

Spektrale Prominenz beeinflusst die Ausgeprägtheit psychoakustischer Empfindungsgrößen

Arne Oetjen¹, Amrit Lamichhane¹, Monir A. Khan¹ und Steven van de Par¹

¹ Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Acoustics Group, 26129 Oldenburg, Email: arne.oetjen@uol.de

Kurzfassung

Die wahrgenommene Ausgeprägtheit vieler psychoakustischer Empfindungsgrößen wie z.B. Rauigkeit Impulshaftigkeit oder Schwankungsstärke hängt neben bestimmten Signalparametern auch vom Schalldruckpegel ab. Dies wurde in bisherigen Studien mit synthetischen Schallen untersucht und es wurden Modellvorstellungen zur Quantifizierung dieser Abhängigkeit entwickelt. Bei realen Geräuschen treten diese psychoakustischen Signalparameter jedoch oft nicht spektral isoliert auf, sondern sind oft in einem bestimmten Frequenzband ausgeprägt. Eine kleine Pegeländerung eines solchen Frequenzbands relativ zum benachbarten Band kann sehr großen Einfluss auf die Ausgeprägtheit einer Empfindungsgröße im Gesamtgeräusch haben. In diesem Fall wird die Ausgeprägtheit der Empfindungsgröße deutlich stärker vom Schalldruckpegel ab als es die Versuche mit synthetischen Geräuschen, bei denen der gesamte Frequenzbereich moduliert wurde, nahelegen. In einer Reihe von Hörversuchen wurden beispielsweise Modulationen nur auf ein bestimmtes Frequenzband in einem rosa Rauschen aufgeprägt. In einem nächsten Schritt wurde dann der Pegel des Frequenzbands leicht im Vergleich zum unmodulierten Geräuschanteil verändert. Diese Änderung der spektralen Prominenz des modulierten Bereichs bewirkte eine große Änderung der Empfindungsstärke der untersuchten Größen. Dieser Effekt lässt sich in vergleichbarer Form auch bei Fahrzeug- und anderen Umweltgeräuschen beobachten. Verschiedene Ansätze zur Interpretation der Hörversuchsdaten werden gezeigt und diskutiert.

Einleitung

Bei einem realen Beispiel für ein Fahrzeuggeräusch wurde beobachtet, dass eine Änderung des Pegels eines bestimmten Frequenzbands um ca. 10dB eine unerwartet hohe Änderung der Rauigkeit zur Folge hatte. In vorangehenden Studien wurde gezeigt, dass für breit- und schmalbandige modulierte Signale bei einer Pegeländerung um 40dB eine Verdreifachung der Rauigkeit zu beobachten ist [1].

Demzufolge wäre bei einer Erhöhung eines Schmalbandpegels um 10dB mit einer Erhöhung der Rauigkeit um den Faktor 1,3 zu rechnen, dies entspricht allerdings nicht dem Höreindruck, die Änderung wird deutlich stärker wahrgenommen. Zur Untersuchung dieses scheinbar nicht durch die übliche Vorstellung der Pegelabhängigkeit der Rauigkeit erklärbaren Phänomens wird dieses Beispiel aus der Praxis nun anhand eines abstrakten, synthetischen Geräuschs reproduziert. Ferner wird diese Untersuchung auf die Empfindungsgrößen „Schwankungsstärke“, „Im-

pulshaftigkeit“ und „Tonhaltigkeit“ erweitert.

Stimuli

Als Basis für die zu untersuchenden Geräusche dient ein rosa Rauschen bei einem Schalldruckpegel von 65dB. Für die Rauigkeit wird ein 3, 5 oder 7 bark breites Band um 1kHz herausgeschnitten, mit einer Modulationsfrequenz von 70Hz und einer Modulationstiefe von -3dB ($20 \cdot \log_{10}(m)$) moduliert. Anschließend wird der herausgeschnittene Frequenzbereich mit einer Pegeländerung von -6, -3, 0, 3 oder 6dB wieder zurück in das rosa Rauschen gesetzt. Dies ergibt insgesamt 15 Geräusche bei denen der modulierte Frequenzbereich im Spektrum jeweils in unterschiedlichen Kontrastsituationen zum Restgeräusch steht (spektrale Prominenz).

