

Verbesserte Tonhaltigkeitsberechnung für instationäre Geräusche

Arne Oetjen¹, Steven van de Par¹, Reinhard Weber¹ und Uwe Letens²

¹ 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

² Daimler AG, 71059 Sindelfingen, Email: uwe.letens@daimler.com

Einleitung

Eine Vielzahl von Umweltgeräuschen wie z.B. Fahrzeuggeräusche weisen sowohl stationäre als auch instationäre tonale Geräuschkomponenten auf. Zeitliche Änderungen der Tonkomponenten können hier sowohl in der Tonhöhe als auch in der Lautstärke auftreten. Bei hoher Änderungsgeschwindigkeit und Ausprägtheit dieser Schwankungen lässt sich mit der spektralen Analyse durch Fouriertransformation eines Zeitfensters, wie z.B. in DIN 45681 [1] vorgesehen, der subjektive Eindruck der Tonhaltigkeit nur unzureichend modellieren, die Tonhaltigkeit dieser Komponenten wird i.d.R. unterschätzt.

Tonhaltigkeitsberechnungen

Modifizierter DIN 45681 Algorithmus

In einer vorangehenden Studie wurde aufbauend auf die DIN 45681 [1] zusätzlich eine Korrekturfunktion für maskierte Geräuschanteile eingeführt [2]. Diese Korrektur verhindert, dass nicht wahrnehmbare Geräuschanteile in der Tonhaltigkeitsberechnung berücksichtigt werden. Diese modifizierte Berechnungsmethode wurde im Vergleich mit Subjektivurteilen für ein Geräuschensemble aus Fahrzeuginnengeräuschen validiert [3].

Die verwendeten Geräusche waren entweder stationär oder zeigten nur sehr langsame Änderungen in der Tonhöhe und der Tonamplitude. Bei weiteren Untersuchungen ergaben sich für Stimuli mit sich schnell verändernden Tonparametern jedoch starke Diskrepanzen zwischen den Berechnungen und der subjektiven Empfindung. Für einen 300 Hz Ton, der mit einer Modulationsfrequenz von 1 Hz und einem Frequenzhub von 150 Hz frequenzmoduliert wurde, wurde beispielsweise kein Tonüberschuss berechnet, obwohl das Geräusch einen Tonüberschuss von 10 dB aufwies.

Die Ursache für dieses Phänomen könnten die in der DIN 45681 indirekt vorgegeben Analysefensterlängen sein. Da der Linienabstand Δf zweier benachbarter Frequenzen im Spektrum zwischen 1,9 Hz und 4,0 Hz liegen soll [1] ergeben sich Fensterlängen zwischen 0,25 s und 0,53 s bei Anwendung einer DFT bzw. FFT Methode zur Berechnung des Spektrums.

Vorverarbeitung des Signals mit DFT¹-Methode

Bei stark instationären Geräuschen könnte die Verwendung deutlich kürzerer Analysefenster die Detektion tonaler Komponenten ermöglichen. Dies hätte allerdings ei-

ne nicht mehr zulässige Vergrößerung der Linienbreite zur Folge.

Aus diesem Grund wird bei dem hier vorgestellten Berechnungsalgorithmus bei der Berechnung der Spektren eine Methode angewendet, die auch bei sehr kurzen ($\approx 0,1$ s) Fenstern eine ausreichend kleine spektrale Linienbreite ermöglicht [4].

Bei zeitkontinuierlichen Signalen berechnet sich eine (Ton-)Frequenz

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \frac{FT^{i+1}(f_p)}{FT^i(f_p)} \quad (1)$$

aus dem Quotienten der Fouriertransformierten der i -ten Ableitung FT^i und der $i+1$ -ten Ableitung FT^{i+1} des Ursprungssignals an der Stelle dieser Frequenz. Für den zeitkontinuierlichen Fall stellt diese Relation also noch keinen Informationsgewinn dar, wenn jedoch im zeitdiskreten Fall das lokale Maximum im Spektrum m_p durch die Rasterung nicht zwangsläufig mit der realen Tonfrequenz f_p übereinstimmt kann mit

