

Rauigkeitswahrnehmung wird durch spektrale Prominenz beeinflusst

Michael Schaffert¹, Arne Oetjen², Steven van de Par³

¹ Carl von Ossietzky Universität, 26129 Oldenburg, Deutschland, Email: michael.schaffert@uni-oldenburg.de

² Carl von Ossietzky Universität, 26129 Oldenburg, Deutschland, Email: arne.oetjen@uni-oldenburg.de

³ Carl von Ossietzky Universität, 26129 Oldenburg, Deutschland, Email: steven.van.de.par@uni-oldenburg.de

Einleitung

Die Ausprägtheit der Rauigkeit von Produktgeräuschen hat einen starken Einfluss auf die Geräuschqualität. Rauigkeit als psychoakustische Größe wurde bisher vorwiegend anhand von synthetischen Signalen untersucht, die über das komplette vorhandene Frequenzband moduliert waren. Vorherige Versuchsergebnisse haben jedoch gezeigt, dass die anhand dieser Erkenntnisse vorhergesagten Rauigkeiten von den tatsächlich wahrgenommenen bei bestimmten Signalen abweichen. Diese Art von Signalen ist nur in einem bestimmten Frequenzband moduliert, dessen Leistungsdichte im Vergleich zum restlichen Spektrum angehoben ist. Dieses Phänomen wurde als „spektrale Prominenz“ bezeichnet. Zur Untersuchung wurde rosa Rauschen nur in bestimmten Frequenzbereichen moduliert, deren spektrale Leistungsdichte variiert wurde. Diese Stimuli wurden von Probanden mit einem breitbandig modulierten rosa Rauschen mit variierender Modulationstiefe mit Hilfe einer adaptiven Versuchszurückführung verglichen und auf gleiche Rauigkeit eingestellt [1]. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigten den abweichenden Zusammenhang zwischen wahrgenommener Rauigkeit und Pegel des modulierten Signales. In der vorgestellten Studie wurde ein anderes Testverfahren verwendet, sowie deutlich erweiterte Parametervariationen untersucht, um einen systematischen Einblick in die Funktionsweise der hinterliegenden Mechanismen zu erlangen. Sämtliche Stimuli wurden mit dem definierten 1-asper Referenzgeräusch verglichen, um eine direkte Einteilung in asper vornehmen zu können. In diesem Vortrag werden die neuen Ergebnisse mit dem vorherigen Experiment, sowie den theoretischen Definitionen, verglichen.

Rauigkeit

Rauigkeit beschreibt eine Modulationsgröße, deren Ausprägung von Trägersignal, Modulationsfrequenz und Modulationstiefe abhängig ist. Die psychoakustische Größe wird Asper genannt, wobei 1 Asper durch einen 1kHz Sinuston mit 60dB SPL, welcher zu 100% mit 70Hz moduliert wurde, definiert wird [2]. Die Ausprägtheit dieser psychoakustischen Größe wird durch Modulationstiefe und Pegel beeinflusst. Nach Fastl&Zwicker hat eine Pegeländerung um 40dB eines Breitbandigen Signales einen Einfluss von etwa Faktor 3 auf die Rauigkeit [2]. Dies entspricht einem Faktor von 1,4 bei einer Pegeländerung von 12dB.

Spektrale Prominenz

Spektrale Prominenz beschreibt das Phänomen, dass Modulationsgrößen, welche nur in einem bestimmten Teil des Spektrums eines Signales auftreten, stärker von Pegeländerungen dieses Spektranteils beeinflusst werden, als angenommen [1]. In Abb. 1 wird der Aufbau eines Stimulus der Spektralen Prominenz grafisch dargestellt. Im weiteren Verlauf werden modulierte Signalteile rot und unmodulierte grün dargestellt.

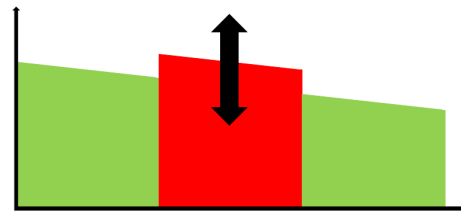


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Frequenz (x-Achse) gegen Pegel (y-Achse) der verwendeten Stimuli. Spektrale Prominenz beschreibt die Pegelanhebung eines bestimmten, in diesem Fall zusätzlich amplitudenmodulierten, Teils des Leistungsdichtespektrums eines Signales.

