

Zum Zwicker-Ton bei unterschiedlichen Konfigurationen der spektralen Lücke

G. KRUMP

Lehrstuhl für Elektroakustik, Technische Universität München

1. Einführung

Nach Abschalten eines Schallreizes mit geeigneter spektraler Lücke wird ein leiser, abklingender Nachton (Zwicker-Ton) hörbar, dessen Tonhöhe sich stets innerhalb der Lücke befindet. Als Erzeugerschalle wurden Linienspektren mit Spektralanteilen zwischen 1 Hz und 16 kHz verwendet. Die im Abstand von 1 Hz angeordneten Linien hatten statistisch gleichverteilte Phasenlagen und besaßen außerhalb der Lücke konstante Amplituden.

Bei den Untersuchungen konnten die Versuchspersonen durch Drehen eines Stufenschalters zwischen drei Positionen wählen: In Stellung 1 wurde der entsprechende Zwicker-Ton-Erzeugerschall dargeboten, den sich die Person einige Sekunden lang anhören sollte. Durch Umschalten auf Position 2 wurde der Anregungsschall abgeschaltet und es sollte der Zwicker-Ton wahrgenommen werden, dessen Tonhöhe und Lautstärke durch Einstellen eines Vergleichssinustones in Schalterstellung 3 ermittelt wurde. Die Schalle wurden monaural über Kopfhörer (Beyer DT 48) mit Freifeldentzerrer nach Zwicker und Feldtkeller [2] dargeboten. An den Experimenten nahmen fünf normalhörende Versuchspersonen im Alter von 27 bis 47 Jahren teil. Aus jeweils vier Einstellungen jeder Versuchsperson wurden Zentralwert und Wahrscheinliche Schwankung berechnet.

2. Einfluß der oberen Lückenbegrenzung

Um die Abhängigkeit der Tonhöhe des Zwicker-Tones von der oberen Lückenbegrenzung zu untersuchen, wurde bei einer spektralen Lücke zwischen 15.4 Bark (2900 Hz) und 18.9 Bark (5300 Hz) die Steigung der oberen Flanke von " ∞ " bis 7.5 dB pro 1000 Hz variiert. Im unteren Teilbild von Fig. 1 ist über der Tonheit der Dichtepegel der Spektrallinien bei den einzelnen Flankensteilheiten (gestrichelt) skizziert. Da bei den Linienspektren von einem linearen Anstieg der oberen Flanke im Frequenzbereich ausgegangen wurde, ergeben sich durch die Transformation in die Tonheitsskala leicht gekrümmte Verläufe. Der Gesamtpegel der Erzeugerschalle war jeweils 40 dB.

Im oberen Teilbild von Fig. 1 sind die Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinlichen Schwankungen der Angaben von fünf Versuchspersonen eingetragen. Die Tonhöhe des Zwicker-Tones, der mit Ausnahme des sehr flachen Anstieges gut wahrnehmbar war, befindet sich ungeachtet der Steigung der oberen Flanke im Mittel 0.8 Bark über der unteren Lückengrenze. Ausgefüllte Symbole wie hier die Rhombe bei sehr steiler oberer Flanke kennzeichnen "Schwebungsstellen" einer Versuchsperson. An diesen Frequenzstellen kann die Person bei Darbietung eines sehr leisen Sinustones (5 dB SL) Schwebungen wahrnehmen. Es handelt sich hierbei vermutlich um übererregte Emissionsstellen, welche die Wahrnehmung des Zwicker-Tones beeinflussen (siehe [1]). Wird diese Stelle durch Spektrallinien des Erzeugerschalles verdeckt, so stimmen die Tonhöhenwahrnehmungen mit denen anderer Versuchspersonen überein.

