

Zum Zwicker-Ton bei Linienspektren mit spektraler Überhöhung

G. KRUMP*

Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München

* jetzt: NOKIA Audio Electronics, Straubing

1. Einführung

Nach dem Abschalten eines etwa 10 Sekunden andauernden Schallreizes mit spektraler Lücke kann ein leiser, abklingender Nachton (Zwicker-Ton) wahrgenommen werden, dessen Vergleichsfrequenz sich stets innerhalb dieser Lücke befindet [5]. Ebenso kann ein tiefpaß- oder bandpaßbegrenztes Schallsignal einen Zwicker-Ton oberhalb der oberen Grenzfrequenz hervorrufen, während ein Hochpaß-Signal für sich keinen Nachton erzeugt [3,4]. In der folgenden Untersuchung wird eine bislang neue Methode zur Erzeugung eines Zwicker-Tones mit Hilfe von Schallreizen mit spektraler Überhöhung vorgestellt. Als Anregung wird ein rechnergeneriertes, harmonisches Grund-Linienspektrum mit Spektrallinien konstanter Amplitude und zufällig verteilter Phase (1 Hz bis 16 kHz) verwendet, dem mittels eines Addierverstärkers ein Sinuston bzw. ein schmalbandiges Linienspektrum überlagert wird. Statt des berechneten Signales kann ebensogut ein thermisches Grundrauschen verwendet werden.

Die Anregungsschalle wurden den sechs normalhörenden Versuchspersonen im Alter von 26 bis 47 Jahren statistisch verteilt jeweils viermal monaural über Kopfhörer (Beyer DT 48) und Freifeldentzerrer [6] in einer Meßkabine dargeboten. Die Probanden konnten mit einem 3-Stufen-Schalter den dargebotenen Zwicker-Ton-Erzeugerschall beliebig ein- bzw. ausschalten. In einer dritten Schalterstellung sollte ein Vergleichssinuston im Pegel und in der Frequenz dem wahrgenommenen Nachton angeglichen werden. Der Zentralwert und die Wahrscheinliche Schwankung der vier Frequenzeinstellungen wurden in die Tonheit umgerechnet und sind für jede Versuchsperson in Form eines Symbols bzw. Balkens dargestellt. Zusätzlich sollte die Person die Qualität des Nachtones mit einer der sechs unterschiedlichen Kategorien gemäß Tab. 1 bewerten. Aus den Qualitätsangaben aller Versuchspersonen wurde für jeden Anregungsschall der Zentralwert ermittelt. Er ist in den nachfolgenden Figuren durch die entsprechenden Symbole dargestellt.

2. Darbietungspegel von Sinuston bzw. Linienspektrum

Um festzustellen, welche Pegelverhältnisse dieses Erzeugerschalles sich günstig auf die Anregung eines Zwicker-Tones auswirken, wurde bei einer Tonheit des Sinustones von 15,6 Bark (3000 Hz) zum einen dessen Pegel variiert, während das Grund-Linienspektrum konstant mit jeweils 40 dB dargeboten wurde, zum anderen umgekehrt bei einem Pegel des Sinustones von 60 dB der Darbietungspegel des Grund-Linienspektrums verändert. In Fig. 1 sind die Angaben der 6 Versuchspersonen für Pegel L_{ST} zwischen 30 und 80 dB aufgetragen. Über der Abszisse ist der entsprechende Zwicker-Ton-Erzeugerschall skizziert. Für die Diskussion der Ergebnisse erweist sich die Berechnung des relevanten Frequenzgruppenpegels als recht brauchbar. Aus einem Gesamtpegel des Grund-Linienspektrums (16000 Spektrallinien) von 40 dB errechnet sich der Pegel einer Spektrallinie L_l zu -2 dB. Daraus resultiert im interessierenden Tonheitsbereich (15,6 Bark) ein Frequenzgruppenpegel ($\Delta f_G = 480$ Hz) von etwa 25 dB. Der Frequenzgruppenpegel des Sinustones entspricht seinem Darbietungspegel.