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \frac{DFT^1(m_p)}{DFT^0(m_p)} \quad (2)$$

die Tonfrequenz f_p aus der DFT des Signals, DFT^0 , und der DFT der 1. Ableitung des Signals, DFT^1 , berechnet werden [4]. Es kann hergeleitet werden, dass sich die Tonfrequenz bei zeitdiskreten Signalen, wobei die zeitliche Ableitung mit dem Differenzenquotienten bestimmt wird, als

$$f_p = \frac{F_s}{\pi} \arcsin \left(\frac{1}{2F_s} \frac{|DFT^1(m_p)|}{|DFT^0(m_p)|} \right) \quad (3)$$

berechnen lässt [5]. Auf Basis dieser, aufgrund begrenzter numerischer Auflösung, geschätzten, realen Tonfrequenz kann ebenfalls die Amplitude a_p dieser Tonkomponente als

$$a_p = 2 \frac{DFT^0(m_p)}{W(|f_p - m_p F_s/N|)} \quad (4)$$

, mit $W(f)$ als Fouriertransformierte des Analysefensters, in Näherung bestimmt werden. Aus diesen nun präzisierten Angaben für die Frequenzen und Amplituden der tonalen Komponenten und dem ursprünglich berechneten Kurzzeitspektrum kann nun durch lineare Interpolation ein Linienspektrum mit deutlich kleinerem, für die Berechnung der Tonhaltigkeit nach DIN 45681 ausreichendem, Linienabstand gebildet werden. In der Implementation dieser Berechnungsmethode werden Fenster von ca. 0,1 s Länge verwendet, die interpolierten Spektren haben

einem Linienabstand von 2 Hz. In dieser Implementati-on wird die Tonhaltigkeit von synthetischen Signalen wie dem eingangs erwähnten Beispiel als solche detektiert, der Tonüberschuss liegt etwa bei dem theoretischen Wert für den jeweiligen Signal-Rauschabstand.

In Abbildung 1 sind die detektierten tonalen Komponenten exemplarisch für ein Fahrzeuginnengeräusch dargestellt. In diesem Beispiel sind die einzelnen, sowohl stationären als auch instationären, Tonkomponenten gut erkennbar, es ist aber zusätzlich ein recht hoher Rauschgrund vorhanden.

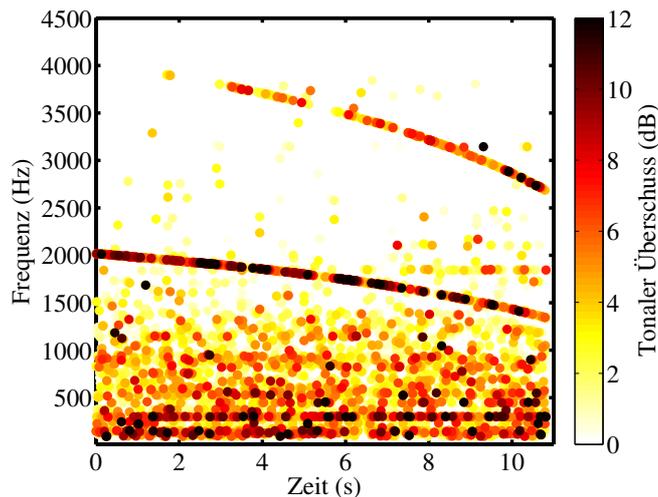


Abbildung 1: Detektierte tonale Komponenten für das Innengeräusch eines Fahrzeugs im Schubetrieb. Das Fahrzeug verfügt über ein stufenloses (CVT) Getriebe.

Tracking tonaler Komponenten

Es scheint somit notwendig, in einer der Tonhaltigkeitsberechnung nachfolgenden Analyse die Tonkomponenten vom Rauschgrund zu trennen. Ausgehend von der Annahme, dass zu Tönen gehörige detektierte Komponenten im Zeit-Frequenzbereich über einen gewissen Zeitraum einen stetigen Verlauf zeigen, kann durch Anwendung eines z.B. in [5] beschriebenen Tracking-Verfahrens eine Trennung der Tonkomponenten vom Rauschgrund erfolgen.

