

## Zwicker-Ton bei erhöhter Ruheshwelle

Gerhard Krump, Maria Fadanelli

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

### Einleitung

Nach dem Abschalten eines etwa 10 Sekunden andauernden Schallreizes mit spektraler Lücke kann von 94 Prozent der normalhörenden Versuchspersonen ein leiser, abklingender Nachton, welcher nach seinem Entdecker auch Zwicker-Ton (ZT) genannt wird, wahrgenommen werden, dessen Vergleichsfrequenz sich stets innerhalb dieser Lücke befindet [1,2,3,4,9,16]. Krump fand heraus, dass ebenso Schallreize mit spektraler Überhöhung einen Nachton erzeugen, der jedoch mit seiner Vergleichsfrequenz tieffrequenter als die spektrale Anhebung liegt [9,12,16]. Das Phänomen ist hinsichtlich erforderlichem Pegel und spektraler Zusammensetzung der verschiedenen Anregungsschalle mit normalhörenden Personen umfangreich untersucht [5,6,7,8,9,10,16]. Über ein einfaches Funktionsmodell von Krump kann die Vergleichsfrequenz gemäß Abb. 10 als Schnittpunkt der Mithörschwelle der unteren Lückenbegrenzung mit der Ruheshwelle (RHS) der Versuchsperson bzw. bei höheren Pegeln, bei denen sich kein Schnittpunkt mehr ergibt, beim Minimum des Mithörschwellenverlaufes innerhalb der spektralen Lücke ermittelt werden [9,13,14,16]. Die Ruheshwelle kann somit als besondere Form der Mithörschwelle angesehen werden. Die Vergleichsfrequenz wandert mit zunehmendem Pegel zur Lückenmitte bzw. oberen Lückenbegrenzung. Bei Anregung mit spektraler Überhöhung ist der Zwicker-Ton beim Schnittpunkt von deren unteren Mithörschwellenflanke mit der Mithörschwelle des Grundrauschens zu finden [9,14,16]. Anregungspegel und Ruheshwelle haben daher Einfluss auf die Tonhöhe des Nachtones. Abweichungen vom Funktionsschema können durch frequenznahe spontane otoakustische Emissionsstellen hervorgerufen werden [5,9,14,16].

In der vorliegenden Studie werden nun Wahrnehmbarkeit des Zwicker-Tones und notwendige Anregungspegel bei Versuchspersonen mit erhöhter Ruheshwelle ermittelt. Hierbei wird insbesondere auf die spektrale Konfiguration der verschiedenen Anregungsschalle unter Berücksichtigung der individuellen Hörschwelle der Versuchspersonen eingegangen. Da der Nachton auch durch Tiefpassrauschen ange-regt werden kann und hauptsächlich im Frequenzbereich von 1 bis 6 kHz wahrgenommen wird, sind Hörschwellenverschiebungen in diesem Bereich interessant. Hochpassrauschen alleine erzeugt bei Normalhörenden keinen Nachton. Es sollten folgende Fragestellungen geklärt werden:

Ist der Zwicker-Ton auch bei erhöhter Hörschwelle wahrnehmbar und welche spektrale Konfiguration ist hierzu geeignet? Welche Anregungspegel sind nötig? Muss der Pegel um die RHS-Erhöhung angehoben werden? Ist der Zwicker-Ton in einem Frequenzbereich hörbar, in dem die RHS stark angehoben ist? Falls ja, würden dort Zwicker-Ton-Erzeugermechanismen trotz Schädigung arbeiten. Erzeugt eine schmalbandige RHS-Erhöhung eine derartige spektrale Lücke, dass dadurch alleine bereits ein Nachton hörbar ist?

