Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung der R-Rauigkeit

Arne Oetjen[1] und Steven van de Par[1]

[1] *Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Acoustics Group, 26129 Oldenburg, Email: arne.oetjen@uni-oldenburg.de*

Einleitung

Die R-Rauigkeit beschreibt eine modulationsbasierte Empfindungsgröße, die an den rollend ausgesprochenen Buchstaben „R“ erinnert. Im Modulationsfrequenzbereich tritt diese Empfindung zwischen der Schwankungsstärke und der (schnellen) Rauigkeit bei Modulationsfrequenzen zwischen ca. 13 und 35 Hz auf. Die maximale Ausgeprägtheit wird bei ca 25 Hz wahrgenommen [1].

Für die Empfindungen Schwankungsstärke und (schnelle) Rauigkeit existieren bereits Berechnungsverfahren, für die R-Rauigkeit jedoch bisher nicht.

Modellstruktur

Bisherige grundlegende Modelle zur Modulationswahrnehmung basieren auf experimentellen Daten, die die Detektionsschwellen für sinusförmige Modulationen beschreiben. Es wurde gezeigt, dass die überschwellige Wahrnehmung von Amplitudenmodulationen mitunter stark durch die modulierende Wellenform beeinflusst wird [2]. Da Umweltgeräusche, wie z.B. die von Verbrennungsmotoren erzeugten Schalle, in der Regel nicht-sinusförmige Einhüllende aufweisen wurden in einer vorangehenden Studie maskierte und unmaskierte Detektionsschwellen für Zielmodulationen mit unterschiedlichen Wellenformen bestimmt [3].

Ausgehend von bisherigen Modulationswahrnehmungsmodellen, die für die Modulationsmaskierung sinusförmiger Einhöllenden entwickelt wurden [5], wurde ein modifiziertes Modell entwickelt, das durch eine Verstärkung von on- und offsets im Modulationsbereich die experimentellen Daten für verschiedene nicht-sinusförmige Einhüllende besser beschreiben kann [3]. Für die Verstärkung der Transienten wird ein Faktor aus der Ableitung der gefilterten Einhüllenden berechnet. Dieses Verfahren bildet die Grundlage für die Berechnung der R-Rauigkeit. Um die spezifischen Eigenschaften der R-Rauigkeit abzubilden wurden der Wertebereich der Modulationsfilter und die kanalabhängige Gewichtung in einem iterativen Verfahren auf einen Satz von R-Rauigkeitsbewertungen von Fahrzeuggeräuschen angepasst.

In Abbildung 1 wird das Berechnungsverfahren schematisch dargestellt. Die einzelnen Berechnungsschritte werden im Folgenden näher beschrieben:

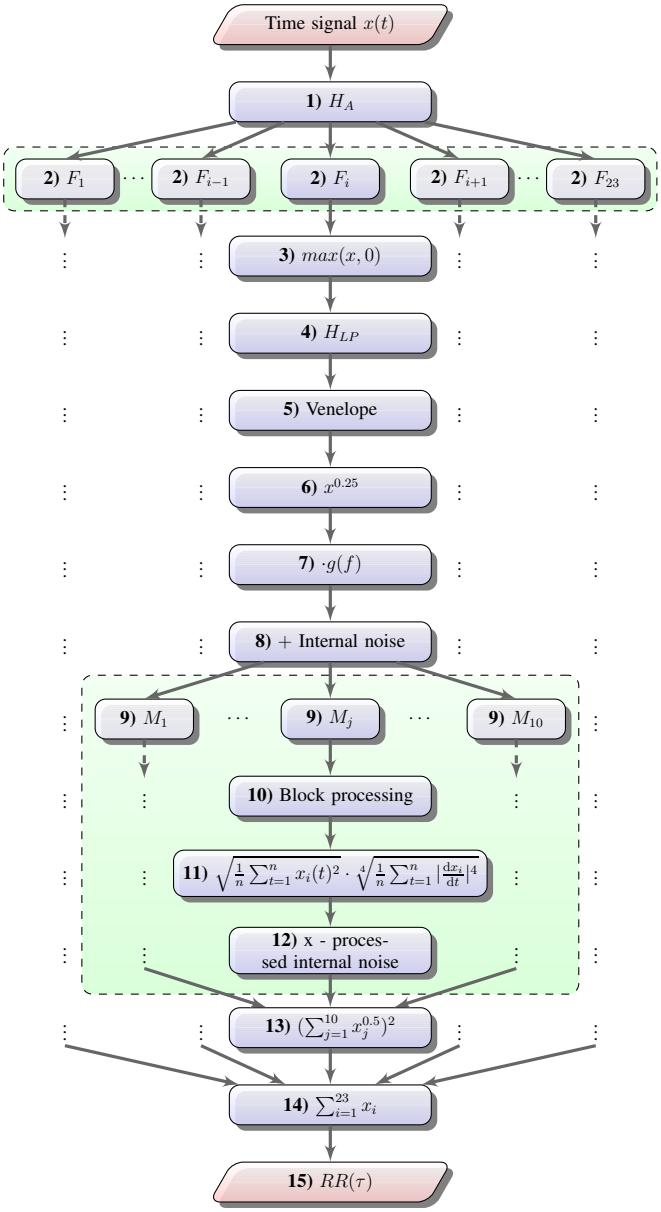

Abbildung 1: Blockschaltbild des Berechnungsverfahrens

1. A-Gewichtungsfilter: Ein Bandpassfilter nach IEC 61672:2003 wird auf das Zeitsignal angewandt um eine einfache Kompensation für frequenzabhängige Lautheitsunterschiede zu erreichen.

2. Gammatonfilterbank: Eine Bank aus 23, jeweils 1 Bark breiten Gammatonfiltern 4. Ordnung beschreibt die spektrale Trennung im Innenohr.

3. Halbwellengleichrichtung: Als einfaches Modell einer Haarzelle wird eine Halbwellengleichrichtung durchgeführt.

4. Tiefpassfilter: Ein Tiefpassfilter 2. Ordnung mit kanalabhängiger Abschneidefrequenz wird zur Extraktion der Einhüllenden implementiert. Die Abschneidefrequenz beträgt 160 Hz für Filterbankkanäle, deren Mittenfrequenz größer als 1 kHz ist und

$$f_{cutoff} = \left(\frac{f_{audio}}{1kHz}\right)^{0.6} \cdot 160Hz \qquad (1)$$

für kleinere Mittenfrequenzen.

5. Venelope: Basierend auf der Hilberteinhüllenden wird durch die Bildung der Einhüllenden über die Venelope

nach [4] die Grundrequenz der modulierenden Wellenform ggf. verstärkt.

6. Nicht-lineare Kompression: Die Einhüllende wird mit einem Exponenten von 0,25 komprimiert.

7. Mittenfrequenzabhängiger Gewichtungsfaktor: Um den Einfluss der Audiofrequenz auf die R-Rauigkeit abzubilden wurde ein kanalabhängiger Gewichtungsfaktor eingeführt. Dieser Faktor ist 1 für Audiofrequenzen zwischen 375 Hz und 8 kHz und fällt für größere und kleinere Frequenzen mit 6 dB/Oktave ab.

8. Internes Rauschen: Bei 1kHz mit einem Tiefpassfilter 1.Ordnung gefiltertes, weißes Rauschen wird zum Signal addiert.

9. Modulationsfilterbank: Das Einhüllendensignal wird mit einer Modulationsfilterbank bestehend aus 10 Filtern mit Mittenfrequenzen zwischen 25.8 und 31 Hz gefiltert. In Anlehnung an [5] haben die Filter 2.Ordnung eine Bandbreite von 1 Oktave.

10. Blockverarbeitung: Die weiterführenden Schritte werden in zeitlichen Blöcken von 16384 Samples ausgeführt, der Überlapp zwischen den Blöcken beträgt 7/8 der Blocklänge, die Samplerate beträgt 44,1 kHz.

