

Funktionsschema des Zwicker-Tones bei Hörschädigung

Gerhard Krump

Technische Hochschule Deggendorf, 94469 Deggendorf, E-Mail: gerhard.krump@th-deg.de

Einleitung

Der akustische Nachton oder nach seinem Entdecker auch Zwicker-Ton (ZT) genannt ist nach einer Beschallungsdauer von ca. 15 Sekunden und abruptem Abschalten von geeigneten Schallen für etwa 5 Sekunden als reiner sinusähnlicher Ton wahrnehmbar [1,2,3]. Dieses Phänomen tritt bei ca. 94 Prozent der normalhörenden Versuchspersonen auf [5]. Auf der DAGA 2017 wurde gezeigt, dass der Nachton auch bei erhöhter Ruhehörschwelle wahrnehmbar ist [18]. Durch Einstellen einer Vergleichsfrequenz sind Tonhöhe und Lautheit des Zwicker-Tones gut bestimmbar. Geeignete Anregungssignale sind breitbandige Schalle mit spektraler Lücke, wobei eine Mindesttiefe der Lücke und tieffrequent zur Lücke genügend Frequenzgruppenpegel vorhanden sein muss. Dementsprechend muss der Pegel bei Hörschädigung angehoben werden. Auch Tiefpassrauschen alleine kann einen Nachton, wenngleich in verminderter Qualität, hervorrufen, der spektral oberhalb der Grenzfrequenz zu finden ist.

Ebenso können breitbandige Signale mit spektraler Überhöhung einen Zwicker-Ton erzeugen, der in der Regel tieffrequent zur Überhöhung liegt [9,12,16]. Auch hier ist eine ausreichende tieffrequente Anregung notwendig. Gemäß [9] muss der tieffrequente Schallanteil hörbar sein. Oberhalb der spektralen Überhöhung ist von Normalhörenden kein Zwicker-Ton wahrnehmbar.

Die nachfolgenden Ausführungen stellen eine Fortführung und Zusammenstellung der Untersuchungen von 2017 [18] bei Hörgeschädigten dar und sollen die ursprünglichen Ergebnisse durch individuelle Mithörschwellenmessungen ergänzen. Sie wurden zwar mit gleicher Gerätschaft, aber ein halbes Jahr später gemessen, so dass Ungenauigkeiten auftreten können.

Funktionsschema und Randbedingungen

Für normalhörende Personen gibt es ein einfaches Funktionsschema, mit dessen Hilfe die Vergleichsfrequenz des Zwicker-Tones hergeleitet werden kann, wenn die Parameter des Anregungsschalles bekannt sind [9,13,14,16]. Hierbei sind die Mithörschwellen-Tonheitsmuster der Anregung ausschlaggebend. Jedoch auch im Frequenzmuster kann die Vergleichsfrequenz des Nachtones hergeleitet werden. Gemäß Abb. 1 befindet sich der mit einem Stern symbolisierte Nachton bei Zwicker-Ton-Erzeugerschallen (ZTE) mit spektraler Lücke beim Schnittpunkt der Mithörschwelle der unteren Lückenbegrenzung mit der Ruhehörschwelle. Dadurch ist der Zwicker-Ton auch mit Tiefpassrauschen alleine erzeugbar, wenngleich dessen Wahrnehmungsqualität etwas schlechter ist. Bei geringen Anregungspegeln ist somit der Verlauf der Ruhehörschwelle (RHS) von großer Bedeutung. Bei höheren Anregungspegeln, bei denen sich kein Schnittpunkt mit der Ruhehörschwelle ergibt, liegt der Nachton beim Minimum der Mithörschwelle (MHS). Dadurch wandert der Zwicker-Ton mit zunehmenden Anregungspegeln zu höheren Frequenzen.