Die Geräusche für die Schwankungsstärke wurden auf die gleiche Weise erzeugt, lediglich die Modulationsfrequenz wurde zu 4Hz geändert. Für die Impulshaftigkeit wurde ebenfalls mit 4Hz moduliert, zusätzlich wurde der modulierte Bereich hier um 1,5kHz zentriert. Zusätzlich wurde nicht sinusförmig sondern mit einer Sägezahnwellenform („damped“) moduliert. Für die Tonhaltigkeit wurde auf den um 1kHz zentrierten Schmalbandteil ein 1kHz Ton mit einer Pegeldifferenz zum Rauschgrund von jeweils 24dB addiert.

Versuchsdurchführung

Die Ausgeprägtheit der jeweiligen Empfindungsgrößen wurde über Punkte subjektiver Gleichheit mit einem Referenzgeräusch bestimmt. Diese Punkte wurden in einem adaptiven Verfahren durch Variation eines Parameters im Vergleichsgeräusch ermittelt. Die Einzelmessungen wurden für alle Parameter ineinander verschachtelt dargeboten. Für die modulationsbasierten Größen war dieses Geräusch ein rosa Rauschen, das mit der gleichen Frequenz und Wellenform wie der schmalbandige Anteil in den korrespondierenden Testgeräuschen moduliert war. Im adaptiven Verfahren wurde hier der Modulationsgrad variiert wobei dieser zunächst um 4dB, nach der ersten Umkehrung um 2dB und bei einer weiteren Umkehrung um 1dB verändert wurde. Für die Tonhaltigkeit wurde als Referenzgeräusch ebenfalls ein rosa Rauschen gewählt, auf das ein 1kHz Ton addiert wurde. Im adaptiven Verfahren wurde hier der Tonpegel variiert.

Die TeilnehmerInnen der Hörversuche waren akustische Laien und Studierende an der C.v.O. Universität Oldenburg. Das Kollektiv umfasste zwei weibliche und 6 männliche Teilnehmende im Alter zwischen 20 und 26 Jahren (\bar{O} 24 Jahre) für Rauigkeit und Impulshaftigkeit und 8 männliche Teilnehmer im Alter zwischen 26 und

30 Jahren (\bar{O} 28 Jahre) für Schwankungsstärke und Tonhaltigkeit.

Ergebnisse und Diskussion

Rauigkeit: In Abbildung 1 sind die mittleren, für gleiche Rauigkeit eingestellten Modulationsgrade des breitbandig modulierten Rauschens für die 15 Testgeräusche dargestellt. Es zeigt sich zum einen, dass die Rauigkeit bei größerer Bandbreite des modulierten Bereichs zunimmt und zum anderen, dass die Rauigkeit mit der Pegeldifferenz dieses Bereichs zunimmt. Die Tendenz dieser Effekte wurde aufgrund bisheriger Erkenntnisse erwartet.

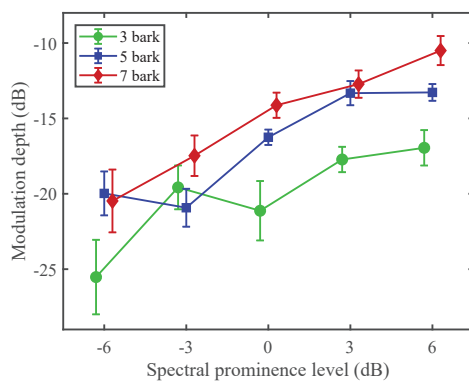


Abbildung 1: Modulationsgrad des Referenzgeräusches (y-Achse) bei gleicher Rauigkeit wie Testgeräusche mit verschiedenen ausgeprägter spektraler Prominenz (x-Achse) und verschiedenen Breiten des modulierten Bands (Farben). Die Datenpunkte wurden zur besseren Sichtbarkeit auf der x-Achse leicht zueinander versetzt dargestellt. Es werden Mittelwerte und Standardfehler gezeigt.

