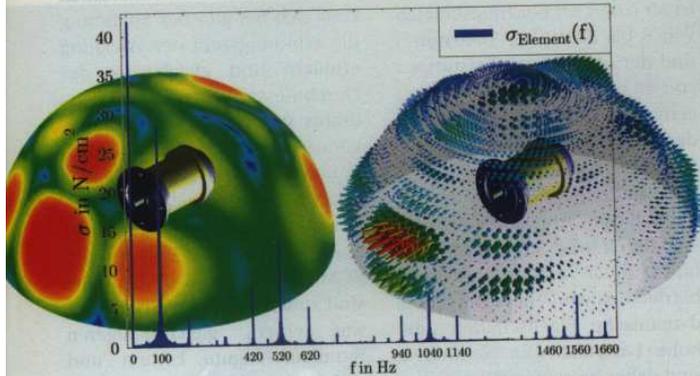


# Geräusche durch Elektromagnetismus

## Bewertung und Optimierung elektrischer Maschinen mittels numerischer Simulation



Christoph Schlensok, Benedikt Schmülling, Kay Hameyer

**Störende Schwingungen und laute Geräusche von elektrischen Maschinen gewinnen zunehmend an Bedeutung. Es ist daher erforderlich, bereits bei der Auslegung und Dimensionierung das strukturdynamische und akustische Verhalten des Antriebs abschätzen zu können. Ein geeignetes Werkzeug hierfür ist die numerische Simulation. Mit ihrer Hilfe können Antriebsvarianten strukturiert bewertet werden.**

Die physikalischen Zusammenhänge bei der Geräuschanregung – ausgehend von einer elektromagnetischen Kraftanregung, über die Verformung von Maschinenteilen bis hin zur Berechnung des abgestrahlten Schalls – beschreiben ein „multi-physics“-Problem, das es zu lösen gilt. Zentral steht hier die elektromagnetische Feldberechnung, aus der als Ergebnis die Zugkraftwellen, die beispielsweise das Gehäuse einer Maschine zu Schwingungen anregen, bestimmt werden. Die periodische Verformung und Bewegung der Gehäuseoberfläche führt zur Abstrahlung von Luftschall, der als störend wahrgenommen werden kann.

Zum numerischen „Werkzeugkasten“, der notwendig ist, um die Schwingungen und Geräusche elektrischer Maschinen bewerten zu können, gehört eine Reihe von Software-Programmen, die miteinander gekoppelt und richtig aufeinander abgestimmt werden müssen. Dies erfordert eingehende Kenntnisse über die Methoden und deren Implementation. Aus diesem Grund ist am Institut für elektrische Maschinen der RWTH Aachen (IEM) ein eigener für alle Maschinentypen (Transformatoren, rotierende Maschinen wie Asynchron- und Synchron-, Gleichstrom- und Reluktanzmaschinen, Aktuatoren und andere elektromagnetische Energiewandler) einsetzbarer „Werkzeugkasten“ entwickelt worden [2, 7-13]. Die Struktur einer vollständigen akustischen „multi-physics“-Simulationskette ist in Bild 2 schematisch dargestellt [8,12]. Zunächst wird ein elektromagnetisches Finite Elemente Modell (FE-Modell) einer Maschine simuliert. Hier können durch eine systematische, parametergesteuerte Modellbildung verschiedenste Geometrievarianten und Betriebsweisen berücksichtigt werden. Dies erlaubt bei Bedarf eine umfassende Analyse der Auswirkungen von fertigungsbedingten Toleranzen [7]. Das elektromagnetische Modell stellt Zugkraftanregungen der Statorzähne zur Verfügung, die als Eingangsgröße für das strukturdynamische FE-Modell verwendet werden. Im strukturdynamischen, mechanischen Modell wiederum können verschiedene Materialien oder Geometrievarianten hinsichtlich der entstehenden Schwingungen untersucht werden. Dabei werden die im elektromagnetischen Modell betrachteten Modellvarianten als Parameter berücksichtigt. Schließlich wird die Vielzahl dieser verschiedenen Schwingungsanregungen in einem akustischen Randelemente-Modell (BEM-Modell) in Bezug auf ihre Schallabstrahlung analysiert [8,10]. Die akustische Rechenkette erlaubt somit die a-priori Analyse von unterschiedlichsten Maschinenvarianten bei verschiedenen Betriebsbedingungen (z. B. Netz- und Umrichterbetrieb). Eine gezielte Optimierung der Maschine erfolgt auf der Basis dieses „multi-physics“-Problems. Als Ergebnisgrößen liegen Schalldruck, Schallleistung, Schallintensität und Schallschnelle vor. Im Folgenden werden die drei Glieder der akustischen Simulationskette erläutert.