Bei Erzeugerschallen mit spektraler Überhöhung ist der Nachton gemäß Abb. 1 beim Schnittpunkt der unteren Mithörschwellenflanke der Überhöhung mit der Mithörschwelle des Grundrauschens zu finden. Bei normalhörenden Versuchspersonen wurde der Nachton nicht hochfrequent zur spektralen Überhöhung wahrgenommen.

Bei Normalhörenden konnten Abweichungen vom dargestellten Funktionsschema durch dem entstehenden Nachton frequenznahe spontane otoakustische Emissionen festgestellt werden [5,9,14,16]. Diese konnten bei Versuchspersonen ohne Hörschädigung sowohl durch Mikrofonmessungen im Ohr als auch durch Schwebungswahrnehmungen zwischen der Emission und einem per Kopfhörer von außen zugeführten leisen Sinuston nachgewiesen werden [9,16]. Nach Abschalten von Weißem Rauschen ohne Lücke oder Überhöhung wurden diese Emissionsstellen wahrgenommen [5].

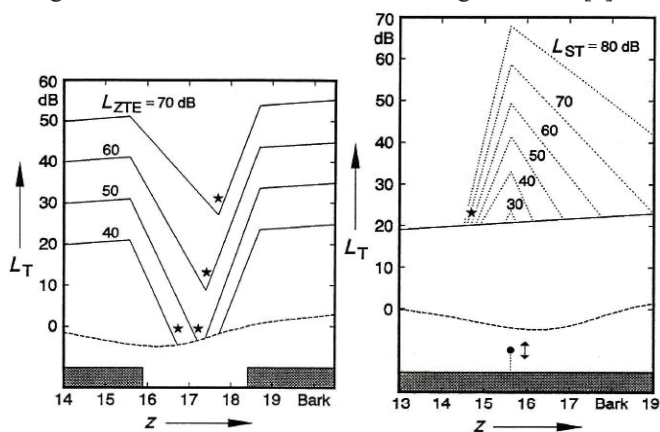


Abbildung 1: Mithörschwellen-Tonheitsmuster einer Anregung mit spektraler Lücke (links) bzw. spektraler Überhöhung (rechts) bei verschiedenen Pegeln. Stern: Simulierter Nachton. Gestrichelt: Norm-RHS [9,14,16].

Die von den Versuchspersonen geschätzte Wahrnehmungsqualität des Nachtones wurde gemäß Abb. 2 in fünf Kategorien eingeteilt, welche mit Zeichen bzw. Farben gekennzeichnet sind. Sie hängt von den Parametern des ZTE ab.

Symbol	Zeichen	Bedeutung
◆	++	sehr gut
◇	+	gut
◇	•	mittel
◇	-	schlecht
◆	--	sehr schlecht

Abbildung 2: Von den Versuchspersonen geschätzte Wahrnehmungsqualität des Zwicker-Tones in fünf Kategorien.

Für die Wahrnehmung und Qualität des Nachtones sind bei normalhörenden Personen noch zahlreiche Randbedingungen des Erzeugerschalles notwendig [9,14,16]:

a, Spektrale Lücke

- Der optimale Gesamtpegel der breitbandigen Anregung liegt zwischen 40 und 60 dB. 70 dB erzeugen einen sehr

schlechten und 80 dB keinen Nachton. Es kommt auf den tieffrequenten Frequenzgruppenpegel an, der mindestens 10 dB, idealerweise über 30 dB sein sollte.

- Die minimale Bandbreite tieffrequent zur spektralen Lücke muss mehr als 1 Bark betragen. Mit zunehmender Bandbreite bis 5 Bark wird seine Qualität besser. Ein Hochpassanteil verbessert selbst bei niedrigen Pegeln (ZT bei Schnittpunkt der MHS mit RHS) die Qualität um eine Kategorie [6,10].

- Die Tiefe der spektralen Lücke bzw. die Pegeldifferenz der entsprechenden Frequenzgruppen außerhalb und innerhalb der Lücke muss mindestens 15 dB betragen. Bis 30 dB nimmt die Qualität des Nachtones zu.

