

**BEITRÄGE
ZUR
VIBRO- UND PSYCHOAKUSTIK**

Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl

Gerhard Krump

DER AKUSTISCHE NACHTON
Beschreibung und Funktionsschema

DER AKUSTISCHE NACHTON
Beschreibung und Funktionsschema

von

Gerhard Krump

Rosengasse 19
94374 Schwarzach
Deutschland

Heft 3/00 der Reihe

Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik

Herausgeber: Helmut Fleischer und Hugo Fastl

ISSN 1430-936X

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Fleischer
Institut für Mechanik
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Universität der Bundeswehr München

Prof. Dr.-Ing. habil. Hugo Fastl
Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Technische Universität München

Postanschrift:

LRT 4 UniBwM
85577 Neubiberg
Deutschland

Krump, Gerhard:
Der akustische Nachton
Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 3/00
Neubiberg 2000
ISSN 1430-936X

Postanschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. Gerhard Krump
Rosengasse 19
94374 Schwarzach
Deutschland

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar. Insbesondere gilt dies für die Übersetzung, den Nachdruck sowie die Speicherung auf Mikrofilm, mit vergleichbaren Verfahren oder in Datenverarbeitungsanlagen.

Im Gedenken an meinen verehrten Lehrer

Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Zwicker

(15.1.1924 - 22.11.1990)

Der akustische Nachton

Beschreibung und Funktionsschema

ZUSAMMENFASSUNG

Nach dem Abschalten eines Schallreizes mit einer spektralen Lücke von mehr als 1 Bark Breite kann für 2 bis 6 Sekunden ein leiser, abklingender Sinuston wahrgenommen werden, dessen Tonhöhe sich stets innerhalb der Lücke befindet. Es wird gezeigt, daß auch eine breitbandige Anregung mit einer spektralen Überhöhung von weniger als 1 Bark Breite dieses monaurale Phänomen hervorrufen kann, wobei dessen äquivalente Frequenz immer unterhalb der schmalbandigen Anhebung des Dichtepegels zu finden ist. Der von 94 % der Versuchspersonen wahrgenomme Nachton tritt in einem Frequenzbereich zwischen 300 Hz und 8 kHz mit einem äquivalenten Pegel von etwa 15 dB über der Ruhhörschwelle auf. Neben grundlegenden Fragestellungen wie objektive Meßbarkeit oder Einfluß von otoakustischen Emissionen wird die Qualität und die Tonhöhe des Nachtones in Abhängigkeit von Pegel und Bandbreite der Anregung, Frequenzbereich, Breite, Tiefe und Flankensteilheit der Lücke sowie Bereich, Bandbreite und Höhe der spektralen Überhöhung umfassend untersucht. Ebenso wird auf die notwendige zeitliche und spektrale Dichte der Anregung eingegangen. Anhand eines aus den Versuchsergebnissen entwickelten Funktionsschemas läßt sich die Tonhöhe des Nachtones basierend auf computersimulierten Mithörschwellenmustern der Anregungen mit einer durchschnittlichen Genauigkeit von 0,3 Bark berechnen. Kontrollversuche bestätigen das Funktionsschema und zeigen, daß mit individuell gemessenen Hörschwellen die Genauigkeit auf 0,15 Bark erhöht werden kann.

The acoustic aftertone

Description and functional scheme

SUMMARY

When sounds with a spectral gap of more than 1 Bark width are switched off, a weak decreasing sinusoidal tone may be audible for two to six seconds with a pitch corresponding to an equivalent frequency within the gap. It is shown, that also a broadband excitation with a spectral enhancement smaller than 1 Bark width can elicit this monaural phenomenon with an equivalent frequency lower than the narrow-band enhancement. The aftertone, which is audible for 94 % of the testpersons, exists in the region from 300 Hz to 8 kHz and has an equivalent sensation level of about 15 dB. In addition to basic questions like objective measurability or the influence of spontaneous otoacoustic emissions the quality and pitch of the aftertone is comprehensively investigated in dependence on level and bandwidth of the excitation, range, width, depth, and slopes of the gap, as well as range, bandwidth, and height of the spectral enhancement. Also the necessary temporal and spectral density of the excitation is described. A functional scheme allows the calculation of the pitch with an accuracy of 0.3 Bark using computer simulated masking patterns of the excitation. Verifying experiments confirm the validity of the functional scheme and show that using individual thresholds the accuracy of the predicted pitch values can be increased to 0.15 Bark.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Versuchsdurchführung	3
3. Psychoakustische Meßergebnisse	7
3.1 Verbreitung des akustischen Nachtones	7
3.2 Existenzbereich des Nachtones innerhalb der Hörfläche	8
3.3 Einfluß spontaner otoakustischer Emissionen auf den Nachton	11
3.4 Linienspektrum mit spektraler Lücke als Erzeugerschall	14
3.4.1 Bandbreite des Erzeugerschalles	14
3.4.2 Darbietungspegel des Erzeugerschalles	19
3.4.3 Bandbreite der spektralen Lücke	21
3.4.4 Tiefe der spektralen Lücke	24
3.4.5 Steigung der Flanken der spektralen Lücke	26
3.4.6 Variation der oberen Lückengrenze	31
3.5 Linienspektrum mit spektraler Überhöhung als Erzeugerschall	33
3.5.1 Sinuston bei unterschiedlicher Frequenzlage	33
3.5.2 Darbietungspegel von Sinuston bzw. Linienspektrum	34
3.5.3 Schmalbandiges Linienspektrum verschiedener Bandbreite	37
3.6 Nachton bei zeitlich strukturierter Darbietung des Erzeugerschalles	39
3.6.1 Einfluß des Crestfaktors des Zeitsignales	40
3.6.2 Zeitliche Struktur durch Wahl der Phasenlagen der Spektrallinien	42
3.6.3 Zeitliche Struktur durch Amplitudenmodulation	47
3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse	52
4. Funktionsschema anhand von Mithörschwellenmustern	55
4.1 Mithörschwellen-Tonheitsmuster und deren Berechnung	55
4.2 Modellvorstellung zur Bildung der Tonhöhe des Nachtones	62
4.3 Vergleich von berechneten und gemessenen Tonhöhen des Nachtones	67
4.3.1 Darbietungspegel	67
4.3.2 Steigung der Flanken	68

4.3.3	Obere Lückengrenze	70
4.3.4	Genauigkeit der Tonheitsberechnungen	73
4.4	Zusammenfassende Darstellung des Funktionsschemas im Mithörschwellen- Tonheits-Zeitmuster	74
5.	Kontrollversuche	80
6.	Binaurale Anregung	85
7.	Neurophysiologische Untersuchungen	90
	Literatur	97
	Abkürzungen und Indizes	100

VORWORT

Das vorliegende Heft "Der akustische Nachton. Beschreibung und Funktionsschema" knüpft an die Tradition psychoakustischer Untersuchungen an, in der neben dem Autor Gerhard Krump auch die beiden Herausgeber tief verwurzelt sind. Extensive Hörversuche, eine sorgfältige Auswertung der Daten und die abschließende Beschreibung der funktionalen Zusammenhänge zwischen Schallreiz und Hörempfindung mit Hilfe eines Schemas kennzeichnen das Vorgehen. Die Methodik wurde nachhaltig vom Direktor des Instituts für Elektroakustik der Technischen Universität München, dem inzwischen leider verstorbenen Eberhard Zwicker, geprägt.

Eberhard Zwicker hat jedoch nicht nur der Arbeitsweise seiner Schüler seinen Stempel aufgedrückt, sondern war auch namensgebend. So ist der Effekt, den Gerhard Krump untersucht, in der Literatur als "Zwicker-Ton" oder als "Zwicker's negative after-image" bekannt. Diese Bezeichnungen dokumentieren, dass Eberhard Zwicker dieses Phänomen bei seiner intensiven Beschäftigung mit dem menschlichen Gehör entdeckt und als erster beschrieben hat. Der Nachton ist in Analogie zu der optischen Erscheinung zu sehen, die man erlebt, wenn man längere Zeit eine helle Kontur vor dunklem Hintergrund betrachtet und anschließend eine weiße Wand anschaut: Was vorher hell war, erscheint nun invertiert als dunkles Bild auf dem hellen Hintergrund. In vergleichbarer Weise kann ein Schallsignal nach dem Abschalten eine Hörempfindung in einem Frequenzbereich hervorrufen, in dem es physikalisch keine Energie enthält. Eben dieser Nachton ist es, den Gerhard Krump nach allen Regeln der psychoakustischen Experimentierkunst untersucht. Dabei ist besonders hervorzuheben, dass es ihm erstmals gelungen ist, auch mit spektralen Anhebungen Nachttöne zu erzeugen. Die Fülle von experimentellem Material, die Konzeption und Generierung äußerst komplexer Schallsignale sowie die kenntnisreiche Auswertung sind bemerkenswert. Sie erweisen sich als repräsentativ für eine Arbeit, die den Stellenwert der Psychoakustik unterstreicht.

Nachdem in dieser Reihe bisher überwiegend Beiträge erschienen sind, deren Schwergewicht eher auf der Vibroakustik liegt, hat Gerhard Krump mit dem Nachton nun ein rein psychoakustisches Thema behandelt. Es ist in den Augen der Herausgeber höchst erfreulich, dass er dadurch dazu beiträgt, dem bisher etwas schwächer vertretenen Zweig der Hörakustik mehr Gewicht zu verleihen. Dies ist besonders dem Herausgeber Hugo Fastl, der die Untersuchungen über Jahre hinweg als Betreuer der Dissertation von Gerhard Krump intensiv mitverfolgt hat, ein Herzensanliegen. Die vorliegende Arbeit führt dem Leser plastisch vor Augen, dass der Hörvorgang mehr beinhaltet, als lediglich die linear-mechanische Umsetzung des physikalischen Schallreizes in Nervenimpulse.

München, im Oktober 2000

Helmut Fleischer

1. Einleitung

Im Jahre 1964 entdeckte Zwicker ein akustisches Phänomen, welches er in Anlehnung an einen ähnlichen Effekt in der Optik als „Negative Afterimage in Hearing“ bezeichnete [51]. Das optische Nachbild ist vielfach aus eigener Erfahrung bekannt: Prägt man sich eine einfache, kontrastreiche Struktur für längere Zeit ein, so sieht man bei anschließender Betrachtung einer weißen Fläche diese Struktur einige Sekunden lang in ihrer Komplementärfarbe. Zwicker stellte fest, daß nach Abschalten eines monauralen Schallreizes mit einer spektralen Lücke, welcher etwa eine Minute lang dargeboten wird, in ruhiger Umgebung ein leiser, abklingender Nachton wahrzunehmen ist. Die seiner Tonhöhe entsprechende Frequenz befindet sich stets **innerhalb** der spektralen Lücke. Obwohl die Lücke eine Breite von über einer halben Oktave aufweist, wird in den meisten Fällen kein der Lücke entsprechendes Schmalbandrauschen, sondern ein reiner Ton gehört. Die Dauer dieses akustischen Phänomens (*φαίνομαι = ich erscheine*) liegt zwischen einer und sechs Sekunden [54] und wird von Zwicker [51] sogar mit bis zu 10 Sekunden angegeben, hängt aber in gewissem Maß auch von der Dauer der Anregung ab. Der Pegel eines gleichlauten Sinustones beträgt etwa 10 - 15 dB SL.

Neelen führte 1967 Untersuchungen mit bandsperrengefilterten DC-Pulsen als Anregung durch [30]. Die beiden amerikanischen Wissenschaftler Lummis und Guttman beschäftigten sich 1972 eingehender mit dem akustischen Nachton und schlugen vor, dieses Phänomen nach seinem Entdecker als Zwicker-Ton (ZT) zu bezeichnen [28]. Fastl und Stoll untersuchten 1979 die Ausprägtheit der Tonhöhe des Nachtones und stellten fest, daß sie derjenigen eines reinen Sinustones entspricht, so daß die **Bezeichnung Zwicker-Ton** durchaus berechtigt ist und sich deshalb in der Literatur durchgesetzt hat [11]. In den Jahren 1986 und 1989 unternahm Fastl schließlich weiterführende Untersuchungen mit rechnergenerierten Linienspektren [6, 7]. Diese Zwicker-Ton-Erzeugerschalle (ZTE), welche einen Spektrallinienabstand von 20 bzw. 200 Hz aufwiesen, verursachten einen ebenso gut wahrnehmbaren Nachton wie Bandsperrenrauschen und hatten den großen Vorteil, daß die spektrale Lücke ohne großen Aufwand in ihrer Lage und Breite variiert werden konnte. Krump fand heraus, daß der Zwicker-Ton nicht nur mit Schallreizen mit spektraler Lücke und tiefpaßgefilterten Geräuschen erzeugt werden kann, sondern auch mit

breitbandigen Signalen mit spektraler Überhöhung z. B. in Form eines einem Grundrauschen überlagerten Sinustones [21, 24]. Dabei befindet sich die Tonhöhe des Zwicker-Tones stets **unterhalb** der spektralen Überhöhung.

Trotz zahlreicher psychoakustischer Untersuchungen sind Ursache und Entstehungsort des Nachttones noch weitgehend unbekannt. Einzelne Vorschläge sind lediglich bei Zwicker [51] und Fastl [7] zu finden. Erst in jüngster Zeit wurden anhand des im folgenden vorgestellten Modelles neurophysiologische Untersuchungen angestellt, die Entstehungsmechanismen, Lokalisation und Verbindungen zum Tinnitus untersuchten [14, 15, 43, 45, 46].

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist deshalb die möglichst vollständige Darstellung bisher bekannter Untersuchungsergebnisse und die Beschreibung aller Einflußgrößen auf den Zwicker-Ton durch systematische Änderung der wesentlichen Parameter des Erzeugerschalles. Auf dieser Grundlage wird ein Funktionsschema vorgestellt, mit dem die Tonhöhe des Zwicker-Tones ermittelt werden kann. Darauf aufbauend werden schließlich erste Hypothesen zur Entstehung des Nachttones vorgestellt und diskutiert.

2. Versuchsdurchführung

Zur Erzeugung eines akustischen Nachttones werden im folgenden ausschließlich nach Gl. 1 berechnete Linienspektren verwendet. Diese besitzen den großen Vorteil, daß durch Weglassen einzelner Spektrallinien die spektrale Lücke beliebig in ihrer Frequenzlage und ihrer Breite variiert werden kann [6]. Durch Linien unterschiedlicher Amplitude innerhalb der Lücke kann zusätzlich die spektrale Hüllkurve verändert werden. In Fig. 1 ist ein ent-

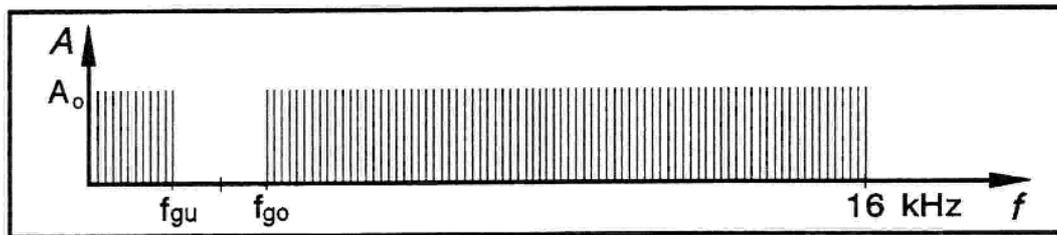


Fig. 1: Linienspektrum mit spektraler Lücke.

sprechendes Linienspektrum skizziert. Die Spektrallinien außerhalb der Lücke besitzen stets eine konstante Amplitude A_0 . Abgesehen von speziellen Fällen erstreckt sich das Linienspektrum von 1 Hz ($n_{lu} = 1$) bis 16 kHz ($n_{lo} = 16000$). Der Spektrallinienabstand bzw. die Grundfrequenz f_b des harmonischen Spektrums beträgt in der Regel 1 Hz, so daß sich eine Periodendauer T von 1 Sekunde ergibt. Diese für das menschliche Gehör durchaus wahrnehmbare Periode spielt jedoch für die Untersuchung des Nachttones keine Rolle [41].

$$u(t) = \sum_{n=n_{lu}}^{n_{lo}} A_0 \sin\left(\frac{2\pi n t}{T} - \varphi_n\right) \quad (1)$$

Die Phasenlagen sind mit einer Ausnahme stets statistisch gleichverteilt, so daß abgesehen von der periodischen Wiederholung ein Signal entsteht, welches in Amplitudenverteilung und Intensitätsdichte Weißem Rauschen entspricht [21, 26]. Als Zufallsgenerator wird ein von Knuth [16] vorgeschlagener Algorithmus verwendet (siehe auch Abschn. 3.6.1). Die Berechnung der Linienspektren wird mit Hilfe eines Personal Computers mit zwei digitalen Signalprozessoren (Motorola DSP 56001) durchgeführt. Das Multisinussignal $u(t)$ wird auf den Maximalwert der Zeitfunktion normiert und mit einer Abtastfrequenz von 48 kHz über ein Digital/Analog-Wandlersystem (16 Bit) mit mindestens 70 dB Klirrdämp-

fung ausgegeben. Zur Bandbegrenzung wird ein Tiefpaßfilter mit einer Grenzfrequenz von 20 kHz nachgeschaltet.

$$L/dB = l + 10 \log(\Delta f/Hz) = L_l + 10 \log A_{leff} \quad (2)$$

Der Gesamtpegel L eines Linienspektrums berechnet sich gemäß Gl. 2 aus dem Dichtepegel l und dem zehnfachen Logarithmus der Bandbreite Δf bzw. dem Pegel einer Spektrallinie L_l und dem zehnfachen Logarithmus der effektiven Linienanzahl A_{leff} eines Linienspektrums. Es dürfen also nur die effektiv vorhandenen Spektrallinien zur Berechnung verwendet werden, mögliche spektrale Lücken müssen berücksichtigt werden.

Die Zwicker-Ton-Erzeugerschalle (ZTE) wurden den normalhörenden Versuchspersonen im Alter zwischen 15 und 47 Jahren in einer schallgedämmten Meßkabine monaural über Kopfhörer (Beyer DT 48) mit Freifeldentzerrer nach Zwicker und Fastl dargeboten [54]. Der Pegel des Anregungsschalles wurde stets mit einem Röhrenvoltmeter mit der Zeitkonstante „fast“ (125 ms) gemessen. Die Versuchsperson konnte mit einem Stufenschalter zwischen drei Positionen wählen: In Schalterstellung 1 wurde ihr der entsprechende Erzeugerschall dargeboten, den sie sich einige Sekunden lang anhören sollte. Beim Umschalten in Position 2 wurde diese Anregung abrupt abgeschaltet und die Person sollte einen abklingenden Nachton wahrnehmen können, den sie sich in Tonhöhe und Lautheit merkte. In der dritten Schalterstellung wurde der Person ein Vergleichssinuston dargeboten, welchen sie nun in Frequenz und Pegel so einstellte, daß er der Tonhöhe und der empfundenen Lautstärke des Zwicker-Tones entsprach. Die Frequenzeinstellung erfolgte hierbei mit einem 10-Gang-Wendelpotentiometer ohne Skaleneinteilung, welches als Spannungsteiler die Eingangsspannung eines Voltage controlled Oszillators steuerte. Der äquivalente Pegel wurde über ein Widerstandsnetzwerk (Eichleitung) abgeglichen. Die Versuchsperson konnte zwischen den einzelnen Schalterpositionen beliebig oft hin- und herschalten, bis sie sich ihrer Angaben sicher war, erhielt aber während des Versuches keinerlei Informationen über die eingestellten Werte.

Zusätzlich zur Tonhöhe und Lautheit wurde auch die Qualität des Zwicker-Tones ermittelt, d.h. die Versuchsperson gab an, wie gut sie den Nachton wahrgenommen hat. Hierzu hatte sie nach Tabelle I fünf verschiedene Kategorien von „sehr schlecht“ bis „sehr gut“

zur Verfügung. Falls sie den Zwicker-Ton nicht wahrnehmen konnte, sollte sie ihn in eine weitere Kategorie als „nicht gehört“ einstufen. Damit wurde jedem Zwicker-Ton-Erzeugerschall ein entsprechendes Symbol zugeordnet. Die Qualität des Nachtones setzt sich hierbei aus mehreren Empfindungsgrößen, hauptsächlich aus Lautheit und Dauer des Zwicker-Tones zusammen. Obige Kategorieneinteilung wurde gewählt, um die Wahrnehmungsqualität des Nachtones sehr unterschiedlicher Versuchsreihen ohne zusätzliche Normierung oder Umrechnung miteinander vergleichen zu können. Diese grobe Einteilung der Qualität des Zwicker-Tones war von den Versuchspersonen gut reproduzierbar und hat sich bei den nachfolgenden Untersuchungen sehr gut bewährt.

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

Tabelle I: *Symbolzuordnung zur Qualität des Nachtones.*

Jeder Versuchsperson wurde in einer Sitzung statistisch verteilt derselbe Erzeugerschall viermal dargeboten. Aus den vier Frequenz- und Pegelinstellungen des Vergleichssinustones wurden pro Person Zentralwert und Wahrscheinliche Schwankung ermittelt, welche in den entsprechenden Abbildungen in Form eines Symboles mit Balken dargestellt sind. Hat eine Versuchsperson von vier Darbietungen den Zwicker-Ton mehr als einmal nicht wahrgenommen, so wurde dieser als „nicht gehört“ gewertet. Die vier Qualitätsbeurteilungen jeder Person wurden unabhängig von dieser Einstufung in eine Liste mit den entsprechenden sechs Kategorien eingetragen. Durch Abzählen wurden aus den Einzelbeurteilungen diejenigen Kategorien ermittelt, in die Zentralwert und Wahrscheinliche Schwankungen fallen. Dadurch erhält man eine über die Angaben aller Personen gemittelte Qualität des Nachtones, welche in den nachfolgenden Graphiken jeweils angegeben ist. Auf diese Weise läßt sich vergleichen, wie stark sich einzelne Parameteränderungen des Erzeugerschalles auf die Wahrnehmbarkeit des akustischen Nachtones auswirken.

Im Laufe der Arbeit hat sich herausgestellt, daß der Zwicker-Ton manchmal durch spontane otoakustische Emissionen sowohl in seiner Tonhöhe als auch in seiner Qualität stark beeinflußt wird (siehe Abschnitt 3.3). Die Tonhöhe derartiger Nachtöne wird deshalb durch ausgefüllte Symbole dargestellt, während die zugehörigen Qualitätsangaben bei der Auswertung nicht berücksichtigt wurden. In einigen der nachfolgenden Figuren sind die nach dem im Abschnitt 4 beschriebenen Funktionsschema ermittelten Tonhöhen des Nachtönes in Form von Sternen eingetragen, so daß die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten gut verglichen werden kann.

Bei zahlreichen Figuren werden die Ergebnisse nicht im Frequenzbereich, sondern infolge der Unterteilung des hörbaren Bereiches in Frequenzgruppen [49, 50, 52, 54] mit Hilfe der Gleichungen von Zwicker und Terhardt [56] im gehöradäquaten Tonheitsbereich dargestellt. Die Ruhehörschwelle wurde nach Angaben von Terhardt et al. [42] berechnet.

3. Psychoakustische Meßergebnisse

Im folgenden Kapitel werden zahlreiche psychoakustische Meßergebnisse dargestellt. Zunächst wird die Verbreitung des Nachtones bei 100 Versuchspersonen und seine Existenz innerhalb des menschlichen Hörbereiches ermittelt. Einflüsse spontaner oto-akustischer Emissionen auf Tonhöhe und Qualität des Zwicker-Tones werden dargestellt. Ferner wird dessen physikalische Meßbarkeit im Gehörgang untersucht. In den Abschnitten 3.4 und 3.5 werden zahlreiche Abhängigkeiten von Darbietungspegel, Bandbreite der Anregung oder Breite und Tiefe der spektralen Lücke bzw. Bandbreite und Höhe der spektralen Überhöhung erläutert, die schließlich mit Hilfe der entsprechenden Mithörschwellenmuster zu dem in Kapitel 4 dargestellten Funktionsschema führen. Abschließend werden in Abschnitt 3.6 Einflüsse der zeitlichen Struktur der Zwicker-Ton-Erzeugerschalle dargelegt. Die zahlreichen Literaturhinweise ergänzen die dargestellten Meßergebnisse und geben den weltweiten Stand der Untersuchungen wieder.

3.1 Verbreitung des akustischen Nachtones

Zunächst interessierte die Frage, wie weit verbreitet ist dieses Phänomen, d.h. wieviele Personen können den Nachton hören. Hierzu wurden Untersuchungen an 100 Versuchspersonen im Alter zwischen 15 bis 47 Jahren durchgeführt [17]. Der Anteil an weiblichen Personen war mit 14 Prozent relativ gering. Den Versuchspersonen wurde monaural ein Signal mit einem Linienspektrum mit einer spektralen Lücke zwischen 2 und 3 kHz und 40 dB Gesamtpegel dargeboten. Die Personen sollten sich diese Anregung in Schalterstellung 1 etwa 10 Sekunden lang anhören und anschließend auf Schalterposition 2 drehen, bei der das Linienspektrum abgeschaltet wurde. Zwischen den Positionen konnte öfters umgeschaltet werden, bis der Proband sich sicher war, die gestellte Frage eindeutig beantworten zu können. Die Fragestellung lautete, ob nach dem Abschalten etwas wahrzunehmen war und, wenn ja, was gehört wurde. Die Versuchspersonen wußten also nicht, was sie hören sollten. Auf Anhieb konnten 83 % der Personen den Nachton wahrnehmen und gaben an, einen kurzen Ton oder ein Pfeifen zu hören. Da der Nachton im allgemeinen verhältnismäßig leise ist und die Erwartungshaltung der ungeübten Personen eventuell sehr groß

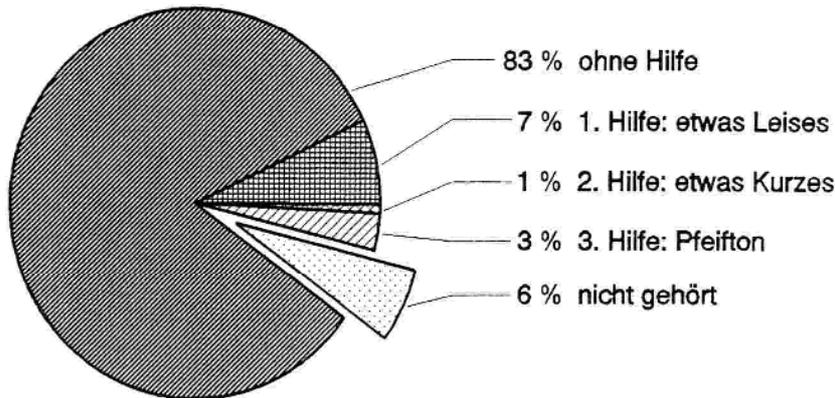


Fig. 2: Verbreitung des Nachtones bei 100 Versuchspersonen.

war, wurde den restlichen 17 % eine Hilfestellung gegeben, indem ihnen gesagt wurde, daß der zu erwartende Effekt sehr leise sei. Daraufhin hörten weitere 7 % den Nachton. Eine zusätzliche Andeutung, daß nur etwas Kurzes zu hören sei, bewirkte bei einer Person die Wahrnehmung des Zwicker-Tones. Schließlich wurde den restlichen Probanden erklärt, daß nach dem Abschalten ein leises, kurzes Pfeifen zu hören sei. Aufgrund dieses direkten Hinweises hörten weitere drei Personen den Zwicker-Ton. Lediglich 6 % konnten den Nachton bei diesem Erzeugerschall nicht wahrnehmen. In Fig. 2 ist diese Verteilung graphisch dargestellt. Ein Einfluß vom Alter (bis 47 Jahre) oder Geschlecht der Versuchspersonen konnte nicht festgestellt werden. Bei Zwicker [51] hörten alle 20 untersuchten Personen den Nachton, während Lummis und Guttman [28] von 28 Probanden 27 positive Antworten bekamen. Die spektrale Lücke befand sich dabei im gleichen Frequenzbereich wie in dieser Untersuchung. Von 52 Versuchspersonen nahmen bei Fastl ebenfalls 94 % den Zwicker-Ton wahr, wobei die spektrale Lücke um 4 kHz lag [6]. Es kann also angenommen werden, daß der akustische Nachton von über 90 % der Personen gehört wird.

3.2 Existenzbereich des Nachtones innerhalb der Hörfläche

In Fig. 3 ist die Qualität des Nachtones innerhalb des Hörbereiches nach Angaben von 5 Versuchspersonen aufgetragen. Die Breite der spektralen Lücke betrug bei dieser Untersuchung jeweils 2,5 Bark. Bei einem Darbietungspegel des Bandsperre-Linienspektrums (Fig. 3a) von 40 dB (ausgefüllte Kreise) wird um 300 Hz und 500 Hz zunächst kein Zwicker-Ton gehört, da die Spektrallinien unterhalb der Lücke infolge der noch hohen

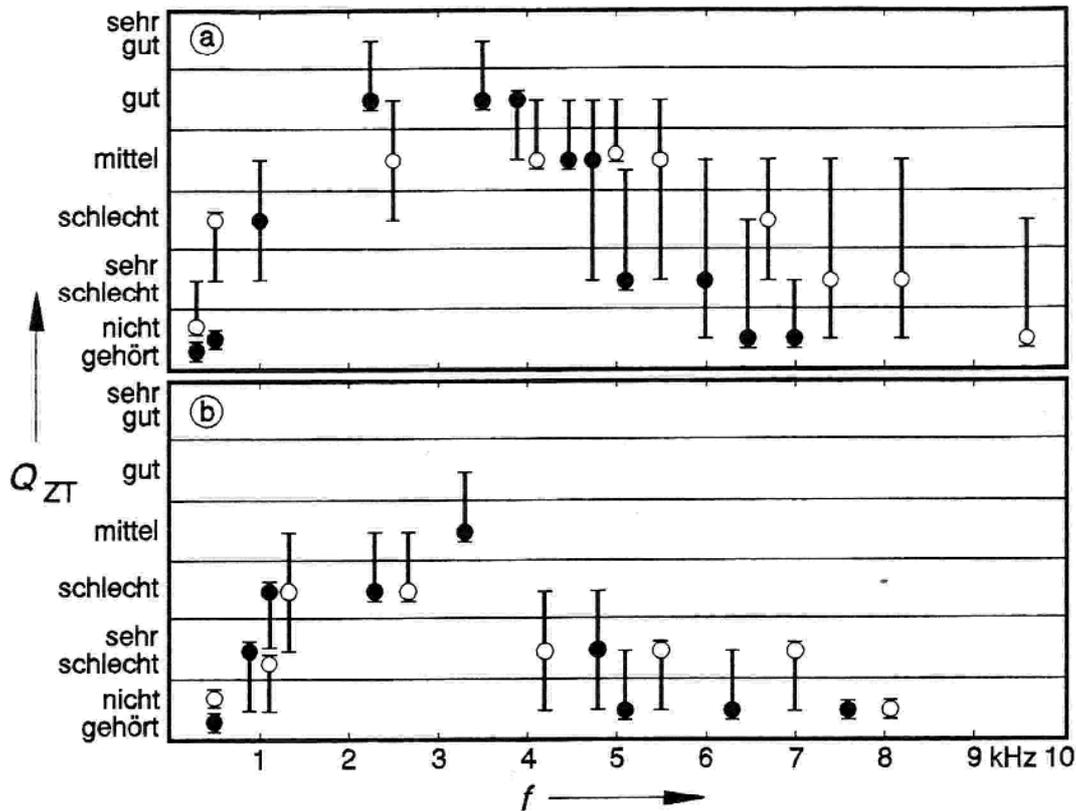


Fig. 3: Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones in Abhängigkeit von der Frequenz f . Zentralwerte (Kreise) und Wahrscheinliche Schwankungen (Balken). Darbietungspegel: 40 dB (ausgefüllte Kreise) und 60 dB (leere Kreise). a: Anregung mit Bandsperre-Linienspektren, Breite der Lücke: 2,5 Bark; b: Anregung mit Tiefpaß-Linienspektren unterschiedlicher Grenzfrequenz.

Ruhehörschwelle eine zu geringe Anregung darstellen. Zwischen 2 und 4 kHz, einem Bereich, in dem die Ruhehörschwelle am tiefsten liegt, kann der Nachton „gut“ wahrgenommen werden. Die Wahrscheinlichen Schwankungen reichen bis in die Kategorie „sehr gut“. Bei höheren Frequenzen wird die Qualität schließlich wieder schlechter, so daß der Nachton ab etwa 7 kHz nicht mehr registriert werden kann. Ein Pegel von 60 dB (leere Kreise) bewirkt, daß der Existenzbereich des Zwicker-Tones ausgeweitet wird. Er kann bei 300 Hz zwar noch nicht, bei 500 Hz jedoch bereits „schlecht“ wahrgenommen werden. Fastl und Stoll geben an, daß bei einem Pegel von 47 dB schon 7 von 10 Personen einen Zwicker-Ton um 500 Hz vernommen haben [11]. Im Frequenzbereich von 2 bis 4 kHz ist die Qualität jedoch um eine Kategorie schlechter als bei 40 dB. Ab 4 kHz nimmt sie allerdings weniger stark ab, so daß sogar über 8 kHz noch ein Zwicker-Ton festgestellt werden kann. Die Wahrscheinliche Schwankung reicht bei fast 10 kHz immerhin noch bis zur Kategorie „schlecht“, da zwei Versuchspersonen mit sehr niedriger

Ruhehörschwelle noch einen deutlichen Nachton hörten. Bei noch höheren Frequenzen steigt die Hörschwelle schließlich so stark an, daß auch diese Personen keinen Nachton mehr registrierten. Ein Darbietungspegel von 70 dB ruft selbst im optimalen Frequenzbereich nur noch einen „schlecht“ hörbaren Zwicker-Ton hervor (Abschnitt 3.4.2). Zwicker gibt einen Existenzbereich zwischen 700 Hz und 6 kHz an [51]. Bei Messungen mit Rotem Rauschen (Intensitätsdichtepegel: -20 dB/Dekade) als Anregung konnte er sogar einen Nachton bei 300 Hz feststellen. Neelen ermittelt bei seinen Untersuchungen mit DC-Pulsen an 3 Versuchspersonen einen Bereich von 300 Hz bis 6 kHz [30].

Guttman und Lummis entdeckten, daß der Zwicker-Ton sogar mit Tiefpaß- und Hochpaßrauschen erzeugt werden kann, wobei letzteres jedoch einen sehr schlechten Anregungsschall darstellte [12, 28]. Deshalb wurde die Untersuchung auch mit Tiefpaß- und Hochpaß-Linienspektren durchgeführt. In Fig. 3b sind die Ergebnisse bei Anregung mit tiefpaßbegrenzten Linienspektren mit einem Gesamtpegel von 40 dB (ausgefüllte Kreise) und 60 dB (leere Kreise) aufgetragen. Der prinzipielle Verlauf der Qualität ist dem oberen Teilbild sehr ähnlich, allerdings werden mit diesem Erzeugerschall wesentlich schlechter wahrnehmbare Nachtöne hervorgerufen als mit Bandsperre-Linienspektren. Der Einfluß der Bandbreite der Anregung wird im Abschnitt 3.4.1 noch ausführlich diskutiert. Versuche mit Hochpaß-Linienspektren lieferten keine eindeutigen und reproduzierbaren Ergebnisse. Viele Angaben der Personen konnten auf Einflüsse von spontanen otoakustischen Emissionen zurückgeführt werden. Diese Beeinflussung liegt möglicherweise auch bei den Daten von Lummis und Guttman [28] vor, da sich dort die Tonhöhe des Zwicker-Tones bei Variation der unteren Grenzfrequenz des Hochpaßrauschens vielfach nicht ändert.

Der Zwicker-Ton wird somit bei Anregung mit Bandsperre-Linienspektren zwischen 2 und 4 kHz am besten wahrgenommen. Der optimale Darbietungspegel liegt hier bei 40 dB und bestätigt damit die Ergebnisse von Fastl [7]. In Bereichen, in denen die Ruhehörschwelle ansteigt, wird die Qualität des Nachtönes wieder schlechter, da offensichtlich auch die Differenz zwischen Anregung und Hörschwelle, d.h. die Tiefe der spektralen Lücke von Bedeutung ist. Diese wird durch eine Pegelerhöhung auf 60 dB vergrößert, so daß in diesen Bereichen dadurch der Nachton wieder etwas besser zu hören ist.

3.3 Einfluß spontaner otoakustischer Emissionen auf den Nachton

Otoakustische Emissionen sind Oszillationen, welche vermutlich im Innenohr aufgrund aktiver Rückkopplungsprozesse produziert werden und mit empfindlichen Sondenmikrofonen im geschlossenen Gehörgang gemessen werden können [54]. Spontane otoakustische Emissionen treten bei etwa 57 % aller Personen auf und sind in ihrer Frequenz sehr stabil, während ihre Amplitude zwischen -30 dB und 10 dB SPL schwanken kann [1]. Da diese Emissionen den Nachton zum Teil stark beeinflussen können, wurden ihre Frequenzen bei jeder Versuchsperson bis etwa 4 kHz mittels einer Sonde gemessen. Sie konnten jedoch auch mit Hilfe eines anderen Experimentes festgestellt werden: Der Versuchsperson wurde (in Schalterposition 3) ein einzelner Sinuston dargeboten, den sie auf einen Pegel von 3 bis 6 dB über der Ruhehörschwelle einstellen und innerhalb eines festgelegten Frequenzbereiches durchstimmen sollte. An bestimmten Frequenzstellen konnte die Person ein Schweben dieses Tones wahrnehmen, wie es bei zwei spektral eng benachbarten Sinustönen auftritt. Die einzelnen Schwebungsstellen, wie sie im folgenden bezeichnet werden, wurden sehr genau und reproduzierbar eingestellt. Jedoch waren innerhalb einer Sitzung nicht alle erfaßbar, sondern es wurden über Monate hinweg im Laufe der Untersuchungen über den Zwicker-Ton immer wieder neue entdeckt. Von 11 Personen gab es eine, welche keine Schwebungsstellen aufwies, und 2 Versuchspersonen, bei denen über 20 festgestellt werden konnten. Ihr Frequenzbereich erstreckte sich im allgemeinen von 800 Hz bis 5500 Hz. Einzelne Personen mit sehr tiefer Ruhehörschwelle bei hohen Frequenzen registrierten sogar um 10 kHz noch Schwebungen. Eine Überprüfung mit den gemessenen spontanen otoakustischen Emissionen ergab, daß zumindest bei Frequenzen unter 4 kHz an jeder Schwebungsstelle auch eine spontane Emission gefunden werden konnte. Der umgekehrte Schluß, daß bei jeder Emissionsfrequenz eine Schwebung wahrgenommen wird, trifft nicht zu. Fig. 4 zeigt den Zusammenhang zwischen Emissionen und Schwebungsstellen, welche durch Pfeile gekennzeichnet sind. Es ist anzunehmen, daß Schwebungen nur an besonders ausgeprägten Emissionsstellen auftreten. Der Einfluß von Emissionsstellen auf den Zwicker-Ton äußert sich dadurch, daß dieser in seiner ursprünglichen Tonhöhe und Qualität verändert werden kann (siehe Abschnitt 3.4.3). Liegt die Tonhöhe eines Nachtones aufgrund der Konstellation der spektralen Lücke in der Nähe

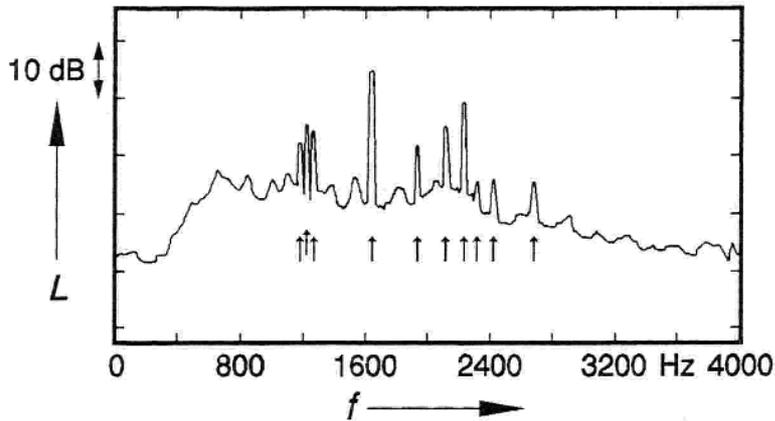


Fig. 4: Spontane oto-akustische Emissionen einer Versuchsperson. Die Pfeile markieren Schwebungsstellen.

einer Emissionsstelle, so kann die Versuchsperson nach dem Abschalten des Linienspektrums bei dieser Frequenz einen Ton wahrnehmen, der mitunter sogar bis zu einer halben Minute lang andauert. Die Qualität dieses Tones, dessen Vergleichsfrequenz sehr genau eingestellt werden kann, ist meist wesentlich besser als die des unbeeinflussten Zwicker-Tones. Deshalb werden diese Qualitätsangaben der Personen nicht ausgewertet. Bei einem nur schlecht hörbaren Zwicker-Ton kann eine ausgeprägte Emissionsstelle sogar an beliebiger Stelle innerhalb der spektralen Lücke einen deutlichen Ton verursachen, so daß der eigentliche Nachton entweder nicht mehr wahrgenommen wird oder zwei Töne gehört werden. Die Tonhöhe derartiger Töne, welche auf Schwebungsstellen zurückzuführen sind, wird in den nachfolgenden Abbildungen durch ausgefüllte Symbole gekennzeichnet, da es sich hier nicht mehr um einen unbeeinflussten Zwicker-Ton, sondern vermutlich um eine übererregte Emissionsstelle handelt [17]. Die subjektive Lautstärke von entsprechend ausgeprägten spontanen Emissionen kann somit durch vorherige Anregung mit Rauschen mit einer um die Emissionsfrequenz zentrierten spektralen Lücke kurzzeitig erhöht werden, ein höherer Emissionspegel ist jedoch nicht meßbar.

