

Methodik zur Bestimmung von optimalen Messpunkten bei der strukturdynamischen Vermessung elektrischer Maschinen

M. Franck , S. Mönninghoff, D. Butterweck, K. Hameyer

Experimentelle Modalanalysen von Komponenten und Baugruppen elektrischer Maschinen, die eine Modellkorrelation erlauben, sind sehr zeitaufwändig. Eine gezielte Planung ist deshalb essenziell. Die Platzierung von Mess- und Anregungspunkten kann einen signifikanten Einfluss auf die Güte der Messergebnisse und der extrahierten Parameter haben. In dieser Arbeit werden Verfahren zur modellbasierten Messpunktidentifikation analysiert und weiterentwickelt. Mit dem weiterentwickelten Verfahren ist es erstmals möglich für gesamte Baugruppen von elektrischen Maschinen potenzielle Messpunkte automatisiert zu identifizieren. Es werden Ergebnisse mit ersten Messungen abgeglichen und analysiert.

Schlüsselwörter: Akustik; Modalanalyse; optimale Messpunktplatzierung; Maschinenakustik; Geräusche elektrischer Maschinen

Methods for the determination of optimal measuring points in the structural dynamic measurement of electrical machines.

Experimental modal analyses of components and assemblies of electrical machines that allow model correlation are very time-consuming. Systematic test planning is therefore essential. The placement of measurement and excitation points can have a significant influence on the quality of the measurement results and the extracted parameters. In this paper, methods for model-based measurement point identification are analyzed and further developed. With the further developed method, it is possible to automatically identify potential measuring points for entire assemblies of electrical machines for the first time. Results are compared and analyzed with initial measurements.

Keywords: acoustics; modal analysis; optimal measurement point placement; machine acoustics; noise of electrical machines

Eingegangen am 7. Mai 2021, angenommen am 7. Juli 2021
© The Author(s) 2021



1. Einleitung

Experimentelle Modalanalyse von Komponenten und Baugruppe elektrischer Maschinen, die eine Modellkorrelation oder eine Modellverbesserung ermöglichen, sind sehr zeitaufwändig. Insbesondere die Platzierung von Mess- und Anregungspunkten kann einen signifikanten Einfluss auf die Güte der Messergebnisse und auf den Messaufwand haben. Häufig werden die Mess- und Anregungspositionen auf Grundlage von Erfahrungswerten gewählt. Zur Auswahl von optimalen Messpunkten für die experimentelle Modalanalyse sind die folgenden Aspekte wichtig. Zum einen die geeignete Wahl von Anregungspunkten, die eine Anregung aller relevanten Eigenschwingungen im betrachteten Frequenzbereich ermöglichen. Zum anderen die Wahl einer minimalen Anzahl an Sensorpositionen, mit der die Eigenvektoren mathematisch eindeutig aus der Messung rekonstruiert werden können. Eine erfahrungsbasierte Messpunktauswahl stößt mit steigendem Frequenzbereich, insbesondere für kompliziertere Baugruppen wie elektrische Maschinen, an ihre Grenzen. Um diese Herausforderung zu lösen, wird ein modellbasiertes Verfahren zur optimalen Platzierung von Mess- und Anregungspositionen bei der strukturdynamischen Vermessung von elektrischen Maschinen vorgeschlagen.

In [1] wird zur Bestimmung von optimalen Sensorplatzierungen das numerische Verfahren der QR-Zerlegung auf die Eigenvektormatrix eines Finite Element Modells (FEM) angewendet. Zur Bestimmung von optimalen Anregungspunkten wird die QR-Zerlegung

auf die in modale Koordinaten transformierte Massenmatrix des FE-Modells angewendet. Als Ergebnis beider Zerlegungen erhält man die mathematisch linear unabhängigen Freiheitsgrade der jeweiligen Matrizen, die anschließend als Mess- und Anregungspunkte ausgewählt werden.

In [2] wird zur Auswahl von geeigneten Anregungspunkten das sogenannte „Optimum Driving Point (ODP)“ Kriterium vorgeschlagen. Beim ODP Verfahren wird das Produkt der einzelnen Eigenvektoren gebildet. Einträge im resultierenden ODP Vektor, die von Null verschieden sind, zeigen dann potentiell geeignete Anregungspunkte. Zur Bestimmung einer optimalen Sensorplatzierung wird das sogenannte „Effective Impedance“ Verfahren aus [3] weiterentwickelt. Grundsätzlich handelt es sich dabei um ein Verfahren aus der Statistik mit der hier die Freiheitsgrade der Eigenvektor Matrix iterativ reduziert werden können, ohne den Rang der Matrix zu verringern.

Die zuvor beschriebenen Verfahren setzen alle ein vorläufiges dynamisches Finite Element Modell (FEM) der Messobjekte voraus. In

Franck, Marius, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen University, Schinkelstraße 4, 52062 Aachen, Deutschland

(E-Mail: marius.franck@iem.rwth-aachen.de); **Mönninghoff, Sebastian**, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland;

Butterweck, Daniel, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland; **Hameyer, Kay**, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

[4] wird eine Vorgehensweise der experimentellen Modalanalyse beschrieben. Bei dieser wird kein vorläufiges Modell benötigt, sondern eine ausreichende Anzahl an Anregungspunkten durch Messung der sogenannten Anregungspunkteinertanz an ausgewählten Punkten ermittelt. Diese gibt Aufschluss darüber, ob und wie viele Eigenfrequenzen mit dem gewählten Punkt angeregt werden können.