- Die Breite der spektralen Lücke muss mindestens 1 Bark betragen. Ab 5 Bark nimmt die Qualität ab, jedoch auch ein Tiefpassrauschen kann einen Nachton hervorrufen.

- Der Existenzbereich des Zwicker-Tones liegt zwischen 500 Hz und 8 kHz, wobei die besten Wahrnehmungsqualitäten zwischen 2 und 5 kHz zu finden sind. Bei reinem Tiefpassrauschen liegt der Existenzbereich zwischen 1 bis 6 kHz.

b, Spektrale Überhöhung

- Das breitbandige Grundrauschen muss hörbar sein und sollte über 20 dB, idealerweise 40 dB Gesamtpegel aufweisen. Ein reiner Sinuston erzeugt keinen Zwicker-Ton.

- Der Pegelunterschied zwischen der Frequenzgruppe unter und der mit der spektralen Überhöhung sollte mindestens 25 dB, idealerweise 35 bis 45 dB betragen. Ab 50 dB Pegelunterschied wird die Qualität schlechter.

- Die Bandbreite der spektralen Überhöhung sollte unter 0,2 Bark liegen und darf 1 Bark nicht überschreiten, weil der Nachton dann nicht mehr gehört wird.

- Der Nachton existiert hier zwischen 2 und 5 kHz.

Diese Randbedingungen zur Erzeugung eines gut wahrnehmbaren Zwicker-Tones sind bei normalhörenden Versuchspersonen mittels definierter Anregungssignale gut zu untersuchen. Bei Personen mit Hörschädigung sind die Ergebnisse nicht mehr so eindeutig und schwierig darzustellen, weil die erhöhte Ruheschwelle nicht nur zu verschobenen Schnittpunkten mit der Mithörschwelle führt, sondern auch die Anregungspegel über der Hörschwelle anders sind. Gerade die tieffrequenten Anregungspegel unterhalb der spektralen Lücke bzw. Überhöhung sind für die Erzeugung und Tonhöhe des Nachtones von großer Bedeutung.

Nach [17] ist der Zwicker-Ton neuronal weder in der Cochlea noch in den Nervenfasern nachzuweisen, sondern sein Ursprung wird im zentralen Hörsystem vermutet. Er wird mit einer asymmetrischen lateralen Inhibition zwischen Nervenzellen von tiefen zu hohen Frequenzen in Verbindung mit einer vorhandenen Rauschunterdrückung im dorsal cochlear nucleus erklärt. Schädigungen an den Sinneszellen im cochleären Bereich führen somit zu einer anderen Signalsituation auf Nervenfaserebene, da die Sinneszellen unempfindlicher sind bzw. wegen der erhöhten Hörschwelle weniger Pegel SL vorhanden ist. Es ist zu prüfen, ob hiermit auch die Zwicker-Ton-Wahrnehmung bei Hörschädigung erklärt werden kann. Auch das Fehlen des Nachtones bei Anregung mit breiter spektraler Überhöhung ab einem Bark ist zu überprüfen.

Versuchsdurchführung

Die Versuchskonditionen und Anregungssignale sind bereits in [18] erläutert und werden im Folgenden wiederholt.

