

Vergleich von subjektiver und berechneter Tonhaltigkeit bei Geschalteten Reluktanzmaschinen.

Sebastián Fingerhuth¹, Knut Kasper², Michael Vorländer¹, Rik W. De Doncker²

¹ Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, Deutschland, Email: sfi@akustik.rwth-aachen.de

² Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen, Deutschland

Einleitung

Elektrische Antriebe haben einen sehr großen und wachsenden Einsatzbereich in der Industrie, als Fahrzeugantrieb und in Haushaltsgeräten. Darum sollten Maschinen immer weiterentwickelt und existierende Antriebe optimiert werden. Geschaltete Reluktanzmaschinen (GRM) bieten im gesamten Drehzahlbereich einen guten Wirkungsgrad, sind kostengünstig und brauchen wenig Wartung (bürstenlos).

Die Geräusentstehung ist jedoch ein Problem, welches beobachtet werden muss. Aerodynamische Effekte bei hoher Drehzahl einerseits und Statorschwingungen andererseits erzeugen hörbare und lästige Töne. In einem gemeinsamen Projekt zwischen dem Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe und dem Institut für Technische Akustik, beide an der RWTH Aachen, sollen geräuschreduzierende Massnahmen entworfen und getestet werden.

Geschaltete Reluktanzmaschinen

In [1] wird das Funktionsprinzip der GRM detaillierter vorgestellt. Spulen an den Statorpolen werden sequenziell bestromt. Der Rotor dreht, um die Reluktanz (magnetischer Widerstand) zu minimieren. Dieses geschieht wenn Stator- und Rotorpol sich gegenüberstehen. In diesem Augenblick wird der Strom abgeschaltet und es folgt die Bestromung der nächste Phase. Ein- und Ausschaltzeitpunkt und Strom werden durch eine Regelung gesteuert, abhängig von Position, Drehzahl und Drehmoment. In der ausgerichteten Position sind Strom und magnetischer Fluss am größten und das Abschalten des Stroms erzeugt einen radialen impulsartigen Kraftstoß. Dies ist eine der wichtigsten Quellen der Geräusentstehung bei GRM. Die erzeugten Töne (+ Harmonische), welche von der Drehzahl und der Anzahl der Phasen abhängen, sollen Gegenstand dieser Untersuchung sein. Siehe Abbildung 1.

Tonhaltigkeit

Die in [1] gefundene Funktion der Lästigkeit beinhaltet auch die Tonhaltigkeit (Klanghaftigkeit nach Terhardt und Aures). Für weitere Untersuchungen der Tonerzeugung und -abstrahlung von GRM ist es interessant zu bewerten, ob und wie gut die vorhandenen Berechnungsmethoden der Tonhaltigkeit bzw. Klanghaftigkeit die von Versuchspersonen (VP) empfundene Tonhaltigkeit wiedergeben.

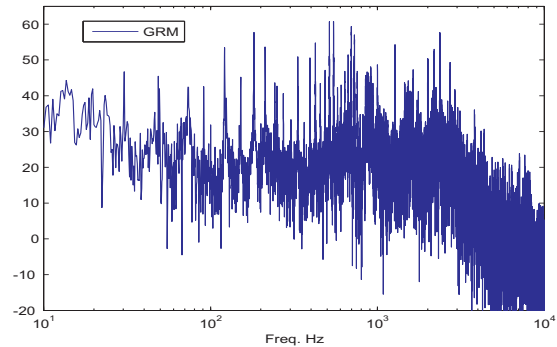


Abbildung 1: Spektrum einer Geschalteten Reluktanzmaschine.

Klanghaftigkeit nach Terhardt und Aures;

Die Software Artemis [2] berechnet die zeitliche Klanghaftigkeit (tonality) eines Schallsignals mittels einer FFT mit 4096 Punkten und einem Algorithmus der auf [3] und [4] basiert. Aus dem Spektrum werden alle spektralen Linien S_i , welche lokale Maxima sind, identifiziert. Sie werden zur weiteren Analyse benutzt, wenn sie mindestens 7 dB größer als die Nachbarlinien $S_{i\pm 2}$ und $S_{i\pm 3}$ sind. Frequenz, Pegel und schmalbandige Spektralkomponenten in den Frequenzgruppen werden für die Berechnung berücksichtigt. Normiert ist die Klanghaftigkeit mit einem Wert von 1 tu (tonality units) für einen 1 kHz Sinus bei 60 dB. Aus den Ausgangsdaten (Klanghaftigkeit über Zeit) wurde für diese Arbeit das Maximum verwendet.

Prominence Ratio nach Nobile und Bienvenue:

Ein Algorithmus zur Identifikation von tonalen Komponenten ist in [5] beschrieben. Das Verhältnis zwischen dem Pegel der Frequenzgruppe in der ein Ton auftritt und dem Pegel der Frequenzgruppen unter- und oberhalb davon wird berechnet. Prominence Ratio: $\Delta L_p = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{X_M}{0.5 \cdot (X_L + X_U)} \right]$ (in dB).

Der Algorithmus berechnet den Prominence Ratio gegenüber der Frequenz (in Bark). Aus dem Spektrum wurde das Maximum verwendet.

Tonhaltigkeit nach DIN45681:

Diese Norm berechnet anhand des Spektrums die Tonhaltigkeit, um dann einen Tonzuschlag anzugeben. Dieser Zuschlag wird zum Dauerschallpegel addiert. Der Algorithmus ist der Funktionsweise des Gehörs angepasst;

Frequenz, Verdeckung, mehrere Töne in einer Frequenzgruppe, Hörbarkeit usw. werden berücksichtigt. Ähnlich wie für Prominence Ratio sucht der Algorithmus die Differenz zwischen dem Tonpegel und dem Pegel der Mithörschwelle. Der Wert für den Ton mit der maximalen Differenz wird hier für den Vergleich mit den anderen Größen gebraucht.