### Elektromagnetische Feldberechnung

Die FEM ermöglicht die Simulation sowohl zwei- als auch dreidimensionaler elektromagnetischer Feldprobleme, die statisch, zeit-harmonisch oder transient sein können. Folglich ist zunächst festzustellen, welche Art von elektromagnetischem Problem vorliegt. Handelt es sich bei der zu untersuchenden elektrischen Maschine um eine lange Maschine, so dass die Stirneffekte vernachlässigbar sind, und ist die Flussführung in der Ebene senkrecht zur Achse, so kann auf ein zweidimensionales Modell zurückgegriffen werden. Im Allgemeinen muss in den verbleibenden Fällen ein dreidimensionales Modell verwendet werden. Die Simulation zweidimensiona-



**Autor:** Dr.-Ing. Christoph Schlensok ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen



**Autor:** Dipl.-Ing. Benedikt Schmülling ist wissenschaftlicher Assistent am IEM der RWTH Aachen



**Autor:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer ist Direktor des IEM und Inhaber des Lehrstuhls für Elektromagnetische Energiewandlung an der RWTH Aachen

Formelzeich

$n$
$\Delta t$
$\Delta \alpha$
$B$
$\theta$
$\bar{\lambda}$
$\sigma$
$N$
$N_e$
$N_s$
$f_j$
$\vec{u}$
$\varepsilon$
$\sigma$
$H$
$E$
$\mu$
$C$
$D$
$F$
$K$
$M$
$\omega$
$r$
$p$
$k$
$H$
$G$
$\vec{v}$
$c$
$f$

Tabelle: Erl

ler Modell

■ Die Mod

■ Die Dau

ist etwa

tionszeit

■ Die Nac

Quersch

Die Ver

dells mit

sionaler

zweckm

Exemplar

Käfigläufe

beschrieb

len mittel

werden. B

läutert. D

steht aus

und der F

und Stato

den Mode

gebender

men und

Die el

führt. So

quasi-sta

Simulatio

 $n$  und de $\Delta \alpha = \frac{180}{60}$ 

weiterge

bestromt

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
$n$	$\text{min}^{-1}$	Drehzahl
$\Delta t$	s	Simulationszeitschrittweite
$\Delta \alpha$		Rotorverdrehwinkel
$B$	$\text{Vs/m}^2$	magnetische Induktion
$\theta$		transienter Faktor
$\vec{A}$	$\text{Vs/m}$	magnetisches Vektorpotenzial
$\sigma$	$\text{N/cm}^2$	Oberflächenkraftdichte
$N$		Anzahl der Simulationszeitschritte
$N_r$		Rotornutzahl
$N_s$		Statornutzahl
$f_s$	$1/\text{s}$	Statorfrequenz
$\vec{u}$	m	Vektor der Verformung
$\epsilon$		Verzerrung
$\sigma$	$\text{N/cm}^2$	Spannung
$H$		Hookesche Matrix
$E$	$\text{N/m}^2$	Elastizitätsmodul
$\mu$		Querkontraktionszahl
$C$		Dämpfungsmatrix
$D$		Vektor der Knotenverschiebung
$F$		Matrix der Kraftanregung
$K$		Steifigkeitsmatrix
$M$		Massenmatrix
$\omega$	$1/\text{s}$	Kreisfrequenz
$r$		Modenzahl der Verformung
$p$	$\text{N/m}^2$	Schalldruck
$k$		Wellenzahl
$H$		Systemgleichung zur Schallberechnung
$G$		Systemgleichung zur Schallberechnung
$\vec{v}$	$\text{m/s}$	Vektor der Schallschnelle
$c$	$\text{m/s}$	Schallgeschwindigkeit
$f$	$1/\text{s}$	Frequenz

Tabelle: Erläuterung der verwendeten Formelzeichen

ler Modelle weist gegenüber dreidimensionalen Vorteile auf:

- Die Modelle sind erheblich kleiner, meist um mehr als Faktor 10.
- Die Dauer von FEM-Simulationen elektromagnetischer Modelle ist etwa quadratisch mit der Elementzahl. Daher sind die Simulationszeiten von 2D-Modellen erheblich geringer.
- Die Nachbildung der Geometrie ist erheblich genauer, da im Querschnitt der Maschine mehr Elemente verwendet werden. Die Vernetzung des Querschnitts eines dreidimensionalen Modells mit der gleichen Elementgröße wie im Fall eines zweidimensionalen Modells ergibt bezüglich der Simulationsdauer nicht zweckmäßig große Elementzahlen.

Exemplarisch werden in diesem Beitrag ein Asynchronmotor mit Käfigläufer (ASM) und eine geschaltete Reluktanzmaschine (SRM) beschrieben. Diese beiden Motoren können mit geeigneten Modellen mittels zweidimensionaler FEM elektromagnetisch simuliert werden. Beispielhaft wird dies für die ASM im Folgenden näher erläutert. Das elektromagnetische FE-Modell der ASM in Bild 3 besteht aus Stator- und Rotorblech, den Aluminiumstäben im Rotor und der Kupferwicklung im Stator, dem Luftspalt zwischen Rotor und Stator und einer umgebenden Luftschicht um den Stator. An den Modellgrenzen (an der Welle und am äußeren Umfang der umgebenden Luft) wird das magnetische Feld als tangential angenommen und eine Randbedingung eingefügt.