In dieser Arbeit wird eine modellbasierte Messpunktbestimmung auf die Fragestellung von elektrischen Maschinen angewendet. Zur Anregungspunktbestimmung wird das Optimum Driving Point Kriterium (ODP) genutzt. Bei der Anwendung auf typische elektrische Traktionsmaschinen wird gezeigt, dass sich bei einem einzelnen Stator einer Maschine plausible Anregungspunkte mit dem Verfahren identifizieren lassen. Bei größeren Baugruppen und ganzen Maschinen können mit dem Verfahren jedoch keine Anregungspunkte mehr gefunden werden. Deshalb wird eine Erweiterung des Verfahrens vorgeschlagen. Zur Identifikation von optimalen Sensorplatzierungen wird die QR-Zerlegung der Eigenvektormatrix angewendet. An einem exemplarischen Stator werden erste Ergebnisse der Verfahren mit experimentellen Modalanalysen abgeglichen.

2. Methodik

Die Voraussetzung für eine modellbasierte Messpunktbestimmung in der Modalanalyse ist ein initiales Modell. Den Ausgangspunkt der mathematischen Beschreibung des strukturdynamischen Verhaltens bildet häufig die allgemeine Bewegungsgleichung, z.B. unter der Annahme von proportionaler Dämpfung nach [2, 5]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{j} \cdot \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \vec{F}(t). \quad (1)$$

Die physikalisch richtige und präzise Modellierung der Dämpfungseigenschaften von elektrischen Maschinen ist herausfordernd. Außerdem ist die Dämpfung meist ausreichend gering, sodass sich die Eigenvektoren und Eigenfrequenzen nicht signifikant verändern. Deshalb wird die Dämpfung bei der initialen Berechnung meist vernachlässigt:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \vec{F}(t). \quad (2)$$

Die homogene Lösung der Differentialgleichung ergibt:

$$\vec{x}(t) = \vec{\Phi} e^{j\omega t}. \quad (3)$$

Das allgemeine Eigenwertproblem lautet dann:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\vec{\Phi} = 0. \quad (4)$$

Die Eigenfrequenzen können über die folgende Gleichung bestimmt werden:

$$\det(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) = 0. \quad (5)$$

Man erhält für den ungedämpften Fall die reellen Eigenvektoren Φ , auch normale Moden des Systems genannt, indem man die Eigenkreisfrequenzen ω aus der Lösung der Gl. (5) in Gl. (4) einsetzt und diese dann löst. Transformiert man Gl. (1) in den Frequenzbereich, kann man die Übertragungsfunktion des gedämpften Systems angeben. Im Falle des Verhältnis von anregender Kraft am Punkt s zur Verschiebungsantwort am Punkt k wird diese Rezeptanz genannt und ergibt für n Eigenfrequenzen und Eigenvektoren nach [5]:

$$\alpha_{sk}(\omega) = \sum_{r=1}^n \frac{\Phi_{sr} \Phi_{kr}}{\omega_r^2 - \omega^2 + j\eta_r \omega_r^2} \quad (6)$$

Zur Aufstellung und Lösung der hier beschriebenen Gleichungen wird die Finite Element Methode eingesetzt. In dieser Arbeit wird dazu die Software ANSYS Workbench verwendet.

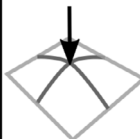
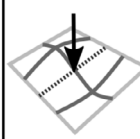
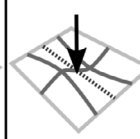
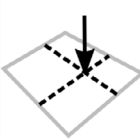
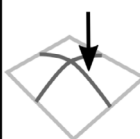
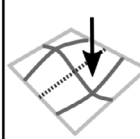
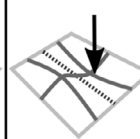
Anregungsposition	1.Mode	2.Mode	3.Mode
			
zentrisch	Auslenkung: maximal	Auslenkung: null	Auslenkung: null
Anregungsposition	1.Mode	2.Mode	3.Mode
			
exzentrisch	Auslenkung: mittel	Auslenkung: mittel	Auslenkung: mittel

Abb. 1. Positionierung von Anregungspunkten am Beispiel einer Platte

2.1 Verfahren zur Bestimmung optimaler Anregungspunkte

Die Anregung bei der experimentellen Modalanalyse beschreibt grundsätzlich einen externen Energieeintrag in das System. Der Vorgang der Energiewandlung von der Anregungsquelle in einzelne Schwingungsformen wird durch viele Faktoren beeinflusst. Nach [2] spielen die Dämpfungs-, Steifigkeits- und Massenverteilungen und Unvollkommenheiten des Materials, wie z.B. Risse oder innere Materialspannungen sowie die Temperatur eine entscheidende Rolle. Eine weitere Besonderheit ergibt sich bei der häufig angewendeten Hammerschlagmessung. Meist wird eine harte Hammerspitze eingesetzt, um die Kontaktzeit mit dem Messobjekt gering zu halten und somit möglichst viel Energie im höheren Frequenzbereich einzubringen. Dabei können jedoch beim Energieeintrag plastische Verformungen des Körpers entstehen. Dadurch kann der Energieeintrag reduziert werden [2].

