

AUSGEPRÄGTHEIT DER TONHÖHE PULSMODULIRTER BREITBANDRAUSCHEN

H. Fastl

Institut für Elektroakustik, Technische Universität München

1. EINLEITUNG

Durch amplitudenmodulierte Breitbandrauschen können Tonhöhenempfindungen hervorgerufen werden, die der Modulationsfrequenz des Rauschens entsprechen. Die Existenz der Tonhöhe modulierter Breitbandrauschen war einige Zeit umstritten, zumal bei ungenügender Signalunterdrückung des Modulators Artefakte auftreten können (vgl. [1]). Umlängst wurden jedoch Versuche bekannt ([2], [3]), bei denen Melodien durch Variation der Modulationsfrequenz von Breitbandrauschen erzeugt und von Versuchspersonen mit großer Sicherheit erkannt wurden. Während somit zur Tonhöhe modulierter Breitbandrauschen bereits zahlreiche Meßergebnisse vorliegen, ist die *Ausgeprägtheit der Tonhöhe* modulierter Rauschen bisher nur wenig erforscht. Daher wurde die Ausgeprägtheit der Tonhöhe pulsmodulierter Breitbandrauschen als Funktion des Verhältnisses von Impuls- und Pausendauer sowie der Modulationstiefe untersucht. Darüber hinaus wurde die Ausgeprägtheit der Tonhöhe modulierter Rauschen mit der Ausgeprägtheit der Tonhöhe eines Sinustones verglichen.

2. MESSUNGEN

Acht normalhörende Versuchspersonen waren an den Experimenten beteiligt. Die Schalle wurden über einen dynamischen Kopfhörer (Beyer DT 48) dargeboten, dem ein Freifeldentzerrer vorgeschaltet war [4]. Die Methode der Größenschätzung wurde angewandt; sie hat sich bei Versuchen zur Ausgeprägtheit der Tonhöhe gut bewährt und ist in [5] detailliert beschrieben. Gleichmäßig Verdeckendes Rauschen (GVR) wurde pulsförmig mit Folgefrequenzen von $f_p = 100$ Hz bzw. 400 Hz moduliert. Das Verhältnis von Impulsdauer T_i zu Pausendauer T_g sowie die Modulationstiefe $d = 20 \lg(1+m)/(1-m)$ des Rauschens wurde variiert. Alle Schalle wiesen eine Lautheit von $N = 14$ sone(GF) auf, die mit einem Lautheitsanalysator für stark zeitvariante Schalle nach Zwicker [6] gemessen wurde. Die Lautheit von $N = 14$ sone(GF) erzeugt beispielsweise ein unmoduliertes GVR von etwa 60 dB Schallpegel bzw. ein 1 kHz Ton mit etwa 79 dB Schallpegel. Als Ankerschalle wurden ein pulsmoduliertes Breitbandrauschen mit relativ ausgeprägter Tonhöhe (Zahlenwert 100) bzw. ein moduliertes Rauschen mit schwach ausgeprägter Tonhöhe (Zahlenwert 10) gewählt. Jede Versuchsperson führte für jeden Parameterwert vier Größenschätzungen relativ zum Ankerwert durch. Die Reproduzierbarkeit der Größenschätzungen war insgesamt gut; für physikalisch gleiche Schalle differierten die zugeordneten Zahlenwerte in der Regel um nicht mehr als + 10. Die Symbole in den Figuren entsprechen Zentralwerten mit wahrscheinlichen Schwankungen, die aus jeweils 32 Daten errechnet wurden.

3. ERGEBNISSE

3.1 Abhängigkeit vom Verhältnis Impulsdauer zu Pausendauer

Fig. 1 zeigt den Einfluß des Verhältnisses von Impuls- zu Pausendauer auf die Ausgeprägtheit der Tonhöhe von pulsmoduliertem Gleichmäßig Verdeckendem Rauschen mit einer Modulationstiefe von 56 dB. Fig. 1a gilt für eine Folgefrequenz der Rauschimpulse von $f_p = 100$ Hz, Fig. 1b zeigt die Ergebnisse für

