

## Zum akustischen Nachton bei Linienspektren

**G. KRUMP**

(Lehrstuhl für Elektroakustik der TU München)

### 1. Einführung

Bei Darbietung eines Schallreizes mit spektraler Lücke wird nach dem Abschalten ein leiser, abklingender Ton hörbar, dessen Tonhöhe sich stets innerhalb der Lücke befindet. Die Wahrnehmungsdauer dieses akustischen Nachtones, der in der Literatur nach seinem Entdecker vielfach auch als Zwicker-Ton bezeichnet wird, beträgt etwa eine bis fünf Sekunden; der Pegel eines gleichlauten Sinustones liegt im Mittel 10 dB über der Ruhehörschwelle.

Als Zwicker-Ton-Erzeugerschalle (ZTE) werden rechnergenerierte Linienspektren konstanter Amplitude mit zufällig verteilten Phasenlagen benützt, deren Spektrallinien sich von 1 Hz bis 16 kHz erstrecken. Diese bieten den Vorteil, durch Weglassen einzelner Linien beliebig breite Lücken mit sehr steilen Flanken an verschiedenen Frequenzstellen erzeugen zu können.

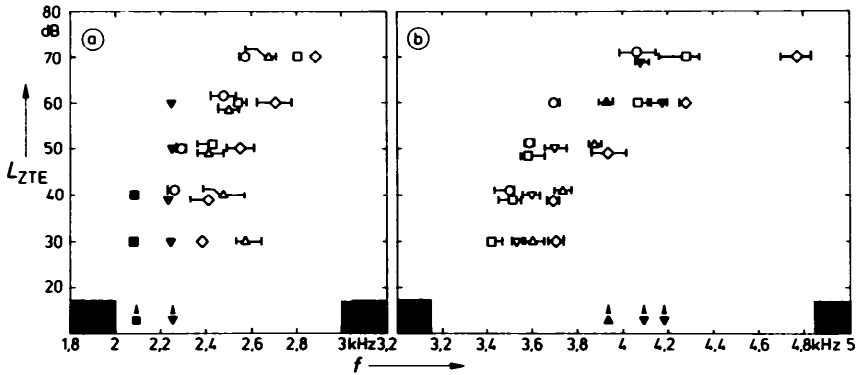
### 2. Verbreitung des Phänomens

An 100 Versuchspersonen (davon 14 weibliche) im Alter zwischen 15 und 47 Jahren wurden Untersuchungen über die Wahrnehmbarkeit des Nachtones angestellt. Den Personen wurde ein Linienspektrum mit einer spektralen Lücke zwischen 2 und 3 kHz mit 40 dB Gesamtpegel über Kopfhörer (Beyer DT 48) mit Freifeldentzerrer nach Zwicker und Feldtkeller [3] meist am rechten Ohr dargeboten. Nach 10 Sekunden Anregung sollten sie einen Schalter betätigen, mit dem der Erzeugerschall abgeschaltet wurde, und angeben, was nach dem Umschalten wahrzunehmen sei. Diesen Vorgang konnten die Personen öfter wiederholen, bis sie sich ihrer Aussage sicher waren. Die Personen waren zunächst nicht darüber informiert, was eventuell nach dem Abschalten des Anregungsschalles wahrgenommen werden konnte.

83 Personen hörten den Nachton auf Anhieb. Nach einer ersten Hilfestellung, daß nämlich unter Umständen eine leise Wahrnehmung vorhanden sei, hörten weitere 7 Personen den Zwicker-Ton. Eine zweite Hilfe, daß diese Wahrnehmung nur kurz andauere, hatte lediglich bei einer Versuchsperson Erfolg. Ein letzter Hinweis auf ein leises Pfeifen nach dem Abschalten führte bei weiteren 3 Personen zur Wahrnehmung des Nachtones. Nur 6 Personen konnten den Nachton bei diesem Erzeugerschall nicht hören. Ein Einfluß von Alter oder Geschlecht der Person wurde nicht festgestellt, jedoch kam es des öfteren vor, daß ein Proband am rechten Ohr den Nachton nicht hören konnte, am linken Ohr dagegen wahrnahm und umgekehrt.

### 3. Abhängigkeit der Tonhöhe des Nachtones vom Pegel

Für die nachfolgende Untersuchung wurden Linienspektren mit Lückenbreiten von 1000 und 1700 Hz bei arithmetischen Mittenfrequenzen von 2,5 bzw. 4 kHz verwendet. Der Spektrallinienabstand betrug 1 Hz. Die Tonhöhe des Nachtones wurde bei einem Gesamtpegel des Zwicker-Ton-Erzeugerschalles von 30, 40, 50, 60 und 70 dB durch Einstellen eines Vergleichssinustones ermittelt.



**Fig.1:** Tonhöhe des Nachttones bei verschiedenen Pegeln des Zwicker-Ton-Erzeugerschalles mit Lücken zwischen 2 und 3 kHz (a) bzw. 3,15 und 4,85 kHz (b).

