

Zum Zwicker-Ton bei binauraler 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 bis zu 10 Sekunden lang ein leiser, abklingender Nachton (Zwicker-Ton) wahrgenommen werden [5,6,8]. Der Pegel eines gleichlauten Sinustones beträgt etwa 10-15 dB SL. In dieser Untersuchung wird ermittelt, ob es sich beim Zwicker-Ton um ein monaurales oder ein binaurales Phänomen handelt. Deshalb wurden zunächst drei Experimente durchgeführt, bei denen in Anlehnung an bereits bekannte Versuchsergebnisse mit monauraler Anregung die Erzeugerschalle in zwei separate Spektralanteile aufgeteilt wurden. Diese wurden den Personen nun binaural dargeboten, um zu sehen, ob das Gehör beide Signale gemeinsam auswertet und daher ein zur monauralen Anregung gleichwertiger Nachton entsteht. Im weiteren soll festgestellt werden, ob sich zwei verschiedene Nachttöne an den beiden Ohren gegenseitig beeinflussen bzw. ob zwei vergleichbare Zwicker-Töne in der Mitte des Kopfes lokalisiert werden, so daß eine binaurale Fusion stattfindet.

Als Anregung wurden rechnergenerierte Linienspektren mit zufällig verteilten Phasen und, wenn nicht anders erwähnt, mit einem Spektrallinienabstand von 1 Hz und einer Bandbreite von 1 Hz bis 16 kHz verwendet. Die Zwicker-Ton-Erzeugerschalle wurden den sechs normalhörenden Versuchspersonen im Alter von 26 bis 47 Jahren in einer Meßkabinen über Kopfhörer (Beyer DT 48) und Freifeldentzerrer [9] statistisch verteilt jeweils viermal binaural dargeboten. Mit einem Stufenschalter konnte die Person die Anregung beliebig ein- und ausschalten. In einer dritten Schalterstellung sollte sie einen Vergleichsinuston in Frequenz und Pegel dem wahrgenommenen Zwicker-Ton angleichen. Der Zentralwert dieser vier Frequenzeinstellungen wurde in die Tonheit umgerechnet [9] und ist in den Abbildungen für jede Versuchsperson durch ein Symbol dargestellt. Zusätzlich stuften die Probanden die Qualität des Zwicker-Tones, welche sich hauptsächlich aus Dauer, Lautheit und Ausgeprägtheit der Tonhöhe des Nachtones zusammensetzt, in eine der sechs Kategorien nach Tab. 1 ein. Aus den Qualitätsbeurteilungen aller Personen wurde für jeden Anregungsschall der Zentralwert ermittelt. Im Laufe der Untersuchungen zu dieser Arbeit zeigte es sich, daß der Nachton an einem Ohr der Versuchsperson in sehr vielen Fällen besser wahrgenommen wurde als am anderen Ohr. Dabei konnte keine Tendenz zum rechten oder linken Ohr beobachtet werden. Von zwölf Probanden hörten sechs Personen den Zwicker-Ton am rechten Ohr und sechs am linken Ohr besser. Das bevorzugte Ohr wird bei den nachfolgenden Versuchen stets als Ohr 1 bezeichnet.

2. Dichotische Anregung mit separaten Spektralanteilen

In der ersten Versuchsreihe wurde den Personen an dem Ohr, an welchem der Nachton jeweils am besten gehört wurde, ein Tiefpaß-Linienspektrum dargeboten, das ab 15,4 Bark mit 15 dB/kHz abfällt. Das andere Ohr wurde gleichzeitig mit einem Hochpaß-Linienspektrum (HPL) beschallt, dessen untere Grenze z_{HP} gemäß Fig. 1 verändert wurde. Der Pegel L_i der einzelnen Spektrallinien lag bei etwa 0 dB. Die Versuchsergebnisse bei Addition beider Spektralanteile und monauraler Darbietung sind unter [2] zu finden. Obwohl die untere Grenze des Hochpaß-Linienspektrums mit 13,4 und 15,4 Bark so festgelegt wurde, daß bei einer Addition der Anregungen der beiden Ohren keine spektrale Lücke mehr vorhanden wäre, geben die Versuchspersonen einen Zwicker-Ton an. Ebenso wird im Gegensatz zur monauralen Anregung [2,4] weder Tonhöhe noch Qualität durch eine Erhöhung der unteren Grenze des Hochpaß-Linienspektrums verändert und entspricht stets derjenigen bei monauraler Anre-

