

Gezielte Veränderung der Impulshaftigkeit von Motorgeräuschsignalen durch geeignete Manipulationen im Modulationsfrequenzbereich

Henning Oetjen, Arne Oetjen, Steven van de Par, Reinhard Weber

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, AG Akustik, Email: henning.oetjen@uni-oldenburg.de

Einleitung

Wird ein Ton mit einer geringen Frequenz von unter $f_{mod} = 10Hz$ amplitudenmoduliert nimmt der Mensch dies noch als Lautheitsänderung wahr. Dieser Effekt wird mit der psychoakustischen Größe Schwankungsstärke beschrieben. Für sehr starke und kurze Modulationen kann der Mensch der kurzen Lautheitsänderung nicht mehr folgen und der Ton wird als impulsartig wahrgenommen. Bei Impulsfolgen wird die maximale Impulshaftigkeit meist bei einer Modulationsfrequenz zwischen $5Hz \leq f_{mod} \leq 8Hz$ erreicht [1].

Impulshafte Alltagsgeräusche treten bei Hammerschlägen auf oder auch beim Rammen. Motorgeräusche, insbesondere Dieselmotorengeräusche zählen ebenfalls dazu.

Motivation

Die Geräuschphänomene von Dieselmotoren werden meist als nagelig bezeichnet. In der Literatur [3] wird diese Empfindung durch die Impulshaftigkeit beschrieben. Je nach Umdrehungszahl können solche Motoren auch eine ausgeprägte Rauigkeit erzeugen, deren Abhängigkeit von der Modulationswellenform und Modulationsgrad durch neuste Untersuchungen bestätigt wurde [2]. Die Vermutung liegt nahe, dass eine impulsartige Klangcharakteristik ebenfalls von diesen Größen beeinflusst wird. Nach Sottek [3] hängt die Empfindungsgröße Impulshaftigkeit von der Impulsbreite ab und erhöht sich mit zunehmender Flankensteilheit der Einhüllendenwellenform. Diese Erkenntnisse wurden mit Hilfe synthetischer Signale gewonnen. Offen bleibt, ob diese Impulsformenabhängigkeit auch für Umweltgeräusche, in diesem Fall Fahrzeuggeräusche besteht. Es sollte dann möglich sein die Impulshaftigkeit eines Fahrzeuggeräusches zu modifizieren, bei Erhaltung sämtlicher anderer Klangmerkmale. Für Zwecke des Geräuschdesigns wäre dies ein nützliches Werkzeug bei der Geräuschentwicklung von Motoren. Ebenfalls ungeklärt ist, ob und wie stark der Einfluss einzelner Trägerfrequenzbereiche auf die Impulshaftigkeit ist. Bei genauer Kenntnis der Abhängigkeit der Impulshaftigkeit von der Trägerfrequenz könnten in der Automobilindustrie Dämpfungsmaterialien gezielter eingesetzt werden, weil eine Dämpfung im gesamten Frequenzbereich nicht mehr nötig wäre. Ein genaueres Verständnis der Impulshaftigkeit von Motorgeräuschen ist deshalb notwendig.

Fragestellungen

Drei Fragestellungen sollen in dieser Untersuchung beantwortet werden:

- **1:** Ist durch eine Änderung der Einhüllendenform eine ausschließliche Änderung der Impulshaftigkeit von Motorgeräuschen möglich?
- **2:** Welche Trägerfrequenzbereiche sind maßgeblich für die Impulshaftigkeit verantwortlich?
- **3:** Wie hängt die Impulshaftigkeit vom Modulationsgrad ab?

Algorithmus zur Impulshaftigkeitsmodifikation

Um die Impulshaftigkeit von Fahrzeuggeräuschen zu modifizieren wird ein Algorithmus nach Abbildung 1 verwendet.

