

Hörstudie zum Vergleich von realen und synthetischen Motorgeräuschen

Felix Gärner¹, Robert Henneberger², Stefan Sentpali³

¹ *MdynamiX AG, 80335 München, Deutschland, Email: felix.gaerner@mdynamiX.de*

² *Hochschule München, 80335 München, Deutschland, Email: henneberger@hm.edu*

³ *Hochschule München, 80335 München, Deutschland, Email: stefan.sentpali@hm.edu*

Einleitung

Mit der ansteigenden Relevanz der Elektromobilität wird auch die Frage, wie sich die Fahrzeuge der Zukunft anhören werden immer dringlicher. Zum Einen ist das Fahrzeuggeräusch ein wichtiges Qualitäts- und Erkennungsmerkmal [1], zum Anderen führen gesetzliche Bestimmungen zur Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugen im Straßenverkehr zu der Notwendigkeit, die ansonsten fast lautlosen Elektrofahrzeuge durch aktive Maßnahmen hörbar zu machen [2].

Bei der MdynamiX AG, einem An-Institut der Hochschule München, wird unter dem Namen "MXsounddesigner" ein Softwaresynthesizer zur Erzeugung von Geräuschen elektrischer Maschinen entwickelt [3], der zwei Anwendungsbereiche hat. Erstens die Verwendung im Bereich des NVH-Engineering, in dem die Software dazu dienen kann bestehende Geräusche nachzubilden und zu verändern, so dass zum Beispiel neue Zielsounds generiert werden, oder akustische Einflüsse von Maschinendefekten hörbar gemacht werden können. Zweitens kann der Synthesizer im Bereich der Active Sound Generation (ASG) dazu dienen, möglichst frei Ordnungsgeräusche abhängig von verschiedenen Parametern (z.B. Frequenz- und Amplitudenmodulation, Amplitudenveränderungen mit der Drehfrequenz und der Last) zu definieren, die dann während der Fahrt synthetisiert und abgespielt werden können.

Ziel der Studie

Es soll untersucht werden, wie ähnlich Versuchspersonen synthetische Geräusche im Vergleich zu gemessenen Geräuschen empfinden. In diesem Versuch wurde ein einfacher Syntheseansatz (sh. Synthetisierung der Geräusche) verwendet, der eine Vergleichsgrundlage für kompliziertere Verfahren bilden soll.

Desweiteren werden die Ergebnisse der Befragung mit einem Korellationskriterium verglichen. Ein einfach berechenbares Gütekriterium für die Nachbildung eines Geräusches könnte z.B. in iterativen Optimierungsalgorithmen für die Parameteranpassung für Geräuschsynthesealgorithmen oder manuelle Anpassungen bei der Geräuschnachbildung hilfreich sein.

Beschreibung der Studie

Für die hier beschriebene Studie wurden vier Körperschallmessungen von Elektromotoren bei der selben Drehzahl gemacht. Drei dieser vier Motoren wiesen dabei einen Defekt auf (Unwucht, Bürstenbeschädigung

oder Lagerbeschädigung). Diese vier Messungen wurden auf einfache Art nachgebildet. Die so entstandenen Geräusche bilden die Basis für die Studie.

Die Signale wurden alle auf gleiche Lautheit normiert, um diese als Einflussgröße auszuschließen. Zudem wurde die Länge aller Signale auf 10 Sekunden begrenzt.

Bei der Befragung sollten die Versuchspersonen die Geräusche untereinander, in ihrer Ähnlichkeit zueinander, bewerten. Dazu stand eine Skala von 0-10 (0: Keine Ähnlichkeit, 10: Maximale Ähnlichkeit) zur Verfügung.

Die Studie wurde mittels eines Online-Fragebogens durchgeführt und hatte 71 Teilnehmer. Die Teilnehmer waren fast ausschließlich männliche Studenten im Alter zwischen 18 und 35 Jahren. Keiner der Teilnehmer hatte eine Hörbeeinträchtigung. Der Fragebogen war darauf ausgelegt, nicht länger als 15 Minuten in Anspruch zu nehmen.

Synthetisierung der Geräusche

Die Synthese der Geräusche lief nach einem einfachen Schema ab. Jedes Geräusch wurde aus 100 ganzzahligen Ordnungen synthetisiert. Die Amplituden und Phasen der Ordnungen wurden über eine FFT (keine Drehzahlinformationen) automatisch ermittelt. Da in der Synthese hier keine zeitlichen Änderungen berücksichtigt wurden, wurde die FFT nur über einen kurzen Abschnitt des Signals durchgeführt, um Verfälschungen durch Unregelmäßigkeiten in der Drehzahl und Änderungen der Ordnungsamplituden im Original auszuschließen. Danach wurden die Modulationsparameter nach Gehör angepasst. Die Zeit, die zur Nachbildung der Geräusche aufgewendet wurde betrug bei keinem der Geräusche mehr als 15 Minuten.

