

Objektives Verfahren zur Beurteilung von Getriebegeräuschen im Fahrzeuginnenraum

Axel Mors¹, Holger Waubke², Werner Deutsch²

¹ZF Friedrichshafen AG, Zentrale Forschung und Entwicklung, Technische Akustik; Email: Axel.Mors@zf.com

²Institut für Schallforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften; Email: holger.waubke@oew.ac.at

Einleitung

Der laufende Fortschritt bei der Reduzierung und Dämmung dominierender Motoren- und Fahrzeuggeräusche in Personenkraftwagen erfordert es auch Getriebegeräusche stetig weiter zu reduzieren. Bereits während der Entwicklung wird neben der reinen Feststellung der Hörbarkeit auch ein Beurteilungskriterium für die Qualität der subjektiven Hörempfindung verwendet, das die Lästigkeit für Fahrzeuginsassen widerspiegeln soll. In der Praxis geschieht dies durch Bewertungen der Testfahrer, bzw. mitfahrender Versuchspersonen mittels beschreibender Attribute auf einer zehnstufigen Skala. In den Bewertungsindex (BI) gehen somit neben der Lautstärke weitere situative und subjektive Variablen ein, die mit intra- und interindividueller Varianz behaftet sind. Insbesondere werden unterschiedliche Bewertungskriterien wirksam. Im Rahmen eines neuen Bewertungsverfahrens wird insbesondere berücksichtigt, dass die Beurteilungskriterien von Laien und Experten miteinander verglichen und Unterschiede aufgezeigt werden können.

Drehzahlabhängige Fahrzeuginnenräume sind in ihrer Auffälligkeit nicht vergleichbar mit seltenen akustischen Ereignissen größerer Lautstärke. Aufgrund der unvergleichbar langen Erfahrung verfügen etwa Berufsfahrer, die praktisch alle Betriebszustände ihres Fahrzeuges am „Klang“ erkennen und infolge der Kontinuität des Drehzahl- und Geschwindigkeitsverlaufes bestens verankerte Erwartungen haben, über eine spezialisierte, außergewöhnlich hohe Diskriminationsfähigkeit. So wird eine Spektrallinie eines Aggregats auch dann fortgesetzt gehört, wenn sie abschnittsweise physikalisch nicht vorhanden ist oder durch andere Geräusche ganz oder partiell verdeckt wird (picked fence effect). Die Wirkung der Kontinuität bzw. des charakteristischen Verlaufes von Spektralkomponenten wurde in der auditiven Szenenanalyse ausführlich untersucht [1]. Selbst wenn einzelne Spektrallinien nicht aufgelöst gehört werden können, tragen sie aufgrund unterschiedlichen Modulationsverhaltens zur lokal auftretenden Glätte oder Rauigkeit des Gesamtklanges und der Klangfarbe bei. Deshalb wird auch die Modulation einzelner Komponentengeräusche zu untersuchen sein. Im Falle mehrerer drehzahlgekoppelter Spektrallinien, die eine gemeinsame Frequenz- oder Amplitudenveränderung über die Zeit erfahren („Gemeinsames Schicksal“), tritt ein weiterer Segregationseffekt ein, der die Bildung von auditiven Streams fördert.

Die wiederholt zu erfahrende Lokalisierbarkeit von aufgelösten Spektralkomponenten trägt zur Senkung der Hörbarkeitsschwelle im höheren Frequenzbereich bei. Ebenso bedeutend ist es, dass Fahrzeuginsassen infolge von situationsbedingten Kopfbewegungen Maxima von stehenden Wellen im Fahrzeuginnenraum auffinden können, die positionsabhängig Pegelerhöhungen um 10 dB aufweisen.

Produktions- und Perzeptionsmodell

Bei der Analyse von Getriebegeräuschen wird zwischen Produktions- und Perzeptionsmodell deutlich unterschieden: für die Identifizierung und Zuordnung einer spektralen Linie zu einer Quelle dient in erster Linie die Ordnung. Die Ordnungsanalyse, bei der

Linien nicht in Abhängigkeit der Frequenz sondern direkt in Abhängigkeit der Ordnung dargestellt werden, berücksichtigt im Gegensatz zur diskreten Fourier Transformation die natürliche Periodizität und enthält somit keine Fenstereffekte. Lediglich Resonanzen, welche von den Ordnungen durchfahren werden, stören die strenge Periodizität der Ordnungsanalyse. Während die Ordnungsanalyse eines der wesentlichsten Hilfsmittel für die Bestimmung des Verursachers ist, gibt sie keinen Aufschluss über die psychoakustische Wirkung der Frequenzkomponenten. (Abb.1)

