

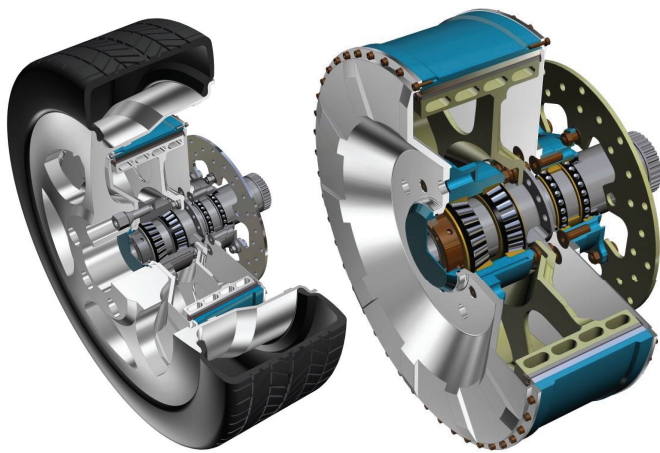
# Numerische und experimentelle Schwingungsanalyse eines Radnabenmotors zur Entwicklung akustischer Maßnahmen

Fabian Duvigneau<sup>1</sup>, Ulrich Gabbert<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Numerische Mechanik, Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 39106 Magdeburg, Deutschland, Email: fabian.duvigneau@ovgu.de

## Einleitung

Das innovative Konzept eines Radnabenmotors ist eine attraktive Möglichkeit, im Rahmen der Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen eine verbesserte Fahrdynamik in Kombination mit einer hohen Leistungsdichte zu erreichen. Die Abbildung 1 zeigt einen elektrischen Radnabenmotor, der durch seine Luftspaltwicklung als Außenläufer eine geringere Masse als die Konkurrenz aufweist [1]. Durch die Kombination der Luftspaltwicklung mit einer zusätzlichen Nutenwicklung wird außerdem eine hohe Leistung erreicht [2]. Aus diesen Gründen besitzt dieser Radnabenmotor im Vergleich zu anderen Wettbewerbern eine besonders hohe Leistungsdichte.



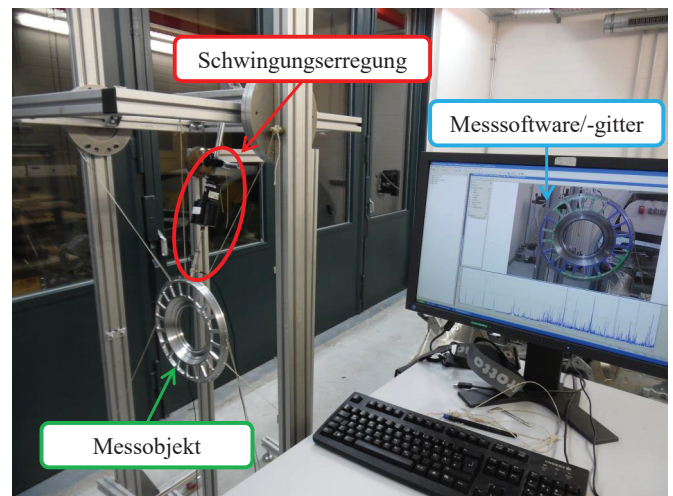
**Abbildung 1:** Innovativer Radnabenmotor mit einer Luftspaltwicklung [3, 4]

Für Passagiere und Passanten stellen Radnabenmotoren als typische Elektromaschinen mit der zugehörigen charakteristischen hochfrequenten Geräuschemission allerdings eine ungewohnte Geräuschquelle dar. Aus diesem Grund werden die entstehenden akustischen Emissionen besonders deutlich wahrgenommen. Im vorliegenden Beitrag wird ein moderner Radnabenmotor numerisch und experimentell untersucht, um später aus den gewonnenen Erkenntnissen verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung des akustischen Verhaltens des Radnabenmotors ableiten und bewerten zu können. Zunächst lag der Fokus der Untersuchungen auf der detaillierten Analyse der Schwingungen der Festkörperstruktur, die aufgrund der Mechanismen der Transmission und Emission die wesentliche Ursache für die resultierende Schallabstrahlung des Radnabenmotors darstellen. Des Weiteren wurden verschiedene passive Maßnahmen zur Schwin-