Die Fig. 1a und 1b zeigen aus jeweils vier Frequenzeinstellungen berechnete Zentralwerte und Wahrscheinliche Schwankungen für fünf Versuchspersonen (verschiedene Symbole). Über der Abszisse ist schematisch das verwendete Linienspektrum mit Lücke skizziert. Die ausgefüllten Symbole mit Pfeil kennzeichnen Frequenzstellen, an denen die entsprechende Versuchsperson in einer separaten Untersuchung bei Darbietung eines in der Frequenz durchstimmbaren, einzelnen Sinustones mit einem Pegel zwischen 1 bis 6 dB über der Ruhehörschwelle eine Art Schwebung wahrnehmen kann, wie sie bei zwei spektral eng benachbarten Sinustönen entsteht. Diese "Schwebungsstellen", an denen auch spontane otoakustische Emissionen gemessen werden können, werden meist sehr genau eingestellt, da bei geringer Verstimmung zu tiefen oder hohen Frequenzen hin bereits Amplitudenschwankungen des Sinustones erkannt werden. Nachtöne an diesen Frequenzstellen werden zum Teil über eine halbe Minute lang gehört. Möglicherweise handelt es sich dabei um übererregte spontane otoakustische Emissionen, da nach Abschalten eines Rauschens ohne spektrale Lücke die ausgeprägteste "Schwebungsstelle" einer Versuchsperson als Ton wahrgenommen wird. Deshalb werden Nachtöne an diesen Frequenzstellen jeweils mit ausgefüllten Symbolen markiert. Sie sind sehr deutlich wahrzunehmen und besitzen meist geringe Wahrscheinliche Schwankungen.

Die Versuchspersonen konnten bei jeder Einstellung ein Qualitätsurteil über den Zwicker-Ton abgeben, welches sich auf Dauer, Lautheit und Deutlichkeit bezog. Danach ist der Nachtton - im Einklang mit Literaturdaten [2] - bei einem Gesamtpegel des Erzeugerschalles von 40 bis 50 dB am besten wahrzunehmen. Die Tonhöhe des Nachtones nimmt bei beiden Lückenbreiten mit steigendem Darbietungspegel in den meisten Fällen zu. Die breitere Lücke in Fig. 1b zeigt einen deutlichen Anstieg der Vergleichsfrequenz bei höheren Pegeln, was einen Zusammenhang mit der nichtlinearen Auffächerung der Mithörschwelle vermuten läßt. Messungen der Mithörschwelle mit pendelndem Einregeln belegen, daß die Tonhöhe des Nachtones meist beim Minimum der Mithörschwelle zu finden ist, wie dies Zwicker schon festgestellt hat [1].

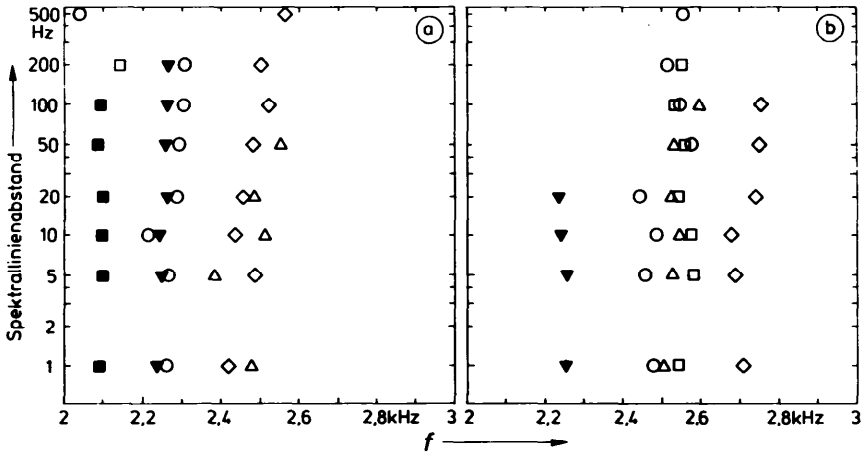


Fig.2: Tonhöhe des Nachttones bei verschiedenen Spektralliniienabständen. Der Pegel des Zwicker-Ton-Erzeugerschalles beträgt 40 dB (a) bzw. 60 dB (b).

**4. Abhängigkeit des Nachttones vom Spektralliniienabstand**

Bei dem harmonischen Linienspektrum mit spektraler Lücke zwischen 2 und 3 kHz wurden zusätzlich die Abstände der Linien variiert. Der Darbietungspegel betrug jeweils 30, 40, 50, 60 und 70 dB. Die Symbole von Fig. 2a und 2b zeigen exemplarisch die Zentralwerte der eingestellten Frequenzen des Vergleichstones bei 40 bzw. 60 dB in Abhängigkeit vom Spektralliniienabstand.

