

Ermittlung orthotroper Materialeigenschaften durch Model Updating

Simulation und Versuch: Gemeinsam erfolgreich

Die Berechnung des strukturellen Verhaltens von elektrischen Maschinen bereits in der Konzeptfindungsphase wird aufgrund verkürzter Entwicklungszyklen und zunehmend komplexeren Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften der Komponenten immer wichtiger.

Zumeist werden Geometrien und Bauteile in den frühen Projektphasen lediglich virtuell erzeugt, was die Validierung der Simulationen erheblich erschwert. Insofern bedarf es robuster, physikalisch basierter Berechnungsmethoden, die sich auf die Daten standardisierter Materialversuche stützen. In der Regel können die mechanischen Materialdaten aus bereits vorhandenen Datenblättern entnommen oder durch analytische Berechnungen bzw. normierte Belastungsversuche von Materialproben generiert werden. Dieses Vorgehen stößt dann an seine Grenzen, wenn eine heterogene Materialstruktur vorliegt, die mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) nicht praktikabel aufgelöst werden kann.

FEM-kompatible Materialparameter

Hier wird ein Prozess beschrieben, mit dem die standardisierte Generierung FEM-kompatibler Materialparameter heterogener Werkstoffstrukturen via Model Updating erfolgt. Exemplarisch wird das Vorgehen anhand in Harz getränkter Kupferwicklungen, wie sie in elektrischen Maschinen verwendet werden, demonstriert. Model Updating meint dabei die iterative Variation ausgewählter Modellparameter, um eine optimale Übereinstimmung von simulativ und experimentell durchgeführter Modalanalyse zu erhalten.

Die Kupferdrähte, die in den Statornuten permanenterregter Synchronmaschinen verankert sind, werden zur elektrischen Isolation sowie zur thermischen Anbindung und mechanischen Fixierung in eine Duroplasmatrix gebettet. Eine detaillierte Auflösung der feinen Nutstruktur

in strukturellen Simulationen ist sehr modellierungs- und berechnungsintensiv und somit nicht praktikabel. Als eine handhabbare Möglichkeit lässt sich das heterogene Material der Kupferwicklungen im Gesamtmodell durch ein homogenes Material mit transversal isotropen Materialeigenschaften substituieren. Das Steifigkeitsverhalten der Nutstruktur wird dabei durch fünf voneinander unabhängige Ersatzparameter beschrieben.

Die Quantifizierung der Ersatzparameter erfolgt anhand des Vergleichs der simulativ mit ANSYS ermittelten Eigenfrequenzen und modalen Schwingformen eines Probekörpers mit den Ergebnissen einer experimentellen Modalanalyse. Als Probekörper dient ein Teilstück aus der Kupferwicklung eines Elektro-Maschinenstators (Bild 2).

Optimierung der Ersatzparameter

Die experimentelle Modalanalyse erfolgt mit einem Laser-Scanning-Vibrometer, das die Oberflächenschnellen in Normalenrichtung zur Längsfläche des Probekörpers misst. Um einen geeigneten Variantenraum für das Model Updating zu schaffen, wird die klassische Laminattheorie nach Chamis genutzt. Anhand der analytischen Zusammenhänge lassen sich die Ersatzparameter für die Simulation transversal isotroper Materialien auf Basis der Werkstoffkennwerte der Grundmaterialien berechnen – in diesem Fall Kupfer und Harzmatrix. Der Variantenraum kann in einem physikalischen Maß symmetrisch um die analytisch berechneten Basiswerte gelegt werden.

Das Model Updating zur Bestimmung der Ersatz-Materialparameter wird auto-



Bild 1: In den Statornuten von permanent-erregten Synchronmaschinen werden Kupferdrähte verankert.

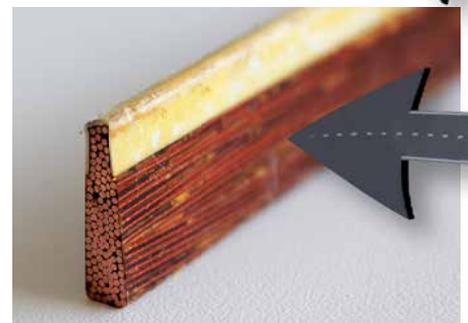


Bild 2: Darstellung des Probekörpers aus in Harzmatrix eingebetteten Kupferwicklungen.

matisiert in optiSLang durchgeführt. Die Zielfunktion der Optimierungsaufgabe besteht dabei aus Termen, welche die modalen Schwingformen mit Hilfe des Modal Assurance Criterion (MAC) vergleichen, sowie Termen, welche die Differenz der Eigenfrequenzen berücksichtigen.