gungsunterdrückung, beispielsweise auf Basis von diversen Schaumsystemen und granularen Medien, hinsichtlich ihrer Effizienz und der erforderlichen Zusatzmasse verglichen. Die experimentellen Untersuchungen wurden mit Hilfe eines eindimensionalen Laservibrometers der Firma Polytec durchgeführt (PSV-400). Für die numerischen Analysen wurde die Finite Elemente Methode (FEM) [5] eingesetzt. Das entwickelte Simulationsmodell des Radnabenmotors wurde unter Zuhilfenahme einer zuvor durchgeführten Referenzmessung des Schwingungsverhaltens validiert.

## Experimentelle Untersuchungen

Für die experimentelle Schwingungsanalyse wurden die zu vermessenden Komponenten des Radnabenmotors mit synthetischen Polymerfäden an einem Rahmen aus Aluminiumprofilen befestigt (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Für die experimentelle Schwingungsanalyse genutzter Versuchsaufbau

Diese frei-freie Lagerung ist besonders geeignet, um auf einfache Weise numerische und experimentelle Schwingungsanalysen vergleichend bewerten zu können. Andere Lagerungsbedingungen, wie eine Einspannung oder eine gelenkige Lagerung, sind in einem FE-Modell nicht so leicht identisch zum Experiment realisierbar [6]. Die Unsicherheiten und der Einfluss dieser Lagerungsbedingungen sind sehr groß, so dass eine gute Übereinstimmung in diesen Fällen meist nur über zusätzlichen Modellierungsaufwand sowie zeitaufwendige Modellanpassungen erreicht werden kann. Um durch die Ankopplung der An-

regung keine undefinierte Lagerungsbedingung zu erzeugen, erfolgte die Schwingungserregung mit Hilfe eines Impulshammers. Somit sind weiterhin frei-freie Lagerungsbedingungen gegeben. Die Anregung muss reproduzierbar sein, da sie für jeden einzelnen Scanpunkt und die dazugehörige Anzahl an Mittlungen wiederholt werden muss. Aus diesem Grund wurde der Kopf des Impulshammers (Force Transducer Type 2800, Brüel & Kjær) auf einen elektrodynamischen Schwingungserreger (Mini Shaker Type 4810, Brüel & Kjær) montiert. Diese Kombination ist in Abbildung 2 mit Hilfe der roten Ellipse hervorgehoben.

