

## Berechnung der zeitabhängigen Rauigkeit bei Motorgeräuschen

Arne Oetjen<sup>1</sup>, Steven van de Par<sup>1</sup>, Jesko Verhey<sup>2</sup>, Reinhard Weber<sup>1</sup> und Uwe Letens<sup>3</sup>

<sup>1</sup> C.v.O. Universität Oldenburg - Arbeitsgruppe Akustik, 26129 Oldenburg,

Email: arne.oetjen@uni-oldenburg.de, steven.van.de.par@uni-oldenburg.de und reinhard.weber@uni-oldenburg.de

<sup>2</sup> O.v.G. Universität Magdeburg - Experimental Audiology, 39120 Magdeburg, Email: jesko.verhey@med.ovgu.de

<sup>3</sup> Daimler AG, 71059 Sindelfingen, Email: uwe.letens@daimler.com

### Einleitung

Der Klangcharakter eines Motorgeräuschs wird unter anderem von dessen akustischer Rauigkeit beeinflusst. Die Drehzahl und der Lastzustand des Motors haben direkten Einfluss auf die Signaleigenschaften Modulationsfrequenz, Modulationstiefe und die Wellenform der Einhüllenden, die die empfundene Rauigkeit des Motorgeräuschs bestimmen. In einigen instationären Betriebszuständen, die sich durch einen deutlich rauhen Charakter auszeichnen, durchlaufen diese oben genannten Signaleigenschaften innerhalb eines sehr kurzen Zeitabschnitts nahezu ihren kompletten natürlichen Wertebereich.

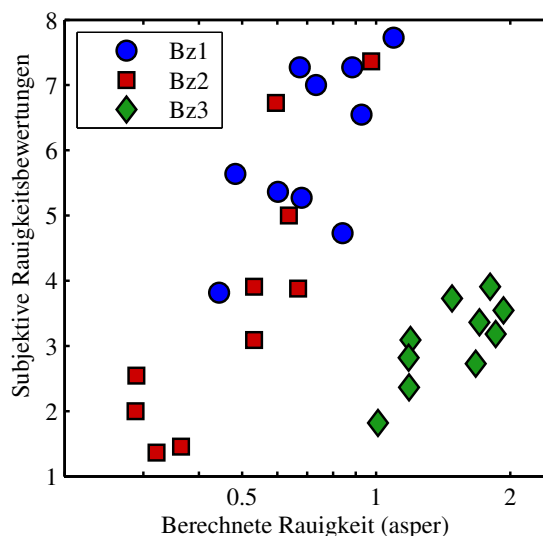
Ziel der hier vorgestellten Rauigkeitsberechnungen ist es, mit einem Algorithmus sowohl für stationäre als auch für instationäre Geräusche die subjektiven Rauigkeitseindrücke vorherzusagen.

### Rauigkeitsberechnung

#### Berücksichtigung der Einhüllendenform

Die Rauigkeit von sinusförmig für amplituden- und frequenzmodulierten Geräuschen, wie z.B. in [1] beschrieben, kann durch die rauigkeitsrelevante Fluktuationstärke in einzelnen kritischen Bändern beschrieben werden. In vorangegangenen psychoakustischen Studien wurde unter Verwendung von synthetischen Signalen mit einer unterschiedlichen Anstiegs- und Abfallflanke des Modulators festgestellt, dass die Rauigkeit auch von den Symmetrieeigenschaften der modulierenden Wellenform abhängt [2, 3]. Bei Verbrennungsmotoren ist die Wellenform der Einhüllenden des Geräuschs ebenfalls selten sinusförmig sondern zeigt, aufgrund der Entstehung durch Verbrennungsvorgänge, von Geräusch zu Geräusch verschiedene Ausprägungen in Bezug auf ihre Asymmetrie.

