

# Numerische Berechnung des akustischen Verhaltens elektrischer Maschinen

Peter Huck<sup>1</sup>, Daniel Jung<sup>2</sup>, Stefan Lobmeyer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> P+Z Engineering GmbH, 80807 München, Deutschland, Email: p.huck@puz.de

<sup>2</sup> P+Z Engineering GmbH, 80807 München, Deutschland, Email: d.jung@puz.de

<sup>3</sup> TU München, Fachgebiet für Energiewandlungstechnik, 80333 München, Deutschland, Email: stefan.lobmeyer@tum.de

## Einleitung

Die Geräuschbildung elektrischer Maschinen ist in verschiedenen Branchen von großer Bedeutung. Nicht zuletzt die Automobilbranche hat ein großes Interesse daran, die Geräuschbildung elektrischer Maschinen berechnen und verstehen zu können, um anhand der Erkenntnisse ungewollte akustische Abstrahlung zu minimieren.

Um in der Lage zu sein, die Schallabstrahlung einer E-Maschine bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen, ist es nötig die Entstehung dieser von der magnetischen Flussdichte bis hin zur Oberflächengeschwindigkeit nachrechnen zu können. Ansonsten kann die Geräuschbildung einer elektrischen Maschine erst in einer späteren Entwicklungsphase untersucht werden, nachdem aufwendige und kostenintensive Prototypen erstellt wurden.

Im vorliegenden Manuskript werden numerische Methoden verwendet, um die Schallabstrahlung einer elektrischen Maschine zu berechnen. Dabei wird auf Erkenntnisse aus der Literatur und der aktuellen Forschung (u.a. [1], [2], [3]) aufgebaut.

## Theoretische Grundlagen

Nach [4], [5] und [6] ist es mithilfe von fünf Feldvektoren möglich, ein elektromagnetisches Feld vollständig darzustellen. Dabei handelt es sich um zwei magnetische und drei elektrische Größen. Die magnetische Feldstärke  $\mathbf{H}$  und die magnetische Flussdichte  $\mathbf{B}$  beschreiben das magnetische Feld, während die elektrische Feldstärke  $\mathbf{E}$ , die elektrische Flussdichte  $\mathbf{D}$  und die Stromdichte  $\mathbf{g}$  das elektrische Feld bestimmen.

Um anhand dieser Feldvektoren ein elektromagnetisches Feld zu berechnen, werden folgende, als „Maxwell’sche Gleichungen“ bekannte, Relationen benötigt:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{g} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = q_e \quad (4)$$

## Berechnung magnetischer Kräfte mithilfe numerischer Methoden

Mithilfe magnetischer Felder können Kräfte erzeugt werden. In elektromagnetischen Energiewandlern wird dieser Effekt genutzt um elektrische Energie anhand magnetischer Felder in mechanische Energie umzuwandeln.

Für die Berechnung lokaler Kraftdichten auf einer Oberfläche wird in der hier vorgestellten Untersuchung die Maxwell’sche Stresstensor Methode benutzt. Diese Methode basiert nach [4] darauf, dass die Übertragung einer Kraftwirkung durch den sogenannten Maxwell’schen Spannungen erfolgt. Diese sind bedingt durch die Wechselwirkungen zwischen atomaren Ladungsträgern und dem äußeren Feld. An Grenzflächen zeigen sich die Maxwell’schen Spannungen als mechanische Kräfte.

Da sich die elektromagnetischen Berechnungen in der hier vorgestellten Untersuchung auf zweidimensionale Berechnungen beschränken, können die lokalen Kraftdichten in normaler und tangentialer Richtung auf der Oberfläche eines Volumens folgendermaßen berechnet werden:

$$f_t = H_t B_n \quad (5)$$

$$f_n = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\mu_0} B_n^2 - \mu_0 H_t^2 \right) \quad (6)$$

## Modellierung

Die Modellierung für die numerische Berechnung des akustischen Verhaltens elektrischer Maschinen beinhaltet eine Nachbildung sowohl elektromagnetischer als auch strukturmechanischer Effekte. Für die Untersuchungen im vorliegenden Projekt wurde eine permanenterregte Synchronmaschine verwendet, welche in dem Flux-2D-Tutorium „Brushless motor with embedded magnets“ [7] benutzt wird, um die Möglichkeiten der Simulationssoftware aufzuzeigen. Die Maschine wurde für ein Elektrohybridfahrzeug entworfen und verfügt über folgende Nenndaten:

- Maximale Spannung: 500 V
- Maximales Drehmoment: 400 Nm
- Maximale Drehzahl: 6000 1/min
- Maximale Leistung: 50 kW (bei 1200 bis 1500 1/min)
- Anzahl Pole: 8

## Elektromagnetisches FE-Modell

Die Berechnung der elektromagnetischen Feldverteilung und der sich daraus ergebenden magnetischen Kräfte erfolgt mit der kommerziellen FEM-Software *FLUX 2D* von *CEDRAT*. Durch Ausnutzung der gegebenen Symmetrie der 8-poligen Maschine kann die elektromagnetische Feldverteilung anhand eines Pols berechnet werden.

## Struktur-Modell

Um anhand der Schwingungsanregung aus dem elektromagnetischen Modell die äquivalent abgestrahlte Schalleistung (ERP) berechnen zu können, muss zunächst die Verschiebung, beziehungsweise die Geschwindigkeit der Struktur an der Oberfläche berechnet werden. Dies erfolgt mittels einer Frequenzganganalyse eines 3D-Strukturmodells.

Für die Untersuchungen in diesem Manuskript wird lediglich ein Strukturmodell des Stators benötigt, die Wicklungen werden vernachlässigt. Dies hat keine Auswirkungen auf die Ergebnisse, da dieses Modell lediglich für qualitative Vergleiche verwendet wird, weshalb eine genauere Modellierung für dieses Modell keinen zusätzlichen Mehrwert erzielen würde.

## Verfahrensentwicklung zur Ermittlung und Übertragung einer magnetischen Anregung zwischen FE-Modellen

Die Berechnung elektromagnetischer Kräfte im vorliegenden Manuskript erfolgt mittels einer Auswertung des Feldes am Rand magnetisch leitender Materialien. Der Effekt der Magnetostraktion wird vernachlässigt. Nach [8] hat diese Vereinfachung relativ geringe Auswirkungen auf das akustische Verhalten einer elektrischen Maschine, da die primäre Ursache der Geräuschbildung elektrischer Maschinen die magnetische Kraftanregung darstellt.

Für die Berechnung der Kraftanregung an Randflächen magnetisch leitender Materialien anhand der Feldverteilung einer elektromagnetischen FE-Berechnung müssen dort Pfade gelegt werden, entlang derer sich Punkte zum Auslesen der benötigten Feldgrößen befinden. In Abbildung 1 sind diese Pfade mit den entsprechenden Punkten im Luftspalt einer elektrischen Maschine zu sehen.

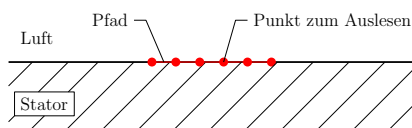


Abbildung 1: Pfade zum Auslesen der Feldgrößen im Luftspalt

Für die Berechnung der Kraftdichte an den Randschichten zwischen zwei Materialien werden folgende skalare Größen aus der elektromagnetischen Feldverteilung

benötigt:

- normale Komponente der magnetischen Flussdichte  $B_n$
- tangentielle Komponente der magnetischen Feldstärke  $H_t$

Mit  $B_n$  und  $H_t$  können anhand den Gleichungen (5) und (6) die Kraftdichten normal und tangential zur Oberfläche berechnet werden. Jedoch handelt es sich bei den berechneten Kraftdichten um die skalaren Komponenten des lokalen Koordinatensystems tangential und normal zur Oberfläche. Um die Kraftdichten später auf ein Strukturmodell übertragen zu können, müssen diese in ein globales Koordinatensystem überführt werden. Hierzu wird die Oberflächennormale benötigt.

Nachdem die im Zeitbereich berechneten lokalen Komponenten der Kraftdichte auf das globale Koordinatensystem übertragen wurden, werden sie mittels einer Fast-Fourier-Analyse in den Frequenzbereich transformiert, womit das Datenvolumen deutlich reduziert wird. Nun müssen die Kraftdichten von den Knoten der Pfade des zweidimensionalen elektromagnetischen Modells auf die Elementoberflächen des dreidimensionalen strukturmechanischen Modells projiziert werden. Diese Datenübertragung zwischen verschiedenen Netzen wird auch Mapping genannt.

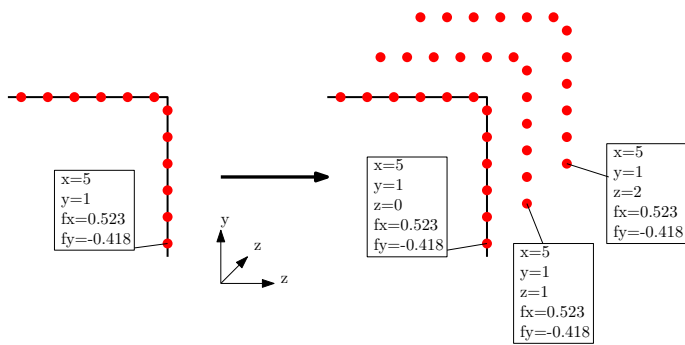
Die Kopplung zwischen den elektromagnetischen und strukturmechanischen FE-Netzen erfolgt einseitig. Die Ergebnisse der elektromagnetischen Berechnung werden auf das strukturmechanische Modell übertragen. Eine Rückkopplung der Geometrieverformung wird nicht durchgeführt, denn laut [9] und [10] sind die Auswirkungen der äußerst geringen Geometrieverformung auf den magnetischen Kreis zu vernachlässigen.

Für die Kopplung müssen zunächst die 2D-Ergebnisse in 3D-Ergebnisse überführt werden. Jedes Ergebnis aus dem 2D-Netz besteht aus x-Koordinate, y-Koordinate und den Kraftdichtekomponenten in x- und y-Richtung. Nun werden jedem Ergebnis  $n$  z-Koordinaten zugewiesen, womit eine dritte Dimension erzeugt wird (siehe Abbildung 2). Da es sich bei den Ergebnissen aus dem elektromagnetischen Modell um eine spezifische Größe handelt und angenommen wird, dass der Kraftdichteverlauf entlang der z-Achse nicht variiert, ist eine Modifizierung der Werte bei der Zuweisung der z-Koordinate nicht nötig.

Für das Mapping selbst wird in den vorliegenden Untersuchungen der *THESEUS*-Transformer verwendet. Der *THESEUS*-Transformer ist ein Produkt von P+Z Engineering und ermöglicht es, Werte zwischen verschiedenen Netzen zu übertragen.

## Untersuchung verschiedener Auslesemethoden

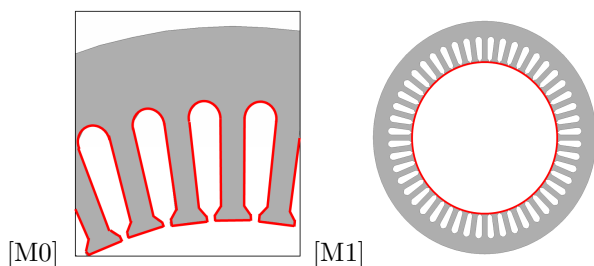
Der Vorgang der Kräftermittlung und deren Übertragung auf das FE-Strukturmodell ist nicht der rechenintensivste Prozess in der vorgestellten Methode, ist aber nicht



**Abbildung 2:** Überführung der 2D-Ergebnisse aus dem elektromagnetischen-Modell in 3D-Ergebnisse

zu vernachlässigen, da er unter Umständen auch eine Bearbeitung großen Datenmengen bedeuten kann. Deshalb wird im Folgenden untersucht, inwiefern dieser Prozess vereinfacht werden kann indem lokale Kräfte an der Statoroberfläche vernachlässigt werden.

Um die Auswirkungen einer solchen Vereinfachung beurteilen zu können werden zwei unterschiedliche Auslesemethoden definiert, anhand derer die äquivalent abgestrahlte Schalleistung berechnet wird.



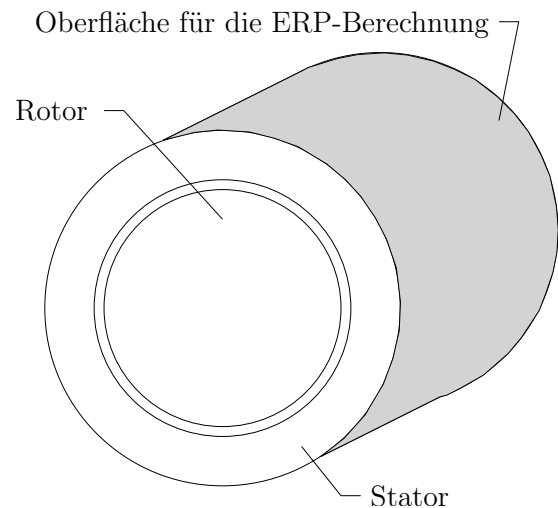
**Abbildung 3:** Die verschiedenen Auslesemethoden

Auslesemethode M0 berücksichtigt die magnetischen Kräfte an der gesamten Oberfläche des Stators. Diese Auslesemethode wird im Folgenden als Referenzmethode benutzt, da sie keine Flächen an der Oberfläche der Maschine vernachlässigt. Auslesemethode M1 berücksichtigt ausschließlich die Kräfte am Luftspalt.

Die Auswertung der Auslesemethoden erfolgt anhand zweier unterschiedlicher Betriebspunkte der elektrischen Maschine. Um bei der Beurteilung der Auslesemethoden eine betriebspunktabhängige Aussage treffen zu können, wird die Maschine einmal unter Volllast und einmal unter Teillast simuliert.

Die Drehzahl beträgt bei beiden Lastfällen 1.200 1/min, jedoch wird bei Volllast eine Leistung von 50 kW und bei Teillast eine Leistung von 25 kW umgesetzt. Die ERP wird bei der Auswertung der Auslesemethoden an der Oberfläche des Statorblechpakets, das bedeutet am äußeren Radius des Stators, berechnet. Abbildung 4 zeigt die Fläche, welche für die Berechnung der ERP verwendet wird.

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Berechnungen beider Lastfälle unter Verwendung der unterschied-



**Abbildung 4:** Oberfläche, an der die äquivalent abgestrahlte Schalleistung berechnet wird

lichen Auslesemethoden aufgelistet. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass deutliche Unterschiede zwischen den Auslesemethoden bestehen, zudem sind die Ergebnisse abhängig vom Betriebspunkt der Maschine. Unter Teillast ist die Abweichung 34,11% und wird die Maschine unter Volllast betrieben so weicht das Ergebnis um 38,11 % voneinander ab.

Method	Volllast		Teillast	
M0	42,27 mW		26,46 mW	
M1	27,08 mW	-38,11%	17,43 mW	-34,11%

**Tabelle 1:** Äquivalent abgestrahlte Schalleistung bei verschiedenen Lastfällen unter Verwendung der Auslesemethoden

Der Unterschied zwischen den Lastfällen lässt sich dadurch erklären, dass die magnetischen Kräfte stark von der Richtung des magnetischen Flusses abhängen. Besonders an Stellen, an denen magnetische Feldkomponenten aus dem magnetisch leitenden Material austreten, entstehen hohe Kräfte. Unter Volllast weist das Statorblechpaket eine höhere Sättigung auf als unter Teillast. Diese erhöhte Sättigung hat wiederum vermehrte Streueffekte zur Folge. Eine Streuung bedeutet stets, dass magnetische Flüsse aus dem Statorblechpaket austreten, wodurch an den in M1 vernachlässigten Oberflächen erhöhte magnetische Kräfte entstehen.

### Zusammenfassung

Im vorliegenden Manuskript wird ein Verfahren vorgestellt, welches eine Berechnung des akustischen Verhaltens elektrischer Maschinen ermöglicht. Hierfür werden zunächst magnetische Kräfte anhand einer numerisch berechneten elektromagnetischen Feldverteilung ermittelt. Außerdem beinhaltet das Verfahren die Übertragung der magnetischen Kräfte zwischen FE-Netzen, um die magnetischen Kräfte für eine Berechnung mit anderen Solvern verwenden zu können. Dadurch

kann die durch die magnetische Anregung ausgelöste Oberflächenverschiebung ermittelt werden, anhand derer das akustische Verhalten durch die äquivalente abgestrahlte Schalleistung berechnet wird.

Anhand des entwickelten Verfahrens wird untersucht inwiefern Oberflächen an der Maschine existieren, an denen die magnetischen Kräfte als Anregung des akustischen Verhaltens vernachlässigt werden können, um somit eine Vereinfachung des Verfahrens zu erzielen. Hierfür wurden zwei verschiedene Auslesemethoden definiert. Eine Referenzmethode, welche keine Kräfte an der Innenoberfläche vernachlässigt und eine Methode, die nur Kräfte am Luftspalt berücksichtigt. Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass keine magnetische Kraft, unabhängig von Betrag oder Richtung für eine akustische Untersuchung vernachlässigt werden darf. Diese Erkenntnisse sind jedoch abhängig von der Geometrie der Maschine. Um den Maschineneinfluss zu verifizieren, ist es im nächsten Schritt nötig andere Maschinen zu untersuchen und somit eine allgemein gültige Aussage treffen zu können.

## Literatur

- [1] Schlensook, C.; van Riesen, D.; Hameyer, K. et al.: Deformation Analysis of Induction Machines by Means of Analytical and Numerical Methods  
IEEE Trans. Mag., volume 13, Juni, 2008
- [2] Neves, C. G. C.; Carlson, R.; Sadowski, N. et al.: Calculation of Electromagnetic-Mechanic-Acoustic Behavior of a Switched Reluctance Motor  
IEEE Trans. Mag., volume 36, Juli, 2000
- [3] Dupont, J. B.; Bouvet, P.: Simulation of the airborne and structure-borne noise of electric powertrain: validation of the simulation methodology  
AIA-DAGA Meran, 2013
- [4] von Weiss, A.: Die elektromagnetischen Felder  
Vieweg, Braunschweig, 1983, ISBN: 3-528-04225-7
- [5] Lowther, D.A.; Silvester, P.P.: Computer aided design in magnetics  
Springer Verlag, Berlin, 1986, ISBN: 0-387-15756-5
- [6] Blume, S.: Theorie elektromagnetischer Felder  
Hüthig, Heidelberg, 1991, ISBN: 3-7785-2070-9
- [7] Flux 2D Application - Brushless motor with embedded magnets - technical paper  
FLUX, Meylan France, 2010, Ref.: K 2 05 - F - 103 - EN -03/10
- [8] Arians, G.: Numerische Berechnung der elektromagnetischen Feldverteilung, der strukturdynamischen Eigenschaften und der Geräusche von Asynchronmaschinen  
Shaker, Aachen, 2001, ISBN: 3-8265-9287-5
- [9] Rainer, S.; Biro, O.; Weilharter, B.: Weak Coupling Between Electromagnetic and Structural Models for

Electrical Machines

IEEE Trans. Mag., volume 46, August, 2010

- [10] Delaere, D.; Sas, P.; Ronnie, B.; Hameyer, K.: Weak Coupling of Magnetic and Vibrational Analysis Using Local Forces  
IEEE IEMD, 1999