Abbildung 1 zeigt das Betragsspektrum eines Referenzabschnittes, des entsprechenden Nachbaus und Originals über den gesamten Zeitabschnitt. Deutlich erkennbar ist das "Verschmieren" des Betragsspektrums des Originalsignals durch Unregelmäßigkeiten im zeitlichen Verlauf. Dies erschwert die Nachbildung von Ordnungssignalen, bei denen der entsprechende Drehzahlverlauf nicht bekannt ist.

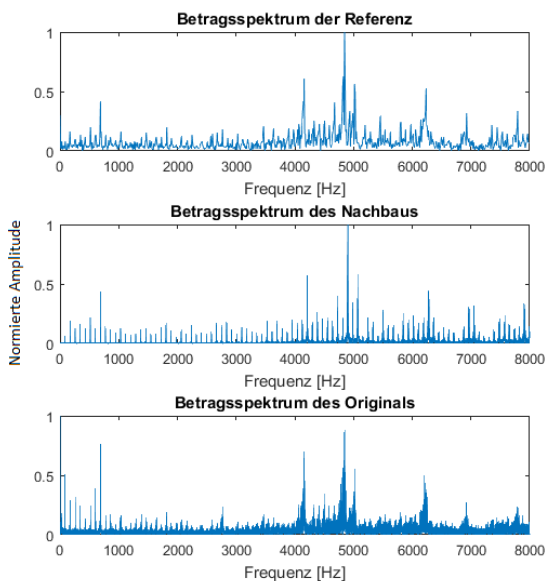


Abbildung 1: Betragsspektrum des Geräusches (Original 3) und des entsprechenden Nachbaus.

Darstellung der Ergebnisse

Für der Betrachtung der Ergebnisse wurden die Signale zuerst in fünf Klassen unterteilt:

- Der Vergleich eines Signals mit sich selbst
- Der Vergleich eines Originals mit der passenden Nachbildung
- Der Vergleich eines Originals mit einer anderen Nachbildung
- Der Vergleich zweier unterschiedlicher Originale
- Der Vergleich zweier unterschiedlicher Nachbildungen

Die so gegliederten Ergebnisse sind in Abbildung 2 zu sehen.

Deutlich am Ähnlichsten wurden erwartungsgemäß zwei gleiche Signale eingeschätzt, allerdings ist auffällig, dass die Gleichheit der Signale nicht mit absoluter Sicherheit erkannt wurde. An zweiter Stelle kommen in der Einschätzung der Vergleiche der Originale mit den passenden Nachbildungen und danach der Rest der Vergleiche. Die Klasse der Vergleiche zwischen Original und passendem Nachbau weist jedoch eine hohe Streuung auf. In Abbildung 3 sind die Ergebnisse für jedes Paar einzeln zu sehen. Man erkennt deutliche Unterschiede zwischen den Signalpaaren, jedoch weisen die Ergebnisse auch für jedes einzelne Paar eine hohe Streuung auf.

Vergleich mit statistischen Korrelationsmaßen

Es wurde überprüft, inwiefern die Ergebnisse der Befragung mit einfachen statistischen Maßen der Signalähnlichkeit übereinstimmen, hierfür wurde jeweils je-

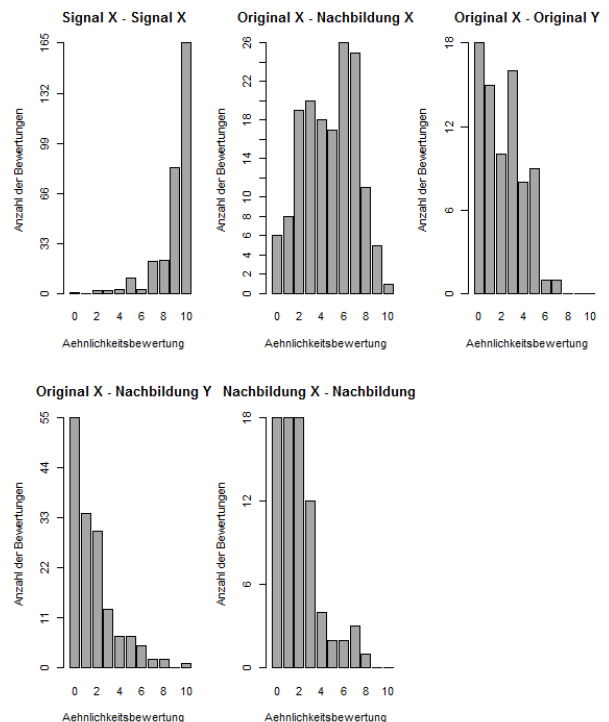


Abbildung 2: Verteilung der Befragung nach Ähnlichkeit, gegliedert in Klassen.

des Originalsignal zu jedem anderen Signal anhand des Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion (1) ausgerichtet.