11. Effektivwert und on- und offsetverstärkung: Der Effektivwert der Blöcke wird mit einem auf on- und offsets sensitiven Verstärkungsfaktor multipliziert. Dieser wird aus der 4. Norm des Betrags der Ableitung des Signals berechnet. Für Einhüllende mit steilen Flanken bewirkt dieser Faktor, dass Einhüllendenschwankungen stärker gewichtet werden als beispielsweise für sinunsförmige Einhüllende.

12. Subtraktion des internen Rauschens: Das in Schritt 8 addierte interne Rauschen wird gesondert über die Verarbeitungsstufen 9 bis 11 bearbeitet und der berechnete Wert dann vom Gesamtwert subtrahiert.

13. Summation über die Modulationsfilter: Die Ausgänge der einzelnen Modulationsfilter werden kompressiv addiert.

14. Summation über spektrale Bänder: Die spezifischen R-Rauigkeiten werden über die Kanäle der Gammatonfilterbank summiert. Hieraus ergibt sich bereits der Zeitverlauf der R-Rauigkeit.

15. Zeitverlauf der R-Rauigkeit: Aus dem Zeitverlauf der R-Rauigkeit kann zur Berechnung eines Einzahlwerts das 90% Perzentil gebildet werden.

Modellvorhersagen

Die Eckfrequenzen der mittenfrequenzabhängigen Gewichtungsfaktoren (Berechnungsschritt 7) und der Wertebereich der Modulationsfilterbank (Berechnungsschritt 9) wurden in einem iterativen Verfahren an Subjektivurteile zur R-Rauigkeit von Fahrzeuggeräuschen angepasst. Dieses Trainingsset umfasste mit einem modifizierten BTL-Berechnungsverfahren skalierte Paarvergleichsurteile eines Sets aus 12 Fahrzeuggeräuschen bei niedrigen Drehzahlen (40 Proband:innen) sowie eines Sets aus im Einhüllendenbereich manipulierten Fahrzeuggeräuschen (35 Proband:innen). Diese Manipulationen wurden ähnlich der in [7] beschriebenen Methode vorgenommen.

Die Daten aus dem Set mit den realen Fahrzeuggeräuschen sind in Abbildung 2 dargestellt. Der Korrelationskoeffizient zwischen den skalierten Subjektivurteilen und den Modellvorhersagen beträgt 0,89. Analog dazu sind die Trainingsdaten der manipulierten Fahrzeuggeräusche in Abbildung 4 dargestellt, hier beträgt der Korrelationskoeffizient 0,79.

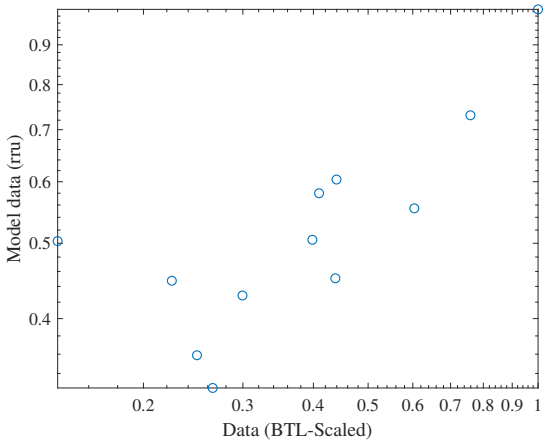

Abbildung 2: BTL-skalierte Subjektivurteile (x-Achse) und Modellvorgersagen (y-Achse) für den Traingsdatensatz aus 12 Fahrzeuggeräuschen in niedertourigen Betriebszuständen