Aus den Daten ergibt sich ein Widerspruch, für den Vergleich der eingestellten Modulationsgrade für die -6dB und +6dB Kondition bei 7bark Bandbreite würde sich nach [1] ausgehend von einer Pegeländerung um 12dB eine Änderung der Rauigkeit um einen Faktor von ca. 1,4 ergeben. Ebenfalls nach [1] würde sich aber für die auf gleiche Rauigkeit eingestellten Referenzgeräusche über die Änderung des Modulationsgrads eine Veränderung der Rauigkeit um einen Faktor von ca. 4,5 ergeben. Ausgehend davon, dass die Abhängigkeit der Rauigkeit vom Modulationsgrad für breitbandige Trägersignale bereits im Experiment gemessen wurde, die Pegeländerung von in ein Gesamtgeräusch eingebetteten schmalbandigen jedoch bisher nicht betrachtet wurde, kann man vermuten, dass die durch Veränderung der spektralen Prominenz auftretende Rauigkeitsänderung nicht ausreichend durch die Pegelabhängigkeit der Rauigkeit erklärt werden kann. Ein weiterer Effekt scheint hier zu bewirken, dass für diesen Geräuschtyp mit vergleichsweise kleinen Pegeländerungen sehr große Änderungen der Rauigkeit erzielen lassen.

Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung könnte die bei sinkender spektraler Prominenz zunehmende Maskierung der Modulationen durch das unmodulierte Rauschen sein. Gegen diese Hypothese würde allerdings sprechen, dass für 7bark breite modulierte Bänder ein

etwas größerer Effekt als für die 3bark breiten Bänder gefunden wird. In Abbildung 2 sind die Modulationsdetektionsschwellen für die jeweiligen Konditionen aufgetragen. Die Messungen wurden von 5 ProbandInnen im Alter zwischen 22 und 36 Jahren durchgeführt. Da sich kein signifikanter Einfluss der spektralen Prominenz auf die Detektionsschwellen zeigt kann davon ausgegangen werden, dass die Maskierung von Modulationen bei dem vorangehend für die Rauigkeit beobachteten Effekt keine Rolle spielt.

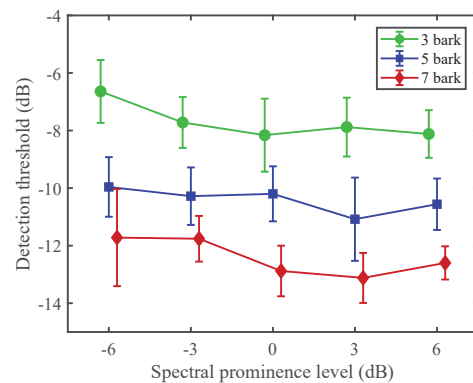


Abbildung 2: Mittelwerte und Standardfehler für die Detektionsschwellen für Modulation (y-Achse) bei unterschiedlich ausgeprägter spektraler Prominenz (x-Achse) und verschiedenen Breiten des modulierten Bands (Farben)

In Abbildung 3 sind die nach [2] und [3] berechneten Rauigkeiten für die Paare gleicher Rauigkeit aufgetragen. Es zeigt sich, dass die Berechnungen beider Methoden sehr stark von den Hörversuchsdaten in Abbildung 1 abweichen.

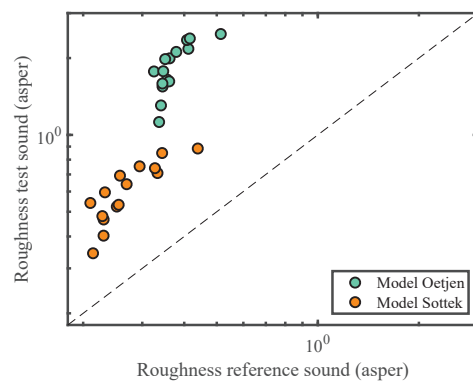


Abbildung 3: Berechnete Rauigkeiten für die in Abbildung 1 gezeigten Paare gleicher Rauigkeit (x- und y-Achse) aus zwei verschiedenen Berechnungsverfahren (Farben). Für eine der Wahrnehmung entsprechende Berechnung lägen die Datenpunkte auf der gestrichelten Linie gleicher Rauigkeit.