Experiment

Experiment-Ablauf

In einer Einleitung wurden den Probanden insgesamt 20 ausgewählte Stimuli in randomisierter Reihenfolge vorgespielt. Die Darbietung begann und endete mit dem 1 Asper Definitionston, bei den 18 verbleibenden Stimuli handelte es sich um eine Auswahl der theoretisch rauesten und am wenigsten rauen Stimuli jeder Stimulusart. Bei dem Hauptexperiment handelte es sich um ein Größenschätzungsexperiment, bei dem die Probanden jeden Stimulus prozentual mit dem 1Asper Definitionston verglichen. 200% würde dementsprechend bedeuten, dass der zu bewertende Stimulus doppelt so rau wahrgenommen wurde, wie der Vergleichsstimulus. Die Versuchspersonen konnten das Maximum ihrer Skala selbst setzen. Dieses Experiment wurde zwei Mal durchgeführt, um die Antwortkonsistenz der Probanden zu überprüfen.

Aufbau der Stimuli

Insgesamt wurden 6 unterschiedliche Arten von Stimuli untersucht. Der genaue Aufbau kann den Abbildungen 2, 3, 4, 5, 6 und 7 entnommen werden. Alle modulierten Signalteile der Stimuli (mit Ausnahme des rosa Rauschens, welches über das gesamte Frequenzband moduliert wurde) wurden mit 70Hz bei einer Modulationstiefe von -3dB

moduliert. Das rosa Rauschen wurde mit einer Modulationstiefe von -9dB moduliert, da Pilottests zeigten, dass die Rauigkeit dieses Signales einen zu großen Kontrast zu den restlichen Stimuli darstellte. Hinzu kommt ein Vergleichsstimulus, bei dem es sich um den 1 Asper Definitionston handelt (1kHz Sinuston bei 60dB SPL zu 100% mit 70Hz moduliert).

Die Stimuli der Spektralen Prominenz „Peak“ (Abb. 2) wurden mit zwei unterschiedlichen Mittenfrequenzen gemessen um festzustellen, ob eine Verschiebung des modulierten Frequenzbandes eine Änderung der Rauigkeit bewirkt. Die Stimuli, welche ein Schmalbandrauschen darstellen (Abb. 4) können direkt mit den Stimuli der Spektralen Prominenz „Peak“ verglichen werden, um festzustellen, ob die unmodulierten Rauschanteile einen Einfluss auf die empfundene Rauigkeit haben. Eine Maskierung mit unmoduliertem Rauschen sollte zu einer Verringerung der Rauigkeit führen. Die Butterworth gefilterten Schmalbandstimuli (Abb. 6) wurden generiert, da bei sehr steilen Filterflanken ein „Edge Pitch“ wahrnehmbar sein könnte.

Bei den Stimuli der Spektralen Prominenz „Notch“ (Abb. 3) sind die Frequenzen, welche den größten Einfluss auf Rauigkeit haben, nicht moduliert. Dementsprechend könnte eine geringe, empfundene Rauigkeit erwartet werden, obwohl ein größerer Teil des Frequenzbandes moduliert wurde. Stimuli des Bandstopprauschens (Abb. 5) können wiederum direkt mit den Spektrale Prominenz „Notch“ Stimuli verglichen werden, um den Einfluss von unmodulierten Rauschanteilen auf die Rauigkeit zu messen.

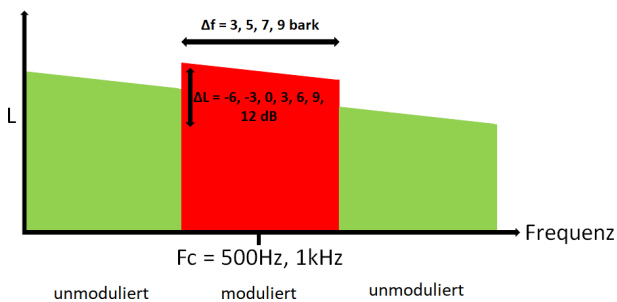


Abbildung 2: Spektrale Prominenz „Peak“. Spektrum innerhalb der definierten Bandbreite wurde amplitudenmoduliert und angehoben.