Im weiteren wurde die Lücke so verändert, daß gemäß Fig. 2 nun die untere Flanke ab 15.4 Bark verhältnismäßig flach mit 15 dB pro 1000 Hz abfällt, um Mithörschwellen in diesem

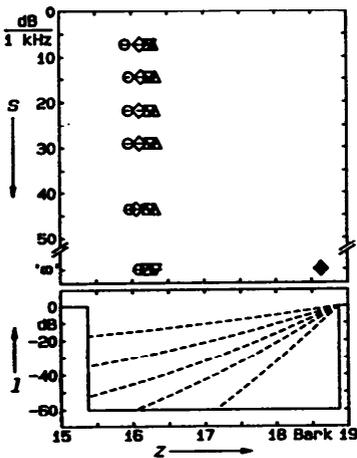


Fig. 1: oben: Tonheit des Nachtoces bei verschiedenen Steigungen s der oberen Flanke.
unten: Dichtepiegel I des Erzeugerschalles.

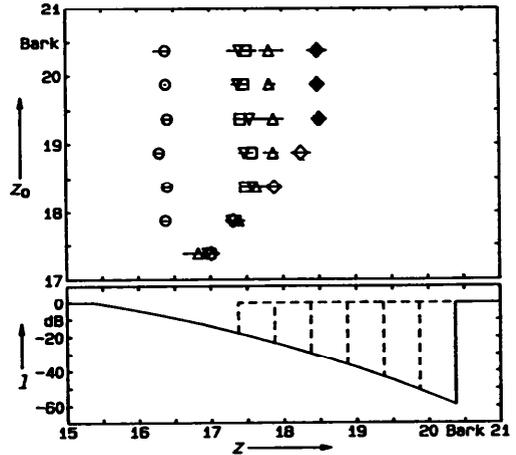


Fig. 2: oben: Tonheit des Nachtoces bei unterschiedlicher oberer Lückengrenze z_0 , Steigung der unteren Flanke: $-15 \text{ dB} / 1000 \text{ Hz}$.
unten: Dichtepiegel I des Erzeugerschalles.

Bereich physikalisch vorzugeben. Die obere Lückenbegrenzung mit sehr steiler Flanke wurde ausgehend von 20.4 Bark in Schritten von 0.5 Bark (gestrichelt) zu tieferen Tonheiten hin verschoben.

Bei breiten Lücken mit oberen Grenzen zwischen 20.4 und 19.4 Bark streuen die Tonhöhenwahrnehmungen der Versuchspersonen untereinander zwar sehr stark, es ist jedoch noch kein Einfluß der oberen Flanke zu erkennen. Hörschwellenmessungen haben ergeben, daß die Versuchsperson, deren Angaben mit einem Kreis gekennzeichnet sind, zwischen 15.5 und 17.5 Bark eine um etwa 15 dB erhöhte Ruhehörschwelle (Maximum bei 16.5 Bark) besitzt und den Nachtoc deshalb bei flach abfallender unterer Flanke stets wesentlich tiefer wahrnimmt als die anderen Personen. Demgegenüber weist die Versuchsperson, deren Zentralwerte mit einem Dreieck symbolisiert sind, im entsprechenden Tonheitsbereich eine sehr tiefe Ruhehörschwelle auf und hört dadurch den Zwicker-Ton mit etwas höherer Tonhöhe, weil sie mehr Spektralanteile innerhalb der Lücke wahrnehmen kann.

Ab 18.9 Bark beginnt sich mit weiterer Verschiebung ein Einfluß der oberen Flanke abzuzeichnen: Die Tonhöhe des Nachtoces wandert zu tieferen Tonheiten und die interindividuellen Streuungen werden geringer, da vermutlich die individuelle Ruhehörschwelle an Bedeutung verliert; eine Versuchsperson (Symbol: Rhombe) "löst" sich von ihrer "Schwebungsstelle" und stimmt schließlich mit den Tonhöhenwahrnehmungen der anderen Personen überein.