Im weiteren wurde der Versuch unternommen, den Zwicker-Ton ähnlich wie eine otoakustische Emission physikalisch zu messen. Hierzu wurde 11 Versuchspersonen über einen Miniaturlautsprecher in einer Sonde ein Zwicker-Ton-Erzeugerschall mit einer spektralen Lücke zwischen 1 kHz und 2 kHz dargeboten, da sich in diesem Frequenzbereich die Resonanz des Sondenmikrophons befand. Es wurde vor, während und nach der Anregung das gemittelte FFT-Spektrum aufgenommen. Obwohl alle Personen nach dem Abschalten des Erzeugerschalles einen Zwicker-Ton hörten, konnte der akustische Nachton physika-

lisch nicht gemessen werden. Der Meßaufbau war dabei empfindlich genug, um spontane otoakustische Emissionen 20 dB SPL über dem Rauschpegel anzeigen zu können (siehe Fig. 4).

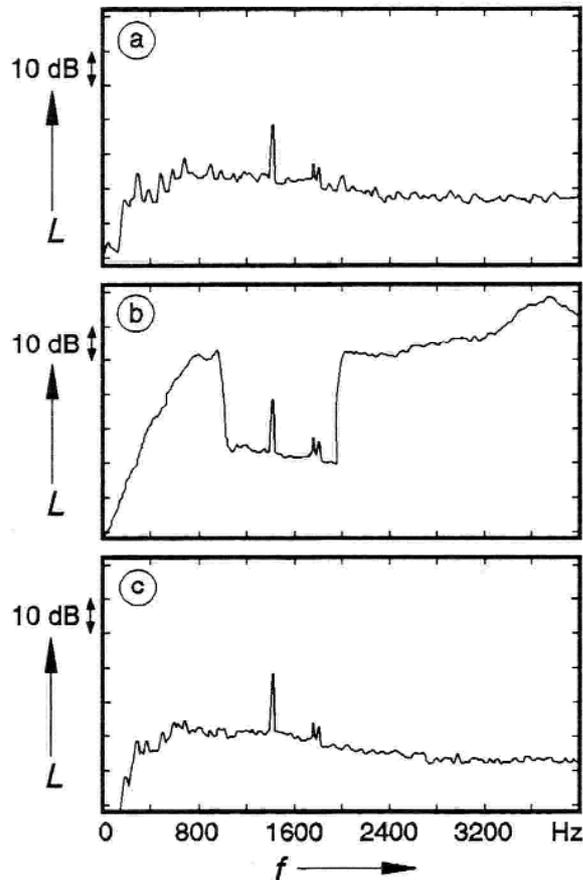


Fig. 5: *FFT-Spektrum vor (a), während (b) und nach (c) der Anregung mit einem Linienspektrum. Spektrale Lücke zwischen 1 und 2 kHz. Der Pegel der Emissionsstelle bei 1460 Hz bleibt stets konstant.*

In Fig. 5 ist eine Meßreihe aufgetragen, bei der die Versuchsperson an einer Schwebungsstelle (1460 Hz) einen deutlichen Ton nach dem Abschalten wahrgenommen hat. Vor der Anregung konnte eine eindeutige Emissionsstelle festgestellt werden (Fig. 5a). Während der Darbietung des Erzeugerschalles in Fig. 5b bleibt diese Emission erhalten, sehr schön ist die spektrale Lücke zu erkennen. Bei etwa 3800 Hz zeigt sich die Resonanzfrequenz des Miniaturlautsprechers. Auch nach Abschalten des Linienspektrums kann keine Pegeländerung der Emission festgestellt werden. Der Pegel der Emissionsstelle blieb also vor, während und nach der Anregung stets konstant, obwohl die Person nach dem Abschalten einen Ton hören konnte.

In einer letzten Versuchsreihe mit 6 Probanden sollte untersucht werden, ob sich ein Zwicker-Ton durch Schwebungen nachweisen läßt. Dazu wurde den Personen nach dem Abschalten des Zwicker-Ton-Erzeugerschalles ein leiser Sinuston dargeboten, den sie in

der Frequenz dem wahrgenommenen Zwicker-Ton angleichen und auf Schwebungen achten sollten. Der zusätzliche Sinuston wurde den Versuchspersonen sowohl an dem Ohr, an welchem sie den Nachton hörten, als auch am anderen Ohr dargeboten. Es waren keine Schwebungen feststellbar. Zwei Versuchspersonen konnten lediglich im zweiten Fall eine Lautheitszunahme registrieren, wie sie bei diotischer Darbietung zweier gleichartiger Töne bekannt ist. Dieser Zuwachs an Lautheit nimmt mit Abklingen des Zwicker-Tones ebenfalls ab. Interessant war in diesem Zusammenhang auch die Feststellung, daß bei Darbietung des Sinustones im selben Ohr der Zusatzton zwar den Nachton verdeckt, aber umgekehrt ein Zwicker-Ton einen zusätzlichen, leisen Sinuston nicht maskieren kann. In keinem Versuch konnte also ein Zwicker-Ton physikalisch nachgewiesen werden, so daß ein akustischer Nachton aus dem Gehör offensichtlich nicht emittiert wird.

3.4 Linienspektrum mit spektraler Lücke als Erzeugerschall

Die „klassische“ Art der Erzeugung eines Zwicker-Tones ist die Anregung durch Schalle mit spektraler Lücke. Die Auswirkungen einzelner Parameteränderungen dieses Zwicker-Ton-Erzeugerschalles auf Tonhöhe und Qualität des Nachtones werden in den nachfolgenden Abschnitten genauer untersucht. Auf die Dauer und den äquivalenten Pegel des Zwicker-Tones wird im einzelnen nicht näher eingegangen. Nach Fastl [7] liegt die Dauer des Nachtones weitgehend unabhängig von seiner Frequenzlage am häufigsten um 2 Sekunden, sehr selten über 6 Sekunden. Die Vergleichstonpegel befanden sich in dieser Untersuchung bei Werten zwischen 10 und 15 dB SL und bestätigten damit die Ergebnisse von Zwicker [51].

3.4.1 Bandbreite des Erzeugerschalles

Der Einfluß der Bandbreite des Erzeugerschalles auf Tonhöhe und Qualität des Zwicker-Tones wurde in umfangreichen Versuchsreihen untersucht [21, 22]. Der Gesamtpegel der verwendeten Linienspektren mit einem Spektrallinienabstand von 1 Hz ist hierbei stark von deren Bandbreite Δz_l abhängig. Die Schalle wurden daher stets mit gleichem Inten-

sitätsdichtepegel l bzw. gleichem Pegel L_l einer Spektrallinie dargeboten, so daß der Pegel der ersten Frequenzgruppe unterhalb der spektralen Lücke jeweils konstant blieb. War die Frequenzgruppe nur zur Hälfte mit Spektrallinien aufgefüllt (Δz_l gleich 0,5 Bark), so wurde der Erzeugerschall dementsprechend mit einem um 3 dB höheren Pegel dargeboten. Fig. 6 zeigt die Ergebnisse bei unterschiedlichen Bandbreiten der Anregung. Die obere Grenzfrequenz des Bandpaß-Linienspektrums wurde hierbei auf 15,6 Bark (3000 Hz) festgelegt, während die Bandbreite Δz_l , angedeutet als schraffierte Balken, von 0,5 bis 5 Bark erhöht wurde.

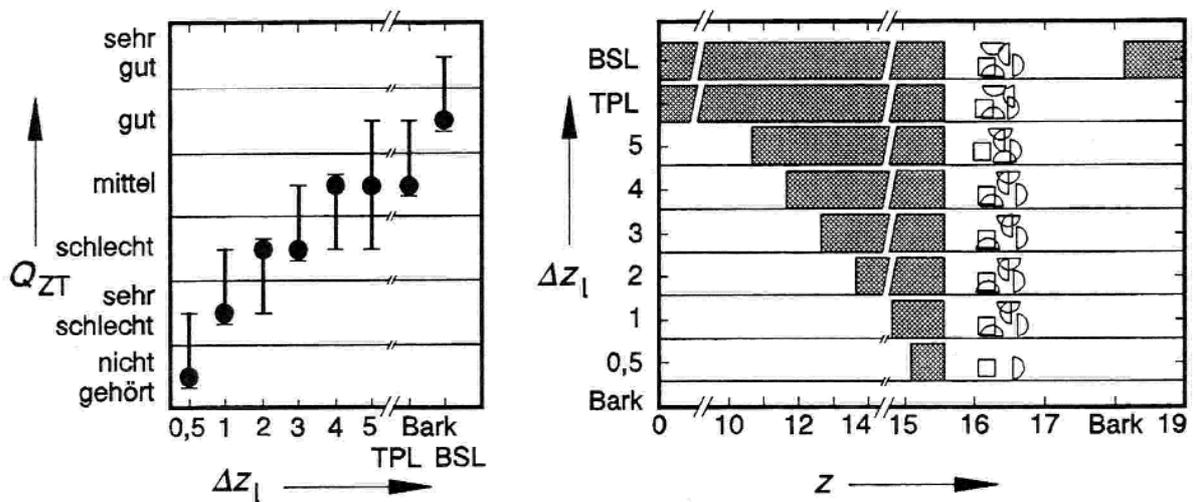


Fig. 6: Tonheit z (rechts) und Qualität Q_{ZT} (links) des Zwicker-Tones bei Linienspektren unterschiedlicher Bandbreite Δz_l bzw. bei tiefpaß- und bandsperrbegrenztem Linienspektrum. Zentralwerte (Kreise) und Wahrscheinliche Schwankungen (Balken). Berechnete Tonheiten (Sterne). Spektrale Lücke zwischen 15,6 Bark (3000 Hz) und 18,1 Bark (4630 Hz) beim Bandsperr-Linienspektrum (BSL). Pegel einer Spektrallinie: -1,5 dB.

Zum Vergleich wurde auch das entsprechende Tiefpaß-Linienspektrum (TPL) mit $\Delta z_l = 15,6$ Bark sowie das Bandsperr-Linienspektrum (BSL) in die Versuchsreihe aufgenommen. Wegen des konstanten Frequenzgruppenpegels ändern sich die von den fünf Versuchspersonen angegebenen und in die Tonheit umgerechneten Vergleichsfrequenzen, welche in Form von verschiedenen Symbolen in die Figur eingetragen sind, bei unterschiedlichen Bandbreiten kaum. Der Zwicker-Ton wurde immer über der oberen Grenzfrequenz des Bandpaß-Linienspektrums angegeben, in keinem Fall hörte eine Versuchsperson einen Nachton bei tieferen Tonheiten. Die Qualität des Zwicker-Tones ist jedoch von der Breite Δz_l des Linienspektrums stark abhängig. Ab 1 Bark Breite des Erzeugerschalles kann der Zwicker-Ton bereits von allen Personen gehört werden. Mit zunehmender Bandbreite ver-

bessert sich die Qualität 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.

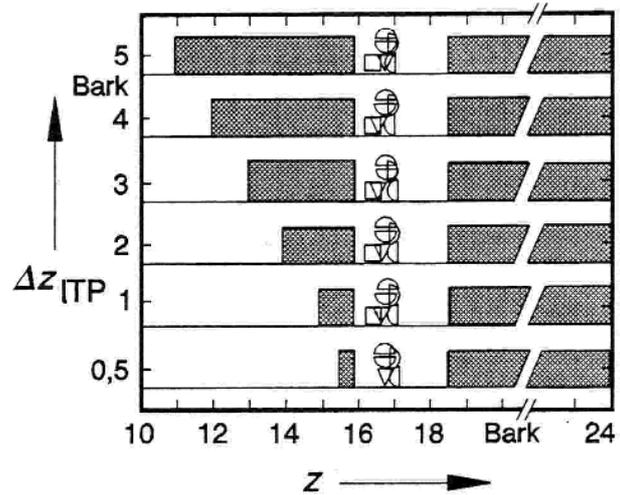
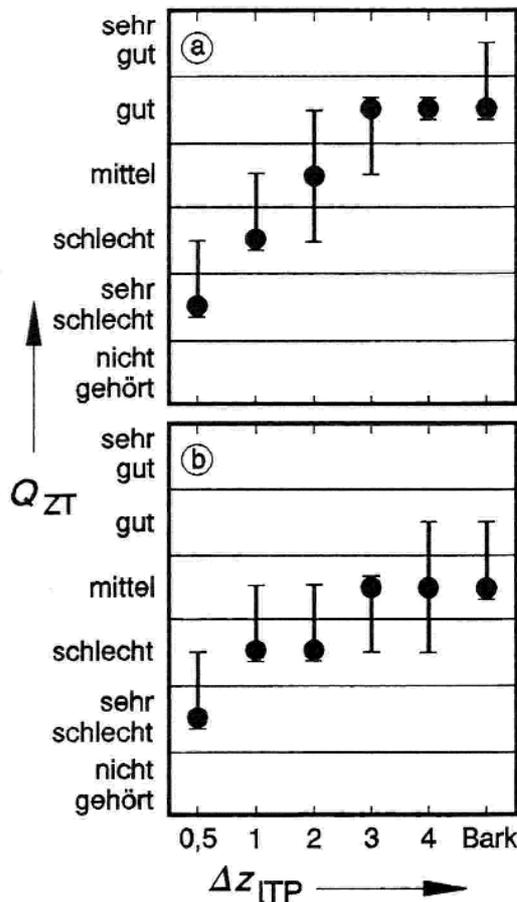


Fig. 7: Tonheit z (rechts) und Qualität Q_{ZT} (links) des Zwicker-Tones bei Bandsperre-Linienspektren mit unterschiedlicher Bandbreite Δz_{ITP} des Tiefpaßanteiles. Zentralwerte (Kreise) und Wahrscheinliche Schwankungen (Balken). Spektrale Lücke zwischen 15,9 Bark (3150 Hz) und 18,4 Bark (4850 Hz). Pegel einer Spektrallinie: -1,5 dB (a) bzw. 18,5 dB (b).

In einer weiteren Versuchreihe wurde gemäß Fig. 7 zu dem in der Breite variierten Bandpaß-Linienspektrum ein ca. 5,5 Bark breiter Hochpaßanteil hinzugefügt, so daß ein Bandsperre-Linienspektrum mit einer spektralen Lücke zwischen 15,9 und 18,4 Bark entsteht. Der Frequenzbereich unterhalb der Lücke wird im folgenden als Tiefpaßanteil, der oberhalb der spektralen Lücke als Hochpaßanteil des Erzeugerschalles bezeichnet. Dementsprechend wurde in diesem Versuch die Bandbreite Δz_{ITP} des Tiefpaßbereiches zwischen 0,5 und 5 Bark variiert. Der Pegel einer Spektrallinie betrug hierbei -1,5 dB (Fig. 7a) bzw. 18,5 dB (Fig. 7b).

Wegen des zugesetzten Hochpaß-Linienspektrums erhöht sich im oberen Teilbild die Qualität im Vergleich zu Fig. 6 um durchschnittlich eine Kategorie, während die Tonhöhe

des Zwicker-Tones von der Bandbreite weitgehend unabhängig bleibt. Der Nachton kann bei 0,5 Bark Bandbreite bereits von 5 der 6 Versuchspersonen gehört werden, obwohl ein reines Hochpaß-Linienspektrum für sich keinen unbeeinflussten Zwicker-Ton verursacht. Die Qualitätsbeurteilung „gut“ wird bereits bei 3 Bark Bandbreite erreicht, bei 5 Bark Bandbreite entsprechen Zentralwert und Wahrscheinliche Schwankungen der Qualitätsangaben denen bei maximaler breitbandiger Anregung BSL in Fig. 6. Die unterschiedlichen Qualitäten in dieser Versuchsreihe sind eindeutig auf die verschiedenen Bandbreiten und nicht auf eine Änderung des Gesamtpegels der Erzeugerschalle zurückzuführen, da der Hochpaßanteil alleine aufgrund seiner Bandbreite von etwa 11 kHz fast den gesamten Darbietungspegel ausmacht. Ein höherer Darbietungspegel (Fig. 7b) bewirkt mit zunehmender Breite des Tiefpaßanteiles keinen so steilen Anstieg der Qualitätsbeurteilung, da ein Zwicker-Ton um 17 Bark nach Fig. 3a bei einem Gesamtpegel von 60 dB selbst bei sehr breitbandiger Anregung auch nur „mittel“ wahrgenommen wird.

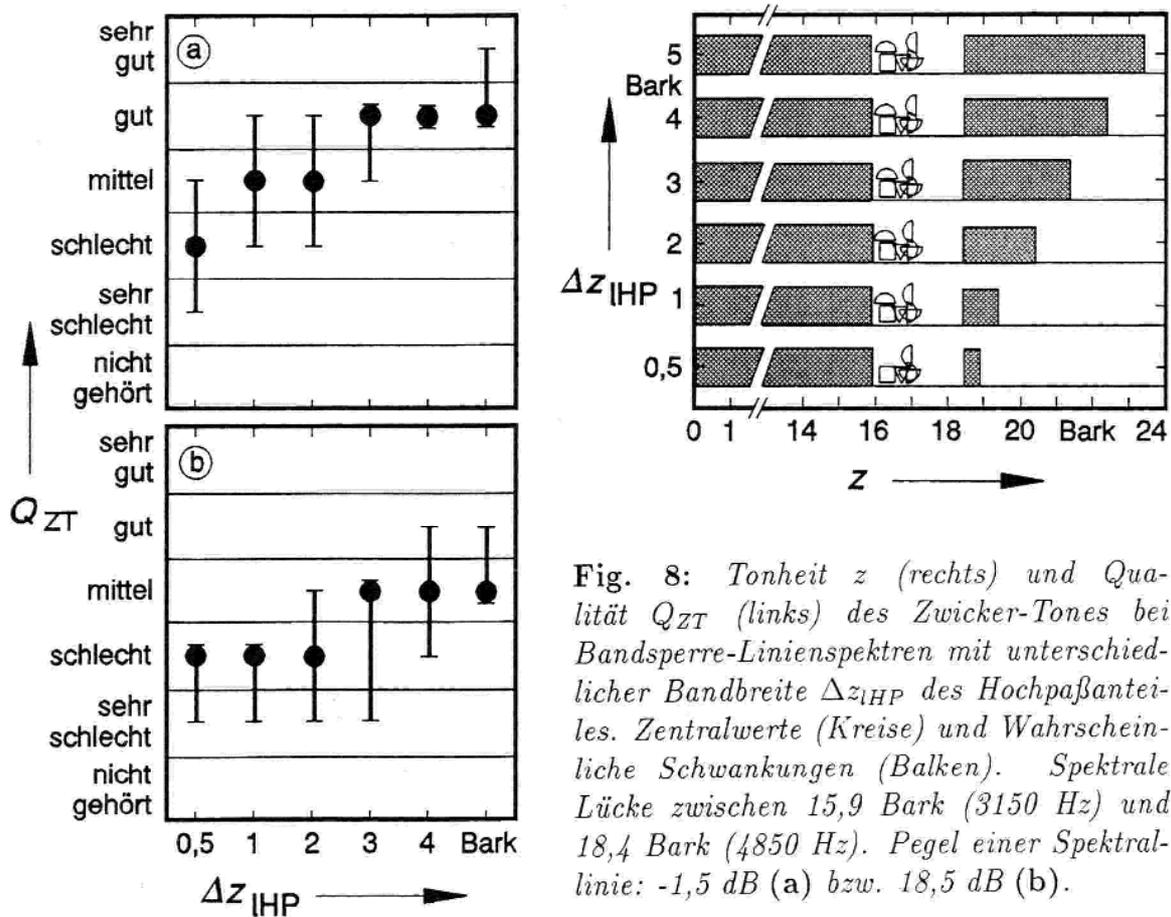


Fig. 8: Tonheit z (rechts) und Qualität Q_{ZT} (links) des Zwicker-Tones bei Bandsperre-Linienspektren mit unterschiedlicher Bandbreite Δz_{IHP} des Hochpaßanteiles. Zentralwerte (Kreise) und Wahrscheinliche Schwankungen (Balken). Spektrale Lücke zwischen 15,9 Bark (3150 Hz) und 18,4 Bark (4850 Hz). Pegel einer Spektrallinie: -1,5 dB (a) bzw. 18,5 dB (b).

Beim nächsten Experiment wurde, wie in Fig. 8 angedeutet, der Hochpaßanteil Δz_{IHP} des Bandsperre-Linienspektrums in der Bandbreite variiert, während unterhalb der spektralen

Lücke breitbandig angeregt wurde. Die Qualität des Nachtones entspricht für beide Pegel in etwa dem Verlauf in Fig. 7, lediglich bei einem Δz_{IHP} von 0,5 und 1 Bark ist der Nachton um eine Kategorie besser zu hören, so daß ein breitbandiger Tiefpaßanteil eine bessere Qualität zu bewirken scheint als ein breitbandiger Hochpaßanteil. Ab einer Breite von 5 Bark kann der Zwicker-Ton bei Darbietungspegeln von 40 dB bzw. 60 dB genauso gut wahrgenommen werden wie bei breitbandiger Anregung. Die Tonhöhe des Nachtones bleibt infolge des stets gleichen Frequenzgruppenpegels auch in diesem Versuch wieder weitgehend unabhängig von der Bandbreite.

Die Kombination von Fig. 7 und Fig. 8 derart, daß die Bandbreite sowohl des Tiefpaß- als auch des Hochpaßanteiles von 0,5 bis 4 Bark verändert wird, ergibt in der Tonheit zur spektralen Lücke symmetrische Bandsperre-Linienspektren. Entsprechende Versuche führen zu einer etwa um jeweils eine Kategorie schlechtere Qualitätsbeurteilung als in Fig. 7, da ein Erzeugerschall mit breitbandigem Hochpaßanteil (Fig. 7) bzw. Tiefpaßanteil (Fig. 8) einen besseren Zwicker-Ton erzeugt als ein symmetrisch bandbegrenztes Linienspektrum [21, 22].

Diese Untersuchungen belegen also, daß das Gehör bei einem Erzeugerschall mit einer 2,5 Bark breiten Lücke bezüglich der Qualität des Zwicker-Tones bis zu 5 Frequenzgruppen unter- und oberhalb der Grenzfrequenzen der spektralen Lücke auswertet. Bandpaß-Linienspektren können bereits ab 1 Bark Bandbreite einen Zwicker-Ton hervorrufen. Ein zusätzlicher Hochpaßanteil steigert die Qualitätsbeurteilung. Mit zunehmender Bandbreite der Anregungsschalle verbessert sich die Qualität, bis sie bei 5 Bark breiten Hoch- und Tiefpaßanteilen stagniert und derjenigen von Erzeugerschallen mit maximaler Bandbreite entspricht. Ein breitbandiger Tiefpaßbereich scheint für die Anregung etwas günstiger zu sein als der vergleichbare Hochpaßanteil. Die Tonhöhe des Nachtones ist von der Bandbreite der Anregung weitgehend unabhängig, solange der gleiche Frequenzgruppenpegel eingehalten wird. Ein höherer Darbietungspegel bewirkt bei diesen Versuchen keine Steigerung, sondern eher eine Verschlechterung der Qualitätsbeurteilung, da der optimale Pegelbereich verlassen wird.

3.4.2 Darbietungspegel des Erzeugerschalles

Wie im vorhergehenden Abschnitt und bei den Untersuchungen zum Existenzbereich des Nachtones bereits deutlich wurde, hängt die Qualität des Nachtones zum Teil sehr stark vom Pegel der Anregung ab. In den nachfolgenden Experimenten wurde deshalb neben dem optimalen Darbietungspegel auch die Pegelabhängigkeit der Tonhöhe des Nachtones erforscht. Fig. 9 zeigt die Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinlichen Schwankungen (Striche) der in die Tonheit z umgerechneten Vergleichsfrequenzen gemäß den Angaben von 5 Versuchspersonen. Über der Abszisse ist jeweils die spektrale Lücke mit einer arithmetischen Mittentonheit bei 17,1 Bark (3900 Hz) und einer Bandbreite von 2,5 (links) bzw. 3,5 Bark (rechts) skizziert. Der Pegel des Zwicker-Ton-Erzeugerschalles L_{ZTE} wurde zwischen 30 und 70 dB in Schritten von 10 dB variiert. Am rechten Rand der Abbildungen sind die nach den Angaben aller Personen ermittelten Zentralwerte der entsprechenden Qualität Q_{ZT} des Nachtones gemäß Tabelle I angegeben. Die ausgefüllten Symbole deuten auf Schwebungsstellen hin. Die mit einem Stern markierten Tonheitsstellen geben die nach dem Funktionsschema berechneten Tonhöhen des Nachtones wieder. Bei Pegeln um 30 und 40 dB befindet sich die Tonhöhe des Nachtones zunächst etwa 0,7 Bark über der unteren Grenze der Lücke und wandert in Übereinstimmung mit Literaturdaten mit höherem Pegel in Richtung obere Lückenbegrenzung [7, 9, 17, 21, 51]. Die Breite der spektralen Lücke wird in beiden Teilbildern fast vollständig ausgenutzt, so daß bei der breiteren Lücke ein etwas größerer Tonheitsbereich überstrichen wird. Diese Tonhöhenverschiebung hatte bereits Zwicker festgestellt; sie veranlaßte ihn zu der Annahme, daß die Tonhöhe des Nachtones beim Minimum der Mithörschwelle des Erzeugerschalles zu finden sei [51]. Die Flanke der Mithörschwelle des Tiefpaßanteiles fächert sich nämlich mit wachsendem Darbietungspegel nichtlinear auf, d.h. ihre Steigung wird flacher, so daß das entstehende Minimum zu höheren Tonheiten hin verschoben wird [7, 17].

Die Qualität des Nachtones besitzt in beiden Teilbildern bei 40 dB bis 50 dB ein Optimum und verschlechtert sich mit steigendem Darbietungspegel zusehends. Bei Pegeln unter 20 dB und über 80 dB wird kein Zwicker-Ton mehr wahrgenommen. Sehr ähnliche Ergebnisse hinsichtlich Tonhöhe und Qualität des Zwicker-Tones erhält man bei demselben Experiment mit spektralen Lücken um 14,4 Bark [17, 21].

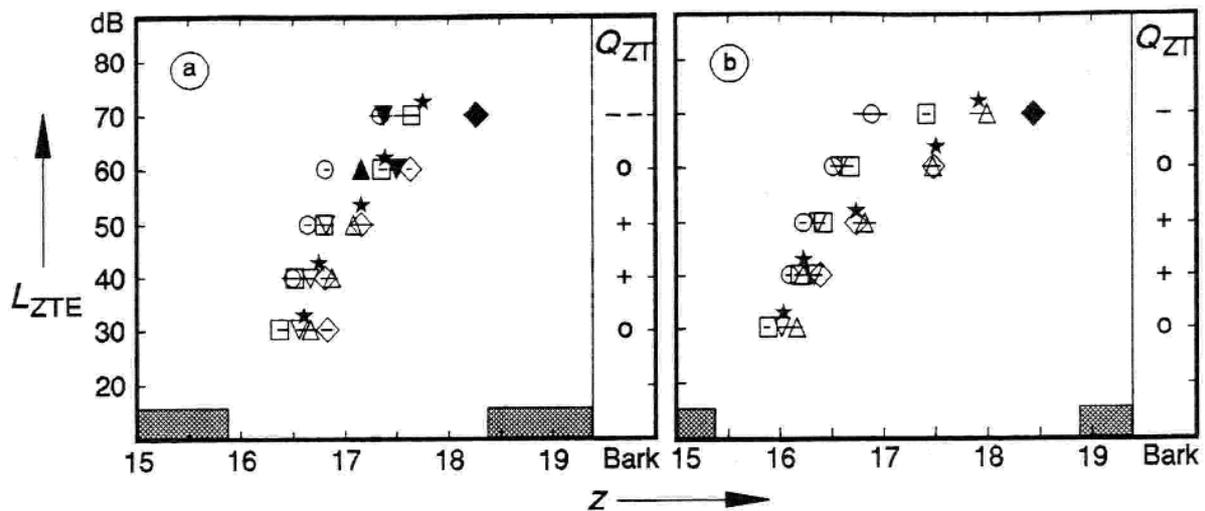


Fig. 9: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei verschiedenen Darbietungspegeln L_{ZTE} des Erzeugerschalles. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Berechnete Tonheiten (Sterne). Mittentonheit: 17,1 Bark (3900 Hz). Breite der Lücke: 2,5 Bark (a) bzw. 3,5 Bark (b).

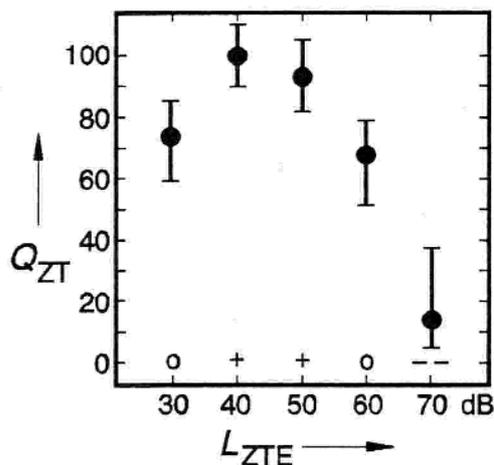


Fig. 10: Größenschätzung ohne Ankerschall. Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones in Abhängigkeit vom Darbietungspegel L_{ZTE} des Erzeugerschalles. Zentralwerte (Kreise) und Wahrscheinliche Schwankungen (Balken). Spektrale Lücke zwischen 15,9 und 18,4 Bark.

Zur genaueren Analyse der Pegelabhängigkeit der Qualität wurde eine Größenschätzung ohne Ankerschall [54] durchgeführt, deren Ergebnisse in Fig. 10 eingezeichnet sind. Als Anregung diente der Zwicker-Ton-Erzeugerschall gemäß Fig. 9a mit Darbietungspegeln zwischen 30 und 70 dB. Die Personen hatten die Aufgabe, die Qualität des Zwicker-Tones nun nicht in Kategorien einzuteilen, sondern sie durch Zuordnen einer Zahl zu charakterisieren. Dabei waren alle positiven Zahlenwerte erlaubt. Die vier Werte jeder Versuchsperson wurden auf den Zentralwert ihrer Angaben bei 40 dB Darbietungspegel normiert. Aus den Schätzungen der 5 Personen wurden die Zentralwerte und Wahrscheinlichen Schwankungen bestimmt und in Fig. 10 eingetragen. Über der Abszisse sind zum Vergleich die Kategorien von Fig. 9a angegeben.

Bei 40 dB Darbietungspegel wird der Zwicker-Ton am besten wahrgenommen, auch bei 50 dB erreicht er noch eine relativ hohe Qualität. Diese Ergebnisse stimmen recht gut mit den Angaben von Fastl überein, der nach einer Studie mit 52 Versuchspersonen einen optimalen Darbietungspegel von 43 dB angibt [7]. Wird der Erzeugerschall mit 30 bzw. 60 dB dargeboten, so erreicht die Qualität noch etwa 70 % des Optimums. Ein Pegel von 70 dB ruft einen nur noch „sehr schlecht“ wahrnehmbaren Zwicker-Ton hervor, der durchschnittlich den Zahlenwert 15 erhält. Insgesamt stimmen die Kategorien sehr gut mit den relativen Qualitätsschätzungen überein. Aufgrund dieser Ergebnisse werden in den nachfolgenden Versuchen die Zwicker-Ton-Erzeugerschalle immer mit 40 dB, manchmal zusätzlich noch mit 60 dB dargeboten.

3.4.3 Bandbreite der spektralen Lücke

Im Abschnitt 3.4.1 wurden Einflüsse der Bandbreite des Erzeugerschalles auf den Nachton untersucht und festgestellt, daß vom Gehör Spektralanteile bis zu 5 Bark außerhalb der Lücke ausgewertet werden. Nun werden bei möglichst breitbandiger Anregung Auswirkungen der Bandbreite der spektralen Lücke auf Tonhöhe und Qualität des Zwicker-Tones näher betrachtet. Die Breite der Lücke Δz_g wurde, wie in Fig. 11 in Form von schraffierten Balken angedeutet, zwischen 1 und 8,5 Bark bei zwei verschiedenen arithmetischen Mittentonheiten variiert. Der Darbietungspegel der einzelnen Erzeugerschalle betrug jeweils 40 dB. Im linken Teilbild bei spektralen Lücken um 14,4 Bark (2450 Hz) sind sehr starke Einflüsse von spontanen Emissionen erkennbar. Vor allem bei breiten spektralen Lücken, bei denen der unbeeinflusste Zwicker-Ton im allgemeinen nur „schlecht“ wahrgenommen wird, geben die Personen einen gut hörbaren Ton an einer Schwebungsstelle an. Deren Qualität wird nicht ausgewertet, so daß in diesem Bereich der Zwicker-Ton zum Teil als „nicht gehört“ eingestuft wird. Die Versuchsperson, deren Angaben durch ein Rechteck gekennzeichnet sind, besitzt nur vier meßbare Schwebungsstellen, so daß an ihr gemäß Fig. 11a ein Charakteristikum des beeinflussten Nachtones studiert werden kann: Ausgehend von sehr breiten Lücken gibt die Person zunächst trotz abnehmender Bandbreite der Lücke stets dieselbe Tonhöhe um 11,4 Bark an. Wird diese Tonheitsstelle von Spektrallinien des Erzeugerschalles überdeckt, so hört die Versuchsperson einen un-

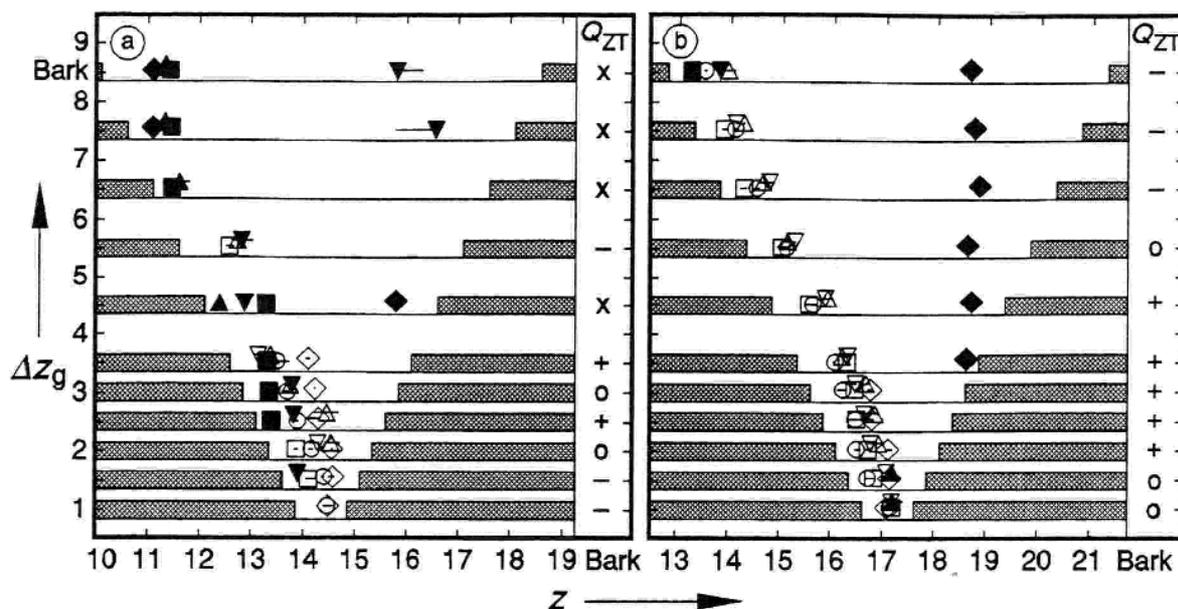


Fig. 11: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlichen Lückenbreiten Δz_g . Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Pegel: 40 dB. Arithmetische Lückenmitte bei 14,4 Bark (a) und 17,1 Bark (b).

beeinflußten Zwicker-Ton, um dann bei weiterer Verringerung der Lückenbreite einen Ton bei der nächsthöheren Schwebungsstelle um 13,4 Bark wahrzunehmen, bis diese wiederum durch den Anregungsschall maskiert wird. Die Vergleichsfrequenzen von Tönen bei Schwebungsstellen werden sehr genau eingestellt, so daß die Wahrscheinlichen Schwankungen (Striche) in den Abbildungen meist vom Symbol verdeckt werden. Die Versuchsperson, deren Ergebnisse mit einem nach unten weisenden Dreieck markiert sind, gibt bei 7,5 und 8,5 Bark Lückenbreite einen Ton an, dessen Vergleichsfrequenz sich von denen anderer Personen stark unterscheidet. Die größeren Wahrscheinlichen Schwankungen rühren daher, daß die Person beim gleichen Anregungsschall abwechselnd Töne aufgrund zweier ausgeprägter Emissionsstellen wahrnimmt und den Vergleichssinuston deshalb auf zwei verschiedene Töne einstellt. Insgesamt zeigt sich, daß spektrale Lücken zwischen 2 und 3,5 Bark einen verhältnismäßig gut hörbaren Zwicker-Ton hervorrufen, der nur noch in wenigen Fällen durch Schwebungsstellen gestört wird.