Die Hörversuche wurden in einer schallgedämmten Kabine monaural [11] per Kopfhörer DT48 mit Freifeldentzerrer [15] mit einer Versuchsanordnung gemäß [19] durchgeführt. Zur Ermittlung des Zwicker-Tones konnten die Versuchspersonen die Anregung beliebig lange anhören, dann abschalten und nach Wahrnehmung des Nachtones in einer dritten Schalterstellung einen Vergleichssinuston in Frequenz und Pegel einstellen. Zusätzlich gab die Person die geschätzte Hörqualität des Nachtones in fünf Kategorien gemäß Abb. 2 an. Es wurden 13 Personen (4 weiblich, 9 männlich) im Alter von 20 bis 60 Jahren mit 26 Ohren untersucht, von denen 15 entweder schmalbandig oder hochfrequent eine Hörschwellenanhebung von mindestens 20 dB aufwiesen. In zwei separaten Sitzungen stellten die Personen bei nachfolgenden Anregungen mit verschiedenen Darbietungspegeln L für jedes Ohr in stets veränderter Reihenfolge den Vergleichssinuston ein. Noch höhere Pegel wurden wegen Recruitment als unangenehm empfunden. Die Personen beurteilten somit zweimal dasselbe Anregungssignal. Als ZT-Erzeugerschalle wurden Multisinussignale von 1 Hz bis 20 kHz mit einem Spektrallinienabstand von 1 Hz und zufälliger Phasenlage verwendet, so dass sich ein Quasirauschen mit 1 s Periodendauer ergibt [4,5,7]. Es gab drei verschiedene Anregungssignale:

A, In Anpassung an die Hörschädigung wurden fünf Anregungssignale mit spektraler Lücke zwischen 920 bis 1600 Hz, 1480 bis 2500 Hz, 2000 bis 3000 Hz, 3150 bis 4850 Hz bzw. 4400 bis 8500 Hz bei Pegeln von jeweils 35, 45, 55, 65 und 75 dB verwendet. Diese ca. 2,5 bis 3,5 Bark breiten spektralen Lücken erzeugen einen guten ZT [5,9,16].

B, Als Signal mit spektraler Überhöhung wurde ein Sinuston bei 3000 Hz (15,6 Bark) mit einem Pegel von 63 dB einem Grundlinienspektrum mit einem Dichtepegel von 0 dB hinzuaddiert. Der Gesamtpegel dieser Kombination wurde den Personen dann mit 55, 65, 75 und 85 dB dargeboten. Dadurch ergibt sich ein Frequenzgruppenpegelunterschied ($\Delta f_G = 400$ Hz) zwischen spektraler Überhöhung und der tieffrequenteren Frequenzgruppe von stets 37 dB, da ein Frequenzgruppenpegelunterschied von minimal 25 dB, ideal 35 bis 45 dB nach Krump einen guten ZT erzeugt [9,12,16].

C, Als dritte Anregungsart wurde ein Multisinussignal mit konstanter Spektrallinienamplitude zwischen 1 Hz und 20 kHz ohne spektrale Lücke bzw. Überhöhung als Quasi Weißes Rauschen [7] mit einem Gesamtpegel von jeweils 35, 45, 55, 65 und 75 dB dargeboten, um zu überprüfen, ob eine Erhöhung der Hörschwelle an sich als spektrale Lücke gewertet wird und einen Nachton in deren Mitte hervorrufft.

Die Ruheschwelle wurde vorab mit pendelndem Einregeln nach Békésy gemessen und gemittelt. Bei manchen Personen war nur ein Ohr geschädigt, so dass sie den Nachton zwischen gesundem und geschädigtem Ohr vergleichen konnten. Bei ausgewählten Signalen und Pegeln von 65 dB wurden die zugehörigen Mithörschwellen durch pendelndes Einregeln und Mittelung gemessen. Einige wurden zusätzlich bei 55 und 75 dB ermittelt. Die Mithörschwellen wurden hierbei nicht über den kompletten, sondern nur die in blauer Farbe dargestellten relevanten Frequenzbereiche gemessen.

Versuchsergebnisse

In den nachfolgenden Abbildungen sind neben den gemessenen Ruhe- und Mithörschwellen die Vergleichsfrequenzen der zugehörigen Zwicker-Töne als Raute eingetragen, wobei die Ergebnisse der ersten Sitzung nicht eingerahmt sind, die der zweiten Sitzung einen schwarzen Rahmen aufweisen. Die Füllfarbe kennzeichnet die Wahrnehmungsqualität gemäß Abb. 2. Es sind nur die Nachtöne bei Anregungspegeln von 65 dB bzw. vereinzelt auch bei 55 und 75 dB eingetragen. Die Ergebnisse bei weiteren Pegeln sind [18] zu entnehmen. Die Signalkonfigurationen sind auf der Abszisse (nicht pegeltreu) skizziert.