Stimuli

Eine Aufnahme einer GRM, siehe Spektrum in Abbildung 1, wurde als Ausgangsstimulus genommen. Eine Reihe von Aufnahmen der Maschine mit unterschiedlicher Tonhaltigkeit war zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung noch nicht vorhanden. Als Alternative wurde der Ausgangsstimulus modifiziert, um Geräusche zu erzeugen, welche unterschiedliche Tonhaltigkeiten bzw. Ausgeprägtheit der Töne aufweisen. Das Signal wurde mit mehreren Filtern (notch filter) bei den stark herausragenden Frequenzen gefiltert. Somit wurden 10 Stimuli erzeugt. Von der Originalaufnahme bis zu einem Signal mit geringer Tonhaltigkeit. Bei zwei weiteren Stimuli wurden die Filter nur unterhalb von 600 Hz bzw. nur oberhalb von 600 Hz eingesetzt. Einige der Stimuli wurden verstärkt, um die gleiche Lautheit zu haben wie das Originalsignal.

Um den Analysebereich zu begrenzen, wurden die Stimuli mit einem Hoch- und einem Tiefpassfilter mit Grenzfrequenzen bei 90 bzw. 5000 Hz gefiltert.

Hörversuch

Um die Ergebnisse der Berechnungen mit subjektiven Bewertungen zu vergleichen, wurde ein Hörversuch (HV) mit 10 VPn durchgeführt, in dem jeder Stimulus mittels Größenschätzung in seiner Tonhaltigkeit bewertet wurde. Die gesamten Stimuli wurden der VP erstmal vorgestellt. Danach wurden sie einzeln vorgespielt, und die Tonhaltigkeit wurde von der VP in einer Skala bewertet, die von 1 bis 50 reicht und in 5 Bereiche aufgeteilt ist („gar nicht tonhaltig“, „gering tonhaltig“, „mittel“, „tonhaltig“ und „sehr tonhaltig“).

Ergebnisse

Es wurden die Korrelationskoeffizienten für die drei „objektiven“ Tonhaltigkeiten und das Ergebnis des HV berechnet. Sie sind in Tabelle 1 zu sehen.

| | | | |
|----------------|------|----------------|------|
| HV - DIN = | 0.96 | Klangh - DIN = | 0.90 |
| HV - PR = | 0.93 | Klangh - PR = | 0.89 |
| HV - Klangh. = | 0.75 | PR - DIN = | 0.98 |

Tabelle 1: Korrelationskoeffizienten

Die Werte zeigen, dass vor allem Prominence Ratio und DIN45681 am besten mit dem HV korrelieren. In Abbildung 2 sind sie graphisch (qualitativ) dargestellt, normiert auf den tonhaltigsten Stimulus im HV und zur Darstellung in Y-Richtung gegeneinander verschoben. Die Kurve der DIN45681 Norm folgt dem HV-Verlauf am besten, die Klanghaftigkeit am

wenigsten. Da der DIN45681-Algorithmus Zusatzinformation zu Verdeckung, Ton- und Geräuschpegel, mehreren Tönen in einer Frequenzgruppe, usw. gibt, ist er ein hilfreiches Werkzeug für die Evaluierung der Geräuschoptimierungen die in diesem Projekt durchgeführt wird.

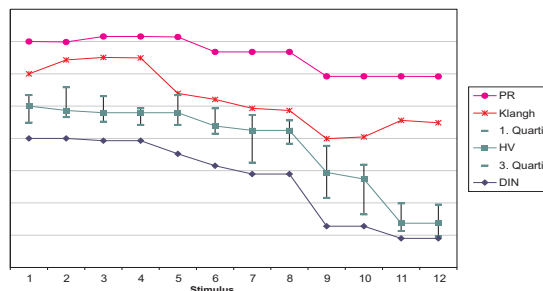


Abbildung 2: Berechnete und mit HV ermittelte Werte für Tonhaltigkeit.

Zusammenfassung

Die Geräuschqualität von GRM soll hinsichtlich der Tonhaltigkeit untersucht werden. Die Präsenz von Tönen ist wichtig, weil sie den Gesamtpegel, Lautheit und Lästigkeit erhöht. Hier wurde anhand von 12 synthetisierten Stimuli gezeigt, dass die „objektiven“ Berechnungen nach DIN45681 mit den Ergebnissen des HV gut korrelieren.

Die Optimierung, die an der GRM durchgeführt wird, soll u.a. auch das Problem der Tonerzeugung angehen. Berechnungen der Tonhaltigkeit mit der DIN45681 können zeigen ob die Optimierung psychoakustisch von Bedeutung ist.

Literatur

- [1] Fingerhuth, S., Kasper, K., Klemenz, M., Fiedler, J., Vorländer, M., De Doncker, R., Bewertung der Geräuschqualität von Geschalteten Reluktanzmaschinen durch psychoakustische Größen, Proc. Fortschritte der Akustik DAGA 05, 2005.
- [2] ArtemiS Help File, Head acoustics GmbH, URL: <http://www.head-acoustics.de>
- [3] Terhardt, E., Stoll, G., Seewann, M., Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. The Journal of the Acoustical Society of America **71**, 1982, 679-688.
- [4] Aures, W., Berechnungsverfahren für den sensorischen Wohlklang beliebiger Schallsignale. Acustica **59**, 1985, 130-141.
- [5] Nobile, M.A., Bienvenue, G.R., A Procedure for Determining the Prominence Ratio of Discrete Tones in Noise Emissions, Proc. NOISE-CON '91, Tarrytown, New York, 1991, 475-480.
- [6] DIN45681 Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen, 2005.