Auf Basis dieser Daten wurde unter Einbeziehung der Einhüllendenspektren der einzelnen kritischen Bänder ein neuer Algorithmus zur Rauigkeitsberechnung entwickelt [4]. Die mit diesem Algorithmus berechneten Rauigkeiten von Fahrzeuggeräuschen zeigten für viele Geräuscharten eine hohe Übereinstimmung mit Subjektivurteilen, für bestimmte Geräuscharten, in erster Linie im Betriebszustand "Konstantfahrt bei 60 km/h", wurden jedoch zu hohe Werte berechnet (Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Rauigkeitsberechnungen (X-Achse) und kategoriale Subjektivurteile (Y-Achse) für Fahrzeuggeräusche in drei verschiedenen Betriebszuständen: Leerlauf außerhalb des Fahrzeugs (Bz1, blaue Kreise), innerhalb des Fahrzeugs (Bz2, rote Quadrate) und Konstantfahrt bei 60 km/h (Bz3, grüne Rauten). Der Korrelationskoeffizient zwischen allen Berechnungen und Bewertungen beträgt 0,10 und 0,86 wenn nur die Betriebszustände "Leerlauf außen" und "Leerlauf innen" (blau und rot) betrachtet werden. Die Berechnungen wurden mit dem in [4] beschriebenen Algorithmus durchgeführt.

#### Berücksichtigung stochastischer Modulationseigenschaften

Eine nähere Betrachtung der Geräuscheigenschaften von Geräuschen aus diesem Betriebszustand ergab, dass sich bei Betrachtung eines kurzen ( $\approx 0,2$  s) Zeitfensters deutlich ausgeprägte Modulationen bei festen Frequenzen in den einzelnen Analysekanälen zeigten. Diese Frequenzen änderten sich allerdings in aufeinanderfolgenden Analysefenstern stochastisch, wohingegen bei Motorgeräuschen mit klar ausgeprägter Rauigkeit diese i.A. durch die Motorordnung bestimmt wurde. Diese stochastischen Modulationen werden bei diesem Betriebszustand vermutlich durch Wind- und Fahrbahngeräusche hervorgerufen.

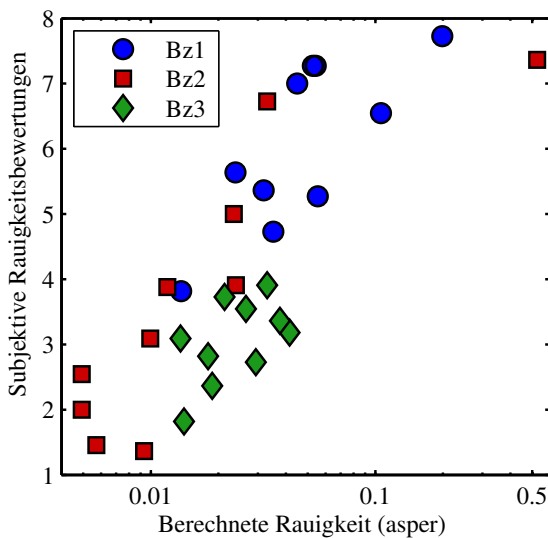
Um die Regularität als für die Rauigkeitsempfindung scheinbar wichtiges Merkmal in den Berechnungen zu berücksichtigen wurde die Shannon-Entropie

$$H = - \sum_i p_i \cdot \log_2(p_i) \quad (1)$$

[5] als Maß für die Zufälligkeit einer Verteilung gewählt. Basierend auf der Shannon-Entropie  $H$  für die detektierten Modulationsfrequenzen in einem bestimmten Zeitbereich ( $\approx 1$  s) wird ausgehend von der ungewichteten Rauigkeit zum Zeitpunkt  $\tau$ ,  $\mathcal{R}(\tau)$  die korrigierte Rauigkeit

$$\mathcal{R}_{corr}(\tau) = \frac{\mathcal{R}(\tau)}{(b + H(\tau))^a} = \frac{\mathcal{R}(\tau)}{(b + \sum_i p_i \cdot \log_2(p_i))^a} \quad (2)$$

berechnet. Bei stationären Betriebszuständen führt dies zu einer im Vergleich zur Rauigkeitsberechnung ohne Berücksichtigung der stochastischen Modulationen [4] zu einer deutlich höheren Korrelation mit Subjektivurteilen (Abbildung 2).

