

Modell zur Berechnung der subjektiven Rauigkeit von drehzahlabhängigen Geräuschen

CARSTEN ZERBS*, OTTO MARTNER*, ULRICH FEY**, RUDOLF KRAGL**

*Müller-BBM GmbH, Planegg; **BMW AG, München

E-mail: CZerbs@mbbm.de

Einleitung

Zur Berechnung der psychoakustischen Rauigkeit von Geräuschen liefern existierende Modelle für viele synthetische und technische Schalle gute Vorhersagen für die subjektiv empfundene Rauigkeit [1, 4]. Bei der Anwendung auf Fahrzeuginnengeräusche weisen die Vorhersagen jedoch nur geringe Übereinstimmung mit subjektiven Hörempfindungen auf.

Basierend auf umfangreichen Hörversuchen sowohl mit „Experten“ als auch mit „Laien“ wurde ein neues Modell zur Berechnung der Motorrauigkeit implementiert, das erheblich verbesserte Vorhersagen der empfundenen Rauigkeit ermöglicht. Das Modell berücksichtigt zum einen die Ordnungsstruktur der Geräusche von Verbrennungsmotoren. Das akustische Signal wird nicht mehr mit einer Filterbank aus Filtern fester Mittenfrequenz zerlegt, sondern die Mittenfrequenzen werden dynamisch aus der Motordrehzahl berechnet. Dadurch können die im Signal enthaltenen und für die Rauigkeitsempfindung wichtigen Amplitudenmodulationen vollständig ausgewertet und für die Berechnung der Gesamtrauigkeit verwendet werden. Zum anderen ist diese auditorische spektrale Zerlegung im Zeitbereich implementiert und nicht, wie für herkömmliche Rauigkeitsmodelle, FFT-basierend.

Im folgenden wird die Modellstruktur beschrieben und die Ergebnisse aus Experimenten und Simulationen werden miteinander verglichen.

Voruntersuchungen

Für Voruntersuchungen wurden 30 binaurale Kopfaufnahmen von Fahrzeuginnengeräuschen ausgewählt. Wegen der bei höheren Geschwindigkeiten dominierenden Windgeräusche, die den Höreindruck störten, wurden für die Vorversuche Aufnahmen von Konstantfahrten im 2. oder 3. Gang im Geschwindigkeitsbereich von 50 bis 80 km/h ausgesucht. Die verwendeten Aufnahmen stammen von zwölf verschiedenen Fahrzeugen aus unterschiedlichen Fahrzeugklassen und mit unterschiedlicher Motorisierung. An den Experimenten nahmen insgesamt 54 Versuchspersonen teil, davon 18 Fachleute und 36 Laien.

Die ausgewählten Schalle sollten anhand eines semantischen Differentials (SD) beurteilt werden. Mit einem SD können Eigenschaften eines Schallereignisses beurteilt werden und ihre Position in einem mehrdimensionalen Merkmals- und Wahrnehmungsraum bestimmt werden. Für die psychoakustischen Voruntersuchungen wurden (unter anderem) die folgenden Attribute verwendet:

- leise – laut
- unsportlich – sportlich
- rau – glatt
- kraftvoll – kraftlos

- dröhnend – nicht dröhnend

• ...

Für die mittlere Beurteilung wurde eine varimaxrotierte Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Die Faktorenanalyse extrahierte 3 Hauptfaktoren, die zusammen 75 % der Varianz aufklärten. Die Experten beurteilen die Lautstärke und Rauigkeit der Schallereignisse getrennt voneinander (1. und 3. Faktor), während die Laien dazu tendierten, die Lautstärke zusammen mit der Rauigkeit zu beurteilen (1. Faktor). Insgesamt konnte die Rauigkeit getrennt von anderen Attributen beurteilt werden.

