

## Rauigkeitsberechnung unter Berücksichtigung der Einhüllendenform

Arne Oejen<sup>1</sup>, Reinhard Weber<sup>2</sup>, Jesko Verhey<sup>3</sup>

<sup>1</sup> C.v.O. Universität Oldenburg - Arbeitsgruppe Akustik, 26129 Oldenburg, Deutschland, Email: arne.oetjen@uni-oldenburg.de

<sup>2</sup> C.v.O. Universität Oldenburg - Arbeitsgruppe Akustik, 26129 Oldenburg, Deutschland, Email: reinhard.weber@uni-oldenburg.de

<sup>3</sup> O.v.G. Universität Magdeburg - Experimentelle Audiologie, 39120 Magdeburg, Deutschland, Email: jesko.verhey@med.ovgu.de

### Einleitung

Die Rauigkeit stellt eine wichtige Empfindungsgröße bei der Charakterisierung von Umweltgeräuschen wie z.B. Motorengeräuschen dar. Als Basis für bisherige Berechnungsalgorithmen dienen Subjektivbewertungen für die Rauigkeit von amplitudenmodulierten Sinustönen. Im Falle von nicht sinusförmig modulierten Signalen korrelieren die berechneten Rauigkeiten nur schwach mit Subjektivbewertungen für diese Geräusche.

Basierend auf der Idee einer gehörgerechten Vorverarbeitung [1] und subjektiven Bewertungen von z.B. dreiecksförmig modulierten Sinustönen [2] wird versucht, einen neuen Berechnungsansatz für die Rauigkeit zu finden. Dieser Ansatz sollte die Modulationswellenform explizit berücksichtigen. Da bei Umweltgeräuschen zwar periodische aber selten sinusförmige Modulationen zu beobachten sind wird gehofft, dass ein solcher Ansatz bei der Berechnung der Rauigkeit von Umweltgeräuschen eine höhere Übereinstimmung mit Subjektivurteilen erzielt als bisherige Verfahren.

Das Flussdiagramm des neuen Berechnungsansatzes ist in Abbildung 1 dargestellt, die einzelnen Berechnungsschritte sind mit den Buchstaben **a** bis **r** gekennzeichnet.

### Rauigkeitsberechnung

Nach der blockweisen Verarbeitung (**a**) erscheint es sinnvoll, eine dem Gehör nachempfundene Vorverarbeitung durchzuführen (siehe [1]). Diese beinhaltet eine Gammatonfilterbank (**b**), Halbwellengleichrichtung (**c**), Tiefpassfilterung (**d**), Einhüllendenbildung über die Venelope (**e**, siehe [3]) und Kompression (**f**). Diese Vorverarbeitung liefert für jeden auditorischen Kanal die Einhüllende des jeweiligen Frequenzbereichs, somit beziehen sich alle folgenden Betrachtungen auf den Modulationsbereich.

Für amplitudenmodulierte Sinustöne wurde festgestellt, dass die Rauigkeit sowohl von der Mitten- als auch von der Modulationsfrequenz abhängig ist [4]. Die Mittenfrequenzabhängigkeit wird durch kanalabhängige Wichtungsfaktoren  $g_i$  realisiert (**g**). Die Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz weist eine Bandpasscharakteristik auf, die z.B. für eine Mittenfrequenz von 1 kHz ein Maximum bei 70 Hz aufweist (1 asper).

Es wird davon ausgegangen, dass diese Abhängigkeit von der Periodizität der Modulation auch für andere Modulationswellenformen besteht. Bei nicht sinusförmigen Modulationen wird diese Periodizität durch die Grundfrequenz im Modulationsspektrum gegeben. Diese Grundfrequenz wird mit Hilfe eines kanalabhängigen