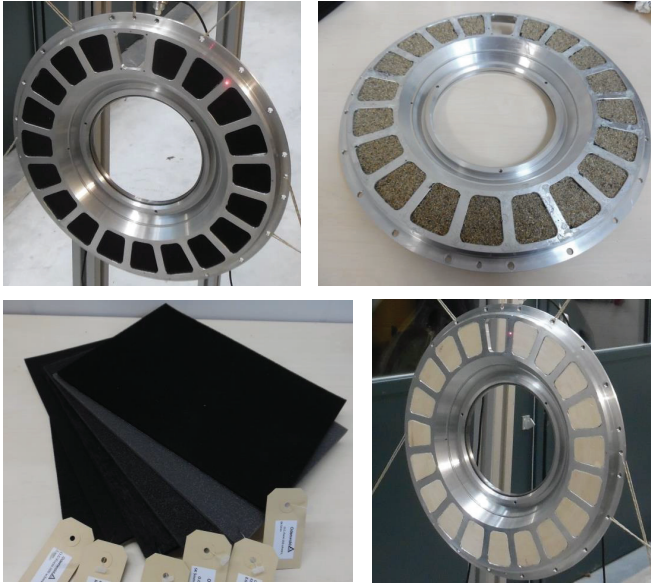


Abbildung 3: Einige der untersuchten Füllmaterialien

Eine Idee, das akustische Verhalten des Radnabenmotors zu verbessern, war es, die Seiten des Gehäuses mit Hohlräumen zu versehen und diese mit absorbierenden Materialien zu füllen. In Abbildung 3 sind einige dieser Materialien abgebildet. Neben Balsaholz wurden auch imprägnierte Schaumstoffe, mit denen in einem anderen Projekt bereits gute Erfahrungen gesammelt wurden [7], in die Untersuchungen einbezogen. Außerdem wurde getestet, ob das in [8] für eine Ölwanne entwickelte Konzept zur Schwingungsreduktion auf Basis granularer Medien, auf den hier vorliegenden Anwendungsfall übertragbar ist. In [9] wurde gezeigt, dass eine Konstruktion mit innen liegenden Kavitäten eine ideale Ausgangsbasis für den Einsatz granularer Medien zur Schwingungsreduktion darstellt. Das Ergebnis einer ausführlichen Studie der unterschiedlichen Füllmaterialien war, dass Balsaholz aus akustischer Sicht die schlechtest mögliche Füllung der Hohlräume darstellt und sogar schlechter als gar keine Füllung ist. Die Füllung mit Sand und einem der imprägnierten Schäume hatte eine große Reduktion der Schwingungsamplituden zur Folge. Allerdings ist die Masse des Sandes wesentlich größer, dies hatte auch eine Verschiebung der Eigenfrequenzen in tiefere Frequenzbereiche zur Folge. Darüber hinaus verursacht eine Sandfüllung Probleme bei der Assemblierung. Bei

der Sandfüllung sind zwar keine Halbzeuge notwendig, aber ein definiertes und sauberes Arbeiten beim Füllen und Zusammenbau gestaltet sich schwierig, insbesondere im Hinblick auf eine automatisierte Fertigung. Aus den genannten Gründen erscheint die Verwendung von imprägniertem Schaummaterial am geeignetsten, um die Hohlräume in den Gehäusedeckeln zu füllen.

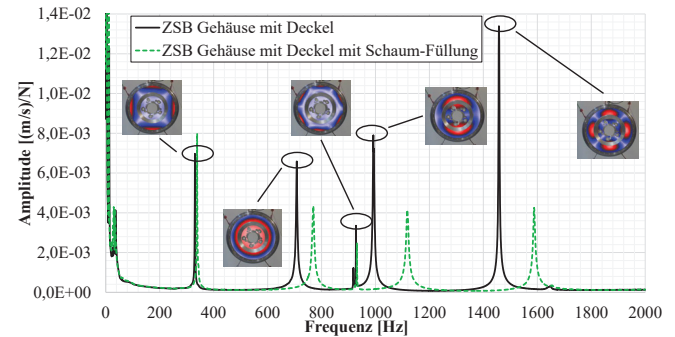


Abbildung 4: Mittlere Schwingungsamplitude der äußeren Frontfläche des Rotors und die dazugehörigen Eigenformen, Vergleich der Konfiguration mit und ohne Schaumfüllung

Die Abbildung 4 zeigt beispielhaft den Mehrwert der vorgenommenen konstruktiven Maßnahme anhand der gemessenen Schwingungsamplituden auf der Oberfläche des Rotors. Diese konstruktive Maßnahmen umfasst eine Schaumfüllung sowie eine stoffschlüssige Abdeckung der Seitenteile des Gehäuses mit Deckblechen. Als Füllmaterial wurde einer der zuvor untersuchten, imprägnierten Schäume verwendet, der sich als ein guter Kompromiss zwischen erreichbarer Schwingungsreduktion und erforderlicher Zusatzmasse erwiesen hat. Auf die Schwingungsformen hat die konstruktive Maßnahme keinen signifikanten Einfluss, da die massiven Rotorkomponenten, die das Gesamtsystemverhalten dominieren, davon kaum beeinflusst werden. Allerdings zeigen die erhöhten Eigenfrequenzen, dass die Maßnahme neben der Amplitudenreduktion auch eine Versteifung bewirkt.