$f_p = 400$ Hz. Für den Ankerschall mit relativ ausgeprägter Tonhöhe (Kreise) wurde bei beiden Folgefrequenzen das Impuls/Pausenverhältnis 0,04 gewählt. Der Ankerschall mit schwach ausgeprägter Tonhöhe (Quadrate) wies bei $f_p = 100$ Hz ein Impuls/Pausenverhältnis von 1,5 und bei $f_p = 400$ Hz ein Impuls/Pausenverhältnis von 1,0 auf. Sämtliche Zentralwerte wurden auf den Wert beim Impuls/Pausenverhältnis 0,04 normiert. Dabei wurden die Werte für den Ankerschall mit dem Zahlenwert 10 (Quadrate) geringfügig angehoben (bei $f_p = 100$ Hz um den Faktor 1,08, bei $f_p = 400$ Hz um den Faktor 1,11). Die Skizzen in Fig. 1a repräsentieren die Zeitfunktion pulsmodulierter Rauschen bei einem Impuls/Pausenverhältnis von 0,1 bzw. 10.

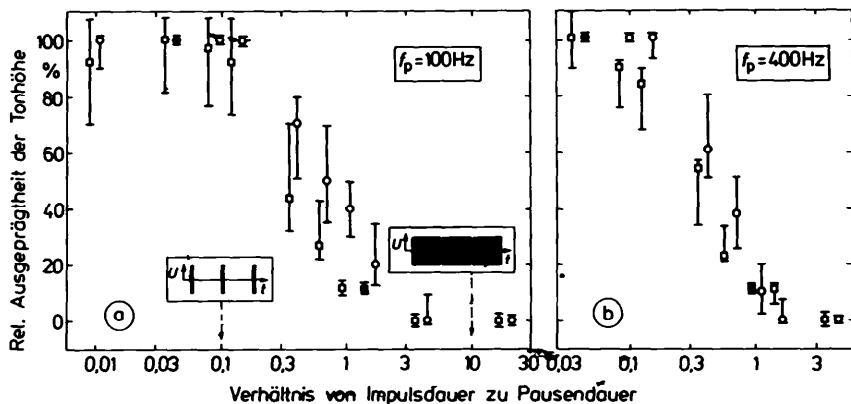


Fig. 1. Ausgeprägtheit der Tonhöhe von pulsförmig moduliertem Gleichmäßig Verdeckendem Rauschen als Funktion des Verhältnisses von Impuls- und Pausendauer. Lautheit 14 sone (GF), Modulationstiefe 56 dB

Kreise: Ankerschall mit Impuls/Pausenverhältnis $T_i/T_g = 0,04$

Quadrate: Ankerschall mit $T_i/T_g = 1,5$ bzw. 1,0

Skizzen: Zeitfunktion modulierter Rauschen für $T_i/T_g = 0,1$ bzw. 10.

Die in Fig. 1 dargestellten Ergebnisse weisen bei beiden Folgefrequenzen auf eine abnehmende Ausgeprägtheit der Tonhöhe pulsmodulierter Breitbandrauschen mit zunehmendem Verhältnis von Impuls- zu Pausendauer hin. Die maximale Ausgeprägtheit der Tonhöhe bleibt bis zu einem Impuls/Pausenverhältnis von 0,14 nahezu erhalten; für größere Werte dieses Verhältnisses nimmt die Ausgeprägtheit der Tonhöhe rasch ab. Bereits bei einem Impuls/Pausenverhältnis von knapp 0,5 ist die Ausgeprägtheit der Tonhöhe auf die Hälfte abgesunken und für Werte $T_i/T_g > 3$ tritt praktisch keine Tonhöhe pulsmodulierter Breitbandrauschen mehr auf. Diese Abhängigkeit der Ausgeprägtheit der Tonhöhe von pulsmoduliertem Gleichmäßig Verdeckendem Rauschen läßt sich anhand der zugehörigen Mithörschwellen-Zeitmuster [7] beschreiben: Bei kleinen Werten des Impuls/Pausenverhältnisses (linke Skizze in Fig. 1a) ergeben sich ausreichend lange Lücken zwischen den Rauschimpulsen, in die das Gehör "hineinhören" kann. Im Gegensatz dazu können bei großem Impuls/Pausenverhältnis (rechte Skizzen in Fig. 1a) die Lücken zwischen den Impulsen vom Gehör nicht mehr aufgelöst werden und das modulierte Rauschen klingt praktisch wie unmoduliertes Gleichmäßig Verdeckendes Rauschen.