Drehzahlabhängige Motorrauigkeit

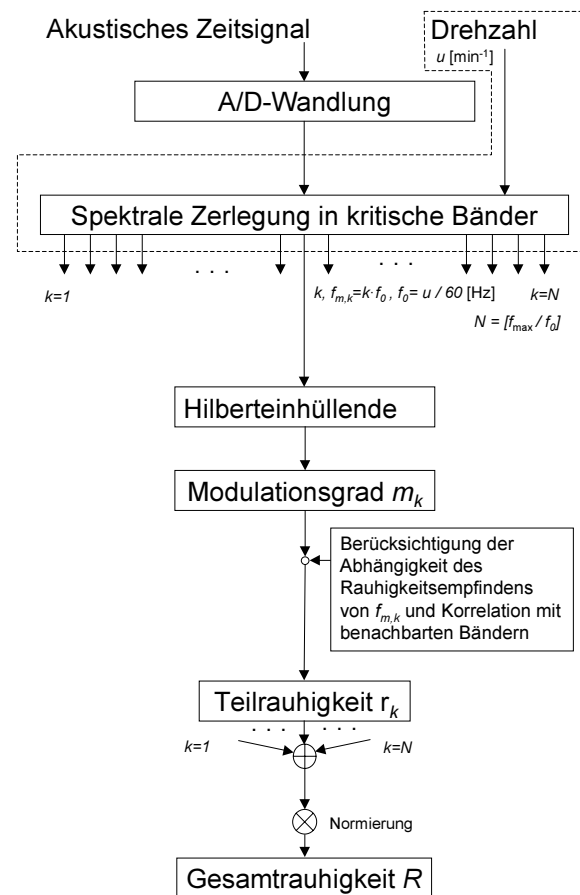


Abbildung 1: Blockdiagramm des Modells zur Berechnung der drehzahlabhängigen Rauigkeit.

Klassische Rauigkeitsmodelle gehen von einer spektralen Zerlegung des Eingangssignals in Frequenzgruppen aus, wobei die Filtermittenfrequenzen fest gewählt sind, z. B. entsprechend einer Barkskala. Dabei wird die Ordnungsstruktur (ausgeprägte Spektrallinien des Fahrzeuginnengeräusches bei ganz- und halbzahligen

Motorordnungen) nicht korrekt berücksichtigt, und resultierende Modulationen in kritischen Bändern nicht gehörgerecht wiedergegeben. Abbildung 1 zeigt das Blockdiagramm des Modells zur Bestimmung der zeitabhängigen Motorrauhigkeit.

Die Struktur des Modells lehnt sich an existierende Rauigkeitsmodelle an, die drehzahlabhängige Filterbank wurde im Zeitbereich implementiert. Das gesampelte Zeitsignal und das zugehörige Drehzahlsignal bilden die Eingangsgrößen. Die Bandbreite der auditorischen Filter im Modell wurde entsprechend der kritischen Bandbreite bei der jeweiligen Mittenfrequenz nach [6] gewählt. Für jeden Kanal (Filterausgang) wird die Hilberteinhüllende berechnet, aus deren Gleich- und Wechselanteil ein Kurzzeit-Modulationsgrad abgeschätzt wird. Aus dem Modulationsgrad wird zusammen mit weiteren Größen (Korrelation mit Nachbarbändern, Momentanpegel, etc.) die Teilrauhigkeit des jeweiligen Frequenzkanals berechnet. Da der Abstand zwischen den einzelnen Filtern durch die Art der Anordnung nicht mehr fest auf einer Barkskala ist, wird bei der Kombination von Information aus benachbarten Kanälen eine Korrekturfunktion benutzt. Die Gesamtrauhigkeit des Eingangssignals ergibt sich durch Summation über die Teilrauhigkeiten. Zum Schluß erfolgt durch Multiplikation mit einem konstanten Faktor eine Normierung auf die psychoakustisch übliche Einheit „asper“.

Validierung

Zur Validierung des Modells wurde ein weiteres psychoakustisches Experiment mit dem Ziel, die Rauigkeit von ausgewählten Fahrzeuginnengeräuschen exakter zu skalieren, durchgeführt. Es wurden 9 der 30 im Vorversuch verwendeten Aufnahmen ausgewählt. Diese Aufnahmen wurden von 27 Versuchspersonen (Vpn) in einem vollständigen Paarvergleich bezüglich ihrer Rauigkeit beurteilt. Für jedes dargebotene Paar von Innengeräuschen sollte das jeweils rauhere ausgewählt werden. Die Konsistenz der Antworten der Vpn wurde anhand der Anzahl der zirkulären Triaden (Tripel von Testschallen, die in der Form $A > B > C > A$ bewertet wurden) überprüft [3]. Wegen zu geringer Konsistenz wurden die Ergebnisse von 6 Vpn von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Als Teststatistik wurde die relative Häufigkeit der zirkulären Triaden (bezogen auf ihren Maximalwert) benutzt; sie sollte für eine $V_p \leq 0,3$ sein.