Außer einem sehr geringfügigen Ansteigen der Tonhöhe zu größeren Linienabständen hin ist kein systematischer Einfluß der Spektralliniienabstände erkennbar. Bei Abständen über 100 Hz ist der Zwicker-Ton nur noch sehr schlecht wahrnehmbar. Ein Vergleich beider Abbildungen zeigt, daß die bereits in Fig. 1 festgestellte Pegelabhängigkeit auch bei größeren Linienabständen erhalten bleibt.

**5. Abhängigkeit des Nachttones von der Lückenbreite**

In dieser Untersuchung wurde von der Frequenzskale in die Tonheitsskale übergegangen und die Lückenbreite zwischen 1 und 8,5 Bark verändert. Alle Linienspektren wurden mit 40 dB Gesamtpegel dargeboten, der Abstand der Linien betrug 1 Hz. Die Symbole von Fig. 3a und 3b geben die Zentralwerte der eingestellten Frequenzen des Vergleichstones für fünf Versuchspersonen bei arithmetischen Lückenmitten von 14,4 und 17,1 Bark an. Die in den vorangegangenen Versuchen verwendeten Linienspektren finden sich bei einer Lückenbreite von 2,5 Bark wieder.

Die Tonhöhe des Nachttones liegt in beiden Bildern bei kleinen Lückenbreiten etwa in der Mitte der Lücke und wandert mit zunehmender Lückenbreite zu deren unterer Grenze. In Fig. 3b können die Tonhöhen ab einer Lücke von 3 Bark sehr gut durch Geraden angenähert werden, welche je nach Versuchsperson einen Abstand von 0,75 bis 1 Bark von der unteren Lückenbegrenzung aufweisen (siehe [2]).

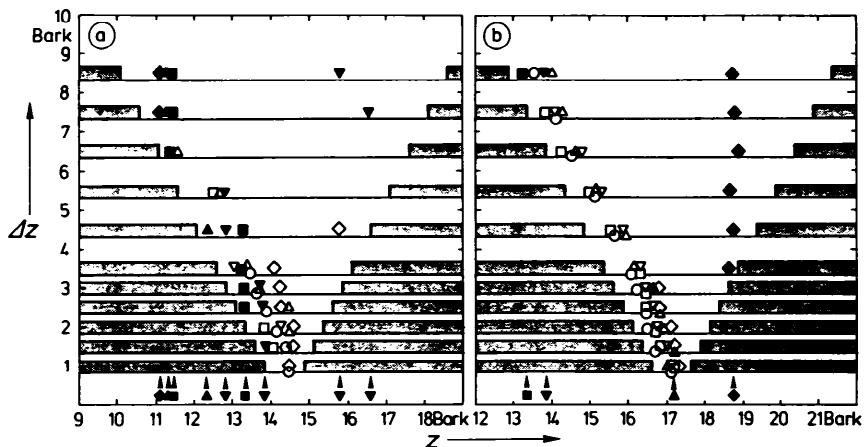


Fig. 3: Tonhöhe des Nachtones bei unterschiedlichen Lückenbreiten. Lückenmitte bei 14,4 Bark (a) bzw. 17,1 Bark (b).

Dieser Verlauf wird in Fig. 3a nur bei einer Versuchsperson (Symbol: Kreis) gefunden, welche keine meßbaren spontanen otoakustischen Emissionen besitzt. Für alle anderen Personen wirken sich die "Schwebungsstellen" stark aus. Ihr Einfluß auf den Nachton läßt sich wie folgt beschreiben: Befindet sich der Zwicker-Ton nahe einer "Schwebungsstelle", so wird der Vergleichston auf diese Frequenz eingestellt. Dies ist auch der Fall, wenn der unbeeinflusste Nachton wie beispielsweise bei großen Lückenbreiten oder hohen Darbietungspegeln sehr schlecht wahrzunehmen wäre und innerhalb der Lücke eine ausgeprägte "Schwebungsstelle" zu finden ist. Die Angaben einer Versuchsperson (Symbol: Rhomben) in Fig. 3b machen deutlich, daß eine "Schwebungsstelle" erst dann an Einfluß gewinnt, wenn sie innerhalb der Frequenzlücke liegt.

Der Autor dankt allen Versuchspersonen für die geduldige Teilnahme an den Experimenten. Diese Arbeit wurde von der deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB 204 Gehör München gefördert.

#### Literatur

- [1] Zwicker E., J. Acoust. Soc. Amer., vol. 36 (1964) p. 2413-2415, "Negative afterimage" in hearing
- [2] Fastl H., Acustica, vol. 67 (1989) p. 177-186, Zum Zwicker-Ton bei Linienspektren mit spektralen Lücken
- [3] Zwicker E. und Feldtkeller R., Hirzel-Verlag Stuttgart (1967), Das Ohr als Nachrichtenempfänger