Ein Pegel L_{ST} von 30 und 40 dB bewirkt zunächst noch keinen Zwicker-Ton, obwohl der Sinuston vom Grund-Linienspektrum nicht vollständig verdeckt wird. Erst ab 50 dB kann ein Nachton „schlecht“ wahrgenommen werden. Die Differenz der Frequenzgruppenpegel von Sinuston und Grund-Linienspektrum, welche notwendig ist, um einen Zwicker-Ton zu erzeugen, beträgt demnach 25 dB. Die minimale Lückentiefe bei Erzeugerschallen mit spektraler Lücke, welche im allgemeinen einen

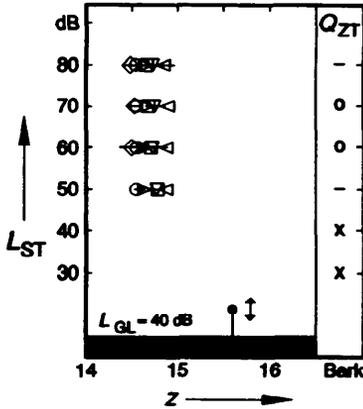


Fig. 1: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlichen Darbietungspegeln L_{ST} des Sinustones. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Tonheit des Sinustones: 15,6 Bark (3000 Hz). Pegel des Grund-Linienspektrums L_{GL} : 40 dB.

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

Tab. 1: Symbolzuordnung zur Qualität des Nachtones.

um eine Kategorie besseren Zwicker-Ton hervorrufen, repräsentiert ebenfalls einen Unterschied der Frequenzgruppenpegel und liegt zum Vergleich um 15 dB. Bei einem Darbietungspegel von 60 und 70 dB wird der Nachton mit Kategorie „mittel“ bei diesen Anregungsschallan am besten gehört. Ab 80 dB verschlechtert sich die Qualität des Zwicker-Tones wieder. Versuche des Autors mit einem Pegel von 90 dB ergaben, daß auch bei dieser sehr lauten Anregung noch ein Zwicker-Ton der Qualität „schlecht“ wahrnehmbar ist. Die Tonhöhe des Zwicker-Tones befindet sich überraschenderweise stets unterhalb der Tonheit des Sinustones und verändert sich mit ansteigendem Pegel L_{ST} kaum, während sie bei Anregungsschallan mit spektraler Lücke immer oberhalb der unteren Grenze der Lücke auftritt und sich mit anwachsendem Darbietungspegel über die gesamte Lückenbreite hinweg zu höheren Tonheiten verschiebt [1,4].

Wird der Pegel L_{ST} des Sinustones konstant auf 60 dB festgelegt und der Gesamtpegel L_{GL} des Grund-Linienspektrums in 10-dB-Schritten von 20 dB auf 70 dB erhöht, so erhält man die in Fig. 2 dargestellten Ergebnisse. Bereits bei einem Pegel von 20 dB kann ein Nachton registriert werden. Seine Qualitätsbeurteilung ist allerdings „sehr schlecht“. Alle Personen außer einer gaben an, das Grund-Linienspektrum, d.h. ein Rauschen, während der Darbietung des Erzeugerschalles gehört zu haben. Diese eine Versuchsperson konnte bei 20 dB auch keinen Nachton feststellen. Bei noch kleineren Pegeln L_{GL} wurde auch von den anderen Personen kein Zwicker-Ton mehr gehört. Ein Sinuston alleine kann also keinen Nachton erzeugen. Die Qualität des Zwicker-Tones ist wie bei den Erzeugerschallan mit spektraler Lücke [1,2,4,6] für Pegel des Grund-Linienspektrums um 40 dB am besten. Ein Pegel von 50 dB bildet die Grenze, ab der schließlich bei weiterer Pegelerhöhung kein Nachton mehr gehört werden kann. Die Differenz der Frequenzgruppenpegel beträgt an dieser Grenze wie bereits bei der vorangegangenen Versuchsreihe 25 dB. Die Tonhöhe des Nachtones ist wiederum nur unterhalb der des Sinustones zu finden und nimmt mit steigendem Darbietungspegel L_{GL} etwas zu.