### Versuchsdurchführung

Die ZT-Erzeugersignale (ZTE) wurden in einer schallgedämmten Kabine monaural [11] per Kopfhörer DT48 mit Freifeldentzerrer dargeboten [15]. Die Personen konnten die Anregung beliebig lange anhören, dann abschalten und nach Wahrnehmung des Nachtones in einer dritten Schalterstellung einen Vergleichssinuston in Frequenz und Pegel einstellen. Der Abgleich konnte öfters durchgeführt werden, bis sich die Versuchsperson in ihrer Einstellung sicher war. Zusätzlich gab die Person die geschätzte Hörqualität des Nachtones in fünf Kategorien von sehr schlecht bis sehr gut an. Bei 13 Personen (4 weiblich, 9 männlich) im Alter von 20 bis 60 Jahren wurden 26 Ohren untersucht, von denen 15 entweder schmalbandig oder hochfrequent eine Hörschwellenanhebung von mindestens 20 dB aufwiesen. Die Ruheshwelle 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. Der Hörversuch erfolgte in zwei separaten Sitzungen, in denen die Personen bei nachfolgenden Anregungen mit verschiedenen Darbietungspegeln L für jedes Ohr in stets veränderter Reihenfolge den Vergleichssinuston einstellten. 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 Quasi-Rauschen 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 hervorruft.

## Versuchsergebnisse

Die Ruhehörschwellen der Versuchspersonen verlaufen sehr unterschiedlich, zum Teil mit schmalbandigen Erhöhungen an beiden Ohren wie in Abb. 1 dargestellt, zum Teil mit einem Hörverlust über den gesamten Hörbereich wie in Abb. 2, der zudem an beiden Ohren einen Hochtonverlust ab ca. 4 kHz, also im ZT-Existenzbereich, aufweist. Auch nur einseitiger Hochtonverlust kam vor.

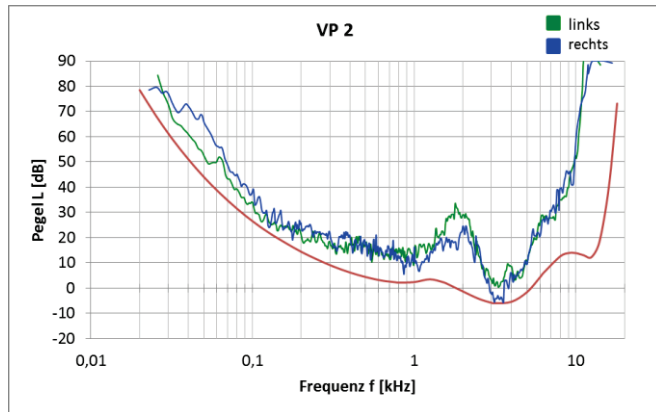


Abbildung 1: RHS der Versuchsperson 2. Norm-RHS in rot.

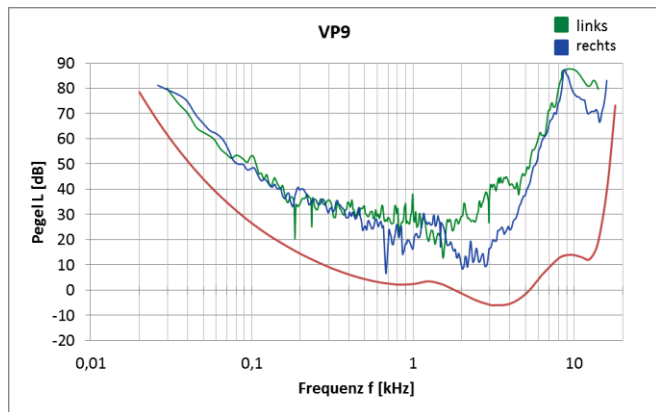


Abbildung 2: RHS der Versuchsperson 9. Norm-RHS in rot.

Im Folgenden werden einige Ergebnisse der Versuchspersonen derart dargestellt, dass über der Abszisse die spektrale Zusammensetzung des Anregungsschalles ohne irgendeinen Pegelbezug skizziert ist. Die eingestellten Vergleichsfrequenzen bei den verschiedenen Darbietungspegeln L der Anregung werden durch eine Raute symbolisiert. Bei Ergebnissen der ersten Sitzung sind die Symbole nicht eingerahmt, Ergebnisse der zweiten Sitzung besitzen eine schwarze Umrahmung. Die Qualität des Zwicker-Tones wird gemäß Abb. 3 in Form von Farben dargestellt. Zusätzlich sind als rote Kurve die Normruhehörschwelle unter Freifeldbedingungen nach DIN EN ISO 389-7 und als schwarze Kurve die individuelle Ruhehörschwelle aus Darstellungsgründen beide in allen nachfolgenden Grafiken um jeweils 30 dB angehoben eingezeichnet.