In der Praxis ist es nicht möglich alle diese Faktoren hinreichend genau vorherzusagen. Es wird jedoch in [2] beschrieben, dass die Energieverteilung in die einzelnen Moden mit der relativen Position des Anregungspunkts zum Schwingungsknoten zusammenhängt. Für eine exemplarische Plattenschwingung wird im folgenden dieser Sachverhalt anhand von Abb. 1 erläutert. Wird der Anregungspunkt zentrisch auf der Platte positioniert, ist die Auslenkung des Eigenvektors der ersten Mode an diesem Punkt maximal. Bezogen auf die zweite und dritte Mode liegt dieser Punkt in einem Schwingungsknoten und die Auslenkung verschwindet. An diesem Ort wird dann kaum oder keine Energie in diese Schwingungsform übertragen. Das bedeutet, bei dieser ungünstigen Wahl wird sich diese Schwingungsform in der Messung nicht ausprägen. Ziel der optimalen Anregungspunktwahl ist es also, einen oder mehrere Punkte zu identifizieren, dessen Amplitude in allen betrachteten Eigenvektoren nicht verschwindet. Ein solcher Punkt ist in der zweiten Zeile von Abb. 1 dargestellt. Beim „Optimum Driving Point (ODP)“ Kriterium aus [2] wird das Produkt aller betrachteten Eigenvektoren Φ_r gebildet:

$$\text{ODP}(i) = \prod_{r=1}^n \|\Phi_{i,r}\| \quad (7)$$

Tritt an einem Punkt i des Eigenvektors ein Schwingungsknoten auf, resultiert dieser in einem Nulleintrag im ODP Vektor. Einträge im ODP Vektor, die von Null verschieden sind, ergeben folglich geeignete Anregungspunkte.

2.2 Verfahren zur Bestimmung optimaler Sensorplatzierung

Ziel der optimalen Sensorplatzierung ist es mit einer minimalen Anzahl an Messpositionen die Eigenvektoren in der Messung mathematisch eindeutig rekonstruieren zu können. In [1] wird dazu die QR-Zerlegung der transponierten Eigenvektormatrix Φ vorgeschlagen. Für eine gegebene Matrix $\mathbf{A}$ ist die QR-Zerlegung definiert durch [1]:

$$\mathbf{A}\mathbf{E} = \mathbf{Q}\mathbf{R}, \quad (8)$$

mit:

- $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m,n}$, mit $m \geq n$ und $\text{Rang}(\mathbf{A}) = n$
- $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{m,n}$ eine orthogonale Matrix, sodass gilt $\mathbf{Q}^T \mathbf{Q} = \mathbf{I}$
- $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{n,n}$ eine obere Dreiecksmatrix mit absteigenden diagonal Einträgen
- $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{n,n}$ die Permutationsmatrix von $\mathbf{A}$.

Die n ersten Spalten der Matrix $\mathbf{A}\mathbf{E}$ der QR-Zerlegung sind die zu einander linear unabhängigen Spalten der Matrix. Die QR-Zerlegung ist eindeutig definiert, wenn gilt $\text{Rang}(\mathbf{A}) = n$. Für die Eigenvektormatrix $\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n] \in \mathbb{R}^{m,n}$ gibt m die Freiheitsgrade des Modells und n die Anzahl der Eigenvektoren an. Wendet man das Verfahren auf die transponierte Eigenvektormatrix Φ^T an, erhält man mit den ersten n Spalten die linear unabhängigen Freiheitsgrade auf der Struktur. Die Voraussetzungen der QR-Zerlegung sind aufgrund der Eigenschaften der Modalanalyse grundsätzlich erfüllt [1]. Zur Verifizierung der gefundenen Messpunkte werden in [1] die reduzierten Eigenvektoren untereinander mit dem sogenannten „Auto Modal Assurance (AutoMAC)“ Kriterium verglichen. Das MAC Kriterium für den allgemeinen gedämpften Fall mit komplexem Eigenvektor Φ ist definiert als [6]:

$$\text{MAC}(c, d) = \frac{|\Phi_c^T \Phi_d^*|^2}{\Phi_c^T \Phi_d^* \Phi_d^T \Phi_c}, \quad (9)$$

mit Φ^* dem komplex konjugierten Eigenvektor. Das Kriterium ist ein Maß für die Konsistenz oder lineare Abhängigkeit der Vektoren. Werte nahe Eins deuten auf eine lineare Abhängigkeit hin, Werte nahe Null zeigen eine lineare Unabhängigkeit an. Für den Fall der AutoMAC Analyse sollten bei linear unabhängigen Messpositionen folglich nur Einträge nahe Eins auf der Hauptdiagonalen zu finden sein.

3. Anwendung des ODP Kriteriums auf elektrische Maschinen

Im folgenden wird zunächst das ODP Kriterium aus Abschn. 2.1 auf Bauteile und Baugruppen einer elektrischen Traktionsmaschine angewendet. Es werden dazu ein Stator und eine Statorbaugruppe, bestehend aus dem Statorblechpaket, dem Gehäusemantel und den Lagerschilden, mit der FEM modelliert. Für das Blechpaket des Stators werden homogenisierte Materialkennwerte nach [7] angenommen. Es werden jeweils die ersten 50 ungedämpften Eigenfrequenzen und Eigenvektoren bis zu einer maximalen Frequenz von 8 kHz für den Stator und bis 5 kHz für die Baugruppe berechnet.

Zur Auswertung und Aufbereitung der Ergebnisse wird die Software MATLAB eingesetzt. Es wird das ODP Kriterium für alle Eigenvektoren über dem FE-Netz der beiden Modelle berechnet. Im Gegensatz zu [2] wird zur einheitlichen Bewertung der verschiedenen

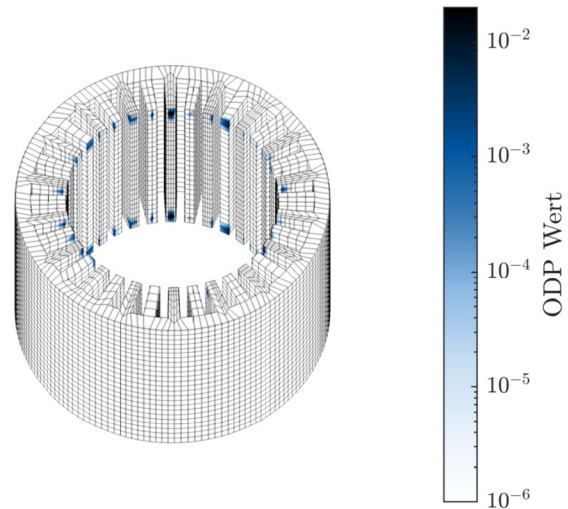


Abb. 2. Ergebnis der ODP Berechnung für den Stator

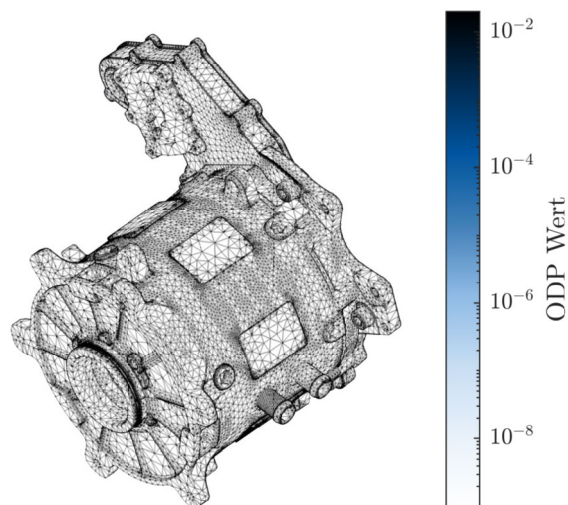


Abb. 3. Ergebnis der ODP Berechnung für die Statorbaugruppe

Eigenvektoren mit normierten Eigenvektoren und nicht mit den üblichen auf die modale Masse skalierten Eigenvektoren gearbeitet. In Abb. 2 und Abb. 3 sind die Ergebnisse der ODP Berechnung für den Stator und die Statorbaugruppe über dem verwendeten FE-Netz dargestellt. Für den Stator können einzelne Punkte an den Statorzähnen identifiziert werden, an denen Einträge im ODP Vektor von Null verschieden sind. Für die Statorbaugruppe können keine Punkte auf Basis der ODP Berechnung identifiziert werden.

4. Erweitertes Optimum Driving Point (eODP) Kriterium

Um mögliche Anregungspunkte auch für Baugruppen von elektrischen Maschinen modellbasiert identifizieren zu können wird ein erweiterter Algorithmus basierend auf dem ODP Kriterium vorgeschlagen. Die Kernidee ist eine Sortierung der Eigenvektoren in Gruppen, die mit ähnlichen Punkten angeregt werden können. Darüber hinaus wird ein numerisches Abbruchkriterium der Sortierung eingeführt. Der Programmablaufplan des vorgeschlagenen „eODP“ Algorithmus ist in Abb. 4 dargestellt.

Zu Beginn wird ein Abbruchkriterium in Form eines minimalen Mittelwertes des ODP Vektors definiert. Anschließend werden die

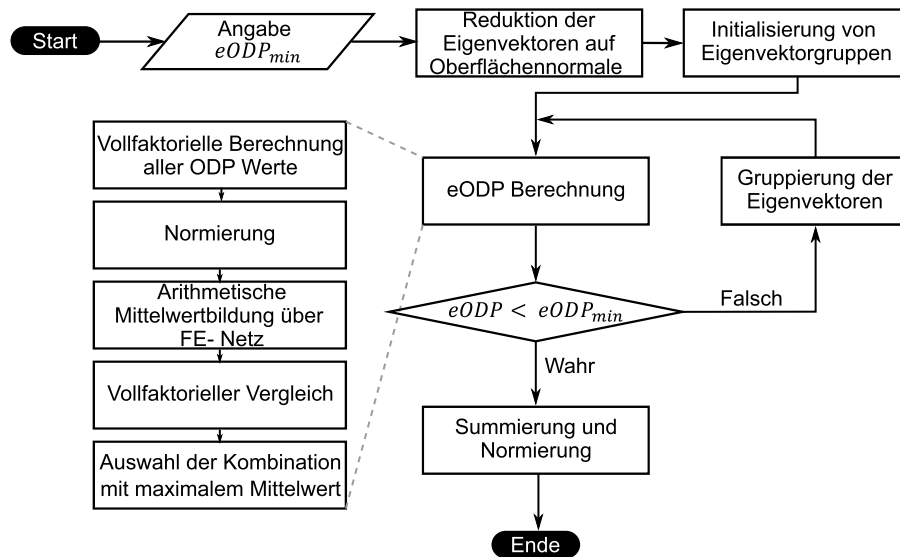


Abb. 4. Programmablaufplan des entwickelten „eODP“-Algorithmus

Eigenvektoren auf die Oberflächennormalenrichtung reduziert, unter der Annahme, dass mit den gängigen Messverfahren nur in dieser Richtung eine Kraft in die Struktur eingeprägt werden kann. Es wird nun für jeden einzelnen Eigenvektor eine Gruppe gebildet. Anschließend wird für alle möglichen Kombinationen der Eigenvektorgruppen untereinander der ODP Vektor nach Gl. (7) berechnet und normiert. Danach erfolgt eine arithmetische Mittelwertbildung des jeweiligen ODP Vektors. Es wird die Gruppierung mit dem maximalen Mittelwert gespeichert, falls dieser größer ist als das zu Beginn definierte Abbruchkriterium. Dann beginnt die Berechnung erneut. Man erhält verschiedene Eigenvektorgruppen, deren ODP Vektoren Einträge enthalten, die als potentielle Anregungspunkte infrage kommen. Zur Darstellung des Ergebnis wird nach Erreichen des Abbruchkriteriums die Summe der ODP Vektoren der einzelnen Gruppen gebildet und normiert.

In Abb. 5 und Abb. 6 sind die Ergebnisse des vorgeschlagenen eODP Algorithmus für Stator und Statorbaugruppe dargestellt. Zur Berechnung wird für beide Modelle das Abbruchkriterium $eODP_{min} = 0.005$ angenommen. Die Maxima des eODP Kriteriums für den einzelnen Stator liegen an ähnlichen Orten, wie jene der ODP Berechnung in Abb. 2. Für die Statorbaugruppe können im Vergleich zur klassischen ODP Berechnung nun Punkte auf der Struktur identifiziert werden.

5. Optimale Sensorplatzierung

Um die Eigenformen für eine Modellkorellation aus der experimentellen Modalanalyse eindeutig rekonstruieren zu können, werden hier zwei Vorgehensweisen empfohlen. Wie in [2] beschrieben, kann es für die Verbesserung des Signal zu Rausch Verhältnis in der Messung günstig sein, die Sensoren nicht auf Schwingungsknoten der Struktur zu platzieren. Ein möglicher Ansatz dafür ist, die Sensoren auf lokalen Maxima des vorgeschlagenen eODP Kriteriums zu verteilen. Grundsätzlich ist dabei eine lineare Unabhängigkeit der Messpunktverteilung nicht gewährleistet.

Wendet man, wie in Abschn. 2.1 beschrieben, die QR-Zerlegung nach Gl. (8) an, kann diese Anforderung jedoch gewährleistet werden. Deshalb wird im folgenden die QR-Zerlegung auf das Modell des Stators angewendet. Man erhält für 50 Eigenvektoren folglich

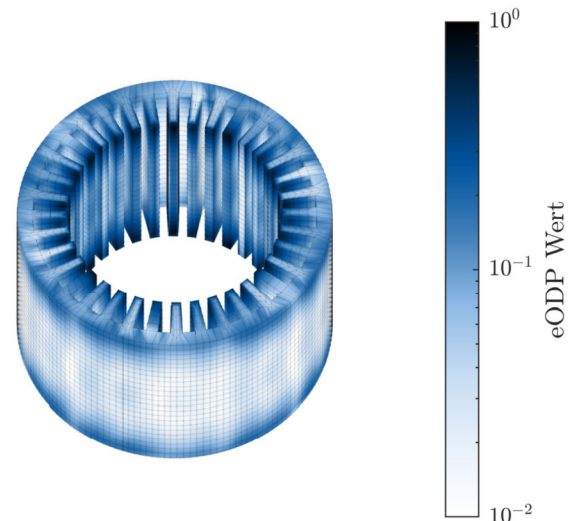


Abb. 5. Ergebnis der eODP Berechnung für den Stator

die 50 linear unabhängigen Punkte des Eigenvektoren als potentielle Messpunkte. Die Verteilung der Messpunkte über dem Stator ist in Abb. 7 dargestellt. Weiter sind die Werte des eODP Vektors dargestellt. Die gefundenen Messpositionen liegen vermehrt an Orten, an denen auch das eODP Kriterium lokale Maxima aufweist.

Zur Verifizierung der linearen Unabhängigkeit der ausgewählten Messpunkte wird das AutoMAC Kriterium nach Gl. (9) berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 8 zu sehen. Es handelt sich um eine geeignete Sensorplatzierung, da die AutoMAC Matrix nur in der Hauptdiagonalen Einträge nahe Eins aufweist.

6. Messergebnisse

Zur Bewertung der vorgeschlagenen Verfahren zur optimalen Messpunktplatzierung wird eine experimentelle Modalanalyse an dem betrachteten Stator durchgeführt. Der Stator wird dazu entsprechend den Empfehlungen in [5], um den Einfluss der Aufhängung zu minimieren, orthogonal zur ersten Eigenform an Expanderseilen

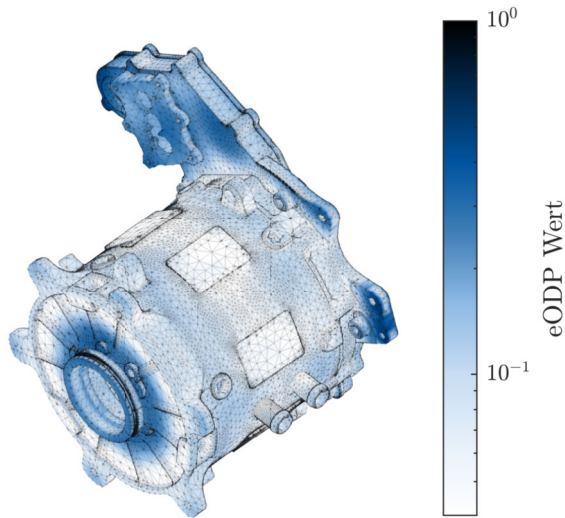


Abb. 6. Ergebnis der eODP Berechnung für die Statorbaugruppe

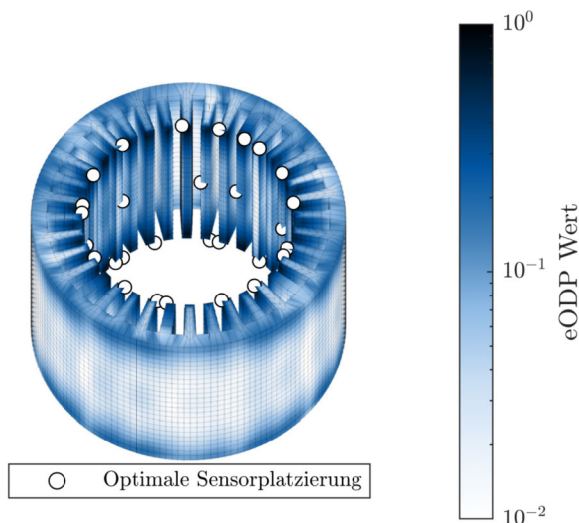


Abb. 7. Ergebnis der optimalen Sensorplatzierung auf Basis der QR-Zerlegung über dem eODP Vektor für den Stator

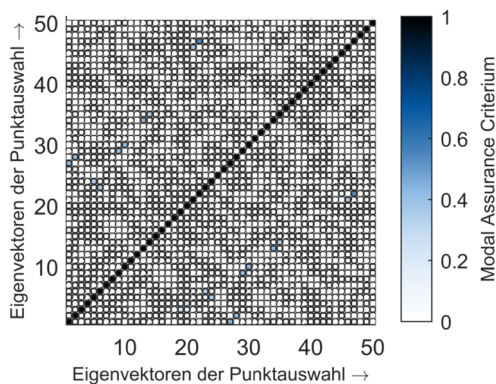


Abb. 8. Ergebnis der AutoMAC Berechnung für die Messpunkte der QR-Zerlegung des Stators

aufgehängt. Es wird eine Hammerschlagmessung mit einem Impulshammer vom Typ PCB-086C03 durchgeführt. Die Schwingungsantwort wird mit 3D Beschleunigungssensoren vom Typ PCB-356A03 mit einer Abtastfrequenz von 48 kHz gemessen. Insgesamt wird an 126 Messpunkte in Oberflächennormalenrichtung angeregt und die Schwingungsantwort in allen drei Raumrichtungen gemessen. Unter den Messpunkten befinden sich sowohl die durch lokale Maxima des eODP Kriterium ermittelten Messpunkte als auch die 50 Messpositionen der QR-Zerlegung.

Da die vorgestellten Verfahren alle auf berechneten Eigenvektoren eines FE-Modells basieren, wird zunächst analysiert, ob das verwendete Modell eine ausreichende Vorhersagegenauigkeit bezüglich der Eigenformen besitzt. Dazu wird das MAC Kriterium zwischen gemessenen Eigenvektoren und denen des Modells berechnet. Es werden im folgenden nur Eigenvektoren bis 5 kHz analysiert. Da der Stator rotationssymmetrisch im FE-Modell modelliert wird und ein homogenisiertes Materialmodell verwendet wird, muss zunächst die Ausrichtung der Eigenvektoren mit dem Modell abgestimmt werden. Zur Bestimmung der Eigenvektoren aus der Messung wird ein einziger Anregungspunkt mit hohem eODP Wert ausgewählt. Das Ergebnis und ein optischer Vergleich der gefundenen Eigenformen ist in Abb. 9 dargestellt. Zur Darstellung der Eigenvektoren aus der Messung werden die extrahierten Vektoren auf dem FE-Netz des Modells dargestellt. Alle nicht gemessenen Freiheitsgrade werden interpoliert.

Bei Nutzung eines einzigen Anregungspunktes in der Messung können 18 Eigenvektoren bis 5 kHz extrahiert werden. Das Modell besitzt für diesen Frequenzbereich insgesamt 22 Eigenvektoren. Die mit dem MAC Kriterium gefundenen Eigenvektorkombinationen mit hoher linearer Abhängigkeit (MAC Wert nahe 1), zeigen optisch eine sehr gute Übereinstimmung. Bei genauerem Vergleich der räumlichen Ausrichtung der Eigenvektoren fällt auf, dass nicht alle Maxima und Minima an den gleichen Punkten in Messung und Modell auftreten. Die Eigenformen treten leicht verdreht auf. Das deutet darauf hin, dass das verwendete Modell die Vorzugsrichtungen der einzelnen Schwingungsformen des Stators physikalisch nicht präzise abbildet.

Wie in [4] beschrieben wird, eignet sich die sogenannte Anregungspunktinertanz, um die Güte eines Anregungspunktes in der Messung zu bewerten. Die Anregungspunktinertanz ist die Übertragungsfunktion der Beschleunigungsantwort an einem Messpunkt bei Anregung an oder nahe des Punktes selbst. Leitet man die Rezeptanz aus Gl. (6) zwei mal im Frequenzbereich ab erhält man die Anregungspunktinertanz am Punkt k :

$$\ddot{\alpha}_{kk}(\omega) = -\omega^2 \alpha_{kk}(\omega) \quad (10)$$

In der Resonanz $\omega = \omega_r$ ist die Anregungspunktinertanz proportional zum Eigenvektorprodukt am Punkt k , $\Phi_{kr} \Phi_{kr}$. Befindet sich der Anregungspunkt für die Eigenfrequenz ω_r in einem Schwingungsknoten, verschwindet das Produkt $\Phi_{kr} \Phi_{kr}$ und die Resonanz ist in der Anregungspunktinertanz sichtbar.

In Abb. 10 sind zwei ausgewählte Messpositionen über dem eODP Kriterium dargestellt. Der Wert des eODP an Messposition Nr. 19 ist relativ gering, der Wert an Messposition Nr. 118 weist ein lokales Maximum auf. Die Anregungspunktinertanz von Punkt 19 weist bis auf die erste Eigenfrequenz geringere Amplituden an den Resonanzen im Vergleich zu Punkt 118 auf. Außerdem werden erwartungsgemäß Eigenvektoren mit Schubverformungsanteil nicht angeregt, da Punkt 19 auf entsprechenden Schwingungsknoten dieser Eigenvektoren liegt.

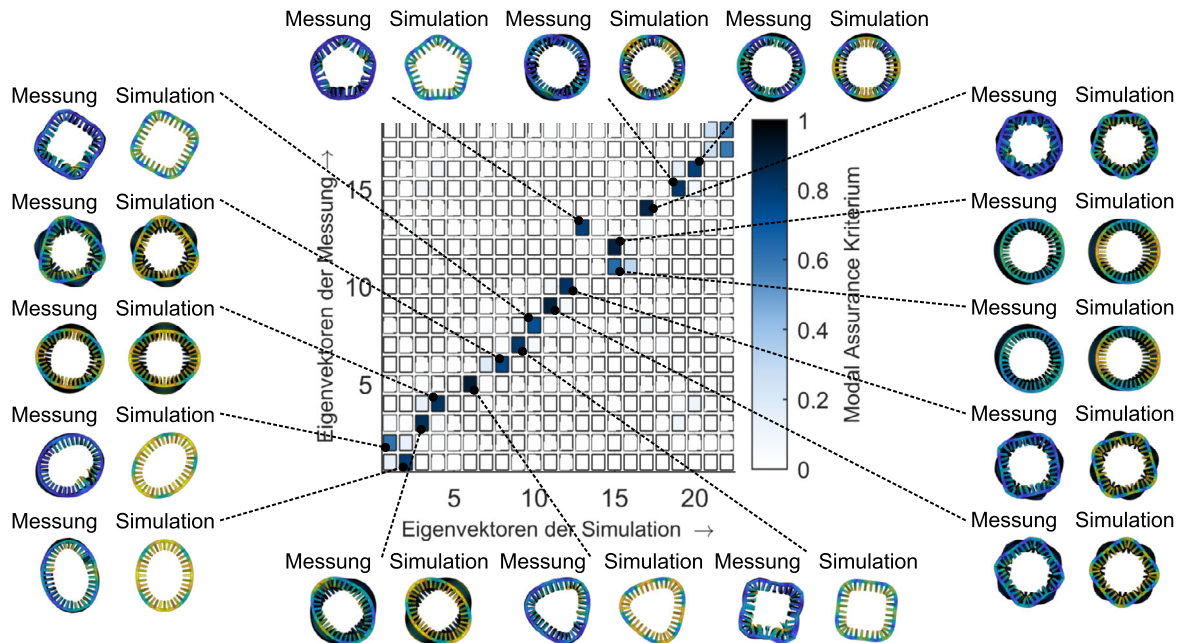


Abb. 9. Eigenvektorkorrelation der Messung mit FE-Modell über das MAC Kriterium

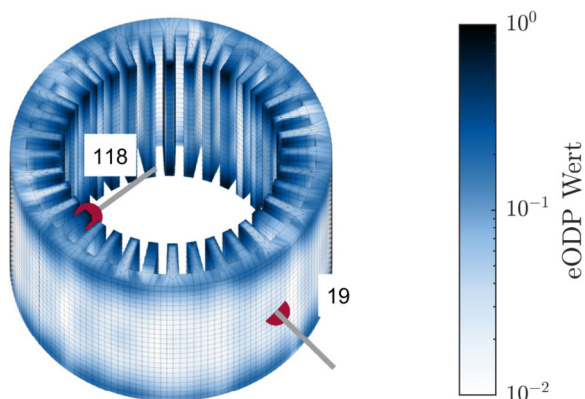


Abb. 10. Positionierung ausgewählter Messpunkte

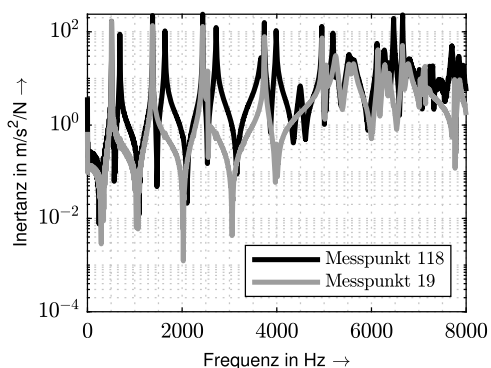


Abb. 11. Anregungspunkteinertanz in Oberflächennormalen Richtung für ausgewählte Messpunkte

7. Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Verfahren zur optimalen Messpunktauswahl bei der experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen untersucht. Bei der Anwendung des Optimum Driving Point Kriteriums aus [2] zur Identifikation von geeigneten Anregungspunkten wird anhand einer exemplarischen Traktionsmaschine gezeigt, dass für einen einzelnen Stator Anregungspunkte identifiziert werden können, bei einer Baugruppe können jedoch keine Punkte gefunden werden.

Es wird deshalb ein erweiterter ODP Algorithmus (eODP) vorgeschlagen, der eine modellbasierte Anregungspunktbestimmung auch für Baugruppen von elektrischen Maschinen erlaubt. Zur optimalen Bestimmung der Sensorplatzierung wird die QR-Zerlegung angewendet.