Beide Pegeluntersuchungen bestätigen somit übereinstimmend, daß ein Zwicker-Ton erst bei einem Unterschied der Frequenzgruppenpegel des Grund-Linienspektrums und des Sinustones von etwa 25 dB entsteht. Eine Pegeldifferenz von 35 bis 45 dB bewirkt die beste Qualitätsbeurteilung des Zwicker-Tones. Ein Gesamtpegel des Grund-Linienspektrums von 40 dB hat sich insgesamt als günstig erwiesen, da bei zu geringem Pegel die Anregung zu nahe an der Ruhehörschwelle liegt, bei zu hohem Pegel der Sinuston bei Einhaltung obiger Bedingungen zu laut wird. Nach Pilotversuchen des Autors können selbst bei sehr lauten Zwicker-Ton-Erzeugerschallan (Grund-Linienspektrum: 60 dB,

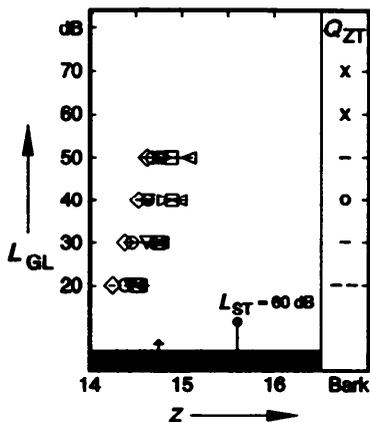


Fig. 2: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei verschiedenen Pegeln L_{GL} des Grund-Linienspektrums. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Pegel des Sinustones: 60 dB. Tonheit des Sinustones: 15,6 Bark (3000 Hz).

Sinuston: 80 bzw. 90 dB) noch Nachttöne der Kategorie „schlecht“ wahrgenommen werden.

Um den Existenzbereich des Nachtones bei diesen Erzeugerschallen ermitteln zu können, wurde einem Grund-Linienspektrum mit 40 dB ein Sinuston mit 60 dB hinzuaddiert, dessen Frequenz in einem Bereich von 300 Hz bis 9 kHz variiert wurde. Bei Frequenzen unter 1 kHz und über 6 kHz wird kein Zwicker-Ton gehört. Zwischen 2,5 und 4,5 kHz kann der Nachton mit Kategorie „mittel“ am besten wahrgenommen werden. Dieses Qualitätsoptimum in einem Frequenzbereich, in dem auch die Ruhehörschwelle am empfindlichsten ist, kann auch bei Anregungsschallen mit spektraler Lücke gefunden werden, wobei hier der Nachton als „gut“ eingestuft wird [1,4].

3. Schmalbandiges Linienspektrum verschiedener Bandbreite

Vergleichbar mit der Breite der spektralen Lücke bei den „klassischen“ Zwicker-Ton-Erzeugerschallen war in dieser Versuchsreihe der Einfluß der Bandbreite eines schmalbandigen Linienspektrums, welches den Sinuston ersetzte, von Interesse. Der Pegel des Grund-Linienspektrums betrug 40 dB, das Schmalband-Linienspektrum wurde jeweils mit einem konstanten Pegel der Frequenzgruppe zwischen 15,6 und 16,6 Bark von 60 dB dargeboten. Bei Bandbreiten kleiner als 1 Bark ist dieser Frequenzgruppenpegel gleich dem Gesamtpegel des Schmalband-Linienspektrums. Die untere Grenze lag stets bei 15,6 Bark (3000 Hz), während die obere Begrenzung der gewählten Bandbreite entsprechend verschoben wurde. Der Erzeugerschall ist in Fig. 3 über der Abszisse angedeutet. Auf der Ordinate ist im logarithmischen Maßstab links die Bandbreite Δf_{SBL} des schmalbandigen Linienspektrums, welche mit der Anzahl der Spektrallinien identisch ist, aufgetragen. Auf der rechten Seite wurde die Bandbreite in die Tonheitsskala umgerechnet. Die Breite des Schmalband-Linienspektrums erstreckt sich ausgehend vom Sinuston in unterschiedlichen Abständen bis 2053 Hz (3 Bark). Zusätzlich wurde noch ein Hochpaß-Linienspektrum ($\Delta f_{HP} = 13$ kHz) in die Untersuchung mitaufgenommen, um festzustellen, ob in Verbindung mit einem Grund-Linienspektrum ein Zwicker-Ton entsteht, nachdem ein hochpaßbegrenztes Linienspektrum alleine keinen Nachton erzeugt [3,4].