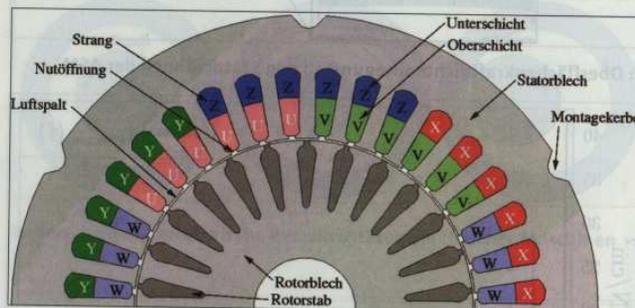
Die elektromagnetische Simulation wird im Zeitbereich durchgeführt. So wird die ASM für eine festgelegte Anzahl von Zeitschritten quasi-stationär mit einem transienten Solver simuliert. Bei jedem Simulationszeitschritt wird in Abhängigkeit von der Rotordrehzahl  $n$  und der Zeitschrittweite  $\Delta t$  der Rotor um den Winkel

$$\Delta \alpha = \frac{180^\circ}{60} \cdot (n \cdot \Delta t) \quad (1)$$

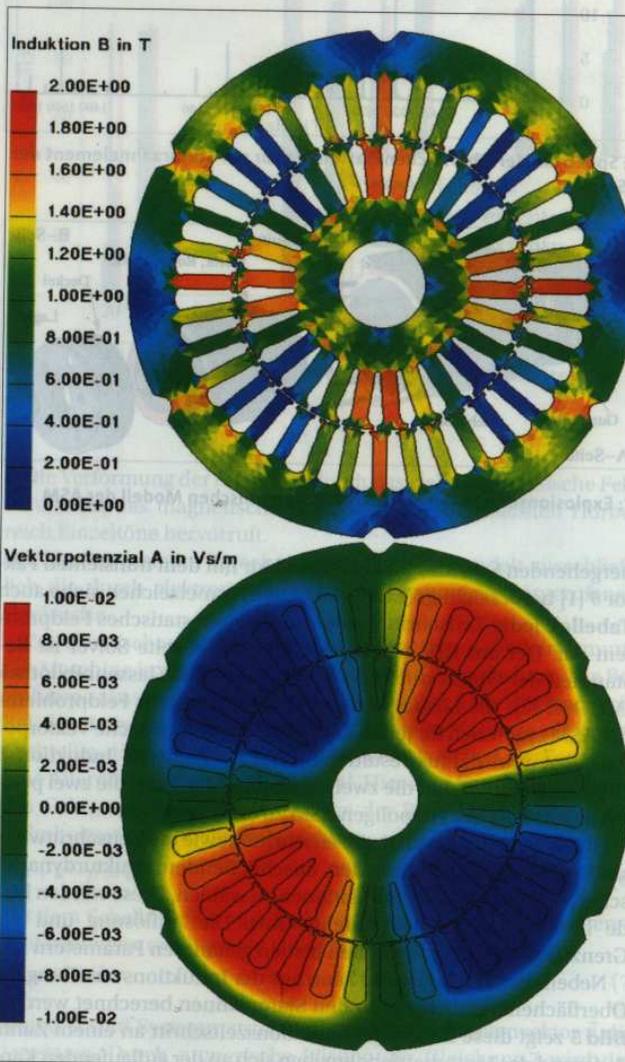
weitergedreht, eine der neuen Rotorposition entsprechende Statorbestromung dem Modell zugewiesen und die B-Feldlösung des vor-



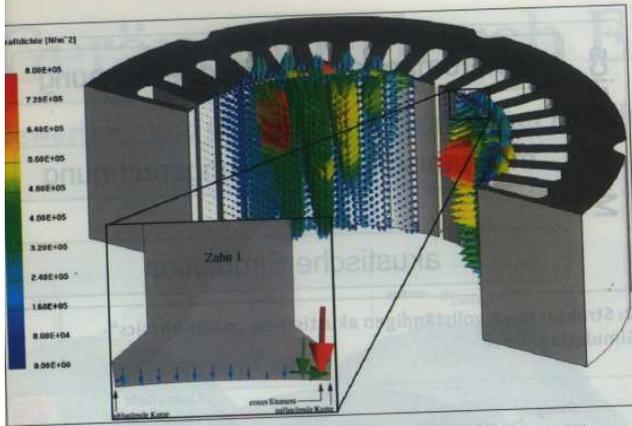
2: Struktur einer vollständigen akustischen „multi-physics“-Simulationskette



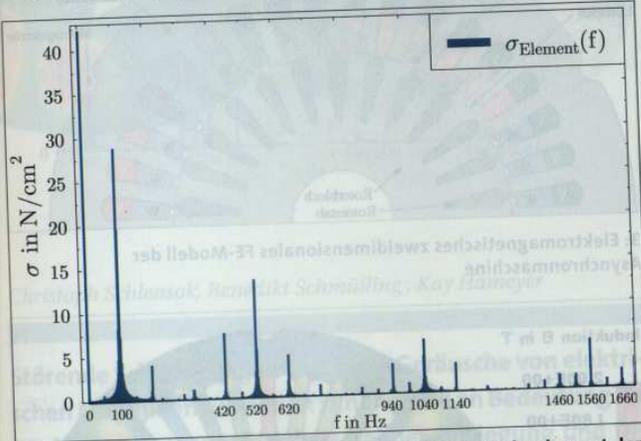
3: Elektromagnetisches zweidimensionales FE-Modell der Asynchronmaschine