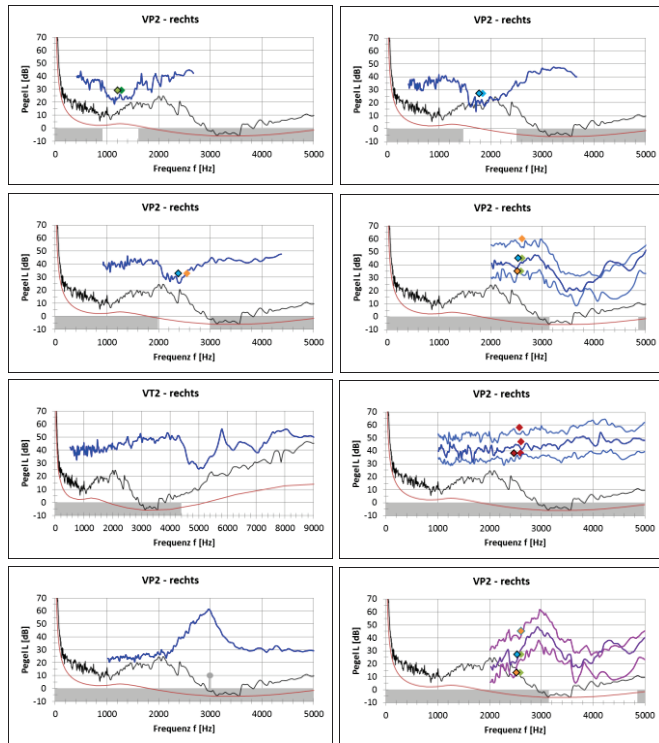


Abbildung 3: Mithörschwelle (blau) der VP2 bei Anregung mit fünf spektralen Lücken sowie mit Weißem Rauschen und mit spektraler Überhöhung. Pegel der Anregung: 65 dB bzw. zusätzlich 55 und 75 dB. Individuelle RHS (schwarz) und Norm-RHS (rot). Zugehörige ZT (ohne Bezug zur Ordinate) als Raute. Letztes Bild: MHS abzüglich RHS (violett) bei Lücke von 3150 bis 4850 Hz.

Versuchsperson 2 weist gemäß Abb. 3 am rechten Ohr eine schmalbandige RHS-Erhöhung um 2 kHz von ca. 25 dB auf. Nach [18] durchwandert bei den verschiedenen Lücken der Nachtöne diese Anhebung, bleibt aber bei allen Darbietungspegeln der Lückenbreite von 3150 bis 4850 Hz bei ca. 2600 Hz und liegt damit außerhalb der Lücke. Diese Frequenz wird auch bei Anregung mit Weißem Rauschen eingestellt, während bei einer Lücke von 4400 bis 8500 Hz und bei Anregung mit spektraler Überhöhung kein Nachtöne wahrgenommen wird. Die MHS-Kurven verdeutlichen bei den ersten drei Lücken noch eine Wahrnehmung beim Minimum, das Auftreten des Nachtönes bei 2600 Hz bei der vierten Lücke und beim Weißem Rauschen kann jedoch mit den Mithörschwellenverläufen allein zunächst nicht erklärt werden. Wird bei der Lücke von 3150 bis 4850 Hz jedoch die individuelle Ruheshwelle von den Mithörschwellen abgezogen, so entstehen wie im letzten Bild von Abb. 3 in violett dargestellt Anregungspegelverläufe als sensation level, die einer Anregung mit spektraler Überhöhung entsprechen. Die Vergleichsfrequenzen wären dann an der erwarteten

ten Frequenzstelle zu finden. Gleiches gilt bei Anregung mit Weißem Rauschen. Allerdings hätte die spektrale Überhöhung dann einen hochpassähnlichen Verlauf von mehr als 1 Bark Bandbreite, so dass kein Nachtöne entstehen dürfte [9,12,14,16]. Ebenso dürfte bei Hörschädigungen auch kein Einfluss von otoakustischen Emissionen vorhanden sein, wie er sonst bei Normalhörenden zu finden ist [5,9].