Symbol	Zeichen	Bedeutung
◆	++	sehr gut
◆	+	gut
◆	○	mittel
◆	-	schlecht
◆	--	sehr schlecht

Abbildung 3: Von den Versuchspersonen geschätzte Wahrnehmungsqualität des Zwicker-Tones in fünf Kategorien.

## A, Anregung mit spektraler Lücke:

Wenn die Hörschädigung hochfrequenter als die spektrale Lücke liegt, gibt es keine signifikante Abweichung der angegebenen ZT-Tonhöhe im Vergleich zu Normalhörenden. Eine Schädigung innerhalb der spektralen Lücke kann zu Verschiebungen der Vergleichsfrequenz führen. Ein Nachton ist aber gemäß Abb. 4 sogar an einer Position mit 40 dB erhöhter RHS der Versuchsperson 9 wahrnehmbar. Das bedeutet, der ZT-Erzeugermechanismus kann selbst bei einer 40 dB starken Schädigung noch aktiv sein, vorausgesetzt der tieffrequente Anregungspegel ist hoch genug, d. h. der Frequenzgruppenpegel unterhalb der Lücke ist 20 dB über der RHS. Daher wurde in Abb. 4 zusätzlich mit einem Pegel von 85 dB angeregt, der bei dieser Versuchsperson einen „sehr gut“ hörbaren ZT erzeugte. Bei normalhörenden Personen ist ab 80 dB kein Nachton mehr feststellbar. Der Vergleichspegel des Nachtones wird von den Hörgeschädigten mit bis zu 60 dB eingestellt, liegt aber immer ca. 10-20 dB über der erhöhten RHS, der Sensation Level entspricht also den in der Literatur angegebenen Werten [9,16].

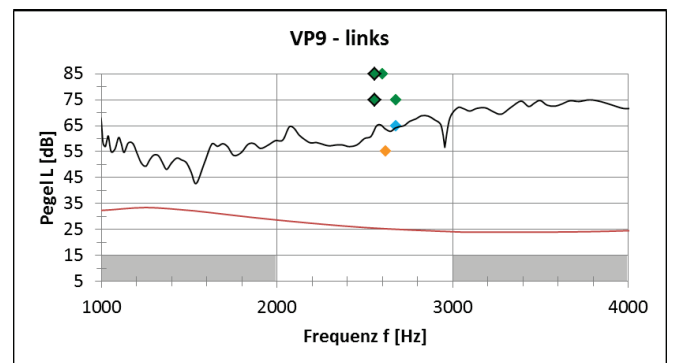


Abbildung 4: Nachton innerhalb der spektralen Lücke von 2 bis 3 kHz bei stark erhöhter Hörschwelle der VP9 (s. Abb. 2). Individuelle RHS (schwarz) und Norm-RHS (rot) sind um 30 dB erhöht.

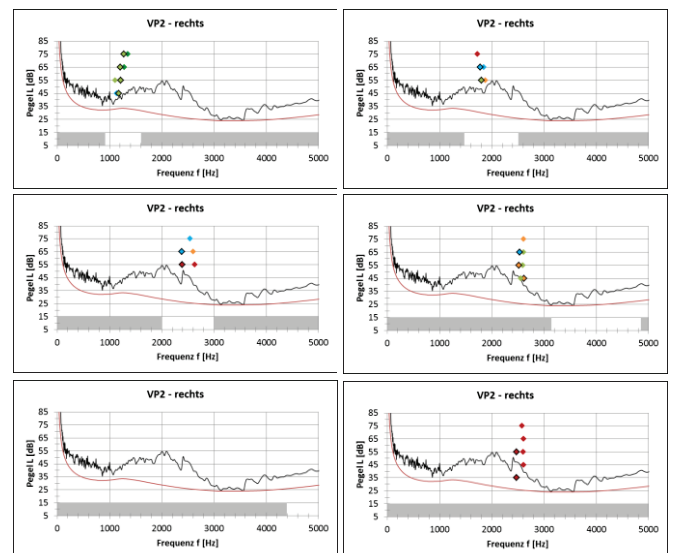
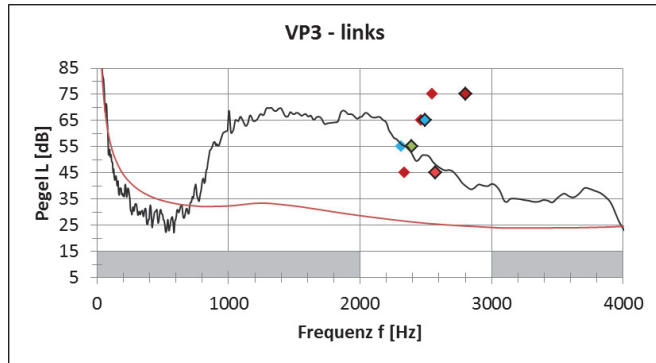