In Bild 3 (oben) sind die experimentell ermittelten Eigenfrequenzen und -schwingformen der Stabprobe bis 6 kHz dargestellt. Es handelt sich um den 1. und 4. Biegemode in Längsrichtung der Struktur, wobei der leicht konische Querschnitt der Probe in einigen Moden eine gegenphasige Schwingung über die Breite der Probe verursacht (vgl. Bild 3 rechts). Die Simulation, basierend auf den analytisch berechneten Ersatzparametern, liefert im selben Frequenz-

spektrum neun Eigenfrequenzen. Eine Sensitivitätsanalyse der fünf orthotropen Ersatzparameter ergibt eine starke Korrelation zwischen der Zielfunktion und dem E-Modul in Faserrichtung sowie eine schwächere Korrelation zwischen Zielfunktion und Schubmodul in Gegenfaserrichtung. Die Variation der weiteren Parameter beeinflusst weder die Eigenfrequenzen noch die Eigenschwingformen signifikant.

Gemäß der Antwortfläche (Bild 4) lassen sich E-Modul in Faserrichtung sowie Schubmodul in Gegenfaserrichtung hinsichtlich der Zielfunktion optimieren. Aufgrund der geringen Signifikanz können die Werte für die Querkontraktionszahlen des Systems sowie für den E-Modul in Gegenfaserrichtung den analytisch berechneten Werten gleichgesetzt werden.

Eigenfrequenzabweichung wurde reduziert

Wird die MAC-Matrix, die mit den so erhaltenen Materialdaten berechnet wurde, der MAC-Matrix mit den analytisch be-

rechneten Materialdaten gegenübergestellt, zeigt sich eine signifikante Verbesserung der MAC-Werte für alle verglichenen Moden. Der MAC-Wert der 2. Eigenmode konnte um 20% gesteigert werden, der der 4. Eigenmode wurde durch die Optimierung sogar verdoppelt. Gleichzeitig konnte für alle Moden die Eigenfrequenzabweichung zwischen Experiment und Simulation reduziert werden. Die in der experimentellen Modalanalyse nicht detektierten Moden sind entweder nicht hinreichend angeregt worden (z.B. Torsionsschwingungen) oder bewegen sich nicht in Normalenrichtung zur Längsfläche des Probekörpers (z.B. Biegemode in Querrichtung).

Insgesamt liefert das automatisierte Model Updating innerhalb kurzer Zeit ein Set FEM-kompatibler Ersatz-Materialdaten, die das strukturdynamische Verhalten der Kupferwicklungen für einen transversal isotropen Modellierungsansatz wiedergeben. Mit diesem Prozess können Konzepte in frühen Projektphasen hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften deutlich akkurater bewertet werden. Ebenso besteht die Möglichkeit, weiter kaum quantifizierbare Modellparameter – z.B. Kontaktsteifigkeiten oder thermisch induzierte Eigenspannungen – zu analysieren und zu verstehen. Zusammenfassend bedeutet dies einen wichtigen Schritt in Richtung Übereinstimmung von Simulation und Versuch.

InfoAutoren

Michael Schwarzer, Dr.-Ing. Endre Barti (BMW Group)
Prof. Dr.-Ing. Thilo Bein (Fraunhofer LBF Darmstadt)