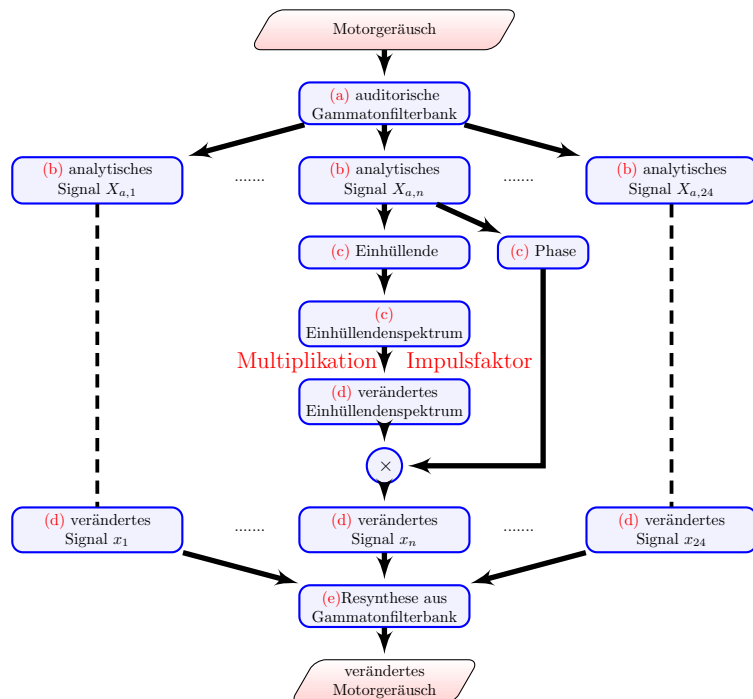


Abbildung 1: Blockschaltbild des Algorithmus zur Impulshaftigkeitsmodifikation

Auf das Motorgeräusch wird zunächst eine Gammatonfilterbank nach Hohmann [4] bestehend aus 24 Kanälen von je einem Bark Breite angewendet, um eine gehörgerechte Modifikation der Signale zu gewährleisten (a). Auf diese

Weise ist es möglich die spätere Modifikation der Impulshaftigkeit den jeweiligen Trägerfrequenzen genau zuzuordnen. Die nächsten Schritte erfolgen jeweils für jedes zu verändernde Band einzeln.

Mit Hilfe von Gleichung 1 wird pro Kanal das analytische Signal \mathcal{X}_a gebildet, wobei \mathcal{H} die Hilberttransformierte des Signals $x(t)$ im jeweiligen Kanal darstellt (b).

$$\mathcal{X}_a = x(t) + \mathcal{H}(x(t)) \quad (1)$$

Die Momentanphase φ des Signals $x(t)$ ergibt sich aus dem analytischen Signal nach Gleichung 2 (c).

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\Im(\mathcal{X}_a)}{\Re(\mathcal{X}_a)}\right) \quad (2)$$

Aus dem Betrag des analytischen Signals ergibt sich die Einhüllende $E(t) = |\mathcal{X}_a|$ (c). Aus dieser wird im nächsten Schritt mittels einer diskreten Fourier-Transformation das Einhüllendenspektrum $\mathcal{X}_E(f_{mod})$ gebildet. Die Impulshaftigkeitsänderung geht einzig aus der Modifikation des Einhüllendenspektrums nach Abbildung 2 hervor (d). Die Peaks im Einhüllendenspektrum werden de-

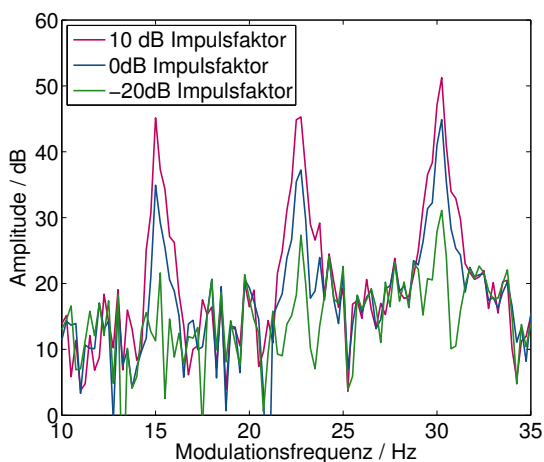


Abbildung 2: Darstellung eines Ausschnitts des Einhüllendenspektrums in einem Band. In blau ist die Originaleinhüllende mit dem Impulsfaktor 0dB eingezeichnet. Die Abschwächung der Impulshaftigkeit (grün) wird durch den Impulsfaktor von -20dB erreicht, indem die Einhüllendenpeaks um 20dB abgesenkt werden. Die Impulshaftigkeitserhöhung erfolgt durch die in rot eingezeichnete Einhüllende mit dem Impulsfaktor +10dB.

tektiert und anschließend im Bereich von 1Hz um den Peak um den jeweiligen Impulsfaktor abgesenkt bzw. erhöht. Als Peak gilt jeder Wert für den gilt $\mathcal{X}_E(f_{mod}) \geq 3.5 \cdot \text{mean}(\mathcal{X}_E(1...100Hz))$. Alle nicht als Peak identifizierte Bereiche bleiben unverändert.

Im Weiteren wird mittels einer inversen diskreten Fouriertransformation die veränderte Einhüllende wieder in den Zeitbereich überführt und anschließend durch Multiplikation des Cosinus der Phase das nun modifizierte Signal $x(t)$ gebildet. Abschließend erfolgt eine Resynthese der 24 Kanäle, nach der das Motorgeräusch mit veränderter Impulshaftigkeit neu entsteht (e).