Bei kleinen Bandbreiten bis 0,2 Bark (100 Hz) ändert sich weder die Tonhöhe noch die Qualität des Zwicker-Tones, welche wie bei einer Anregung mit einem Sinuston in die Kategorie „mittel“ eingestuft wird. Erst bei größerer Breite des Schmalband-Linienspektrums verschlechtert sich die Qualität bis ab 1 Bark von den meisten Personen schließlich kein Nachton mehr festgestellt werden kann. Ein Eigenversuch des Autors mit unterschiedlichen Darbietungspegeln ($\Delta z_{SBL} = 1$ Bark) brachte keine

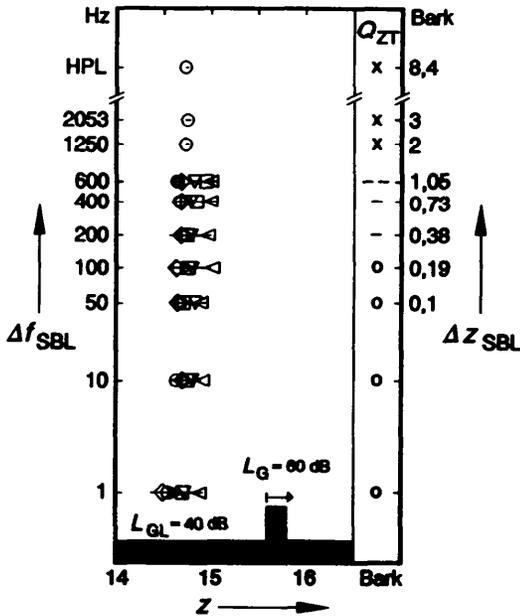


Fig. 3: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlichen Bandbreiten Δf_{SBL} bzw. Δz_{SBL} des Schmalband-Linienspektrums mit einer unteren Grenze von 15,6 Bark. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Frequenzgruppenpegel L_G des Schmalband-Linienspektrums: 60 dB. Pegel L_{GL} des Grund-Linienspektrums: 40 dB.

Qualitätsverbesserung, so daß die gewählten Pegelverhältnisse gemäß den vorangegangenen Untersuchungen bereits ein Optimum darstellen. Nur ein Proband nahm bei 2 und 3 Bark Bandbreite und sogar beim Hochpaß-Linienspektrum noch einen Nachton der Kategorie „schlecht“ wahr. Die eingestellten Vergleichsfrequenzen änderten sich wegen des konstanten Frequenzgruppenpegels kaum. Im Gegensatz zu den Erzeugerschallen mit spektraler Lücke, bei denen erst ab einer minimalen Lückenbreite von etwa 1 Bark ein Zwicker-Ton zu hören ist, darf bei diesen Anregungsschallen die Bandbreite des Schmalband-Linienspektrums über eine Frequenzgruppe nicht hinausgehen [1,4]. Eine sehr schmalbandige Anregung ($\Delta f_{SBL} \leq 100$ Hz) bzw. ein Sinuston erzeugt in Verbindung mit dem Grund-Linienspektrum den besten Nachton. Die Tonhöhe des Zwicker-Tones ist wieder stets unterhalb der unteren Grenze des Schmalband-Linienspektrums zu finden. Es wurde nie ein Vergleichssinuston bei höheren Frequenzen eingestellt.

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] 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 zeitlich gepulsten Erzeugerschallen*. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '92, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 889-892 (1992).
- [3] Krump G., *Zum Zwicker-Ton bei unterschiedlicher Bandbreite der Anregung*. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '93, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 808-811 (1993).
- [4] Krump G., *Beschreibung des akustischen Nachtones mit Hilfe von Mithörschwellenmustern*. Dissertation an der TU München (1993).
- [5] Zwicker E., "Negative Afterimage" in Hearing. J. Acoust. Soc. Amer. 36, 2413-2415 (1964).
- [6] Zwicker E. und Fastl H., *Psychoacoustics - Facts and Models*. Springer-Verlag, Heidelberg (1990).