

# Zur Tonhöhenempfindung bei Tiefpaßrauschen

W. Schmid, W. Auer

Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München

## Einführung

Bandbegrenzte Rauschen können Tonhöhenempfindungen hervorrufen. Die meßtechnische Erfassung der Tonhöhe(n) eines Testschalles kann im psychoakustischen Experiment so geschehen, daß die Frequenz eines Sinustons definierten Pegels so eingestellt wird, daß die betreffende Tonhöhe von Testschall und diejenige des Sinustons als gleich hoch wahrgenommen werden. Dieses Verfahren liefert die Frequenztonhöhe(n) des Testschalls (siehe dazu TERHARDT 1979). Von derartigen Experimenten mit Bandpaßrauschen berichtet z.B. v. Békésy 1963. Der Zusammenhang von ermittelten Frequenztonhöhen und Bandpaß-Grenzfrequenzen trat in seinen Experimenten und ganz besonders deutlich in jenen von FASTL 1971 zutage. Abb. 1 zeigt das von v. Békésy angeführte Wirkprinzip einer Kontrastverstärkung. Bisher konnte die Psychophysik mittels eines solchen Mechanismus das Zustandekommen der sog. Machbänder (der Aufhellungen) und Verdunklungen an rampenförmigen Leuchtdichteänderungen) systemtheoretisch erklären. (HAUSKE 1994).

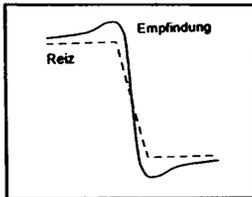


Abb. 1 Wirkprinzip einer örtlichen Simultan-Kontrastverstärkung

Obwohl die von Tiefpaßrauschen (TPR) hervorgerufenen Tonhöhen („Kantentöne“) im Vergleich zum gleichlauten Sinuston sehr wenig ausgeprägt sind (FASTL UND STOLL 1979), berichteten im Rahmen unserer Experimente mit bandbegrenzten Rauschen Versuchspersonen wiederholt von Änderungen der Tonhöhen bei Schallpegeländerungen. Wir nahmen dies zum Anlaß, den Effekt experimentell im A-B-Vergleich näher zu beleuchten. Die Frage lautete somit

Wie unterscheiden sich die Tonhöhen der Tiefpaßrauschen, wenn diese mit unterschiedlichem Pegel dargeboten werden?

## Experiment

### Prozedur

Im A-B-Vergleich wurden den Versuchspersonen (4 VPen, 24-38 Jahre) die Tiefpaßrauschen in einem schallisolierten Raum monotonisch auf dem linken Ohr über elektrodynamische Kopfhörer (Beyer DT48) mit vorgeschaltetem Freifeldzenterr (nach ZWICKER, FASTL 1990) als Schallpaare (A-B) dargeboten.

Dabei wurden variiert bzw. konstant gehalten:

- bei Tiefpaßrauschen A: variiert Pegel L; konstant Grenzfrequenz  $f_g$ ;

- bei Tiefpaßrauschen B: variiert Grenzfrequenz  $f_g$ ; konstant Pegel L;

Nach jeweils dreimaliger Abfolge der Sequenz A(3 Sek.) - Pause(1 Sek.) - B(3 Sek.) urteilten die VPen, ob Tonhöhe von Schall A oder Tonhöhe von Schall B höher war. Das Urteil „gleich hoch“ war nicht zugelassen. Alle Schallpaare (mit randomisierten Pegel- und Grenzfrequenzwerten) wurden von jeder VP achtmal beurteilt. Abbildung 2 zeigt den Ablauf schematisch.

### Testschalle:

Bei den Tiefpaßrauschen (TPR) handelt es sich um fünf Minuten lange, mit 16 bit Amplitudenaufösung gespeicherte Aufzeichnungen von Weißem Rauschen, bandbegrenzt über passive RLC-Tiefpässe mit Filtersteilheiten >150dB/oct. Für die Schalle A betragen die Filtergrenzfrequenzen (3dB-Abfall des Übertragungsmasses)  $f_g = 250$  Hz bzw.  $f_g = 1$  kHz; die Pegel der Schalle B sind  $L = 50$ dB(20µPa). Die Pegel der Schalle A und die Grenzfrequenzen für die Schalle B können den Abbildungen 3 und 4 entnommen werden.

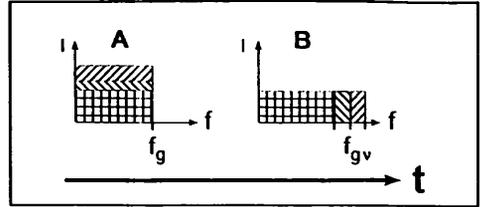


Abb. 2 Schema des Versuchsablaufs und der Testschalle

Aus Tabelle 1 ist zu ersehen, daß sich die pegel- und bandbreitenabhängigen Lauthheiten der Rauschen um ungefähr Faktor 16 bzw. Faktor 10 unterscheiden.