Subjektive Messung zur Impulshaftigkeitsänderung

Zur Messung der Impulshaftigkeitsänderung bewerteten 39 Probanden (Durchschnittsalter=25 Jahre) die Impulshaftigkeit von 5 verschiedenen Dieselleerlaufgeräuschen auf einer 7-Punkte Kategorienskala. Eine Absenkung der Impulshaftigkeit sollte durch die Impulsfaktoren -20dB und -4dB erreicht werden, wohingegen der Impulsfaktor +10dB eine Impulshaftigkeitserhöhung hervorrufen sollte. Zusätzlich wurden die Originalgeräusche verwendet, was einem Impulsfaktor von 0dB entspricht.

Um den Trägerfrequenzinfluss auf die Impulshaftigkeit zu untersuchen, wurden die Einhüllenden in 6 verschiedenen Frequenzbereichen verändert. Zum einen auf dem gesamten Frequenzbereich 1-24 Bark und zum anderen in den Teilbereichen 1-8Bark; 5-12 Bark; 9-16 Bark; 13-20 Bark; 17-24 Bark.

Ergebnisse der subjektiven Messung

Impulshaftigkeitsänderung im gesamten Frequenzbereich (1-24 Bark)

In Abbildung 3 ist die bewertete Impulshaftigkeit I_{1-24} über den Impulsfaktor für die Modifikation im gesamten Frequenzbereich zugetragen.

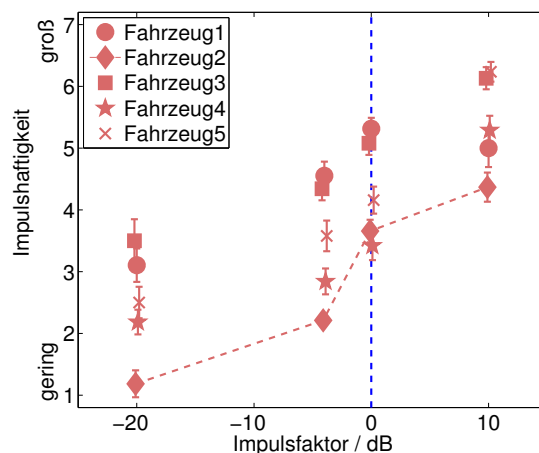


Abbildung 3: Bewertete Impulshaftigkeit aufgetragen über den Impulsfaktor für 5 verschiedene Dieselleerlaufgeräusche bei Modifikation der Einhüllendenpeaks im gesamten Frequenzbereich von 1-24 Bark.

Für alle 5 Fahrzeuge nimmt die Impulshaftigkeit I_{1-24} mit steigenden Impulsfaktor zu. Die Impulshaftigkeit kann somit abgeschwächt und erhöht werden. Mit dem beschriebenen Algorithmus ist also eine gezielte Modifikation der Impulshaftigkeit von Fahrzeuggeräuschen möglich.

Impulshaftigkeitsänderung in Frequenzteilbereichen

Um die Trägerfrequenzabhängigkeit der Impulshaftigkeit genauer zu untersuchen wurden weitere Geräusche bewertet in denen nur die Einhüllendenspektren in $N = 5$

verschiedenen Frequenzteilbereichen von je 8 Bark breite modifiziert wurde. Exemplarisch sind diese Ergebnisse in Abbildung 4 für Fahrzeug 2 dargestellt.

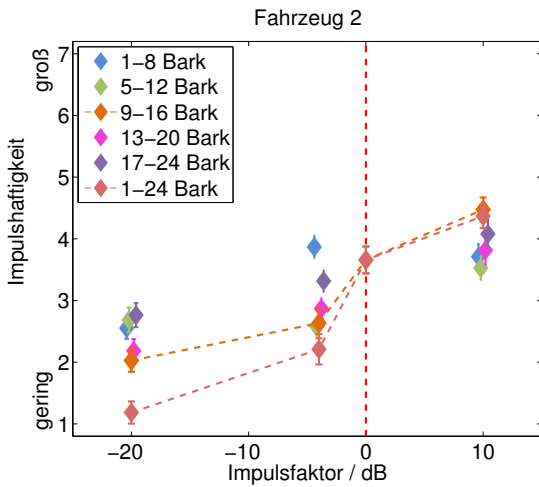


Abbildung 4: Bewertete Impulshaftigkeit aufgetragen über den Impulsfaktor für Fahrzeug 2 bei Modifikation der Einhüllendenpeaks im gesamten Frequenzbereich von 1-24 Bark I_{1-24} und der Frequenzteilbereiche von je 8 Bark breite I_n . Verbunden sind die Punkte bei 1-24 Bark Modifikation (rosa) und der Teilbereich mit der größten Impulshaftigkeitsänderung 9-16 Bark (orange).