Eine Ursache für dieses Verhalten könnte sein, dass die Berechnungsverfahren lediglich die Pegelabhängigkeit der Rauigkeit berücksichtigen und nicht die spektrale Prominenz des Rauigkeit enthaltenden Bandes. Abbildung 4 zeigt die berechneten relativen Rauigkeiten mit den theoretischen, über den Modulationsgrad des Referenzgeräusches berechneten, relativen Rauigkeiten. Letz-

tere zeigen eine weitaus größere Änderung als die Berechnungsverfahren über die reine Pegelabhängigkeit vorher-sagen.

Zusätzlich fällt auf, dass beide Algorithmen für Breitbandrauschen eine deutlich höhere Abhängigkeit vom Modulationsgrad zeigen, als in der Literatur aus Hörversuchen abgeleitet wurde. Durch eine Regression der Datenpunkte wurde gefunden, dass bei den Algorithmen die Berechnete Rauigkeit proportional zu $m^{2,9}$ (Modell Oetjen) bzw. $m^{2,0}$ (Sottek) verläuft, während in der Literatur ein Zusammenhang mit $m^{1,3}$ abgeleitet wurde [1].

Schwankungsstärke: Abbildung 5 zeigt analog zur

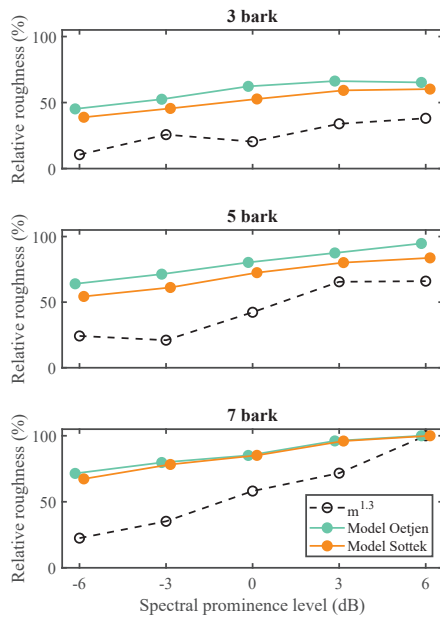


Abbildung 4: Mit zwei Berechnungsverfahren (Farben) ermittelte, relative Rauigkeit (y-Achse) für die Testgeräusche mit verschiedener spektraler Prominenz (x-Achse) und verschiedenen Bandbreiten (Teilabbildungen) und über den Modulationsgrad berechnete, relative Rauigkeit der korrespondierenden Referenzgeräusche (schwarz)

Rauigkeit die Modulationsgrade für gleiche Schwankungsstärke. Hier zeigen sich ähnliche Tendenzen wie in Abbildung 1, die Änderung des Modulationsgrads für verschieden ausgeprägte spektrale Prominenz fällt hier etwas geringer aus.

In Abbildung 6 sind die mit der Analysesoftware „ArtemiS SUITE 8.3“ der Head acoustics GmbH berechneten Schwankungsstärken für die Paare gleicher Schwankungsstärke aufgetragen. Es zeigt sich analog zur Rauigkeit, dass die Berechnungen sehr stark von den Hörversuchsdaten in Abbildung 5 abweichen, wenn auch weniger stark ausgeprägt.

In diesem Fall scheint die Ursache für die Abweichungen jedoch nicht die spektrale Prominenz zu sein, Abbildung 7 zeigt, dass die für die Testgeräusche berechneten, relativen Schwankungsstärken gut mit den über den Modulationsgrad der Referenzgeräusche ermittelten Werten übereinstimmen. Das Berechnungsverfahren zeigt, ähnlich wie bei der Rauigkeit, eine zu hohe Abhängigkeit

