

# Zur Ausgeprägtheit der Tonhöhe bei Wiederholungsrauschen

M. Fruhmann, H. Fastl

AG Technische Akustik, MMK, TU München, Fruhmann@mmk.ei.tum.de

## 1. Einleitung

Die Tonhöhe eines Schallereignisses lässt sich mit Adjektiven wie “hoch” und “tief” beschreiben wodurch sich verschiedene Schalle zueinander in Relation setzen lassen. Die wahrgenommene Tonhöhe kann aber auch stärker oder schwächer ausgeprägt sein. Diese, als “Ausgeprägtheit der Tonhöhe” bezeichnete Empfindungsgrösse wurde beispielsweise von Fastl und Stoll [1] für verschiedenartige Schalle untersucht.

Im folgenden Artikel werden Wiederholungsrauschen bezüglich der Ausgeprägtheit ihrer Tonhöhe untersucht. Teile der gewonnenen Daten werden zudem mit Ergebnissen aus der Literatur, die mit grundsätzlich anderen Messmethoden gewonnen wurden, verglichen.

## 2. Verwendete Schalle

### 2.1. Testschalle

Abbildung 1 zeigt den sogenannten “Add-Same”-Algorithmus nach Yost et. al. [2] zur Generierung der verwendeten Wiederholungsrauschen. Das verzögerte Eingangssignal wird u.U. mit einer Dämpfung beaufschlagt und zum Eingangssignal addiert. Das Ausgangssignal einer solchen Verzögerungsstufe wird als “Rippled Noise” bezeichnet und bildet wiederum das Eingangssignal für die darauf folgende Stufe, die einen identischen Aufbau besitzt.

Die entstehenden “Iterated Rippled Noises” (IRN-S) sind durch drei Grössen gekennzeichnet: Im Verzögerungszeit durch die Delay-Zeit  $d$  und den Dämpfungsfaktor  $g$  sowie die Anzahl der verwendeten Stufen bzw. Iterationen  $n$ .

In Abbildung 1 rechts ist das Spektrum der entstehenden Schalle qualitativ dargestellt. Verwendet man weisses Rauschen als Eingangssignal, so findet man im, grundsätzlich weissen, Spektrum schmale Vertiefungen, sog. Notches. Die dadurch entstehenden Überhöhungen liegen bei ganzzahligen Vielfachen des Kehrwerts der Verzögerungszeit  $d$ .

Diese Verzögerungszeit  $d$  im Delay-Zweig betrug bei den vorliegenden Untersuchungen 4, 8, 16 und 32 msec, wobei die Dämpfung  $g$  konstant bei 0 dB belassen wurde. Die Zahl der Iterationen war bei allen IRN-S auf  $n = 16$  festgelegt.

In Anlehnung an die in [3] verwendeten Signale wurden die Testschalle einer Bandpassfilterung mit einer Bandbreite von 1000 Hz unterzogen. Die Mittenfrequenzen  $f_c$  der Filterung lagen bei 500, 1000, 2000 und 4000 Hz. Zusätzlich wurden die Schalle mit einer Gauss-Kurve moduliert um Ein- und Ausschaltgeräusche zu vermeiden. Dabei betrug die Anstiegszeit 20 msec. Die Schalldauer lag jeweils bei 330 msec.

### 2.2. Ankerschalle

Zunächst wurde als Ankerschalle ebenfalls IRN-S verwendet, welches jeweils eine Verzögerungszeit von 4 msec besass.

In einem zweiten Versuch sollten die IRN-S Testschalle entsprechend [3] mit sog. AABB-Rauschen verglichen werden. Bei diesen Schallen wird weisses Rauschen in Segmente einer bestimmten Dauer unterteilt, die jeweils zweimal aneinander

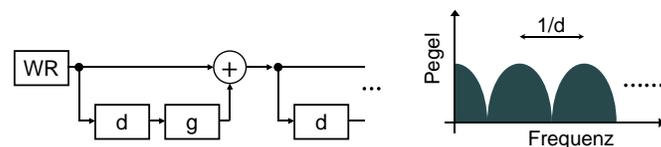


Abb. 1. Erstellungsalgorithmus der verwendeten IRN-S(d,g,n) Signale und qualitatives Spektrum.

gehängt werden und so eine Struktur AABBC... ergeben. Die Länge der Segmente entsprach jeweils der Verzögerungszeit des zu vergleichenden IRN-S, also 4, 8, 16 oder 32 msec.

Die sonstigen Parameter sowie die Bandbegrenzung der Ankerschalle entsprachen der der jeweiligen Testschalle.

## 3. Versuchsdurchführung

Mit Hilfe der Grössenschätzung mit Ankerschall sollten die Versuchspersonen die Ausgeprägtheit der Tonhöhe des Testschalls relativ zu der des Ankerschalls beurteilen. Dabei wurde dem Ankerschall, der vom Testschall durch eine 300 msec lange Pause getrennt wurde, eine Ausgeprägtheit der Tonhöhe von 100 zugewiesen.