Die spektralen Lücken um 17,1 Bark (3900 Hz) im rechten Teilbild verdeutlichen den eigentlichen Tonhöhenverlauf des unbeeinflußten Zwicker-Tones: Bei breiten Lücken befinden sich die Tonhöhen des Nachtones auf einer Geraden, die je nach Versuchsperson 0,7 bis 1 Bark über der unteren Lückengrenze liegt [7, 54]. Erst ab etwa 2 Bark Bandbreite

verlassen die Symbole diese Richtung und der Nachton wird bei 1 Bark Lückenbreite von allen 5 Personen in der Mitte der spektralen Lücke gehört. Dieser Verlauf ist auch in Fig. 11a erkennbar, insbesondere bei den durch einen Kreis gekennzeichneten Angaben, da bei dieser Versuchsperson keinerlei Schwebungsstellen gemessen wurden. Die mit einer Rhombe dargestellten Ergebnisse in Fig. 11b stimmen bei geringen Lückenbreiten mit denen der anderen Personen zunächst gut überein, erst wenn die ausgeprägten Emissionsstellen um 18,7 Bark (5 kHz) nicht mehr vom Linienspektrum überdeckt werden, nimmt diese Person unabhängig von der Lückenbreite einen Ton an diesen Stellen wahr. Der Zwicker-Ton wird also nur dann von spontanen otoakustischen Emissionen beeinflusst, wenn sie innerhalb der spektralen Lücke liegen [17, 21].

Bei Lückenbreiten zwischen 2 und 4,5 Bark wird der Nachton am besten beurteilt, so daß in anderen Versuchsreihen meist spektrale Lücken mit Bandbreiten von 2,5 und 3,5 Bark Verwendung fanden. Lückenbreiten über etwa 5 Bark führen möglicherweise dazu, daß Zwicker-Töne nur noch durch den Tiefpaßanteil angeregt werden und das zugehörige Hochpaß-Linienspektrum auch für die Qualität des Nachtones keine Rolle mehr spielt. Um diese Vermutung zu untermauern, wurden in einem Experiment nur die Tiefpaßanteile der Erzeugerschalle in Fig. 11b mit Lückenbreiten von 1,5, 2,5, 3,5, 5,5 und 7,5 Bark verwendet. Es wurde auf jeweils gleichen Dichtepiegel von Bandsperre-Linienspektrum und zugehöriger tiefpaßbegrenzter Anregung geachtet, so daß vergleichbare Frequenzgruppenpegel sichergestellt waren. Die Qualität des Zwicker-Tones stimmt bei Bandbreiten der spektralen Lücke von 5,5 und 7,5 Bark mit den entsprechenden Ergebnissen in Fig. 12 (z_{TP} gleich 14,35 und 13,35 Bark) überein, während bei Erzeugerschallen mit geringeren Lückenbreiten der Nachton in Fig. 11b um eine Kategorie besser wahrgenommen werden kann. Wie aus Abschnitt 3.4.1 bereits bekannt, bringt hier die zusätzliche Darbietung des Hochpaßanteiles eine weitere Verbesserung der Qualität. Die Tonheitsangaben in Fig. 11b sind mit denen in Fig. 12 annähernd identisch, so daß bei diesem Darbietungspegel das Hochpaß-Linienspektrum die Tonhöhe des Zwicker-Tones nicht verändert. Die berechneten Werte (Sterne), welche aus Gründen der Übersichtlichkeit in Fig. 11 nicht eingetragen wurden, ergeben eine sehr gute Übereinstimmung mit den Angaben der Versuchspersonen.

Die Tonhöhe des unbeeinflussten Zwicker-Tones ist also bei Erzeugerschallen mit spektraler Lücke nicht, wie vielleicht zunächst erwartet, in der Mitte der Lücke zu finden,

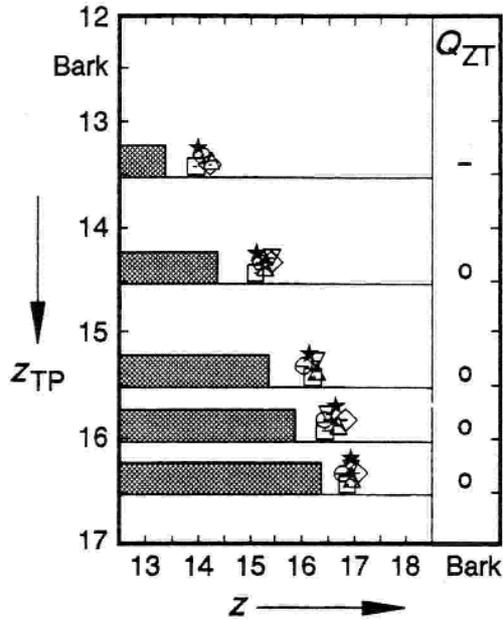


Fig. 12: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei Tiefpaß-Linienspektren mit den Grenztonheiten z_{TP} . Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Berechnete Tonheiten (Sterne).

sondern in der Nähe der unteren Lückengrenze, so daß wohl der Tiefpaßanteil und davon vor allem die erste Frequenzgruppe unterhalb der Lücke die Tonhöhe des Nachtones bestimmt [21, 25]. Der Hochpaßanteil spielt bei sehr großen Lückenbreiten keine Rolle, erst bei Lückenbreiten unter 5 Bark verbessert er die Qualität des Zwicker-Tones. Bei sehr schmalen spektralen Lücken wird der Nachton wieder schlechter gehört, weil die Tiefe der Lücke im Mithörschwellenmuster geringer wird.

3.4.4 Tiefe der spektralen Lücke

Einen weiteren wichtigen Parameter des Zwicker-Ton-Erzeugerschalles stellt die notwendige Tiefe der spektralen Lücke dar. Um hierüber Aussagen zu bekommen, wurden Linienspektren mit einer 2,5 Bark breiten Lücke bei 14,4 Bark (2450 Hz) bzw. 17,1 Bark (3900 Hz) generiert. Die spektrale Lücke wurde hierbei mit zusätzlichen Linien aufgefüllt, so daß Lückentiefen ΔL_g zwischen 5 und 50 dB entstanden. Die Erzeugerschalle wurden mit einem Gesamtpegel von 40 dB dargeboten. Fig. 13 zeigt die Ergebnisse dieser Messungen. Aus den beiden Teilbildern ist deutlich zu entnehmen, daß der Zwicker-Ton unabhängig von der Lage der spektralen Lücke ab einer Tiefe von 15 dB wahrgenommen wird. Seine Qualität verbessert sich mit zunehmendem ΔL_g ständig, bis ab 30 dB Lückentiefe der Nachton „gut“ zu hören ist. Bei einer Tiefe über 30 dB befindet sich die

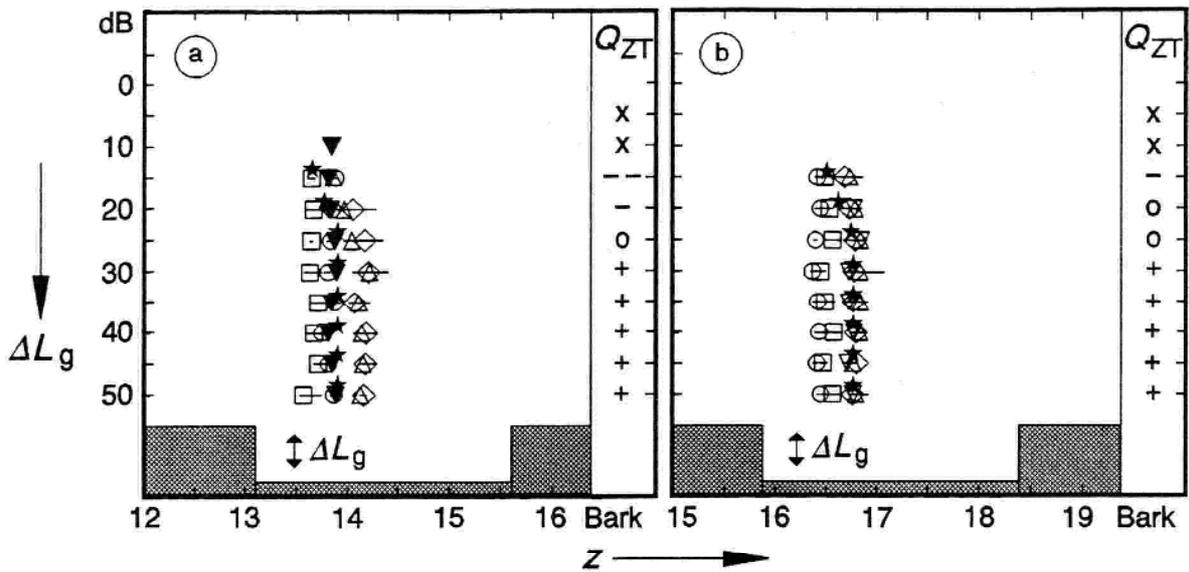


Fig. 13: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlicher Lückentiefe ΔL_g . Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Berechnete Tonheiten (Sterne). Lückenbreite: 2,5 Bark. Arithmetische Mittentonheit 14,4 Bark (a) und 17,1 Bark (b) bei einem Darbietungspegel von 40 dB.

zusätzliche Anregung innerhalb der Lücke bereits unter der Ruheshörschwelle, so daß eine weitere Zunahme der Lückentiefe vom Gehör nicht mehr registriert wird und die Qualität daher unverändert bleibt. Die Tonhöhe des Zwicker-Tones hingegen wird nur wenig verändert und wandert bei geringen Lückentiefen mit zunehmender Tiefe eher zu höheren Tonheiten.

Eine Pegelerhöhung des Erzeugerschalles mit einer spektralen Lücke gemäß Fig. 13b auf 60 dB führte zu ähnlichen Ergebnissen. Der Nachton war wiederum ab einer Lückentiefe von 15 dB wahrzunehmen. Ein Qualitätsanstieg war bis zu einer Tiefe von 25 dB zu verzeichnen. Auch eine Verbreiterung der Lücke auf 5,5 Bark bei einem Darbietungspegel von 40 dB bestätigte die minimal notwendige Lückentiefe von 15 dB.

Lummis und Guttman untersuchten die minimale Lückentiefe in Abhängigkeit von der Dauer des Erzeugerschalles und gaben für eine Anregung über 2 Sekunden eine Mindesttiefe von 26 dB an [28]. Sie benutzten zur Verringerung der Tiefe der spektralen Lücke ein additiv hinzugesetztes Grundrauschen dargeboten über einen Kopfhörer ohne Freifeldentzerrer. Möglicherweise liegt darin die Ursache für die Diskrepanz der Ergebnisse beider Untersuchungen. In dieser Versuchsreihe ergab sich jedoch eindeutig, daß fast alle Versuchspersonen den unbeeinflussten Zwicker-Ton unabhängig von der Lage und Breite

der spektralen Lücke und dem Pegel des Erzeugerschalles ab einer Lückentiefe von 15 dB registrieren konnten [9, 21].

3.4.5 Steigung der Flanken der spektralen Lücke

In Abschnitt 3.4.2 wurde festgestellt, daß die Tonhöhe des Zwicker-Tones mit steigendem Darbietungspegel des Erzeugerschalles zu höheren Tonheiten hin wandert. Dieser Effekt wurde mit der nichtlinearen Auffächerung der Mithörschwelle begründet [7, 17, 51], d.h. die Flanke der Mithörschwelle des Tiefpaßanteiles wird bei höheren Pegeln flacher und verändert dadurch die Tonlage des Nachtones. Die Steigung der unteren Lückenbegrenzung kann mit Hilfe der Linienspektren physikalisch nachgebildet werden, indem die spektrale Lücke von der unteren Grenze her mit Spektrallinien abnehmender Amplituden aufgefüllt wird [18]. Es entsteht dadurch innerhalb der Lücke eine spektrale Hüllkurve wie sie im unteren Teilbild der Fig. 14 punktiert angedeutet ist. Über der Tonheit z ist der Pegel L_l einer einzelnen Spektrallinie aufgetragen. Aufgrund des Spektrallinienabstandes von 1 Hz können in der Zeichnung einzelne Linien nicht mehr aufgelöst werden, so daß nur noch die Hüllkurve der spektralen Lücke skizziert ist. Die physikalischen Flankensteigungen wurden mit linearem Abfall in der Frequenzskale berechnet, weshalb bei Umrechnung in die Tonheit z leicht gekrümmte Verläufe entstehen. Ausgehend von einer 4,5 Bark breiten Lücke mit sehr steilen Grenzen wurde die Steigung s_u der unteren Flanke zunächst in Schritten von 15 dB/kHz und schließlich in kleineren Abständen von 7,5 dB/kHz verändert. Der Darbietungspegel betrug 40 dB. Bei sehr steiler Flanke liegt die Tonhöhe des Nachtones je nach Versuchsperson 0,7 bis 1 Bark oberhalb der unteren Lückengrenze und wandert mit betragsmäßig geringerer Steigung ähnlich wie bei der Pegelabhängigkeit in Abschnitt 3.4.2 zu höheren Tonheiten, wobei sich auch die Qualität Q_{ZT} ab einer Flankensteilheit von -30 dB/kHz verschlechtert. Dieser Qualitätsverlust des Zwicker-Tones beruht wahrscheinlich auf der Verringerung der Lückentiefe bei sehr flachem Abfall der Flanken. Die mit einem Kreis markierten Tonheitsangaben unterscheiden sich stark von den berechneten Werten (Sterne) und den Ergebnissen anderer Personen, da diese Versuchsperson eine ab 16 Bark erhöhte Ruhehörschwelle aufweist. Spektrallinien mit geringen Amplituden, wie sie in der Mitte und an der oberen Grenze der spektralen

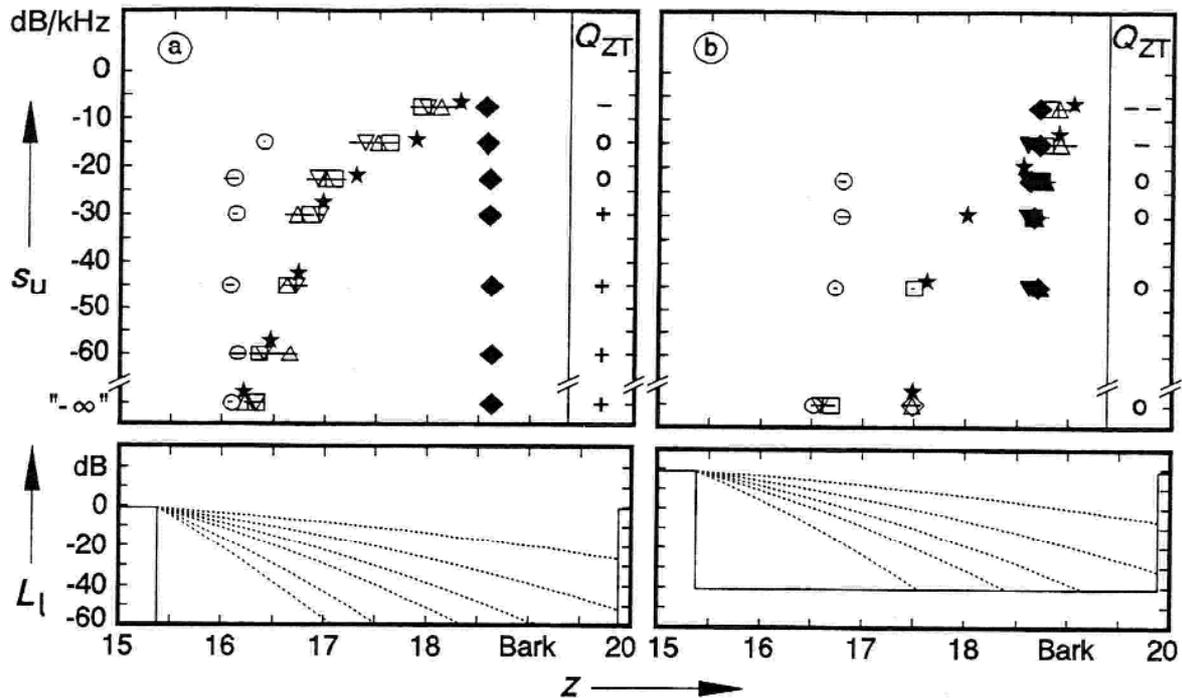


Fig. 14: oben: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlichen Steigungen s_u der unteren Flanke der spektralen Lücke zwischen 15,4 Bark (2900 Hz) und 19,9 Bark (6300 Hz). Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Berechnete Tonheiten (Sterne). Darbietungspegel: 40 dB (a) bzw. 60 dB (b). unten: Pegel L_l der einzelnen Spektrallinien als Funktion der Tonheit z .

Lücke auftreten, tragen daher nicht mehr zur Anregung bei und die Versuchsperson hört deshalb einen erheblich tieferen Nachton. Auf gleiche Weise können die Abweichungen der anderen Versuchspersonen bei geringen Flankensteilheiten mit dem Verlauf der individuellen Ruheshwelle erklärt werden. Dieses Verhalten kann als weiterer Hinweis dafür aufgefaßt werden, daß die Tonhöhe des Zwicker-Tones eng mit dem Mithörschwellenmuster und der Ruheshwelle verknüpft ist. Durch die ausgefüllte Rhombe wird ein Ton gekennzeichnet, den die Person ungeachtet der unterschiedlichen Steigungen infolge ihrer sehr ausgeprägten Emissionsstelle bei etwa 18,7 Bark wahrnimmt.

Diese Einflüsse von spontanen oto-akustischen Emissionen wirken sich im rechten Teilbild bei einem Pegel von 60 dB noch wesentlich stärker aus und machen eine detaillierte Aussage über den unbeeinflussten Zwicker-Ton fast unmöglich. Ab Steigungen von -45 dB/kHz stellen die meisten Personen bereits einen Vergleichsinuston von über 18,5 Bark (5000 Hz) ein. Bei diesen Tonheiten wurden auch jeweils Schwebungsstellen registriert. Es treten hier über 5 kHz noch Emissionen auf, welche die Messung stark beeinträchtigen.

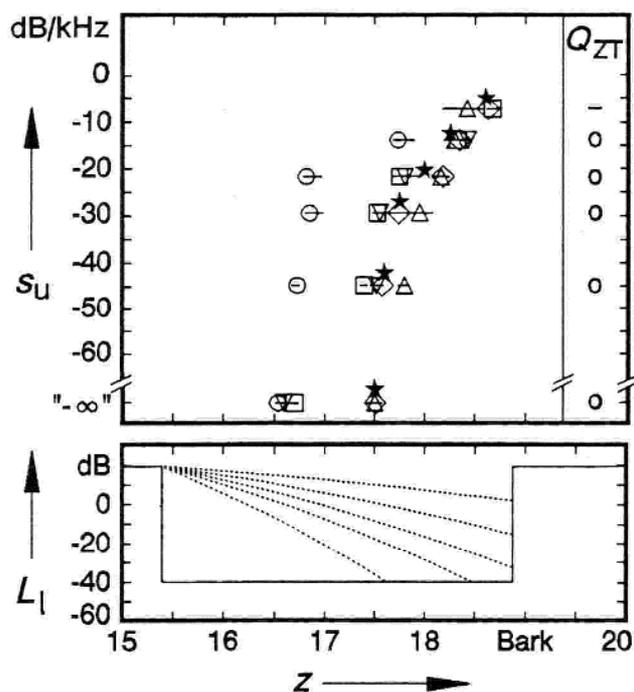


Fig. 15: oben: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlichen Steigungen s_u der unteren Flanke der spektralen Lücke zwischen 15,4 Bark (2900 Hz) und 18,9 Bark (5300 Hz). Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Darbietungspegel: 60 dB. unten: Pegel L_l der einzelnen Spektrallinien als Funktion der Tonheit z .

Wie in Abschnitt 3.4.3 bereits festgestellt, kann der Einfluß von spontanen Emissionen dadurch verhindert werden, daß sie von Spektrallinien überdeckt werden. Aus diesem Grund wurde die obere Grenze der Lücke um 1 Bark verringert. Die Schwebungsstellen sind zwar damit rein physikalisch noch nicht ganz verdeckt, die Ergebnisse in Fig. 15 zeigen aber, daß nun alle Versuchspersonen einen unbeeinflussten Zwicker-Ton wahrnehmen, dessen Tonhöhenverlauf ähnlich von der Steigung der unteren Flanke der Lücke abhängt wie in Fig. 14a. Bei betragsmäßig größeren Flankensteigungen als -30 dB/kHz ändert sich die Tonhöhe des Zwicker-Tones verhältnismäßig wenig, da die Mithörschwelle des Tiefpaßanteiles bei diesem Darbietungspegel dann flacher ist als die physikalische Steigung der Lücke (siehe Abschnitt 4.1), so daß das Gehör den Verlauf der unteren Lückengrenze nicht erkennt. Eine weitere Abflachung der unteren Flanke hingegen läßt den Zwicker-Ton zur oberen Lückengrenze wandern.

Das Linienspektrum mit einer spektralen Lücke zwischen 15,4 und 18,9 Bark wurde im folgenden weiter verwendet, um die Steigung s_o der oberen Lückengrenze zwischen 7,5 und 45 dB/kHz zu variieren. In Fig. 16 ist die spektrale Hüllkurve im unteren Teilbild skizziert. Die Erzeugerschalle wurden mit 40 dB dargeboten. Die unterschiedlichen Steigungen beeinflussten die Tonhöhe des Nachtones jedoch nicht und die Personen stellten dieselben Vergleichsfrequenzen ein wie bei einer Anregung mit sehr steilen Flanken der Lücke. Die Qualität wird mit einer Ausnahme bei 7,5 dB/kHz mit „gut“ bewertet.

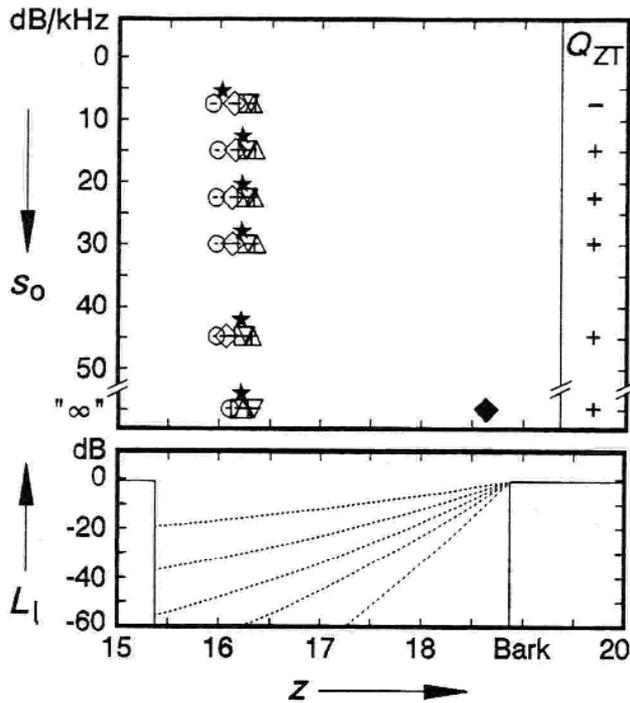


Fig. 16: oben: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei verschiedenen Steigungen s_0 der oberen Flanke der spektralen Lücke zwischen 15,4 Bark (2900 Hz) und 18,9 Bark (5300 Hz). Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Darbietungspegel: 40 dB. unten: Pegel L_1 der einzelnen Spektrallinien als Funktion der Tonheit z .

Da der Zwicker-Ton von der oberen Grenze der 3,5 Bark breiten Lücke sehr weit entfernt lag, wurde in einem weiteren Experiment die Flankensteilheit der unteren Lückenbegrenzung auf -15 dB/kHz festgelegt und die Steigungen s_0 der oberen Lückengrenze wiederum zwischen 7,5 und 45 dB/kHz verändert. Die entsprechende Lückenkonfiguration ist in Fig. 17 dargestellt. Der Darbietungspegel betrug 40 dB (a) bzw. 60 dB (b). Durch die verhältnismäßig geringe Steigung der unteren Flanke der Lücke wurde erreicht, daß bei steiler oberer Lückenbegrenzung der Nachton stark zu höheren Tonheiten hin verschoben und der Verlauf der Mithörschwelle auch bei hohen Pegeln im unteren Bereich der Lücke physikalisch vorgegeben wird. Die Tonhöhe deckt sich weitgehend mit den entsprechenden Angaben in Fig. 14a bzw. Fig. 15. Bei beiden Pegeln ist der Nachton noch „mittel“ wahrnehmbar, so daß der Vergleichssinuston von den Versuchspersonen trotz geringerer Lückentiefe noch ohne Schwierigkeiten eingestellt werden kann.

Eine Verringerung der Steigung der oberen Flanke bewirkt, daß die Tonhöhe des Nachtones zu tieferen Tonheiten hin verschoben wird. Die interindividuellen Unterschiede der Angaben sind verhältnismäßig gering, weil auch im oberen Bereich der Lücke die Mithörschwellen durch den physikalischen Verlauf der Flanke festgelegt werden. Ab Flankensteigungen kleiner als 30 dB/kHz geben die Versuchspersonen bei beiden Darbietungspegeln sogar annähernd dieselbe Tonhöhe des Zwicker-Tones an, da die Konfigurationen der Lücken identisch sind und kaum mehr durch Einflüsse individueller Ruhe- bzw.

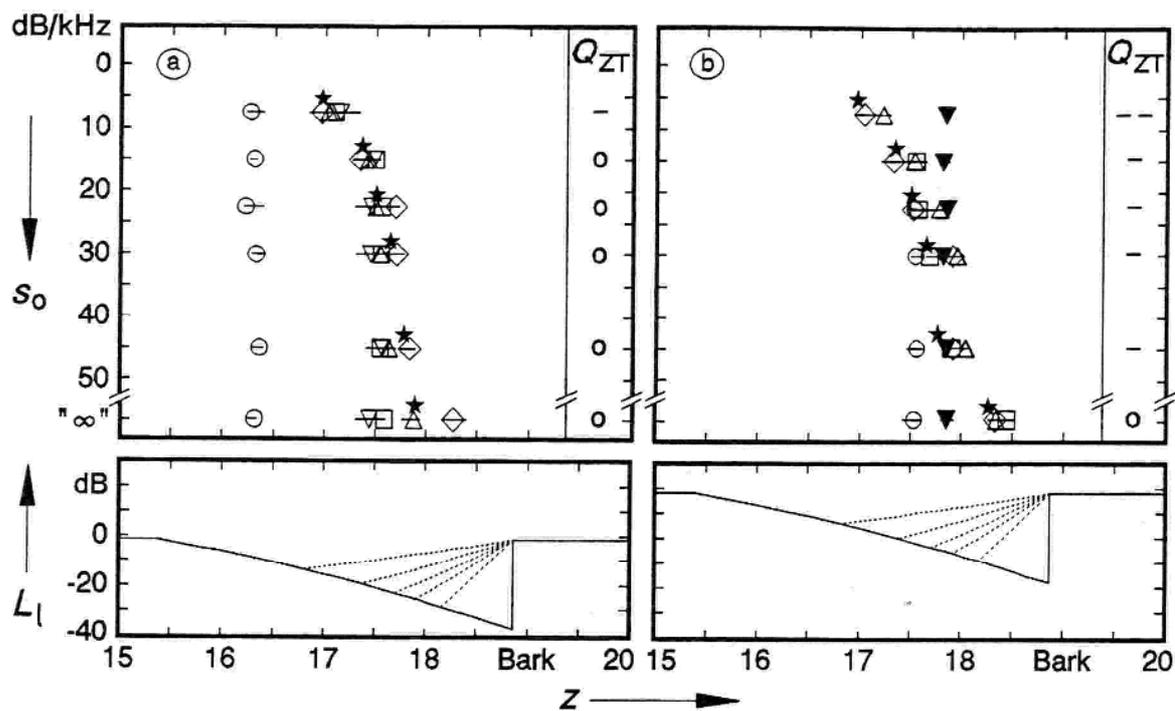


Fig. 17: oben: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei verschiedenen Steigungen s_0 der oberen Flanke der spektralen Lücke zwischen 15,4 Bark (2900 Hz) und 18,9 Bark (5300 Hz). Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Steigung der unteren Flanke: -15 dB/kHz. Darbietungspegel: 40 dB (a) bzw. 60 dB (b). unten: Pegel L_1 der einzelnen Spektrallinien als Funktion der Tonheit z .

Mithörschwellen gestört werden. Dies wird erreicht, indem die physikalischen Steigungen der Linienspektren flacher sind als diejenigen der Mithörschwelle des Gehörs. Ein Vergleich der Qualitätsangaben bei beiden Pegeln zeigt eindeutig, daß die Qualität des Zwicker-Tones zwar von der Tiefe der spektralen Lücke abhängt (siehe Abschnitt 3.4.4), der Qualitätsunterschied bei verschiedenen Darbietungspegeln aber dadurch allein nicht erklärt werden kann. Trotz gleichem Verlauf der Lücke wird bei einem Pegel von 60 dB der Nachton um jeweils eine Kategorie schlechter wahrgenommen. Zur Abschätzung der Qualität muß daher unter anderem neben der Lückentiefe auch der Darbietungspegel des Erzeugerschalles berücksichtigt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß der Nachton durch zunehmende Abflachung der unteren Flanke der Lücke ähnlich wie bei einer Pegelerhöhung des Erzeugerschalles zu höheren Tonheiten verschoben wird. Vor allem bei geringen Steigungen zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Tonhöhe des Zwicker-Tones vom individuellen Verlauf der Ruhehörschwelle [18]. Die Steilheit der oberen Flanke hat nur dann einen Einfluß auf den Zwicker-Ton, wenn dieser sich nahe an der oberen Lückengrenze befindet. Seine

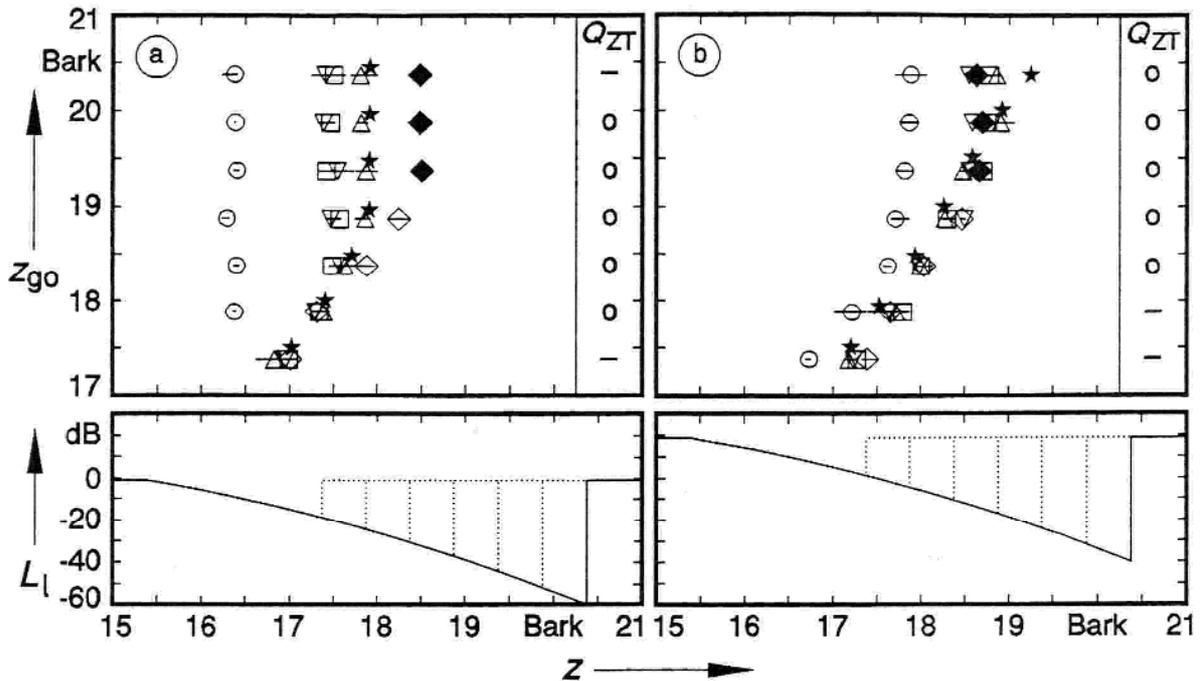


Fig. 18: oben: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlichen oberen Lückengrenzen der Tonheit z_{go} . Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Steigung der unteren Flanke der Lücke: -15 dB/kHz. Darbietungspegel: 40 dB (a) bzw. 60 dB (b). unten: Pegel L_l der einzelnen Spektrallinien als Funktion der Tonheit z .

Qualität wird durch die Tiefe der Lücke wie auch durch den Gesamtpegel des Erzeugerschalles bestimmt.

3.4.6 Variation der oberen Lückengrenze

In einer weiteren Versuchsreihe wurde schließlich bei einer Steigung der unteren Flanke von -15 dB/kHz die „steile“ obere Grenze der spektralen Lücke von $20,4$ Bark (6850 Hz) auf $17,4$ Bark (4100 Hz) in Schritten von jeweils $0,5$ Bark verschoben, um festzustellen, ab wann eine Beeinflussung des Zwicker-Tones durch die obere Lückengrenze z_{go} stattfindet. In Fig. 18 sind die spektralen Hüllkurven anhand des Pegels L_l einer Spektrallinie für einen Darbietungspegel von 40 dB (a) und 60 dB (b) dargestellt. Die untere Lückenbegrenzung lag bei $15,4$ Bark (2900 Hz), um die Ergebnisse mit den vorangegangenen Versuchen vergleichen zu können.

Gemäß Fig. 18a wird die Tonhöhe des Zwicker-Tones bei großen Lückenbreiten zunächst

nicht von der oberen Lückengrenze z_{go} verändert. Die interindividuellen Streuungen sind verhältnismäßig groß und deuten auf eine Beteiligung der Ruhehörschwelle an der Bildung der Tonhöhe des Nachtones hin, womit auch größere Abweichungen zu den berechneten Tonheitswerten (Sterne) begründet werden können. Die mit einer ausgefüllten Rhombe symbolisierten Angaben können auf eine Schwebungsstelle bei 18,5 Bark (5000 Hz) zurückgeführt werden, die bei einem z_{go} von 18,9 Bark (5300 Hz) an Einfluß verliert. Ab dieser oberen Lückengrenze macht sich eine weitere Verringerung der Lückenbreite durch eine Verschiebung des Zwicker-Tones zu kleineren Tonheitswerten hin bemerkbar. Personen, die einen etwas tieferen Nachton hören, reagieren sogar erst ab einer Grenze von 18,4 Bark (4850 Hz). Die eingestellten Vergleichsfrequenzen weichen nur noch wenig voneinander ab, da nun die Mithörschwelle des entsprechenden Hochpaßanteiles der Anregung (Steigung: 27 dB/Bark) zusammen mit der physikalisch vorgegebenen Mithörschwelle der unteren Flanke die Form der spektralen Lücke bestimmt. Bei einer Grenze von 17,4 Bark (4100 Hz) kann der Nachton aufgrund der geringen Lückentiefe nur „schlecht“ wahrgenommen werden. Noch schmalere Lücken weisen eine Tiefe unter 15 dB auf, so daß kein Zwicker-Ton mehr festgestellt werden konnte [18, 21].

Bei einem höheren Darbietungspegel (Fig. 18b) zeigt sich ein ähnliches Versuchsergebnis. Mit abnehmender oberer Grenze wandert der Nachton wieder zu tieferen Tonheiten. Die Angaben der Personen untereinander streuen sehr wenig und stimmen mit den nach dem Funktionsschema ermittelten Tonhöhen recht gut überein. Der Abstand zwischen oberer Lückenbegrenzung und Tonheit des Zwicker-Tones ist nicht konstant, sondern verringert sich wegen der flachen unteren Flanke der Lücke mit geringer werdender Lückenbreite zusehends.

Der Zwicker-Ton kann somit durch Variation der oberen Lückengrenze innerhalb gewisser Bereiche verändert werden. Ein Limit stellt zum einen die minimale Lückenbreite, zum anderen die Lückentiefe dar.

3.5 Linienspektrum mit spektraler Überhöhung als Erzeugerschall

Die bisher verwendeten Zwicker-Ton-Erzeugerschalle, seien es Bandsperre-Linienspektren oder bandpaß- bzw. tiefpaßbegrenzte Linienspektren, wiesen von tiefen Frequenzen ausgehend als charakteristisches Merkmal stets einen mehr oder weniger starken Übergang von hohem zu geringem Intensitätsdichtepegel bzw. Frequenzgruppenpegel auf. Im Frequenzbereich oberhalb dieses Pegelsprungs konnte dann ein Zwicker-Ton beobachtet werden. Demgegenüber ist bei einem Sprung von niedrigem zu hohem Pegel, wie dies an der unteren Grenze von Bandpaß-Linienspektren und bei Hochpaß-Linienspektren der Fall ist, kein unbeeinflußter Nachton wahrnehmbar. Es muß also - immer eine Betrachtungsrichtung von tiefen nach hohen Frequenzen hin vorausgesetzt - möglicherweise zunächst eine Anregung vorhanden sein, um durch einen Pegelsprung einen Zwicker-Ton erzeugen zu können. Aufgrund dieser Überlegungen setzte sich der Erzeugerschall für die nachfolgenden Versuche zunächst aus einem Grund-Linienspektrum bestehend aus harmonischen Spektrallinien konstanter Amplitude von 1 Hz bis 16 kHz zusammen. Dieser mit zufälliger Phasenverteilung generierte Schall ist vergleichbar mit periodischem Weißen Rauschen. Hierbei ergeben sich keine Unterschiede in Tonhöhe und Qualität des Zwicker-Tones, wenn statt des berechneten Grund-Linienspektrums ein entsprechendes thermisches Grundrauschen verwendet wird. Dieser Anregung wird mit Hilfe eines Addierverstärkers zusätzlich ein Sinuston bzw. ein schmalbandiges Linienspektrum hinzugefügt. Der Sinus wurde mit einem Funktionsgenerator (Wavetek 171) erzeugt, bei dem die Frequenz digital eingestellt werden konnte. Im folgenden werden die wichtigsten Parametereinflüsse dieses Erzeugerschalles mit spektraler Dichtepegelanhebung auf den Zwicker-Ton dargestellt [21, 24]. Der Einfluß von Schwebungsstellen ist bei dieser Anregung wesentlich geringer als bei Linienspektren mit spektraler Lücke.