Die Berechnung von Skalenwerten aus den Antworten erfolgte mit dem Bradley-Terry-Luce (BTL) Modell [2]. Mit dieser Methode wird aus den relativen Präferenzhäufigkeiten, mit denen ein Stimulus gegenüber einem anderen bevorzugt wird, für jeden Stimulus ein Skalenwert auf einer Intervallskala berechnet (dem kleinsten Skalenwert wird hierbei der Wert 0 zugewiesen). Abbildung 2 vergleicht die Ergebnisse der psychoakustischen Skalierung mit den Modellvorhersagen. Die Rauigkeit wurde basierend auf Filtern mit Mittenfrequenzen auf den ganzen und halben Motorordnungen berechnet.

Die Modellvorhersagen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den subjektiven Daten. Es ergibt sich

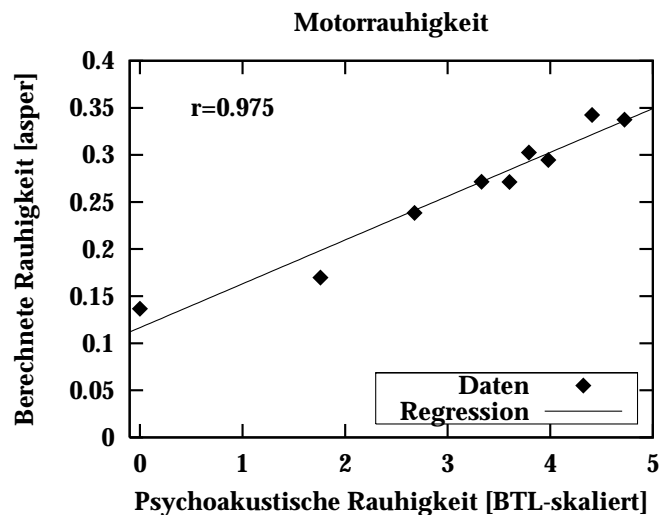


Abbildung 2: Berechnete Motorrauhigkeit über der empfundenen Rauigkeit aus dem Paarvergleich.

eine Korrelation von $r = 0,975$ zwischen Vorhersage und der subjektiven Rauigkeit. Für die gleichen Daten lieferte ein „klassisches“ Rauigkeitsmodell lediglich eine Korrelation von $r = 0,35$, eine Implementierung des neuen Modells im Zeitbereich, bei dem die Filtermittenfrequenzen festgehalten werden ergibt eine Korrelation von $r = 0,827$ mit den subjektiven Daten.

Diskussion und Ausblick

In den beschriebenen Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß die Vorhersage der psychoakustischen Rauigkeit für Fahrzeuginnengeräusche wesentlich verbessert werden kann, wenn man sie mit einem Modell berechnet, bei dem das Eingangssignals spektral mit Filtern zerlegt wird, deren Mittenfrequenzen den ganz- und halbzahligen Motorordnungen entsprechen. Zur Verbesserung der Übereinstimmung von Vorhersage und experimentellen Daten trägt auch die Implementierung des Modells im Zeitbereich bei, durch die Artefakte die durch Fenstereffekte der Fouriertransformation verursacht werden, verringert werden konnten.

Zur Zeit wird getestet, inwieweit auch Änderungen der Rauigkeit bei zeitvariabler Drehzahl wiedergegeben werden können.

Literatur

- [1] Aures, W.: Ein Berechnungsverfahren der Rauigkeit. *Acustica* 58 (1985), 268-281.
- [2] Borg, I.; Staufenbiel, T.: Theorien und Methoden der Skalierung. Eine Einführung. Huber, 1993.
- [3] Bortz, J. et al.: Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik. 2. Aufl. Springer, 2000.
- [4] Daniel, P.; Weber, R.: Psychoacoustical roughness: Implementation of an optimized model. *Acustica* 83 (1997), 113-123.
- [5] Martner, O. et al.: Neues psychoakustisches Modell zur objektiven Bestimmung der Rauigkeit bei Verbrennungsmotoren. *MTZ Motortechnische Zeitschrift* 62 (2000) 10, 678-685.
- [6] Zwicker, E.; Fastl, H.: *Psychoacoustics. Facts and models*. Springer, 1999.