Abbildung 5: Verschiebung des Nachtones der VP2 (RHS s. Abb. 1) bei den fünf spektralen Lücken sowie bei Anregung mit Weißem Rauschen ohne Lücke. Individuelle RHS (schwarz) und Norm-RHS (rot) sind um 30 dB angehoben.

In Abb. 5 wandert die Vergleichsfrequenz des Zwicker-Tones zunächst mit höherfrequenter spektraler Lücke mit und wird über den schmalbandigen Gehörschaden „hinweg-

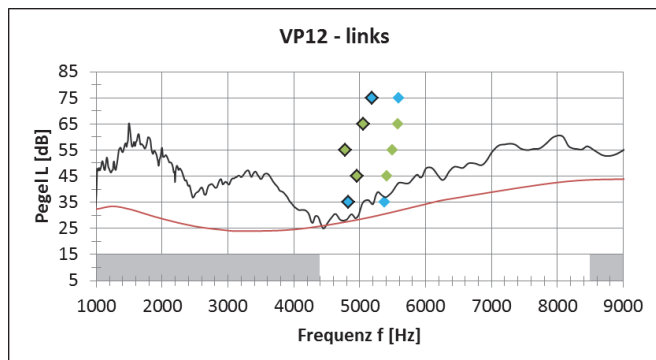
geschoben“, bleibt jedoch bei einer Lücke zwischen 3150 und 4850 Hz bei etwa 2600 Hz und ist damit außerhalb der spektralen Lücke zu hören, was manchmal auch bei anderen Personen zu beobachten war. Bei einer Lücke zwischen 4400 bis 8500 Hz ist er nicht mehr wahrnehmbar, ebenso nicht bei Anregung mit spektraler Überhöhung (Anregung B). Bei Anregung mit Weißen Rauschen (Anregung C) hingegen ist er wieder „sehr schlecht“, aber in beiden Sitzungen zu hören. Beim linken Ohr der VP2 mit ähnlicher Hörschädigung gab es vergleichbare Ergebnisse.



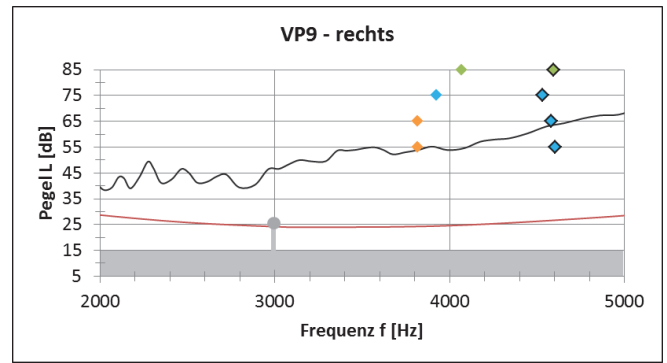
**Abbildung 6:** Nachton innerhalb der spektralen Lücke zwischen 2 und 3 kHz bei erhöhter linker Hörschwelle der VP3. Individuelle RHS (schwarz) und Norm-RHS (rot) sind um 30 dB angehoben.

In Abb. 6 wird zwar ein Nachton innerhalb der Lücke wahrgenommen, der tieffrequente Anregungspegel liegt jedoch in einer Hörschädigung von über 30 dB. Hier scheint der hochfrequente Anteil zur Erzeugung beizutragen. Wie bei einer Anregung mit spektraler Überhöhung treffen geringe Frequenzgruppenpegel SL tieffrequent zur Lücke auf hohe Pegel SL hochfrequent zur Lücke, so dass ein entsprechender „kantiger“ Schnittpunkt der Mithörschwelle ähnlich zur Abb. 10 rechts entsteht. Identisch war es am rechten Ohr. Gleiche Verhältnisse ergeben sich in Abb. 5 mit Anregung C auch mit etwa 30 dB Frequenzgruppenpegeldifferenz.