Durch die Wahl der Parameter ergaben sich 16 verschiedene IRN-S Signale, die innerhalb eines Versuchsdurchgangs vier mal dargeboten wurden. Jeder Hörversuch bestand aus insgesamt 69 zufällig dargebotenen Schallpaaren, 5 Paare zum Einhören gefolgt von 64 Schallpaaren.

Jede der jeweils 8 normalhörenden Versuchspersonen absolvierte zwei Versuchsdurchläufe, was pro Schallpaar zu acht Bewertungen je Teilnehmer führte. Zur Überprüfung der Signifikanz der Ergebnisse wurde in einem Rückversuch, mit ansonsten gleichbleibenden Bedingungen, die Reihenfolge aus Anker- und Testschall vertauscht.

Die Darbietung der Testschalle erfolgte in einer schallgedämmten Hörkabine diotisch über freifeld-entzerrte Kopfhörer bei einem Wiedergabepegel von 60 dB.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1. Anker IRN-S

Abbildung 2 zeigt Mediane und Interquartilbereiche der Versuche mit IRN-S-Anker. Die linken Werte entsprechen dabei jeweils dem Hinversuch, die Rechten dem Rückversuch. Der Interquartilbereich ergibt sich als Median der Interquartilbereiche der einzelnen Versuchspersonen.

Deutlich ist zu erkennen, dass die Ausgeprägtheit der Tonhöhe mit zunehmender Verzögerungszeit abnimmt. Dieser Effekt ist zudem von der Mittenfrequenz des Bandpassfilters abhängig. So sinkt die Ausgeprägtheit der Tonhöhe bei der niedrigsten Filterbedingung von 100 % auf ca. 60 %, bei der höchsten Filterbedingung aber lediglich auf ca. 80 %.

Diese Resultate stimmen qualitativ mit den Erwartungen überein.

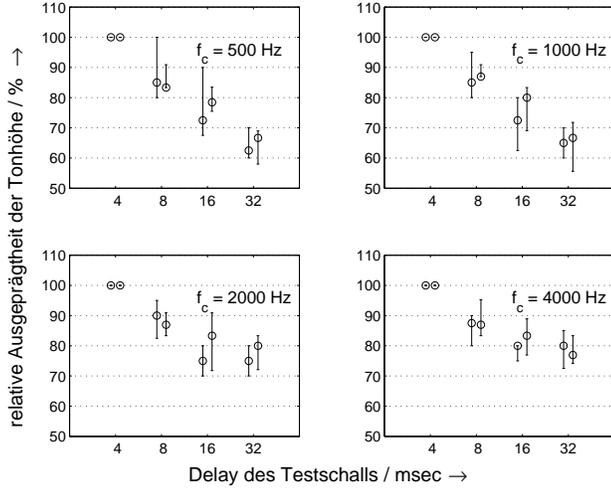


Abb. 2. Relative Ausprägtheit der Tonhöhe von IRN-S verglichen mit IRN-S mit einer Verzögerungszeit von 4 msec bei identischer Bandpassfilterung. Ergebnisse für vier verschiedene Mittenfrequenzen  $f_c$  als Mediane und Interquartilbereiche. Die jeweils linken Datenpunkte beziehen sich auf den Hinversuch, die rechten Datenpunkte stehen für den Rückversuch.

Rippled Noises und damit auch die verwendeten IRN-S Signale erhalten mit steigender Verzögerungszeit eine deutlich wahrnehmbare zeitliche Fluktuation, die als Rauigkeit bzw. Schwankungsstärke wahrgenommen wird und bei sehr langen Verzögerungen auch als “motorboating”-Effekt bezeichnet wird. Diese Fluktuationen führen mit steigender Verzögerungszeit zu einer deutlichen Abnahme der Ausprägtheit der Tonhöhe. Auch der Effekt, dass die Delay-Abhängigkeit der Ausprägtheit der Tonhöhe mit steigender Mittenfrequenz abnimmt war zu erwarten. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, befinden sich im Spektrum der Schalle Maxima entsprechend der Verzögerungszeit und dieses ist somit dem Spektrum eines harmonisch komplexen Tons vergleichbar. Durch die Bandpassfilterung bleibt nur ein Teil dieser “Spektrallinien” erhalten, was zur Bildung virtueller Tonhöhen, wie sie beispielsweise von Terhardt [4] beschrieben wurde, führt. Da mit steigender Frequenz die einzelnen harmonischen Komponenten des Spektrums nur noch unzureichend vom Gehör aufgelöst werden können überwiegt bei den hohen Filterbedingungen der Rauschcharakter der Signale und sie werden ähnlich einem Bandpassrauschen empfunden. Somit ist die Ausprägtheit der Tonhöhe je nach Lage der Harmonischen im sog. “Existenzbereich der virtuellen Tonhöhe” nach [4] mit steigender Mittenfrequenz der Bandpassfilterung schwächer ausgeprägt.

#### 4.2. Anker AABR-Rauschen

Die Ergebnisse der Versuche mit AABR-Anker sind in Abbildung 3 abgebildet. Es sind wiederum der Median sowie die Interquartilbereiche für Hin- (Links) und Rückversuch (Rechts) dargestellt.