3.5.1 Sinuston bei unterschiedlicher Frequenzlage

Ähnlich wie in Abschnitt 3.2 interessierte zunächst der Existenzbereich des Nachtones bei diesen Erzeugerschallen. Als Anregung diente ein Grund-Linienspektrum mit 40 dB

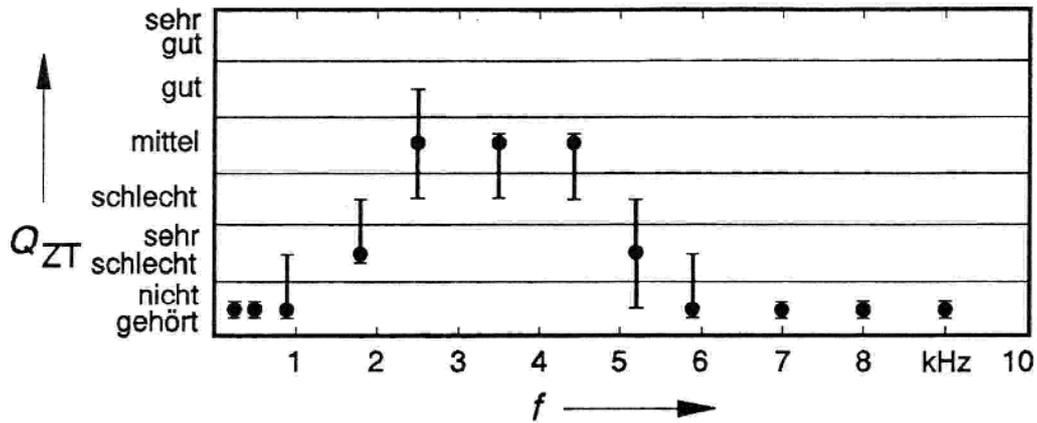


Fig. 19: Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones in Abhängigkeit von der Frequenz f . Zentralwerte (Kreise) und Wahrscheinliche Schwankungen (Balken). Pegel des Grund-Linienspektrums: 40 dB. Pegel des Sinustones: 60 dB.

Gesamtpegel, dem ein Sinuston mit 60 dB hinzuaddiert wurde. Dessen Frequenz wurde gemäß Fig. 19 in einem Bereich von 300 Hz bis 9 kHz variiert. Die Ergebnisse, welche sich aus den Angaben von 6 Versuchspersonen zusammensetzen, zeigen einen ähnlichen Verlauf wie in Fig. 3a (ausgefüllte Kreise). Bei Frequenzen unter 1 kHz wird kein Zwicker-Ton registriert. Zwischen 2,5 und 4,5 kHz kann der Nachton „mittel“ gehört werden, wobei der beste Zwicker-Ton um 2,5 kHz zu finden ist. Die Frequenz des anregenden Sinustones beträgt hierbei 3 kHz. Frequenzen über 6 kHz rufen bei den verwendeten Testpersonen kaum mehr einen Zwicker-Ton hervor. Insgesamt ist der akustische Nachton bei dieser Form der Anregung um etwa eine Kategorie schlechter wahrnehmbar und der Existenzbereich innerhalb der Hörfläche geringer als bei Erzeugerschallen mit spektraler Lücke [9, 24]. Das Optimum in einem Frequenzbereich, in dem auch die Ruhehörschwelle am empfindlichsten ist, bleibt jedoch erhalten.

3.5.2 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

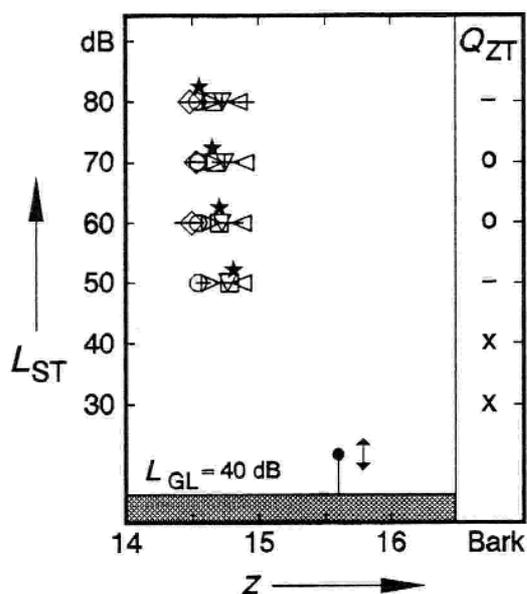


Fig. 20: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlichen Darbietungspegeln L_{ST} des Sinustones. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Berechnete Tonheiten (Sterne). Tonheit des Sinustones: 15,6 Bark (3000 Hz). Pegel des Grund-Linienspektrums L_{GL} : 40 dB.

Fig. 20 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 sehr günstig. Aus einem Gesamtpegel L_{GL} 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 verdeckt wird. Erst ab 50 dB kann ein Nachton „schlecht“ wahrgenommen werden. Die Differenz der Frequenzgruppenpegel zwischen 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 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 Anregungsschallen 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“

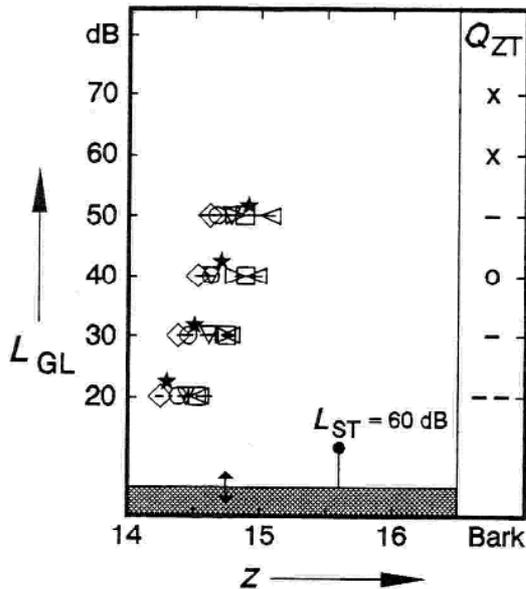


Fig. 21: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei verschiedenen Pegeln L_{GL} des Grund-Linienspektrums. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Berechnete Tonheiten (Sterne). Pegel des Sinustones: 60 dB. Tonheit des Sinustones: 15,6 Bark (3000 Hz).

wahrnehmbar ist. Die Tonhöhe des Zwicker-Tones befindet sich überraschenderweise stets unterhalb der Tonheit des Sinustones und verändert sich mit ansteigendem Darbietungspegel kaum. Die berechneten Tonheitswerte (Sterne) stimmen mit den Angaben der Personen im Mittel recht gut überein.

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. 21 dargestellten Ergebnisse. Bereits bei einem Pegel von 20 dB kann ein Nachton registriert werden. Seine Qualitätsbeurteilung ist allerdings „sehr schlecht“. Alle Versuchspersonen 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 Erzeugerschallen mit spektraler Lücke (siehe Fig. 10) für Pegel des Grund-Linienspektrums um 40 dB am besten. Diese Pegelverhältnisse wurden deshalb für die Bestimmung des Existenzbereiches im vorhergehenden Abschnitt verwendet. 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 Pegel L_{GL} etwas zu.

Beide Pegeluntersuchungen bestätigen somit übereinstimmend, daß ein Zwicker-Ton erst bei einem Unterschied der relevanten 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 Erzeugerschallen (Grund-Linienspektrum: 60 dB, Sinuston: 80 bzw. 90 dB) noch Zwicker-Töne der Kategorie „schlecht“ wahrgenommen werden. Die angegebenen Tonheiten des Nachtones befinden sich stets unterhalb der des Sinustones und wandern mit zunehmendem Pegel des Grund-Linienspektrums ein wenig auf ihn zu, während sie bei steigendem Pegel des Sinustones eher konstant bleiben.

3.5.3 Schmalbandiges Linienspektrum verschiedener Bandbreite

Vergleichbar mit der Breite der spektralen Lücke bei den „klassischen“ Zwicker-Tonerzeugerschallen 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 der spektralen Überhöhung. Die untere Grenze des Schmalband-Linienspektrums lag stets bei 15,6 Bark (3000 Hz), während die obere Begrenzung der gewählten Bandbreite entsprechend verschoben wurde. Der Erzeugerschall ist in Fig. 22 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

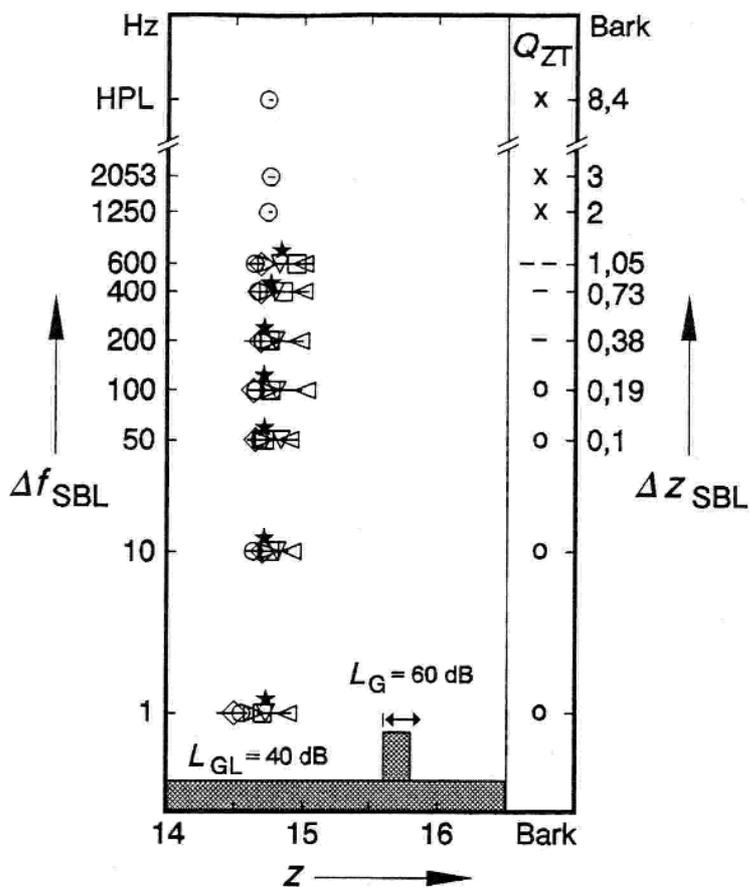


Fig. 22: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlichen Bandbreiten Δf_{SBL} bzw. Δz_{SBL} des Schmalband-Linienspektrums mit einer unteren Grenze von 15,6 Bark. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Berechnete Tonheiten (Sterne). Frequenzgruppenpegel L_G : 60 dB. Pegel L_{GL} des Grund-Linienspektrums: 40 dB.

ein Zwicker-Ton entsteht, nachdem ein hochpaßbegrenztes Linienspektrum alleine keinen Nachton erzeugt.

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 Bandbreite von den meisten Personen schließlich kein Zwicker-Ton mehr festgestellt werden kann. Ein Eigenversuch des Autors mit unterschiedlichen Darbietungspegeln ($\Delta z_{SBL} = 1$ Bark) brachte keine Qualitätsverbesserung, so daß die gewählten Pegelverhältnisse gemäß den vorangegangenen Untersuchungen bereits ein Optimum darstellten. Nur eine Versuchsperson nahm bei 2 und 3 Bark Bandbreite und sogar beim Hochpaß-Linienspektrum noch einen Nachton der Kategorie „schlecht“ wahr. Die eingestellten Vergleichsfrequenzen änderten sich aufgrund des konstanten Frequenzgruppenpegels kaum und stimmen mit den berechneten Werten (Sterne) gut überein.

Im Gegensatz zu den Erzeugerschallen mit spektraler Lücke, bei denen erst ab einer

minimalen Lückenbreite von etwa 1 Bark ein Zwicker-Ton innerhalb der Lücke zu hören ist, darf bei diesen Anregungsschallen die Bandbreite des Schmalband-Linienspektrums über eine Frequenzgruppe nicht hinausgehen. 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 stets unterhalb der unteren Grenze des Schmalband-Linienspektrums zu finden. Es wurde nie ein Vergleichssinuston bei höheren Frequenzen eingestellt.

Versuche mit verschiedener Bandbreite des Grund-Linienspektrums kombiniert mit einem Sinuston ergaben, daß bereits ein Tiefpaß-Linienspektrum, dessen Frequenzbereich sich bis zur Frequenz des Sinustones erstreckt, genügt, um einen Nachton hervorzurufen [10]. Bei weiterer Reduzierung der Bandbreite bei tiefen Frequenzen, zeigt sich bei Versuchen des Autors, daß die untere Mithörschwellenflanke des Sinustones berücksichtigt werden muß und ein unmaskiertes Bandpaß-Linienspektren von fünf Bark Breite frequenzmäßig unterhalb der Verdeckungskurve des Sinustones angeordnet ausreicht, um einen breitbandiger Anregung entsprechenden Zwicker-Ton zu erzeugen. Bei weiterer Verringerung der Bandbreite wird die Qualität des Nachtones zunehmend schlechter, bis bei einer unmaskierten Bandbreite von weniger als einem Bark schließlich kein Nachton mehr entsteht.

3.6 Nachton bei zeitlich strukturierter Darbietung des Erzeugerschalles

Nachdem in den vorausgegangenen Abschnitten die Auswirkungen der spektralen Eigenschaften des Erzeugerschalles auf Tonhöhe und Qualität des Zwicker-Tones eingehend beschrieben worden sind, wird nun auf die Einflüsse der Zeitstruktur der Anregung näher eingegangen. Dabei wurde bei diesen Untersuchungen stets darauf geachtet, daß das Amplitudenspektrum, insbesondere die spektrale Lücke des Erzeugerschalles abgesehen von beabsichtigten Variationen des Spektrallinienabstandes möglichst unverändert bleibt. Zunächst wird der Einfluß des Crestfaktors der Zwicker-Ton-Erzeugerschalle auf die Wahrnehmbarkeit des Nachtones dargestellt. Die Zeitstruktur der Anregung wird im zweiten Abschnitt zum einen durch unterschiedliche Spektrallinienabstände und damit verschie-

dene Periodendauern, zum anderen bei gleichem Spektrallinienabstand von 1 Hz durch die Wahl der Phase verändert. Im dritten Abschnitt wird die Zeitstruktur bei einem Linienabstand von 1 Hz und zufälliger Phasenverteilung durch eine gaußförmige Amplitudenmodulation verändert.

Die spektrale Lücke befand sich stets zwischen 3 und 5 kHz, da die Grenzfrequenzen der Lücke durch möglichst viele Frequenzabstände teilbar sein mußten, um ein harmonisches Linienspektrum mit konstanten Eckfrequenzen beibehalten zu können. Die Erzeugerschalle wurden jeweils mit 40 dB Gesamtpegel dargeboten. Zur Pegelmessung wurde ein Röhrenvoltmeter mit der Zeitkonstante „fast“ verwendet. Um zusätzliche Phasenverzerrungen zu vermeiden, wurde nach der Digital/Analog-Wandlung dieser Signale kein Tiefpaßfilter mehr nachgeschaltet.

3.6.1 Einfluß des Crestfaktors des Zeitsignales

Da in den vorangegangenen Versuchen stets Linienspektren mit statistisch gleichverteilten Phasenlagen Verwendung fanden, war zunächst der Einfluß der Zeitstruktur des entstehenden periodischen Rauschens auf den Zwicker-Ton von Interesse. Hierzu wurden Linienspektren mit 1 Hz Spektrallinienabstand berechnet, deren Phasenverteilung auf Randomgeneratoren unterschiedlicher Qualität beruhten. Eine schlechte Gleichverteilung der Phasen führt bei der Signalgenerierung zu einer Bevorzugung bestimmter Phasenwerte, so daß im Zeitsignal ausgeprägte Maxima und Minima entstehen. Als Maß hierfür wird der Crestfaktor, das Verhältnis von Spitzenwert zu Effektivwert angegeben. Hohe Crestfaktoren führen bei der D/A-Wandlung dazu, daß ein Rauschsignal trotz Vollaussteuerung des Wandlers nur mit geringem Effektivwert ausgegeben wird. Weißes Rauschen besitzt in der Regel einen Crestfaktor von etwa 4 [27, 34]. Die Ergebnisse von 6 Versuchspersonen sind in Fig. 23 eingetragen. Zusätzlich ist der Crest-Faktor der einzelnen Signale angegeben. Der erste Zwicker-Ton-Erzeugerschall, welcher mit Hilfe eines Zufallsgenerators berechnet wurde, der von Knuth [16] als RAN1 bezeichnet wurde, liefert eine sehr impulshaltige Zeitstruktur mit ausgeprägten Peaks und besitzt dadurch einen hohen Crestfaktor von 16,8. Dennoch ist der Nachton gut wahrnehmbar. Der zweite Anregungschall wurde mit dem

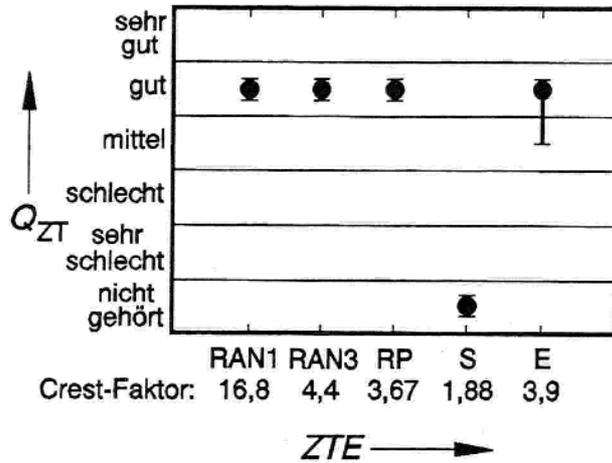


Fig. 23: Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlichen Zwicker-Ton-Erzeugerschallen (ZTE). Zentralwerte (Kreise) und Wahrscheinliche Schwankungen (Balken).

Zufallsalgorithmus RAN3 [16] generiert, der eine sehr gute Gleichverteilung der Phasen und damit einen Weißem Rauschen sehr ähnlichen Crestfaktor von 4,4 bewirkte. Dieser Algorithmus wurde daher in dieser Arbeit für alle Untersuchungen mit gleichverteilter Phasenlage verwendet. Der mit RP bezeichnete Erzeugerschall kam dadurch zustande, daß den einzelnen Spektrallinien statistisch gleichverteilt nur die beiden Phasenwerte Null und π zugeordnet wurden. Als Zufallsgenerator wurde hierbei die RANDOM-Funktion der Programmiersprache TURBO PASCAL verwendet, die eine sehr gute Gleichverteilung der beiden Phasen lieferte. Das entstehende Zeitsignal weist einen verhältnismäßig geringen Crest-Faktor auf und verursacht einen ebenfalls „gut“ hörbaren Zwicker-Ton.

Zusätzlich wurden in den Versuch zwei Signale mit deterministischen Phasenzuordnungen mitaufgenommen. Bei der mit S gekennzeichneten Anregung wurde die Schroeder-Phase nach Gl. 3 verwendet [26, 38]. Dadurch entsteht als Zeitfunktion ein Sinussweep mit einer Periodendauer von 1 Sekunde, welche einen sehr geringen Crestfaktor von nur 1,88 aufweist. Hier wurde der Nachton trotz des niedrigen Crest-Faktors von keiner Versuchsperson registriert. Beim Zwicker-Ton-Erzeugerschall E wurde schließlich die Phasenzuordnung empirisch so gewählt, daß ein Zeitsignal mit geringem Crest-Faktor entstand. Dem Nachton wird bei dieser Anregung auch die Kategorie „gut“ mit Tendenz „mittel“ zugewiesen.

Die Tonhöhe des Zwicker-Tones blieb infolge der identischen spektralen Lücke und des gleichen Darbietungspegels bei den verschiedenen Erzeugerschallen unverändert. Bei statistischen Phasenlagen scheint also die Wahl des Zufallsgenerators und damit der Crestfaktor und die Form der Zeitstruktur der Anregung für die Erzeugung eines Zwicker-Tones

weniger kritisch zu sein [19, 21]. Für den physikalischen Signalverlauf, besonders für die Digital/Analog-Wandlung bringt jedoch eine Zeitfunktion mit ausgeprägten Maxima und Minima erhebliche Nachteile mit sich, da das Signal trotz Vollaussteuerung des Wändlers nur einen geringen Effektivwert aufweist.

3.6.2 Zeitliche Struktur durch Wahl der Phasenlagen der Spektrallinien

Mit deterministischer Phasenzuordnung können Einflüsse der Zeitstruktur des Erzeugerschalles auf den Zwicker-Ton wesentlich deutlicher herausgearbeitet werden. In Fig. 24a sind die Ergebnisse von 8 Versuchspersonen bei Anregung mittels Linienspektren mit Nullphase dargestellt. Der im logarithmischen Maßstab aufgetragene Spektrallinienabstand wurde zwischen 2 Hz und 1 kHz variiert, so daß im Zeitbereich Impulse mit Periodendauern von 500 bis 1 Millisekunde entstanden. Bis zu einem Linienabstand von 5 Hz kann zunächst keine Person einen Nachton beobachten. Der zeitliche Abstand der Impulse von 200 ms und mehr ist vermutlich noch zu groß, um die Anregung entsprechend einzuprägen. Ab 10 Hz wird bereits ein Nachton wahrgenommen, dessen Qualität sich mit größerem Liniensabstand zunehmend verbessert, bis bei 100 Hz der Zwicker-Ton fast ebenso gut beurteilt wird wie bei Anregung mit Linienspektren, deren Phasen zufällig verteilt sind (siehe Fig. 23). Eine weitere Vergrößerung des Spektrallinienabstandes verschlechtert die Qualität des Nachtones wieder, da zwar der zeitliche Abstand der Impulse sehr gering wird, die Spektrallinien jedoch immer größere Frequenzabstände aufweisen, so daß bei 1 kHz die spektrale Lücke nur noch durch Weglassen einer einzigen Linie gekennzeichnet ist.

Aus dem bandpaßähnlichen Verlauf der Qualitätsverteilung könnte somit angenommen werden, daß für die Entstehung eines gut wahrnehmbaren Zwicker-Tones sowohl eine hohe Impulsrate im Zeitbereich als auch eine große spektrale Dichte der Linien vorhanden sein muß [19, 21]. Ein guter Kompromiß ist bei einem Spektrallinienabstand von 100 Hz erreicht. Nachdem sich der Erzeugerschall einige Sekunden lang einprägen muß, bis das Gehör adaptiert ist und nach dem Abschalten des Erzeugerschalles ein Zwicker-Ton entsteht, ist es leicht vorstellbar, daß diese Einprägung um so besser ist, je öfter das Gehör

mit einem Impuls angeregt wird, d. h. je höher die zeitliche Anregungsdichte des Erzeugerschalles ist. Ebenso zeichnet sich die spektrale Kontur des Linienspektrums mit Lücke im Gehör um so deutlicher ab, je geringer der Spektrallinienabstand ist bzw. je mehr Rezeptoren des Gehörs erregt werden [39, 40].

Ein Versuch mit statistisch gleichverteilten Phasen bekräftigt diese Hypothese. Gemäß Fig. 24b wurden dieselben Spektrallinienabstände gewählt wie beim vorangegangenen Experiment. Der Nachton kann nun bei Linienabständen unter 100 Hz jeweils „gut“ wahrgenommen werden, da die Forderung nach hoher zeitlicher Anregungsdichte bei diesem periodischen „Rauschen“ stets erfüllt ist. Da auch die Voraussetzung einer hohen spektralen Dichte gegeben ist, stellt Weißes Rauschen bzw. ein Linienspektrum mit einer spektralen Lücke, das einen geringen Spektrallinienabstand und statistisch gleichverteilte Phasen aufweist, wohl den besten Erzeugerschall dar. Eine Erhöhung des Linienabstandes über 100 Hz hinaus, bewirkt einen ähnlichen Qualitätsabfall wie bei den entsprechenden Linienspektren mit Nullphase, weil die Dichte der Spektrallinien zu gering wird.

Eine weitere Bestätigung obiger Annahmen stellen die Ergebnisse in Fig. 24c dar, welche durch Anregung mit einem analog erzeugten Gleitsinus erzielt wurden. Mit Hilfe eines VCO wurde die Anzahl A_e der Frequenzsweeps pro Sekunde zwischen 2 und 500 variiert. Im Frequenzbereich entstehen dadurch Spektrallinien, deren Abstände der Wiederholrate A_e entsprechen. Diese Linien sind jedoch spektral nicht so scharf abgegrenzt wie bei den digital erzeugten Linienspektren, sondern erscheinen in der Kurzzeitspektralanalyse wesentlich breiter und unschärfer. Die spektrale Lücke wurde mit sehr steilen Hoch- und Tiefpaßfiltern (92 dB/Oktave) mit einer Grenzfrequenz von 3 bzw. 5 kHz erzeugt.

Bei geringen Wiederholraten ist der Nachton zunächst nicht zu hören, ab 20 Sweeps pro Sekunde kann der Zwicker-Ton jedoch von den meisten Versuchspersonen festgestellt werden. Mit zunehmender Wiederholrate verbessert sich die Qualität des Nachttones ähnlich wie in Fig. 24a, bis sie bei 100 Sweeps pro Sekunde ihr Optimum erreicht hat. Aufgrund der spektralen Unschärfe, d.h. der wesentlich breiteren Spektrallinien im Kurzzeitspektrum dieser analog erzeugten Frequenzsweeps verändert sich die Qualitätsbeurteilung bei höherer Wiederholrate nicht mehr, so daß insgesamt ein hochpaßähnlicher Verlauf der Qualitätsangaben entsteht. Dieser ergänzt sich mit der Tiefpaß-Charakteristik von Fig. 24b recht gut zur Bandpaß-Struktur in Fig. 24a.

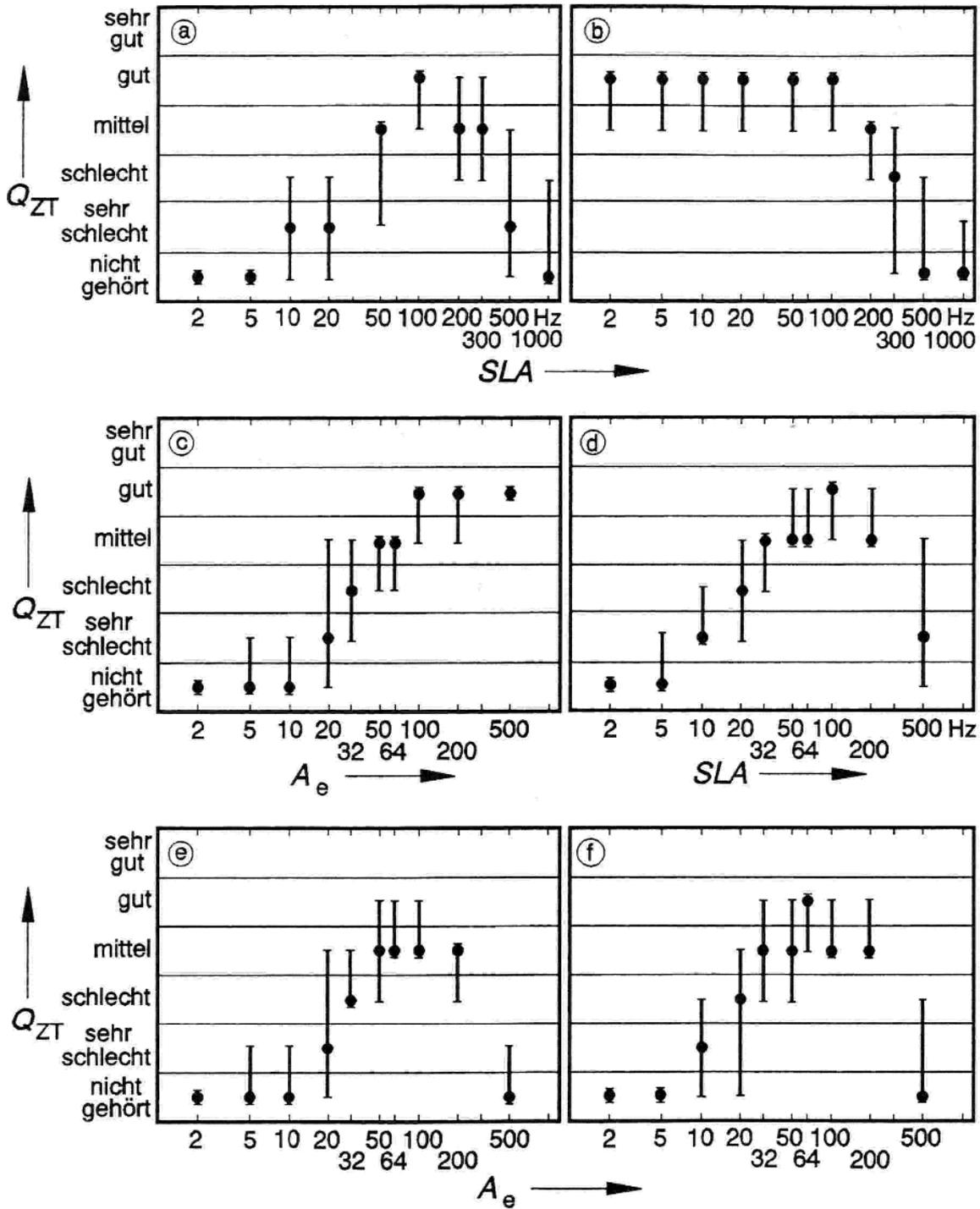


Fig. 24: Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei Linienspektren mit unterschiedlicher Phasenzuordnung. Zentralwerte (Kreise) und Wahrscheinliche Schwankungen (Balken). Spektrale Lücke zwischen 3 und 5 kHz. Darbietungspegel: 40 dB. a: Nullphase, $\varphi_n = 0$; b: zufällige Phase; c: Gleitsinus, analog mittels VCO erzeugt; d: Schroeder-Phase; e: Impulsfolge, $\varphi_n = \varphi_{nIF}$; f: Sweepfolge, $\varphi_n = \varphi_{nSF}$.

In einem weiteren Versuch wurden Linienspektren mit Schroeder-Phase als Anregung benutzt [19, 26]. Diese spezielle Phasenbeziehung gemäß Gl. 3 ist in der Literatur allgemein als Schroeder-Phase [38] oder als „Quadratischer Ansatz“ [33] bekannt. Letztendlich ist sie auf Ausführungen von Newman [31] zurückzuführen. Eingesetzt in Gl. 1 ergibt sich damit ein Zeitsignal in Form eines Sinussweeps über die gesamte Periodendauer. Diese wurde durch Verändern der Spektrallinienabstände in Anlehnung an Fig. 24c variiert. Bei Linienabständen unter 100 Hz zeigt sich in Fig. 24d ein vergleichbarer Verlauf wie beim analog erzeugten Gleitsinus. Der Zwicker-Ton scheint auch im Vergleich zu Linienspektren mit Nullphase (Fig. 24a) bei diesem Erzeugerschall etwas besser wahrnehmbar zu sein. Wiederum ist die beste Qualitätsangabe bei einem Spektrallinienabstand von 100 Hz zu finden. Bei größeren Linienabständen nimmt nun im Gegensatz zum Frequenzsweep in Fig. 24c die Qualität des Zwicker-Tones wieder ab, da dieses digital generierte Linienspektrum deutlich abgegrenzte Spektrallinien aufweist, deren Abstände für eine gute Konturisierung des Erzeugerschalles nicht mehr ausreichen. Die Form der Zeitfunktion an sich, ob Impuls oder Sweep, spielt hier nur eine geringe Rolle, was auch durch Aussagen von Neelen [30] bestätigt wird.

$$\varphi_n = \frac{\pi n^2}{A_{\text{leff}}} \quad (3)$$

$$\varphi_{nIF} = \frac{\pi n^2}{A_e} \quad (4)$$

$$\varphi_{nSF} = \frac{\pi n^2 (A_{\text{leff}} + 1)}{A_e A_{\text{leff}}} \quad (5)$$

Mit Hilfe von Gl. 4 und Gl. 5 können nun Impuls- bzw. Sweepfolgen berechnet werden, deren Wiederholrate innerhalb einer Periode durch A_e bestimmt wird (siehe hierzu [19, 21, 26]). Die Periodendauer beträgt aufgrund des Spektrallinienabstandes von 1 Hz stets eine Sekunde. A_{leff} beinhaltet die effektive Linienanzahl. Bei den bisher verwendeten Zeitsignalen (Fig. 24a bis d), deren Wiederholrate durch Variation des Spektrallinienabstandes festgelegt wurde, treten bei jedem Impuls bzw. Sweep stets dieselben

Spektrallinien auf. Bei mit Hilfe von Gl. 4 und Gl. 5 berechneten Impuls- bzw. Sweepfolgen, deren Wiederholrate A_e durch die Phase bestimmt wird, repräsentiert hingegen jeder Einzelimpuls bzw. jeder Sweep im Kurzzeitspektrum andere Harmonische aus dem Gesamtspektrum, deren Abstand durch A_e definiert ist [19, 21, 26]. Innerhalb eines Zeitfensters von 1 Sekunde treten jedoch alle Harmonischen einmal auf, so daß insgesamt ein Spektrallinienabstand von 1 Hz besteht.

Diese Signale wurden nun ebenfalls als Zwicker-Ton-Erzeugerschalle verwendet. Die Wiederholrate A_e wurde dem vorhergehenden Versuch mit Schroeder-Phase angepaßt. Die Angaben der Versuchspersonen bei einer Impulsfolge als Anregung in Fig. 24e ergeben eine ähnliche Bandpaß-Struktur wie in Fig. 24a, wobei der Zwicker-Ton allerdings etwas schlechter wahrnehmbar ist. Ein einzelner Impuls beispielsweise bei $A_e = 5$ besteht zwar aus Harmonischen im Abstand von 5 Hz, so daß eine hohe spektrale Dichte vorhanden wäre, es dauert aber 200 ms bis der nächste Impuls das Gehör anregt, so daß der zeitliche Abstand zu groß ist und der Erzeugerschall sich nicht genügend einprägen kann. Ein A_e von 500 bewirkt zwar im Zeitbereich eine hohe Impulsrate, ein Einzelimpuls repräsentiert jedoch Spektrallinien im Abstand von 500 Hz. Obwohl nicht jedesmal dieselben Linien dargeboten werden, sondern die Spektrallinien sich von Impuls zu Impuls um 1 Hz unterscheiden, so daß sie sich erst nach einer Sekunde wiederholen, reicht dies nicht aus, um bei den meisten Versuchspersonen noch einen Zwicker-Ton zu erzeugen.

Die Ergebnisse für Sweepfolgen in Fig. 24f zeigen einen ähnlichen Qualitätsverlauf. Das Qualitätsoptimum liegt allerdings in dieser Versuchsreihe bei 64 Sweeps pro Sekunde. Wie beim Vergleich der Teilbilder d und a deutet sich auch hier an, daß der Zwicker-Ton bei Anregung mit einem Sweep geringfügig besser wahrzunehmen ist als bei impulsförmigen Erzeugerschallen.

Die in diesem Abschnitt verwendeten Sinussweeps wiesen stets einen Sweep von tiefen zu hohen Frequenzen auf. Um Auswirkungen der Sweeprichtung auf den Zwicker-Ton untersuchen zu können, wurden Sweepfolgen mit verschiedenem Phasenvorzeichen generiert und mit einem Pegel von 60 dB dargeboten. Dieser höhere Pegel verursacht aufgrund der nichtlinearen Auffächerung einen unterschiedlichen Mithörschwellenverlauf der unteren und oberen Flanke der spektralen Lücke. Es konnte jedoch kein signifikanter Einfluß der Sweeprichtung auf Tonhöhe oder Qualität des Nachtones festgestellt werden.

Die Experimente von Neelen [30] mit DC-Pulsen, welche er in ihrer Wiederholrate und damit in ihrem Spektrallinienabstand veränderte, bestätigen im wesentlichen die hier gefundenen Ergebnisse. Fastl [7] führte ebenfalls Versuche mit DC-Impulsen unterschiedlicher Impulsdauer und Folgefrequenz durch. Seine Angaben decken sich ebenfalls weitgehend mit den Aussagen dieser Untersuchung. Allerdings fand er ein Qualitätsoptimum bei einer Wiederholfrequenz von 200 Hz, was möglicherweise ähnlich wie beim Gleitsinus auf die analoge Erzeugung der Signale zurückzuführen sein könnte.

Die Versuchsergebnisse dieses Abschnittes machen deutlich, daß zur Erzeugung eines gut wahrnehmbaren Zwicker-Tones sowohl die zeitliche Anregungsdichte als auch die Dichte der Spektrallinien möglichst hoch sein sollte. Diese im Prinzip gegenläufigen Bedingungen sind bei Wiederholraten von 100 Impulsen bzw. Frequenzsweeps pro Sekunde noch am besten erfüllt. Ebenso eignen sich daher Linienspektren mit geringen Spektrallinienabständen und zufällig verteilten Phasen bzw. Weißes Rauschen sehr gut zur Anregung eines Zwicker-Tones. Seine Tonhöhe ändert sich bei gleichem Darbietungspegel (Zeitkonstante: „fast“) trotz unterschiedlicher Linienabstände bzw. verschiedener Wiederholraten der Erzeugerschalle nicht (siehe [17]). Die Ausgeprägtheit der Tonhöhe der Zwicker-Töne ist jedoch bei großen Spektrallinienabständen ab 500 Hz schon sehr schlecht, so daß manche Versuchspersonen angeben, nur noch ein tonales Schmalbandrauschen oder Klingeln zu hören. Dieser Eindruck entsteht vor allem bei den Signalen in Fig. 24a und 24d mit einem Linienabstand von 500 Hz, bei denen jeder Impuls bzw. Sweep aus denselben Spektrallinien besteht, während bei der entsprechenden Impuls- bzw. Sweepfolge in Fig. 24e und 24f im Kurzzeitspektrum die Harmonischen ständig wechseln, so daß von den meisten Personen kein Nachton mehr wahrgenommen wird. Die Experimente von Zwicker [51] mit DC-Pulsen lieferten bei Wiederholraten von 750 Hz vergleichbare Aussagen.

3.6.3 Zeitliche Struktur durch Amplitudenmodulation

Der Zeitverlauf des Zwicker-Ton-Erzeugerschalles kann auch durch Amplitudenmodulation mehr oder weniger stark strukturiert werden. Es war in der folgenden Untersuchung hauptsächlich von Interesse, bei welchen Impuls/Pause-Kombinationen der Nachton auf-

tritt. Da eine der Voraussetzungen für einen möglichst guten Zwicker-Ton eine hohe spektrale Dichte der Anregung ist, wurde als Träger wieder ein Linienspektrum mit Spektrallinienabstand 1 Hz und statistisch gleichverteilten Phasen verwendet, welche mit dem Zufallsalgorithmus RAN1 berechnet wurden [16]. Die Signale wurden zur Vermeidung von Einschaltknacken mit einer gaußförmigen Übergangsfunktion moduliert [32, 57]. Die Lücke lag zwischen 15,9 Bark (3150 Hz) und 18,4 Bark (4850 Hz). Sie wurde infolge der gewählten Anstiegszeit der gaußförmigen Übergangsfunktion von 5 ms spektral nur wenig verändert. Der Darbietungspegel des mit Zeitkonstante „fast“ gemessenen Pulses betrug jeweils 40 dB. Die 6 Versuchspersonen hörten sich wie bei allen Sitzungen den gepulsten Erzeugerschall in Position 1 des Stufenschalters einige Sekunden lang an und schalteten selbständig auf Stufe 2, bei der sie den Zwicker-Ton wahrnehmen sollten. Die Personen konnten zwischen diesen Schalterpositionen mehrmals hin- und herschalten, bis sie den Vergleichssinuston ihrer Wahrnehmung entsprechend eingestellt und eine Qualitätsbeurteilung abgegeben hatten. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen sind in Fig. 25 in Matrixform dargestellt. Die Impulsdauer T_i wurde ebenso wie die Pausendauer T_p zwischen 10 ms und 3200 ms variiert. Mit einer zusätzlichen Pausendauer von 6400 ms war schließlich der Übergang zum ungepulsten Erzeugerschall gegeben, d.h. die entsprechenden Impulse beeinflussten sich mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr, so daß das Ergebnis mit einer Einzelanregung von 800, 1600 bzw. 3200 ms vergleichbar ist. Der Schwärzungsgrad der einzelnen Quadrate gibt an, wieviele Versuchspersonen den Zwicker-Ton bei der jeweiligen Impuls-/Pause-Kombination gehört haben. In der Mitte sind die Zentralwerte der Qualitätsbeurteilungen angegeben. Es wurden nur bei denjenigen Kombinationen Messungen durchgeführt, die durch ein Füllmuster gekennzeichnet sind.