Eine hochfrequente 3,5 Bark breite Lücke kann gemäß Abb. 7 „gut“ hörbare Nachttöne selbst bis 5,5 kHz erzeugen, wenn die Hörschwellenanhebung im Tiefpassanteil der Lücke einen ausreichenden Frequenzgruppenpegel SL zulässt. Bei dieser 4100 Hz breiten Lücke wirkt wegen einer Hochtonschädigung hauptsächlich der Tiefpassanteil des Signals. Die Vergleichsfrequenzen der hörgeschädigten Personen streuen allgemein etwas stärker als bei Normalhörenden, insbesondere von Sitzung zu Sitzung, da die RHS schwanken kann und je nach Verlauf großen Einfluss hat.



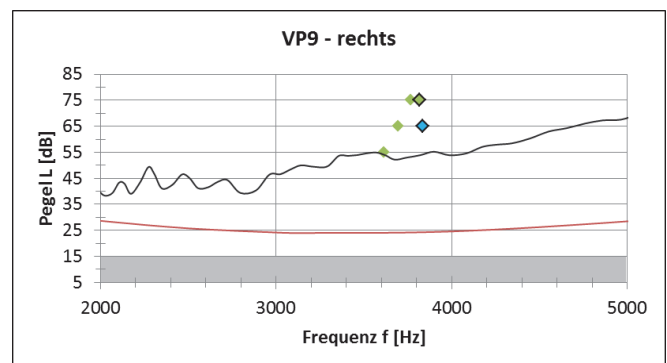
**Abbildung 7:** Nachton innerhalb der spektralen Lücke zwischen 4400 und 8500 Hz bei erhöhter Hörschwelle der VP12. Individuelle RHS (schwarz) und Norm-RHS (rote) sind um 30 dB angehoben.



**Abbildung 8:** Nachton bei Anregung mit spektraler Überhöhung und erhöhter Hörschwelle der VP9 (s. Abb. 2). Individuelle RHS (schwarz) und Norm-RHS (rot) sind um 30 dB angehoben.

### B, Anregung mit spektraler Überhöhung:

Diese Form der Anregung erzeugt wie bei Normalhörenden einen um eine Kategorie schlechter wahrnehmbaren Nachton. Eine starke Hörschädigung tieffrequent zur spektralen Überhöhung erzeugt keinen Nachton. Daher konnten bei dieser Anregungsform nur bei 12 Ohren Zwicker-Töne wahrgenommen werden. Diese waren entweder immer tieffrequenter als der addierte Sinuston (4 Ohren) wie bei Normalhörenden oder in den meisten Fällen (8 Ohren) immer hochfrequent gemäß Abb. 8. Hier scheint es, dass die Frequenzgruppenpegel über der angehobenen Hörschwelle im tieffrequenten Bereich der spektralen Überhöhung bzw. die Pegeldifferenzen der beteiligten Frequenzgruppen nicht ausreichen, einen Nachton zu erzeugen, sondern das Signal als breitbandige Anregung mit einem Schnittpunkt mit der RHS im Hochtonbereich agiert. Daher wird die Vergleichsfrequenz relativ hochfrequent eingestellt und schwankt von Sitzung zu Sitzung, weil die RHS möglicherweise etwas variiert. Diese Personen mit Nachton über der spektralen Anhebung nehmen in der Regel auch einen Zwicker-Ton bei einer Anregung mit reinem Weißen Rauschen wahr.



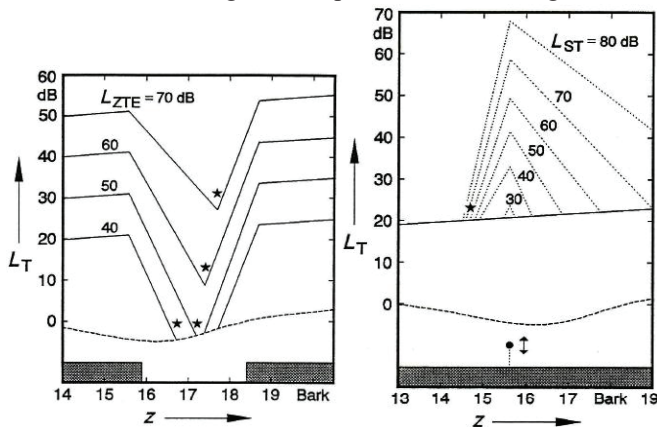
**Abbildung 9:** Nachton bei Anregung mit Weißem Rauschen. Hörschwelle der VP9 siehe Abb. 2. Individuelle RHS (schwarze Kurve) und Norm-RHS (rote Kurve) sind um 30 dB angehoben.