An einem exemplarischen Stator wird im Modell gezeigt, dass mit diesem Verfahren eine minimale Anzahl an Messpositionen gefunden werden kann, die eine mathematisch eindeutige Unterscheidung der Eigenvektoren erlaubt.

An diesem Stator wird anschließend eine experimentelle Modalanalyse durchgeführt. Für einen einzelnen Anregungspunkt, der zuvor aus dem eODP Kriterium bestimmt wird, wird eine Eigenvektorkorrelation mit entwickeltem FE-Modell durchgeführt. Dazu wird das Modal Assurance Kriterium (MAC) genutzt. Für Eigenvektorkorrelationen, die eine hohe Korrelation mit dem MAC Kriterium aufweisen, wird zusätzlich ein optischer Vergleich der Eigenvektoren gezeigt.

Erst nach einer initialen Ausrichtung der Eigenvektoren zwischen Messung und Simulation können gut korrelierte Eigenvektorkorrelationen gefunden werden. Es ist folglich mit den hier verwendeten Modellen für das analysierte Blechpaket nicht möglich die Vorzugsrichtungen der Eigenformen hinreichend genau vorherzusagen. Gründe hierfür können der Einfluss der Aufhängung sowie Vorzugsrichtungen der einzelnen Bleche des Statorpakets sein. Mit einem homogenisierten Materialmodell können diese nicht hinreichend abgebildet werden. Die Vorzugsrichtungen können erheblichen Einfluss auf die Lage der einzelnen Schwingungsknoten auf der Struktur und somit

auf den möglichen Energieeintrag der Anregung an einem Punkt in einzelne Schwingungsformen haben. Es wird deshalb für die experimentelle Modalanalyse von elektrischen Maschinen empfohlen stets mehrere Anregungspunkte für die Messung auszuwählen. Wie anhand der Analyse von Anregungspunkteinertanzen gezeigt wird, kann das hier entwickelte eODP Verfahren dennoch sehr gute Anhaltspunkte für geeignete Anregungspunkte liefern.

Funding Note Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende

nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Carsten Schedlinski, M. L. (1996): An approach to optimal pick-up and exciter placement. In Int. modalanalysis conference IMAC.
2. Imamovic, N. (1998): Validation of large structural dynamics models using modal test data. Ph.D. thesis, Imperial College of Science, Technology & Medicine, University of London.
3. Kammer, D. C. (1991): Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures. J. Guid. Control Dyn., 14(2), 251–259.
4. Schwarz, B., Richardson, M., Avitabile, P. (2002): Locatin optimal references for modal testing. In Int. Modalanalysis Conference IMAC.
5. Ewins, D. J. (2000): Modal testing: theory, practice and application. Engineering dynamics series. 2. Aufl. (Bd. 10). Hertfordshire: Research Studies Press.
6. Allemang, R. J. (2003): The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse. J. Sound Vib., 37(8), 14–23.
7. van der Giet, M., Kasper, K., De Doncker, R. W., Hameyer, K.: (2012): Material parameters for the structural dynamic simulation of electrical machines. In 2012 XXth international conference on electrical machines.

Autoren



Marius Franck

schloss im Jahr 2018 das Maschinenbau-Studium an der RWTH Aachen University mit dem Master of Science ab. Seit August 2018 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen der RWTH Aachen. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der akustischen und strukturdynamischen Untersuchung von elektrischen Maschinen.



Sebastian Mönninghoff

schloss im Jahr 2018 das Maschinenbau-Studium an der RWTH Aachen University mit dem Master of Science ab. Seit Januar 2019 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen der RWTH Aachen. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der Auslegung von elektrischen Maschinen mit hoher Leistungsdichte zur Anwendung in Luftfahrt- und Automobilanwendungen.



Daniel Butterweck

erhielt 2013 seinen Master of Science Abschluss in Elektrotechnik, Informationstechnik und Technische Informatik der RWTH Aachen University, Deutschland. Seit Januar 2014 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen der RWTH Aachen University, wo er seit März 2018 als Oberingenieur tätig ist. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der

Simulation und Auslegung elektrifizierter Antriebstränge.



Kay Hameyer

erwarb sein Diplom in Elektrotechnik von der Universität Hannover und promovierte an der Technischen Universität Berlin. Nach seinem Studium arbeitete er für die Robert Bosch GmbH in Stuttgart als Entwicklungsingenieur für permanentmagneterregte Servomotoren und Kraftfahrzeugbordnetzkomponenten. Bis 2004 war Dr. Hameyer Professor für Numerische Feldberechnungen und Elektrische Maschinen an der KU Leuven in Belgien. Seit 2004 ist er Professor und Leiter des Instituts für Elektrische Maschinen der RWTH Aachen University. 2006 war er Vizedekan der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der RWTH Aachen University und von 2007 bis 2009 Dekan der Fakultät. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der numerischen Feldberechnung und -optimierung, dem Entwurf und der Regelung elektrischer Maschinen, insbesondere von permanentmagneterregten Maschinen und Drehfeldmaschinen sowie der Entwicklung von Methoden für die virtuelle Realität. Seit vielen Jahren beschäftigt sich die Arbeit von Dr. Hameyer mit der Magnetschwebetechnik für Antriebssysteme, der elektromagnetischen Geräuschanregung elektrischer Maschinen und der Charakterisierung ferromagnetischer Materialien und Isolierwerkstoffe. Er ist Autor von mehr als 350 Journal-Publikationen, mehr als 700 internationalen Konferenzveröffentlichungen und Autor von vier Büchern. Dr. Hameyer ist Mitglied im VDE, IEEE Senior Member und Fellow des IET.