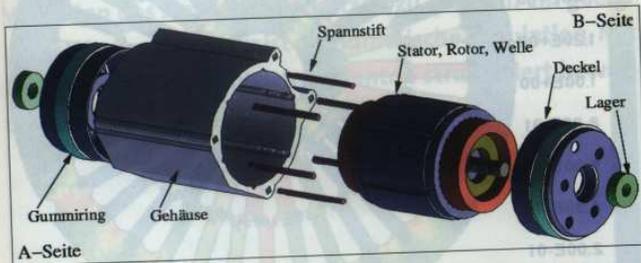
4: Magnetisches Vektorpotenzial und Induktionsverteilung einer ASM mit zwei Polpaaren



5: Oberflächenkraftdichteanregung an den Statorzähnen der ASM



6: Spektrum der Oberflächenkraftdichte für ein Statorzahnelement der ASM



7: Explosionsdarstellung des strukturdynamischen Modell der ASM

hergehenden Schrittes im Lösungsvektor mit dem transienten Faktor  $\theta$  [1] berücksichtigt (Erläuterung der Formelzeichen siehe auch **Tabelle**). Jeder Zeitschritt wiederum stellt ein statisches Feldproblem dar. Der am IEM eingesetzte und entwickelte Solver ist Bestandteil der Objekt orientiert programmierten Klassenbibliothek iMOOSE [2]. Als Lösung des elektromagnetischen Feldproblems der ASM ergibt sich für jeden Zeitschritt das magnetische Vektorpotenzial  $\vec{A}$  und daraus resultierend die magnetische Induktion  $B$  (**Bild 4**). Deutlich sind die zwei negativen (blau) und die zwei positiven (rot) Pole der vierpoligen ASM zu erkennen.

Die Anzahl der Simulationszeitschritte sowie die Zeitschrittweite sind in Abhängigkeit von den anschließenden strukturdynamischen und akustischen Simulationen zu wählen. Diese werden beide im Frequenzbereich durchgeführt. Die Auflösung und die Grenzfrequenz hängen von den beiden genannten Parametern ab.

Neben dem Drehmoment kann aus der Induktionsverteilung die Oberflächenkraftdichte  $\sigma$  an den Statorzähnen berechnet werden. **Bild 5** zeigt diese für einen Simulationszeitschritt an einem Zahn. Aufgrund des Motorbetriebs ergeben sich an der auflaufenden Kante des Zahns die größten Kräfte. Die Kräfte pulsieren in Abhängigkeit von Drehzahl, Schlupf, Statorfrequenz und der An-

zahl der Stator- und Rotornuten.  $N = 2056$  Simulationszeitschritte von  $\sigma$  werden für jedes Statorzahnoberflächenelement in den Frequenzbereich transformiert. Für ein Element an der auflaufenden Kante eines Zahns ergibt sich das in **Bild 6** dargestellte Spektrum. Nach [3, 4] sind die auftretenden Frequenzen die 1. Rotornutharmonische bei  $N_R n = 520$  Hz ( $N_R = 26$ ), die doppelte Statorfrequenz  $2f_1 = 97,96$  Hz und die modulierte Rotornutharmonische  $N_R n \pm 2f_1 = 520 \text{ Hz} \pm 97,96$  Hz. Zusätzlich treten Vielfache dieser Frequenzen auf.

### Mechanische Verformungsrechnung

Anschließend an die elektromagnetische Simulation einer elektrischen Maschine erfolgt eine strukturdynamische Simulation, die als Ergebnis die Verformung bzw. die Schwingungen ermittelt. Als Anregungsgröße wird die Oberflächenkraftdichte an den Statorzähnen verwendet, die in der elektromagnetischen Feldberechnung bestimmt wird. Die Berechnung der periodischen, mechanischen Verformungen elektrischer Maschinen erfordert wie im elektromagnetischen Fall eine numerische Simulation. Eine analytische Lösung ist aufgrund der Vielzahl und der Komplexität der Bauteile nicht möglich. Ebenso wie zur Bestimmung der elektromagnetischen Eigenschaften wird die FEM verwendet [1, 5, 7].

