

Bewertung der Geräuschqualität von Geschalteten Reluktanzmaschinen durch psychoakustische Größen

Sebastian Fingerhuth¹, Knut Kasper², Martin Klemenz¹, Jens Fiedler²,
Michael Vorländer¹, Rik W. De Doncker²

¹ Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, 52056 Aachen. Email: sfi@akustik.rwth-aachen.de

² Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen, 52056 Aachen

Einleitung

Geschaltete Reluktanzmaschinen (GRM) sind aus Kostengründen (Fertigung und Wartung) eine interessante Alternative zu anderen elektrischen (bürstenlosen) Maschinen. Die Geräuschentwicklung von GRM ist eines der größten Hindernisse für ihre weitere Verbreitung in der Industrie. Bei langsamen und mittleren Drehzahlen entstehen die Geräusche vor allem wegen der impulsartigen elektromagnetischen Kräfte in der Maschine und bei hoher Drehzahl auch durch aerodynamische Prozesse.

In dieser Arbeit wird gezeigt, inwiefern die Angenehmheit des Geräuschs einer GRM durch psychoakustische Größen (Lautheit, Rauigkeit, Schärfe, Tonhaltigkeit, usw.) erklärt werden kann. Dazu wurde ein Hörversuch mit anschließender multiplen Regression durchgeführt. Als Stimuli dienten Aufnahmen von GRM unterschiedlicher Leistung und Größe in verschiedenen Betriebspunkten. Die Ergebnisse sollen letztendlich ermöglichen, Maßnahmen zur Geräuschoptimierung von GRM (Änderung der Steuerungsverfahren oder der Maschinengeometrie) gehörrechtlich zu bewerten.

Geschaltete Reluktanzmaschinen

Geschaltete Reluktanzmaschinen nutzen nicht wie üblich die Lorentzkraft, sondern die Reluktanzkraft. Nach Abbildung 1 werden beide a -Spulen eingeschaltet bis die A -Pole des Rotors mit a übereinstimmen. Dies minimiert die Reluktanz. Darauf folgt die Sequenz bB , cA , aB , bA , usw.

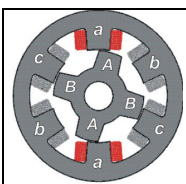


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer geschalteten Reluktanzmaschine. Beide a -Spulen sind eingeschaltet. Eine Reluktanzminimierung wird erreicht, wenn der Rotor sich gegen den Uhrzeigersinn dreht, so dass a und A nebeneinander liegen.

Einige Eigenschaften, welche die geschaltete Reluktanzmaschine interessant machen, sind: kostengünstige Maschinenherstellung, robuster Aufbau, hohe Zuverlässigkeit, hohe Drehzahlen, hoher Wirkungsgrad im Teillastbereich.

Doch damit verbunden ist eine hohe Geräuschentwicklung, vor allem wegen Vibrationen beim Abschalten der Phasen. Dies erzeugt drehzahl- und schaltfrequenzabhängige Töne und bei höherer Drehzahl auch aerodynamische Geräusche [1].

Hörversuch

Ein Hörversuch mit 22 Stimuli wurde durchgeführt (siehe Tabelle 1). Die Versuchspersonen (VPn) sollen die Geräuschqualität der Stimuli beurteilen. Die VPn werden in einer Einfachen Form nach bestimmten Merkmalen befragt. Das Adjektivpaar „angenehm/unangenehm“ ist für eine solche Untersuchung geeignet [2]. Mit einer Kategorien-Unterteilungs-Skala (CP-Skala, wie in Abbildung 2) wird jeder Stimulus von den Versuchspersonen an einem GUI bewertet. Die Skala ist in fünf „grobe“ Kategorien eingeteilt (sehr unangenehm, unangenehm, mittel, angenehm, sehr angenehm), die wiederum zehnfach geteilt sind (Abbildung 2). So kann jeder Stimulus eine Bewertung zwischen 1 und 50 bekommen. Die Stimuli wurden 19 VPn vorgespielt. Ein Stimulus wurde wiederholt präsentiert. Da zwei Personen diese beiden Stimuli sehr unterschiedlich bewertet haben, wurden sie für die Auswertung nicht berücksichtigt.