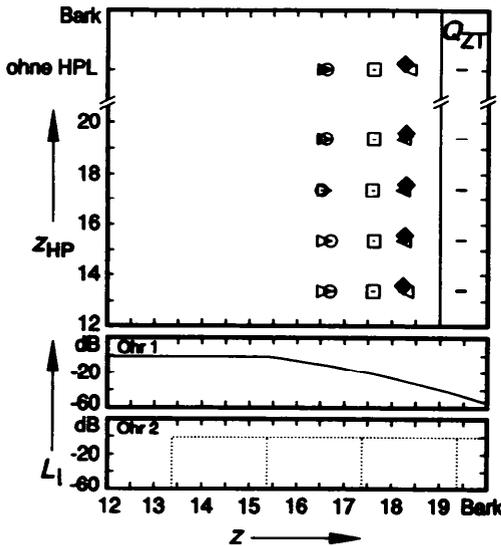


Fig. 1: oben: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei Variation der unteren Grenze z_{HP} des Hochpaß-Linienspektrums bzw. ohne Hochpaß-Linienspektrum. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Ausgefülltes Symbol: Einfluß einer spontanen Emission [1,2]. Mitte: Pegel L_1 der einzelnen Spektrallinien eines Tiefpaß-Linienspektrums mit einer Steigung der unteren Flanke von -15 dB/kHz ab $15,4$ Bark am Ohr 1. unten: Pegel L_1 von Hochpaß-Linienspektren mit unterschiedlicher unterer Grenze z_{HP} .

gung mit dem Tiefpaß-Linienspektrum ohne Hochpaßanteil. Der Zwicker-Ton wurde eindeutig jeweils dem Ohr 1 zugeordnet. Es ist somit kein Einfluß des Hochpaß-Linienspektrums am anderen Ohr zu erkennen. Diese Aussage bestätigt die Ergebnisse von Lummis und Guttman, welche ebenfalls keine Beeinträchtigung des Zwicker-Tones durch Hochpaßrauschen im anderen Ohr erkennen konnten [7].

In einem zweiten Experiment wurde die Abhängigkeit der Qualität des Zwicker-Tones vom Spektrallinienabstand des Erzeugerschalles ausgenutzt. Der Nachton wird bei Linienspektren mit einem Linienabstand von 500 Hz nicht mehr wahrgenommen, während er bei einem Abstand von 250 Hz zumindest „schlecht“ oder sogar „mittel“ gehört wird [1,3,6]. Deshalb wurden zwei Linienspektren mit 500 Hz Spektrallinienabstand generiert, wobei jedoch die Harmonischen des einen um 250 Hz gegenüber denen des anderen versetzt waren, so daß bei Addition beider Spektren ein Linienabstand von 250 Hz entstehen würde. Diese Erzeugerschalle mit einer spektralen Lücke zwischen 3 und 5 kHz wurden den Versuchspersonen jeweils monaural und binaural (dichotisch) mit einem Pegel von 40 dB dargeboten. Es konnte allerdings keine Verbesserung der Qualitätsangaben bei beidohriger Darbietung festgestellt werden. Auch ein Vertauschen der Kopfhörersysteme und damit der Erzeugerschalle brachte keine Qualitätsverbesserung.

Bei einem dritten Versuch wurde den Personen am Ohr 1 ein Linienspektrum mit einer Lücke zwischen 15,4 (2900 Hz) und 18,9 Bark (5300 Hz) dargeboten, während das andere Ohr mit einem Sinuston bei 16 Bark (3200 Hz) mit unterschiedlichen Pegeln L_{ST} beschallt wurde. Der Darbietungspegel des Linienspektrums betrug 40 dB. Die Versuchsergebnisse in Fig. 2 verdeutlichen, daß der Zwicker-Ton unabhängig vom Zusatzton im anderen Ohr „gut“ wahrgenommen wird. Die Tonhöhe deckt sich sehr gut mit den Angaben der Versuchspersonen bei monauraler Anregung ohne Zusatzton (siehe [1]), obwohl bei monauraler Darbietung von Linienspektrum und Sinuston die Tonhöhe des Nachtones vom Zusatzton eindeutig verschoben wird [6]. In den drei sehr unterschiedlichen Experimenten konnte daher kein Hinweis dafür gefunden werden, daß Signale an beiden Ohren gemeinsam zur Bildung eines Nachtones beitragen. Es werden somit die Aussagen von Zwicker bestätigt, der vermutete, daß es sich beim akustischen Nachton um ein monaurales Phänomen handelt [8].