InfoAnsprechpartner | CADFEM

Christof Gebhardt, CADFEM GmbH
Tel. +49 (0) 80 92-70 05-65
cgebhardt@cadfem.de

InfoVerwendete Software

ANSYS Workbench, optiSLang

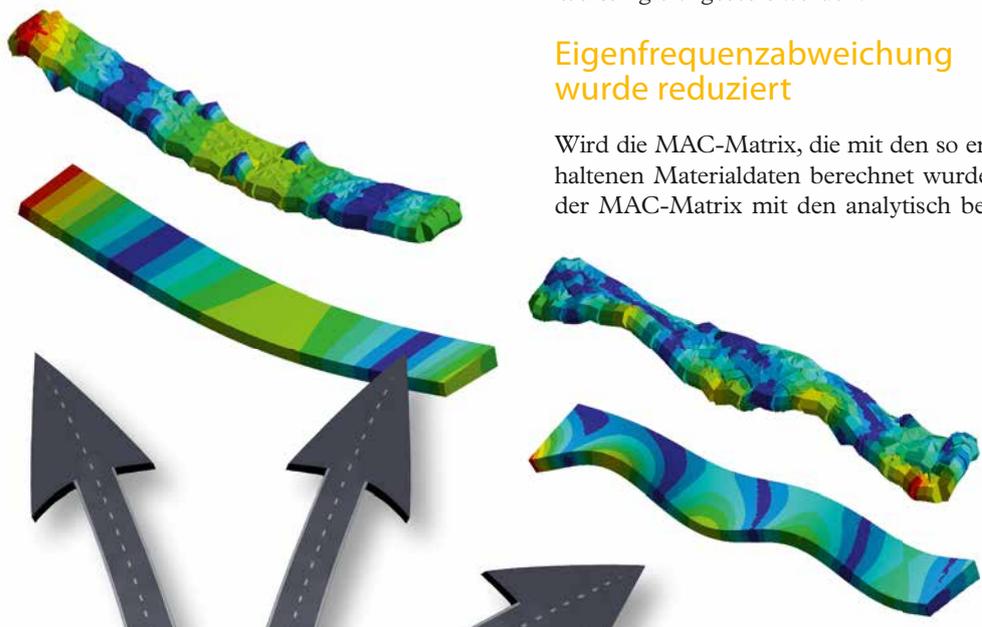


Bild 3: Vergleich der experimentellen (oben) und simulativ ermittelten Eigenmoden.

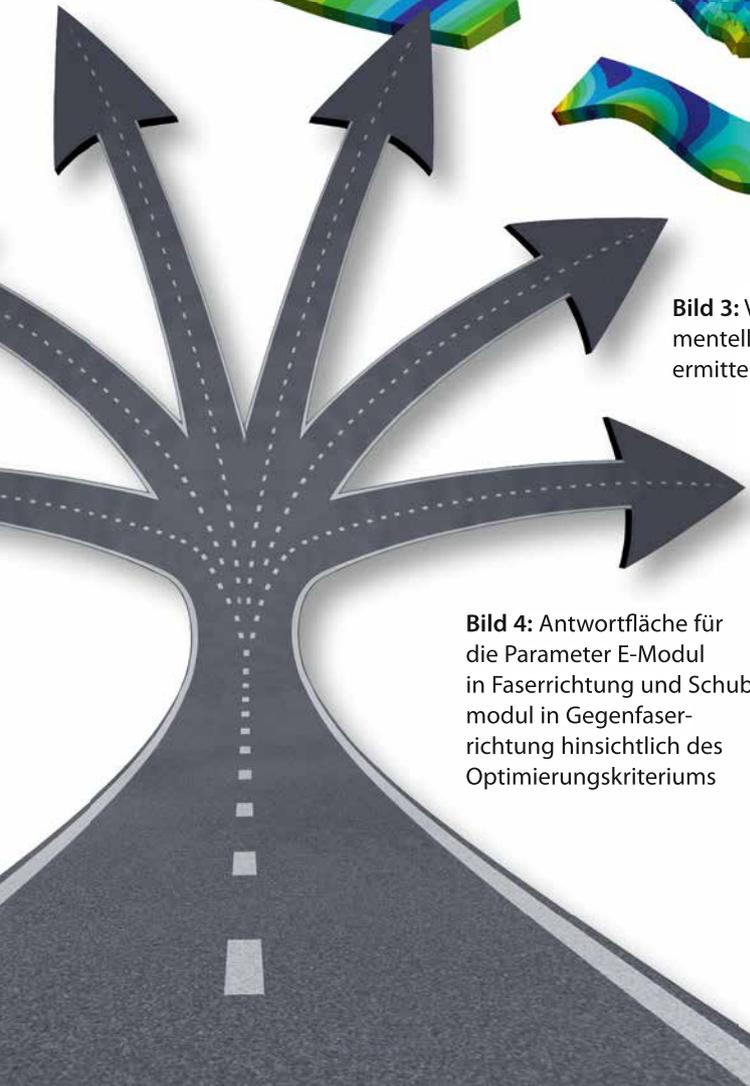
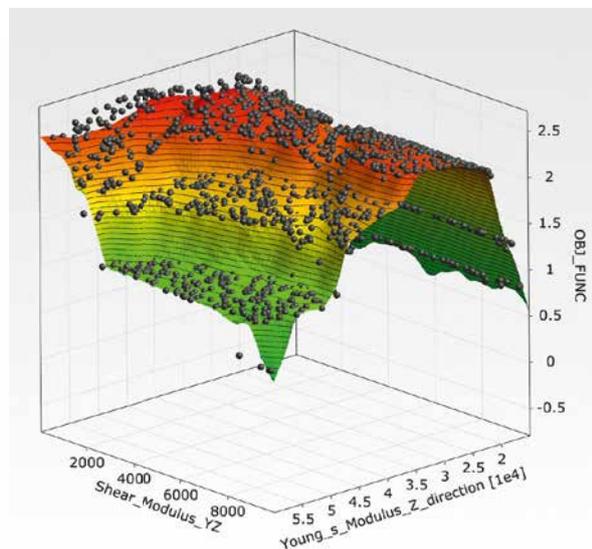


Bild 4: Antwortfläche für die Parameter E-Modul in Faserrichtung und Schubmodul in Gegenfaserrichtung hinsichtlich des Optimierungskriteriums



Bilder: BMW Group, Shutterstock.com/igntspring