

# Modell der Hörbarkeit von zeitvarianten tonalen Komponenten (Getriebetöne) vor komplexem Hintergrundgeräusch

Werner A. Deutsch<sup>1</sup>, Axel Mors<sup>2</sup>, Anton Noll<sup>1</sup>, Holger Waubke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Schallforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, A-1010 Wien, Email: Werner.Deutsch@oeaw.ac.at*

<sup>2</sup> *ZF Friedrichshafen AG, D-88038 Friedrichshafen, Email: Axel.Mors@zf.com*

## Einleitung

Die subjektive Beurteilung von einzelnen, u.U. schwachen und dennoch hörbaren Komponentengeräuschen, z.B. Getriebetöne, im Fahrzeuginnenraum erfolgt unter akustisch und perceptiv komplexen Randbedingungen: 1. über einen großen Frequenzbereich auf Grund der Drehzahlabhängigkeit der Quellensignale und der Resonanzeigenschaften der mechanisch gekoppelten Struktur, 2. wegen der Vielzahl gleichzeitig vorhandener, kovarianter Quellen (Motor und andere), die das Innengeräusch bilden und schließlich 3. in Folge der mehrfach und wechselseitig beteiligten psychoakustischen Effekte, wie z.B. Verdeckung, Kontinuität und auditive Stream - Bildung, die selbst bei erfahrenen Experten zu großen Streuungen in der Qualitätsbeurteilung führen.

Aus diesen Gründen beinhaltet das vorgestellte Modell 3 Stufen: 1. die akustische Identifikation und den Pegelverlauf relevanter Spektralkomponenten mittels einer Ordnungsanalyse, 2. die Prüfung der Hörbarkeit in Abhängigkeit benachbarter, nicht zur gesuchten Quelle gehöriger Spektralkomponenten und 3. die Abbildung der perceptiv wirksamen Pegel innerhalb eng gestufter Drehzahlklassen auf einer subjektiven Qualitätsskala.

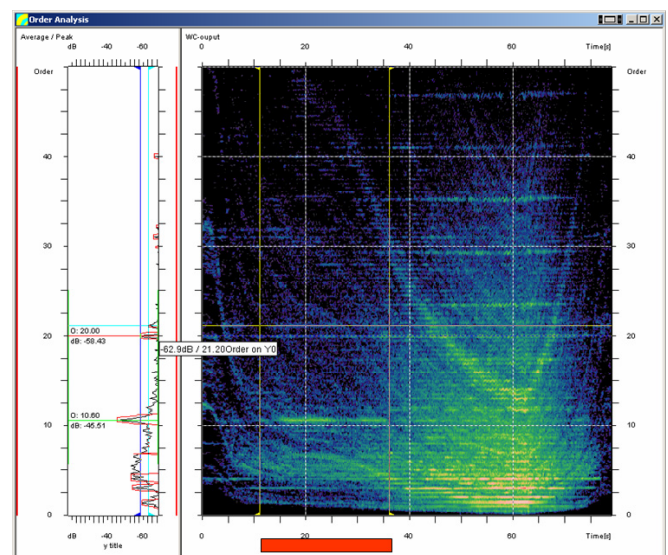
## 1. Die Ordnungsanalyse

Zur Ordnungsanalyse stehen verschiedene Methoden zur Verfügung (Umrechnung von FFT - Spektren in Ordnungsspektren, Resampling - Verfahren, oder Void Kalman Ordnungsfilter), jedoch sollte die Breite der Testordnungsbänder und die Auflösung so wählbar sein, dass einerseits leichte Verschiebungen der Ordnungen (z.B. beim Wechsel von Zug auf Schub), andererseits eng aneinander liegende Ordnungen, die zu Schwebungseffekten führen, erfasst werden können. Als Ergebnis erhält man ein Ordnungsspektrogramm, das den Verlauf der Ordnungen über die Zeit lokal und über Mittelwertbildung in beliebig langen Zeitfenstern darstellt, ohne Frequenzauflösung zu verlieren. Bei Verfügbarkeit eines Drehzahlsignals kann es direkt verwendet werden, jedoch ist auch die Extraktion der Drehzahl aus einer Harmonizitäts- oder Grundfrequenzanalyse durchführbar.