### C, Anregung mit Weißem Rauschen:

Bei 16 Ohren erzeugte die Anregung C einen Nachton. In Abb. 9 sind die Ergebnisse von Versuchsperson 9 aufgetragen, die unter 4 kHz einen „gut“ hörbaren Nachton bei teilweise ähnlichen Vergleichsfrequenzen wie in Abb. 8 wahrnimmt. Auch bei Anregung mit verschiedenen spektralen Lücken stellte sie diese hohe Vergleichsfrequenz manchmal ein, ebenso beim linken Ohr. Ihre Hörschwelle steigt in diesem Frequenzbereich gemäß Abb. 2 steil an. Ein Hoch-

tonverlust im ZT-Existenzbereich kann somit einen Nachton erzeugen, es entsteht auch ohne spektrale Lücke ein Schnittpunkt zwischen Mithörschwelle und RHS.

Bei schmalbandigen Hörschäden kann wegen der Frequenzgruppenpegeldifferenz SL Weißes Rauschen wie in Abb. 5 auch bei anderen Personen einen „schlecht“ wahrnehmbaren Nachton verursachen. Gemäß [9] genügt zur ZT-Erzeugung eine Lückentiefe bzw. Frequenzgruppenpegeldifferenz von 15 dB. Eine starke schmalbandige Anhebung wie in Abb. 6 wirkte bei Weißem Rauschen nicht im Sinne einer Anregung mit spektraler Lücke, bei der der ZT nahe der Mitte liegt, sondern wie eine umgedrehte spektrale Überhöhung.



**Abbildung 10:** Mithörschwellen-Tonheitsmuster von Anregung mit spektraler Lücke (links) bzw. spektraler Überhöhung (rechts) bei verschiedenen Pegeln. Stern: Simulierter Nachton. Gestrichelt: Norm-RHS. [9,14,16]

## Zusammenfassung

Der Nachton ist auch bei einer Hörschädigung von über 40 dB hörbar, so dass hierdurch zwar seine Tonhöhe, aber nicht der Erzeugungsmechanismus an sich beeinflusst wird. Die beste Anregung ist ein breitbandiges Signal mit spektraler Lücke und ausreichendem tieffrequenten Anteil. Der Anregungspegel ist eher höher als bei Normalhörenden, so dass ein „gut“ hörbarer Nachton je nach Hörschädigung auch mit 85 dB erzeugt werden kann, wobei Recruitment die Anregung dann unangenehm laut erscheinen lässt. Bei einer schmalbandigen Hörschwellenerhöhung kann ein Nachton an den Flanken oder in der Mitte entstehen. Die Hörschwelle beeinflusst sowohl den notwendigen Anregungspegel als auch in großem Maße die Tonhöhe des Nachtones, so dass auch Nachttöne außerhalb der angebotenen spektralen Lücke mit guter Qualität hörbar waren. Auch Weißes Rauschen mit konstantem Dichtepegel kann Nachttöne erzeugen. Die Vergleichspegel SL des Nachtones entsprechen denen von Normalhörenden.

Die Vorhersage der Tonhöhe des Nachtones beim Schnittpunkt der Mithörschwelle mit der RHS bzw. beim Minimum der Mithörschwelle der spektralen Lücke bzw. beim Schnittpunkt der Mithörschwelle mit der unteren Flanke der spektralen Anhebung gemäß Abb. 10 wird durch eine Hörschwellenanhebung stark gestört. Die hierzu relevanten Frequenzgruppenpegel über der Hörschwelle sind schwer ermittelbar und unterschiedliche Steigungen der Hörschwelle haben bei der Schnittpunktermittlung großen Einfluss.

Inwieweit die Entstehung des Zwicker-Tones bei Hörschädigungen mit neuronalen Rauschunterdrückungsverfahren und asymmetrischer Inhibition erklärt werden kann, ist noch zu untersuchen [17].

## 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 Nachtones 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.