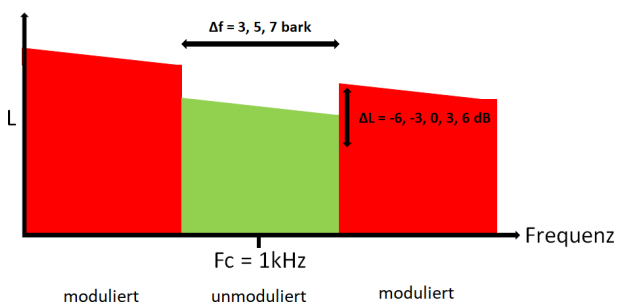


Abbildung 3: Spektrale Prominenz „Notch“. Spektrum außerhalb der definierten Bandbreite wurde amplitudenmoduliert und angehoben.

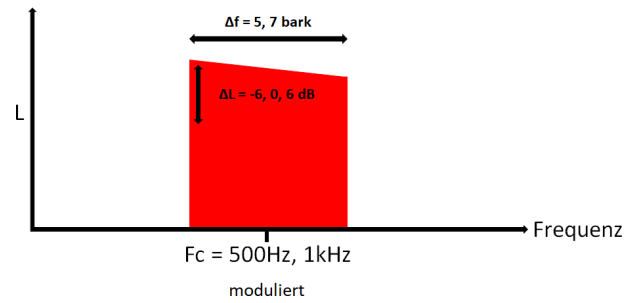


Abbildung 4: Schmalbandrauschen durch FFT-Filter generiert.

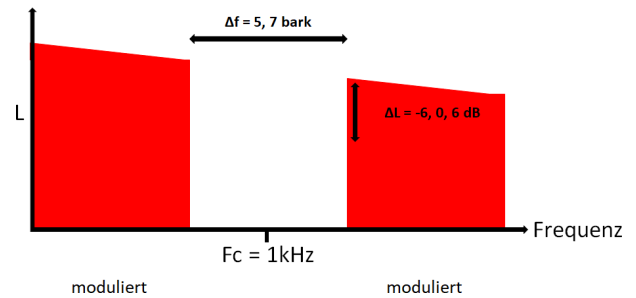


Abbildung 5: Bandstopprauschen durch FFT-Filter generiert.

Ergebnisse

Bewertungskonsistenz

Insgesamt nahmen 21 Versuchspersonen im Alter von 19 bis 31 (Durchschnitt 24) Jahren ohne bekannte Hörbeeinträchtigungen an den Versuchen teil. Hörbeeinträchtigungen waren keiner der Versuchspersonen bekannt. Die Versuchspersonen bewerteten die Stimuli zwischen 0% und 100%, der Mittelwert der Bewertungsabweichungen betrug für die meisten Versuchspersonen zwischen den beiden Versuchen weniger als 50 Prozentpunkte. Eine Anova zeigte, dass sich die Ergebnisse von nur einer Versuchsperson signifikant zwischen den beiden Versuchen unterschieden. Dementsprechend wurden keine Versuchsergebnisse aus der Analyse entfernt.

Ergebnisse: Spektrale Prominenz

In Abb. 8 sind die über die Versuchspersonen gemittelten Bewertungen für die Kondition „Peak“ dargestellt. Hier keine signifikanten Unterschiede zwischen den bei-

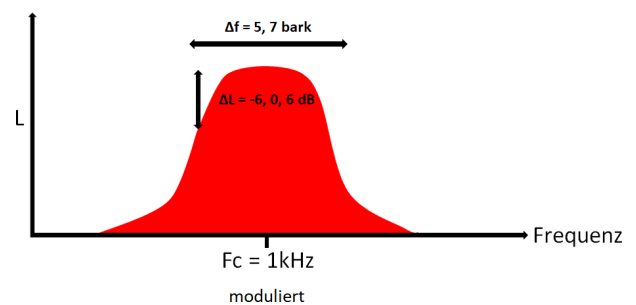


Abbildung 6: Schmalbandrauschen durch Butterworth-Filter 4. Ordnung generiert.