3.2 Abhängigkeit von der Modulationstiefe

Fig. 2 zeigt den Einfluß der Modulationstiefe auf die Ausgeprägtheit der Tonhöhe

von pulsmoduliertem Gleichmäßig Verdeckendem Rauschen. Als Impulsdauer wurde $T_i = 0,1$ ms gewählt. Somit ergibt sich ein Impuls/Pausenverhältnis $T_i/T_g = 0,01$ bei einer Folgefrequenz von $f_p = 100$ Hz (Fig. 2a) und ein Verhältnis $T_i/T_g = 0,04$ bei $f_p = 400$ Hz (Fig. 2b). Ankerschalle waren modulierte Rauschen mit 56 dB (Kreise) bzw. 15 dB (Quadrate) Modulationstiefe. Alle Meßwerte wurden auf den Zentralwert bei 56 dB Modulationstiefe normiert.

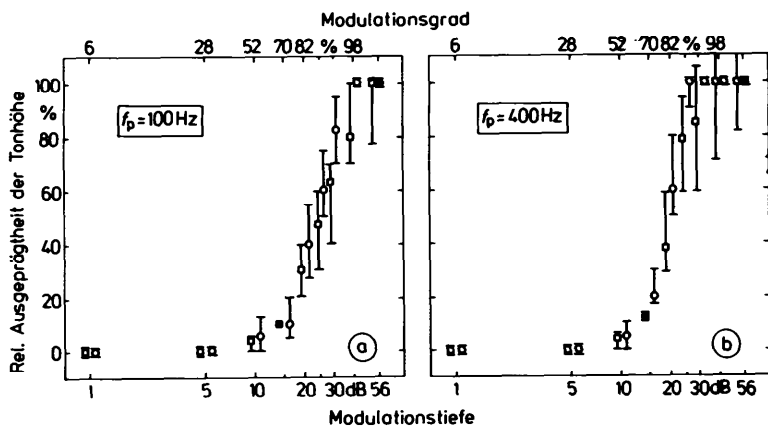


Fig. 2. Ausgeprägtheit der Tonhöhe von pulsförmig moduliertem Gleichmäßig Verdeckendem Rauschen als Funktion der Modulationstiefe. Lautheit 14 sone (GF), Impulsdauer 0,1 ms, $T_i/T_g = 0,01$ bzw. 0,04. Kreise: Ankerschall mit Modulationstiefe $d = 56$ dB
Quadrate: Ankerschall mit $d = 15$ dB

Die in Fig. 2 dargestellten Ergebnisse weisen auf eine zunehmende Ausgeprägtheit der Tonhöhe modulierter Breitbandrauschen mit wachsender Modulationstiefe hin. Bis zu Modulationstiefen von $d = 5$ dB erzeugen modulierte Rauschen keine Tonhöhe, 50 % der maximalen Ausgeprägtheit der Tonhöhe werden erst bei 25 dB ($f_p = 100$ Hz) bzw. 20 dB ($f_p = 400$ Hz) Modulationstiefe erreicht. Zur Erzeugung der maximalen Ausgeprägtheit der Tonhöhe sind bei 400 Hz Modulationstiefen $d > 30$ dB ausreichend, bei 100 Hz tritt die maximale Ausgeprägtheit nur für $d = 56$ dB auf. Insgesamt steigt die Ausgeprägtheit der Tonhöhe mit wachsender Modulationstiefe bei 400 Hz steiler an und erreicht schneller ihren Maximalwert. Da die Lücke zwischen den Rauschimpulsen bei 400 Hz Folgefrequenz nur 2,4 ms beträgt, kann das Gehör die Modulationstiefe nur in beschränktem Maße auflösen. Bei $f_p = 100$ Hz beträgt die Pausendauer jedoch 9,9 ms und das Gehör kann den Pegelschwankungen offensichtlich etwas besser folgen. Für beide Folgefrequenzen gilt, daß sehr schwach ausgeprägte Tonhöhen modulierter Breitbandrauschen erst bei Modulationsgraden über 50 % auftreten (vgl. Fig. 2, obere Abszisse).