Der Verlauf der jeweiligen Teilimpulshaftigkeiten in Abhängigkeit von dem Impulsfaktor entspricht dem der Modifikation von 1-24 Bark, wobei die größte Impulshaftigkeitsänderung jeweils durch Modifikation im gesamten Frequenzbereich erreicht wurde. Um zu prüfen inwiefern die Gesamtimpulshaftigkeit I_{1-24} durch die Teilimpulshaftigkeiten I_n repräsentiert wird wurde eine gewichtete Linearkombination der Teilbereiche nach Gleichung 3 gebildet.

$$I_{1-24}^* = \sum_{n=1}^N g_n \cdot I_n \quad (3)$$

Mit nur 2 Teilbereichen 5-12 Bark und 13-20 Bark wird eine Korrelation von $r = 0,92$ nach Gleichung 4 erzielt.

$$I_{1-24}^* = 0,28 \cdot I_{5-12} + 0,68 \cdot I_{13-20} \quad (4)$$

Der Gewichtungsfaktor 0,28 von I_{5-12} entspricht etwa der Hälfte des Gewichtungsfaktors 0,68 von I_{13-20} , sodass der Bereich von 1850Hz-5800Hz (13-20 Bark) als der wichtigste für Impulshaftigkeit bei Fahrzeuggeräuschen angesehen werden kann.

Abhängigkeit der Impulshaftigkeit vom Modulationsgrad

Um eine Korrelation der bewerteten Impulshaftigkeit mit dem Modulationsgrad zu berechnen, muss zunächst ein Modulationsgrad pro Fahrzeuggeräusch ermittelt werden. Dazu wird ein mittlerer Modulationsgrad m nach Gleichung 5 berechnet, indem zunächst ein Modulationsgrad pro Modulationsfrequenz bestimmt wird und anschließend der Mittelwert aus den 5 größten Modulati-

onsgraden pro Kanal gebildet wird. Als letztes wird dieser Wert für alle 24 Kanäle aufsummiert und es ergibt sich m .

$$m = \sum_{n=1}^{24Bark} \text{mean}(m^*) \quad ; \quad m^* = \max_5 \left(\frac{AC_E}{DC_E} \right) \quad (5)$$

Die somit errechnete Korrelation zwischen der bewerteten Impulshaftigkeit und dem mittleren Modulationsgrad m beträgt bei Berücksichtigung der Geräusche mit allen Frequenzbereichen $r = 0,64$. Werden jedoch nur die Geräusche mit einer Impulshaftigkeitsänderung im gesamten Frequenzbereich verwendet erhöht sich die Korrelation auf $r = 0,79$. Eine direkte Berechnung der Impulshaftigkeit aus dem Modulationsgrad bei Fahrzeuggeräuschen ist also durchaus denkbar.

Fazit

Die Ergebnisse der subjektiven Messungen bestätigen, dass sowohl eine Abschwächung als auch eine Verstärkung der Impulshaftigkeit bei Fahrzeuggeräuschen durch Anwendung einer Filterbank mit dem vorgestellten Algorithmus möglich ist. Außerdem zeigt sich eine schwächere Änderung der Impulshaftigkeit bei Modifikation in Teilfrequenzen als bei Modifikation im gesamten Frequenzbereich. Die Gesamtimpulshaftigkeit wird von den Impulshaftigkeiten in den Teilbereichen 5-12 Bark und 13-20 Bark sehr gut repräsentiert, wobei der Frequenzbereich von 13-20 Bark (1850-5800) scheinbar den wichtigsten Bereich darstellt.

Ein Vergleich der Impulshaftigkeitsurteile mit dem Modulationsgrad zeigt eine recht gute Korrelation für die Geräusche mit Änderung der Impulshaftigkeit im gesamten Frequenzbereich.

Literatur

- [1] Heldmann, K., „Wahrnehmung, gehörgerechte Analyse und Merkmalsextraktion technische Schalle, VDI Verlag, Düsseldorf, Seite 61 ff, 1994.
- [2] Yasui, N., und Miura M. „Perception of Roughness on sounds amplitude-modulated with triangular wave“, Forum Acousticum 2001, Aalborg, Denmark, European Acoustics Association, 2011, ISBN: 978-84-694-1520-7.
- [3] Sottek et.al.: Ein Model zur Berechnung der Impulshaftigkeit, Fortschritte der Akustik, 21 Deutsche Jahrestagung DAGA 1995; 791-794.
- [4] V. Hohmann, Frequency analysis and synthesis using a Gammatone filterbank; Acta Acoustica Vol.88 (2002), 433-442.