Es lassen sich zunächst zwei grundlegende Tendenzen erkennen, anhand derer nicht untersuchte Impuls-/Pause-Zusammensetzungen zum Teil abgeschätzt werden können: Bei konstanter Pausendauer T_p (Zeilen) verbessert sich abgesehen von $T_p = 10$ ms mit zunehmender Impulsdauer die Qualität des Zwicker-Tones. Daher wird ein Nachton, der bei Pausendauern von 10, 20, 100 und 400 ms bereits die Qualität des Zwicker-Tones bei ungepulster Anregung erreicht hat (siehe Fig. 9a bzw. 11b), bei größeren Impulsdauern ebenfalls „gut“ wahrnehmbar sein. Umgekehrt verschlechtert sich meistens die Qualitäts-

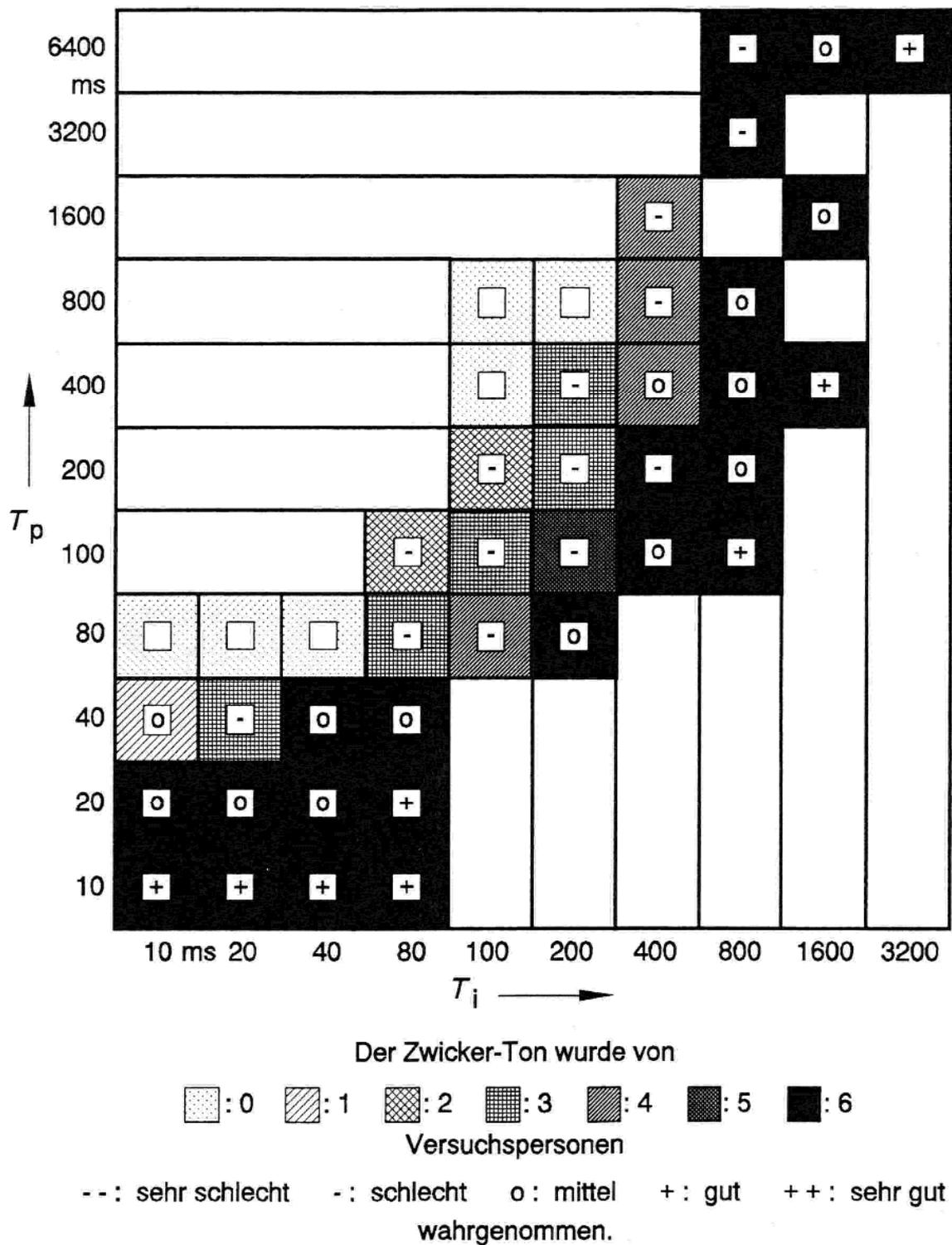


Fig. 25: Häufigkeit und Qualität des Nachtones bei unterschiedlichen Impulsdauern T_i und Pausendauern T_p . Spektrale Lücke zwischen 15,9 Bark (3150 Hz) und 18,4 Bark (4850 Hz). Darbietungspegel: 40 dB.

beurteilung bei konstanter Impulsdauer T_i (Spalte) mit steigenden Pausendauern, so daß der Zwicker-Ton bei 10, 20, 40, 100 und 200 ms langen Impulsen auch mit noch längeren Pausendauern als hier gemessen nicht mehr auftreten wird. Demgegenüber wird ein Nachton, der bei Impulsdauern von 800, 1600 und 3200 ms bereits „gut“ gehört wird, auch bei geringeren Pausen dieselbe Qualität erreichen. Auf diese Art und Weise können viele weiße Felder mit hoher Wahrscheinlichkeit richtig vervollständigt werden, so daß sich ein sehr anschauliches Bild über die Häufigkeit des Auftretens und die Qualitätsbeurteilungen des Zwicker-Tones bei verschiedenen Impuls-/Pause-Kombinationen ergibt. In dieser Versuchsreihe sollte vor allem der Übergang von der Kategorie „gut wahrgenommen“ zu „nicht gehört“ genauer untersucht werden, so daß in diesem Bereich die meisten Messungen stattfanden. Die Angaben bei einer Pausendauer von 6400 ms zeigen, daß die minimale Anregungsdauer zur Erzeugung eines Zwicker-Tones der Kategorie „gut“ zwischen 1600 und 3200 ms liegt. Hinsichtlich dieses Phänomens sind also verhältnismäßig lange Integrationszeiten im Sekundenbereich nötig.

Beim Vergleich der Qualitätsergebnisse einzelner Impuls-/Pause-Verhältnisse fällt auf, daß eine Darbietung des Erzeugerschalles mit kurzen Impuls- und Pausendauern häufig einen wesentlich besseren Zwicker-Ton erzeugt als eine Anregung mit entsprechend längeren Dauern. Betrachtet man z.B. einen 200 ms langen Zeitausschnitt der gepulsten Darbietung, so wird bei einer Impuls-/Pause-Kombination von 10 ms/10 ms der Zwicker-Ton „gut“ gehört, während die Qualitätsbeurteilung bei 100 ms/100 ms trotz einer gleichen physikalischen Gesamtdauer der Anregung von 100 ms wesentlich schlechter ist. Dieser Effekt ist auch beim Vergleich anderer Zusammensetzungen (wie 20 ms/10 ms, 40 ms/10 ms, 10 ms/20 ms, 20 ms/20 ms, 40 ms/20 ms, 80 ms/20 ms . . .) mit den im gleichen Verhältnis stehenden Kombinationen längerer Impuls- und Pausendauern beobachtbar. Lediglich bei 80 ms/10 ms bzw. 800 ms/100 ms trifft dieser Zusammenhang nicht zu, da ein 800 ms langer Impuls mit kurzer Pause bereits einen guten Zwicker-Ton erzeugt. Ein ähnliches Ergebnis erhält man, wenn man die Fig. 25 diagonal bei einem Impuls-/Pause-Verhältnis von 1 auswertet. Bei kurzen Dauern von 10 ms/10 ms, 20 ms/20 ms, 40 ms/40 ms besitzt der Nachton eine Qualität von „gut“ bis „mittel“, während sich bei Kombinationen um 100 ms/100 ms eine Qualitätssenkung ergibt. Längere Impulsdauern ab 400 ms verbessern die Qualität des Nachtones wieder.

Ein höherer Darbietungspegel der gepulsten Anregung von 60 dB führt zu vergleichbaren Aussagen der Versuchspersonen. Ebenso liefert ein amplitudenmodulierter Erzeugerschall mit einer spektralen Lücke zwischen 13,1 Bark (2000 Hz) und 15,6 Bark (3000 Hz) bei einem Pegel von 40 dB sehr ähnliche Ergebnisse, so daß die oben diskutierten Besonderheiten bei gepulsten Erzeugerschallen weitgehend unabhängig von der Lage der Lücke und dem Darbietungspegel auftreten [20, 21].

Zwicker führte ebenfalls Experimente mit zeitlich gepulstem Rauschen durch und stellte fest, daß bei einer Impulsdauer von 100 ms und einer über 3 Sekunden langen Pause zunächst noch kein Nachton zu hören ist, bei einer Impuls- und Pausendauer von 100 ms jedoch schon während der Anregung ein leiser kontinuierlicher Ton wahrzunehmen ist [51]. Eine Impuls-/Pause-Kombination von 500 ms/500 ms verursacht einen bereits innerhalb der Pause wahrnehmbaren Nachton. Dieser Effekt trat bei den Versuchen gemäß Fig. 25 bereits ab einer Pausendauer von 400 ms auf. Lummis und Guttman boten bei ihren Untersuchungen den Versuchspersonen den Erzeugerschall mit einer Anregungsdauer von 4 Sekunden und einer Pausenzeit von 1 Sekunde an, so daß ihre Ergebnisse denen bei ungepulster Anregung entsprechen dürften [28].

Die Tonhöhe des Zwicker-Tones ist nur von der spektralen Hüllkurve des Erzeugerschalles abhängig und änderte sich daher bei den verschiedenen Impuls-/Pause-Kombinationen nicht. Diese Tatsache kann als Indiz dafür angesehen werden, daß signaltheoretisch die spektrale Lücke durch die Modulation nicht merklich verändert wurde. Eine stärkere Abflachung der Flanken der Lücke müßte nämlich gemäß Abschnitt 3.4.5 eine Tonhöhenverschiebung zur Folge haben. Die Qualität des Zwicker-Tones hängt jedoch sehr stark von der entsprechenden Impuls-/Pause-Kombination ab [20].

Resultierend kann festgehalten werden, daß eine Darbietung des Erzeugerschalles mit Impuls- und Pausendauern im 10-Millisekunden-Bereich einen wesentlich besseren Zwicker-Ton hervorruft als eine Amplitudenmodulation mit Zeitdauern um 100 Millisekunden. Lange Impulse ab etwa 1 Sekunde mit Pausen in derselben Größenordnung verursachen schließlich wieder einen Nachton, dessen Qualität sich kaum von der bei ungepulster Anregung unterscheidet.

3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Von 100 Versuchspersonen konnten 94% den akustischen Nachton wahrnehmen. Er ist in einem Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 8 kHz zu hören. Der Zwicker-Ton kann bereits durch ein nur 1 Bark breites Bandpaß-Linienspektrum hervorgerufen werden, wobei sich seine Qualität bis zu einer Bandbreite des Erzeugerschalles von 5 Bark ständig verbessert und die Tonhöhe bei gleichem Frequenzgruppenpegel nahezu unverändert bleibt. Der Nachton wird stets über der oberen Grenze des Bandpasses wahrgenommen. Ein zusätzlicher Hochpaßanteil steigert die Qualität des Zwicker-Tones um eine Kategorie, so daß ein Bandsperre-Linienspektrum mit einer mindestens 5 Bark breiten Anregung ober- und unterhalb der spektralen Lücke den besten Zwicker-Ton-Erzeugerschall darstellt. Die optimale Breite der Lücke liegt zwischen 2 und 5 Bark. Es tragen also zur Entstehung des akustischen Nachtones innerhalb und außerhalb der spektralen Lücke bis zu fünf Frequenzgruppen bei.

Die minimal notwendige Tiefe der Lücke beträgt 15 dB und ist weitgehend unabhängig von der Lage der Lücke und dem Darbietungspegel. Die Qualität des Nachtones verbessert sich mit zunehmender Tiefe bis etwa 30 dB.

Bei einem Gesamtpegel des Erzeugerschalles von 40 dB ist der Zwicker-Ton in einem Frequenzbereich zwischen 2 und 4 kHz „gut“ mit Tendenz „sehr gut“ wahrnehmbar. Seine Tonhöhe befindet sich dabei etwa 0,7 bis 1 Bark über der unteren Lückengrenze und wandert mit steigendem Pegel zur oberen Grenze der spektralen Lücke. Gleichzeitig nimmt die Qualität des Nachtones laufend ab, bis er bei einem Pegel von 80 dB nicht mehr auftritt.

Ebenso kann die Tonhöhe des Zwicker-Tones durch eine Abflachung der unteren Flanke der spektralen Lücke zu höheren Tonheiten hin verschoben werden. Seine Qualität verschlechtert sich dabei erst bei sehr flachem Abfall infolge der geringeren Lückentiefe. Die Steigung der oberen Lückenbegrenzung ist nur dann von Bedeutung, wenn der Zwicker-Ton durch eine entsprechende Konfiguration der Lücke im Einflußbereich der Mithörschwelle der oberen Flanke liegt. Diese Bedingung muß auch erfüllt sein, wenn die Lage der oberen Lückengrenze den Zwicker-Ton verändern soll. In allen Fällen wird die Tonhöhe des Nachtones von den Grenzen der Lücke weggeschoben.

Bei allen Experimenten zeichnet sich neben einer starken Beeinträchtigung des Zwicker-

Tones durch spontane oto-akustische Emissionen ein deutlicher Einfluß der individuellen Ruhehörschwelle und der Mithörschwellen innerhalb der spektralen Lücke ab. Der Nachton wird nicht emittiert und kann daher nicht physikalisch per Sonde gemessen werden.

Ein Zwicker-Ton kann auch mit einem Grundrauschen erzeugt werden, dem ein Sinuston bzw. schmalbandiges Linienspektrum als spektrale Überhöhung hinzuaddiert wird, wenn dessen Bandbreite 1 Bark nicht überschreitet. Der Existenzbereich des Nachtones deckt sich für diese Erzeugerschalle in etwa mit dem für Erzeugerschalle mit spektraler Lücke. Insgesamt ist der Zwicker-Ton jedoch um eine Kategorie schlechter wahrnehmbar, das Qualitätsoptimum bleibt in einem Frequenzbereich zwischen 2 und 4 kHz, in dem auch die Ruhehörschwelle der Personen am tiefsten ist.

Ein Pegel des Grundrauschens von 40 dB (Frequenzgruppenpegel um 3 kHz: 25 dB) hat sich als sehr günstig erwiesen, da bei zu niedrigem Darbietungspegel die Anregung zu gering ist. Die Differenz der Frequenzgruppenpegel von Grundrauschen und spektraler Überhöhung sollte zwischen 35 und 45 dB liegen. Der Zwicker-Ton ist ab einer minimalen Differenz zwischen den relevanten Frequenzgruppenpegeln von 25 dB hörbar. Diese liegt somit um 10 dB höher als bei Anregung mit spektraler Lücke. Die Tonheit des Nachtones befindet sich stets **unterhalb** der der spektralen Überhöhung und ändert sich mit zunehmendem Pegel nur wenig. Der Einfluß von Schwebungsstellen ist bei diesen Erzeugerschallen wesentlich geringer als bei Linienspektren mit spektraler Lücke.

Ein Sinuston ohne ein zusätzliches Grundrauschen erzeugt keinen Zwicker-Ton, ein mindestens frequenzgruppenbreites Linienspektrum alleine kann hingegen nach Abschnitt 3.4.1 einen Nachton hervorrufen, dessen Vergleichsfrequenz jedoch **über** der oberen Grenzfrequenz liegt. Bei Bandsperresignalen befindet sich der Nachton stets **innerhalb** der spektralen Lücke.

Der zeitliche Verlauf des Erzeugerschalles an sich spielt für die Entstehung eines Nachtones nur eine untergeordnete Rolle. Die Qualität des Zwicker-Tones unterscheidet sich bei Anregung mit so gegensätzlichen Zeitsignalen wie Impulsfolgen und Sweepfolgen nur unwesentlich. Wichtig ist vielmehr, wie häufig und wie viele Rezeptoren des Gehörs pro Zeiteinheit angeregt werden. Für einen gut wahrnehmbaren Zwicker-Ton muß sowohl die zeitliche Dichte der Anregung als auch die spektrale Liniendichte möglichst hoch sein.

Dies wird für Linienspektren mit deterministischer Phasenzuordnung bei einem Spektrallinienabstand von etwa 100 Hz am besten erreicht. Ebenso eignen sich als Zwicker-Ton-Erzeugerschalle sehr gut Linienspektren mit zufälliger Phasenverteilung und geringen Spektrallinienabständen, da sie ebenfalls obige Bedingungen erfüllen.

Der Einfluß der Anregungsdauer auf die Qualität des Zwicker-Tones kann mit Hilfe von amplitudenmodulierten Linienspektren mit zufälligen Phasen studiert werden. Kurze Impuls- und Pausendauern im Bereich von einigen 10 Millisekunden verursachen einen fast genauso gut hörbaren Zwicker-Ton wie ein gleichartiger ungepulster Erzeugerschall. Längere Zeiten um 100 ms hingegen bewirken trotz gleichen äquivalenten Dauerschallpegels eine wesentlich schlechtere Qualität des Nachtones, die sich erst ab Dauern um 400 ms wieder verbessert. Einzelimpulse mit Darbietungsdauern zwischen 1600 und 3200 ms reichen aus, um eine ebenso gute Qualität wie bei unmodulierter Anregung zu erhalten, so daß die für dieses Phänomen relevanten Integrationszeiten des Gehörs im Bereich von wenigen Sekunden zu suchen sind. Insgesamt ist festzustellen, daß die Qualität des Zwicker-Tones sich sowohl mit steigender Impulsdauer als auch mit abnehmender Pausendauer verbessert. Je mehr sich also die zeitliche Hüllkurve der des ungepulsten Erzeugerschalles nähert, desto besser wird die Qualitätsbeurteilung.

Die Tonhöhe des Zwicker-Tones ist bei Pegelmessung mit der Zeitkonstante „fast“ nicht nur unabhängig von der Zeitstruktur und der zeitlichen Darbietung des Erzeugerschalles, sondern ändert sich auch bei verschiedenen Spektrallinienabständen nicht wesentlich, solange die spektrale Lücke in Form und Lage konstant bleibt. Die Tonhöhe dieses Phänomens wird somit nur von der spektralen Hüllkurve des Erzeugerschalles bestimmt.

4. Funktionsschema anhand von Mithörschwellenmustern

Ein Funktionsschema gibt im allgemeinen die Beziehung zwischen dem physikalischen Reiz, z.B. einem bandsperrengefilterten Rauschen und der hervorgerufenen Empfindungsgröße wie etwa der Tonhöhe des Zwicker-Tones an. Hiermit sollte man also bei entsprechender Kenntnis der physikalischen Parameter des Erzeugerschalles in der Lage sein, die Tonhöhe des Nachtones zu berechnen und qualitativ angeben können, wie gut der Zwicker-Ton wahrzunehmen ist. Dies gilt sowohl für stationäre als auch für zeitlich gepulste Anregung. Die Herleitung des Funktionsschemas erfolgt zweckmäßigerweise anhand gehörspezifischer Eigenschaften. Als sehr brauchbares Maß sowohl für das zeitliche als auch das spektrale Auflösungsvermögen des Gehörs haben sich Mithörschwellenmuster erwiesen [2, 4], die deshalb als Grundlage des Funktionsschemas herangezogen werden.

Dieses Kapitel beschreibt zunächst die psychoakustischen Grundlagen, um aus einer vorgegebenen physikalischen Anregung das entsprechende Mithörschwellen-Tonheitsmuster zu konstruieren. Auf dieser Basis wird ein Funktionsschema vorgestellt, mit dem die im Kapitel 3 angegebenen Tonheitswerte (Sterne) berechnet wurden. Einzelne Ergebnisse dieser Modellvorstellung werden nochmals mit Angaben von Versuchspersonen unter Einbeziehung der individuellen Ruhehörschwellen verglichen. Im Abschnitt 4.4 erfolgt im wesentlichen eine Zusammenfassung, in der das Funktionsschema mit Hilfe des dreidimensionalen Mithörschwellen-Tonheits-Zeitmusters dargestellt wird.

4.1 Mithörschwellen-Tonheitsmuster und deren Berechnung

Mithörschwellen stellen die Grundlage für die Beschreibung zahlreicher Empfindungsgrößen dar. Obwohl sie zunächst nur ein Meßergebnis repräsentieren, nämlich denjenigen Pegel eines Testtones, bei dem dieser zusätzlich zu einem Maskierer gerade noch gehört wird, spiegelt sich in ihnen doch das zeitliche und spektrale Auflösungsvermögen des Gehörs wieder [2, 4]. In diesem Abschnitt wird daher der prinzipielle Verlauf einiger Mithörschwellen im Frequenz- bzw. Tonheitsbereich erläutert, so daß die für das

Funktionsschema notwendigen Schwellen ohne zusätzliche Messungen in guter Näherung berechnet werden können. Detaillierte Beschreibungen können bei Zwicker und Feldtkeller [55], Zwicker [52] wie auch bei Zwicker und Fastl [54] nachgelesen werden.

Zunächst wird vorab der bereits im Kapitel 3 häufig verwendete Begriff Tonheit genauer erklärt und schließlich auf Mithörschwellenmuster von Schmalbandrauschen und Sinustönen näher eingegangen. Das Gehör zerlegt den wahrgenommenen Schall spektral in Frequenzabschnitte unterschiedlicher Bandbreite. Spektralanteile innerhalb dieser sogenannten Frequenzgruppen werden vom Gehör zusammen ausgewertet und tragen so gemeinsam zur Bildung der Mithörschwelle bei. Die Frequenzgruppenbreite Δf_G besitzt bei Frequenzen unter 500 Hz einen konstanten Wert von 100 Hz, während sie bei höheren Frequenzen in etwa mit 20 % der Mittenfrequenz anwächst. Werden diese Abschnitte lückenlos aneinandergereiht und so durchnummeriert, daß der entsprechende Zahlenwert die Anzahl der aneinandergfügten Frequenzgruppen angibt, so erhält man die Tonheitsskala z mit der Einheit Bark. Der gesamte Hörbereich bis 16 kHz läßt sich auf diese Art in 24 Frequenzgruppen einteilen. In Fig. 26 wird diese Transformation verdeutlicht.

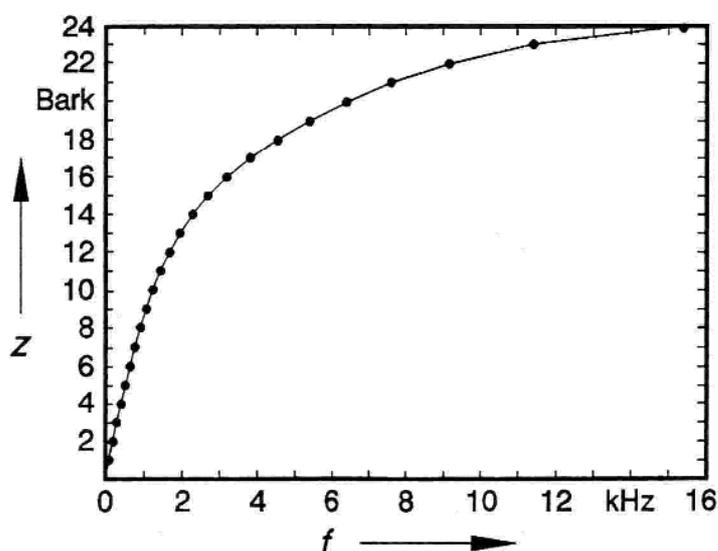


Fig. 26: Zusammenhang zwischen Tonheit z und Frequenz f (nach Zwicker 1982).

Über der linear aufgetragenen Frequenz ist die Tonheit z dargestellt. Die Punkte kennzeichnen jeweils Frequenzgruppengrenzen. Bis 500 Hz verläuft der Anstieg aufgrund der absolut konstanten Frequenzgruppenbreite zunächst linear und setzt sich dann wegen der relativ konstanten Analysebandbreite des Gehörs bogenförmig fort. Die Verbindung der einzelnen Punkte durch Geradenstücke soll andeuten, daß die Tonheit z nicht nur aus ganzzahligen Werten besteht, sondern beliebige Zwischenwerte annehmen kann, so daß

obige Kurve als Transformationskennlinie aufgefaßt werden kann. Für diesen Zusammenhang wurde von Zwicker und Terhardt [56] ein analytischer Ausdruck gemäß Gl. 6 vorgestellt, mit dessen Hilfe eine Frequenz-Tonheits-Umrechnung auch im Rechner durchgeführt werden kann. Allerdings ist diese Gleichung nicht umkehrbar, weshalb Traunmüller [44] eine etwas genauere rekursive Formel angibt. In den hier vorgestellten Untersuchungen wurde die Tonheit z jedoch stets nach Gl. 6 berechnet.

$$\frac{z}{\text{Bark}} = 13 \arctan\left(0,76 \frac{f}{\text{kHz}}\right) + 3,5 \arctan\left(\frac{f}{7,5 \text{ kHz}}\right)^2 \quad (6)$$

Die Frequenzgruppenbreite Δf_G , welche von Zwicker [49, 50] bei verschiedenen Frequenzen tabellarisch erfaßt wurde, kann mit Gl. 7 ermittelt werden [56].

$$\frac{\Delta f_G}{\text{Hz}} = 25 + 75 \left[1 + 1,4 \left(\frac{f}{\text{kHz}} \right)^2 \right]^{0,69} \quad (7)$$

Die Frequenzgruppen des Gehörs besitzen nicht etwa feste Mittenfrequenzen. Der Schallreiz wird vielmehr je nach seiner Frequenzlage und spektralen Zusammensetzung innerhalb von Frequenzgruppen entsprechender Bandbreite ausgewertet. Durch die Transformation der Frequenz in die Tonheitsskala wird erreicht, daß diese Analyseintervalle jeweils gleiche Breite aufweisen und zugehörige Mithörschwellenmuster dadurch entlang der Abszisse verschoben werden können, ohne daß sich ihr Verlauf ändert. Es genügt deshalb, pegelabhängige Messungen bei einer bestimmten Tonheit vorzustellen, da die Kurvenverläufe bei anderen Tonheitslagen durch parallele Verschiebung entlang der Abszissenachse ermittelt werden können, wobei der Einfluß des Verdeckungsmaßes a_v noch zu berücksichtigen ist. In Fig. 27 ist der gerade noch wahrnehmbare Pegel L_T eines Testtones bei Maskierung durch ein frequenzgruppenbreites Rauschen um 8,5 Bark (1 kHz) aufgetragen. Der Frequenzgruppenpegel oder Anregungspegel L_G des Schmalbandrauschens wurde zwischen 20 dB und 100 dB variiert.

Bei Anregungspegeln unter 40 dB kann dieses Mithörschwellen-Tonheitsmuster noch als symmetrisch angesehen werden. Die oberen und unteren Flanken des Mithörschwellenmusters weisen eine Steigung von etwa 27 dB/Bark auf. Mit zunehmendem Pegel bleibt die untere Flankensteilheit konstant, die obere Flanke hingegen wird immer flacher. Diese

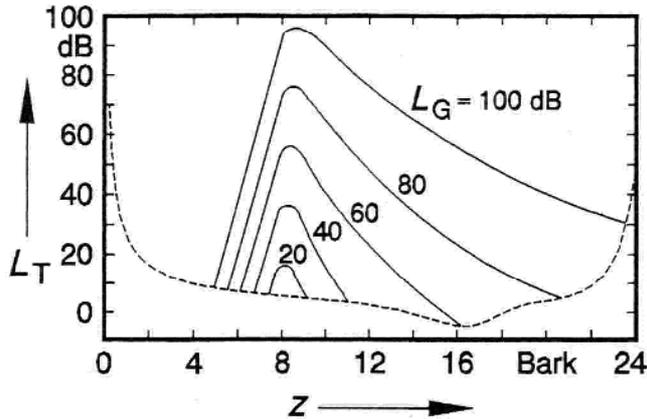


Fig. 27: Pegel L_T eines gerade wahrnehmbaren Testtones verdeckt durch frequenzgruppenbreites Rauschen bei 8,5 Bark mit unterschiedlichem Anregungspegel L_G (nach Zwicker 1982).

Eigenschaft der Mithörschwelle, die als nichtlineare Auffächerung bezeichnet wird, spielt für die Tonhöhenbestimmung des Zwicker-Tones bei unterschiedlichen Darbietungspegeln des Erzeugerschalles eine wichtige Rolle. Bei der Berechnung der Mithörschwellenmuster von Erzeugerschallen mit spektraler Lücke ist jedoch zu beachten, daß die untere Flanke der Lücke der hier dargestellten oberen Flanke der Mithörschwelle des Schmalbandrauschens entspricht, so daß die nichtlineare Auffächerung dementsprechend an der unteren Flanke der spektralen Lücke stattfindet. Das Maximum des Testtonpegels L_T befindet sich jeweils 3 dB unter dem zugehörigen Frequenzgruppenpegel. Zu niedrigen Pegeln hin wird das Mithörschwellenmuster stets von der Ruhehörschwelle begrenzt. Die hier eingetragene „Normruhehörschwelle“ entspricht einer von Terhardt et al. [42] vorgeschlagenen Formel.

$$\frac{L_{RHS}}{dB} = 3,64 \left(\frac{f}{kHz} \right)^{-0,8} - 6,5 \exp \left[-0,6 \left(\frac{f}{kHz} - 3,3 \right)^2 \right] + 10^{-3} \left(\frac{f}{kHz} \right)^4 \quad (8)$$

Ein etwas anderes Mithörschwellenmuster zeigt sich gemäß Fig. 28 für einen einzelnen Sinuston der Tonheit 8,5 Bark (1 kHz) als Maskierer, dessen Pegel L_{ST} von 20 bis 90 dB verändert wurde. Diese infolge auftretender Schwebungen und Verzerrungen schwer meßbare Hörschwelle besitzt pegelabhängige untere Flanken, deren Steigungen bei kleinen Pegeln geringer sind als bei großen, so daß der Eindruck entsteht, als würden sich alle Linien an einem Punkt auf der Ruhehörschwelle treffen. Bei den oberen Flanken ist wiederum die nichtlineare Auffächerung beobachtbar, wobei die Verläufe sich jedoch etwas von denen in Fig. 27 unterscheiden. Das Verdeckungsmaximum ist zwar ebenfalls stark ausgeprägt, entspricht aber nicht mehr dem Pegel des maskierenden Sinustones, sondern

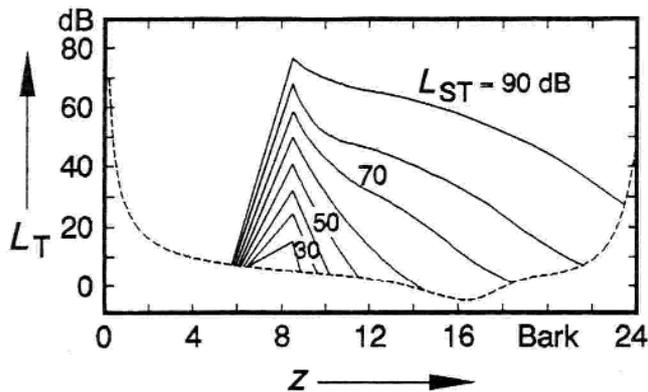


Fig. 28: Pegel L_T eines gerade wahrnehmbaren Testtones verdeckt durch einen Sinuston bei 8,5 Bark mit verschiedenem Pegel L_{ST} (nach Zwicker 1982).

liegt etwa 10 dB darunter. Diese Unterschiede zwischen Sinuston und Schmalbandrauschen als Maskierer werden von Zwicker und Fastl [54] dadurch erklärt, daß man sich das frequenzgruppenbreite Rauschen auch aus vielen einzelnen Sinuslinien zusammengesetzt vorstellen kann, welche eine große Anzahl von zusätzlich maskierenden Differenztönen produzieren. Tatsächlich kann man durch eine sinnvolle Aneinanderreihung von nur fünf Sinuslinien ein Mithörschwellenmuster messen, dessen untere Flanke derjenigen des Musters für Schmalbandrauschen sehr ähnlich ist.

Unter Berücksichtigung der dargestellten spektralen Eigenschaften können die Mithörschwellen-Tonheitsmuster für die entsprechenden Zwicker-Ton-Erzeugerschalle nun ohne zusätzliche Messungen berechnet werden. Anhand eines Beispiels sind die einzelnen Schritte in Fig. 29 skizziert. Den Ausgangspunkt stellt der physikalische Reiz, ein Linienspektrum mit einer Lücke zwischen 1 und 2 kHz, dar. Über der linear aufgetragenen Frequenz ist der Pegel L_l einer einzelnen Spektrallinie angegeben. Mit einer effektiven Linienanzahl $A_{l_{eff}}$ von 15001 (Eckfrequenzen zählen mit) erhält man bei 40 dB Gesamtpegel durch Umstellen von Gl. 2 einen Pegel L_l von -1,8 dB. Die Abszisse dieses Linienspektrums wird zunächst mit Hilfe von Gl. 6 in die Tonheit z transformiert, so daß die spektrale Lücke in Fig. 29b zwischen 8,5 und 13 Bark zu liegen kommt.

In einem weiteren Schritt erfolgt die Umrechnung vom Dichtepiegel bzw. Pegel einer Spektrallinie in den Frequenzgruppenpegel bzw. Anregungspegel L_G . Hierzu wird ausgehend von tiefen Frequenzen mit Gl. 7 die Breite der Frequenzgruppe bestimmt, die bei einem Linienabstand von 1 Hz zugleich die Anzahl der Spektrallinien angibt, so daß mittels Gl. 2 L_G berechnet werden kann. Im allgemeinen genügt es, Stützwerte im Abstand von 0,1 Bark zu ermitteln, die durch Interpolation zu dem in Fig. 29c gezeichneten

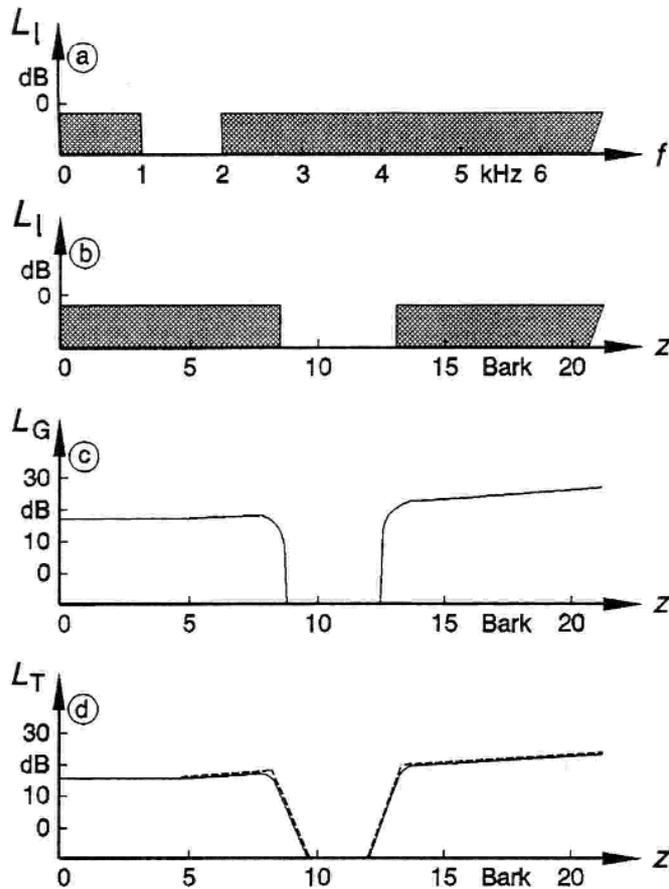


Fig. 29: Berechnung des Mithörschwellen-Tonheitsmusters eines Linienspektrums mit spektraler Lücke. a: Pegel L_l einer Spektrallinie über der Frequenz f ; b: Pegel L_l einer Spektrallinie über der Tonheit z ; c: Anregungspegel L_G über der Tonheit z ; d: Pegel L_T des gerade wahrnehmbaren Testtones über der Tonheit z .

Kurvenverlauf führen. Der Pegel bleibt für Tonheiten unter 5 Bark zunächst konstant und nimmt dann infolge der ansteigenden Frequenzgruppenbreite laufend zu. Die „Kanten“ der spektralen Lücke werden durch dieses Verfahren stark abgerundet, da in die zugehörigen Frequenzgruppen an den Grenzen der Lücke immer weniger Spektrallinien fallen, so daß sich ein geringerer Pegel ergibt. Dieser Pegelabfall beginnt bzw. endet dementsprechend 0,5 Bark unter- bzw. oberhalb der Lückengrenzen.

Um das Mithörschwellen-Tonheitsmuster gemäß Fig. 29d zu erhalten, muß die endliche Steilheit der im Gehör vorhandenen Frequenzselektivität ebenfalls berücksichtigt werden. Dazu werden die Flanken der spektralen Lücke so abgeflacht, daß ihre Steigungen mit den zugehörigen Mithörschwellen von Schmalbandrauschen (siehe Fig. 27) übereinstimmen. Der Abfall der Flanken beginnt hierbei jeweils in der Mitte der ersten Frequenzgruppe unterhalb bzw. oberhalb der Lücke. Die obere Flanke der spektralen Lücke (= untere Flanke des Mithörschwellenmusters des Schmalbandrauschens) besitzt demnach unabhängig vom Pegel immer eine Steilheit von 27 dB/Bark, während die untere Flanke der spektralen Lücke für Frequenzgruppenpegel über 40 dB aufgrund der nichtlinearen Auffächerung fla-

cher abfällt. In diesem Beispiel beträgt sie wegen des geringen Anregungspegels ebenfalls 27 dB/Bark. Die Steigungen können graphisch aus Abbildungen von Zwicker [52] bzw. Zwicker und Fastl [54] gewonnen sowie mit Gleichungen von Terhardt et al. [42] berechnet werden. Für die Berechnung der Tonhöhe des Zwicker-Tones reicht eine asymptotische Näherung, wie sie in Fig. 29d gestrichelt angedeutet ist, aus. Der Schnittpunkt der Geraden wird dabei 0,3 Bark unter- bzw. oberhalb der Lückengrenzen gewählt, um dem Pegelabfall, der bereits eine halbe Frequenzgruppe vor der unteren Lückenbegrenzung beginnt bzw. 0,5 Bark über der oberen Grenze endet, genügend Rechnung zu tragen. Sind die physikalischen Flankensteilheiten der Anregung geringer, so werden diese Steigungen für das Mithörschwellenmuster verwendet.