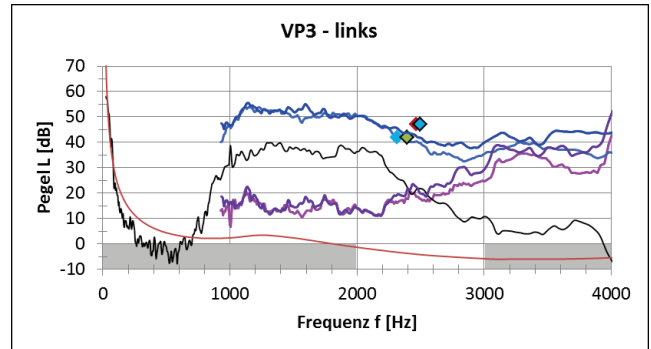


Abbildung 4: Mithörschwelle (blau) der VP3 bei Anregung mit spektraler Lücke zwischen 2 und 3 kHz. Pegel: 65 dB (dunkelblau) bzw. 55 dB (hellblau). Individuelle RHS (schwarz) und Norm-RHS (rot). Zugehörige Zwicker-Töne (ohne Bezug zur Ordinate) als Raute. MHS abzüglich der RHS als violette Linien.

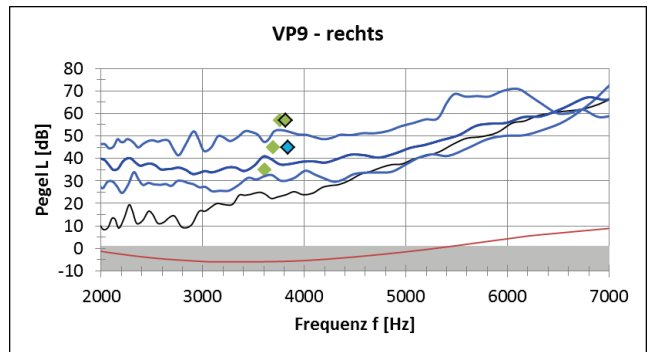


Abbildung 5: Mithörschwelle (blau) der VP9 bei Anregung mit Weißem Rauschen. Pegel: 65 dB (dunkelblau) bzw. 55 dB und 75 dB (hellblau). Individuelle RHS (schwarz) und Norm-RHS (rot). Zugehörige Zwicker-Töne (ohne Bezug zur Ordinate) als Raute.

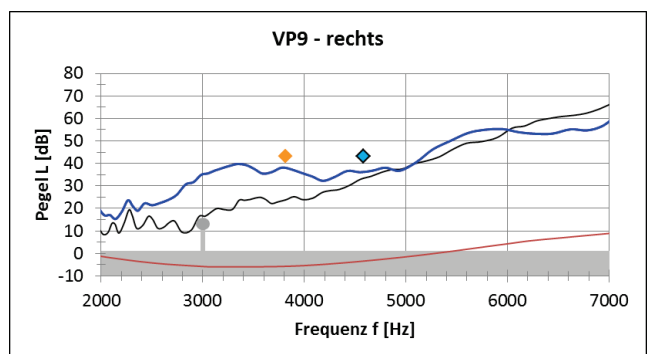


Abbildung 6: Mithörschwelle (dunkelblau) der VP9 bei Anregung mit spektraler Überhöhung. Pegel: 65 dB. Individuelle RHS (schwarz) und Norm-RHS (rot). Zugehörige Zwicker-Töne (ohne Bezug zur Ordinate) als Raute.