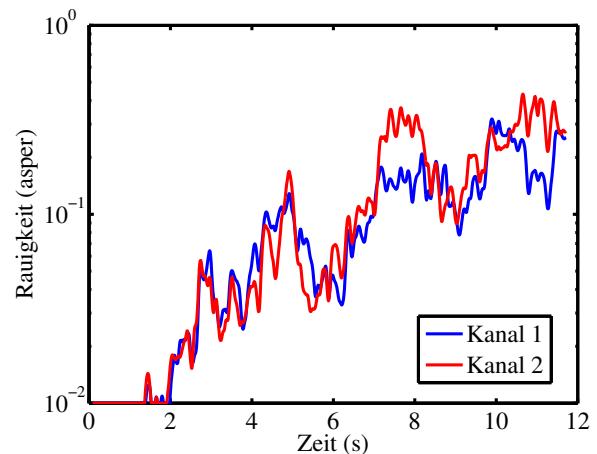


**Abbildung 2:** Rauigkeitsberechnungen (X-Achse) und kategoriale Subjektivurteile (Y-Achse) für Fahrzeuggeräusche, die Darstellung entspricht der in Abbildung 1. Die Berechnungen wurden mit dem in [6] beschriebenen Algorithmus mit Berücksichtigung stochastischer Modulationseigenschaften durchgeführt, der Korrelationskoeffizient beträgt 0,79.

### Einbeziehung zeitlich veränderlicher Geräusche

Bei instationären Betriebszuständen ändert sich die Modulationsfrequenz in Abhängigkeit von der Drehzahl. Diese Änderungen würden mit dem Gewichtungsfaktor aus Gleichung 2 zu deutlich reduzierten Rauigkeitswerten in der Berechnung führen. Im Gegensatz zu stochastisch angeregten Modulationen vollziehen sich diese Änderungen kontinuierlich über die Zeit. Aus diesem Grund wurden die detektierten Modulationsfrequenzen in Relation zu der Momentanen Drehzahl gesetzt. Die im vorangehenden Abschnitt beschriebene statistische Betrachtung der Modulationsfrequenzen wird nunmehr für "Modulationsmotorordnungen" durchgeführt. Diese "Modulationsmotorordnungen" werden, falls vorhanden, mit Hilfe des parallel zum Audiosignal aufgezeichneten Drehzahlverlaufs oder durch Schätzung der momentanen Drehzahl aus dem Cepstrum des Audiosignals gebildet. In Abbildung 3 ist exemplarisch der Verlauf der Rauigkeitsberechnung über der Zeit für ein sportliches Fahrzeug in Vollastbeschleunigung im 3. Gang dargestellt.

Die tendenzielle Zunahme des Rauigkeitseindrucks und zeitliche lokale Minima und Maxima decken sich hier gut mit der subjektiven Empfindung mehrerer Experten.



**Abbildung 3:** Zeitlicher Rauigkeitsverlauf bei einer Vollastbeschleunigung in einem sportlich positionierten 8-Zylinder PKW. Die Berechnungen wurden mit dem in [6] beschriebenen Algorithmus mit Berücksichtigung der Motordrehzahl durchgeführt.

### Zusammenfassung

Durch die Einbeziehung rauigkeitsrelevanter Geräuscheigenschaften, die in bisherigen Verfahren nicht explizit berücksichtigt wurden, ist es gelungen, die Rauigkeitsberechnung für viele, teilweise sehr unterschiedliche Signaltypen zu verbessern. Hier zeigten mit etablierten Verfahren berechnete Rauigkeiten teilweise sehr große Unterschiede zu Subjektivurteilen.

### Literatur

- [1] Fastl, H. und Zwicker, E.: Psychoacoustics - Facts and Models. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- [2] Yasui, N. und Miura, M.: Perception of Roughness on sounds amplitudemodulated with triangular wave. Forum Acusticum 2011
- [3] Weber, R., Oetjen, A. und Oetjen, H.: Shape of the envelope and roughness perception. Fortschritte der Akustik - DAGA 2012
- [4] Oetjen, A., Weber, R. and Verhey, J.: Rauigkeitsberechnung unter Berücksichtigung der Einhüllendenform. Fortschritte der Akustik - DAGA 2012
- [5] Shannon, C. E. (1948), A mathematical theory of communication, Bell System Technical Journal 27, 379-423 and 623-656.
- [6] Oetjen, A., Letens, U., van de Par, S., Verhey, J.L. und Weber, R.: Roughness calculation for randomly modulated sounds. AIA-DAGA 2013, Merano