Der Verlauf der Mediane zeigt eine Abnahme des Unterschieds der Ausprägtheit der Tonhöhe mit steigender Verzögerungszeit. So ist für eine Verzögerungszeit von 32 msec bei keiner der vier Filterbedingungen ein Unterschied in der Ausprägtheit der Tonhöhe wahrnehmbar, bei einer Delay-Zeit von 4 msec ist dieser Unterschied jedoch stark ausgeprägt und nimmt mit steigender Mittenfrequenz deutlich ab.

Zum Vergleich der Daten wurden Versuchsergebnisse von Wiegrebe et. al. [3] herangezogen bei denen Versuchspersonen die Aufgabe hatten, den Verstärkungsfaktor im Rückkopplungsweig des IRN-S so einzustellen, dass die Ausprägtheit der Tonhöhe von Test- und Ankerschall überein-

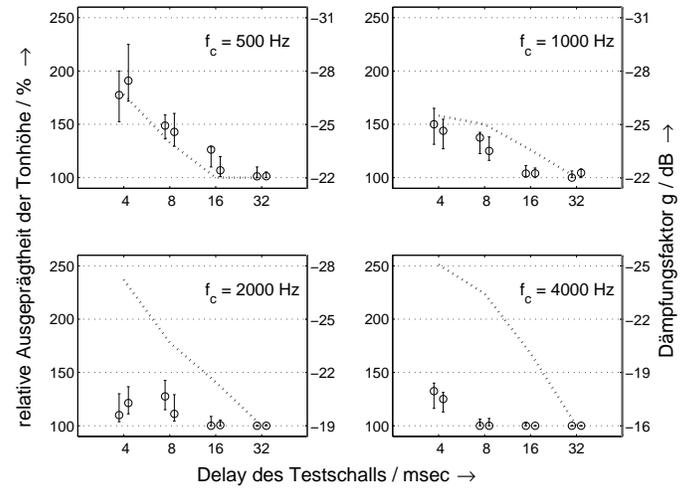


Abb. 3. Relative Ausprägtheit der Tonhöhe von IRN-S. Ankerschall AABR-Rauschen bei identischer Bandpassfilterung. Ergebnisse für vier verschiedene Mittenfrequenzen  $f_c$  als Mediane und Interquartilbereiche. Die jeweils linken Datenpunkte beziehen sich auf den Hinversuch, die rechten Datenpunkte stehen für den Rückversuch. Gestrichelte Linie: Eingestellter Dämpfungsfaktor für Gleichheit der Ausprägtheit der Tonhöhe nach Wiegrebe et. al [3].

stimmt. Die Parameter der Test- und Ankerschalle waren, abgesehen vom frei einzustellenden Verstärkungsfaktor  $g$ , mit den hier verwendeten Parametern identisch.

Um die Daten nach Wiegrebe mit den hier vorgestellten Daten vergleichen zu können wurde der in [3] gewonnene Wert für die Dämpfung  $g$  als Multiplikator der Ausprägtheit der Tonhöhe interpretiert und in Abbildung 3 als gepunktete Linie eingetragen. Bezieht man die Verstärkungsfaktoren jeweils auf den Wert, der sich für eine Verzögerungszeit von 32 msec ergibt, so stellt man fest, dass für niedrige Mittenfrequenzen der Bandpassfilterung eine recht gute Übereinstimmung erzielbar ist, bei Mittenfrequenzen von 2000 und 4000 Hz fallen die Unterschiede jedoch sehr deutlich aus. Der eingestellte Dämpfungsfaktor ist also kein unmittelbares Mass für die Ausprägtheit der Tonhöhe im ungedämpften Fall.

Diese Tatsache ist in Einklang mit den in Abschnitt 4.1 getroffenen Aussagen. Da die spektralen Komponenten mit steigender Mittenfrequenz schlechter aufgelöst werden können, sind stärkere spektrale Kontraste erforderlich um eine entsprechend starke Ausprägtheit der Tonhöhe hervor zu rufen. Diese Kontraste entsprechen der Breite und Tiefe der Einschnitte im Spektrum der IRN-S, die in Abhängigkeit vom Verstärkungsfaktor  $g$  mit jedem Iterationsschritt bei der Generierung der Schalle zunehmen.

#### Danksagung

Diese Arbeit wird im Rahmen der Forschergruppe “Hörobjekte” von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

#### Literatur

- [1] H. Fastl, G. Stoll: Scaling of pitch strength. *Hearing Research* **1** (1979) 293–301.
- [2] W. A. Yost, R. Patterson, S. Sheft: A time domain description for the pitch strength of iterated rippled noise. *J. Acoust. Soc. Am.* **99** (1996) 1066–1078.
- [3] L. Wiegrebe, H. S. Hirsch, R. D. Patterson, H. Fastl: Temporal dynamics of pitch strength in regular-interval noises: effect of listening region and auditory model. *J. Acoust. Soc. Am.* **107** (2000) 3343–3350.
- [4] E. Terhardt: Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen. I. Psychoakustische Grundlagen. *Acustica* **26**(4) (1972) 173–186.