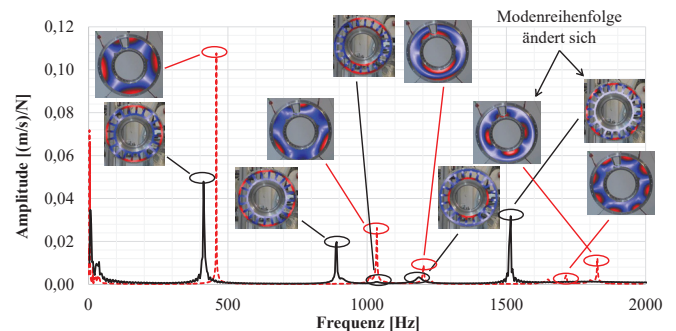


Abbildung 5: Veränderung des Schwingungsverhaltens durch den Zusammenbau von Einzelkomponenten

Um das Verhalten des Gesamtsystems und das Zusammenspiel der wichtigsten Einzelkomponenten besser zu verstehen, wurden intensive experimentelle Studien durchgeführt. Dabei wurden unter anderem verschiedene Zusammenbaustufen hinsichtlich ihrer Eigen-



frequenzen und Eigenformen sowie der sich einstellenden Schwingungsamplituden untersucht. Auf diesem Wege konnten die Komponenten identifiziert werden, die das Schwingungsverhalten maßgeblich dominieren. Die Abbildung 5 zeigt als einen solchen Zusammenhang exemplarisch die Frequenzgänge für zwei Zusammenbaustufen eines Gehäusedeckels. Eine davon ist das Aluminiumskelett des Gehäusedeckels mit Lagereinheit und die andere Konfiguration ist zusätzlich mit einem Deckblech versehen. Neben dem Frequenzgang sind in Abbildung 5 die Eigenschwingungsformen der beiden Konfigurationen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Deckblech eine Versteifung des Systems bewirkt und die Eigenfrequenzen steigen. Dabei steigen nicht alle Eigenfrequenzen im gleichen Maße, d. h. es besteht kein linearer Zusammenhang. Dadurch kann es zu einer Änderung der Modenreihenfolge kommen (siehe Abbildung 5). Außerdem ist klar ersichtlich, dass die Eigenformen maßgeblich durch das innen liegende Skelett bestimmt werden. Darüber hinaus weist die wesentlich großflächigere, dünnwandige Struktur, die im Vergleich zum Skelett viel nachgiebiger ist, größere Schwingungsamplituden auf und stellt im akustischen Sinne einen wesentlich effektiveren Strahler dar.

### Numerische Untersuchungen

Für die numerische Schwingungsanalyse wurde ein FE-Modell des gesamten Radnabenmotors aufgebaut, um verschiedene Designkonfigurationen des Gehäuses hinsichtlich der resultierenden Schwingungen sowie der daraus resultierenden Schallabstrahlung vergleichend bewerten zu können. Zu Validierungszwecken wurde zunächst ausschließlich der komplette Rotor betrachtet. Der dafür verwendete Versuchsstand ist in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: Für die Validierung der numerischen Schwingungsanalyse genutzter Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung entsprechen der bereits eingangs beschriebenen Vorgehensweise. Der Rotor beinhaltet einen Seitendeckel mit Verbindungsnieten, Füllung und Deckblech sowie das zylindrische Gehäuse mit Eisenrückschluss und innen applizierten Permanentmagneten. Das FE-Modell des Rotors ist in Abbildung 7 dargestellt.

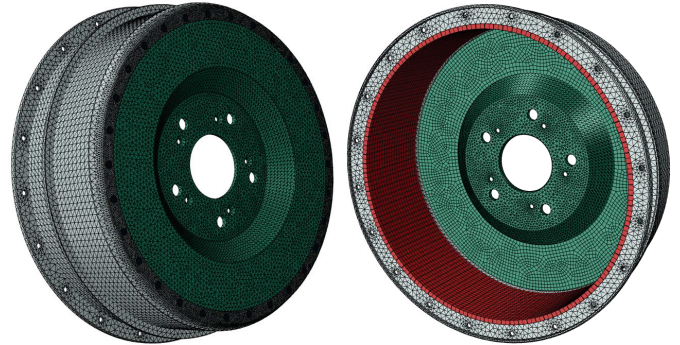


Abbildung 7: FE-Modell des Rotors zur numerischen Schwingungsanalyse des Radnabenmotors mit gefüllten inneren Kavitäten

