Methode zur akustischen Gestaltung einer Permanentmagnet-Synchronmaschine auf Basis der Strukturintensität

Christian Adams, Clarissa Schaal, Joachim Bös, Tobias Melz
TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, 64289 Darmstadt
Email: adams@szm.tu-darmstadt.de.de

Einleitung und Grundlagen

Elektrische Maschinen kommen heute in zahlreichen Anwendungen zum Einsatz. Vor allem im Automobilbereich werden immer mehr Funktionen durch elektrische Maschinen übernommen. Aber auch in industriellen Anwendungen sowie im Haushalt spielen elektrische Maschinen eine immer wichtigere Rolle. Durch die damit verbundene Nähe zum Menschen ist die Akustik von elektrischen Maschinen ein wichtiger Faktor, mit dem sich Wettbewerbsvorteile erzielen lassen. Die dominante Geräuschquelle von elektrischen Maschinen ist die Abstrahlung von Körperschall, die durch die Magnetkräfte verursacht wird [1]. Die Magnetkräfte erzeugen auch das Drehmoment des Motors und lassen sich daher nicht verhindern. Der beschriebene Geräuschentstehungsmechanismus wird modellhaft durch die Maschinenakustische Grundgleichung [2] beschrieben

$$P(f) = \tilde{F}^2(f) Sh_{\mathrm{T}}^2(f) \sigma(f) \rho c. \tag{1}$$

$P(f)$ ist die Schallleistung, $\tilde{F}^2(f)$ die Anregungskraft, $Sh_{\mathrm{T}}^2(f)$ die Körperschallfunktion, $\sigma(f)$ der Abstrahlgrad und ρc die Schallkennimpedanz, die sich aus der Dichte ρ und der Schallgeschwindigkeit c berechnen lässt. Um elektrische Antriebe hinsichtlich ihrer Akustik auszulegen, lassen sich verschiedene Maßnahmen aus der Maschinenakustischen Grundgleichung ableiten. Eine Beeinflussung der Anregungskraft $\tilde{F}^2(f)$, d.h. der Magnetkräfte, erfolgt entweder indirekt über die Rotor-/Stator-Geometrie [3] oder direkt durch die in den Spulen fließenden Ströme [4]. Die Körperschallfunktion $Sh_{\mathrm{T}}^2(f)$ lässt sich durch eine Auslegung der Maschinenstruktur beeinflussen. Dazu werden neben den üblichen Verfahren der Maschinenakustik und der Strukturdynamik auch Verfahren basierend auf der Strukturintensität (STI) eingesetzt [5]. Die STI $\mathbf{I}_{\mathrm{S}}(f)$ beschreibt den zeitlich gemittelten Fluss der Körperschallenergie in einer festen Struktur und lässt sich mit Hilfe des Spannungstensors $\underline{\mathbf{S}}(f)$ und der konjugiert komplexen Schnelle $\underline{\mathbf{v}}^*(f)$ berechnen [6]

$$\mathbf{I}_{\mathrm{S}}(f) = -\frac{1}{2} \Re \left\{ \underline{\mathbf{S}}(f) \underline{\mathbf{v}}^*(f) \right\}. \tag{2}$$

In diesem Beitrag wird gezeigt, wie sich das Geräusch einer dreiphasigen Permanentmagnet-Synchronmaschine (PMSM) mit Hilfe der STI beeinflussen lässt. Ziel ist es, das Geräusch der PMSM so zu beeinflussen, dass eine zuvor definierte Zielgröße erreicht wird (*Design to Acoustics*). Zur Beschreibung des Geräuschs dient hier die äquivalent abgestrahlte Schallleistung (ERP) [7]

$$P_{\mathrm{ERP}} = \frac{1}{2} \rho c \int_S \Re \left\{ \underline{\mathbf{v}}_{\mathrm{n}}(f) \underline{\mathbf{v}}_{\mathrm{n}}^*(f) \right\} \mathrm{d}S. \tag{3}$$

Dabei ist $\underline{\mathbf{v}}_{\mathrm{n}}(f)$ die Schnelle der Gehäuseoberfläche in Normalenrichtung. Für die Pegelbildung wird analog zur Schallleistung ein Referenzwert von $10^{-12}\,\mathrm{W}$ verwendet.

Tabelle 1: Technische Daten der untersuchten PMSM

Eigenschaft	Wert
Nennleistung	$0,5\,\mathrm{kW}$
Nenndrehzahl	$3300\,\mathrm{min}^{-1}$
Polpaarzahl	7
Anzahl Statorzähne	7
Anzahl Rotormagnete	14

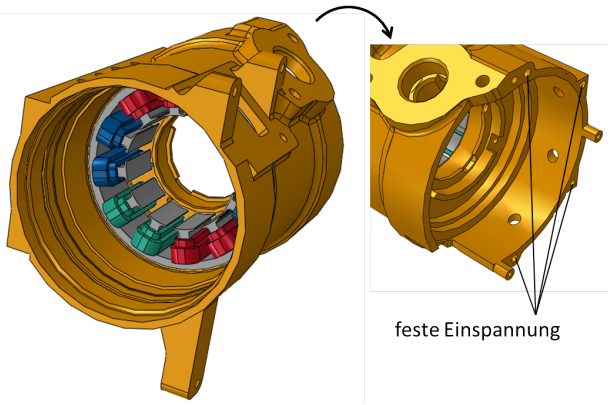

Abbildung 1: Stator und Gehäusestruktur der PMSM als CAD-Modell

Die technischen Daten der untersuchten PMSM sind in Tabelle 1 aufgelistet, und Abbildung 1 zeigt das CAD-Modell der Stator- und Gehäusestruktur. Auf Basis des CAD-Modells wird ein Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) aufgebaut, um die Strukturschwingungen zu berechnen. Dabei wird das Gehäuse an vier Bohrungen fest eingespannt, da die PMSM in der Anwendung dort mit angrenzenden Baugruppen fest verschraubt ist. Die ERP wird gemäß Gleichung (3) aus den Strukturschwingungen der PMSM berechnet, die sich durch die Anregung mit den Magnetkräften ergibt. Die Magnetkräfte wiederum lassen sich mit Hilfe der Feldrekonstruktionsmethode (FRM) berechnen [8]. Weitere Details zur Implementierung der FRM

finden sich in [5]. Die Spektren der radialen und der tangentialen Magnetkraft sind in Abbildung 2 dargestellt. Knapp unterhalb von 2000 Hz weisen die Magnetkräfte ein lokales Maximum auf. Abbildung 3 zeigt das berechnete ERP-Spektrum für einen typischen Betriebszustand der PMSM (Drehzahl $n = 500\,\mathrm{min}^{-1}$, Lastmoment $M_{\mathrm{Last}} = 0\,\mathrm{Nm}$). Die dominanten Peaks liegen bei 1360 Hz, 2000 Hz, 2660 Hz und 2930 Hz, wobei die Schallabstrahlung bei 2000 Hz maximal ist. Diese Frequenzen stimmen mit den ersten vier Resonanzfrequenzen des Gehäuses überein. Knapp unterhalb von 2000 Hz liegt auch das Maximum der Magnetkräfte. Folglich ist die Anregung der Gehäuseresonanzen durch die Magnetkräfte maßgeblich für die Geräuschentstehung verantwortlich. Um die Beeinflussung der ERP mittels STI zu zeigen, wird der Peak der ERP bei 2000 Hz für diese Untersuchung als Zielgröße ausgewählt.

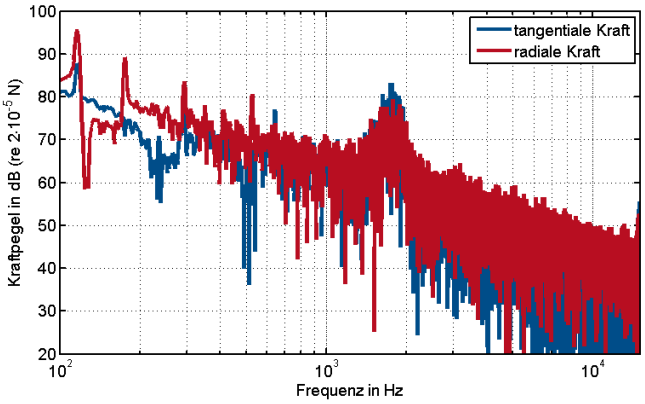

Abbildung 2: Spektren der radialen und der tangentialen Magnetkraft für $n = 500\,\mathrm{min}^{-1}$ und $M_{\mathrm{Last}} = 0\,\mathrm{Nm}$

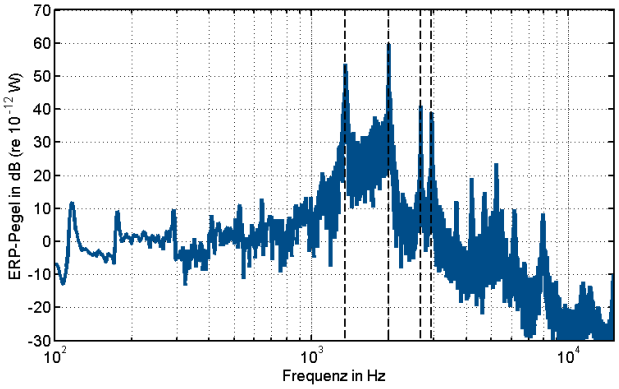

Abbildung 3: berechnetes ERP-Spektrum der PMSM bei $n = 500\,\mathrm{min}^{-1}$ und $M_{\mathrm{Last}} = 0\,\mathrm{Nm}$; senkrechte gestrichelte Linien markieren die ersten vier Resonanzfrequenzen des Gehäuses

Methode

Abbildung 4 zeigt den Ablauf der angewendeten Methode. Wie zuvor beschrieben, soll die ERP bei einer Frequenz von 2000 Hz, d.h. bei der zweiten Resonanzfrequenz des Gehäuses, mittels STI beeinflusst werden. Dazu wird im nächsten Schritt ein vereinfachtes Modell der PMSM aufgebaut. Die Statorzähne werden dabei mit einer harmonischen Kraft $|F_{\mathrm{STI}}| = 1\,\mathrm{N}$, $f_{\mathrm{STI}} = 2000\,\mathrm{Hz}$ in radialer Richtung angeregt (siehe Abbildung 5) und nicht mit den tatsächlichen Magnetkräften. Mit Hilfe dieser vereinfachten Anregungskraft soll zunächst die prinzipielle Machbarkeit der Methode gezeigt werden. Anschließend wird die STI berechnet und

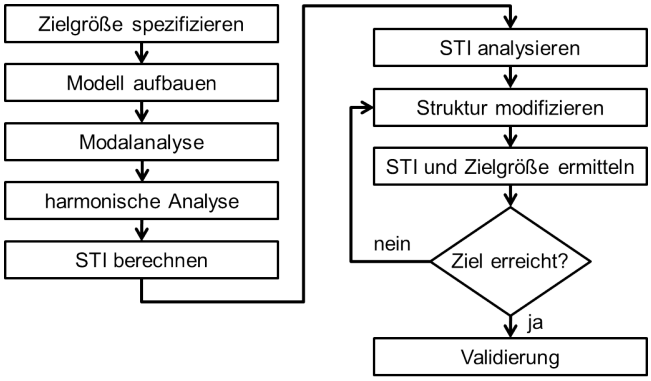

Abbildung 4: Ablaufdiagramm der Methode zur Beeinflussung des Geräuschs einer PMSM

analysiert. Anhand der STI wird die Gehäuseoberfläche durch zusätzliche Geometrie-Features (*Beläge*) modifiziert. Diese Beläge ändern die Masse des Gehäuses um weniger als 1 %, so dass sich die Resonanzfrequenzen zwischen 0,07 % und 1,2 % ändern. Im nächsten Schritt werden die Eigenfrequenzen des modifizierten Gehäuses berechnet, bei denen das modifizierte Gehäuse anschließend harmonisch angeregt wird. Dadurch ist sichergestellt, dass das modifizierte Gehäuse ebenfalls in seinen Resonanzen angeregt wird. Folglich lassen sich die Einflüsse der Beläge auf eine Änderung der STI zurückführen und sind nicht durch eine Anregung außerhalb der Gehäuseresonanzen begründet. Anhand der STI des modifizierten Gehäuses lässt sich die Änderung der Körperschallenergie aufgrund des Belags bewerten. Die Berechnung der ERP des modifizierten Gehäuses zeigt, ob die Modifikation zu einer Reduzierung der ERP führt oder nicht. Wird eine Reduzierung der ERP erreicht, kann das modifizierte Gehäuse validiert werden, indem die ERP bei Anregung mit den Magnetkräften ermittelt wird (analog zu Abbildung 3). Andernfalls muss eine weitere Gehäusemodifikation auf Basis der STI getestet werden.

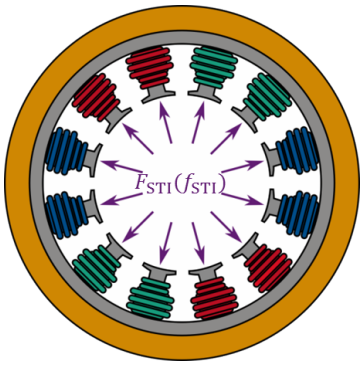

Abbildung 5: schematische Darstellung der vereinfachten Anregung zur Berechnung der STI

Ergebnisse

Abbildung 6 zeigt die berechnete STI bei 2000 Hz für verschiedene Ansichten der PMSM, wobei die Farbe den Betrag der STI, d.h. die Energiemenge, zeigt und die Pfeile die Richtung der STI angeben. Die STI ist auf der Gehäuseoberfläche im Bereich des Stators maximal, da dort die Anregung durch die harmonische Kraft erfolgt. Dabei lassen sich drei charakteristische Bereiche unterscheiden, die in Abbildung 6 markiert sind: Im Bereich 1 verläuft die STI nahezu parallel zur Gehäuseoberfläche, im Bereich 2 zeigen die Pfeile von der Gehäuseoberfläche weg, d.h. die STI verläuft radial nach außen und im Bereich 3 zeigen die Pfeile in das Gehäuseinnere, so dass die STI dort radial nach innen verläuft.

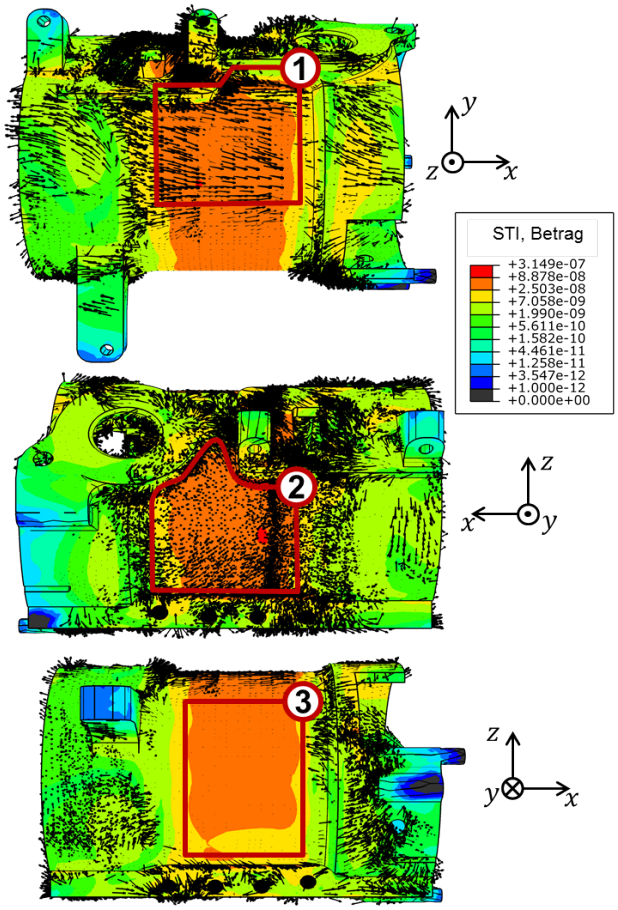

Abbildung 6: STI der PMSM bei einer Frequenz von 2000 Hz für verschiedene Ansichten des Gehäuses

In diesen drei Bereichen wird jeweils ein Belag mit einer Dicke von 1 mm aufgebracht. Der Belag hat dieselben Materialeigenschaften wie das Gehäuse und ist mit diesem fest verbunden. Für jedes modifizierte Gehäuse werden anschließend die STI und die ERP berechnet. Tabelle 2 zeigt die Änderung der ERP bei 2000 Hz aufgrund der Beläge. Lediglich durch den Belag 1 sinkt die ERP, so dass diese Gehäusevariante für die Validierung in Frage kommt. Die STI für das Gehäuse mit Belag 1 ist in Abbildung 7 dargestellt. Im Vergleich zum nicht modifizierten Gehäuse (Abbildung 6) zeigt sich, dass der Belag 1 den Betrag der STI bei 2000 Hz ungefähr um den Faktor 40 reduziert, wohingegen die Richtung der STI nahezu unverändert bleibt.

Tabelle 2: Änderung der ERP aufgrund der Gehäusemodifikation durch verschiedene Beläge bei 2000 Hz

Belag Nr.	Änderung der ERP
1	$-25\,\mathrm{dB}$
2	$+7,5\,\mathrm{dB}$
3	$+4,5\,\mathrm{dB}$

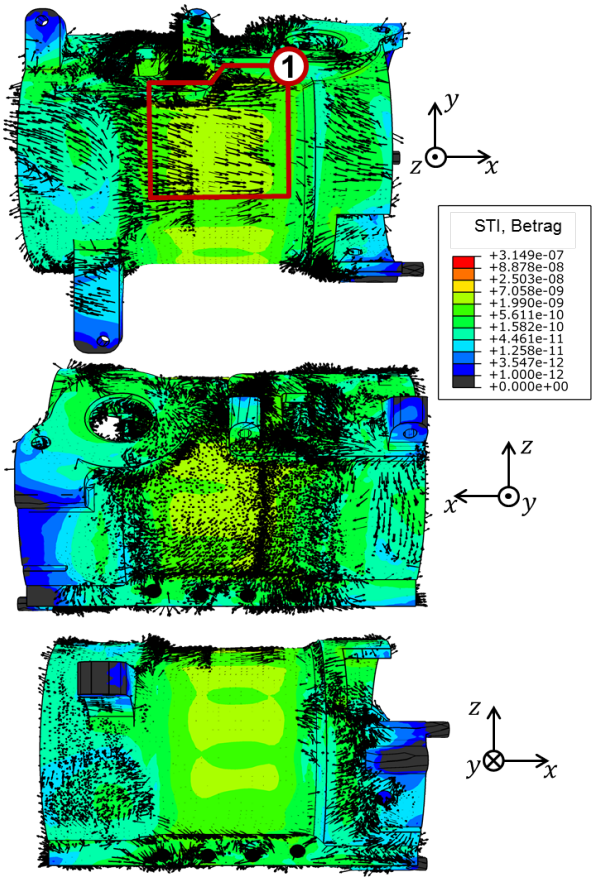

Abbildung 7: STI bei 2000 Hz für verschiedene Ansichten des Gehäuses mit Belag 1, vgl. auch Abbildung 6

Im nächsten Schritt wird das Gehäuse mit Belag 1 verwendet, um die ERP aufgrund der Magnetkräfte zu ermitteln. Dabei wird das FE-Modell der PMSM mit denselben Magnetkräften angeregt, die zur Berechnung der ERP des unmodifizierten Gehäuses verwendet werden (vgl. Abbildung 2). In Abbildung 8 werden die Spektren der ERP für das Gehäuse ohne Belag und das Gehäuse mit Belag 1 gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass der Belag 1 die ERP bei 2000 Hz um 3 dB senkt. Die dritte und vierte Resonanzfrequenz des Gehäuses erhöhen sich durch den Belag 1 jeweils um ca. 1 %, wobei die Pegel der ERP um 7,5 dB und 2,5 dB sinken. Der ERP-Summenpegel beträgt in beiden Fällen 67 dB.

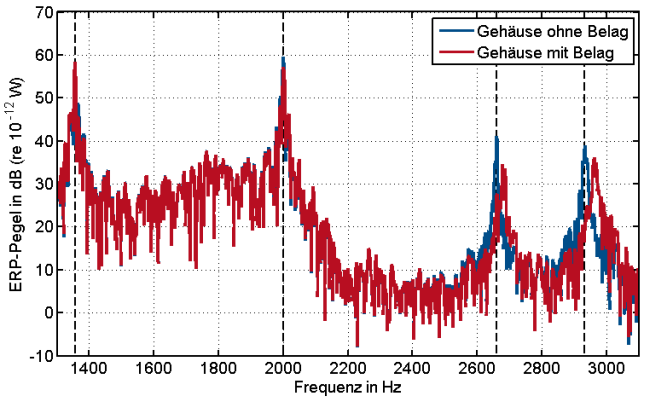

Abbildung 8: ERP-Spektren des Gehäuses ohne Belag und des Gehäuses mit Belag 1 für $n = 500\,\mathrm{min}^{-1}$ und $M_{\mathrm{Last}} = 0\,\mathrm{Nm}$; senkrechte gestrichelte Linien markieren die ersten vier Resonanzfrequenzen des Gehäuses ohne Belag

Schlussfolgerung

In der Untersuchung zeigt sich, dass ein Belag auf der Gehäuseoberfläche die ERP bei 2000 Hz reduziert, wenn er in einem Bereich maximaler STI (Betrag) appliziert wird und die STI dort parallel zur Oberfläche verläuft. Somit kann die vorgestellte Methode eingesetzt werden, um die Geräusche der PMSM zu beeinflussen. Allerdings lässt sich die Änderung der ERP mit dem FE-Modell bisher nur qualitativ für einzelne Frequenzen abschätzen, da anstelle der Magnetkräfte eine vereinfachte harmonische Anregungskraft verwendet wird. Um die Änderung der ERP auch quantitativ mittels STI bewerten zu können, wird die Anregung mit den Magnetkräften im nächsten Schritt implementiert. Dazu müssen die radialen und tangentialen Komponenten der Magnetkräfte und deren Phasenbeziehungen für die zu untersuchende Frequenz berücksichtigt werden. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass sich der ERP-Summenpegel durch den Belag nicht verändert. Um eine stärkere Reduzierung der Pegel bei einzelnen Frequenzen sowie des ERP-Summenpegels zu erzielen, müssen neben einer Geometrieänderung weitere Modifikation an der Gehäusestruktur vorgenommen werden, wie beispielsweise zusätzliche Dämpfung, die anhand des STI-Verlaufs auf die Gehäusestruktur aufgebracht wird.

Literatur

[1] Timar, P.L.: Noise and Vibration of Electrical Machines. Elsevier, New York, 1989

[2] Grote, K.-H. und Feldhusen, J. (Hrsg.): Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, 23. Auflage, Springer, Berlin, 2011

[3] Huang, S., Aydin, M. und Lipo, T. A.: Electromagnetic vibration and noise assessment for surface mounted PM machines. Power Engineering Society Summer Meeting (2001), Vancouver, 1417–1426

[4] Habetler, T. und Divan, D.: Acoustic noise reduction in sinusoidal PWM drives using a randomly modulated carrier. IEEE Transactions on Power Electronics 6 (1991), 356–363

[5] Adams, C., Schaal, C., Bös, J. und Melz, T.: Numerical investigation of the sound power and of the structural intensity of a permanent magnet synchronous machine. Inter.noise (2015)

[6] Cremer, L. und Heckl, M: Körperschall, Springer, Berlin, 1996

[7] Marburg, S. und Nolte, B.: Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids – Finite and Boundary Element Methods. Springer, Berlin, 2008

[8] Zhu, W., Pekarek, S., Fahimi, B. und Deken, B. J.: A field reconstruction method for optimal excitation of permanent magnet synchronous machines, IEEE Transactions on Energy Conversion 21 (2006) 366–374