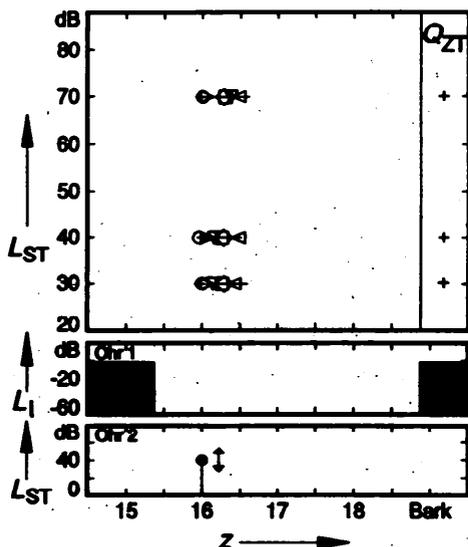


Fig. 2: oben: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei verschiedenen Pegeln L_{ST} des Sinustones. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Mitte: Pegel L_1 der einzelnen Spektrallinien eines Linienspektrums mit spektraler Lücke zwischen 15,4 und 18,9 Bark am Ohr 1. unten: Pegel L_{ST} eines Sinustones bei 16 Bark am Ohr 2.

Symbol	Der Nachton wurde
++	sehr gut
+	gut
o	mittel
-	schlecht
--	sehr schlecht
x	nicht
	wahrgenommen.

Tab. 1: Symbolzuordnung zur Qualität des Nachtones.

3. Gegenseitige Beeinflussung und Lokalisation zweier Nachtöne

Fig. 3 zeigt die Ergebnisse einer letzten Versuchsreihe, bei der drei Erzeugerschalle (A, B und C) mit unterschiedlichen spektralen Lücken von jeweils 2,5 Bark Breite zunächst monaural beiden Ohren getrennt mit 40 dB dargeboten wurden (ZTE: A0, B0, C0, 0A, 0B, 0C). Trotz gleicher Anregung wird - wie bereits erwähnt - der Nachton am Ohr 1 um eine Kategorie besser beurteilt, während die zugehörige Tonhöhe des Zwicker-Tones weitgehend identisch ist.

Wird nun Ohr 1 mit dem Erzeugerschall B beschallt und dem anderen Ohr nacheinander eines der drei anderen Linienspektren dargeboten (ZTE: BA, BB, BC), so hören viele Versuchspersonen an beiden Ohren einen Nachton. Es setzt sich aber qualitativ im wesentlichen der Zwicker-Ton im Ohr 1 durch. Der Nachton im anderen Ohr ist um eine Kategorie schlechter als bei einohriger Darbietung oder gar nicht mehr wahrnehmbar. Die Tonheitsangaben differieren nur wenig gegenüber denen der monauralen Anregung. Bei Umkehrung der Zuordnungen wird Ohr 2 mit dem Erzeugerschall B angeregt, während dem Ohr 1 jeweils eines der drei Linienspektren dargeboten wird (ZTE: AB, BB, CB). Wiederum werden die Nachtöne im Ohr 1 genauso gut wahrgenommen wie bei monauraler Darbietung. Im Ohr 2 hingegen ist die Qualität des Zwicker-Tones um eine Kategorie schlechter als bei einohriger Anregung. Eine grundsätzliche Änderung der Tonhöhe ist nicht erkennbar.

Monaurale Versuche mit Erzeugerschallen mit zwei bzw. drei spektralen Lücken zeigen, daß in diesem Fall auch mehrere Nachtöne unterschiedlicher Qualität entstehen. Meist dominiert dabei einer der Zwicker-Töne. Eine reproduzierbare Virtuelle Tonhöhe gleichzeitig auftretender Nachtöne konnte nicht festgestellt werden.