Abbildung 2: Kategorien-Unterteilungs-Skala (CP-Skala).

Die Stimuli waren 4 Sekunden lang und wurden mit originalem Pegel über Kopfhörer in einer Zufallsreihenfolge wiedergegeben. Nicht alle Aufnahmen sind frei von Störgeräuschen (mechanische Last, Ventilator beim Staubsauger). Der Abstand des Mikrofons betrug 1,5 m vom Mittelpunkt der GRM. Nur 10 der Aufnahmen konnten unter Freifeldbedingungen gemacht werden.

Tabelle 1 zeigt den Anwendungstyp und die mechanischen Kenngrößen der Maschinen. Für jede Konfiguration wurden zwischen 2 und 7 Einzelstimuli bei verschiedenen Drehzahlen bzw. Lastzuständen für den Hörversuch verwendet.

Vor der Durchführung des Hörversuches wurden jeder VPn alle Stimuli vorgespielt, um sich mit diesen vertraut zu machen. Der erste Stimulus war für alle VPn derselbe und konnte jederzeit wiedergegeben werden (inklusive seiner Bewertung) und diente somit als Ankerschall.

Um den Kontext mit einzubeziehen, wurde den VPn erklärt, die Maschine müsse in einem Betrieb eingesetzt werden.

Die Urteile der 17 VPn wurden arithmetisch gemittelt [2]. Anschließend können die Mittelwerte mit psychoakustischen Größen verglichen werden.

Anzahl Stimuli	Maschine	max. Drehzahl [rpm]	P_{nom} [kW]	\varnothing Stator [mm]	Zahn-konfig.
7	Staubsaug. A	36000	1,3	98	8/4
2	Staubsaug. B	36000	1,5	76	4/2
7	Kfz-Antrieb	6000	30	286	18/12
4	Webmasch. A	5000	11	247	8/6
2	Webmasch. B	5000	ca. 1,4	120	8/6

Tabelle 1: Information zu den Stimuli und Maschinen.

Psychoakustische Größen

Für jeden Stimulus wurden verschiedene psychoakustische Größen berechnet. Diese waren: Prominence Ratio [dB] [3], Tonhaltigkeit [tu] (nach Aures und Terhardt [4]), Lautheit [Phon] [5], Pegel [dB(A)], Schärfe [acum] (nach v. Bismarck [6] und nach Aures [6]) und Rauigkeit [asper] (nach Sottek [7]). Diese Größen wurden mit der Software ArtemiS der Firma HEAD acoustics GmbH berechnet.

Statistische Auswertung

Mittels multipler linearer Regression [2],[8] wurde nach einem Modell gesucht, welches die Varianz des Hörversuchs zum größtmöglichen Teil erklärt. Als abhängige Variable dienen die Mittelwerte des Hörversuches und als unabhängige Variablen die psychoakustischen Größen.

Da somit jeweils 2 Größen für jede Dimension des Hörens zur Verfügung stehen, wurde hiervon zunächst nach denjenigen Größen gesucht, die ein besseres Modell bezüglich des Hörversuches erzeugen. Dabei wurden die Paare *Prominence Ratio - Tonhaltigkeit*, *Lautheit - Pegel* und *Schärfe nach v. Bismarck - nach Aures* verglichen.

Für diese Stimuli haben die Tonhaltigkeit gegenüber Prominence Ratio, die Lautheit gegenüber dem dB(A)-Pegel und die Schärfe nach v. Bismarck gegenüber Schärfe nach Aures eine höhere Varianzaufklärung ergeben. Die Rauigkeit ergibt dagegen keine höhere Varianzaufklärung und wird deshalb in kein Modell einbezogen.