3.3 Ausgeprägtheit der Tonhöhe von Sinuston und moduliertem Rauschen

Um die Größenordnung der Ausgeprägtheit der Tonhöhe modulierter Breitbandrauschen abschätzen zu können, wurden pulsmodulierte Rauschen ($T_i = 0,1$ ms und $d = 56$ dB) mit Sinustönen von 100 Hz bzw. 400 Hz verglichen. Relativ zur Ausgeprägtheit der Tonhöhe eines Sinustones von 100 % ergaben sich Werte von 20 % (Anker Sinus) bzw. 11,4 % (Anker Rauschen) bei 100 Hz und Werte von 15 % bzw. 11,8 % bei 400 Hz. Die maximale Ausgeprägtheit der Tonhöhe von pulsmoduliertem Gleichmäßig Verdeckendem Rauschen ist folglich um mehr als den Faktor 6 gerin-

ger als die Ausprägtheit der Tonhöhe eines Sinustones und nimmt mit wachsender Folgefrequenz ab. Nachdem diese Werte für ein Tastverhältnis $< 0,04$ gelten und die Ausprägtheit der Tonhöhe mit wachsendem Tastverhältnis abnimmt, liegt die Ausprägtheit der Tonhöhe der in der Literatur verwendeten rechteckförmig bzw. sinusförmig modulierten Breitbandrauschen um mindestens den Faktor 10 unterhalb derjenigen eines Sinustones (vgl. [5]).

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die Ausprägtheit der Tonhöhe von pulsförmig moduliertem Gleichmäßig Verdeckendem Rauschen nimmt mit abnehmendem Tastverhältnis und zunehmender Modulationstiefe zu. Bis zu einem Impuls/Pausenverhältnis von etwa 0.1 bleibt die maximale Ausprägtheit der Tonhöhe erhalten, die Hälfte des Maximalwertes wird bei einem Impuls/Pausenverhältnis von etwa 0,5 erreicht. Für Impuls/Pausenverhältnisse > 3 erzeugen pulsmodierte Breitbandrauschen keine Tonhöhe mehr.

Zur Erzeugung der maximalen Ausprägtheit der Tonhöhe von pulsmoduliertem Gleichmäßig Verdeckendem Rauschen ist eine Modulationstiefe von mehr als 30 dB ($m > 94 \%$) notwendig. Sehr schwach ausgeprägte Tonhöhen entstehen erst bei einer Modulationstiefe von immerhin $d = 10$ dB ($m = 52 \%$), während für $d \leq 5$ dB ($m \leq 28 \%$) die Tonhöhe modulierter Breitbandrauschen verschwindet. Die maximale Ausprägtheit der Tonhöhe modulierter Rauschen erreicht lediglich etwa 15 % der Ausprägtheit der Tonhöhe eines Sinustones.

Literatur:

- [1] Pollack, I., Periodicity pitch for interrupted white noise - fact or artifact? J.Acoust.Soc.Am. 45, 237 (1969).
- [2] Burns, E.M. and Viemeister, N., Nonspectral pitch. J.Acoust.Soc.Am. 60, 863 (1976).
- [3] Houtsma, A., Wicke, R. and Ordubadi, A., Pitch of amplitude-modulated low-pass noise and predictions by temporal and spectral theories. J.Acoust.Soc.Am. 67, 1312 (1980).
- [4] Zwicker, E. und Fel'dtkeller, R., Das Ohr als Nachrichtempfänger. 2. erw. Auflage, Hirzel-Verlag, Stuttgart (1967).
- [5] Fastl, H. and Stoll, G., Scaling of pitch strength. Hearing Research 1, 293 (1979).
- [6] Zwicker, E., Procedure for calculating loudness of temporally variable sounds. J.Acoust.Soc.Am. 62, 675 (1977).
- [7] Fastl, H., Temporal masking effects: I. Broad band noise masker. Acustica 35, 287 (1976).

Der Autor dankt Herrn Dipl.-Ing. T. Steuer für tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Messungen und Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Zwicker für wertvolle Hinweise zur Abfassung des Manuskripts. Die Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 50, Kybernetik, München gefördert.