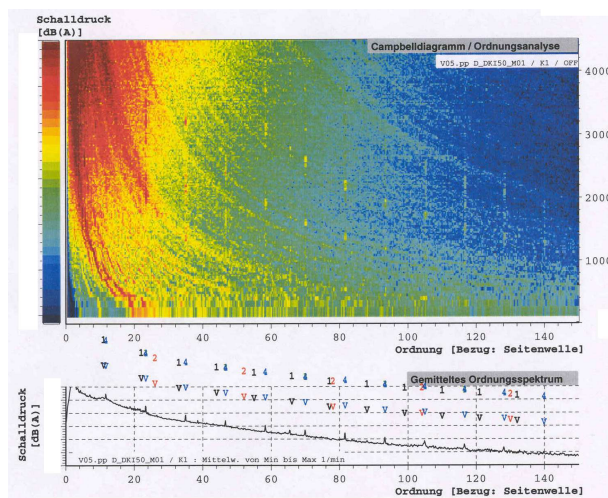


Abbildung 1: Ordnungsanalyse - Produktionsmodell

Das Perzeptionsmodell orientiert sich andererseits nicht an der Quelle sondern an den Funktionen des Hörsystems des Menschen. Die auditive Frequenzanalyse ist aus technischer Sicht breitbandig, so dass mehrere Spektrallinien des Motors, Getriebes und weiterer Aggregate in eine kritische Bandbreite fallen. Aus der perzeptiv korrekten Analyse kann somit nicht unmittelbar auf einen Verursacher geschlossen werden. Zur Trennung der Verursacher ist eine Simulation erforderlich, bei der mittels eines Produktionsmodells die Linien des Schmalbandspektrums bzw. der Ordnungsanalyse systematisch variiert und den Quellen zugeordnet werden. Die solcherart generierten Signale dienen als Input für das perzeptive Modell, um die psychoakustische Wirkung zu bestimmen.

Maskierung

Die erste Stufe des Bewertungsverfahrens berechnet die Simultanmaskierung der Originalgeräusche und der in den Simulationen generierten Signale. Die Maskierungsfunktion wird im Abstand von 5 bis 10 ms überlappend bei einer Fensterlänge von ca. 23 ms berechnet, so dass die zeitlichen Fluktuationen der Signale erhalten bleiben. Schwebungen und Rauigkeiten werden auch in der Abfolge der maskierten Spektren korrekt abgebildet.

Die Bestimmung der Maskierungsfunktion erfolgt, indem das Spektrum des Signals zunächst auf die Barkskala transformiert wird und anschließend mit der dreiecksförmigen Spreading Function [2] gefaltet wird. Die Spreading Function nimmt ausgehend von einer Amplitude Eins bei 0 Bark in Richtung positiver Frequenzen mit

24 dB/Bark und in Richtung negativer Frequenzen mit 27 dB/Bark ab. An der Nullstelle wird die Funktion auf Null gesetzt, da der Maskierer selbst unmaskiert bleibt. Wesentlich für den ungestörten Höreindruck ist es den Crest Faktor der Spreading Function gering zu halten. Hierzu werden die Ecken der Funktion ausgerundet [3] (eq.1).

$$B(x) = 13.94 + 1.5(x + 0.03) - 22.5\sqrt{0.3 + (x + 0.03)^2} \quad \text{eq. 1}$$

Die Faltung ist als Multiplikation der Fourier Transformaten beider Spektren mit energieäquivalenter Rücktransformation in den Frequenzraum implementiert. Die so entstandene Maskierungsfunktion wird anschließend für die Maskierung des Amplitudenspektrums verwendet. Bei diesem Vorgehen bleiben die Phasen des Signals erhalten, so dass sich aus der Differenz zwischen maskierten und unmaskierten Signal jene Teile bestimmen lassen, die nicht hörbar sind. (Abb. 2)

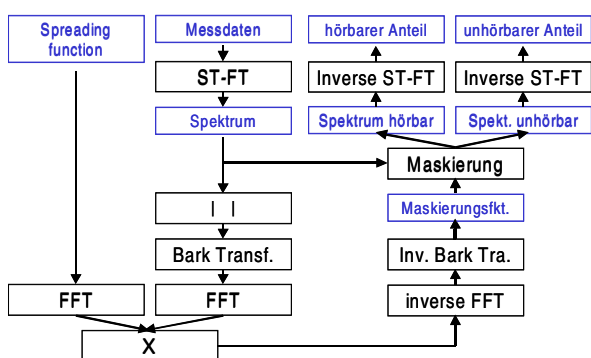


Abbildung 2: Maskierungsalgorithmus

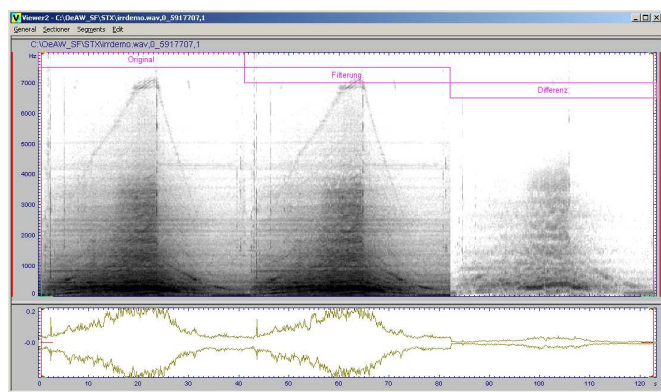


Abbildung 3: Maskierung des Signals Perzeptionsmodell (von links: Original, hörbarer Anteil – nichthörbarer Anteil)