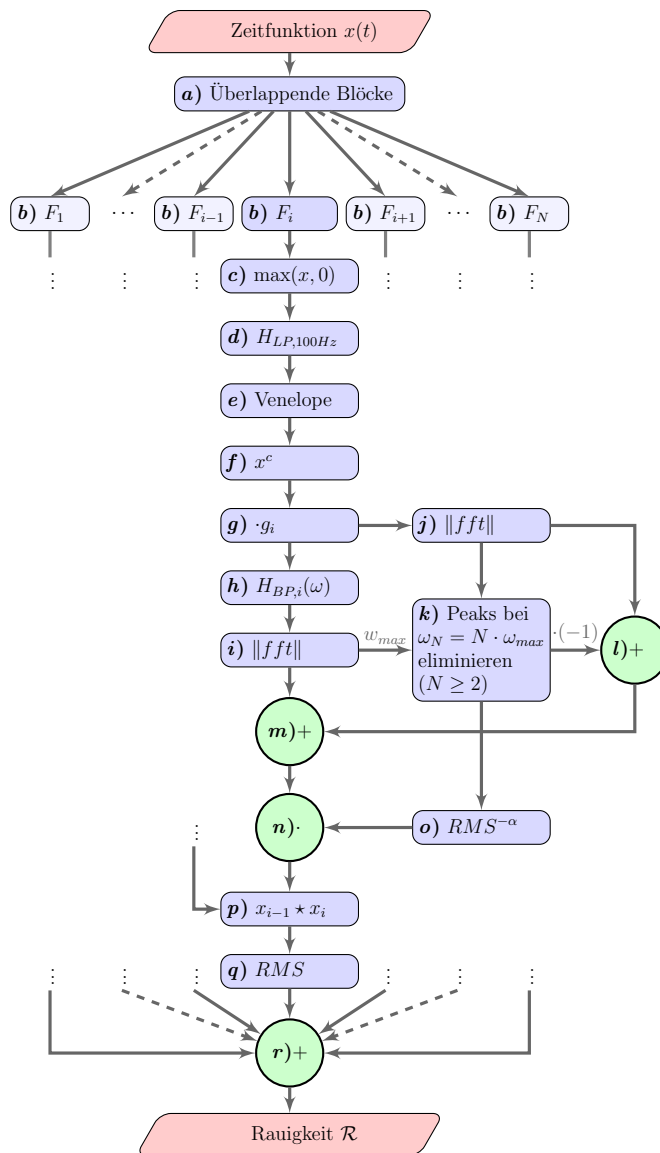
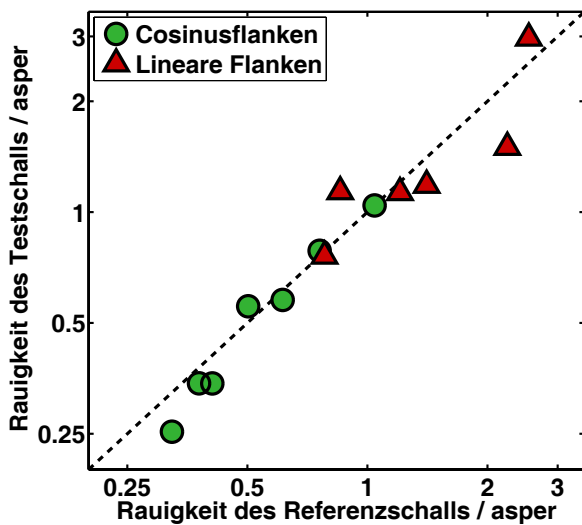


Abbildung 1: Flussdiagramm für den Ansatz zur Rauigkeitsberechnung

Bandpassfilters als Maximum nach der Filterung extrahiert (**h**).

Aufgrund von Subjektivurteilen für verschiedene Einhüllendenwellenformen (z.B. aus [2]) wird vermutet, dass die eventuell vorhandenen Harmonischen dieser Grundfrequenz die Ausprägung der Rauigkeit stark beeinflussen. Im Berechnungsansatz wird daher im ungefilterten Modulationsspektrum (**j**) nach Vielfachen der prägnantesten Frequenz des gefilterten Modulationsspektrums (**i**) gesucht (**k**). Diese Vielfachen werden auf

das bandpassgefilterte Spektrum addiert ( $l$  und  $m$ ).



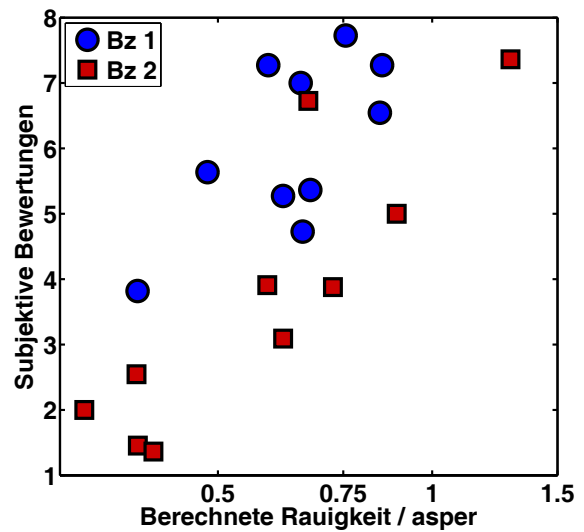
**Abbildung 2:** Berechnete Rauigkeiten jeweils für 13 Geräuschpaare mit subjektiv gleicher Rauigkeit (X- und Y-Achse). Für Testschalle mit Einhüllendenformen, die sich sowohl in ihrer Grundform (cosinusförmige und lineare Flanken, grün und rot) als auch in ihren Symmetrieeigenschaften unterschieden, wurde ein Referenzschall durch Variation der Modulationstiefe auf gleiche subjektive Rauigkeit eingestellt [5].

