

Effekt des Signal-Rausch-Abstands und der Bandbreite von schmalbandigen Geräuschkomponenten auf die wahrgenommene Tonhaltigkeit

WOLFGANG ELLERMEIER & PETER DANIEL

Sound Quality Research Unit, Aalborg Universitet, Dänemark; Cortex Instruments, Regensburg, Deutschland

E-mail: we@acoustics.dk - daniel@cortex-instruments.de

Zusammenfassung

In Untersuchungen zur globalen Bewertung von Produktschall zeigt sich, daß selbst schwache tonale Komponenten negativ zum Gesamturteil (zur *overall sound quality*) beitragen können. Um diesen Einfluß in Hörexperimenten parametrisch zu untersuchen, wurden schmalbandige Signale in rosa Rauschen dargeboten, und zwar: (a) Sinustöne bei verschiedenen Signal-Rausch-Abständen (T/N: -6 bis +6 dB) und (b) Schmalbandrauschen unterschiedlicher Bandbreite (10 bis 200 Hz). Um die Stärke der empfundenen Tonhaltigkeit zu skalieren, beurteilten 60 Versuchspersonen diese Schalle im vollständigen Paarvergleich. Es zeigte sich, daß naive Versuchspersonen die Tonhaltigkeit konsistent beurteilen können, und daß diese systematisch von den beiden untersuchten Parametern abhängt. Allerdings waren die Daten nicht durch das *BTL*-Modell zu repräsentieren, das voraussetzt, daß alle Vergleiche nach identischen Urteilkriterien durchgeführt werden. Eine Verhältnisskala der Tonhaltigkeit ließ sich jedoch aufgrund des weniger restriktiven *Präferenzbaum*-Modells konstruieren.

Einführung

Die wahrgenommene *Tonhaltigkeit* (tonal prominence, tonalness) spielt eine Rolle sowohl bei der Bewertung von Emissionen, als auch in ihrem Beitrag zur Geräuschqualität (sound quality). Hat man es im ersten Fall mit deutlichen Spitzen im Spektrum zu tun, für deren Wirkung auf die Gesamtlästigkeit Tonzuschläge vergeben werden, so können sich im zweiten Fall selbst schwache tonale Anteile, die von kurzer Dauer oder zeitlich variabel sind, auf die Geräuschqualität auswirken. In diesem Falle sind die gängigen instrumentellen Methoden (tone-to-noise und prominence ratio) strenggenommen nicht adäquat.

Deshalb wurden in der vorliegenden Untersuchung schwach tonhaltige synthetische Geräusche mit einer Methode untersucht, die sich bereits bei der Bewertung von Reifengeräuschen [1] bewährt hatte. Dabei werden die Skalenergebnisse indirekt aus dem Ergebnis ordinaler Paarvergleiche geschätzt. Die denkbar einfachste Beziehung zwischen Paarvergleichen und (zu schätzenden) Skalenergebnissen wird durch das *BTL*-Modell [2] postuliert:

$$p_{ab} = \frac{v(a)}{v(a) + v(b)}, \quad (1)$$

wobei p_{ab} die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, das Objekt a dem Objekt b "vorzuziehen", z.B. es als tonhaltiger zu beurteilen, und $v(a)$, $v(b)$ die Skalenergebnisse dieser Objekte bezeichnen. Gilt das *BTL*-Modell, so lassen sich die untersuchten Schalle auf einer *eindimensionalen Verhältnisskala* repräsentieren. Das Ergebnis einer solchen Skalierung soll mit den variierten physikalischen Parametern (in diesem Falle Signal-Rausch-Abstand und Bandbreite einer prominenten Komponente) und den Vorhersagen einschlägiger Tonhaltigkeitsmodelle in Beziehung gesetzt werden.

Methode

Sechzig hörgesunde Versuchspersonen nahmen am Experiment teil. Sie beurteilten 11 Kombinationen aus rosa Rauschen und schmalbandigen Geräuschkomponenten im vollständigen Paarvergleich. Das rosa Rauschen hatte einen Gesamtpegel von 63 dB SPL. Zur Variation des Signal-Rausch-Abstands wurde ein 500-Hz-Sinuston mit T/N-Abständen von -6, -3, 0, +3 und +6 dB dazugegeben. Zur Variation der Bandbreite wurde Schmalbandrauschen mit einer Mittenfrequenz von 500 Hz und Bandbreiten von 10, 50, 100, 150 und 200 Hz beigemischt, wobei der Gesamtpegel der addierten Rauschkomponenten konstant 10 dB über dem Frequenzgruppenpegel des Rauschens lag. Alle 11 Geräusche - einschließlich rosa Rauschen allein - waren von 400 ms Dauer. Sie wurden mit 16 bit Auflösung und 44.1 kHz Samplingrate über eine Soundkarte (Soundblaster AWE PnP) ausgegeben und nach Diffusfeldentzerrung diotisch über Kopfhörer (STAX SR lambda) dargeboten.