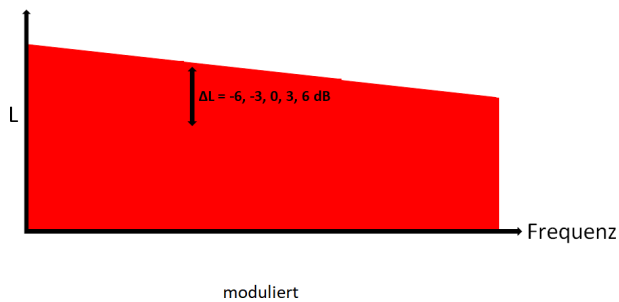


Abbildung 7: Über ads ganze Frequenzband moduliertes rosa Rauschen.

den Mittenfrequenzen zu erkennen. Dies kann unter anderem daran liegen, dass sich beide Frequenzbänder weiterhin im Bereich des maximalen Einflusses auf Rauigkeit befinden. Bei einer Mittenfrequenz von 500Hz verändert sich die Rauigkeit über eine Pegeländerung von 12dB mit einem Faktor von 1,2 bis 1,6. Im Falle von einer Mittenfrequenz von 1kHz verändert sich die Rauigkeit mit einem Faktor von 1 bis 1,7. Im Vergleich mit dem in der Literatur beschriebenen Faktor von 1,4 kann hier nicht von einem signifikanten unterschied gesprochen werden. [2]

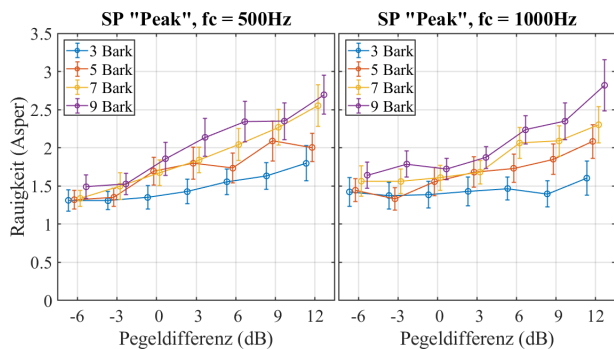


Abbildung 8: Vergleich der Versuchsergebnisse beider Mittenfrequenzen von Stimulustyp spektrale Prominenz „Peak“ (Abb. 2)

In Abb. 9 werden die Ergebnisse von Schmalbandrauschen (Abb. 4) und spektraler Prominenz „Peak“ miteinander verglichen. Es ist ein deutlicher Unterschied von 0,5 bis 0,8 Asper in der Rauigkeit zu erkennen. Ein unmodulierter Maskierer sollte theoretisch die Rauigkeit des gesamten Signales verringern, jedoch ist hier der gegenteilige Effekt zu erkennen. Es könnte sein, dass die steilen Filterflanken des FFT-Filters einen Edge Pitch erzeugen, welcher das psychoakustische Phänomen der Rauigkeit maskiert.

In Abb. 10 wird der Vergleich zwischen einem mit einem Butterworth-Filter 4. Ordnung erzeugtem Schmalbandrauschen und den Stimuli der spektralen Prominenz „Peak“ dargestellt. Es existiert weiterhin eine Diskrepanz der Rauigkeit bei dem die Stimuli des Schmalbandrauschens um 0 bis 0,3 Asper unter denen der spektralen Prominenz „Peak“ liegen. Die Butterworth-gefilterten Signale verändern sich mit einem Faktor von 1,4 bis 1,7 bei einer Pegeländerung von 12dB. Auch diese Ergebnisse unterscheiden sich nicht signifikant von den Werten aus der Literatur.

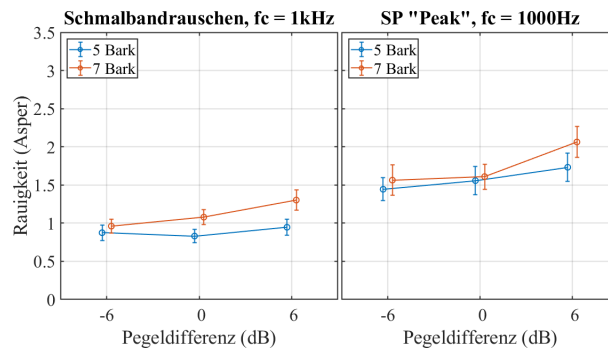


Abbildung 9: Vergleich der Versuchsergebnisse von Schmalbandrauschen und spektraler Prominenz „Peak“

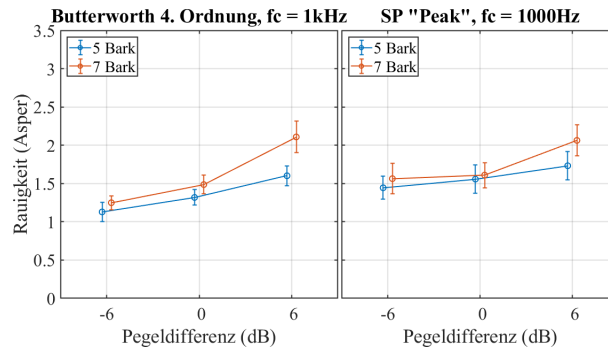


Abbildung 10: Vergleich der Versuchsergebnisse von mit einem Butterworth-Filter 4. Ordnung erzeugtem Schmalbandrauschen und spektraler Prominenz „Peak“