Interkorrelation

Schärfe-Tonhalt.	Schärfe-Lautheit	Lautheit- Tonhalt.
0,059	-0,33	-0,195

Tabelle 2: Korrelationskoeff. der psychoakustischen Größen (Schärfe, Tonhaltigkeit, Lautheit)

Um sicherzustellen, dass die psychoakustischen Größen untereinander unabhängig sind, wurde die Interkorrelation berechnet (Tabelle 2). Da die Werte klein sind (d.h. zum Beispiel, dass die lauten Stimuli nicht die schärfsten sind, usw.), wird die Aussagekraft der multiplen Regression hiervon nicht beeinträchtigt.

In Tabelle 3 ist für jedes Modell die Varianzaufklärung aufgelistet (R^2_{kor}) wie auch die „Gewichte“ (d.h. die standardisierten Beta-Koeffizienten) der einzelnen psychoakustischen Größen und deren Signifikanz. Die drei Modelle unterscheiden sich in der Anzahl unabhängiger Variablen. Dasjenige Modell, welches nur die Lautheit berücksichtigt (Modell 3), erklärt nur knapp 33% der Varianz. Hingegen

erklären die Größen Lautheit, Schärfe (v. Bismarck) und Tonhaltigkeit (Modell 1) 85% der Varianz. Hiermit wird eindrucksvoll gezeigt, dass die Lautstärke mitnichten die einzige Dimension bei der Bewertung der Geräusche ist. Ebenso zeigt die hohe Varianzaufklärung bei Modell 3, dass Hörversuche bei dem untersuchten Geräuschtyp in Zukunft nicht unbedingt notwendig sind, da die drei untersuchten Größen die Wahrnehmung zu einem hohen Teil abdecken.

		Beta-Gewicht	Signifikanz
Modell 1 $R^2_{kor} = 0,850$	LAUT	0,888	0
	SCHARF	0,633	0
	TONH	0,403	0
Modell 2 $R^2_{kor} = 0,685$	LAUT	0,809	0
	SCHARF	0,631	0
Modell 3 $R^2_{kor} = 0,328$	LAUT	0,6	0,003

Tabelle 3: R^2_{kor} -Wert, standardisierte Beta-Koeffizienten und deren Signifikanz für 3 unterschiedliche Modelle mit dem Ergebnis aus dem Hörversuch als abhängige Variable.

Zusammenfassung

Es wurde ein Hörversuch durchgeführt, um Geräusche von geschalteten Reluktanzmaschinen auf einer CP-Skala anhand des Merkmals "Angenehmheit" zu bewerten. Das Ergebnis wurde mittels multipler Regression mit psychoakustischen Größen verglichen. Zur Bewertung von Geräuschen dieser Art ist die Lautheit alleine nicht ausreichend. Die zusätzliche Berücksichtigung von Schärfe und Tonhaltigkeit erbringt hingegen eine sehr hohe Annäherung an die Urteile des Hörversuchs.

Literatur

- [1] Kasper, K., Analyse und Bewertung der Geräuschentwicklung von Geschalteten Reluktanzmaschinen, Diplomarbeit, RWTH Aachen, 2004.
- [2] Klemenz, M., Die Geräuschqualität bei der Anfahrt elektrischer Schienenfahrzeuge, Dissertation, RWTH Aachen, 2005.
- [3] Nobile & Bienvenue, Procedure for determining the prominence ratio of discrete tones in noise emissions, Proc. of the Noise-Con 91, Tarrytown, New York, 1991.
- [4] Terhardt, E., Stoll, G., and Seewann, M., Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals, J. Acoust. Soc. Amer. 71, S.679, 1982.
- [5] ISO 532, Akustik; Verfahren zur Berechnung des Lautstärkepegels, Teil B, 1975.
- [6] Aures, W., Berechnungsverfahren für den sensorischen Wohlklang beliebiger Schallsignale, Acustica 59, S.130, 1985.
- [7] Sottek, R., Modelle zur Signalverarbeitung im menschlichen Gehör. Dissertation, RWTH Aachen, 1993.
- [8] Bortz, J., Statistik für Sozialwissenschaftler, Springer Verlag, 1999.