Die Verformung  $\vec{u}$  der Maschine wird durch die Verschiebung der einzelnen Knoten des mechanischen FE-Modells dargestellt [7, 8, 10, 15]. Der Zusammenhang zwischen Verzerrung  $\epsilon$  und Spannung  $\sigma$  (**Bild 6**) wird durch das Materialgesetz beschrieben, das unter Vernachlässigung von Anfangsspannung und -dehnung lautet:  $\sigma = H \cdot \epsilon$ .  $H$  ist die Hookesche Matrix, deren Einträge über das Elastizitätsmodul  $E$  und die Querkontraktionszahl  $\mu$  des jeweiligen Materials definiert sind. Für den Fall isotroper und homogener Materialien ergibt sich die folgende Form:

$$H = \frac{E(1-\mu)}{(1-\mu)(1-2\mu)} \begin{pmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Nach Diskretisierung dieser Gleichungen ergibt sich die Schwingungsgleichung zu:

$$K \cdot D + C \cdot \dot{D} + M \cdot \ddot{D} = F \quad (3)$$

$K$  ist die globale Steifigkeitsmatrix,  $D$  der Vektor der Knotenverschiebungen,  $C$  die Dämpfungsmatrix,  $M$  die Massenmatrix und  $F$  die Kräfteanregung. Für die hier eingesetzte zeitharmonische Analyse im Frequenzbereich ergibt sich mit

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} = j\omega D \quad (4)$$

$$(K + j\omega C + \omega^2 M) \cdot D = F \quad (5)$$

Für  $F$  wird nun die komplexe Oberflächenkraftdichte aus der elektromagnetischen Simulation für jede zu untersuchende Frequenz auf das mechanische Modell transformiert und eine strukturdynamische Simulation durchgeführt. Das mechanische Modell (**Bild 7**) besteht aus allen Bauteilen der elektrischen Maschine. Die Luft wird nun nicht mitmodelliert, da sie bei den zu erwartenden kleinen Verschiebungen im Bereich von maximal einigen Mikrometern keinen Einfluss auf die Verformung der festen Körper hat [7, 8]. Für

die physikalische G Anforderungen an spielsweise der Rot häuseform hingege richtige Modellieru Modell eine umfan

Die Verformung se wie folgt ausgew

Nach [5] ergebe der Statorfrequen zahl und der Wic mode erlaubt Sch Ferner können d Als kritisch gelte denzahl wird di nicht stark verfor positiv auf die Se 1 sind beispiele hohe Kräfteanreg haben. **Bild 8** ze ASM mit der Mo tigungsbedingte zitäten darstelle den und damit schine [7].

Alternativ kann die identisch n den. Dem Vorte der Nachteile ei schlüsse auf da

Anders als im F maß eine inte Hiermit ist es n regungen glob Je nach Fragestel tungskriterium a

Aufgrund von schen Maschine trischen Maschi ne angenommen Exzentrizitäten l die verschieden gungstoleranzen tor-, Stator- und zentrischen Fäll mittelpunkt (dy der Statormitte Beide Arten der dynamische Ex

**Bild 10** zeigt quenzen der AS Vergleich zu ei Exzentrizität in warten ist, wol schallmaß erre Hier zeigt sich die Schwingur kann. So ergibt mung der ASM

### Akustische

Der von einer lich drei Ursac

- Das breitba bei Verwirb
- Eine weiter Maschine, d

die physikalische Größe der Verformung ergeben sich nun andere Anforderungen an die Detailierung einzelner Bauteile. So kann beispielsweise der Rotor als Vollzylinder dargestellt werden. Die Gehäuseform hingegen muss sehr detailgetreu nachgebildet sein. Die richtige Modellierung erfordert wie beim elektromagnetischen FE-Modell eine umfangreiche Erfahrung [15].

Die Verformung einer elektrischen Maschine kann beispielsweise wie folgt ausgewertet werden [9]:

■ Nach [5] ergeben sich bestimmte Schwingungsmoden, die von der Statorfrequenz, der Drehzahl, den Nutzzahlen, der Polpaarzahl und der Wicklungsanordnung abhängen. Die Schwingungsmoden erlaubt Schlüsse auf die mechanische Festigkeit zu ziehen. Ferner können die zu erwartenden Einzeltöne bestimmt werden. Als kritisch gelten kleine Modenzahlen  $r$ . Mit zunehmender Modenzahl wird die mechanische Struktur steifer und kann somit nicht stark verformt werden. Eine geringere Verformung wird sich positiv auf die Schallabstrahlung auswirken. Modenzahlen 0 und 1 sind beispielsweise als mechanisch kritisch anzusehen, da sie hohe Kräfte auf die Lagerung der Maschine zur Folge haben. **Bild 8** zeigt exemplarisch eine Verformung des Stators der ASM mit der Mode  $r = 6$ . Wie Untersuchungen zeigen, haben fertigungsbedingte Fehler und Unsymmetrien, wie sie z. B. Exzentrizitäten darstellen, einen großen Einfluss auf die Verformungsmoden und damit auf die Schallabstrahlung einer elektrischen Maschine [7].

■ Alternativ kann der Körperschallpegel an festgelegten Positionen, die identisch mit etwaigen Messpositionen sind, ermittelt werden. Dem Vorteil der Vergleichbarkeit mit Messergebnissen steht der Nachteil einer lokalen Aussage gegenüber, die keine Rückschlüsse auf das gesamte Verhalten der Struktur zulässt.

■ Anders als im Fall des Körperschallpegels stellt das Körperschallmaß eine integrale Größe für einen vollständigen Körper dar. Hiermit ist es möglich, die Verformung bei unterschiedlichen Anregungen global zu vergleichen.