Es kann somit abschließend festgehalten werden, daß es bei den meisten Personen ein bevorzugtes Ohr gibt, bei dem der Nachton etwas besser wahrzunehmen ist als beim anderen. Dieser Effekt wird bei binauraler Anregung sogar noch verstärkt, indem sich der Nachton am Ohr 2 verschlechtert. Dies kann möglicherweise auch darauf zurückzuführen sein, daß das Auftreten von zwei Nachtönen an beiden Ohren und das Einstellen eines entsprechenden Vergleichssinustones hohe Anforderungen an die Konzentrationsfähigkeit der Versuchsperson stellt und deshalb ein etwas schlechterer Zwicker-Ton

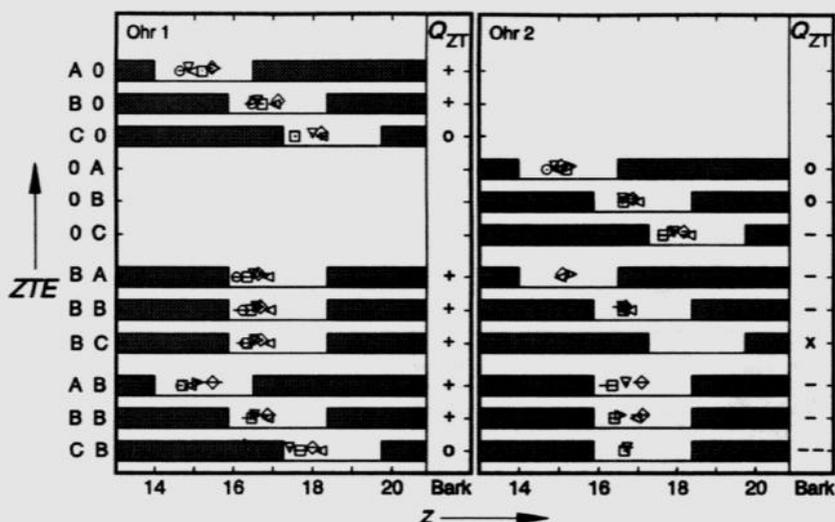


Fig. 3: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlichen Zwicker-Ton-Erzeugerschallen (ZTE) an den beiden Ohren. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Darbietungspegel: 40 dB. Spektrale Lücke: A: 14 bis 16,5 Bark; B: 15,9 bis 18,4 Bark; C: 17,3 bis 19,8 Bark.

übermäßig niedrig eingestuft wird. Der Nachton konnte im allgemeinen stets dem Ohr zugeordnet werden, welches mit dem zugehörigen Erzeugerschall angeregt wurde. Lediglich bei Zwicker-Tönen von etwa gleicher Qualität und sehr ähnlicher Tonhöhe gaben einzelne Versuchspersonen manchmal an, einen Nachton in der Mitte des Kopfes wahrzunehmen, was auch von Lummis und Guttman beschrieben wird [7]. Nur unter diesen beiden Voraussetzungen könnte eine binaurale Fusion zweier Nachttöne stattfinden. Eine gemeinsame, sich ergänzende Auswertung der Anregung hingegen konnte bei dichotisch dargebotenen Erzeugerschallen mit verschiedenen Spektren nicht beobachtet werden.

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

Literatur

- [1] Krump G., Zum akustischen Nachton bei Linienspektren. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'90, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 767-770 (1990).
- [2] Krump G., Zum Zwicker-Ton bei unterschiedlichen Konfigurationen der spektralen Lücke. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'91, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 513-516 (1991).
- [3] Krump G., Zum Zwicker-Ton bei Linienspektren unterschiedlicher Phasenlagen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'92, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 825-828 (1992).
- [4] Krump G., Zum Zwicker-Ton bei unterschiedlicher Bandbreite der Anregung. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'93, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 808-811 (1993).
- [5] Krump G., Zum Zwicker-Ton bei Linienspektren mit spektraler Überhöhung. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'94, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef (1994).
- [6] Krump G., Beschreibung des akustischen Nachtones mit Hilfe von Mithörschwellenmustern. Dissertation an der TU München (1993).
- [7] Lummis R. C. und Guttman N., Exploratory Studies of Zwicker's "Negative Afterimage" in Hearing. J. Acoust. Soc. Amer. 51, 1930-1944 (1972).
- [8] Zwicker E., "Negative Afterimage" in Hearing. J. Acoust. Soc. Amer. 36, 2413-2415 (1964).
- [9] Zwicker E. und Fastl H., Psychoacoustics - Facts and Models. Springer-Verlag, Heidelberg (1990).