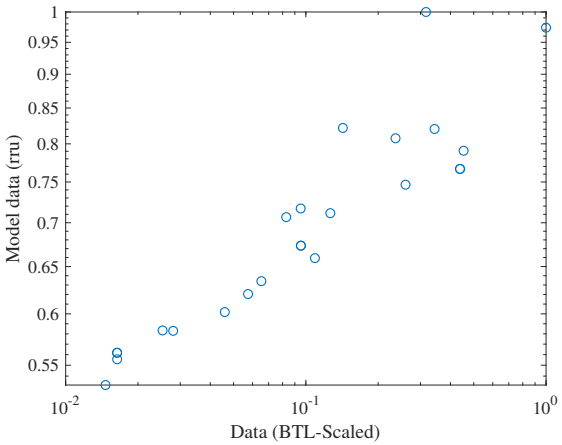

Abbildung 3: BTL-skalierte Subjektivurteile (x-Achse) und Modellvorgersagen (y-Achse) für den Traingsdatensatz aus manipulierten Fahrzeuggeräuschen

Für die Validierung des Verfahrens wurde ein weiteres Set aus 12 Fahrzeuggeräuschen von 60 Proband:innen im Paarvergleich bewertet. Der Korrelationskoeffizient zwischen diesen skalierten Daten und den Modellvorhersagen beträgt 0,84 (siehe Abbildung 4).

Diskussion

Auf Basis eines Wahrnehmongsmodells für nichtsinusförmige Einhüllende wurde ein Berechnungsverfahren für die R-Rauigkeit entwickelt. Sowohl die Hörversuchsdaten aus dem Trainigsset als auch die Daten aus dem Validierungsdatensatz zeigen eine hohe Korrelation mit den

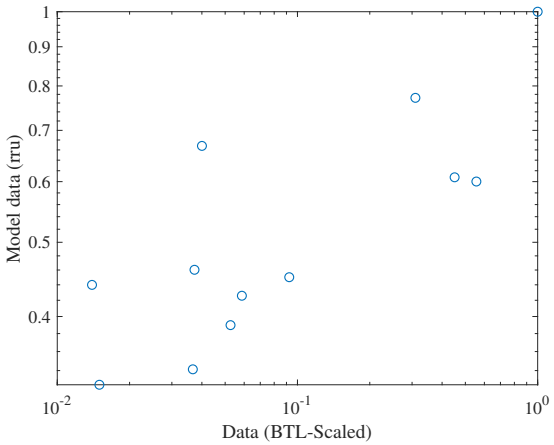

Abbildung 4: BTL-skalierte Subjektivurteile (x-Achse) und Modellvorgersagen (y-Achse) für den Validierungsdatensatz aus 12 Fahrzeuggeräuschen in niedertourigen Betriebszuständen

Modellvorhersagen. Dies zeigt, dass ein auf Messungen von Detektionsschwellen beruhendes Modell auch für die Vorhersage überschwelliger Phänomene geeignet sein kann.

Danksagung

Die vorgestellte Studie war Teil des Projekts „Empfindungsgrößen niedertoutiges Fahren“ der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV).

Literatur

[1] Springer, N. und Weber, R. (1995). Bewertung von amplitudenmodulierten Schallen im R-Rauhigkeitsbereich. Fortschritte der Akustik, DAGA 1995, 839-842

[2] Yasui, N. und Miura, M. (2011). Perception of roughness on sounds amplitude-modulated with triangular wave, Forum Acusticum, in Aalborg.

[3] Oetjen, A., Schiller, J. und van de Par, S. (2019). Modulation masking patterns for complex-shaped envelopes, ICA 2019, Aachen.

[4] Verhey, J.L., Ewert, S.D. und Dau, T. (2003). Modulation masking produced by complex tone modula-tors. J. Acoust. Soc. Am. 114, 2135-2146.

[5] Ewert, S. D. und Dau, T. (2000). Characterizing frequency selectivity for envelope fluctuations, J. Acoust. Soc. Am. 108, 1181-1196.

[6] Wickelmaier, F. und Schmid, C. (2004). A Matlab function to estimate choice model parameters from paired-comparison data. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers 36, 29-40

[7] Oetjen, H., Oetjen, A., van de Par, S. und Weber, R. (2015). Gezielte Veränderung der Impulshaftigkeit von Motorgeräuschen im Modulationsfrequenzbereich, DAGA, Nürnberg