Je nach Fragestellung ist es zweckmäßig, das entsprechende Bewertungskriterium auszuwählen.

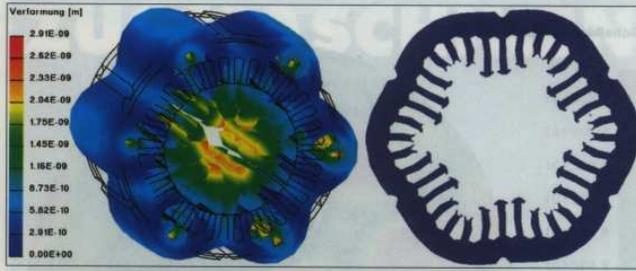
Aufgrund von Fertigungstoleranzen sind Rotoren von elektrischen Maschinen stets exzentrisch gelagert. Der Spezialfall der zentrischen Maschine wird allerdings bei der Auslegung einer Maschine angenommen. Daher ist eine Abschätzung der Effekte, die durch Exzentrizitäten hervorgerufen werden von Bedeutung. **Bild 9** zeigt die verschiedenen rotatorischen Exzentrizitäten, die durch Fertigungstoleranzen entstehen. Im zentrischen Fall befinden sich Rotor-, Stator- und Rotationsmittelpunkt am gleichen Ort. Für die exzentrischen Fälle weichen entweder der Rotations- und der Rotormittelpunkt (dynamische Exzentrizität) oder der Rotations- und der Statormittelpunkt (statische Exzentrizität) von einander ab. Beide Arten der Exzentrizität können auch kombiniert als statisch-dynamische Exzentrizität auftreten.

**Bild 10** zeigt das Ergebnis einer Simulation ausgewählter Frequenzen der ASM bei verschiedenen Exzentrizitäten des Rotors im Vergleich zu einer zentrischen Maschine. Dabei zeigt sich, dass bei Exzentrizität im Allgemeinen eine Zunahme der Verformung zu erwarten ist, wobei die statische Exzentrizität das höchste Körperschallmaß erreicht und als besonders kritisch einzustufen ist [9]. Hier zeigt sich, dass von der Kraftdichteanregung nicht direkt auf die Schwingung einer elektrischen Maschine geschlossen werden kann. So ergibt sich für  $N_s n = 720$  Hz ( $N_s = 36$ ) die höchste Verformung der ASM trotz sehr kleiner Kraftamplituden (**Bild 6**).

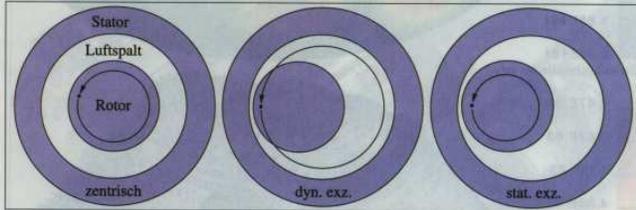
### Akustische Simulation

Der von einer elektrischen Maschine erzeugte Schall hat vornehmlich drei Ursachen:

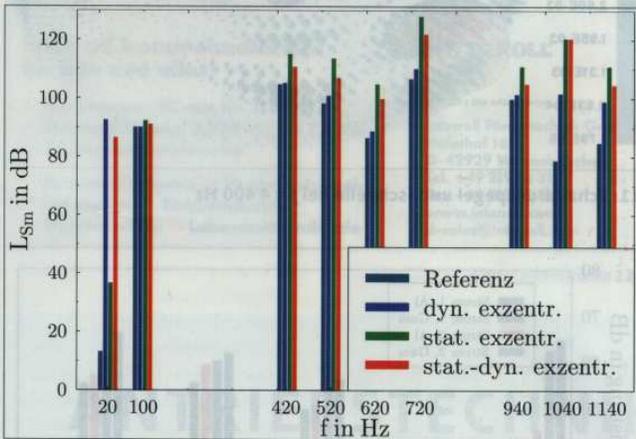
- Das breitbandige Strömungsgeräusch (500 - 1 000 Hz) entsteht bei Verwirbelung der Luft durch den umlaufenden Motor.
- Eine weitere Geräuschquelle ist die Reibung in den Lagern der Maschine, die Einzeltöne im Bereich größer 3 kHz erzeugt.



8: Verformungsmoden der ASM ( $r = 6$  bei  $f = 618$  Hz)



9: Verschiedene rotatorische Exzentrizitäten elektrischer Maschinen



10: Körperschallmaß bei Vergleich verschiedener Exzentrizitäten der ASM

■ Die Verformung der Maschine durch das elektromagnetische Feld verursacht das magnetische Geräusch, das im gesamten Hörbereich Einzeltöne hervorruft.

Die hier vorgestellte Berechnungsmethode behandelt ausschließlich die durch elektromagnetische Verformung hervorgerufenen Geräusche.