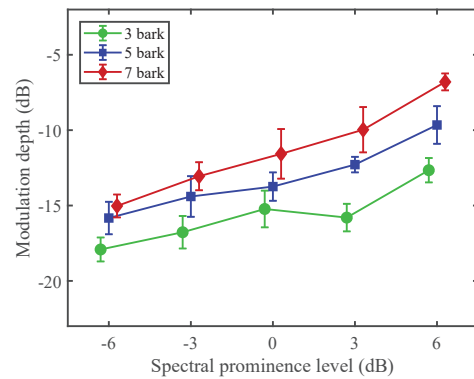


Abbildung 5: Modulationsgrad des Referenzgeräuschs (y-Achse) bei gleicher Schwankungsstärke wie verschiedene Testgeräusche. Die Darstellung entspricht der in Abbildung 1.

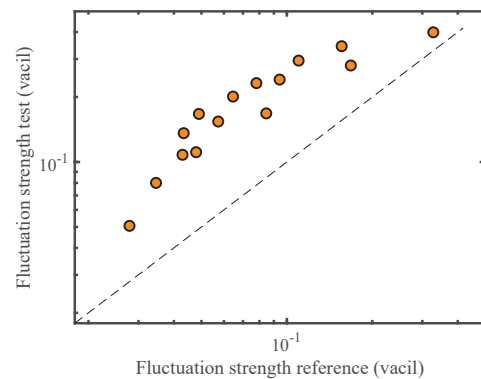


Abbildung 6: Berechnete Schwankungsstärken für die in Abbildung 5 gezeigten Paare gleicher Schwankungsstärke (x- und y-Achse). Für eine der Wahrnehmung entsprechende Berechnung lägen die Datenpunkte auf der gestrichelten Linie gleicher Schwankungsstärke.

vom Modulationsgrad. Hier ist die Schwankungsstärke proportional zu $m^{2,9}$ während die in der Literatur aus Hörversuchen abgeleitete Abhängigkeit mit $m^{1,0}$ angegeben wird [1].

Impulshaftigkeit: Abbildung 8 zeigt analog zur Rauigkeit die Modulationsgrade für gleiche Impulshaftigkeit. Auch hier zeigen sich ähnliche Tendenzen wie in Abbildung 1, die Änderung des Modulationsgrads für verschieden ausgeprägte spektrale Prominenz fällt hier ähnlich zuer Schwankungsstärke etwas geringer aus.

In Abbildung 9 sind die mit einem an der Universität Oldenburg entwickelten Verfahren und mit der Analysesoftware „ArtemiS SUITE 8.3“ der Head acoustics GmbH berechneten Impulshaftigkeiten für die Paare gleicher Impulshaftigkeit aufgetragen. Es zeigt sich analog zur Rauigkeit, dass die Berechnungen sehr stark von den Hörversuchsdaten in Abbildung 8 abweichen. In diesem Fall ist mangels Daten aus der Literatur eine weitere Analyse der Ursachen für diese Beobachtung nicht möglich.

Tonhaltigkeit: Abbildung 10 zeigt die Tonpegelüberschüsse für gleiche Tonhaltigkeit. Hier zeigt sich kein Einfluss der spektralen Prominenz oder der Bandbreite, was gut zu den Annahmen in der entsprechenden

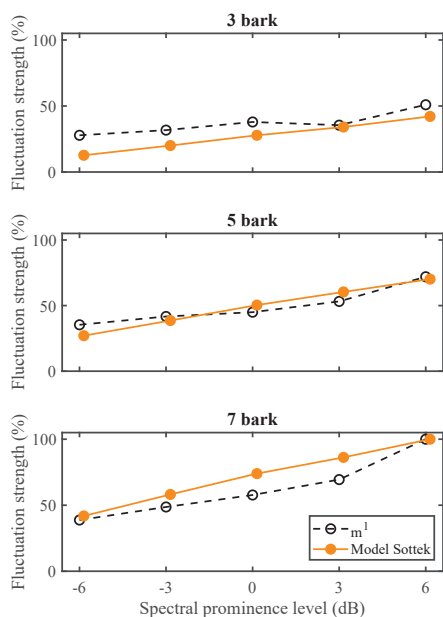


Abbildung 7: Mit einem Berechnungsverfahren (orange) ermittelte, relative Schwankungsstärke (y-Achse) für die Testgeräusche mit verschiedener spektraler Prominenz (x-Achse) und verschiedenen Bandbreiten (Teilabbildungen) und über den Modulationsgrad berechnete, relative Schwankungsstärke der korrespondierenden Referenzgeräusche (schwarz)

DIN Norm passt [4].