In einem letzten Schritt muß schließlich das sogenannte Verdeckungsmaß a_v hinzuaddiert werden [52, 54]. Das Verdeckungsmaß ist definiert als die Differenz zwischen dem Frequenzgruppenpegel L_G von Gleichmäßig Anregendem Rauschen und dem zugehörigen Testtonpegel L_T ($a_v = L_T - L_G$). Der Verlauf des Verdeckungsmaßes ist in Fig. 30 aufgetragen. Bei geringen Tonheiten besitzt a_v einen Wert von -2 dB und fällt bei höheren Tonheiten z bis auf -6 dB ab. Der höhere Wert des Verdeckungsmaßes bei tieferen Tonheiten wird dadurch erklärt, daß die Frequenzgruppen in diesem Bereich schmaler sind und daher Fluktuationen des Rauschens stärker stören als bei breiten Frequenzgruppen, so daß ein höherer Testtonpegel erforderlich ist.

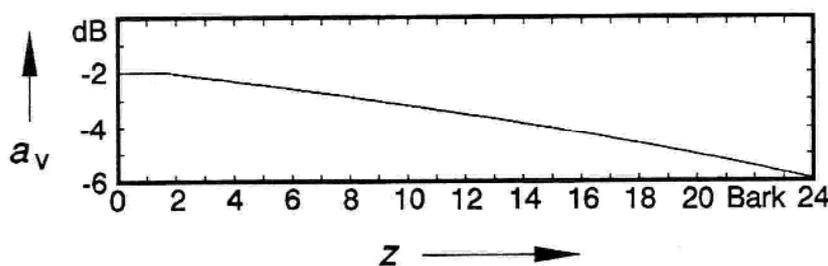


Fig. 30: oben: Verdeckungsmaß a_v (nach Zwicker 1982).

Die Mithörschwelle für Erzeugerschalle ohne Lücke kombiniert mit einem Sinuston kann dadurch konstruiert werden, daß die in Fig. 29 dargestellten Schritte für ein Linienspektrum ohne spektrale Lücke durchgeführt werden und zum Ergebnis die zugehörige Mithörschwelle von Fig. 28 hinzugefügt wird. Die Flankensteigungen der Mithörschwellen von Sinustönen können graphisch aus Abbildungen von Zwicker [52] oder Zwicker und Fastl [54] ermittelt sowie in Form von Zahlenwerten Schorer [37] entnommen wer-

den. Wird anstelle des Sinustones ein Schmalband-Linienspektrum verwendet, kommen die entsprechenden Kurvenverläufe aus Fig. 27 zur Anwendung.

4.2 Modellvorstellung zur Bildung der Tonhöhe des Nachtones

Es wird im folgenden eine Gesetzmäßigkeit vorgestellt, nach der die Tonhöhe des Nachtones aus den physikalischen Parametern des Anregungsschalles vorherbestimmt werden kann. Hierzu wurden die Mithörschwellen-Tonheitsmuster aller im Kapitel 3 vorgestellten Zwicker-Ton-Erzeugerschalle gemäß Abschnitt 4.1 mit einem Personal Computer berechnet und graphisch dargestellt. Zusätzlich wurde die „Normruhehörschwelle“ nach Gl. 8 eingetragen. Fig. 31 zeigt die entstehenden Muster für eine wichtige Einflußgröße auf den Zwicker-Ton, den Darbietungspegel des Erzeugerschalles. Für ein Linienspektrum mit einer spektralen Lücke zwischen 15,9 und 18,4 Bark sind die Mithörschwellenverläufe bei Darbietungspegeln von 40 bis 70 dB durch Geraden angenähert. Bei geringen Pegeln weisen untere und obere Flanke der Lücke eine Steigung von 27 dB/Bark auf und schneiden die Ruhehörschwelle. Mit zunehmendem Pegel ist die nichtlineare Auffächerung der unteren Flanke der Lücke deutlich zu erkennen, welche zusammen mit der oberen Flanke einen „Trichter“ bildet.

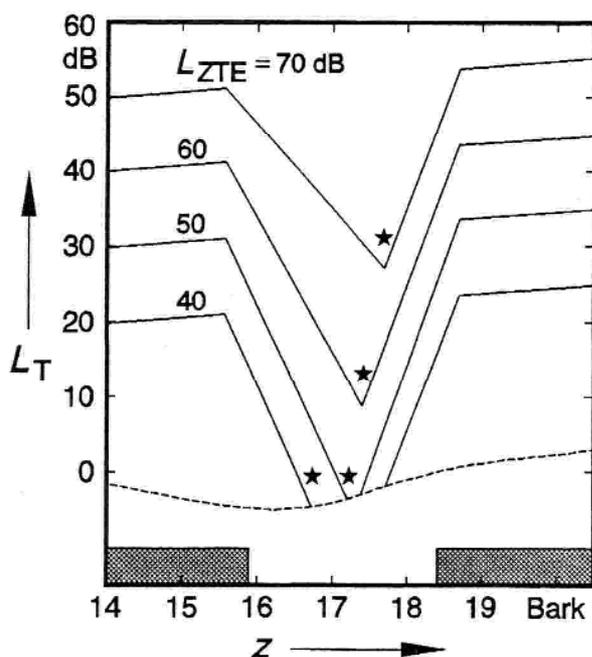


Fig. 31: Berechnete Mithörschwellen-Tonheitsmuster von Linienspektren mit spektraler Lücke zwischen 15,9 und 18,4 Bark bei verschiedenen Darbietungspegeln L_{ZTE} (durchgezogen). Gestrichelte Kurve: Ruhehörschwelle. Stern: Berechnete Tonhöhe des Nachtones.

Der Nachton befindet sich bei den Tonheiten, bei denen die Mithörschwelle des Tiefpaßanteiles des Erzeugerschalles die Ruhehörschwelle schneidet, wie dies für einen Pegel von 40 und 50 dB der Fall ist [21, 25]. Bei einem Darbietungspegel von 40 dB liegt dieser Schnittpunkt 0,85 Bark oberhalb der unteren Lückengrenze. Mit einer einfachen Abschätzung können damit die Tonhöhenangaben der Versuchspersonen in Abschnitt 3.4.3 bei unterschiedlichen Lückenbreiten nachvollzogen werden: Die Pegeldifferenz zwischen dem Testtonpegel L_T unterhalb der spektralen Lücke und der Ruhehörschwelle beträgt etwa 27 dB. Bei einer Flankensteigung von 27 dB/Bark erhält man somit einen Schnittpunkt von etwa 1 Bark oberhalb der unteren Grenze der Lücke. Da jedoch der Abfall der Mithörschwelle näherungsweise 0,3 Bark unterhalb der Lückengrenze beginnt (siehe Abschnitt 4.1), berechnet sich die Tonhöhe des Zwicker-Tones zu 0,7 Bark oberhalb der unteren Lückengrenze. Das Ergebnis dieser einfachen Tonhöhenberechnung stimmt mit den Messungen in Abschnitt 3.4.3 sehr gut überein. Dieser Ansatz verdeutlicht auch, warum bei Linienspektren mit spektraler Lücke und Tiefpaß-Linienspektren gemäß Fig. 11b bzw. Fig. 12 dieselben Vergleichsfrequenzen eingestellt werden, wenn die Frequenzgruppenpegel jeweils konstant sind. Die Mithörschwelle des Hochpaßanteiles gewinnt nach Fig. 31 bei einem Pegel von 40 dB nämlich erst an Einfluß, wenn die Lückenbreite kleiner als 1,5 Bark ist. Eine Verringerung des Tonheitsabstandes zwischen Zwicker-Ton und unterer Lückengrenze bei größeren Lückenbreiten kann stets auf eine erhöhte Ruhehörschwelle der Versuchspersonen zurückgeführt werden.

Kommt bei höheren Pegeln infolge der nichtlinearen Auffächerung kein Schnittpunkt zwischen Mithörschwelle und Ruhehörschwelle zustande, so befindet sich die Tonhöhe des Nachtones beim Minimum der Mithörschwelle, sofern es tief genug ist, um einen Nachton hervorzurufen [21, 25]. Seine Tonhöhe wandert daher bei Pegeln von 60 und 70 dB zu höheren Tonheiten. Diese Verschiebung wird bei einer breiteren Lücke (Fig. 9b) deutlicher, da stets die gesamte Lückenbreite ausgenutzt wird. Ein Pegel von 80 dB verursacht eine sehr flache untere Flanke der Lücke, so daß die geringe Tiefe des Mithörschwellenminimums von weniger als 15 dB dazu führt, daß kein Nachton mehr festgestellt wird.

Im Gegensatz dazu ist in Fig. 32 der umgekehrte Fall dargestellt. Das Mithörschwellen-Tonheitsmuster weist nun kein spektrales Minimum auf, sondern zeichnet sich durch eine spektrale Überhöhung aus. Das Grund-Linienspektrum mit einem Gesamtpegel von 40 dB

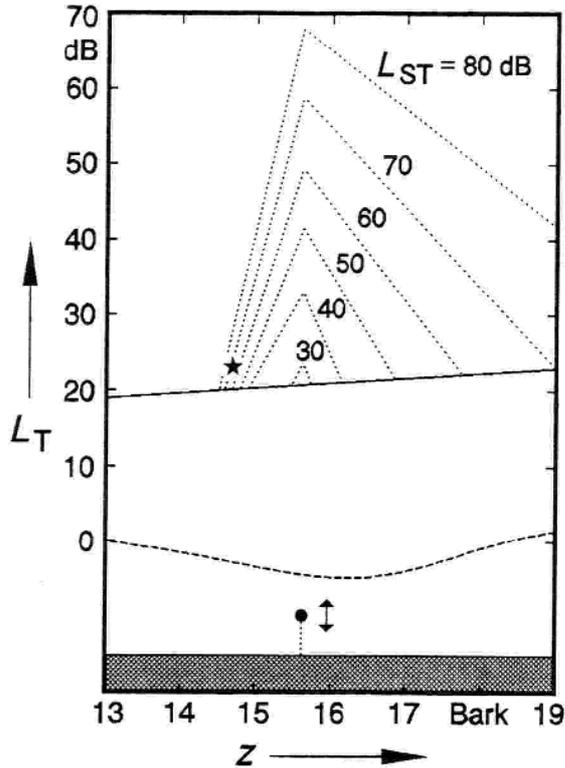


Fig. 32: Berechnete Mithörschwellen-Tonheitsmuster von einem Grund-Linienspektrum (durchgezogen) kombiniert mit einem Sinuston bei 15,6 Bark mit unterschiedlichem Pegel L_{ST} (punktiert). Gestrichelte Kurve: Ruhehörschwelle. Stern: Berechnete Tonhöhe des Nachtones.

bewirkt infolge der wachsenden Frequenzgruppenbreite eine mit zunehmender Tonheit leicht monoton ansteigende Mithörschwelle. Eine Anhebung erfolgt durch den zusätzlich dargebotenen Sinuston, dessen Pegel L_{ST} von 30 bis 80 dB variiert wurde. Die entsprechenden Mithörschwellenmuster sind in Fig. 32 schematisch eingezeichnet.

Der Nachton entsteht bei Tonheiten, bei denen die untere Flanke des Mithörschwellenmusters des Sinustones die Mithörschwelle des Grund-Linienspektrums schneidet, falls zwischen beiden Hörschwellen eine Pegeldifferenz von mindestens 15 dB (ab $L_{ST} = 50$ dB) auftritt [21, 25]. Die Tonhöhe ist aufgrund der unterschiedlichen Steigungen der unteren Flanken der Mithörschwellenmuster geringfügig vom Pegel des Sinustones abhängig, was die Versuchsergebnisse in Fig. 20 bestätigen. Wird hingegen bei einem konstanten Pegel des Sinustones von 60 dB der Pegel L_{GL} des Grund-Linienspektrums erniedrigt, so wandert in Einklang mit den Daten in Fig. 21 der Zwicker-Ton zu etwas tieferen Tonheiten. Die untere Flankensteigung des Mithörschwellenmusters des Sinustones bei 60 dB entspricht in etwa derjenigen von Schmalbandrauschen. Deshalb ändert sich in Fig. 22 an den Angaben der Versuchspersonen nur wenig, wenn vom Sinuston zum Schmalband-Linienspektrum übergegangen und dessen Bandbreite Δf_{SBL} zunehmend vergrößert wird. Lediglich beim frequenzgruppenbreiten Linienspektrum müßte die Tonheit des Zwicker-Tones sich etwas

erhöhen, da das Maximum der Mithörschwelle nicht mehr wie bei kleinen Bandbreiten um 15,6 Bark liegt, sondern eher in der Mitte der anregenden Frequenzgruppe.

Mit Hilfe der Mithörschwellen-Tonheitsmuster können auch die zur Erzeugung eines Zwicker-Tones notwendigen Pegeldifferenzen veranschaulicht werden. In Abschnitt 3.4.4 wurde die minimale Lückentiefe sehr genau in 5-dB-Schritten untersucht. Bei einer Tiefe der spektralen Lücke von 15 dB konnte der Nachton von den Versuchspersonen gerade noch wahrgenommen werden. Dementsprechend beträgt an der unteren Lückengrenze der Pegelunterschied zwischen der Frequenzgruppe außerhalb und der innerhalb der spektralen Lücke ebenfalls 15 dB und es ergeben sich bei den Mithörschwellen der zugehörigen Erzeugerschalle daher Minima von 15 dB. Bei Anregung mit Linienspektren ohne Lücke kombiniert mit einem Sinuston in Abschnitt 3.5.2 waren hingegen Frequenzgruppenpegeldifferenzen von 25 dB nötig, um einen Nachton hervorzurufen. Für die Berechnung des entsprechenden Mithörschwellenmusters wird angenommen, daß das Maximum der Mithörschwelle eines Sinustones gemäß Fig. 28 10 dB unter dem Pegel L_{ST} liegt [54]. Berücksichtigt man weiterhin für das Grund-Linienspektrum das Verdeckungsmaß a_v , so erhält man im Mithörschwellen-Tonheitsmuster in Fig. 32 Pegelunterschiede von 20 dB ($L_{ST} = 50$ dB), bei denen der Nachton noch zu hören ist und eine Differenz von 10 dB ($L_{ST} = 40$ dB), ab der kein Zwicker-Ton mehr registriert wird. Genauere Eigenversuche des Autors bestätigten schließlich, daß auch bei dieser Anregung der Nachton ab einer Pegeldifferenz von 15 dB im Mithörschwellen-Tonheitsmuster gerade noch wahrnehmbar ist. Es ist also sowohl für Erzeugerschalle mit spektralem Minimum als auch für solche mit spektralem Maximum der Pegelunterschied im Mithörschwellen-Tonheitsmuster ausschlaggebend, ob ein Nachton entsteht oder nicht. In beiden Fällen kann ab einer Differenz von 15 dB ein Zwicker-Ton gehört werden.

Bei Verlängerung der Mithörschwellen des Sinustones in Fig. 32 bis zur Ruhehörschwelle wird deutlich, daß ein Großteil des Grund-Linienspektrums durch den Sinuston verdeckt wird. Im Maskierungsbereich des Sinustones muß daher keine Anregung durch das Grund-Linienspektrum vorhanden sein, da es sowieso durch den Sinuston verdeckt wird. Wichtig ist lediglich, daß mindestens ein Bark unterhalb des Mithörschwellenmusters des Sinustones eine zusätzliche, hörbare Anregung vorhanden ist, da ein einzelner Ton alleine keinen Nachton hervorruft. Die Qualität des Zwicker-Tones erhöht sich mit zunehmender

Breitbandigkeit des Grund-Linienspektrums bis zu einer unmaskierten Bandbreite von 5 Bark. Das bandbegrenzte Grund-Linienspektrum muß sich stets im tieferfrequenten Bereich außerhalb des Maskierungseinflusses des Sinuston befinden, um einen Nachton hervorzurufen. Ein Grund-Linienspektrum im höherfrequenten Bereich alleine erzeugt keinen Zwicker-Ton.

Da der unbeeinflusste Nachton weder bei Hochpaß-Linienspektren noch bei einem einzelnen Sinuston auftritt, ist zumindest im Tiefpaßbereich, also unterhalb der spektralen Lücke bzw. des Sinustones, eine Anregung notwendig. Anhand der Mithörschwellen-Tonheitsmuster in den Fig. 31 und 32 läßt sich damit für die Tonhöhe des Nachtones folgende einfache Regel aufstellen:

Weist das Mithörschwellen-Tonheitsmuster einer bereits bei tiefen Tonheiten vorhandenen Anregung ein spektrales Minimum bzw. eine spektrale Überhöhung mit einer Pegeldifferenz von mindestens 15 dB auf, so befindet sich die Tonhöhe des nach dem Abschalten entstehenden, unbeeinflussten Nachtones beim Schnittpunkt dieser Mithörschwelle mit der Ruhehörschwelle. Falls kein Schnittpunkt vorhanden ist, entsteht der Zwicker-Ton beim Minimum der Mithörschwelle bzw. bei der spektralen Kante, welche durch den Anstieg der Mithörschwelle verursacht wird.

Mit Hilfe von gemessenen oder rechnerisch simulierten Mithörschwellenmustern kann auf diese Weise die Tonhöhe des Nachtones ermittelt werden. Die Mithörschwellen-Tonheitsmuster lassen auch erkennen, warum bei Erzeugerschallen mit spektraler Lücke kein entsprechendes Schmalbandrauschen, sondern eindeutig ein Ton zu hören ist. Durch die Verarbeitung im Gehör wird die spektrale Hüllkurve des physikalischen Reizes so stark verändert, daß stets ein Minimum oder eine spektrale Kante entsteht, wodurch auf bisher noch ungeklärte Weise ein Nachton hervorgerufen wird. Keinesfalls kann jedoch in diesem Verarbeitungsstadium vom Gehör die Struktur der spektralen Lücke mit steilen Flanken noch nachvollzogen werden, so daß auch kein derartiger „Komplementärschall“ gebildet wird [21, 25].

4.3 Vergleich von berechneten und gemessenen Tonhöhen des Nachtones

Um eine Aussage darüber zu bekommen, wie gut die Tonhöhe des Nachtones anhand der vorgeschlagenen Modellvorstellung vorherbestimmt werden kann, wurde zusätzlich zu den rechner-simulierten Mithörschwellenmustern der Erzeugerschalle eine große Anzahl von Mithörschwellen mit der Versuchsmethode des pendelnden Einregelns [52] gemessen. Hierzu wurde den Versuchspersonen zusammen mit dem Linienspektrum ein mit 200 ms gepulster Testton (Gaußflanken: 5 ms) dargeboten, der während der Messung sehr langsam von tiefen zu hohen Frequenzen durchgestimmt wurde. Die Personen mußten den Pegel des Sinustones mittels eines Schalters ständig so einstellen, daß er zwischen „hörbar“ und „nicht hörbar“ hin- und herpendelte. Die entstehenden „Zick-Zack“-Kurven wurden aufgezeichnet, gemittelt und in den Rechner eingelesen. Ebenso wurden alle Tonheitsangaben der Versuchspersonen im Rechner gespeichert, so daß dadurch sehr leicht Vergleiche zwischen den gemessenen Kurvenverläufen und der Tonheit des Zwicker-Tones angestellt werden konnten. Da nach dem Funktionsschema der Ruhehörschwelle große Bedeutung zukommt und diese individuell sehr unterschiedlich ist, wurde auch sie bei allen Versuchspersonen ermittelt. Lediglich bei Erzeugerschallen, deren Mithörschwellenmuster durch die geringe Steigung der Flanken vorgegeben war, wurden keine Mithörschwellenmessungen durchgeführt, da ein Pilotversuch bereits ergab, daß nur kleine interindividuelle Unterschiede auftreten. Viele mit obiger Gesetzmäßigkeit berechnete Tonhöhen wurden bereits in den Figuren des Kapitels 3 in Form eines Sternes angegeben und mit den Versuchsergebnissen verglichen. Es werden nun weitere Meßergebnisse einzelner Versuchspersonen, deren Nachtton im betrachteten Bereich nicht von Schwebungsstellen beeinflusst wird, vorgestellt und an diesen Beispielen die Zuverlässigkeit des Funktionsschemas erläutert.

4.3.1 Darbietungspegel

Für den Zwicker-Ton-Erzeugerschall, dessen berechnete Mithörschwellenverläufe bereits in Fig. 31 dargestellt sind, zeigt Fig. 33 die Ruhehörschwelle und die Mithörschwellen einer Versuchsperson bei Darbietungspegeln von 30, 40, 60 und 70 dB. Zugleich wird die

Tonhöhe des wahrgenommenen Nachtones (Rechtecke) angegeben. Die Steigungen der Mithörschwellen-Tonheitsmuster sind durch punktierte Geraden, welche minimale Fehlerquadrate aufweisen, ausgedrückt. Bei kleinen Pegeln ergibt deren Schnittpunkt mit der Ruhehörschwelle die Tonhöhe des Zwicker-Tones, während sie bei großen Pegeln durch das entstehende Minimum beider Asymptoten beschrieben werden kann. Obwohl in diesem Fall die Steigungen sich verhältnismäßig stark von den berechneten Flanken in Fig. 31 unterscheiden, stimmen die Tonheitsangaben überraschend gut überein, wie ein Vergleich zwischen Rechteck und Stern in Fig. 9a erkennen läßt.

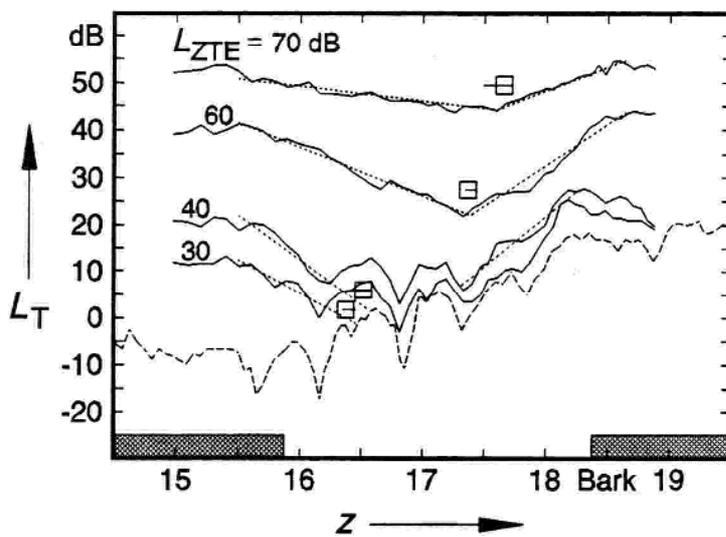


Fig. 33: Gemessene Mithörschwellen (durchgezogen) und Ruhehörschwelle (gestrichelt) einer Versuchsperson bei unterschiedlichen Pegeln L_{ZTE} des Zwicker-Ton-Erzeugerschalles. Punktiert: Asymptotische Näherungen. Spektrale Lücke zwischen 15,9 und 18,4 Bark. Rechteck: Gemessene Tonheit des Nachtones.

Bei einem Darbietungspegel von 40 dB entspricht die angegebene Tonheit derjenigen von Fig. 11b bei einer Lückenbreite von 2,5 Bark. Wird die Asymptote der unteren Flanke der Lücke parallel zur Abszisse entsprechend verschoben, so erhält man durch den Schnittpunkt mit der Ruhehörschwelle bzw. mit der Näherungsgeraden der oberen Flanke die Tonheitseinstellungen der Versuchsperson bei unterschiedlichen Lückenbreiten.

4.3.2 Steigung der Flanken

Die Abhängigkeit des Zwicker-Tones vom Pegel des Erzeugerschalles kann teilweise dadurch nachgebildet werden, daß die untere Flanke der Lücke abgeflacht wird. In Fig. 34 ist das Mithörschwellen-Tonheitsmuster für verschiedene Steigungen der unteren Flanke bei einem Darbietungspegel von 40 dB aufgetragen. Sehr steile Lückenbegrenzungen ver-

ursachen zunächst gehöregene Flankensteilheiten von 27 dB/Bark, während physikalisch flache Flanken schließlich auch zu betragsmäßig geringen Steigungen der Mithörschwelle führen.

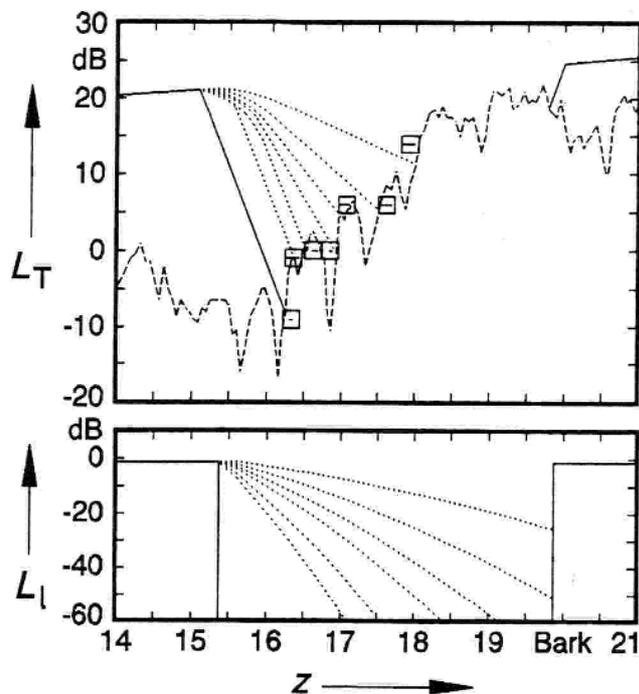


Fig. 34: oben: Berechnete Mithörschwellen und gemessene Ruhehörschwelle (gestrichelt) einer Versuchsperson bei verschiedenen Steigungen der unteren Flanke. Spektrale Lücke zwischen 15,4 und 19,9 Bark. Rechteck: Gemessene Tonheit des Nachtones. unten: Pegel L_1 der einzelnen Spektrallinien als Funktion der Tonheit z. Gesamtpegel: 40 dB.

In diesem Beispiel ist sehr deutlich zu sehen, daß das Kriterium des Schnittpunktes zwischen Mithörschwelle und Ruhehörschwelle die Tonhöhe des Zwicker-Tones sehr gut zu beschreiben vermag, insbesondere dann, wenn die Mithörschwellen physikalisch vorgegeben werden und die individuelle Ruhehörschwelle berücksichtigt wird. Die Tonhöhenangabe bei sehr steiler Lückenbegrenzung (16,35 Bark) stimmt mit derjenigen in Fig. 11b bei einer Lückenbreite von 3,5 Bark gut überein, da beide Erzeugerschalle dieselbe untere Lückengrenze besitzen. Die obere Flanke der Lücke hat in diesem Fall keinen Einfluß auf die Tonhöhe des Nachtones. Ein Vergleich der eingestellten Tonheiten des Zwicker-Tones (Rechtecke) in Fig. 14a mit den berechneten Werten (Sterne), denen die „Normruhehörschwelle“ nach Gl. 8 zugrunde liegt, verdeutlicht, daß sich bei großen Flankensteilheiten beide Symbole zwar gut überdecken, bei flachen Flanken jedoch die Versuchsperson den Zwicker-Ton etwas tiefer wahrnimmt als die Berechnung angibt. Diese Diskrepanz kann mit dem Anstieg der Ruhehörschwelle der Versuchsperson in Fig. 34 erklärt werden. Für Tonheiten über 17 Bark weicht die Hörschwelle der Person - wie bei vielen anderen Versuchspersonen auch - stärker von der „Normruhehörschwelle“ ab, so daß sich ein Schnittpunkt bei etwas tieferen Tonheiten ergibt. Aus geometrischer Sicht wirkt sich

bei flachen Flanken der Lücke eine Abweichung der Ruhehörschwelle stärker aus als bei steilen Flanken. Eine Hörschwellenanhebung hat stets eine Verringerung der Tonhöhe des Nachtones zur Folge.

Die Versuchsergebnisse in Fig. 15 bei einem Darbietungspegel von 60 dB weichen - von den Kreisen abgesehen - ebenfalls nur wenig von den berechneten Werten (Sterne) ab, da der Verlauf der individuell stark unterschiedlichen Ruhehörschwelle in diesem Fall keine große Rolle mehr spielt, sondern der Nachton auf der durch den Hochpaßanteil der Anregung verursachten Mithörschwelle entlang verschoben wird. Anhand der oberen vier Meßwerte in Fig. 15 kann damit die Steigung der Mithörschwelle der oberen Lückengrenze zu etwa 27 dB/Bark ermittelt werden. Die durch Kreise gekennzeichneten Angaben ändern sich infolge der erhöhten Ruhehörschwelle der Person (siehe Fig. 37) auch bei diesem hohen Pegel kaum. Erst eine sehr flache Steigung von -15 dB/kHz schiebt den Nachton in Richtung der Ergebnisse der anderen Personen, da die entsprechende Anhebung der Ruhehörschwelle durch die physikalisch vorgegebene flache untere Flanke überwunden wird.

Wird die Steigung der unteren Flanke auf -15 dB/kHz festgelegt und die obere Flankensteilheit verändert, so erhält man Mithörschwellen-Tonheitsmuster gemäß Fig. 35. Durch die Abflachung wird die untere Flanke der Mithörschwelle wiederum physikalisch vorgegeben, wodurch der Schnittpunkt mit der gemessenen Ruhehörschwelle erst bei verhältnismäßig großen Tonheiten stattfindet. Die Mithörschwellenmuster zeigen eindeutig, daß steile obere Flanken keinen Einfluß auf den Schnittpunkt und damit auf die Tonhöhe des Zwicker-Tones ausüben. Erst eine sehr geringe Steigung der oberen Lückenbegrenzung verhindert ein Überschneiden von Mithörschwelle und Ruhehörschwelle, so daß der Zwicker-Ton zum Minimum der Mithörschwelle verschoben wird.

4.3.3 Obere Lückengrenze

Im folgenden wird das Funktionsschema auf Zwicker-Ton-Erzeugerschalle angewandt, deren untere Flankensteigung wiederum -15 dB/kHz beträgt, deren obere Lückengrenze mit steiler Flanke aber jeweils um 0,5 Bark verschoben wird. In Fig. 36 sind für zwei verschiedene Pegel die berechneten Mithörschwellen und die Ruhehörschwelle einer Versuchsperson aufgetragen, welche in etwa der „Normruhehörschwelle“ entspricht. Zusätzlich ist in

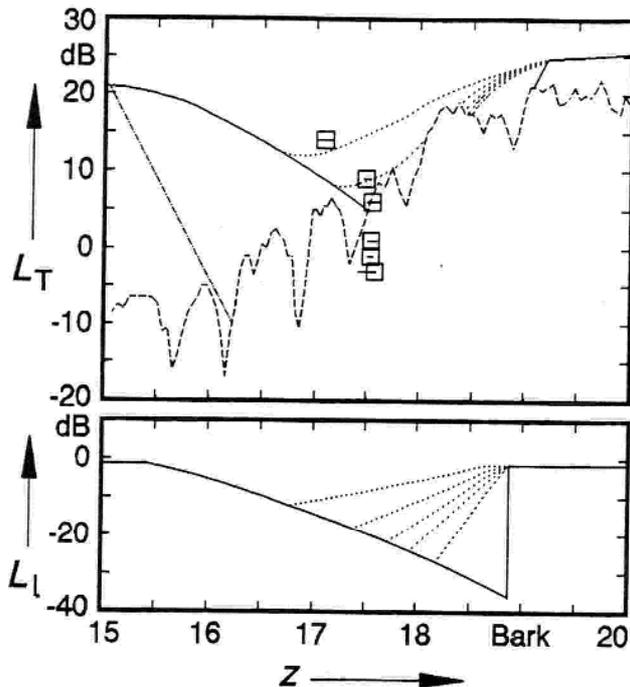


Fig. 35: oben: Berechnete Mithörschwellen und gemessene Ruhehörschwelle (gestrichelt) einer Versuchsperson bei unterschiedlichen Steigungen der oberen Flanke. Steigung der unteren Flanke: -15 dB/kHz . Strichpunktirt: Mithörschwelle bei „ ∞ “ steiler unterer Flanke. Lücke zwischen 15,4 und 18,9 Bark. Rechteck: Gemessene Tonheit des Nachtone. unten: Pegel L_l der einzelnen Spektrallinien als Funktion der Tonheit z . Gesamtpegel: 40 dB.

beiden Teilbildern die Steigung der unteren Flanke angedeutet wie sie im Gehör bei steiler unterer Lückenbegrenzung entstehen würde. Die Schnittpunkte können zur Überprüfung der Angaben dieser Testperson in Fig. 9b verwendet werden. Es zeigt sich deutlich, daß auch bei einem Pegel von 60 dB die Mithörschwelle durch den flachen Abfall der unteren Flanke physikalisch vorgegeben und der Nachtone zu hohen Tonheiten verschoben wird.

In Fig. 36a hat bei breiten Lücken die obere Grenze zunächst keinen Einfluß, so daß sich die Tonhöhe des Nachtone nicht ändert. Erst ab einer Lückengrenze unter 18,4 Bark kann die Mithörschwelle der unteren Flanke der Lücke die Ruhehörschwelle nicht mehr erreichen und der Nachtone wandert dem entstehenden Minimum entsprechend zu tieferen Tonheiten. Ein höherer Pegel in Fig. 36b verschiebt alle Mithörschwellen-Tonheitsmuster parallel zur Ordinate, so daß die Tonhöhe nun hauptsächlich durch das Minimum der Mithörschwelle bestimmt wird. Lediglich bei sehr breiten Lücken verursacht eine Schwellenerhöhung der im allgemeinen recht tiefen Ruhehörschwelle der Versuchsperson einen Schnittpunkt mit der unteren Flanke der Mithörschwelle, weshalb der Nachtone bei etwa 18,8 Bark wahrgenommen wird. In Fig. 18 stimmen daher die Angaben dieser Versuchsperson (Dreieck) mit den berechneten Tonheitswerten bis auf diese eine Ausnahme sehr gut überein. Diskrepanzen zwischen den Meßwerten und dem berechneten Tonheitswert bei der größten Lücke in Fig. 18b können stets auf die Unterschiede zwischen der berech-

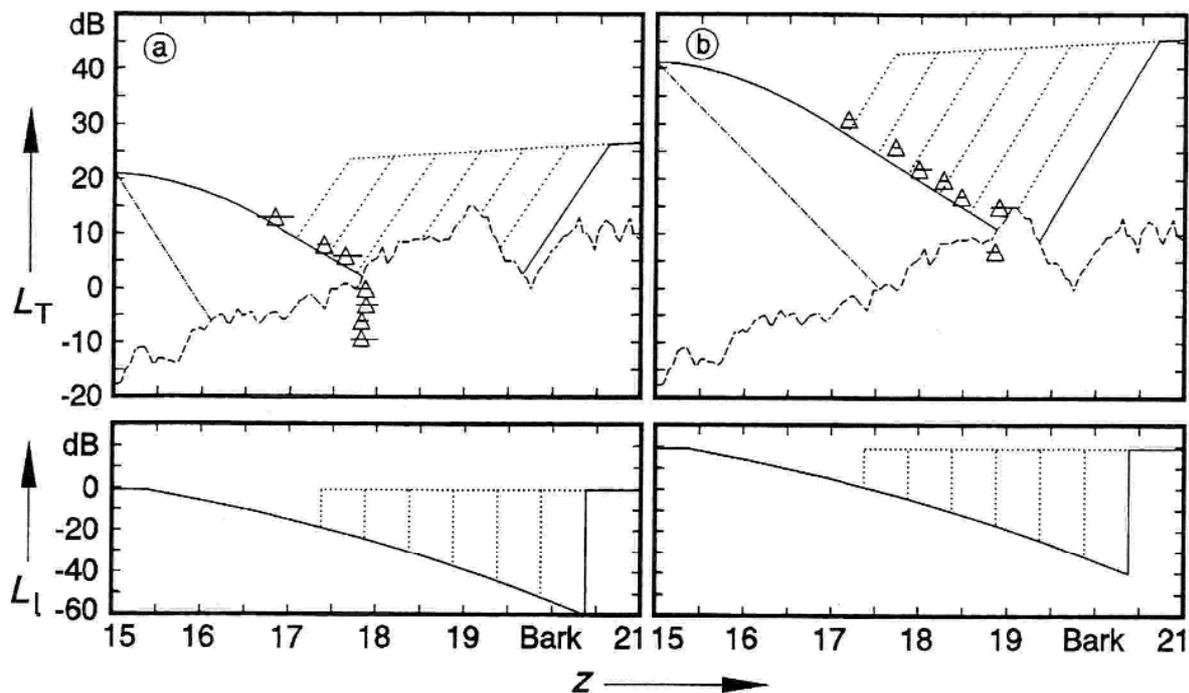


Fig. 36: oben: Berechnete Mithörschwellen und gemessene Ruhehörschwelle (gestrichelt) einer Versuchsperson bei verschiedenen oberen Lückengrenzen. Steigung der unteren Flanke: -15 dB/kHz . Strichpunktiert: Mithörschwelle bei „ ∞ “-steiler unterer Flanke. Darbietungspegel: 40 dB (a) bzw. 60 dB (b). Dreieck: Gemessene Tonheit des Nachtönes. unten: Pegel L_1 der einzelnen Spektrallinien als Funktion der Tonheit z .

neten und der tatsächlichen Ruhehörschwelle der Versuchsperson zurückgeführt werden.

Sehr starke Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Daten treten hingegen in Fig. 18a bei den mit einem Kreis gekennzeichneten Tonhöhenstellungen auf. Deshalb ist in Fig. 37 das zugehörige Mithörschwellen-Tonheitsmuster zusammen mit der Ruhehörschwelle der Versuchsperson aufgetragen. Wie bereits mehrfach erwähnt, besitzt diese Versuchsperson eine ab 16 Bark (3200 Hz) erhöhte Ruhehörschwelle, welche die Mithörschwelle bei etwa 16,5 Bark kreuzt, so daß die Person den Nachtönes völlig unabhängig von der oberen Lückengrenze stets mit derselben Tonhöhe hört. Bei derartigen Hörschwellenanhebungen von über 15 dB muß jeweils die individuelle Ruhehörschwelle gemessen werden, um genauere Aussagen über die Tonhöhe des Nachtönes treffen zu können. Liegen jedoch die individuellen Daten der Versuchsperson vor, so kann die Tonheit des Nachtönes auch in diesen Fällen sehr gut bestimmt werden, was die Zuverlässigkeit des Funktionsschemas unterstreicht.