### Psychoakustische Interpretation des Ordnungsspektrogramms

Für die psychoakustische Weiterverarbeitung liefert das Ordnungsspektrogramm die Rohdaten, dass ein Ton mehr oder weniger kontinuierlich vorhanden ist und von der Drehzahl- oder von einer anderen Steuerungsfunktion abhängig seine Frequenz ändert. Das entspricht auch der auditiven Wahrnehmung, die im Gegensatz zur FFT keine lokale Stationari-

tät eines sich in der Frequenz verändernden Tones annehmen muss, sondern im Sinne einer perceptiven Dekonvolution die Attribute Ton vorhanden/nicht vorhanden (siehe Ordnung), Tonhöhe steigend oder fallend, gleich bleibend, periodisch variant usw. (Wahrnehmung der Quellenaktivität) einführt. Somit wird die Ordnungsanalyse neben ihrer technischen Bedeutung auch als nützliches Werkzeug für die Repräsentanz von auditiven Features gesehen, bei denen kohärente Frequenzvariationen eine konstitutive Rolle spielen.



**Abbildung 1:** Ordnungsspektrogramm der Tonaufnahme im KFZ-Innenraum eines Hoch- und Auslaufes mit Identifikation von relevanten und irrelevanten Komponentenordnungen (rot: Mittelwert im Bereich von ca. 10s bis 35s; links angeordnet).

## 2. Hörbarkeit von tonalen Komponenten

Üblicherweise sind die Ordnungszahlen der zu einer bestimmten Komponente gehörigen Ordnungen aus den Konstruktionsdaten bekannt. Somit könnte sich die Analyse der Hörbarkeit auf die Frequenzbereiche beschränken, in denen die Ordnungen liegen. Dennoch, zur Gesamtbewertung und angesichts der in der Praxis häufigen Verwechslung von Ordnungen verschiedener Quellen bei subjektiven Beurteilungen, wird der volle Frequenzbereich analysiert. Dazu wird das von E. Terhardt [1,2] entwickelte Verfahren zur Berechnung des SPL - Exzesses von Spektraltonhöhen in leichter Modifikation eingesetzt. Einerseits wurde eine Transformationslänge von 250 ms gewählt, andererseits wurde das Kriterium für die Detektion der spektralen Spitzen auf +3 dB reduziert, schließlich war es für die untersuchten Fälle ausreichend, nur die gegenseitige Verdeckung zu be-

rechnen. Alternativ wurde zur Berechnung der Verdeckungsfunktion das im eigenen Haus entwickelte Maskierungs- / Übermaskierungsmodell [3] eingesetzt, das bei entsprechender Konfiguration absolut vergleichbare Ergebnisse liefert.

**Bewertungsfunktion**

Aus den so gewonnenen (näherungsweise) „SPL – Exzess“ - Daten der einzelnen Komponenten werden zwei für die Bewertungsfunktion benötigte Pegel berechnet: a) die Summe aller wirksamen Pegel (= wirksamer Gesamtpegel) und b) die wirksamen Pegel in den Testordnungsbändern:

$$XP_{gesamt} = 10 * \log_{10} \sum_{j=0}^{NP-1} 10^{XP_j/10}$$

$$XP_{test} = 10 * \log_{10} \left[ \sum_{FU_{test} \leq FP \leq FO_{test}} 10^{XP_j/10} + \sum \dots \right]$$

wobei  $XP_{gesamt}$  = wirksamer Pegel des gesamten Spektrums  
 $XP_{test}$  = wirksamer Pegel in den Testordnungsbändern  
 $FU_{test}$ ,  $FO_{test}$  = untere/obere Grenzfrequenz des jeweiligen Testordnungsbandes. Anmerkung: im Falle mehrerer Testordnungsbänder, die gleichzeitig bewertet werden sollen, werden die Teilsummen addiert.

Aus den in (1) ermittelten wirksamen Signalpegeln wird mittels eines direkten Vergleichs der Anteil  $WT$  der Testordnungen am gesamten wirksamen Pegel berechnet.

$$WT = \frac{XP_{test} + 6}{XP_{gesamt} + 6} \text{ wenn } XP_{test} \geq 6 \text{ dB}$$

$$WT = 0 \text{ wenn } XP_{test} \leq 6 \text{ dB}$$

$$WT = \text{relativer Pegel der wirksamen Testordnungen}$$

Der Offset von 6 dB in (2) ergibt sich experimentell und aus der Literatur abgesichert, nachdem eine spektrale Komponente, die einen Pegelüberschuss von mehr als 6 dB gegenüber benachbarten Komponenten aufweist, einen analytisch hörbaren, eigenen Tonhöhenbeitrag leistet.