Zusammenfassung

Spektrale Prominenz verursacht starke Änderungen der Empfindung, diese fällt bei Rauigkeit und Schwankungsstärke stärker aus, als durch eine reine Pegeländerung erwartet würde. Bei der Tonhaltigkeit ist dieser Effekt nicht zu beobachten.

Dieses Phänomen wird durch vorhandene Berechnungsalgorithmen bei der Rauigkeit nicht abgebildet. Zudem fällt auf, dass alle Algorithmen eine viel zu starke Abhängigkeit vom Modulationsgrad bei breitbandig modulierten Signalen zeigen.

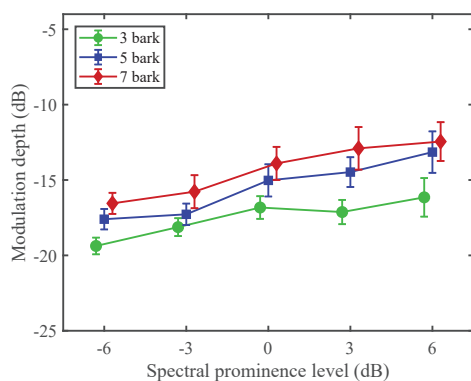


Abbildung 8: Modulationsgrad des Referenzgeräusches (y-Achse) bei gleicher Impulshaftigkeit wie verschiedene Testgeräusche. Die Darstellung entspricht der in Abbildung 1.

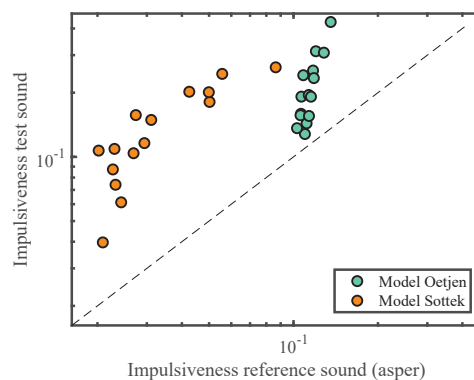


Abbildung 9: Berechnete Impulshaftigkeiten für die in Abbildung 5 gezeigten Paare gleicher Impulshaftigkeit (x- und y-Achse). Für eine der Wahrnehmung entsprechende Berechnung lägen die Datenpunkte auf der gestrichelten Linie gleicher Impulshaftigkeit.

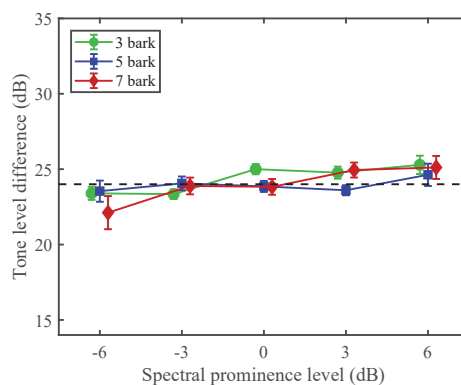


Abbildung 10: Differenz des Tonpegels zum Rauschgrund beim Referenzgeräusches (y-Achse) bei gleicher Tonhaltigkeit wie verschiedene Testgeräusche. Die Darstellung entspricht der in Abbildung 1.

Literatur

- [1] Fastl, H. und Zwicker, E.: Psychoacoustics - Facts and Models, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [2] Sottek, R. und Becker, J.: Modellierung der psychoakustischen Rauigkeit. Fortschritte der Akustik, DAGA 2019
- [3] Oetjen, A., van de Par, S., Weber, R. und Letens, U.: Roughness calculation utilizing envelope waveforms, Intnoise 2016, 1717-1721,
- [4] DIN 45681: Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2005)