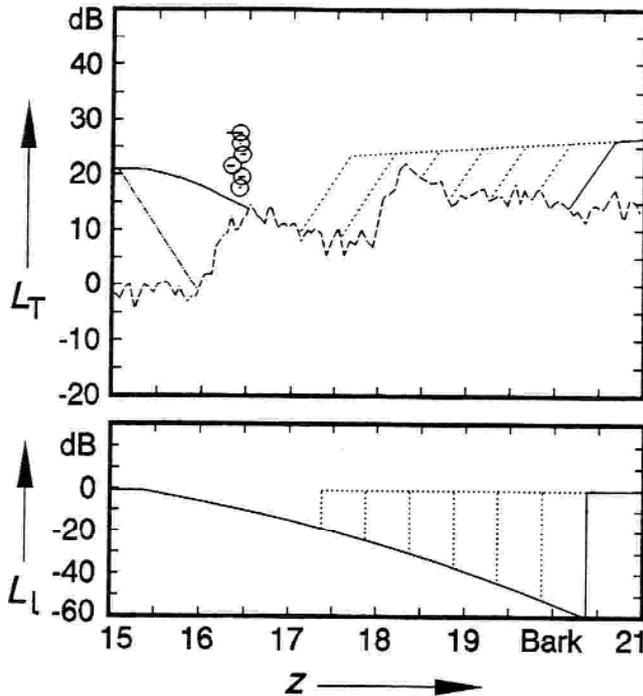


Fig. 37: oben: Berechnete Mithörschwellen und gemessene Ruhehörschwelle (gestrichelt) einer Testperson bei verschiedenen oberen Lückengrenzen. Steigung der unteren Flanke: -15 dB/kHz . Strichpunktiert: Mithörschwelle bei „ ∞ “-steiler unterer Flanke. Darbietungspegel: 40 dB . Kreis: Gemessene Tonheit des Nachttones. unten: Pegel L_l der einzelnen Spektrallinien als Funktion der Tonheit z .

4.3.4 Genauigkeit der Tonheitsberechnungen

Die Einstellgenauigkeit der Frequenz von Sinustönen bei der hier verwendeten Einregelmethode beträgt laut Fastl [3] und Hesse [13] etwa $0,3 \%$. Umgerechnet auf die Tonheit bedeutet dies, daß der Vergleichssinuston auf ungefähr $0,02 \text{ Bark}$ genau eingestellt werden kann [8]. Der Zwicker-Ton besitzt eine Ausprägtheit der Tonhöhe, die der von Sinustönen entspricht [11]. Da der Nachtton jedoch im allgemeinen nur sehr kurz und verhältnismäßig leise zu hören ist, muß mit größeren Ungenauigkeiten der Vergleichseinstellungen gerechnet werden. Es wurde daher gemäß Gl. 9 der relative Fehler der in die Tonheit z umgerechneten Vergleichsfrequenzen ermittelt. Als Bezugswert wurde jeweils der Zentralwert z_v der vier Einstellungen z_{vi} gewählt. Die Zentralwerte der relativen Fehler einer Versuchsreihe ergaben für jede der fünf Versuchspersonen Werte unter 1% . Damit wird die Tonhöhe des Nachttones, wie schon aus den geringen Wahrscheinlichen Schwankungen zu erkennen war, relativ genau eingestellt.

$$F_{rel} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \frac{|z_{vi} - z_v|}{z_v} \quad (9)$$

Die Abweichungen der Tonhöhenangaben der Versuchspersonen bei Wiederholung derselben Versuchsreihe in Abständen von einigen Monaten liegen unter 0,2 Bark und können vermutlich auf Schwankungen der Ruhehörschwelle zurückgeführt werden. Da die Tonheitsberechnungen anhand des Funktionsschemas im Prinzip auf dem Schnittpunkt zweier Kurvenverläufe beruhen, dürfen die individuellen Mit- und Ruhehörschwellen der Versuchspersonen für genaue Berechnungen nur verhältnismäßig wenig von den Ausgangswerten des Funktionsschemas abweichen. Die zulässigen Differenzen können durch einfache geometrische Überlegungen abgeschätzt werden. Geht man näherungsweise von einem waagerechten Verlauf der Ruhehörschwelle aus, so bildet eine Steigung der Mithörschwelle von etwa -15 dB/Bark, wie sie bei einem Darbietungspegel von 60 dB vorkommt, den ungünstigsten Fall. Die Differenz zwischen maximalem Testtonpegel und der Ruhehörschwelle beträgt im Extremfall ungefähr 45 dB. Soll nun die Tonhöhe des Zwicker-Tones auf 0,3 Bark genau berechnet werden, so darf die Steigung der Mithörschwelle nur um $\pm 10\%$ abweichen oder die Ruhehörschwelle um ± 5 dB von der Norm differieren. Bei Mithörschwellenflanken von 27 dB/Bark sind in etwa die doppelten Werte zulässig. Da jedoch in der Praxis die Feinstruktur der Ruhehörschwelle nicht waagrecht verläuft, sondern mehr oder weniger große Steigungen aufweist, konnten alle Tonhöhen des Zwicker-Tones bei den Versuchen in Kapitel 3 mit einer Genauigkeit von $\pm 0,3$ Bark berechnet werden, sofern die individuelle Ruhehörschwelle nicht um mehr als 10 dB von der „Normruhehörschwelle“ nach Gl. 8 abwich [21, 25].

4.4 Zusammenfassende Darstellung des Funktionsschemas im Mithörschwellen-Tonheits-Zeitmuster

Nach dem Funktionsschema in Abschnitt 4.2 kann die Tonhöhe des Zwicker-Tones aus dem Mithörschwellen-Tonheitsmuster des Erzeugerschalles bestimmt werden, während seine Qualität von der Frequenz- und Zeitstruktur der Anregung abhängt. In Fig. 38 ist das dreidimensionale Mithörschwellen-Tonheits-Zeitmuster eines Linienspektrums mit einer spektralen Lücke zwischen 15,9 und 18,4 Bark skizziert, welches zwei Sekunden lang dargeboten wird. Diese Zeitdauer entspricht gemäß den Ergebnissen in Abschnitt 3.6 in

etwa der für den akustischen Nachton notwendigen minimalen Anregungsdauer, um einen gut wahrnehmbaren Zwicker-Ton hervorzurufen. Geübte Versuchspersonen wählten oft eine Darbietungsdauer in derselben Größenordnung, obwohl sie sich den Erzeugerschall beliebig lange anhören konnten. Im unteren Teilbild von Fig. 38 ist der physikalische Ver-

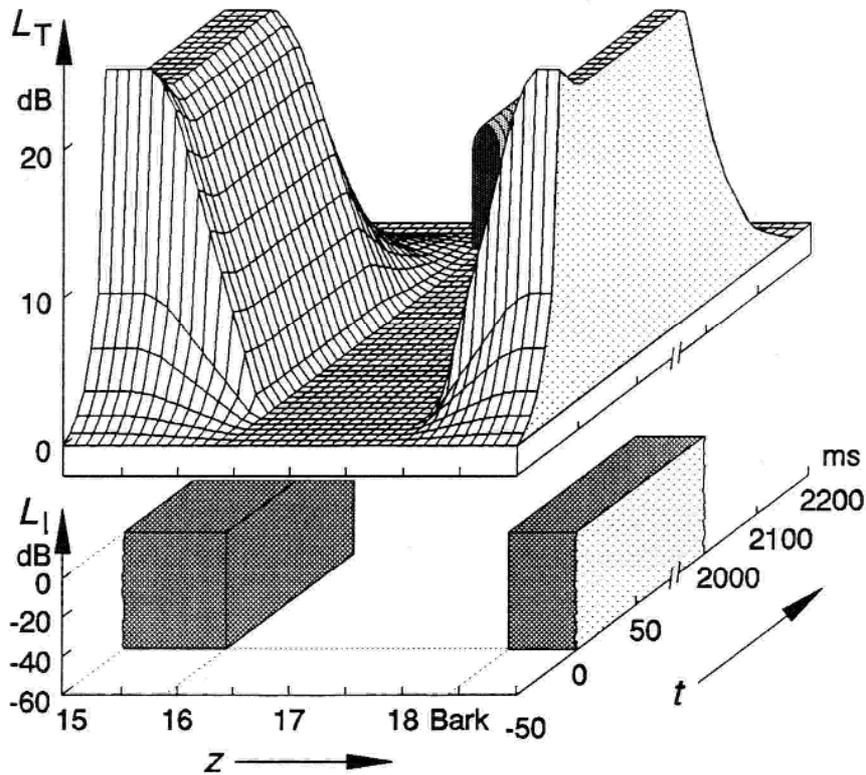


Fig. 38: oben: Mithörschwellen-Tonheits-Zeitmuster mit Zwicker-Ton (dunkel) nach dem Abschalten der Anregung. unten: Ausschnitt eines Zwicker-Ton-Erzeugerschalles mit spektraler Lücke zwischen 15,9 und 18,4 Bark. Darbietungsdauer: 2 Sekunden.

lauf des Erzeugerschalles mit steilen Lückenbegrenzungen und einem Gesamtpegel von 40 dB ($L_I \approx 0$ dB) angedeutet. Es ist hierbei nur die Umgebung der spektralen Lücke von Interesse. Das obere Teilbild zeigt das entstehende Mithörschwellenmuster mit Flankensteigungen von 27 dB/Bark. Im Zeitbereich sind Vor- und Nachverdeckung [52, 54] sowie ein leichtes Überschwingen („overshoot“) beim Einschalten [35, 36] berücksichtigt. Die Ruhehörschwelle wurde der Übersichtlichkeit halber als Ebene bei 0 dB dargestellt. Gemäß den Ergebnissen in Abschnitt 3.6 sollte sowohl die zeitliche als auch die spektrale Dichte des Anregungsschalles möglichst hoch sein, um einen gut hörbaren Nachton zu erzeugen. Diese Voraussetzungen werden von Weißem Rauschen bzw. Linienspektren mit geringen Spektrallinienabständen und zufällig verteilten Phasenlagen sowie von

Impulsen bzw. Frequenzsweeps mit Wiederholraten von 100 Hz ausreichend erfüllt. Im Mithörschwellenmuster äußert sich dies durch einen glatten Kurvenverlauf sowohl in Richtung Zeit- als auch in Richtung Tonheitsachse.

Nach dem Abschalten der Anregung entsteht der unbeeinflusste akustische Nachton am Schnittpunkt zwischen der Mithörschwelle der unteren Lückenbegrenzung und der Ruhhörschwelle. Kommt bei einem höheren Darbietungspegel, einem flachen Abfall der unteren Flanke oder einer schmalen spektralen Lücke kein Schnittpunkt mit der Ruhhörschwelle zustande, so befindet sich der Nachton stets beim Minimum der Mithörschwelle. Wird statt einer spektralen Lücke eine Erhöhung des Testtonpegels mit Hilfe eines Sinustones oder eines schmalbandigen Linienspektrums erreicht, so ist der Zwicker-Ton am Beginn der unteren, ansteigenden Flanke der Mithörschwelle zu finden. Der Erzeugerschall muß stets einen Tiefpaßanteil aufweisen, um einen Nachton hervorzurufen. Das dreidimensionale Mithörschwellen-Tonheits-Zeitmuster verdeutlicht, daß der Zwicker-Ton immer erst nach dem Abschalten des Erzeugerschalles auftritt. Der Nachton entsteht also nicht schon während der Anregung, da er sonst bei einem äquivalenten Pegel von 10 dB über der Ruhhörschwelle bereits vor dem Abschalten gehört werden müßte. Neuere Untersuchungen bringen den Zwicker-Ton sogar mit einer Ruhhörschwellenabsenkung nach der Anregung mit spektraler Lücke in Verbindung [45].

Die Berechnung der Tonhöhe des Zwicker-Tones lohnt sich nur dann, wenn durch die Anregung auch ein Nachton hervorgerufen wird. Daher sind in Fig. 39 die einzelnen Parameter des Erzeugerschalles, welche einen Einfluß auf die Qualität des Zwicker-Tones ausüben, zusammengestellt. Es sind jeweils die ungefähren Grenzen angegeben, innerhalb derer der Nachton am besten wahrgenommen bzw. in welchen Bereichen der Reizparameter er nicht mehr gehört wird. Die Qualitätsverläufe sollen nur Tendenzen aufzeigen und sind daher in erster Näherung linear angegeben. Die einzelnen Qualitätsbeiträge Q_{ZT}^* sind multiplikativ miteinander verknüpft, da bereits bei ungünstiger Wahl eines einzigen Parameters entweder nur ein schlechter oder gar kein Nachton mehr hervorgerufen wird. Im einzelnen hängt die Qualität des Nachtones von folgenden Parametern eines Linienspektrums ab:

Der Gesamtpegel L_{ZTE} des Erzeugerschalles sollte zwischen 40 und 50 dB betragen. Unter 20 und über 80 dB ist kein Nachton mehr wahrnehmbar.

Der Spektrallinienabstand SLA von Linienspektren mit statistischen Phasenzuordnungen

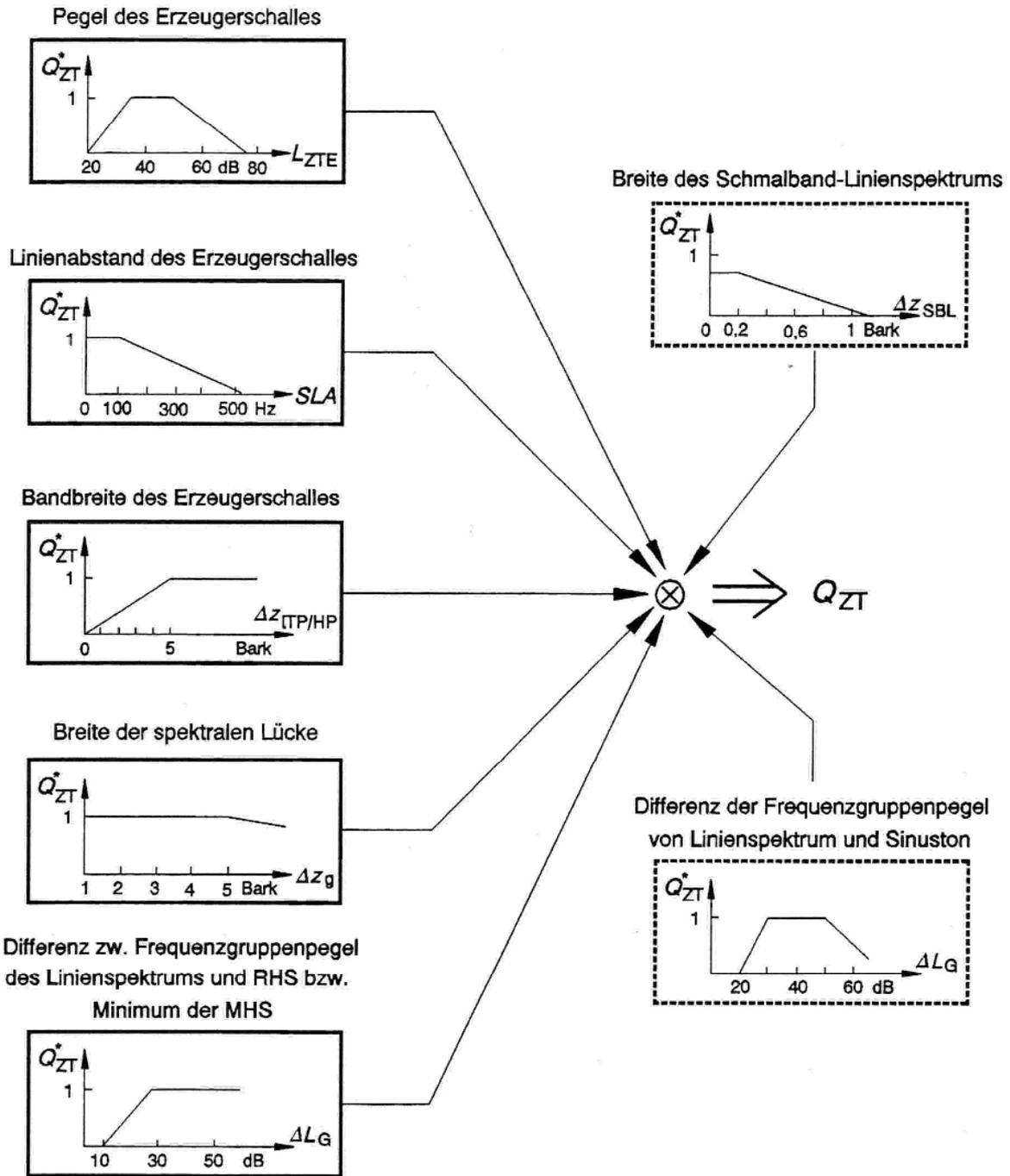


Fig. 39: Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones in Abhängigkeit von Parametern des Erzeugerschalles. Die Anregungsdauer sollte 2 Sekunden nicht unterschreiten.

sollte unter 100 Hz liegen, über 500 Hz wird ein Nachton kaum mehr gehört. Bei statistischen Schallen spielt die Zeitfunktion keine Rolle, während bei deterministischen Signalen der Zeitverlauf der Anregung bei einem Linienabstand unter 100 Hz einen zusätzlichen Einfluß auf den Nachton ausübt.

Die Bandbreite Δz_{ITP} bzw. Δz_{IHP} des Erzeugerschalles sollte unter- und oberhalb der spektralen Lücke mindestens 5 Bark betragen.

Die Lückenbreite Δz_g besitzt bis zu 5 Bark einen positiven Einfluß auf den Zwicker-Ton. Bei größeren Breiten dient wahrscheinlich nur noch der Tiefpaßanteil als Anregung. Kleinere Breiten unter 1 Bark verursachen wegen der endlichen Flankensteilheit der Mithörschwelle bereits eine so geringe Tiefe der Lücke, daß kaum mehr ein Zwicker-Ton gehört wird. Daher läßt sich bei Lückenbreiten unter 1 Bark keine Aussage mehr über deren Einfluß auf die Qualität des Nachtones treffen.

Die Differenz ΔL_G zwischen dem Frequenzgruppenpegel des Linienspektrums und der Ruhehörschwelle (RHS) bzw. dem Minimum der Mithörschwelle (MHS), d.h. die Tiefe der spektralen Lücke, sollte möglichst 30 dB übersteigen. Ein Unterschied von 10 dB und weniger kann keinen Nachton erzeugen.

Speziell für Grund-Linienspektren kombiniert mit einem Sinuston bzw. schmalbandigem Linienspektrum gelten zusätzlich die in gestrichelter Umrandung dargestellten Abhängigkeiten:

Bei einer Anregung mit einem Grund-Linienspektrum kombiniert mit Schmalband-Linienspektren sollte deren Bandbreite Δz_{SBL} geringer als 0,2 Bark sein und 1 Bark nicht überschreiten. Die Qualität Q_{ZT}^* erreicht insgesamt bei dieser Art der Anregung nur etwa 70 % des maximal möglichen Wertes.

Die Differenz ΔL_G der Frequenzgruppenpegel von Grund-Linienspektrum und Sinuston bzw. Schmalband-Linienspektrum sollte zwischen 30 und 50 dB betragen. Bei größeren oder kleineren Pegelunterschieden verschlechtert sich die Qualität des Zwicker-Tones. Ab einer Differenz von weniger als 20 dB ist kein Nachton mehr wahrnehmbar.

Werden alle Parameter des Erzeugerschalles im Bereich des Optimums gewählt, so müßte nach dem Abschalten ein guter akustischer Nachton wahrnehmbar sein. Die Aufstellung in Fig. 39 gibt somit einen groben Überblick, auf welche Parametereinstellungen des Erzeugerschalles geachtet werden muß. Mit ihrer Hilfe läßt sich z.B. der Existenzbereich

des Nachtones in Fig. 3 abschätzen: Bei einem optimalen Darbietungspegel von 40 dB ist die spektrale Lücke im Bereich der größten Empfindlichkeit der Ruhhörschwelle am tiefsten, so daß der Zwicker-Ton qualitativ am besten beurteilt wird. Sowohl bei tieferen als auch bei höheren Frequenzen steigt die Ruhhörschwelle an und die spektrale Lücke verliert an Tiefe, weshalb der Nachton schließlich nicht mehr wahrgenommen wird. Dies kann dadurch ausgeglichen werden, daß der Gesamtpegel auf 60 dB erhöht wird. Der Pegel befindet sich dann zwar außerhalb des Optimums, so daß auch der Zwicker-Ton nicht mehr so gut gehört wird, insgesamt wird dadurch aber der Existenzbereich des Nachtones erweitert, weil sich die notwendige Tiefe der spektralen Lücke über einen größeren Frequenzbereich erstreckt.

5. Kontrollversuche

Um die Zuverlässigkeit des Funktionsschemas zu überprüfen, wurden Linienspektren generiert, deren spektrale Lücken so geformt waren, daß sie stets ein Minimum bei 17,1 Bark (3900 Hz) aufwiesen. Die Lückentiefe betrug hierbei jeweils 30 dB. Die Breite der Lücke wurde in Anlehnung an die entsprechende Versuchsreihe in Abschnitt 3.4.3 (Fig. 11b), bei der sich der Zwicker-Ton stets nahe an der unteren Grenze der spektralen Lücke befand, zwischen 1,5 und 7,5 Bark verändert. Nach dem Funktionsschema müßte der Nachton bei diesem Experiment unabhängig von der Lückenbreite beim Minimum der spektralen Lücke zu finden sein. In Fig. 40 sind die Ergebnisse bei einem Darbietungspegel von 40 dB (a) bzw. 60 dB (b) aufgetragen. Der Nachton tritt den Erwartungen gemäß tatsächlich in der Mitte der spektralen Lücke auf, wobei jedoch vereinzelt die individuelle Hörschwelle geringe Tonhöhenverschiebungen verursachen kann. Selbst bei Flankensteigungen von nur 8 dB/Bark bei der breitesten Lücke ist der Zwicker-Ton noch mit einer Qualität der Kategorie „mittel“ wahrnehmbar.

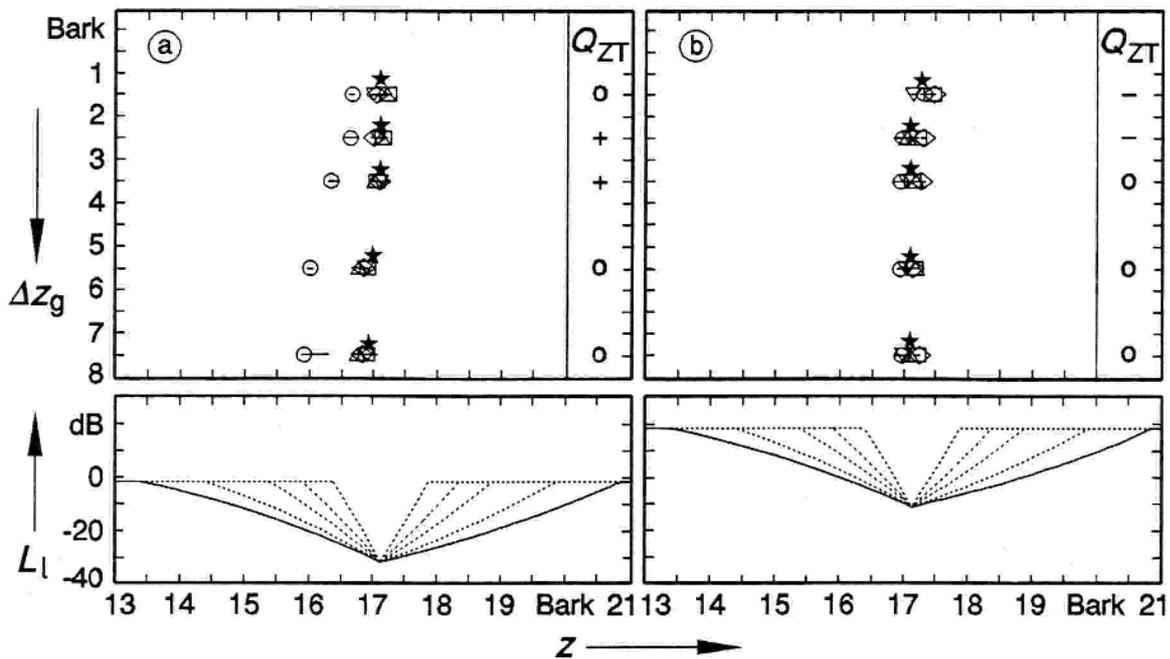


Fig. 40: oben: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei Linienspektren mit definiertem Minimum. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Berechnete Tonheiten (Sterne). Darbietungspegel: 40 dB (a) und 60 dB (b). unten: Pegel L_l der einzelnen Spektrallinien als Funktion der Tonheit z .

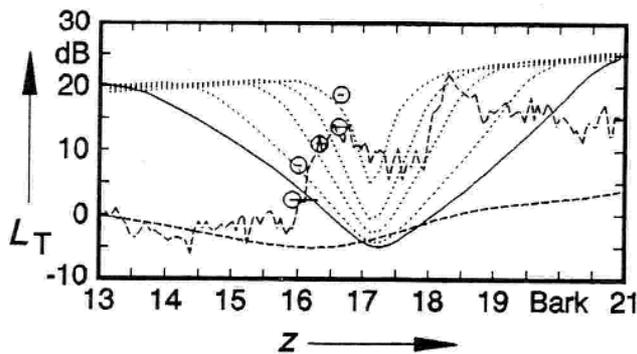


Fig. 41: Berechnete Mithörschwellen-Tonheitsmuster der Linienspektren von Fig. 40a. Gemessene Ruhehörschwelle einer Versuchsperson und „Normruhehörschwelle“ (beide gestrichelt). Kreis: Gemessene Tonheit des Nachtones der Versuchsperson.

Für einen Darbietungspegel von 40 dB sind die zugehörigen Mithörschwellen-Tonheitsmuster in Fig. 41 dargestellt. Bei sehr breiten Lücken von 7,5 und 5,5 Bark schneidet sich das Mithörschwellenmuster gerade noch mit der „Normruhehörschwelle“, so daß der Nachton geringfügig tiefer wahrzunehmen ist, während er bei kleineren Lückenbreiten genau beim Minimum angegeben wird. Eine Ausnahme bildet dabei wiederum die Versuchsperson, deren Angaben mit einem Kreis gekennzeichnet sind. Ihre Ruhehörschwelle ist ebenfalls in Fig. 41 eingetragen und verdeutlicht die Ursache für die Abweichungen. Infolge der Hörschwellenanhebung ab 16 Bark entsteht der Nachton stets beim Schnittpunkt zwischen Ruhe- und Mithörschwelle. In Fig. 40b wird die Mithörschwelle um 20 dB erhöht, so daß die Ruhehörschwelle keinen Einfluß mehr besitzt und der Nachton deshalb bei breiten Lücken beim Minimum zu hören ist. Bei schmalen Lücken hingegen ist bei diesem Darbietungspegel an der unteren Flanke der Lücke die Mithörschwelle des Gehörs etwas flacher als die zugehörige physikalische Steigung des Erzeugerschalles, so daß der Nachton etwas zu höheren Tonheiten hin verschoben und wegen der geringen Lückentiefe nur noch „schlecht“ wahrgenommen wird. Insgesamt bestätigen auch hier die gemessenen Tonheitswerte die Berechnungen sehr gut.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde das Mithörschwellen-Tonheitsmuster verändert, indem einem Linienspektrum mit einer spektralen Lücke zwischen 14,4 und 19,9 Bark mit einem Addierverstärker ein Sinuston von 30 dB zugesetzt wurde. Die Tonheit z_{ST} dieses Tones wurde von 14,9 Bark über 15,4 Bark auf 15,9 Bark erhöht und die resultierende Tonhöhenänderung des Zwicker-Tones ermittelt. Fig. 42 zeigt die Ergebnisse bei einem Darbietungspegel des Linienspektrums von 40 dB.

Im unteren Teilbild von Fig. 42 ist schematisch das Mithörschwellen-Tonheitsmuster

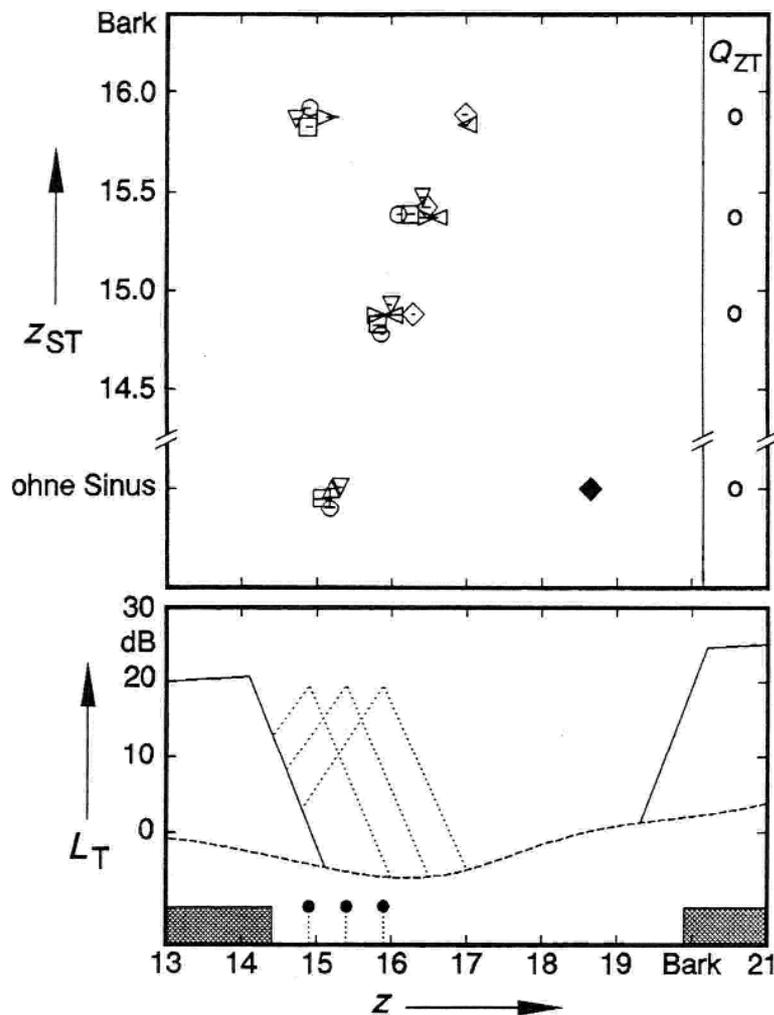


Fig. 42: oben: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlichen Tonheiten z_{ST} eines zusätzlichen Sinustones. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Pegel des Zusatztones: 30 dB. Pegel des Linienspektrums: 40 dB. unten: Zugehörige berechnete Mithörschwellen-Tonheitsmuster.

des Erzeugerschalles skizziert, während das obere Teilbild die zugehörigen Ergebnisse zeigt. Wird das Linienspektrum ohne Zusatzton dargeboten, so befindet sich die Tonhöhe des Zwicker-Tones wiederum beim Schnittpunkt zwischen Mithörschwelle und Ruhehörschwelle. Der zusätzliche Sinuston bei 14,9 Bark verdeckt diesen Schnittpunkt und es entsteht ein neuer bei etwa 16 Bark. Dementsprechend wird auch der Zwicker-Ton zu höheren Tonheiten verschoben. Bei einem z_{ST} von 15,4 Bark entsteht der Nachton bei etwa 16,4 Bark. Bei weiterer Erhöhung der Tonheit des Sinustones auf 15,9 Bark teilen sich die 6 Versuchspersonen in zwei Gruppen auf. Die eine Gruppe hört einen Nachton wiederum beim Schnittpunkt des Mithörschwellenmusters mit der Ruhehörschwelle um 17 Bark, die andere jedoch nimmt einen Zwicker-Ton beim Minimum des Mithörschwellenmusters um 15 Bark wahr. Diese Personengruppe weist eine etwas höhere Ruhehörschwelle bei 17 Bark auf als die anderen beiden Probanden, so daß das Minimum den tiefsten Punkt im Tonheitsmuster darstellt. Der Nachton kann somit durch einen Zusatzton je

nach Veränderung des Mithörschwellen-Tonheitsmusters in beide Richtungen verschoben werden. Auch Lummis et al. [29] sowie Lummis und Guttman [28] stellten fest, daß ein zusätzlicher Sinuston den Nachton von sich wegrückt.

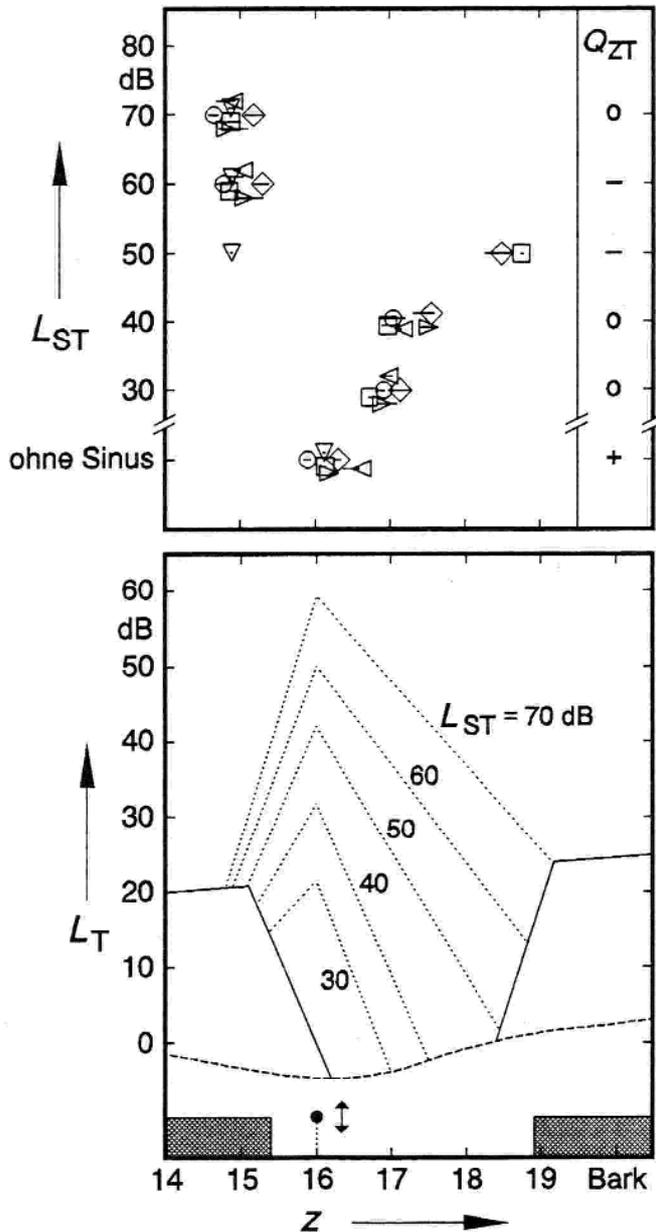


Fig. 43: oben: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlichem Pegel L_{ST} eines zusätzlichen Sinustones. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Tonheit des Sinustones: 16 Bark. Pegel des Linienspektrums: 40 dB. unten: zugehörige berechnete Mithörschwellen-Tonheitsmuster.

Im folgenden wird ein Versuch beschrieben, der den Übergang von einem Schallreiz mit spektraler Lücke gemäß Abschnitt 3.4 zu einer Anregung mit spektraler Überhöhung, wie sie in Abschnitt 3.5 behandelt wurde, bildet. Bei einer etwas kleineren Lückenbreite von 3,5 Bark wird die Tonheit des Zusatztones auf 16 Bark (3200 Hz) festgelegt und dessen Pegel L_{ST} nach Fig. 43 zwischen 30 und 70 dB variiert, während das Linienspektrum mit 40 dB dargeboten wird. Im unteren Teilbild sind wiederum die zugehörigen

Mithörschwellen-Tonheitsmuster skizziert. Das obere Bild gibt die Ergebnisse von 6 Versuchspersonen an.

Ohne Zusatzton befinden sich die Tonhöhenangaben abermals beim Schnittpunkt von Mithörschwelle und Ruhehörschwelle. Ein zusätzlicher Sinuston mit einem Pegel von 30 und 40 dB verschiebt den Zwicker-Ton dem Funktionsschema entsprechend zu etwas höheren Tonheiten. Bei 50 dB wird die Tiefe der spektralen Lücke bereits geringer, zumal die Ruhehörschwelle der meisten Versuchspersonen über 18 Bark im Vergleich zur Normalruhehörschwelle vielfach um mehr als 10 dB angehoben ist. Der Nachton wird deshalb nur noch von zwei Personen im Bereich von 18,6 Bark gehört, während ihn eine Versuchsperson bereits wesentlich tiefer an der unteren Kante der Mithörschwelle um 15 Bark wahrnimmt. Seine Qualität wird dementsprechend in die Kategorie „schlecht“ eingestuft. Bei Pegeln von 60 und insbesondere 70 dB wird die spektrale Lücke vollends vom zusätzlichen Sinuston verdeckt, so daß der Nachton von allen Versuchspersonen am Beginn der unteren Flanke des Mithörschwellenmusters des Sinustones registriert wird. Ein Pegel des Sinustones von 70 dB führt im Mithörschwellen-Tonheitsmuster zu einer Pegeldifferenz von etwa 40 dB, so daß in Übereinstimmung mit den Ergebnissen in Abschnitt 3.5.2 die Qualität des Zwicker-Tones wieder zunimmt und mit „mittel“ beurteilt wird.

Dieser Versuch zeigt damit sehr anschaulich den Übergang von Erzeugerschallen mit spektraler Lücke zu solchen mit Pegelerhöhung. Das in Abschnitt 4.2 vorgestellte Funktionsschema kann in jedem Falle die Tonhöhe des Nachtones sehr zuverlässig in guter Näherung beschreiben [21, 25].

6. Binaurale Anregung

In diesem Kapitel wird untersucht, 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 bisherige Versuche die Erzeugerschalle in zwei separate Spektralanteile aufgeteilt wurden, welche den Personen nun binaural dargeboten wurden, um zu sehen, ob das Gehör beide Signale gemeinsam auswertet und daher ein zur monauralen Anregung gleichwertiger Nachton entsteht. Im weiteren sollte 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.

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 der Versuchspersonen beobachtet werden. Von zwölf Versuchspersonen hörten sechs Personen den Zwicker-Ton am rechten Ohr und sechs am linken Ohr besser [23]. Das bevorzugte Ohr wird bei den nachfolgenden Versuchen stets als Ohr 1 bezeichnet.

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 gemäß Abschnitt 3.4.6 mit 15 dB/kHz abfällt. Das andere Ohr wurde gleichzeitig mit einem Hochpaß-Linienspektrum beschallt, dessen untere Grenze z_{HP} verändert wurde. Der Pegel L_i der einzelnen Spektrallinien lag bei etwa 0 dB, so daß die Tonheitsangaben im oberen Teilbild von Fig. 44 mit denen von Fig. 18a verglichen werden können. 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 Personen einen Zwicker-Ton an. Ebenso wird die Tonhöhe durch eine Erhöhung der unteren Grenze des Hochpaß-Linienspektrums nicht verändert und entspricht stets derjenigen bei monauraler Anregung mit dem Tiefpaß-Linienspektrum. Die vergleichbaren Angaben dreier Personen decken sich direkt mit denen in Fig. 18a bei breiten Lücken. Der Zwicker-Ton wurde eindeutig jeweils dem Ohr 1 zugeordnet. Es ist somit kein Einfluß des Hochpaß-Anteiles am anderen Ohr zu erkennen. Diese Aussage bestätigt

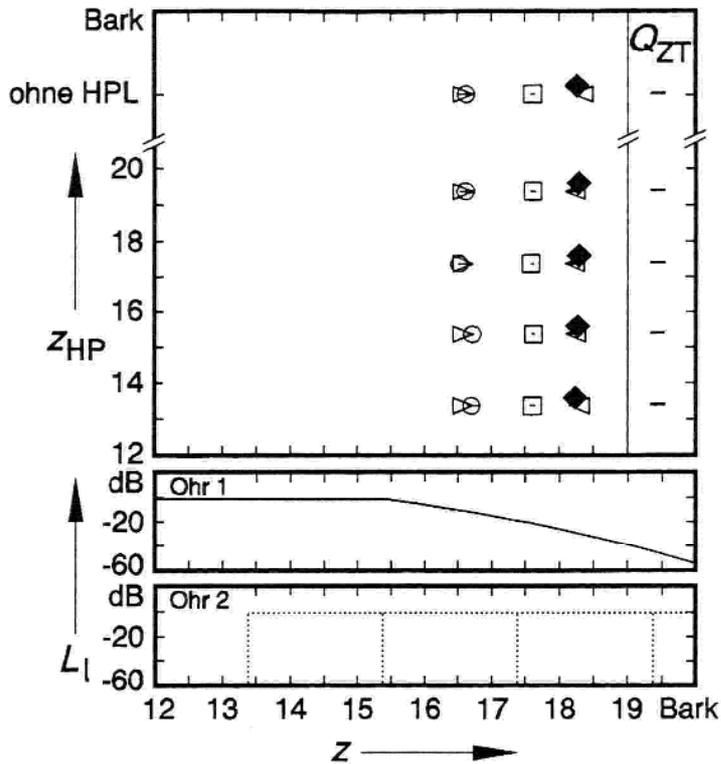


Fig. 44: oben: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei Variation der unteren Grenze z_{HP} des Hochpaß-Linienspektrums. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Mitte: Pegel L_1 der einzelnen Spektrallinien eines Tiefpaß-Linienspektrums mit einer Steigung der unteren 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} .

die Ergebnisse von Lummis und Guttman [28], welche ebenfalls keine Beeinträchtigung des Nachtones durch Hochpaßrauschen im anderen Ohr erkennen konnten.