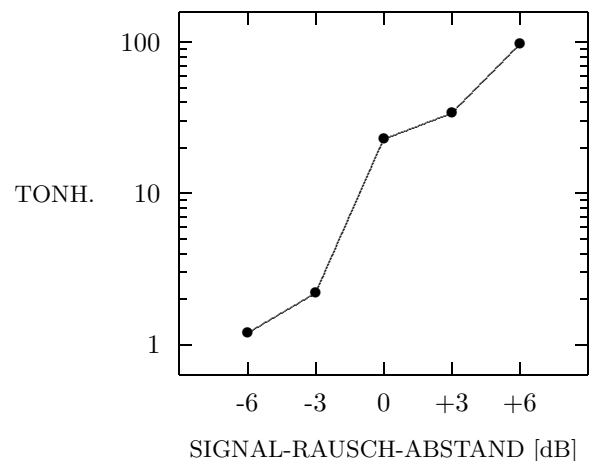


Abbildung 1: Tonhaltigkeit in Abhängigkeit vom Signal-Rausch-Abstand. Auf der Abszisse ist der relative Pegel des einem rosa Rauschen beigemischten 500-Hz-Tons abgetragen. Die Ordinate ist die aufgrund des *Präferenzbaum*-Modells geschätzte Verhältnisskala der Tonhaltigkeit, die sich aus den Paarvergleichen ergibt.

Die Versuchspersonen beurteilten alle Paarungen der 11 Reize in zufälliger Reihenfolge und entschieden, welcher der beiden Schalle eines Paares tonhaltiger klang.

Ergebnisse

Die Paarvergleiche wurden über alle Versuchspersonen aggregiert. Die resultierenden relativen Präferenzhäufigkeiten lassen sich nun auf ihre Vorhersagbarkeit durch das *BTL*-Modell (Gl. 1) analysieren. Wie das im einzelnen geschieht, und welche Konsistenzprüfungen (z.B. bezüglich der Transitivität der Paarvergleiche) durchzuführen sind, ist in [3] näher beschrieben. Für den vorliegenden Datensatz ergaben sich signifikante Abweichungen vom *BTL*-Modell; $\chi^2(45) = 96.66$; $p < 0.001$.

Deshalb wurde das weniger restriktive *Präferenzbaum*-

Modell [4] angepaßt, das eine andere Vergleichsstrategie unterstellt: Hier ist es zulässig, daß je nachdem, welche Stimuli ein Reizpaar konstituieren, andere Vergleichskriterien herangezogen werden. Methodische Details dieser Auswertung und ihre Darstellung in Form einer Baumstruktur sind für eine parallele Untersuchung an Reifengeräuschen in [1] beschrieben. Für den vorliegenden Datensatz ergab ein Präferenzbaum-Modell mit zwei zusätzlichen Parametern eine gute Anpassung; $\chi^2(43) = 45.81$; $p < 0.356$.

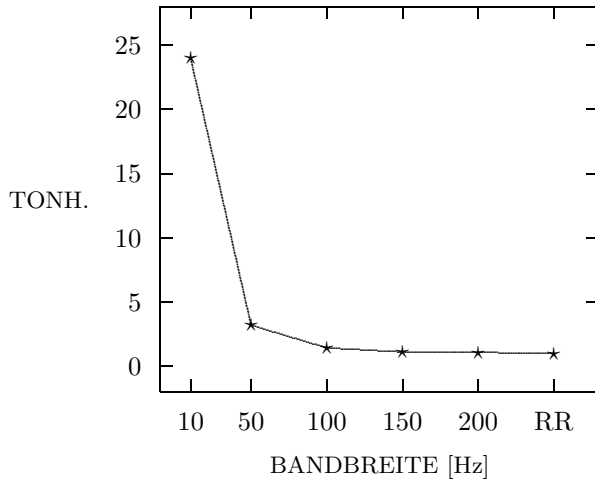


Abbildung 2: Tonhaltigkeit in Abhängigkeit von der Bandbreite des spektralen Buckels. Grundgeräusch war ein rosa Rauschen (RR), dem Schmalbandrauschen mit 500 Hz Mittenfrequenz und den fünf auf der Abszisse angegebenen Bandbreiten beigemischt wurde.

Aufgrund dieses Modells kann für die gegebenen Reize eine Verhältnisskala der Tonhaltigkeit konstruiert werden. Die Ergebnisse dieser Skalierung sind - separat für die beiden manipulierten Reizparameter - in den Abb. 1 und 2 dargestellt. Mit der Erhöhung des Signal-Rausch-Abstands um insges. 12 dB ergibt sich ein dramatischer Zuwachs der Tonhaltigkeits-Skalenwerte um etwa den Faktor 100 (s. Abb. 1). Wird die Bandbreite der tonalen Komponente vergrößert, so fällt die Tonhaltigkeit sehr schnell auf Werte, die nicht signifikant über der Tonhaltigkeit des Hintergrundrauschens liegen (s. Abb. 2).