**Bestimmung der Bewertungsscores**

Für den Zusammenhang zwischen den üblichen Qualitäts-Bewertungsscores  $BW$  (1 = untragbar, 10 = nicht hörbar) und der oben beschriebenen Funktion  $WT$  wurde eine empirische Funktion ermittelt:

$$BW_j = 1 + 9 \left[ \sum_{j=IB_i}^{IE_i} \frac{1 - WT_j^2}{IE_i - IB_i + 1} \right]$$

wobei  $i$  = der Index des bewerteten Signalbereichs,  $IB_i$ ,  $IE_i$  = der Index des Beginn- und Endframes des  $i$ -ten Segments,  $BW_j$  = die Bewertung für das jeweilige Signalsegment nach Drehzahlklasse zusammengefasst.

**3. Vergleich der Ergebnisse mit Expertenbeurteilungen**

Zur Evaluierung der Modellergebnisse wurden unabhängig erhobene, anonymisierte Qualitätsbeurteilungen von Experten mit langjähriger Erfahrung in Getriebetönen herangezogen. Zu diesem Zweck wurden binaurale Tonaufnahmen von KFZ - Testfahrten (mit Beschleunigung und Schub) in Sig-

nalsegmente von 7s Dauer zerlegt und zur Beurteilung spezialisierten Experten über Kopfhörer dargeboten [4].

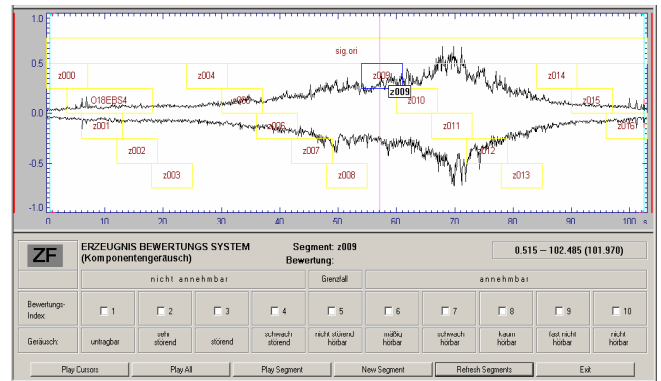


Abbildung 1: Bildschirminterface für die subjektive Beurteilung von Getriebetönen [4].

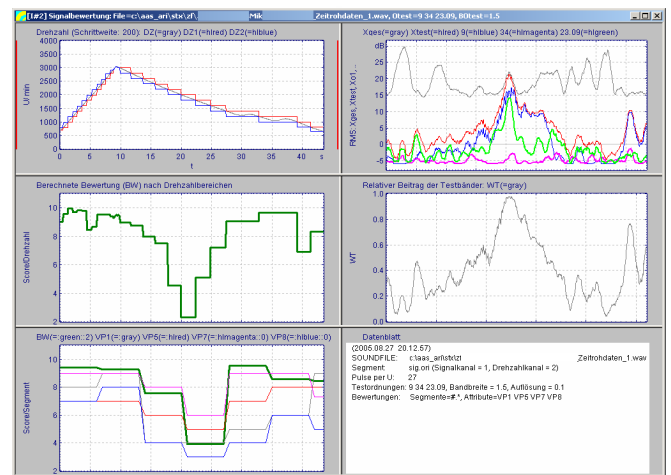


Abbildung 4: Vergleich der Ergebnisse der automatischen Beurteilung von Getriebetönen eines im Fahrzeuginnenraum aufgezeichneten Testlaufes mit Expertenurteilen auf einer Skala von 1 bis 10. Links oben: Einteilung des Drehzahlbereiches in Klassen (Abszisse Zeit in s); links Mitte: Ergebnis der automatischen Bewertung; darunter: subjektive Bewertung von 4 Experten. Rechts oben: Gesamtpegel des KFZ-Innengeräusches und zeitabhängiger Anteil von 3 Getriebeordnungen; darunter Summe des Anteils der Getriebeordnungen am Gesamtpegel. Die Graphik zeigt deutlich den Qualitätseinbruch bei Sekunde 20 des Testlaufes im Drehzahlbereich von ca. 2000 U/min. übereinstimmend mit den subjektiven Beurteilungen.

**Literatur**

[1] Terhardt, E. (1972). Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen. I. Psychoakustische Grundlagen. Acustica 26, 173-186.  
 [2] Terhardt, E. (1972). Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen. II. Ein Funktionsschema. Acustica 26, 187-199.  
 [3] Deutsch, W.A., G. Eckel & A. Noll (1990): Von der Irrelevanzschwelle zur Relevanzspektrographie. Fortschritte der Akustik, DAGA'90, Wien, 699-702.  
 [4] Mors, A., H. Waubke & W.A. Deutsch(2003): Objektives Beurteilungskriterium von Getriebegeräuschen im Fahrzeuginnenraum. Fortschritte der Akustik, DAGA'93.