$$c[m] = \sum_{n=0}^{N-m-1} x[n+m] * y[n] \quad (1)$$

Danach wurde der der Korrelationskoeffizient nach Pearson (2) berechnet.

$$\rho(x, y) = \frac{cov(x, y)}{\sigma(x) * \sigma(y)} \quad (2)$$

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Berechnungen. Zumindest für die Originale 1 und 4 (die laut Bewertung den jeweiligen Nachbildungen auch am ähnlichsten waren), ist der Korrelationskoeffizient zwischen Original und Nachbildung größer als zwischen den übrigen Paarungen. Die Absolutwerte der Koeffizienten sind allerdings im Allgemeinen sehr niedrig, das Maß scheint die Ergebnisse der Befragung nicht gut wiederzugeben.

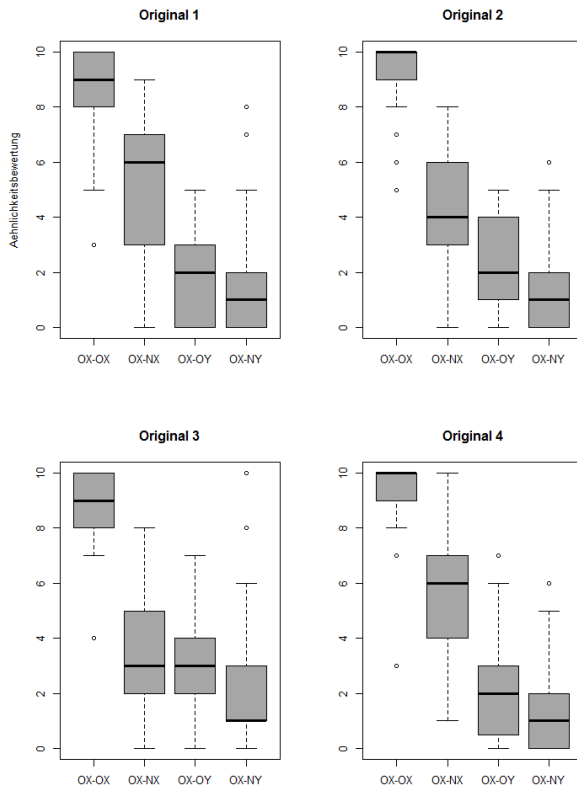


Abbildung 3: Ergebnisse der Vergleiche zwischen den verschiedenen Originalen und anderen Signalen im Boxplot.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden die Ergebnisse des Vergleichs von Motorgeräuschen bei konstanter Drehzahl mit entsprechenden stationären Nachbildungen verglichen. Es wurde ermittelt, dass Versuchspersonen die "Ähnlichkeit" zwischen Original und Nachbau nur mit großer Varianz angeben, bei einer Differenzierung in verschiedene Faktoren aber durchaus ein systematischer Unterschied zwischen Original und Nachbau mit dem oben beschriebenen, einfachen Syntheseansatz entsteht.

Ausblick

Die Ergebnisse dieser Studie bieten die Grundlage für weitere Untersuchungen. Zum Beispiel zum Vergleich mit Nachbildungen, die Informationen aus Ordnungsanalysen beachten. Oder zur Bewertung der Ergebnisse von Optimierungsalgorithmen, die Ordnungsamplituden und Modulationsparameter aufgrund des Referenzsignals anpassen.

Literatur

- [1] Genuit K., Fiebig A.: Automobiltechnische Zeitschrift, 113(7-8):530-535 (Juli 2011)
- [2] Verordnung(EU).: Nr. 540/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über den Geräuschpegel von Kraftfahrzeugen und von Austauschschalldämpferanlagen sowie zur Änderung

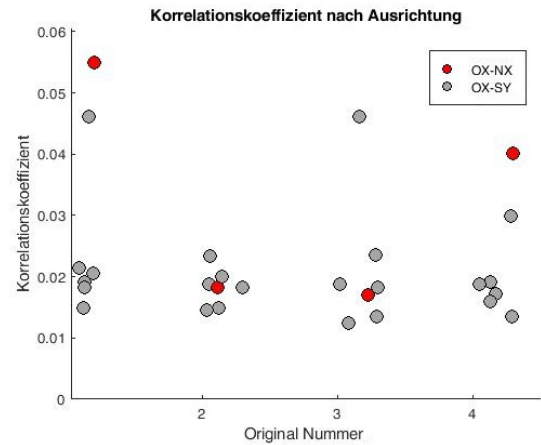


Abbildung 4: Scatterplot der Korrelationskoeffizienten zwischen jedem Original und den anderen Signalen

der Richtlinie 2007/46/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 70/157/EWG (19)

- [3] Gärner F., Henneberger R., Schubert S. Sentpali, S.: Geräuschsynthesizer für rotierende Maschinen. 43. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Akustik (2017)