In einem zweiten Experiment wurde die Abhängigkeit der Qualität des Zwicker-Tones vom Spektrallinienabstand des Erzeugerschalles ausgenutzt. Nach Fig. 24b wird der Nachton bei Linienspektren mit statistisch verteilten Phasenlagen und einem Linienabstand von 500 Hz nicht mehr wahrgenommen, während er bei einem Abstand von 250 Hz zumindest „schlecht“ oder sogar „mittel“ gehört wird. 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) 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 $15,4$ und $18,9$ Bark dargeboten, während das andere Ohr mit einem Sinuston bei 16 Bark (3200 Hz) mit unterschiedlichen Pegeln L_{ST} beschallt wurde (vergleiche

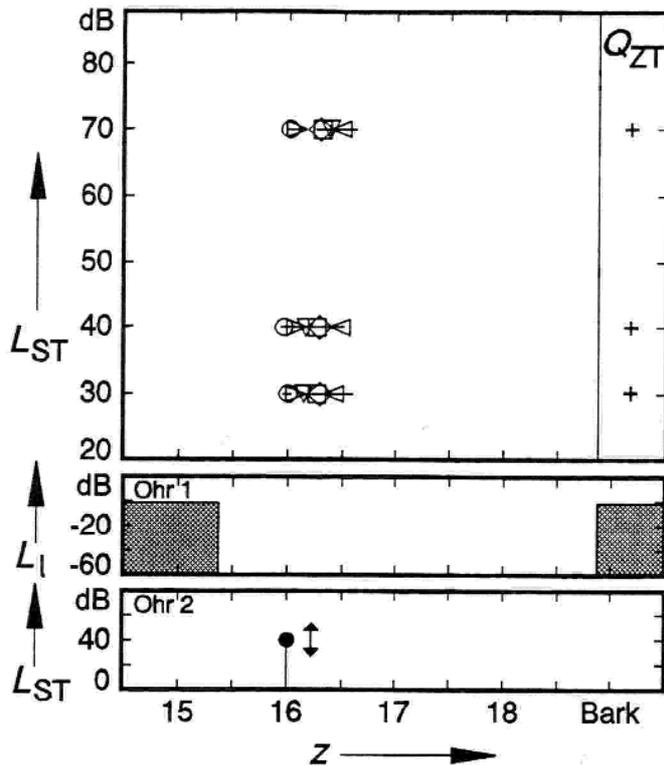


Fig. 45: oben: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei verschiedenen Pegeln L_{ST} des Sinustones. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Mitte: Pegel L_I der einzelnen Spektrallinien eines Linienspektrums mit spektraler Lücke zwischen 15,4 und 18,9 Bark am Ohr 1. unten: Pegel L_{ST} eines Sinustones bei 16 Bark am Ohr 2.

Fig. 43). Der Pegel des Linienspektrums betrug 40 dB. Die Ergebnisse in Fig. 45 verdeutlichen, daß der Nachton unabhängig vom Zusatzton im anderen Ohr „gut“ gehört wird. Die Tonhöhe deckt sich sehr gut mit den Angaben der Personen bei monauraler Anregung ohne Zusatzton. Dieses Resultat steht im Gegensatz zu den Erkenntnissen von Lummis und Guttman [28], die angeben, daß ein zusätzlicher Ton im anderen Ohr die Tonhöhe des Zwicker-Tones verschieben kann, wenn auch nicht so stark wie bei monauraler Darbietung. In den drei sehr unterschiedlichen Experimenten konnte jedoch kein Hinweis dafür gefunden werden, daß Signale an beiden Ohren gemeinsam zur Bildung eines Nachtones beitragen [23]. Es werden somit die Aussagen von Zwicker [51] bestätigt, der vermutete, daß es sich beim akustischen Nachton um ein monaurales Phänomen handelt.

Fig. 46 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

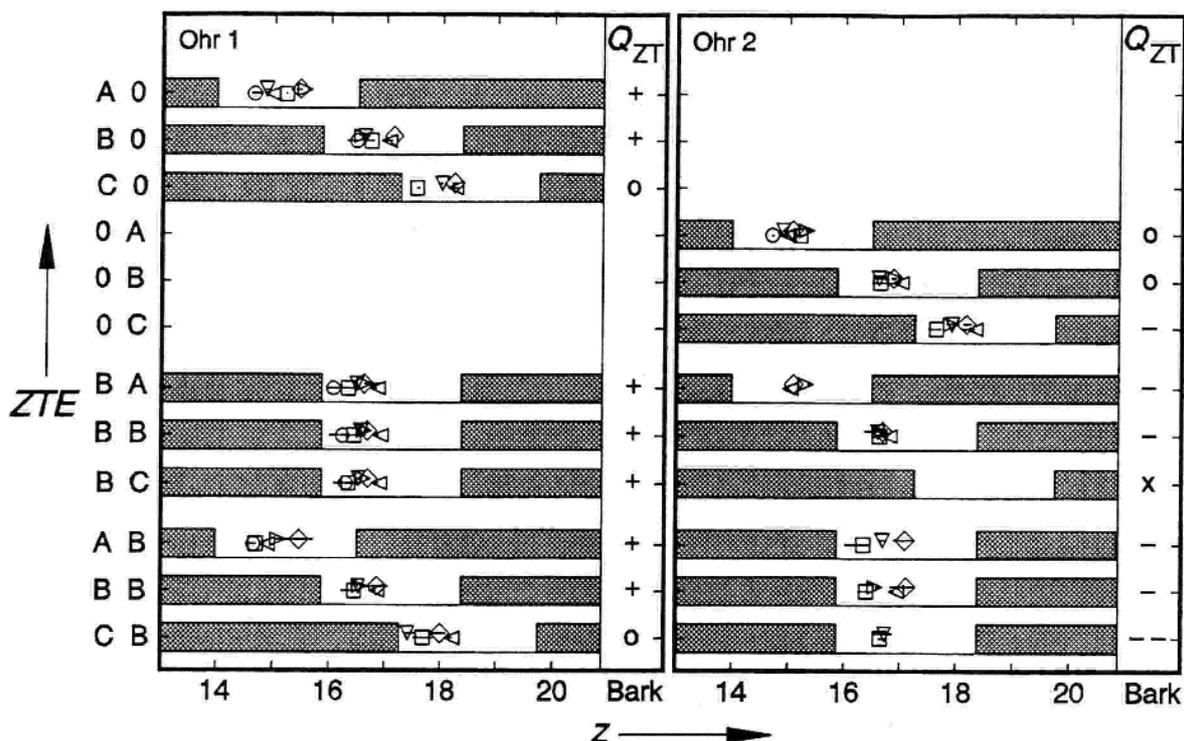


Fig. 46: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlichen Zwicker-Ton-Erzeugerschallen (ZTE) an den beiden Ohren. Zentralwerte (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Striche). Darbietungspegel: 40 dB. Spektrale Lücke: A: 14 bis 16,5 Bark; B: 15,9 bis 18,4 Bark; C: 17,3 bis 19,8 Bark.

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 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 Nachttöne 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 Nachttöne unterschiedlicher Qualität entstehen. Meist dominiert dabei einer der Zwicker-Töne. Eine reproduzierbare Virtuelle Tonhöhe gleich-

zeitig auftretender Nachtöne konnte nicht festgestellt werden [23].

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 übermäßig niedrig eingestuft wird. Der Nachton konnte im allgemeinen stets dem Ohr zugordnet 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 [28] beschrieben wird. Nur unter diesen beiden Voraussetzungen könnte eine binaurale Fusion zweier Nachtöne stattfinden. Eine gemeinsame, sich ergänzende Auswertung der Anregung hingegen konnte bei dichotisch dargebotenen Erzeugerschallen mit verschiedenen Spektren nicht beobachtet werden.

7. Neurophysiologische Untersuchungen

Da die entscheidenden Parameter zur Erzeugung eines gut wahrnehmbaren Nachtönes bekannt sind und mit Hilfe des vorgestellten Funktionsschemas der äquivalente Frequenzbereich des Nachtönes mit großer Genauigkeit berechnet werden kann [21], sind die Grundlagen für weitere neurophysiologische Untersuchungen und Ableitungen geschaffen. Um eine hierzu notwendige gute Qualität des Nachtönes zu erreichen, müssen die im Kapitel 3 angegebenen Einflußgrößen und Parameter im optimalen Bereich liegen.

Nachfolgend angeführte Untersuchungsergebnisse können Hinweise auf die Lokalisation des Zwicker-Tones im Gehör geben:

Der Nachtöner ist ein rein monaurales Phänomen, zwei verschiedene, dichotisch dargebotene Erzeugerschälle an den beiden Ohren ergänzen sich spektral nicht, sondern generieren entsprechend unterschiedliche Nachtöne, die getrennt wahrgenommen werden. Lediglich zwei in Qualität und Tonhöhe identische Zwicker-Töne an beiden Ohren können zu einer binauralen Fusion und wahrgenommenen Lokalisation in Kopfmittle führen. Jede Versuchsperson scheint ein bevorzugtes Ohr zu haben, mit dem sie Nachtöne besser wahrnimmt als mit dem anderen.

Der Nachtöner konnte weder physikalisch gemessen werden, noch waren Schwebungen mit einem zusätzlichen Sinuston feststellbar, so daß der Zwicker-Ton höchstwahrscheinlich nicht wie spontane Emissionen durch Schwingungen der Basilarmembran ans Außenohr gelangt. Ein zusätzlich dargebotener Sinuston am selben Ohr verdeckt den Zwicker-Ton, während der Nachtöner keine verdeckenden Eigenschaften besitzt.

Spontane otoakustische Emissionen innerhalb der spektralen Lücke beeinflussen jedoch die Hörbarkeit des Zwicker-Tones und führen im Vergleich zum unbeeinflussten Nachtöner zu Tonhöhenverschiebungen in Richtung der Emissionsstelle und zu Wahrnehmungsdauern von bis zu einer halben Minute. Die empfundene Lautstärke von ausgeprägten spontanen Emissionen kann daher mit Signalen mit spektraler Lücke kurzzeitig erhöht werden.

Der Zwicker-Ton-Erzeugerschall muß eine minimale spektrale (Liniendichte 100 Hz) und zeitliche Anregungsdichte (100 Erregungen pro Sekunde) aufweisen. Die Zeitstruktur der Anregung beeinflusst das spektrale Erscheinungsbild wie z.B. die Tonhöhe des Nachtönes nicht.

Eine spektrale Lücke, aber auch Bandsperrenrauschen alleine muß mindestens ein Bark breit sein, Bandbreiten über 5 Bark verbessern die Qualität des Nachtones nicht mehr. Bei Anregung mit spektraler Überhöhung darf hingegen die Anhebung ein Bark nicht überschreiten.

Hoke [14] berichtet 1996 von einem neurophysiologischen Korrelat des Zwicker-Tones im Hörkortex. Es wurde das Magnetoencephalogramm von Versuchspersonen nach Anregung mit Weißem Rauschen ohne Bandsperre, Rauschen mit spektraler Lücke zwischen 3,2 und 5,2 kHz sowie demselben Rauschen mit Lücke, jedoch nach dem Abschalten zusätzlich dargebotenem Sinuston als Zwicker-Ton-Simulation aufgenommen. Nach Abschalten des Rauschens mit spektraler Lücke konnten ähnliche poststimulatorische Aktivitäten sowohl mit als auch ohne anschließendem Sinuston gemessen werden, während sie nach Darbietung von Rauschen ohne Lücke nicht vorhanden waren. Die neuromagnetischen Aktivitäten des Zwicker-Tones entsprechen demnach in etwa denen eines nach dem Abschalten dargebotenen, in Lautheit und Tonhöhe gleichwertigen Sinustones. Bei periodischer Darbietung des Zwicker-Ton-Erzeugerschalles von ca. 5 Sekunden mit einer Pause von einer Sekunde erreichten sie ca. 500 ms nach dem Abschalten ein Maximum und klangen dann rasch ab. Eine genaue Lokalisation ist jedoch aufgrund der schwachen evozierten Signale nicht möglich.

Eine Hypothese zur Entstehung des Zwicker-Tones bei der klassischen Anregung mit spektraler Lücke besteht in der Annahme, daß es während der Anregung zu Adaptionserscheinungen in den dem Erzeugerschallspektrum aufgrund der Frequenz-Orts-Transformation zugeordneten Hörneuronen kommt, welche sich nach Abschalten des Zwicker-Ton-Erzeugerschalles in kurzzeitig verminderter Spontanaktivität äußern. Die vorhandene Spontanaktivität nicht angeregter Bereiche wird dann relativ gesehen von höheren Verarbeitungsebenen als Erregung interpretiert. Breite spektrale Lücken führen jedoch selbst unter Berücksichtigung entsprechender Flankensteigungen im Mithörschwellenmuster zu breitbandigen Bereichen ungeminderter Spontanaktivität, die im Gegensatz zum wahrgenommenen Einzelton stehen. Diese Betrachtungsweise setzt daher die Existenz von differenzierenden Elementen in der Signalverarbeitung des Gehörs voraus. Diese würden laut Hoke [14] erklären, warum keine neurophysiologischen Korrelate im inferior colliculus gefunden wurden [9].

Mit dieser Annahme könnte auch die Entstehung des von Wilson [47, 48] beschriebenen inversen Nachklanges erklärt werden, der auftritt, wenn von einem dargebotenen Linienspektrum ohne spektrale Lücke abrupt auf Weißes Rauschen umgeschaltet wird. Das Differenzmuster müßte hierbei infolge stark unterschiedlicher Spontanaktivität noch ausgeprägter sein als wie beim Zwicker-Ton. Der Nachklang, bei dem selbst bei hohen Darbietungspegeln von 90 dB nach dem Einprägen eines Spektrums mit mehreren Peaks und Lücken und dem abrupten Umschalten auf ein Weißes Rauschen kurzzeitig das Komplementärspektrum wahrzunehmen ist, unterscheidet sich jedoch vom Zwicker-Ton dadurch, daß beim Nachton die Anregung stets gegen Ruhe verglichen wird und daß es sich in der Regel um einen einzelnen Ton handelt. Auch bei Anregung mit spektraler Überhöhung handelt es sich nicht um einen Sonderfall des von Wilson beschriebenen Effektes, da stets gegen Ruhe verglichen wird. Gerade bei dieser Anregungsform wird nicht das inverse Spektrum wahrgenommen, sondern ein einzelner Ton, dessen Vergleichsfrequenz sogar unterhalb der spektralen Überhöhung liegt. Die Entstehung des Nachtones bei Anregung mit spektraler Überhöhung kann mit der Hypothese der verminderten Spontanaktivität ohne zusätzliche inhibitorische Effekte nur schwer erklärt werden. Unter der Annahme, daß die lokale Aktivitätsminderung proportional zum Intensitätsdichtepegel des Spektrums ist, ist es nicht einsichtig, daß ein einzelner Nachton mit einer Vergleichsfrequenz unterhalb der spektralen Überhöhung wahrnehmbar ist. Die Erzeugung eines akustischen Nachtones mit Hilfe von Linienspektren mit spektraler Überhöhung fand bisher bei der Suche nach neurophysiologischen Korrelaten sehr wenig Anwendung, obwohl sie diesbezüglich eine sehr interessante Variante darstellt.

Hypothesen, welche auf lateraler Inhibition aufbauen, könnten hingegen die Entstehungsmechanismen des Nachtones bei den verschiedenen Anregungsmethoden in Einklang bringen und wären möglicherweise auch in der Lage, die maximal zulässige Bandbreite der spektralen Überhöhung von 1 Bark zu erklären.

Hoke [15] berichtet anhand von Untersuchungen mit spektralen Lücken mit Mittenfrequenzen um 2, 4 und 6 kHz, daß sowohl der Nachton als auch ein nach dem Abschalten der Anregung dargebotener Sinuston eine ähnliche tonotopische Repräsentation im Hörkortex aufweisen. Entsprechende poststimulatorische Aktivitäten wandern an der medial-lateralen Koordinate des Hörkortex mit zunehmender Tonheit bzw. Frequenz in mediale

Richtung, während kaum Veränderungen in anterior-posteriorer und inferior-superiorer Richtung feststellbar sind. Interessant ist auch die Aussage, daß beim nach dem Abschalten der Anregung zugesetzten Sinuston ein absoluter Anstieg der neuronalen Aktivitäten in der den Sinuston repräsentierenden Umgebung gemessen werden kann, während bei Wahrnehmung des Zwicker-Tones, wenn also nach dem Abschalten der Anregung kein Sinuston dargeboten wird, unveränderte Aktivitäten innerhalb der spektralen Lücke, jedoch verminderte poststimulatorische Aktivitäten unterhalb und oberhalb der spektralen Lücke meßbar waren. Relativ gesehen kann dies vom Gehör als ein kurzzeitiger Anstieg der neuronalen Aktivität innerhalb der Lücke interpretiert werden, obwohl kein realer Stimulus vorhanden war.

Der Zwicker-Ton weist einige Relationen zum Tinnitus auf: So können keine Schwebungen mit zusätzlich dargebotenen Sinustönen erzeugt werden. Der Zwicker-Ton besitzt wie der Tinnitus keine maskierende Wirkung, kann aber durch dargebotene Signale maskiert werden. Wie bei bilateralen Tinniti erfolgt keine binaurale Fusion, wenn zwei ähnliche Zwicker-Töne an beiden Ohren erzeugt werden. Bei Tinnitus und beim Zwicker-Ton liegt der äquivalente Pegel ca. 10 - 15 dB über der Ruhehörschwelle. Der Existenzbereich des Zwicker-Tones liegt bei 500 Hz bis 8 kHz und seine Tonhöhe korrespondiert mit dem Mithörschwellenminimum, während tonaler Tinnitus in Frequenzbereichen zwischen 2 und 6 kHz vorkommt und seine äquivalente Frequenz bei der des maximalen Hörschadens bzw. beim Minimum des Audiogramms zu finden ist. Bei beiden deutet sich an, daß ein objektives Korrelat in den biomagnetischen Feldern des Hörkortex existiert.

Laut Tomlinson et al. [43] handelt es sich beim Zwicker-Ton um eine kurzzeitiges, transientes Ungleichgewicht im auf Rückkopplung basierenden Regelmechanismus des Gehörs, während ein Tinnitus aus einem langandauerndem Ungleichgewicht resultiert. Ausgewachsenen Chincillas wurden Elektroden über dem Hörkortex implantiert und elektro-physikalische Korrelate nach Anregung mit Breitbandrauschen, Weißem Rauschen mit einer halben Oktave breiten Lücke um 3,8 kHz und Weißem Rauschen mit einer spektralen Lücke um die charakteristische Frequenz im Frequenzbereich von 230 Hz bis 11 kHz gemessen. Verglichen mit der Messung nach Anregung mit Breitbandrauschen variierte die Spikerate nach Anregung mit spektraler Lücke um die charakteristische Frequenz im Bereich von 1 bis 6 kHz deutlich, wobei jedoch excitatorische und inhibitorische Effekte

beobachtet werden konnten.

Wiegrebe et al. [45, 46] berichteten über eine individuelle Absenkung der Ruhehörschwelle um 5 bis 13 dB ausschließlich innerhalb der spektralen Lücke direkt nach Abschalten eines Linienspektrums mit spektraler Lücke um 4 kHz während der Wahrnehmungsphase des Zwicker-Tones. Die größte Absenkung befindet sich um den äquivalenten Frequenzbereich des wahrgenommenen Nachtone und wird zu den Lückengrenzen hin geringer. Als erster berichtete M. Kössl nach einer absolvierten Versuchsreihe des Autors über den Eindruck einer Absenkung der Ruhehörschwelle. Versuche mit einem in Pegel und Frequenz veränderbaren Dauersinuston nach dem Abschalten der Anregung konnten jedoch zunächst mit den in Kapitel 3 verwendeten, trainierten Versuchspersonen keine Verringerung der Ruhehörschwelle aufzeigen. Die Untersuchungen von Wiegrebe et al. wurden mit gepulstem Testton durchgeführt, wobei das Entscheidungskriterium der Personen die Wahrnehmung einer Amplitudenmodulation des etwa eine Sekunde anhaltenden Zwicker-Tones durch das nach dem Abschalten der Anregung mit einer Wiederholrate von 3,8 Hz dargebotene Testtonsignal war [45]. Es trat keine Schwebung zwischen Nachtone und Testton auf. Möglicherweise handelt es sich bei diesem Effekt weniger um eine Ruhehörschwellenabsenkung als vielmehr um die eben wahrnehmbare Amplitudenmodulation bzw. Lautheitsvariation des Zwicker-Tones.

Versuche mit einem nach dem Abschalten der Anregung zusätzlich dargebotenen Tieftonsignal um 5 bis 50 Hz mit einem Pegel von 80 bis 120 dB, wie es zur Modulation von spontanen otoakustischen Emissionen verwendet wird [53], ergaben, daß hiervon weder der Nachtone noch die angenommene Ruhehörschwellenabsenkung beeinflusst wurden, so daß Rückkopplungsprozesse ausschließlich im Bereich des Innenohres an der Erzeugung des Zwicker-Tones vermutlich nicht beteiligt sind. Untersuchungen an Personen mit subjektivem Tinnitus zeigten, daß die Lautstärke des Tinnitus unter dem Einfluß von Rauschen mit spektraler Lücke um die äquivalente Tinnitusfrequenz deutlich zunimmt [45].

Trotz der aufgeführten Untersuchungen ist der Entstehungsort und der genaue Entstehungsmechanismus des Zwicker-Tones noch weitgehend unbekannt. Erstaunlich bleibt die Tatsache, daß stets ein reiner Ton wahrgenommen werden kann und nicht das Komplementärspektrum. Bei Anregung mit spektraler Lücke werden zwar physikalisch steile Lückengrenzen im Mithörschwellenmuster je nach Pegel mit Steigungen von weniger als

27 dB/Bark abgebildet, so daß ein ausgeprägtes Hörschwellenminimum entstehen kann, aber auch bei entsprechenden breiten spektralen Lücken ist stets ein einzelner Ton wahrnehmbar. Selbst Flankensteigungen von 8 dB/Bark führen gemäß Kapitel 5 (Fig. 40) noch zu Nachtönen der Kategorie „mittel“, so daß im Gehör sehr fein spektral differenzierende Prozesse ablaufen müssen. Noch unklarer ist die Entstehung des Nachtones bei Anregung mit spektraler Überhöhung, bei der die Tonhöhe des Zwicker-Tones an der unteren Flanke der Überhöhung zu finden ist, was mit den bisherigen Hypothesen nicht erklärt werden kann. Bei beiden Anregungsformen spielt hinsichtlich Tonhöhe des Nachtones der Hochpaßanteil kaum eine Rolle. Für weitere physiologische Untersuchungen wären Anregungssignale gemäß der Kontrollversuche in Kapitel 5, insbesondere entsprechend Fig. 43 geeignet, da hiermit eine Anregung mit Lücke in eine Erregung mit spektraler Überhöhung übergeführt werden kann und so neurophysiologische Aktivitäten von beiden Anregungsformen studiert werden können.

Mein Dank gilt allen Versuchspersonen für die erstaunliche Geduld und Ausdauer bei der Durchführung der oft schwierigen Messungen, insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Fastl für die sehr gute Zusammenarbeit und für zahlreiche Hinweise und Anregungen. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Fleischer und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Fastl bedanke ich mich für die Gelegenheit, die vorliegenden Untersuchungen in dieser Reihe veröffentlichen zu dürfen.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei für die Unterstützung im Rahmen des Sonderforschungsbereiches „Gehör“ (SFB 204), München gedankt.

Literatur

- [1] Dallmayr C., Spontane oto-akustische Emissionen: Statistik und Reaktion auf akustische Störtöne. *Acustica* **59** [1985], 67-75.
- [2] Fastl H., Mithörschwellen-Muster und Hörempfindungen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '78, VDE-Verlag, Berlin [1978], 103-111.
- [3] Fastl H., Frequency discrimination for pulsed versus modulated tones. *J. Acoust. Soc. Amer.* **63** [1978], 275-277.
- [4] Fastl H., Beschreibung dynamischer Hörempfindungen anhand von Mithörschwellen-Mustern. Hochschul-Verlag, Freiburg 1982.
- [5] Fastl H., Fluctuation strength and temporal masking patterns of amplitude modulated broadband noise. *Hearing Research* **8** [1982], 59-69.
- [6] Fastl H., Auditory after-images produced by complex tones with a spectral gap. In: Proc. 12 ICA, Toronto, Vol. I [1986], B 2-5.
- [7] Fastl H., Zum Zwicker-Ton bei Linienspektren mit spektralen Lücken. *Acustica* **67** [1989], 177-186.
- [8] Fastl H. und Hesse A., Frequency Discrimination for Pure Tones at Short Durations. *Acustica* **56** [1984], 41-47.
- [9] Fastl H. und Krump G., Pitch of the Zwicker-tone and masking patterns. Advances in Hearing Research, 10th International Symposium on Hearing 1994, G. A. Manley, G. M. Klump, C. Köppl, H. Fastl, and H. Oeckinghaus eds., World Scientific, Singapore [1995], 457-466.
- [10] Fastl H. und Patsouras D., Pure tone plus bandlimited noise as Zwicker-tone-exciter. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 2000, Verlag: DEGA, Oldenburg [2000].
- [11] Fastl H. und Stoll G., Scaling of pitch strength. *Hearing Research* **1** [1979], 293-301.
- [12] Guttman N. und Lummis R.C., Auditory Afterimages produced by Low-Pass, High-Pass, and Band-Rejected Noises. *J. Acoust. Soc. Amer.* **41** [1967], 1592-1593.
- [13] Hesse A., Ein Funktionsschema der Spektraltonhöhe von Sinustönen. *Acustica* **63** [1987], 1-16.
- [14] Hoke E. S., Hoke M. und Ross B., Neurophysiological Correlate of the Auditory After-Image ("Zwicker Tone"). *Audiology & Neuro-Otology* **1** [1996], 161-174.
- [15] Hoke E. S., Hoke M. und Ross B., Auditory afterimage: Tonotopic representation in the auditory cortex. *NeuroReport* **9** [1998].
- [16] Knuth D., *Seminumerical Algorithms - The Art of Computer Programming*. Addison-Wesley Verlag, Reading [1981].
- [17] Krump G., Zum akustischen Nachton bei Linienspektren. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '90, DPG-Verlag, Bad Honnef [1990], 767-770.
- [18] Krump G., Zum Zwicker-Ton bei unterschiedlichen Konfigurationen der spektralen Lücke. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '91, DPG-Verlag, Bad Honnef [1991], 513-516.

- [19] Krump G., Zum Zwicker-Ton bei Linienspektren unterschiedlicher Phasenlagen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '92, DPG-Verlag, Bad Honnef [1992], 825-828.
- [20] Krump G., Zum Zwicker-Ton bei zeitlich gepulsten Erzeugerschallen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '92, DPG-Verlag, Bad Honnef [1992], 889-892.
- [21] Krump G., Beschreibung des akustischen Nachtones mit Hilfe von Mithörschwellenmustern. Dissertation an der TU München 1993.
- [22] Krump G., Zum Zwicker-Ton bei unterschiedlicher Bandbreite der Anregung. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '93, DPG-Verlag, Bad Honnef [1993], 808-811.
- [23] Krump G., Zum Zwicker-Ton bei binauraler Anregung. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '94, DPG-Verlag, Bad Honnef [1994], 1005-1008.
- [24] Krump G., Zum Zwicker-Ton bei Linienspektren mit spektraler Überhöhung. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '94, DPG-Verlag, Bad Honnef [1994], 1009-1012.
- [25] Krump G., Ein Funktionsschema zur Bestimmung der Tonhöhe des Zwicker-Tones. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '95, Verlag: DEGA, Oldenburg [1995], 943-946.
- [26] Krump G., Linienspektren als Testsignale in der Akustik. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '96, Verlag: DEGA, Oldenburg [1996], 288-289.
- [27] Landon V.D., The Distribution of Amplitude with Time in Fluctuation Noise. In: Proceeding of the Institute of Radio Engineers **29** 50-55.
- [28] Lummis R.C. und Guttman N., Exploratory Studies of Zwicker's "Negative Afterimage" in Hearing. J. Acoust. Soc. Amer. **51** [1972], 1930-1944.
- [29] Lummis R.C., Guttman N. und Bock D.E., Auditory Afterimages in Gated Noise. J. Acoust. Soc. Amer. **40** [1966], 1240.
- [30] Neelen J.J.M., Auditory Afterimages Produced by Incomplete Line Spectra. IPO Progress Report **2** [1967], 37-43.
- [31] Newman D.J., An L1 extremal problem for polynomials. Proc. Amer. Math. Soc. **16**, [1965], 1287-1290.
- [32] Pfeiffer T., Filter zur Umformung von Rechteckimpulsen in Gaußimpulse. Frequenz **17**, Fachverlag Schiele & Schön, Berlin [1963], 81-88.
- [33] Pumplin J., Low-noise noise. J. Acoust. Soc. Amer. **78**, [1985], 100-104.
- [34] Rice S.O., Mathematical Analysis of Random Noise. In: Noise and Stochastic Processes, N. Wax ed., Dover Publications, New York [1954].
- [35] Schmidt S., Abhängigkeit des „Overshoot“-Effekts von der spektralen Zusammensetzung des Maskierers. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '89, DPG-Verlag, Bad Honnef [1989], 387-390.
- [36] Schmidt S. und Zwicker E., The effect of masker spectral asymmetry on overshoot in simultaneous masking. J. Acoust. Soc. Amer. **89** [1991], 1324-1330.
- [37] Schorer E., Ein Funktionsschema eben wahrnehmbarer Frequenz- und Amplitudenänderungen. Acustica **68** [1989], 268-287.
- [38] Schroeder M.R., Number Theory in Science and Communication. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo [1984].
- [39] Terhardt E., Warum hören wir Sinustöne? In: Naturwissenschaften **76**, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo [1989], 496-504.

- [40] Terhardt E., Akustische Kommunikation. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg [1998].
- [41] Terhardt E. und Aures W., Wahrnehmbarkeit der periodischen Wiederholung von Rauschsignalen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '84, DPG-Verlag, Bad Honnef [1984], 769-772.
- [42] Terhardt E., Stoll G. und Seewann M., Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. *J. Acoust. Soc. Amer.* **71** [1982], 679-688.
- [43] Tomlinson R. W. W., Biebel U. W. und Langner G., The hunt for the phantom's song: Representation of Zwicker tones in neurons of alert auditory cortex. In: Göttingen Neurobiology Report, Elsner N. und Wehner R. eds., Stuttgart [1998], 345.
- [44] Traunmüller H., Analytical expressions for the tonotopic sensory scale. *J. Acoust. Soc. Amer.* **88** [1990], 97-100.
- [45] Wiegrebe L., Wartini S., Kössl M. und Schmidt S., Ruhehörschwellenabsenkung während der Wahrnehmung des Zwickertons. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '95, DPG-Verlag, Bad Honnef [1995], 947-950.
- [46] Wiegrebe L., Kössl M. und Schmidt S., Auditory enhancement at the absolute threshold of hearing and its relationship to the Zwicker tone. *Hearing Research* **100** [1996], 171-180.
- [47] Wilson J.P., Psychoacoustics of obstacle detection using ambient or self-generated noise. In: *Animal Sonar Systems*, R.G. Busnel ed. (Frascati Symposium, 1966; Jouy-en-Josas, 1967) [1966], 89-114.
- [48] Wilson J.P., An auditory after-image. In: Plomp R., Smoorenburg G.F. eds., *Frequency Analysis and Pitch Detection in Hearing*. Leiden, Sijthoff [1970], 303-318.
- [49] Zwicker E., Zur Unterteilung des hörbaren Frequenzbereiches in Frequenzgruppen. *Acustica* **10** [1960], 185.
- [50] Zwicker E., Subdivision of the audible frequency range into critical bands (Frequenzgruppen). *J. Acoust. Soc. Amer.* **33** [1961], 248.
- [51] Zwicker E., "Negative Afterimage" in Hearing. *J. Acoust. Soc. Amer.* **36** [1964], 2413-2415.
- [52] Zwicker E., *Psychoakustik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1982.
- [53] Zwicker E., Delayed evoked otoacoustic emissions and their suppression by gaussian-shaped pressure impulses. *Hearing Research* **11** [1983], 359-371.
- [54] Zwicker E. und Fastl H., *Psychoacoustics - Facts and Models*. Second updated edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1999.
- [55] Zwicker E. und Feldtkeller R., *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*. 2. erw. Auflage, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1967.
- [56] Zwicker E. und Terhardt E., Analytical expressions for critical-band rate and critical bandwidth as a function of frequency. *J. Acoust. Soc. Amer.* **68** [1980], 1523-1525.
- [57] Zwicker E. und Zollner M., *Elektroakustik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1984.

Abkürzungen und Indizes

A	Amplitude
A_e	Anzahl der Wiederholungen eines Ereignisses pro Periode
A_l	Gesamtzahl der Harmonischen eines Linienspektrums
A_{leff}	effektive Anzahl der Harmonischen eines Linienspektrums
a_v	Verdeckungsmaß
BSL	bandsperrenbegrenztes Linienspektrum
DC-Impuls	direct current, Gleichstrom-Impuls
FFT	Fast Fourier-Transformation
f	Frequenz
f_b	Grundfrequenz
f_g	Grenzfrequenz
f_{go}	obere Grenzfrequenz der spektralen Lücke
f_{gu}	untere Grenzfrequenz der spektralen Lücke
f_{lo}	höchste Frequenz des Linienspektrums
f_{lu}	niedrigste Frequenz des Linienspektrums
f_m	arithmetische Mittenfrequenz der Lücke
f_n	Frequenz der n-ten Harmonischen
Δf	Bandbreite des Linienspektrums
Δf_G	Breite der Frequenzgruppe
Δf_g	Breite der spektralen Lücke (gap)
Δf_{IHP}	Bandbreite des Hochpaßanteiles des Linienspektrums
Δf_{ITP}	Bandbreite des Tiefpaßanteiles des Linienspektrums
Δf_{SBL}	Bandbreite des schmalbandigen Linienspektrums
HP	Hochpaß
HPL	hochpaßbegrenztes Linienspektrum
L	Pegel
L_G	Frequenzgruppenpegel oder Anregungspegel
L_{GL}	Pegel des Grund-Linienspektrums
L_l	Pegel einer einzelnen Spektrallinie
L_{RHS}	Pegel der Ruhehörschwelle
L_{ST}	Pegel des Sinustones
L_T	Pegel des Testtones
L_{ZTE}	Gesamtpegel des Zwicker-Ton-Erzeugerschalles
l	Dichtepegel
ΔL	Pegeldifferenz
ΔL_G	Differenz der Frequenzgruppenpegel
ΔL_g	Tiefe der spektralen Lücke
MHS	Mithörschwelle
n	laufende Nummer von Harmonischen
n_{lu}	niedrigste Harmonische des Linienspektrums
n_{lo}	höchste Harmonische des Linienspektrums
Q_{ZT}	Qualität des Zwicker-Tones
RHS	Ruhehörschwelle
SBL	schmalbandiges Linienspektrum
SL	sensation level, Pegel über Ruhehörschwelle
SLA	Spektrallinienabstand
SPL	sound pressure level, Schalldruckpegel
s_o	Steigung der oberen Flanke der spektralen Lücke
s_u	Steigung der unteren Flanke der spektralen Lücke
T	Periodendauer
T_e	Dauer eines Ereignisses
T_i	Impulsdauer

T_p	Pausendauer
TP	Tiefpaß
TPL	tiefpaßbegrenztes Linienspektrum
t	Zeit
u	Spannung
VCO	voltage controlled oscillator
ZTE	Zwicker-Ton-Erzeugerschall
z	Tonheit
z_{go}	obere Grenze der spektralen Lücke in Bark
z_{gu}	untere Grenze der spektralen Lücke in Bark
z_{HP}	untere Grenze des hochpaßbegrenzten Linienspektrums
z_m	arithmetische Mittentonheit der spektralen Lücke
z_{ST}	Tonheit des Sinustones in Bark
z_{TP}	obere Grenze des tiefpaßbegrenzten Linienspektrums
Δz_g	Breite der Lücke in Bark
Δz_l	Bandbreite des Linienspektrums in Bark
Δz_{HP}	Bandbreite des HP-Anteiles des Linienspektrums in Bark
Δz_{TP}	Bandbreite des TP-Anteiles des Linienspektrums in Bark
Δz_{SBL}	Breite des schmalbandigen Linienspektrums in Bark
φ	Phase
φ_n	Phase der n-ten Harmonischen
φ_{nES}	Phase der n-ten Harmonischen eines Einzelsweeps
φ_{nIF}	Phase der n-ten Harmonischen einer Impulsfolge
φ_{nSF}	Phase der n-ten Harmonischen einer Sweepfolge
ω	Kreisfrequenz
ω_b	Kreisbasisfrequenz
ω_n	Kreisfrequenz der n-ten Harmonischen

In der Reihe

Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik

sind bisher erschienen:

- Heft 1/96 Fleischer, H. und Zwicker, T., DEAD SPOTS. Zum Schwingungsverhalten elektrischer Gitarren und Baßgitarren.
- Heft 1/97 Fleischer, H., Glockenschwingungen.
- Heft 1/98 Fleischer, H., Schwingungen akustischer Gitarren.
- Heft 1/99 Valenzuela, M.N., Zur Rolle des Gehörs bei akustischen Untersuchungen an Musikinstrumenten.
- Heft 2/99 Fleischer, H., Dead Spots of Electric Basses. I. Structural Vibrations (in Englisch).
- Heft 1/00 Fleischer, H., Dead Spots of Electric Basses. II. Diagnosis (in Englisch).
- Heft 2/00 Varsányi, A., Zur Akustik des javanischen *gong ageng* unter Berücksichtigung verwandter Gonginstrumente.

ISSN 1430-936X

Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik