

NUMERISCHE BERECHNUNG DES KÖRPERSCHALLS VON ELEKTRISCHEN MASCHINEN

N. Domann

1 MOTIVATION

Elektrische Maschinen sind sehr häufig anzutreffende Energiewandler. Den Vorteilen von elektrischen Maschinen, wie hoher Wirkungsgrad als Energiewandler, gute Skalierbarkeit der Leistung (Milliwatt bis Gigawatt) und niedrigem Verschleiß stehen je nach Anwendung auch Nachteile gegenüber wie Gewicht und Kosten. In zunehmendem Maße spielen auch die Geräusche von elektrischen Maschinen eine große Rolle. Diese Geräusche müssen aus verschiedenen Gründen begrenzt werden. Zur Einhaltung von Normen im Arbeitsschutz darf die freigesetzte Lautstärke bestimmte Grenzen nicht überschreiten, bei Komfortanwendungen leidet der Kundennutzen unter ungewünschten Geräuschen und schließlich können hohe Schallpegel auch zu Schäden an Anlagen führen.

Im Elektromaschinenbau wird die Geräuschproblematik von elektrischen Maschinen seit längerer Zeit untersucht. In den 50er Jahren wurden verbesserte analytische Ansätze zur Berechnung von Geräuschen entwickelt [1] und seitdem ständig erweitert. Mit zunehmender Komplexität des Aufbaus elektrischer Antriebe werden zuverlässige Aussagen mit rein analytischen Ansätzen immer schwieriger. Insbesondere eine exakte Vorausberechnung der von der Maschine verursachten Schallpegel ist kaum möglich. Hier bietet die numerische Berechnung mithilfe der Finiten-Elemente-Methode (FEM) eine Möglichkeit, im Entwurfsprozess die akustischen Eigenschaften des Elektromotors oder sogar des Gesamtsystems mit guter Näherung zu bestimmen.

2 URSACHE VON GERÄUSCHEN IN ELEKTRISCHEN MASCHINEN

Die Ursachen von Geräuschen in elektrischen Maschinen sind vielfältig. In [2] ist eine Klassifizierung vorgenommen worden (**Bild 1**). Grundsätzlich kann zwischen Geräuschen elektromagnetischen Ursprungs, mechanischen Ursprungs, durch fluiddynamische Effekte und aufgrund der Speisung der Maschine unterschieden werden. Welche dieser Quellen in einem praktischen Fall die entscheidende ist, lässt sich nicht generell beantworten. Allgemein muss bei hohen Drehzahlen und Luftkühlung mit starken Geräuschen durch Luftverwirbelungen an der Maschinenstruktur bzw. dem Lüfter gerechnet werden. Sehr häufig treten Probleme durch Körperschall auf, welcher auch durch ausgedehnte Strukturen geleitet werden kann und schließlich durch Schallabstrahlung hörbar wird. Körperschall wird größtenteils durch elektromagnetische und mechanische Effekte aber auch durch die Speisung mit Oberschwingungsreichen Strömen hervorgerufen. Eine Unterscheidung der Effekte ist

mitunter kaum möglich, da ein unrunder Lauf des Rotors durch eine Verformung der Welle einen kleineren Luftspalt zur Folge hat und dieser zu unsymmetrischen Kräften in der Maschine führen kann.

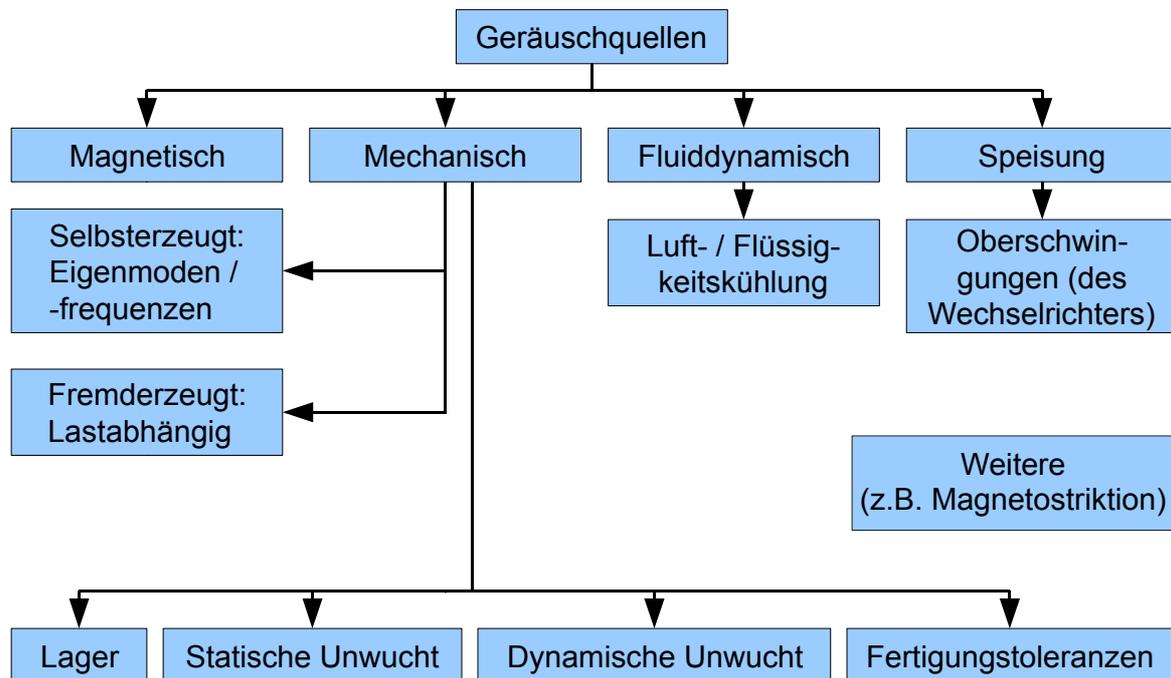


Bild 1: Klassifikation möglicher Geräuschquellen in elektrischen Maschinen

Der grundlegende aktive Prozess bei der Schallerzeugung im Magnetkreis ist die Energieumwandlung von elektrischer in mechanische Energie. Die daraus resultierenden Kräfte erregen die mechanische Struktur und führen zu Schwingungen, welche schließlich zur Schallabstrahlung führen. Zur Berechnung des akustischen Verhaltens ist also zunächst die Kenntnis der Kräfte erforderlich.

3 FELD- UND KRAFTBERECHNUNG

Mit der kostengünstigen Verfügbarkeit von Rechenleistung hat die numerische Berechnung bei der Entwicklung von elektrischen Maschinen eine große Verbreitung gefunden. Somit wird eine Berücksichtigung von nichtlinearen Effekten möglich, welche bei hochausgenutzten Maschinen eine wichtige Rolle spielt. Die Berechnung von Kräften wird in typischer Finite-Elemente-Software durch Anwendung des Maxwell'schen Spannungstensors [3] durchgeführt. Auf diesem Weg können aber im Allgemeinen weder örtlich korrekte Kräfte noch im Material angreifende Kräfte berechnet werden. Diese Unzulänglichkeit wurde durch ein Script gelöst, welches eine Auswertung der Feldlösung vornimmt. **Bild 2** zeigt den Ausschnitt einer Beispielmaschine mit Oberflächenmagneten. In **Bild 3** ist die Feldlösung für den entsprechenden Ausschnitt gezeigt (es wurde zur Veranschaulichung ein sehr grob vermaschtes Modell genutzt). Aus der Feldlösung ergeben sich die Kraftdichtevektoren in **Bild 4**. Es werden Kräfte an den Grenzen von finiten Elementen berechnet. An der Grenzfläche zum Luftspalt greifen Kräfte an. Ebenso existieren Kräfte an den Grenzen

zwischen unterschiedlich gesättigten Bereichen des Eisenkreises. Aus diesen Kräften resultieren Verzerrungen der Struktur, welche in **Bild 5** dargestellt sind. Dort ist überlagert sowohl die unverformte, als auch die verformte Geometrie zu sehen.

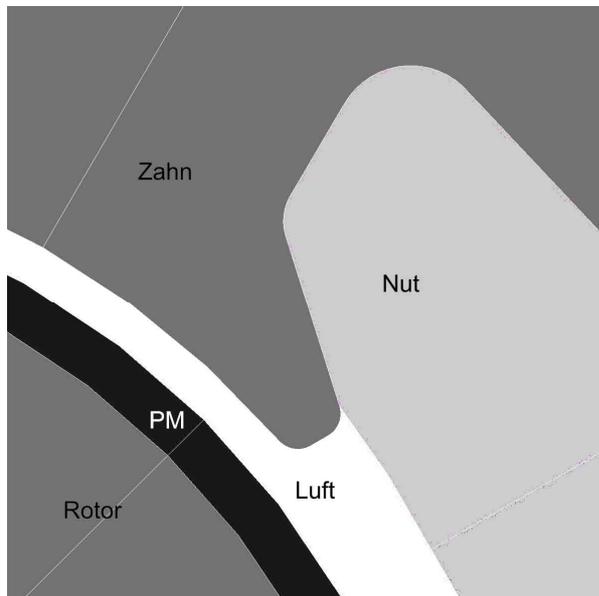


Bild 2: Geometrie der Beispielmachine

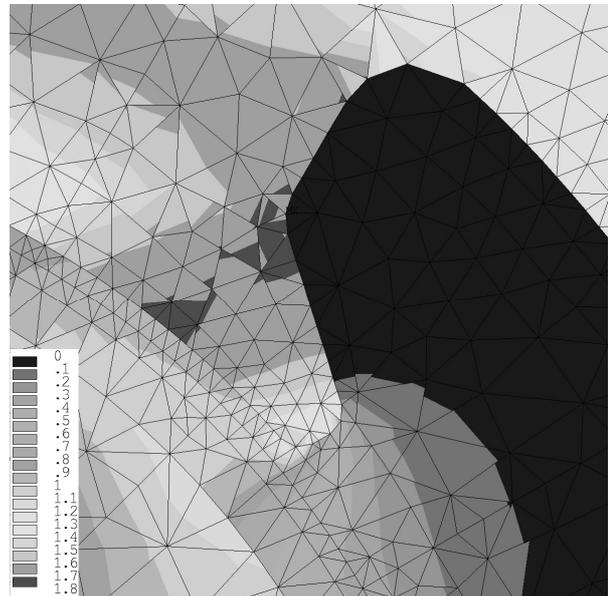


Bild 3: Flussdichteverteilung

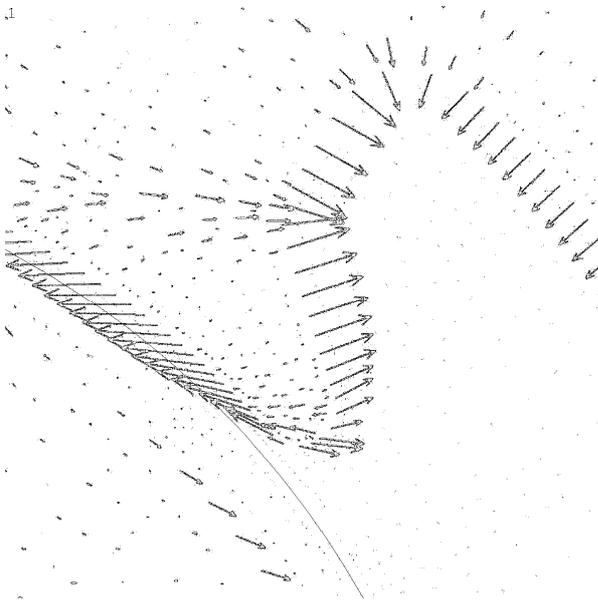


Bild 4: Kraftdichtevektoren

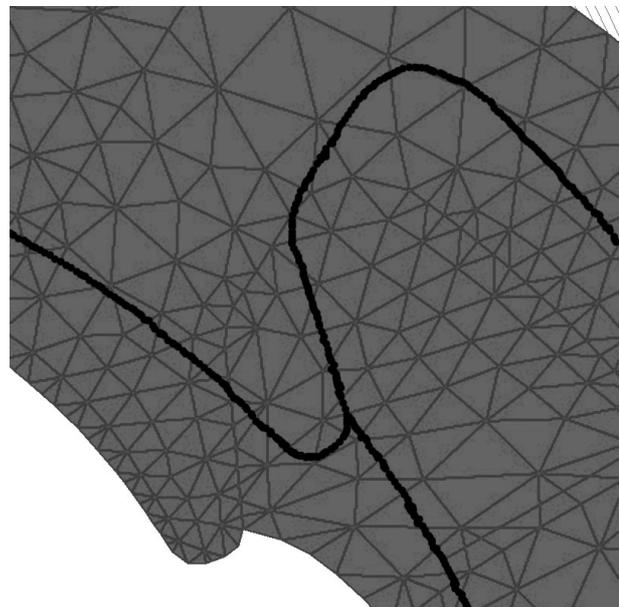


Bild 5: Deformierte und originale Struktur

4 STRUKTURMECHANISCHE BERECHNUNG DER VERZERRUNGEN EINER ELEKTRISCHEN MASCHINE

Die in der FE-Rechnung ermittelten Kräfte können nun als Anregung für eine mechanische Rechnung genutzt werden. Eine statische Rechnung gibt Aufschluss über die Art der sich einstellenden Verformung der berechneten Maschinenstruktur. Bei Durchführung dieser Rechnung für mehrere Drehwinkel kann für die Außenlinie der Maschine die Verformung über den Drehwinkel errechnet werden. In **Bild 6** ist beispielhaft die Deformation für einen bestimmten Winkel gezeigt. Die sich einstellenden Verformungen betragen nur wenige Mikrometer und sind stark überhöht dargestellt.

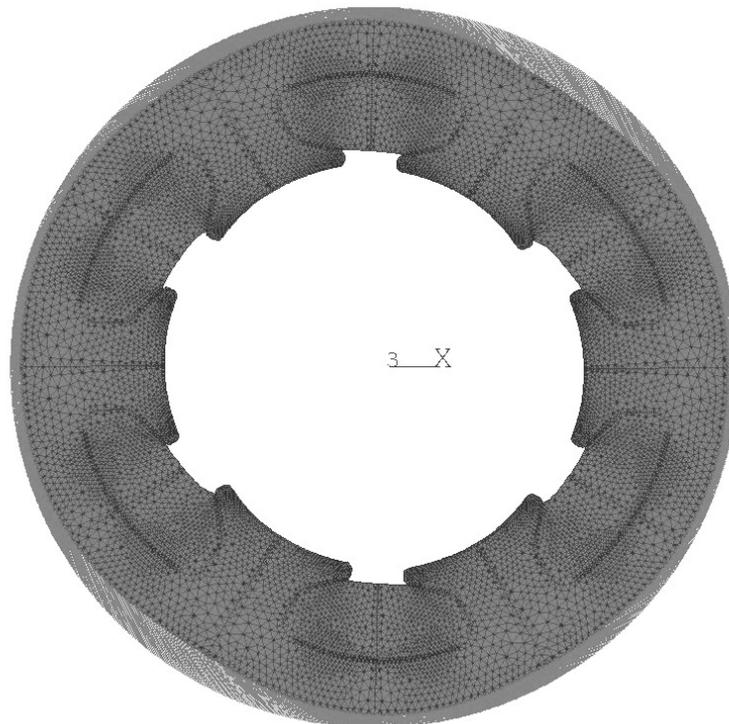


Bild 6: Auf Sichtbarkeit skalierte Verzerrungen des Stators der Beispielmachine

Bei diesen Rechnungen wird die mechanische Dämpfung nicht berücksichtigt und es wird angenommen, dass die Struktur der Anregung instantan folgen kann. Somit wird die Trägheit der Struktur nicht berücksichtigt. Diese Annahme ist aufgrund der geringen Amplituden berechtigt. Eine Modellierung der Dämpfung ist bei laminierten Strukturen relativ aufwendig, da die Reibung zwischen den Blechen des Eisenkreises von der Art der Beschichtung und der Kraft zwischen den Blechen abhängt. Diese Kräfte können durch Verspannen der Bleche, Verbacken der Laminierung, Verschweißung der Bleche und Kombinationen dieser Möglichkeiten entstehen. Zuverlässige Aussagen zur Dämpfung können nur durch aufwendige Messungen ermittelt werden. Soll die Dämpfung berücksichtigt werden, muss entweder eine harmonische Rechnung für jede interessierende Anregungsfrequenz oder eine transiente Berechnung durchgeführt werden, welche relativ viel Rechenzeit benötigen. Für die Punkte auf dem Umfang der Maschine wurde über die Drehung die Verzerrung berechnet. Mittels einer Fourieranalyse wurde für jeden Punkt das örtlich geltende Spektrum bestimmt, sowie aus diesen der quadratische Mittelwert gebildet. Dieses gemittelte Spektrum erlaubt

qualitative Aussagen über das Körperschallverhalten. Als Beispielmachine wurde eine PPSM (Polyphasige-Permanentmagneterregte-Synchronmaschine) gewählt, welche aus zwei Elementarmaschinen besteht. Pro Elementarmaschine liegen zwei Pole, drei Stränge und drei Nuten vor, so dass sich eine 2/3 Anordnung ergibt. In **Bild 7** ist das Verzerrungsspektrum der Beispielmachine für ideale symmetrische Speisung mit sinusförmigem Strom und sinusförmigem Erregerfeld dargestellt. Als Ordnungen treten neben einer nullten Ordnung, welche aus der Tatsache erwächst, dass die magnetischen Kräfte die Maschine zusammenziehen, noch die 4., 8. und 12. Ordnung (jeweils auf die gesamte Maschine bezogen) auf. An dieser Stelle wird nicht weiter auf die analytisch begründbaren Ursachen eingegangen. Diese sind beispielsweise in [4] ausgearbeitet. Daneben (**Bild 8**) ist das Spektrum derselben Maschine für den Fall dynamischer Unwucht angegeben. Dies bedeutet, dass sich synchron mit der Drehung des Rotors der Luftspalt auf einer Seite des Rotors verringert und auf der anderen entsprechend vergrößert. Es wurde angenommen, dass der Luftspalt um 10 % variiert. **Bild 9** zeigt das Spektrum für einen Rotor, bei dem einer der vier Permanentmagnete 10 % stärker magnetisiert ist als die anderen, wobei ebenfalls ein sinusförmiger Feldverlauf erzeugt wird. Schließlich ist in **Bild 10** das Spektrum für ein Erregerfeld aus Grundwelle und einer überlagerten Oberwelle dritter Ordnung dargestellt.

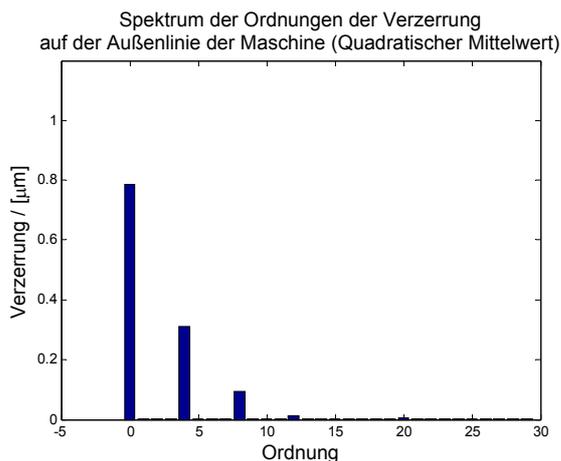


Bild 7: Verzerrungsspektrum der idealen Maschine

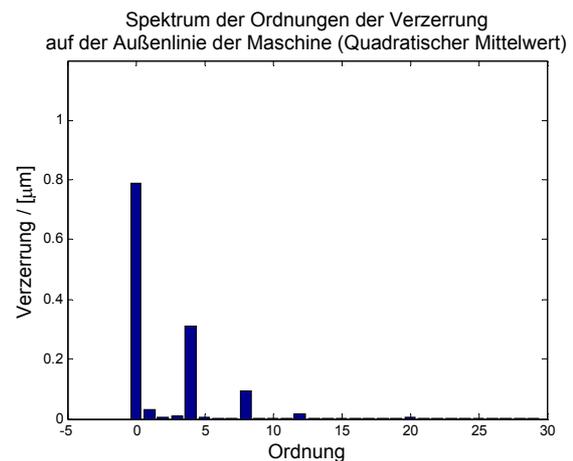


Bild 8: Verzerrungsspektrum bei dynamischer Unwucht

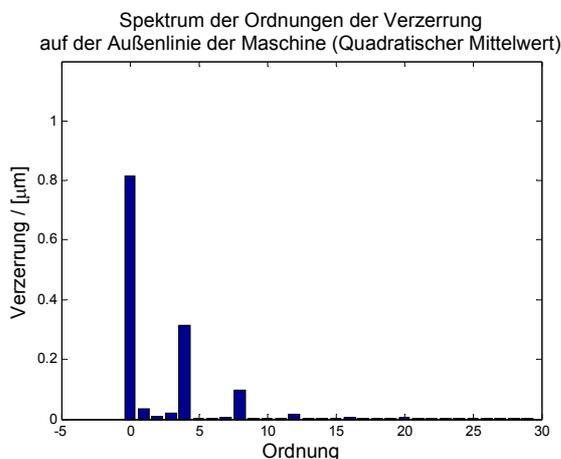


Bild 9: Verzerrungsspektrum bei einem stärker magnetisierten Magnetpol

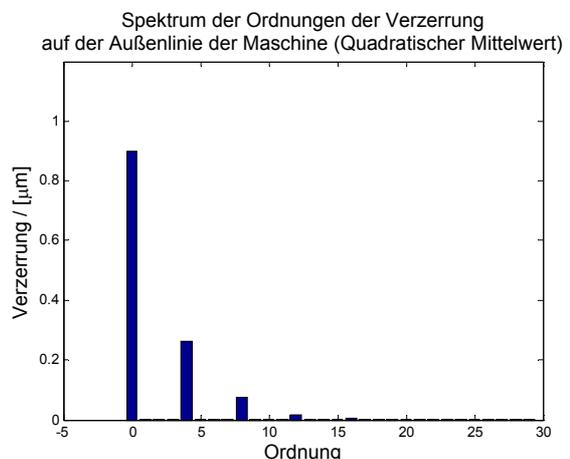


Bild 10: Verzerrungsspektrum für ein Erregerfeld mit dritter Ordnung

Dabei nähert sich das Erregerfeld in seiner Form einem Trapez an. Hier ist auffallend, dass kein wesentlicher Anstieg der Oberwellenamplituden beobachtbar ist bzw. die Amplituden sogar kleiner werden. Da das Erregerfeld die gleiche Amplitude hat wie das Feld der Ausgangsmaschine, ist der Gesamtenergieinhalt größer als bei dieser, somit entspricht die höhere Amplitude der nullten Ordnung den Erwartungen.

5 AUSBLICK

Es wurden statische Rechnungen durchgeführt, welche eine Reihe von Ergebnissen bezüglich auftretender Kraftanregungen bei nichtidealen Maschinen liefern. Im Weiteren ist die Nutzung von harmonischen und transienten Modellen zur wirklichkeitsnäheren Modellierung anzustreben. Insbesondere bei hohen Frequenzen ist eine Berücksichtigung der Trägheit der massebehafteten Maschinenstruktur notwendig. Gleichzeitig kann eine Dämpfung in der Struktur berücksichtigt werden. So könnten die Ergebnisse einer transienten elektromagnetischen Rechnung mit Spannungsspeisung als Anregung für eine mechanische Berechnung genutzt werden. Dadurch könnten beispielsweise die Auswirkungen eines Sprungs in der Drehmomentanforderung untersucht werden. Der nächste Schritt wird die Errechnung des Körperschallpegels sein.

Die Untersuchung von Luftschall ist ein weiterer Forschungsbereich. Dabei bieten sich neben der FEM die BEM (Boundary-Element-Methode) oder deren Verbesserung FMBEM (Fast-Multipole-Boundary-Element-Methode) an. Da bei der FEM der gesamte interessierende Luftraum berechnet werden muss, stellt diese Methode sehr hohe Forderungen bezüglich Rechenleistung, so dass diese auf kleine Modelle begrenzt bleiben wird. Mithilfe der FMBEM kann die Schallabstrahlung einer Struktur in Richtung eines Empfängers effizient berechnet werden, allerdings sind die Untersuchungen derzeit auf den Frequenzbereich begrenzt.

LITERATUR

- [1] H. Jordan: *Geräuscharme Elektromotoren*, Giradet Essen, 1950
- [2] P. Vijayraghavan, R. Krishnan: *Noise in Electric Machines: A Review*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 5, 1999
- [3] Release 11.0 Documentation for ANSYS: *Maxwell Stress Tensor*, Ansys Inc.
- [4] S. Huang, M. Aydin, T. A. Lipo: *Electromagnetic Vibration and Noise Assessment for Surface Mounted PM Machines*, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2001