Bei einer oberen Grenze von 17.4 Bark weist die Lücke nur noch eine Tiefe von 17.5 dB auf, der Zwicker-Ton wird verhältnismäßig schlecht gehört. Genauere Experimente, bei denen die Tiefe einer Lücke mit steilen Flanken durch Auffüllen mit Spektrallinien variiert wurde, haben eine minimale Lückentiefe von 15 dB ergeben, um den Zwicker-Ton gerade noch wahrzunehmen.

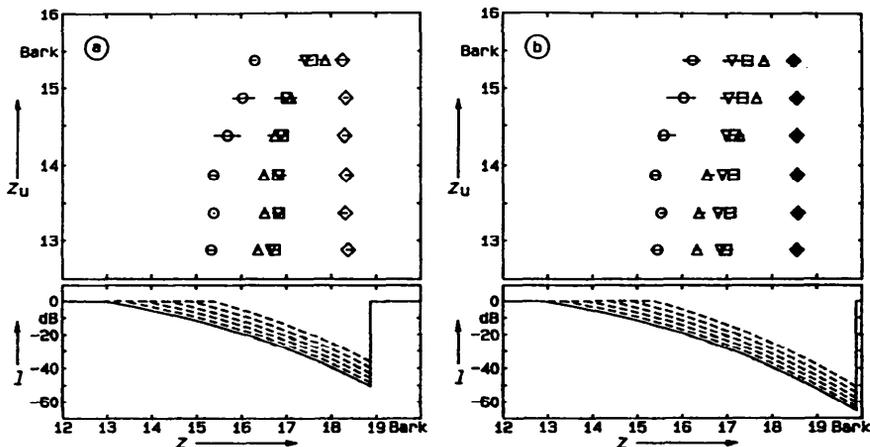


Fig. 3: oben: Tonheit des Nachtones in Abhängigkeit von der unteren Lückengrenze z_u , obere Grenze bei 18.9 Bark (a) bzw. 19.9 Bark (b). unten: Dichtepiegel I des Erzeugerschalles.

3. Einfluß der unteren Lückengrenze

Bei nachfolgender Untersuchung wurde von 12.9 Bark ausgehend die untere Grenze in Schritten von 0.5 Bark erhöht, bis die vom vorigen Versuch bereits bekannten Lückenkfigurationen mit einer sehr steilen oberen Lückengrenzung bei 18.9 Bark (Fig. 3a) bzw. 19.9 Bark (Fig. 3b) erreicht wurden. Die Steigungen der unteren Flanken betragen jeweils wieder -15 dB pro 1000 Hz, die Linienspektren wurden mit 40 dB Gesamtpegel dargeboten.

Der Zwicker-Ton, der bei steilen Flanken im allgemeinen 0.8 Bark über der unteren Lückengrenze wahrzunehmen ist, wird nun durch den Verlauf der unteren Flanke bei wesentlich größeren Tonheiten gehört. Obwohl die untere Grenze um bis zu 2.5 Bark verschoben wurde, änderten sich die Tonhöhen nur um zum Teil weniger als ein Bark. In Fig. 3a liegen die mit einer Rhombe gekennzeichneten Angaben sehr nahe an der oberen Lückengrenze und erreichen nach deren Verschiebung auf 19.9 Bark gemäß Fig. 3b eine "Schwebungsstelle". Die Tonhöhenwahrnehmungen der anderen Personen stimmen infolge des geringen Einflusses der oberen Flanke in beiden Abbildungen weitgehend überein.

4. Einfluß der Steigung der unteren Lückengrenzung

Nachdem der Verlauf der unteren Flanke der spektralen Lücke die Tonhöhe des Zwicker-Tones stärker beeinflusst als derjenige der oberen Flanke, wurde im folgenden die Steigung der unteren Lückengrenzung variiert. Fig. 4a zeigt die Ergebnisse für einen Darbietungspegel von 40 dB, in Fig. 4b wurde der Pegel auf 60 dB erhöht.