Es lässt sich nach der Maskierung erkennen, zu welchen Zeiten Getriebelinien hörbar sind und zu welchen nicht. Allerdings stehen die Getriebelinien vom Pegel her selten hervor. Somit ist die Energie der Linien des Getriebes kein Maß, welches dem Höreindruck entspricht (Abb.3).

Der Vor- und Nachverdeckung wird bei der Bearbeitung der vorliegenden Signale eine untergeordnete Rolle zugewiesen, weil die Modulation bei den beobachteten Pegelschwankungen verhältnismäßig geringe Flankensteilheit aufweist.

Modulation

Als wesentliches Unterscheidungskriterium für Motor-, Getriebe- und sonstige Geräusche hat sich die zeitliche Modulation der Ordnungen herausgestellt.

Modulation der Motorlinien

Aufgrund des Drehzahlbereiches von Motoren lässt sich ein Abstand der Linien von 12 bis 100 Hz abschätzen. Psychoakustisch entspricht dies dem Übergang von an der Verschmelzung liegenden Schwankungen über die Rauigkeit bis zur Auflösung in die einzelnen Teiltöne eines Klanges, die innerhalb, bzw. gerade im Bereich einer der kritischen Bandbreite liegen (100 Hz). Aus dieser Sicht wäre das Motorengeräusch vornehmlich als rau zu beurteilen. Das entspricht jedoch nur teilweise der Hörempfindung. Analysiert man den zeitlichen Verlauf der Pegel der Ordnungen nach Berechnung der Maskierung, so stellt man fest, dass die Linien zeitlich versetzt moduliert sind, und das länger andauernde gemeinsame Auftreten zweier ausgeprägter Spektrallinien selten ist. Vielmehr werden entsprechend der Modulation im unteren und mittleren Drehzahlbereich vornehmlich Schwankungen wahrgenommen. Erst bei höheren Drehzahlen bilden sich Bedingungen aus, die Rauigkeit hervortreten lassen.

Getriebemodulation

Solange die Getriebelinien durch die fluktuierenden Motorkomponenten zeitweise verdeckt werden, bilden sie keine eigene Kontinuität aus. Erst wenn einerseits die Pegel der Linien ansteigen, bzw. der Frequenzabstand größer wird, führt die fehlende Modulation der Getriebelinien zur Bildung getrennt hörbarer Spektralkomponenten. In diesem Moment beginnen die Getriebeegeräusche lästig zu werden.

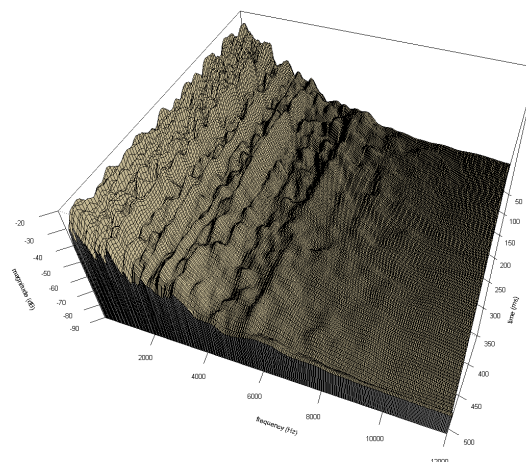


Abbildung 4: Modulation der maskierten Spektren mit dem Ausklingen einer Getriebelinie

Zusammenfassung

Es wurde ein zweistufiges Verfahren entwickelt, das im Fahrzeuginnenraum gewonnene Messdaten mittels des Softwarepakets ST^X des Instituts für Schallforschung nach verschiedenen akustischen und psychoakustischen Größen mit entsprechenden Gewichtungen in ihrem zeitlichen Verlauf auswertet. Anschließend werden aus diesen Werten mittels angepasster Algorithmen Indikatoren abgeleitet, die eine automatische Bewertung ergeben, welche der subjektiven Bewertung nahe kommt.

- ¹ Bregman, A.S. (1990): Auditory Scene Analysis. The Perceptual Organization of Sound. The MIT press, Cambridge, Mass.
- ² Schroeder et. Al. (1979): Optimizing digital speech coders by exploiting masking properties of the human ear. JASA 66(6), pp. 1647-1652.
- ³ Eckel, G. (1989): Ein Modell der Mehrfachverdeckung für die Analyse musikalischer Schallsignale. Phil.Diss.Univ.Wien.