Diskussion

Um die erhaltenen Skalenwerte mit instrumentellen Maßen der Tonhaltigkeit zu vergleichen, wurden mittels der Sound-Quality Software VIPER 3.11 (Cortex Instruments) für die verwendeten Reizkonstellationen sowohl *prominence ratios* als auch die Ausgeprägtheit der Tonhöhe (*pitch salience*) auf der Grundlage von Terhardts Tonhöhenmodell [5,6] berechnet. Abb. 3 zeigt, dass das *prominence ratio* den starken Abfall der Tonhaltigkeit, der sich schon bei Vergrößerung der Bandbreite von 10 auf 50 Hz ergibt, nicht wiedergibt, da es die Verteilung der Energie innerhalb der Frequenzgruppe nicht berücksichtigt. Das Tonhöhenmodell dagegen sagt diesen bereits vor Erreichen der Frequenzgruppenbreite auftretenden Effekt recht gut voraus.

Die Tatsache, dass das eindimensionale BTL-Modell die Paarvergleiche nicht adäquat vorhersagen konnte, deutet darauf hin, dass Tonhaltigkeit anhand mehrerer (wechselnder) Kriterien beurteilt wird. So ist es denkbar, dass starke Tonhaltigkeiten anhand der dominierenden spektralen

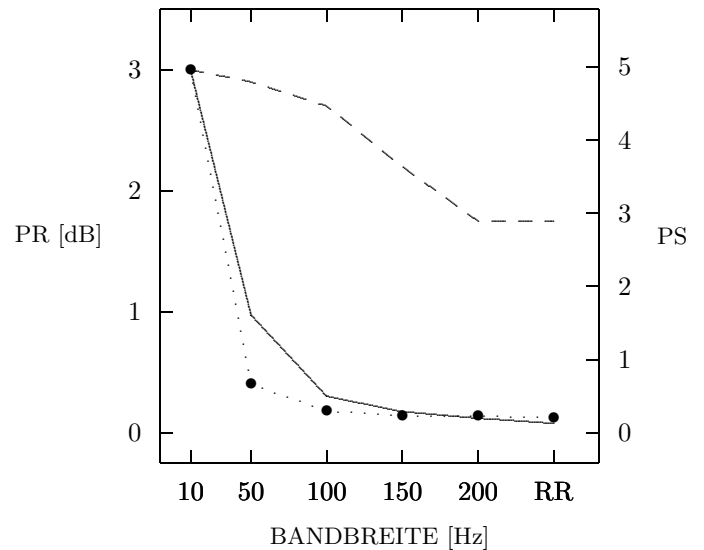


Abbildung 3: Aus den Paarvergleichen ermittelte Tonhaltigkeit (ausgefüllte Kreise) und *prominence ratios* (PR, linke Ordinate, gestrichelte Linie) sowie die Vorhersagen des Tonhöhenmodells (PS, "pitch salience", rechte Ordinate, durchgezogene Linie).

Komponente (hier einer Spitze bei 500 Hz) beurteilt werden, während sich bei schwach ausgeprägten Tonhaltigkeiten mehrere Kandidaten zum Vergleich anbieten, z.B. auch Kantentöne (*edge pitches*) an den Rändern des Schmalbandrauschens. Diese Interpretation wird auch dadurch gestützt, dass die Modellierung mittels eines Präferenzbaums die Reize in zwei Gruppen teilt: die stark tonhaltigen Geräusche (Signal-Rausch-Abstände von 0, +3 und +6 dB, sowie das schmalbandige 10-Hz-Rauschen) gegenüber den (verbleibenden) schwach tonhaltigen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die verwendeten indirekten Skalierungsmethoden (1) eine Messung der Tonhaltigkeit auf Verhältnisskalenniveau erlauben, (2) im Unterschied zu herkömmlichen direkten Skalierungsverfahren Information über die Struktur der Daten liefern und (3) im Ergebnis bessere Übereinstimmung mit einem psychoakustisch begründeten Tonhöhenmodell zeigen als mit den zur Bestimmung von Tonzuschlägen entwickelten Methoden.

Literatur

- [1] Ellermeier, W. and Daniel, P. (2002). Tonal components in tire sounds: Refined subjective and computational procedures. *Sound Quality Symposium at Inter-Noise 2002*.
- [2] Luce, R.D. *Individual choice behavior*. Wiley, 1959.
- [3] Ellermeier, W., Mader, M. & Daniel, P. (2003). Scaling the unpleasantness of sounds according to the BTL model: Ratio-scale representation and psychoacoustical analysis. Under review.
- [4] Tversky, A. & Sattath, S. (1979). Preference trees. *Psychological Review*, 86, 542-573.
- [5] Terhardt, E., Stoll, G. & Seewann, M. (1982). Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. *JASA*, 71, 679-688.
- [6] Vormann, M. & Daniel, P. (1997). Detection of tonal components with a model of spectral and virtual pitch based on the Fourier time transformation (FTT). *Inter-Noise 1997*, 1531-1534.