Die Abbildung 8 zeigt für fünf verschiedene Eigenfrequenzen den Vergleich der im Experiment gemessenen (obere Zeile in Abbildung 8) mit den numerisch berechneten Eigenschwingungsformen (mittlere Zeile in Abbildung 8). Der Vergleich der Eigenformen erfolgt bezüglich der Messfläche des Laservibrometers, also der äußeren Seitenfläche des Rotors. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Simulationsmodell sehr gut in der Lage ist, die Eigenfrequenzen und Eigenformen des komplexen Gesamtsystems, das unter anderem mehrere Fügstellen aufweist, vorherzusagen.

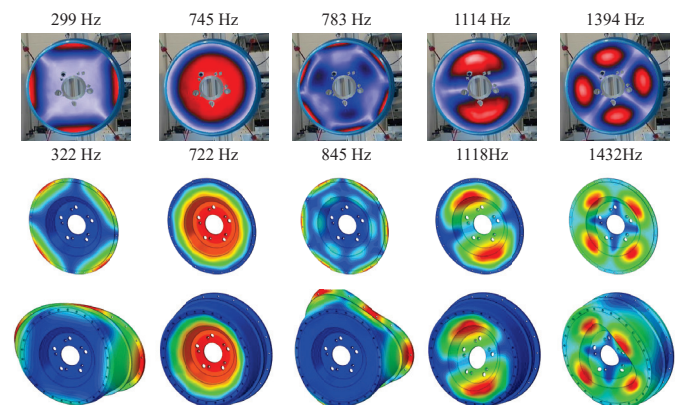


Abbildung 8: Validierung der Ergebnisse des numerischen Modells mit Hilfe der Ergebnisse der experimentellen Schwingungsanalyse

In der unteren Zeile in Abbildung 8 sind zusätzlich die Eigenformen des gesamten Rotors dargestellt, um zu zeigen, dass die numerische Analyse im Vergleich zur Laservibrometermessung die Möglichkeit bietet, einen besseren Eindruck vom Schwingungsverhalten des Gesamtsystems zu erhalten. Die erste und dritte Spalte der Ab-

bildung 8 verdeutlichen, dass die Betrachtung der Seitenfläche in diesen Fällen nicht repräsentativ für die Eigenform des Gesamtsystems ist und die kritischen Schwingungsregionen nicht erfasst werden. Die Messung mittels Laservibrometer ist hinsichtlich der erfassbaren Flächen eines Messobjektes begrenzt. Es können ausschließlich Oberflächen vermessen werden, die für den Laserstrahl zugänglich sind. Außerdem stellen stark gekrümmte Flächen ein Problem dar. Dies verdeutlicht den Mehrwert einer numerischen Schwingungsanalyse, die Informationen über alle Bereiche der untersuchten Struktur liefert. Trotzdem sind Validierungsmessungen stets empfehlenswert, um die Prognosefähigkeit der Modellierung nachzuweisen.

## Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Radnabenmotor numerisch und experimentell untersucht. Es wurden passive Maßnahmen zur Schwingungsreduktion unter Verwendung von Schaumsystemen und granularen Medien hinsichtlich ihrer Effizienz und der erforderlichen Zusatzmasse verglichen. Dabei haben granulare Materialien, wie bereits in den vorangegangenen Studien [8, 9], gute Schwingungsreduktionen bewirkt. Die untersuchten imprägnierten Schäume zeigten ähnlich große Amplitudenreduktionen, erfordern allerdings eine geringere Zusatzmasse. Außerdem ist ihre Handhabung und Verarbeitung einfacher als die der granularen Materialien. Aus diesen Gründen sind die imprägnierten Schaummateriale für den hier vorliegenden Anwendungsfall besser geeignet. Die intensiven experimentellen Studien zum Schwingungsverhalten der Einzelkomponenten und des Gesamtsystems werden in weiterführenden Arbeiten genutzt, um aus den gewonnenen Erkenntnissen verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung des akustischen Verhaltens des Radnabenmotors abzuleiten. Die daraus entwickelten Designkonfigurationen sollen anschließend mit Hilfe des numerischen Modells zur Schwingungsanalyse bewertet werden, das bereits im Rahmen dieser Arbeit validiert wurde. Zukünftig soll die Simulationskette so erweitert werden, dass die elektromagnetische Anregung und die Schallabstrahlung in die Umgebung berechnet werden kann [10]. Mit Hilfe dieses ganzheitlichen Ansatzes sollen die Verbesserungspotentiale durch geänderte Anregungs- und Übertragungsmechanismen bewertet werden. Der ganzheitliche Simulationsansatz wird dazu vorab durch Schwingungsmessungen des rotierenden Systems mittels Derotator sowie durch Mikrofonarraymessungen in einem Freifeldraum validiert. Am Ende soll, wie in [11] dargestellt, die menschliche Wahrnehmung im ganzheitlichen Ansatz berücksichtigt werden.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung der Arbeiten im Rahmen des Verbundprojektes „COMpetence in MObility - Automotive“, das mit Geldern des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung und des Landes Sachsen-Anhalt gefördert wird. Darüber hinaus möchten sich die Autoren bei ihren Projektpart-

nern des Lehrstuhls Mechatronik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg für die Bereitstellung der Konstruktionsdaten und der Prototypen bedanken.

## Literatur

- [1] A. Zörnig, R. Hinzemann, and R. Kasper, “Methodische Konstruktion eines Radnabenmotors mit Radialfluss-Luftspaltwicklung für Kleinwagen,” in *14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik*, 2016.
- [2] R. Kasper and N. Borchardt, “Boosting Power Density of Electric Machines by Combining Two Different Winding Types,” in *7th IFAC Symposium on Mechatronic Systems*, 2016.
- [3] A. Zörnig, N. Vittayaphadung, and R. Kasper, “Deformation and Modes of a Wheel Hub Motor with Air Gap Winding,” in *11. Magdeburger Maschinenbautage: Effizienz, Präzision, Qualität*, 2013.
- [4] N. Borchardt, B. Penzlin, A. Zörnig, W. Heilmann, and R. Kasper, “Entwicklung und Validierung eines BLDC Radnabenmotors mit Luftspaltwicklung,” in *11. Magdeburger Maschinenbautage: Effizienz, Präzision, Qualität*, 2013.
- [5] K. J. Bathe, *Finite-Elemente-Methoden*. Springer-Verlag Berlin, 2002.
- [6] F. Duvigneau, S. Koch, R. Orszulik, E. Woschke, and U. Gabbert, “About the vibration modes of square plate-like structures,” *Technische Mechanik*, vol. 36, pp. 180–189, 2016.
- [7] P. Schrader, F. Duvigneau, T. Schwammberger, M. Feist, H. Rottengruber, and U. Gabbert, “Numerische und experimentelle Parameterstudien zum akustischen Verhalten monosubstrater Twinlayer für automotiv Anwendungen,” in *9. Magdeburger Akustik-Symposium*, 2016.
- [8] F. Duvigneau, S. Koch, E. Woschke, and U. Gabbert, “An effective vibration reduction concept for automotive applications based on granular-filled cavities,” *Journal of Vibration and Control, online first*, DOI: 10.1177/1077546316632932, 2016.
- [9] S. Koch, F. Duvigneau, R. Orszulik, U. Gabbert, and E. Woschke, “Partial filling of a honeycomb structure by granular materials for vibration and noise reduction,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 393, pp. 30–40, 2017.
- [10] F. Duvigneau, S. Perekopskiy, R. Kasper, and U. Gabbert, “A holistic simulation workflow to design an acoustically optimized electric wheel hub motor,” in *8th International Conference on Design, Modelling and Experiments in Advanced Structures and Systems – DeMEASS VIII*, 2017.
- [11] F. Duvigneau, S. Liefold, M. Höchstetter, J. Verhey, and U. Gabbert, “Analysis of simulated engine sounds using a psychoacoustic model,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 366, pp. 544–555, 2016.