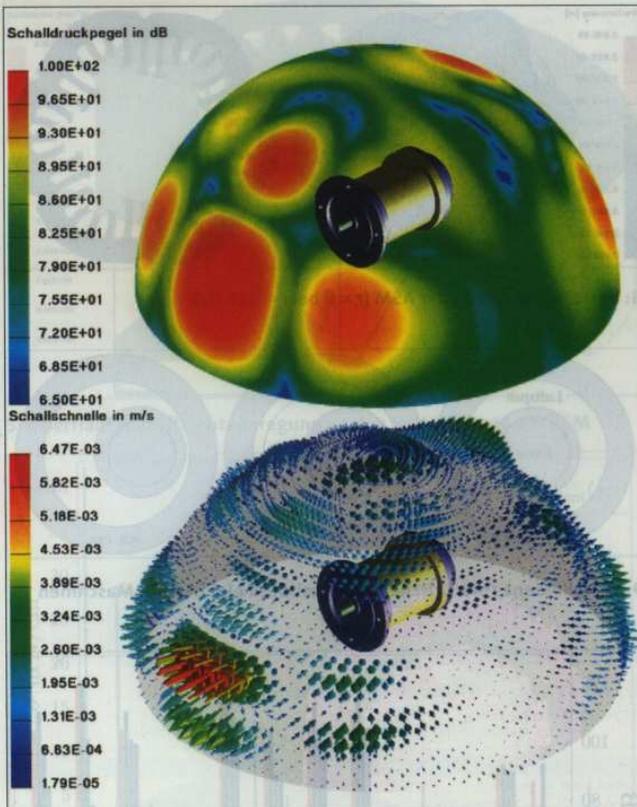
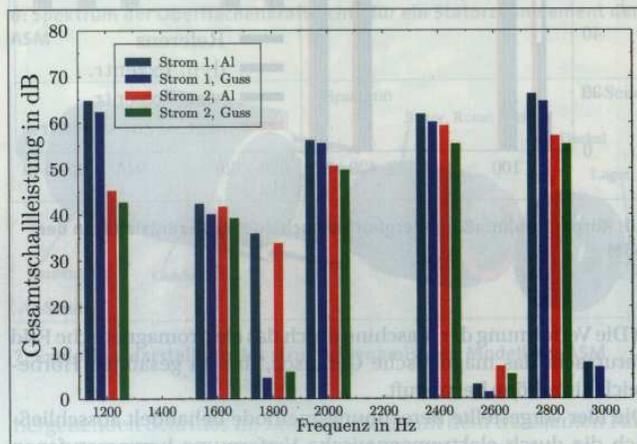
Zur akustischen Simulation wird die mechanische Verformung der Maschine in die mechanische Schnelle  $\vec{v}$  umgerechnet. Die Berechnung akustischer Felder ist grundsätzlich mit der FEM möglich. Bei der Berechnung von Luftschall ist diese Methode aber sehr nachteilig, da das gesamte Rechengelände diskretisiert werden muss. Eine Alternative bietet die BEM [7,14]. Hier wird nur die Randfläche des Gebiets diskretisiert. Grundlage der BEM ist die Lösung der Helmholtzschen Differentialgleichung

$$\Delta p + k^2 \cdot p = 0 \tag{6}$$

mit dem Schalldruck  $p$  und der Wellenzahl  $k = \omega/c$ . Nach weiteren Umformungen resultiert ein Gleichungssystem in der Form

$$H \cdot p = G \cdot \vec{v} \tag{7}$$

$H$  und  $G$  sind Systemmatrizen [7] und der Schnellenvektor  $\vec{v}$  die Anregung. Durch numerische Lösung der Gleichung 7 wird der Schalldruck  $p$  berechnet. Das beschriebene Verfahren kommt in dem Programm zur Anwendung, das am IEM entstanden ist. Durch

11: Schalldruckpegel und -schnelle bei  $f = 4400$  Hz

12: Gesamtschallleistung für betrachteten Betriebspunkt der SRM

die Anwendung der BEM wird neben dem elektromagnetischen und dem mechanischen Modell als drittes ein akustisches Modell benötigt. Dieses besteht aus einem Oberflächennetz, welches die äußere, Schall abstrahlende Fläche des Motors nachbildet. Die mechanische Schnelle wird auf das akustische Netz übertragen.

Da der Luftraum, der die betrachtete Anordnung umgibt, nicht diskretisiert ist, liegt dort nach der Simulation keine Lösung vor. Schalldruck und Schallschnelle werden daher an vorgegebenen Punkten oder auf einer vorgegebenen Fläche ausgewertet (Bild 11) und in Gesamtschallleistung [10] umgerechnet. Weiterhin kann die Schallintensität bestimmt werden. Die Ergebnisse liegen für diskrete Frequenzen vor.

Die Auswertung der akustischen Rechnung wird hier anhand einer ausgeführten SRM gezeigt. Für einen ausgewählten Betriebspunkt werden die Ergebnisse für zwei verschiedene Stromformen und Gehäusevarianten (Aluminium und Grauguss) gezeigt. Der si-

mulierte Schalldruckpegel und die Schallschnelle sind in Bild 11 dargestellt. Aus diesen Größen können der Gesamtschallleistungspegel und die Richtung der Schallabstrahlung bestimmt werden. So strahlt die SRM bei  $f = 4400$  Hz in axialer Richtung besonders viel Schall ab.