In Abb. 11 werden die Ergebnisse von spektraler Prominenz „Notch“ und spektraler Prominenz „Peak“ verglichen. Es ist direkt zu erkennen, dass „Notch“ wesentlich stärker durch Pegeländerungen beeinflusst wird. Die Frequenzen mit größtem Einfluss auf Rauigkeit werden bei dieser Stimulusart nicht moduliert, was darauf schließen lässt, dass die Bandbreite des modulierten Signalteils starken Einfluss auf die wahrgenommene Rauigkeit hat. Die Rauigkeit verändert sich mit einem Faktor von 1,7 bis 2 über eine Pegeländerung von 12dB. Diese Werte liegen deutlich über denen in der Literatur vermerkten und denen der Schmalbandigen Signale. Zudem ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Unterschiedlichen Bandbreiten dieses Stimulus zu erkennen, was darauf schließen lässt, dass der Einfluss der Bandbreite mit sehr hohen Bandbreiten stagniert.

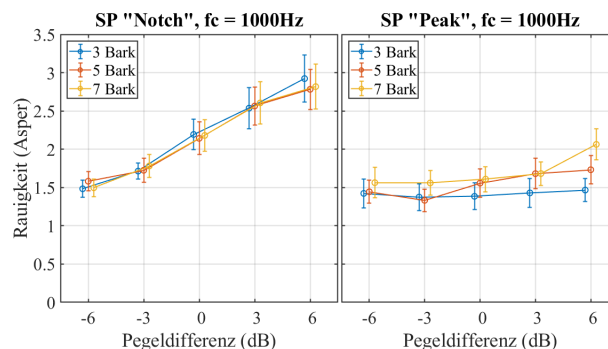


Abbildung 11: Vergleich der Versuchsergebnisse von spektraler Prominenz „Notch“ und spektraler Prominenz „Peak“

In Abb. 12 werden die Versuchsergebnisse der Stimuli spektrale Prominenz „Notch“ und Bandstopprauschen verglichen. Der Faktor mit denen sich das Bandstopprauschen über eine Pegeländerung von 12dB ändert liegt mit 2 bis 2,2 noch über denen der spektralen Prominenz „Notch“. In diesem Fall sind Ergebnisse Gegenteilig zu denen aus dem Vergleich zwischen Schmalbandrauschen und spektraler Prominenz „Peak“. Ein möglicher Grund hierfür könnte sein, dass das Verhältnis zwischen modulierten und unmodulierten Frequenzanteilen einen Einfluss auf die wahrgenommene Rauigkeit hat.

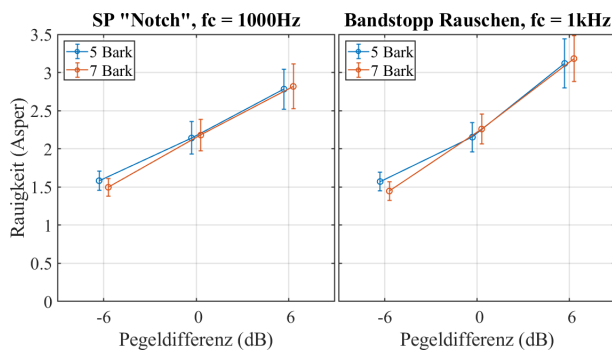


Abbildung 12: Vergleich der Versuchsergebnisse von spektraler Prominenz „Notch“ und Bandstopprauschen

Ergebnisse: Vergleich mit einem Rauigkeitsmodell

Um einen Einblick darauf zu erhalten, wie derzeitige Rauigkeitsmodelle die verwendeten Stimuli bewerten wurden die Messergebnisse mit denen eines Rauigkeitsmodelles verglichen [3]. In Abb. 13 werden die Messergebnisse von spektraler Prominenz „Notch“ und Schmalbandrauschen miteinander verglichen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Stimuli mit größerer Bandbreite als wesentlich rauer bewertet wurden. Diese Art der Bewertung von steigender Rauigkeit mit steigender Bandbreite zieht sich durch sämtliche Versuchsergebnisse und erscheint anhand der ermittelten Daten auch plausibel. In Abb. 14 ist jedoch ein Gegenteiliges Bild zu beobachten. Das Rauigkeitsmodell bewertet die Schmalbandstimuli als rauer. Evtl. kann dies daran liegen, dass das Rauigkeitsmodell die in der Literatur angegebenen Frequenzen zwischen 500Hz und 2000Hz als wichtigstes Maß für die Rauigkeitsberechnung wertet.