Durch eine geeignete Wahl der Parameter in diesem Verfahren können die tonalen Komponenten gut isoliert werden. Da das menschliche Gehör sehr schnellen Änderungen der Tonamplitude nicht folgen kann werden die aufeinanderfolgenden Einzelkomponenten eines detektierten Tracks bei einer Grenzfrequenz von 2 Hz tiefpassgefiltert (Abbildung 2).

Zusammenfassung und Ausblicke

Durch die neu entwickelten Vor- und Nachbearbeitungsschritte ist es möglich geworden, Tonhaltigkeiten in wesentlich feineren zeitlichen Abtastschritten mit deutlich kürzeren Analysefenstern zu berechnen. Dies ermöglicht nun auch für Geräusche mit sich stark über der Zeit

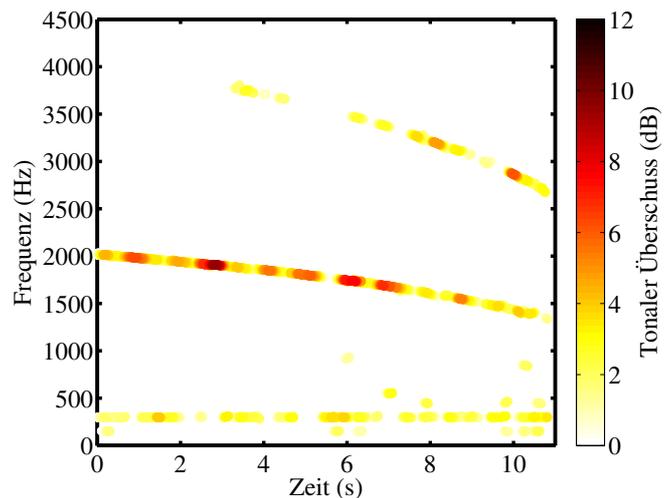


Abbildung 2: Wie Abbildung 1, mit Reduzierung des Rauschhintergrunds durch Tracking tonaler Komponenten und Tiefpassfilterung der in diesen Tracks aufeinanderfolgenden tonalen Komponenten.

verändernden Tonparametern eine Tonhaltigkeitsberechnung, die teilweise sehr deutliche Verbesserungen im Vergleich mit Subjektivurteilen liefert. Dies gilt sowohl für synthetische Testschalle als auch für Umweltgeräusche, wobei in dieser Studie der Fokus auf Fahrzeugeräuschen liegt.

Bei sich sehr schnell verändernden Tonfrequenzen ($> 10 \text{ kHz/s}$), wie sie z.B. im Anlaufgeräusch von Turboladern vorhanden sein können, funktioniert die Detektion von Tönen zwar besser als mit dem Ansatz aus der DIN 45681 jedoch noch nicht völlig zufriedenstellend. Ziel künftiger Forschung wird es sein, auch für diese Geräusche eine dem Subjektivempfinden ähnelnde Detektion von Tonkomponenten zu erreichen.

Literatur

- [1] DIN 45681 (2005), Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V..
- [2] Hansen, H. (2005), Geräuschqualität von Fahrzeuginnengeräuschen – Der Einfluss tonhaltiger Geräuschanteile, Masterthesis, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.
- [3] Hansen, H., Weber, R. und Letens, U. (2005), Quantifying tonal phenomena in interior car sounds, Forum Acusticum 2005.
- [4] Desainte-Catherine, M. und Marchand, S. (2000), High-Precision Fourier Analysis of Sounds Using Signal Derivatives, J. Audio Eng.Soc. 48, 654-667.
- [5] Lagrange, M., Marchand, S. und Rault, J.B. (2007), Enhancing the Tracking of Partial for the Sinusoidal Modeling of Polyphonic Sounds, IEEE TRANSACTIONS ON AUDIO, SPEECH, AND LANGUAGE PROCESSING, 1558-7916.