L / dB(20µPa)	50	60	80
$f_g$ / Hz	N / sone <sub>GF</sub>		
250	0,7	2,5	11
1000	2,5	6,5	24

Tab. 1 Lauthheit N für TPR mit Schallpegel L und Grenzfrequenz  $f_g$

## Ergebnisse

Abbildung 3 bzw. Abb. 4 zeigt, um welchen Wert die Grenzfrequenz von Schall B, ausgehend von 250 Hz bzw. 1 kHz, jeweils verändert werden muß, um eine andere Tonhöhe als Schall A hervorzuufen. Wird der 75%-Wert der relativen Häufigkeit für das Urteil „höher“ zugrundegelegt, so geht eine Pegelsteigerung von 50 dB auf 80 dB jeweils einher mit einer deutlichen Steigerung der Tonhöhe; diese Tonhöhenverschiebung entspricht

- im Falle von TPR mit der Grenzfrequenz  $f_g = 250$  Hz einer Grenzfrequenzverschiebung um 25 Hz von 260 Hz auf 285 Hz; dies entspricht 1,59 Halbötönen bzw. 159 cent bzw. 0,26 Bark;

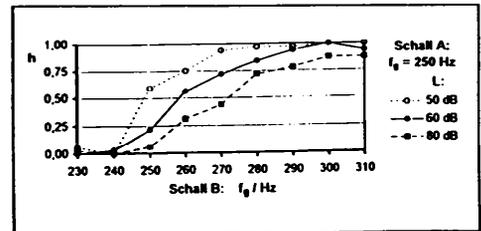


Abb. 3 Relative Häufigkeit h für das Urteil „B hat höhere Tonhöhe“, als Funktion der Grenzfrequenz  $f_g$  von Schall B und des Pegels L von Schall A.

- im Falle von TPR mit der Grenzfrequenz  $f_g = 1000$  Hz einer Grenzfrequenzverschiebung um 51 Hz von 1022 Hz auf 1073 Hz; dies entspricht 0,84 Halbötönen bzw. 84 cent bzw. 0,28 Bark. Die Unterschiedsschwelle für Änderungen der Grenzfrequenz von TPR mit  $f_g = 1$  kHz beträgt (SCHORER 1989) ca. 9 Hz für  $L = 50$  dB bzw. ca. 18 Hz für  $L = 80$  dB; die vorgefundenen Tonhöhenverschiebungen entsprechen also dem 5,7fachen bzw. dem 2,8fachen des Schwellenwertes.

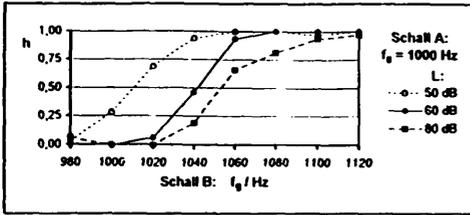


Abb. 4 wie Abb. 3, jedoch für die Grenzfrequenz  $f_g = 1\text{ kHz}$  von Schall A.

Für Spektraltonhöhen von Sinustönen sind die Abhängigkeiten vom Schallpegel und von simultan dargebotenen Störschallen bekannt. Hierfür wird von HESSE 1987 ein Funktionsschema vorgeschlagen und mittels zahlreicher Daten aus der Literatur überprüft. Das Modell beruht auf der Analyse der Mithörschwellen, die vom Testschall und vom jeweiligen (drosselnden) Störschall erzeugt werden. - Wir unternehmen daher den Versuch, die gemessenen Tonhöhenverschiebungen anhand der Mithörschwellenstrukturen zu interpretieren.

#### Messung der Mithörschwellen

Die Mithörschwellen der Testschalle (Tabelle 1) wurden bei jeder Versuchsperson mittels „Békésy-tracking“ (s. z.B. ZWICKER, FASTL 1990) zweimal gemessen und die Werte für die Flankensteigungen jeweils arithmetisch gemittelt. Die Ergebnisse, die die Grundlage für die weiteren Berechnungen bildeten, können Tabelle 2 entnommen werden. Die bei Erhöhung der Testschallpegel deutlich in Erscheinung tretenden „Aufächerungen“ der Flanken der MHS-Frequenz- bzw. MHS-Tonheitsmuster führten uns zu der Überlegung, daß zwischen diesen Änderungen der Flankensteigungen und den experimentell ermittelten Tonhöhenverschiebungen eine einfach zu beschreibende Abhängigkeit bestehen könnte.

$f_g$ / Hz	L / dB	$s_{MHS}$ / (dB / oct)		$s_{MHS}$ / (dB / Bk)	
		Median	Spannweite	Median	Spannweite
250	50	-39,5	-40,0 ... -36,0	-16,2	-16,5 ... -14,9
	60	-29,5	-35,6 ... -23,0	-12,2	-14,7 ... -9,5
	80	-19,0	-20,6 ... -13,0	- 8,0	- 8,5 ... -5,5
1000	50	-81,5	-88,0 ... -74,0	-18,7	-19,6 ... -16,5
	60	-72,5	-82,0 ... -55,0	-16,2	-18,2 ... -12,3
	80	-34,3	-40,0 ... -32,0	- 7,7	- 9,0 ... -7,1

Tab. 2 Flankensteigungen der Mithörschwellen: Messungen mit vier Versuchspersonen.

#### Tonhöhendetektor

Wir nehmen an, daß ein (hypothetischer) Tonhöhendetektor für die Bildung einer Tonhöhe eines Rauschens eine lokale Erregungsdiskontinuität voraussetzt, die sich im (Simultan-) MHS-Muster als Stelle zeigt, bei der der Gradient  $dL_T / df_T$  ungleich Null ist. Auf der Basis von „Erregungspegel-Detektoren“ und des nichtlinearen Zusammenhangs von Schallpegel und Steilheit der (oberen) Flanke des Erregungspegelmusters können die gemessenen Tonhöhenverschiebungen (vereinfacht; folgendermaßen erklärt bzw. beschrieben werden: Im MHS-Muster eines TPR ist unabhängig vom Ausgangswert des (Testton-) Pegels  $L_T$  eine Änderung  $\Delta L_T$  konstanter Größe notwendig, um eine „neue“ Tonhöhe bzw. die Verschiebung der bisher gehörten Tonhöhe um einen konstanten Tonheitswert zu codieren.

Tatsächlich liefert ein solches Beschreibungs- und Rechenmodell für die untersuchten Schallpegel und Grenzfrequenzen der Testschalle dann die beste Näherung an die experimentell gewonnenen

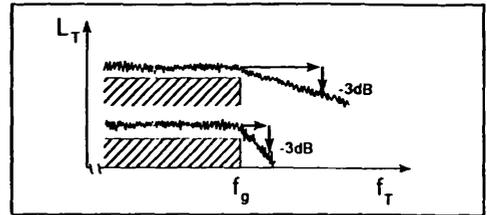


Abb. 5 Schematische Darstellung des postulierten Tonhöhendetektors und der Testschalle (schraffiert) für zwei Pegel.

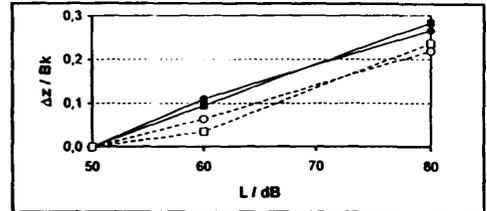


Abb. 6 Tonhöhenverschiebung (umgerechnet in Bark) bei TPR in Abhängigkeit des Pegels: für  $f_g = 250\text{ Hz}$  (Kreise) und  $f_g = 1\text{ kHz}$  (Quadrate); gemessene (ausgefüllte Symbole) und berechnete Werte (leere Symbole).

Daten, wenn der Pegelabfall zu  $\Delta L_T = -3\text{ dB}$  gesetzt wird.

#### Ergebnis

Mittels des beschriebenen einfachen Detektionsmodells für die „Kantenton“-Verschiebungen, welches auf der Analyse von Mithörschwellen beruht, können die Tonhöhenverschiebungen (voraus-) berechnet werden, die auftreten, falls Tiefpaßrauschen mit den Grenzfrequenzen 250 Hz bzw. 1 kHz mit verschiedenen Pegeln gehört werden. Für die zusammenfassende Abbildung 6 wurden als Nullpunkte der Verschiebungen die jeweiligen nominalen Filtergrenzfrequenzen (umgerechnet in Bark) gewählt. Deutlich ersichtlich ist die recht gute Übereinstimmung von den berechneten mit den experimentell ermittelten Daten.

Die Autoren danken Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Fastl für hilfreiche Hinweise.

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB 204 „Gehör“ München gefördert.

#### Literatur:

- v. BÉKÉSY, G. 1963, Hearing Theories and Complex Sounds. J. Acoust. Soc. Am. 35, 588-601.
- FASTL, H. 1971, Über Tonhöhenempfindungen bei Rauschen. Acustica 25, 350-354.
- FASTL, H., AND STOLL, G. 1979, Scaling of pitch strength. Hearing Research 1, 293-301.
- HAUSKE, G. 1994, Systemtheorie der visuellen Wahrnehmung. Stuttgart: Teubner.
- HESSE, A. 1967, Ein Funktionsschema der Spektraltonhöhe von Sinustönen. Acustica 63, 1-16.
- SCHORER, E., 1989, Vergleich eben erkennbarer Unterschiede und Variationen der Frequenz und Amplitude von Schallen. Acustica 68, 183-199.
- TERHARDT, E. 1979, Calculating virtual pitch. Hearing Research 1, 155-182.
- ZWICKER, E., FASTL, H. 1990, Psychoacoustics, Facts and Models. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.