In Abb. 4 sind die Mithörschwellen eines Signals mit einer spektralen Lücke zwischen 2 und 3 kHz dargestellt. Die tief-frequenten Frequenzgruppenpegel über der Ruheshwelle sind wegen der Hörschwellenerhöhung relativ gering. Dennoch wird ein Zwicker-Ton wahrgenommen, obwohl weder ein Minimum der Mithörschwelle, noch ein Schnittpunkt mit der Ruheshwelle erkennbar ist. Die Differenzberechnung zwischen MHS und RHS in Form der violetten Kurven

lassen in diesem Fall eine Anregung mit spektraler Überhöhung vermuten. Eine Vergleichsfrequenz zu Beginn des Anstieges würde dann in etwa passen. Die Erhöhung der individuellen RHS kann somit die Art des Zwicker-Ton-Erzeugerschalles stark beeinflussen.

In Abb. 5 sind die Mithörschwellen der Versuchsperson 9 bei Weißem Rauschen mit Pegeln von 55, 65 und 75 dB dargestellt. Eine Regel für die Entstehung des Nachtönes ist nicht erkennbar. Obwohl die RHS der Person ab 5 kHz sehr stark ansteigt (siehe [18]) ist kein konkreter Schnittpunkt zwischen RHS und MHS bei den eingestellten Vergleichsfrequenzen erkennbar, es sei denn, die RHS und MHS-Verläufe schwanken sehr stark, weil zwischen beiden Messungen sechs Monate Zeitunterschied bestanden. Bei Normalhörenden würde man die Tonhöhe mit dem Einfluss spontaner otoakustischer Emissionen erklären [5,9,16].

Dieselbe Versuchsperson stellte gemäß Abb. 6 bei Anregung mit spektraler Überhöhung bei einem Pegel von 65 dB in der ersten Sitzung die Vergleichsfrequenz wie beim Weißen Rauschen um 3,8 kHz ein. In der zweiten Sitzung hörte sie den ZT jedoch nahe dem Schnittpunkt von RHS und MHS.

Zusammenfassung

Bei definierter Anregung mit spektraler Lücke bzw. spektraler Überhöhung gilt das für Normalhörende bekannte Funktionsschema auch bei angehobener Ruhehörschwelle. Die erhöhte Hörschwelle beeinflusst jedoch den notwendigen Darbietungspegel des Erzeugerschalles sowie die Tonhöhe des Nachtönes sehr stark, weil die tieffrequenten Anteile über der Hörschwelle, also der sensation level für Wahrnehmungsqualität und Tonhöhe ausschlaggebend sind. Bei entsprechender Konstellation können dadurch auch Nachtöne außerhalb der spektralen Lücke oder oberhalb der spektralen Überhöhung gehört werden. Bei entsprechender Anregung kann ein Nachton auch um eine schmalbandige Hörschädigung herumwandern. Dass eine Hörschädigung an sich als spektrale Lücke wirkt und der Nachton in der Mitte wahrgenommen wird, wurde nicht beobachtet. Über die zugehörigen Mithörschwellenmuster kann die Vergleichsfrequenz des Zwicker-Tones in den meisten Fällen zwar vorhergesagt werden, die Vorhersage ist jedoch wegen der individuellen Hörschwelle wesentlich schwieriger als bei normalhörenden Versuchspersonen. Die Mechanismen zur Erzeugung eines Zwicker-Tones arbeiten selbst bei einer Hörschwellenanhebung von 40 dB noch. Hierbei erzeugen Anregungspegel von 85 dB noch einen „guten“ Zwicker-Ton. Die Rahmenbedingungen zur Erzeugung eines Nachtönes bleiben auch bei Hörschädigung bestehen. Ebenso sind bevorzugte Vergleichsfrequenzen wie sie bei Normalhörenden durch spontane Emissionsstellen nachgewiesen werden können, auch bei Hörschädigungen beobachtbar, obwohl Emissionen an sich wegen der Schädigung nicht mehr gemessen werden können [5].