Im linken Bild liegt bei einer sehr steilen unteren Flanke die Tonhöhe des Nachtones wieder etwa 0.8 Bark über der unteren Grenze und beginnt bereits bei einer Steigung von -45 dB pro 1000 Hz zu höheren Tonheiten zu wandern. Die Flanke ist bei dieser Steigung nach einem Bark zwar bereits um 24 dB abgefallen, aber trotzdem noch etwas flacher als die Steigung der

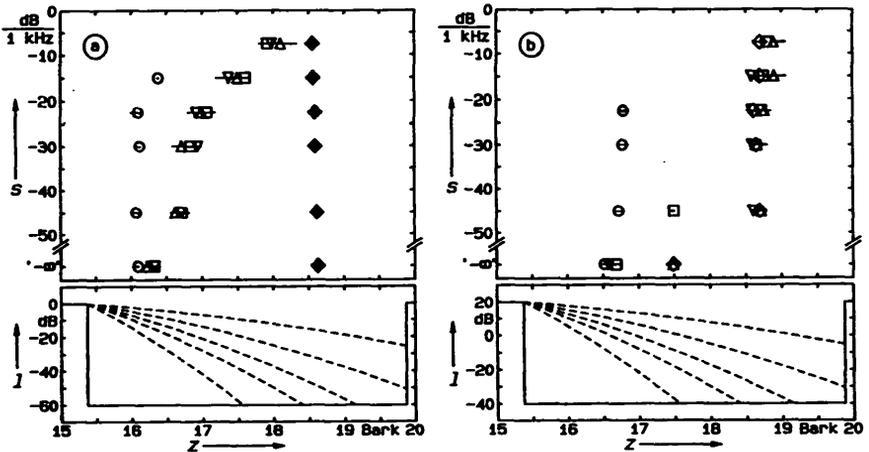


Fig. 4: oben: Tonheit des Nachttones bei verschiedenen Steigungen s der unteren Lückenbegrenzung, Darbietungspegel 40 dB (a) bzw. 60 dB (b). unten: Dichtepegel l des Erzeugerschalles.

Mithörschwelle (27 dB/Bark). Die durch Kreise markierten Angaben einer Versuchsperson bleiben zunächst auf Grund der erhöhten Ruhehörschwelle konstant, erst bei sehr flachem Abfall der unteren Flanke deutet sich ein Anstieg der Tonhöhe an.

Ein höherer Darbietungspegel bewirkt bei steilerer unterer Flanke vermutlich wegen der nicht-linearen Auffächerung der Mithörschwelle ein Ansteigen der Tonhöhe [1]. Mit abnehmender Steigung der unteren Flanke wird der Zwicker-Ton auf fast ein Bark unterhalb der oberen Lückenbegrenzung gedrängt, die interindividuellen Streuungen nehmen geringfügig zu. Der Nachtton ist insgesamt nicht mehr ganz so gut wahrnehmbar wie bei niedrigeren Pegeln.

Anhand der Ergebnisse der hier beschriebenen Untersuchungen deutet sich an, daß der Zwicker-Ton wohl eng mit den Frequenzgruppenpegeln des Erzeugerschalles sowie der Ruhehörschwelle der Versuchspersonen verknüpft ist. Der Einfluß der individuellen Ruhehörschwelle könnte ein Hinweis dafür sein, daß bei der Schallverarbeitung im Gehör der Zwicker-Ton erst nach der Bildung der Ruhehörschwelle entsteht.

Der Autor dankt allen Versuchspersonen für die bereitwillige Teilnahme an den Experimenten, insbesondere Herrn PD Dr.-Ing. H. Fastl für zahlreiche Anregungen und Hinweise. Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB 204 Gehör München gefördert.

Literatur

- [1] Krump G., *Zum akustischen Nachtton bei Linienspektren*. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '90, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 767-770 (1990).
- [2] Zwicker E. und Feldtkeller R., *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*. Hirzel-Verlag Stuttgart (1967).