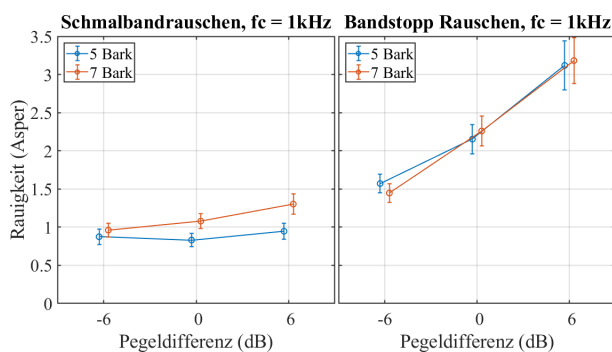


Abbildung 13: Vergleich der Versuchsergebnisse von spektraler Prominenz „Notch“ und Schmalbandrauschen

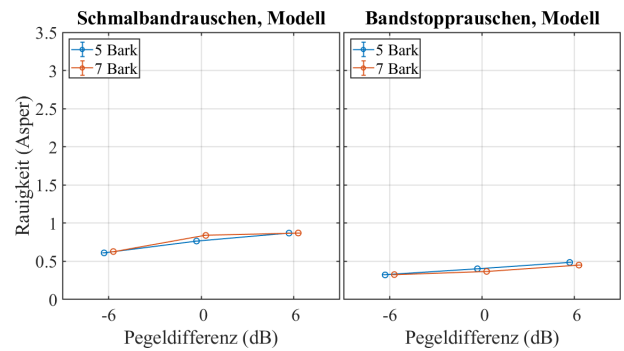


Abbildung 14: Vergleich der Bewertungen eines Rauigkeitsmodells [3] von spektraler Prominenz „Notch“ und Schmalbandrauschen

Fazit

Unmodulierte Signalteile beeinflussen die wahrgenommene Rauigkeit. Zudem kann den Daten entnommen werden, dass der Einfluss einer Pegeländerung auf die empfundene Rauigkeit maßgeblich durch das Pegelverhältnis (spektrale Prominenz) der modulierten Spektralanteile zu den unmodulierten beeinflusst wird. Der Faktor, mit dem die Rauigkeit steigt, liegt für breitbandige Signale zudem über den in der Literatur angegebenen Werten. Insgesamt ist zu erkennen, dass der Einfluss von Bandbreite und eventuellen anderen Maskierern auf die wahrgenommene Rauigkeit noch nicht gut erfasst wurde und weitere Experimente nötig sind, um diese zu verstehen. Weiterhin kann der Einfluss anderer Parameter, wie die Existenz von anderen psychoakustischen Phänomenen, nicht ausgeschlossen werden.

Rauigkeitsmodelle scheinen den Einfluss von Bandbreite und den Einfluss des Pegels auf Breitbandige Signale zu unterschätzen. Zudem scheinen sie den Einfluss der Frequenzen zwischen 500Hz und 2000Hz zu überschätzen. Generell kann festgestellt werden, dass für die Vorhersagen von Rauigkeitsmodellen, bei den in dieser Studie verwendeten Stimuli, nicht mit den Subjektivurteilen übereinstimmen. Da auch reale Signale wie z.B. Fahrzeuggeräusche ähnliche Eigenschaften wie die synthetischen Signale dieser Studie haben, wäre es empfehlenswert, die hier gezeigten Ergebnisse als Grundlage zu Verbesserungen bei bestehenden Modellen heranzuziehen.

Literatur

- [1] Arne Oetjen et al.: Spektrale Prominenz beeinflusst die Ausprägtheit psychoakustischer Empfindungsgrößen, DAGA Rostock 2019
- [2] Hugo Fastl, Eberhard Zwicker: Psychoacoustics Facts and Models. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1990, 1999, 2007
- [3] Arne Oetjen et al.: Rauigkeitsmodellierung bei unterschiedlichen Signalklassen, DAGA Nürnberg 2015