Der Autor dankt Herrn Peter Meier für die Durchführung der MHS-Messungen.

Literatur

- [1] Zwicker E.: „Negative Afterimage“ in Hearing. J. Acoust. Soc. Amer. **36**, 1964, 2413-2415.
- [2] Guttman N., Lummis R.C.: Auditory Afterimages produced by Low-Pass, High-Pass, and Band-Rejected Noises. J. Acoust. Soc. Amer. **41**, 1967, 1592-1593.
- [3] Lummis R.C., Gutmann N.: Exploratory Studies of Zwicker's „Negative Afterimage“ in Hearing. J. Acoust. Soc. Amer. **51**, 1972, 1930-1944.
- [4] Fastl H.: Zum Zwicker-Ton bei Linienspektren mit spektralen Lücken. *Acustica* **67**, 1989, 177-186.
- [5] Krump G.: Zum akustischen Nachton bei Linienspektren. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '90, Verlag: DPG, Bad Honnef, 1990, 767-770.
- [6] Krump G.: Zum Zwicker-Ton bei unterschiedlichen Konfigurationen der spektralen Lücke. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '91, Verlag: DPG, Bad Honnef, 1991, 513-516.
- [7] Krump G.: Zum Zwicker-Ton bei Linienspektren unterschiedlicher Phasenlagen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '92, Verlag: DPG, Bad Honnef, 1992, 825-828.
- [8] Krump G.: Zum Zwicker-Ton bei zeitlich gepulsten Erzeugerschallen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '92, Verlag: DPG, Bad Honnef, 1992, 889-892.
- [9] Krump G.: Beschreibung des akustischen Nachtönes mit Hilfe von Mithörschwellenmustern. Dissertation an der TU München, 1993.
- [10] Krump G.: Zum Zwicker-Ton bei unterschiedlicher Bandbreite der Anregung. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '93, Verlag: DPG, Bad Honnef, 1993, 808-811.
- [11] Krump G.: Zum Zwicker-Ton bei binauraler Anregung. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '94, Verlag: DPG, Bad Honnef, 1994, 1005-1008
- [12] Krump G.: Zum Zwicker-Ton bei Linienspektren mit spektraler Überhöhung. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '94, Verlag: DPG, Bad Honnef, 1994, 1009-1012.
- [13] Fastl H., Krump G.: Pitch of the Zwicker-tone and Masking Patterns. *Advances in Hearing Research*, 10th International Symposium on Hearing, G. A. Manley, G. M. Klump, C. Köppl, H. Fastl, and H. Oeckinghaus eds., 1994, 457-464.
- [14] Krump G.: Ein Funktionsschema zur Bestimmung der Tonhöhe des Zwicker-Tones. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '95, Verlag: DEGA, Oldenburg, 1995, 943-946.
- [15] Zwicker E., Fastl H.: *Psychoacoustics. Facts and Models*. Springer, 1999.
- [16] Krump G.: Der akustische Nachton - Beschreibung und Funktionsschema. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik, Heft 3/00, Herausgeber: H. Fleischer und H. Fastl, Neubiberg, ISSN 1430-936X, Oktober 2000.
- [17] Fransosch J.-M. et al.: Zwicker Tone Illusion and Noise Reduction in the Auditory System. *Physical Review Letters* **90**, No. 17, American Physical Soc., 2003.
- [18] Krump G., Fadanelli M.: Zwicker-Ton bei erhöhter Ruhehörschwelle. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 2017, Verlag: DEGA, Kiel, 2017, 784-787.
- [19] Meier P., Krump G.: Eine modulare Hörversuchssteuerung auf Basis von Audio-Plugins. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, Verlag: DEGA, München, 2018.