Bild 12 fasst die Ergebnisse im Frequenzbereich von 1200 Hz bis 3000 Hz für beide Gehäusevarianten zusammen. Die Schallabstrahlung wird im gegebenen Beispiel durch die Stromformen beeinflusst. Stromform 2 verringert die Schallabstrahlung. Darüber hinaus zeigt sich, dass das Gussstahlgehäuse ebenfalls eine Reduzierung bewirkt. Diese Ergebnisse entsprechen Resultaten aus Luftschallmessungen. Sie sind in den Unterschieden von Materialdichte und Elastizitätsmodul begründet.

## Zusammenfassung

Die numerische Simulation elektrischer Maschinen erlaubt es, bei der Auslegung und Optimierung das strukturelle und akustische Verhalten elektrischer Maschinen im Voraus zu berücksichtigen. Anhand der in diesem Beitrag betrachteten Maschinen (ASM und SRM) wird die Vorgehensweise bei der Simulation erläutert. Die simulierten Resultate zeigen zum einen eine gute Übereinstimmung mit Messergebnissen und zum anderen weisen sie das enorme Optimierungspotenzial hinsichtlich der Schwingungen und Geräusche der betreffenden Maschinen auf. Die vorgestellten Methoden und Simulationswerkzeuge erlauben es, jede Art elektromagnetischen Energiewandlers hinsichtlich seines elektromagnetischen, strukturellen und akustischen Verhaltens zu untersuchen, analysieren und bewerten. Mit am IEM vorhandener Messtechnik ist es zudem möglich die erzielten Simulationsergebnisse durch Messresultate an Prüflingen zu verifizieren. Die Analyse und Bewertung ermöglicht ferner die Detektierung von fertigungsbedingten Fehlern in elektrischen Maschinen. Die numerische akustische Simulation stellt somit ein unverzichtbares Werkzeug bei der Auslegung, Bewertung und Optimierung elektrischer Maschinen dar.

### Literaturhinweise:

- [1] Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L.: *Methode der finiten Elemente*. Carl Hanser Verlag, 1977
- [2] Ariens, G; Bauer, T; Kaehler, C.; Mai, W.; Monzel, C.; van Riesen, D.; Schlensock, C.: *Innovative modern object-oriented solver environment (iMOOSE)*. Aachen 2006
- [3] Jordan, H.: *Geräuscharme Elektromotoren*. Verlag W. Geradet, 1950
- [4] Seinsch, H. O.: *Oberfelderscheinungen in Drehfeldmaschinen*. Verlag B. G. Teubner, 1992
- [5] Bathe, K.-J.: *Finite-Elemente Methoden*. Springer-Verlag, 1986
- [6] Lancos, C.: *The variational principles of mechanics*. McGraw-Hill, Toronto 1970
- [7] van Riesen, D.: *Finite-Elemente-Methoden für die elektromagnetische und strukturelle Berechnung von Induktionstiegelöfen*. Dissertation. IEM, RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2004
- [8] Ramesohl, I.: *Numerische Geräuschberechnung von Drehstrom-Klauenpolgeneratoren*. Dissertation. IEM, RWTH Aachen, Shaker Verlag, 1999
- [9] Schlensock, C.: *Numerische Berechnung und Optimierung einer Asynchronmaschine mit Käfigläufer zur elektrischen Lenkunterstützung im Kfz*. Dissertation. IEM, RWTH Aachen, Aachen 2005
- [10] Bauer, T.: *Elektromagnetische, strukturelle und akustische Berechnung und Optimierung von Induktionstiegelöfen*. Dissertation. IEM, RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2000
- [11] Ariens, G.: *Numerische Berechnung der elektromagnetischen Feldverteilung, der strukturellen Eigenschaften und der Geräusche von Asynchronmaschinen*. Dissertation. IEM, RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2001
- [12] Kaehler, C.: *Numerische Berechnung der Wirbelstromverluste von Drehstrom-Klauenpolgeneratoren*. Dissertation. IEM, RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2002
- [13] Monzel, C.: *Entwicklung von Quersfeldinduktoren zur Erwärmung dünner ferromagnetischer Bänder*. Dissertation. IEM, RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2002
- [14] Kollmann, F. G.: *Maschinenakustik*. Springer Verlag, 2000
- [15] Delaere, K.: *Computational and Experimental Analysis of Electric Machine Vibrations caused by Magnetic Forces and Magnetostriction*, Dissertation, Katholieke Uni Leuven, 2002

Um die Zi bei der DC-Moto Regelelek minimieren für seine Parametri Computermetrierten schwindigkeit und im damit kin sich mit o stellte Par chern un miert für Aufwand von Mas mehreren DC-Antri mit üblic tern und Motoren über eine le (zusät cker). Da druck die risch erfa ständige zur Mot auch vor übertrage Mit d elektronisch kon motoren Eingangs tenbetrie drahtend fällt. Som Fahrprofi werden.

Der klein und Posi steht au Motor u verstärkte Spannu nach Ty betragen und Tol achten. Direktan ordnete und RS;