Die Summe der Amplituden der Grundfrequenz und der Harmonischen stellt schon ein Maß für die Rauigkeit dar, sie gibt die Rauigkeit von z.B. sinusförmig modulierten Tönen bereits wieder. Bei den Berechnungen für synthetische Geräuschpaare mit subjektiv gleicher Rauigkeit in Abbildung 2 spielen die nachfolgenden Betrachtungen kaum eine Rolle. Für komplexere Geräusche ist es jedoch notwendig, weitere Verarbeitungsschritte anzuschließen. Es wird davon ausgegangen, dass für die Rauigkeit eines Geräuschs relevante Modulationen durch andere Modulationen maskiert werden können. Als sehr einfaches Modell wird der Effektivwert aller nicht rauigkeitsrelevanten Modulationskomponenten gebildet und mit einem Wichtungsexponenten  $\alpha$  versehen ( $o$ ). Die rauigkeitsrelevanten Anteile werden mit diesem Faktor gewichtet ( $n$ ). Je mehr nicht rauigkeitsrelevante Komponenten auftreten, desto kleiner wird dieses Gewicht.

Breitbandige amplitudenmodulierte Geräusche erzeugen eine höhere subjektive Rauigkeit als schmalbandige Signale (siehe [4]). Dies wird durch die Berechnung der Kreuzkorrelation mit dem Signal aus dem jeweiligen Nachbarkanal nachgebildet ( $p$ ), so dass eine höhere Rauigkeit berechnet wird wenn breitbandige Signale spektral kohärent moduliert werden. Aus diesen Berechnungen wird pro Kanal der Effektivwert gebildet ( $q$ ), diese Teilrauigkeiten werden dann zur Gesamtrauigkeit  $\mathcal{R}$  aufsummiert ( $r$ ).

Die wenigen freien Modellparameter wurden durch iterative Berechnung von synthetischen Geräuschen mit variierenden Einhüllendenformen (Abbildung 2) und Fahrzeuggeräuschen in verschiedenen Betriebszuständen (Abbildung 3) ermittelt. Sowohl bei den synthetischen

Geräuschen als auch bei den Fahrzeuggeräuschen lässt sich im Vergleich mit bisherigen Berechnungsverfahren eine deutlich erhöhte Korrelation mit den Subjektivurteilen feststellen.



**Abbildung 3:** Mit dem neuen Ansatz berechnete (X-Achse) und subjektiv bewertete Rauigkeit (Y-Achse) für stationäre Fahrzeuggeräusche in zwei verschiedenen Betriebszuständen (rot und blau). Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,75.

## Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der psychoakustisch gemessenen Beeinflussung der Rauigkeit durch die Einhüllendenwellenform wurde ein neuer Berechnungsansatz entwickelt. Da die Rauigkeit von Umweltgeräuschen wie z.B. Fahrzeuggeräuschen folglich ebenfalls abhängig von der jeweiligen Modulationswellenform ist bietet der neue Berechnungsansatz unter Berücksichtigung bisher bekannter Paradigmen eine verbesserte Korrelation mit Subjektivurteilen. Für bestimmte Arten von Umweltgeräuschen wird jedoch eine zu hohe Rauigkeit berechnet. Diese Geräusche werden in folgenden Studien gesondert betrachtet um den eventuell noch vorhandenen systematischen Fehler zu lokalisieren.

## Literatur

- [1] Sottek, R.: Gehörgerechte Rauigkeitsberechnung. Fortschritte der Akustik - DAGA 1994
- [2] Yasui, N. und Miura, M.: Perception of Roughness on sounds amplitudemodulated with triangular wave. Forum Acusticum 2011
- [3] Ewert, S., Verhey, J. und Dau, T.: Spectro-temporal processing in the envelope-frequency domain. J. Acoust. Soc. Am. 112 2002
- [4] Fastl, H. und Zwicker, E.: Psychoacoustics - Facts and Models. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- [5] Weber, R., Oetjen, A. und Oetjen, H.: Shape of the envelope and roughness perception. Fortschritte der Akustik - DAGA 2012