

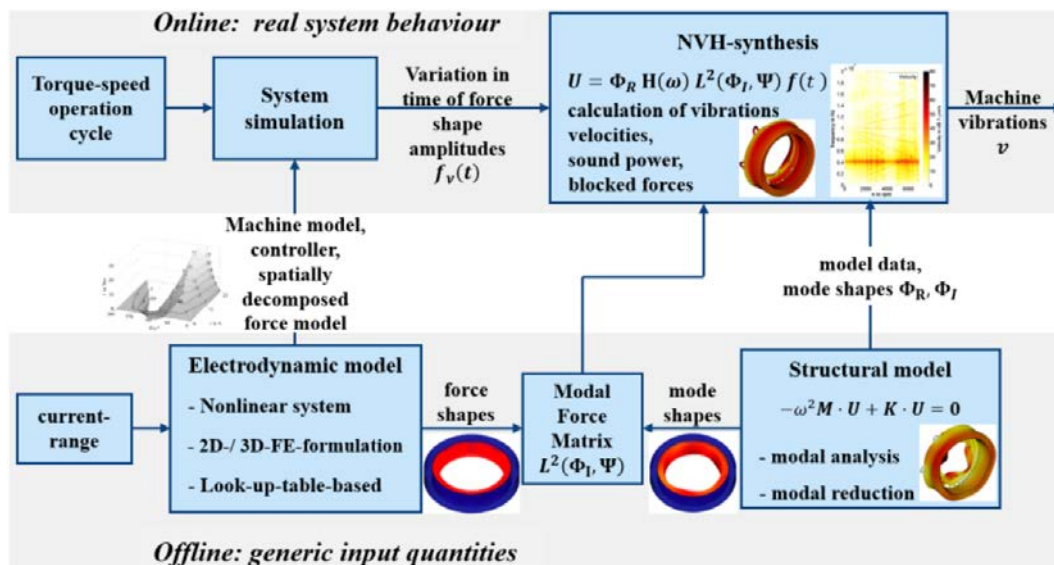
## Forschungsprojekte im Labor für Messtechnik

### BERECHNUNG DES AKUSTISCHEN VERHALTENS EINER ELEKTRISCHEN MASCHINE

Durch das stetige Ansteigen der Komfortansprüche an heutige Fahrzeuge, gewinnen in der heutigen Entwicklung Themen an Bedeutung, die früher noch eher eine untergeordnete Rolle spielten. Ein typisches Beispiel dafür findet sich in dem akustischen Verhalten eines Antriebs wieder. Dieser Fachbereich wird auch als Noise-Vibration-Harshness (NVH) bezeichnet. Durch die immer leiser werdenden Motoren gilt es durch verschiedene Methoden das NVH-Verhalten zu analysieren und zu beurteilen. Auf Basis der Untersuchungen soll das Auftreten von störenden oder unangenehmen Geräuschen im Betrieb des Fahrzeuges frühzeitig erkannt und entsprechende Gegenmaßnahmen durchgeführt werden.

Im heutigen Entwicklungsprozess dominiert der Einsatz von Simulationsmodellen immer mehr und Erstmuster einer Maschine liegen immer später vor. Aus diesem Grund sollte im Rahmen einer Dissertation bei der Robert Bosch GmbH ein geeignetes Simulationsmodell entwickelt werden, mit dem möglichst früh ein Gesamteindruck des akustischen Verhaltens einer elektrischen Maschine gewonnen werden kann, um frühzeitig in den Entwicklungsprozess eingreifen zu können.

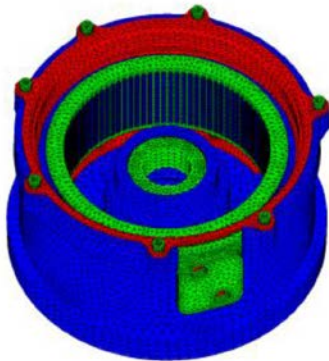
Die Grundidee des Simulationsansatzes besteht aus mehreren Teilsimulation mit verschiedenen Softwaretools wie (FEMAG, ANSYS Workbench, Abaqus und MATLAB) mit denen die einzelnen physikalischen Domänen berechnet werden. Es wird dabei in die drei Domänen Elektromagnetik, Strukturmechanik und Akustik unterschieden.



Simulationsansatzes für die Ermittlung des akustischen Verhaltens einer E-Maschine [1]

In der elektromagnetischen Simulation werden zu Beginn die auftretenden elektromagnetischen Kräfte im Luftspalt zwischen Rotor und Stator berechnet. Diese Kräfte sind die Hauptursache, neben einigen weiteren Effekten, für die Anregung der mechanischen Struktur der Maschine. Mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) werden in der strukturmechanischen Domäne die Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen ermittelt. Durch eine geeignete Kopplung der elektromagnetischen Kräfte mit den Strukturmoden lässt sich die Verteilung der auftretenden Schallschnelle an der Oberfläche der Geometrie bestimmen, die als Eingangsgröße für die akustische Simulation dient. Aus der Schallschnelle an der Oberfläche lassen sich die akustischen Größen, wie Abstrahlcharakteristik

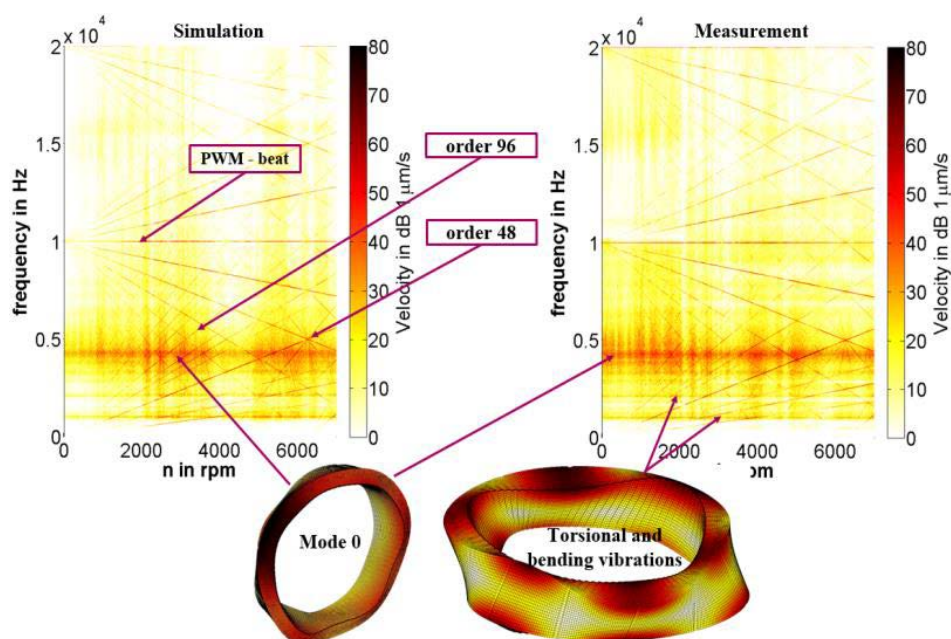
(Luftschall) und Lagerkräfte (Körperschall) durch eine weitere Berechnung ableiten. Ein Beispiel einer Radialflussmaschine und das vernetzte FEM-Modell ist in den nachfolgenden Bildern dargestellt.



Radialflussmaschine der Robert Bosch GmbH als FEM-Modell(li) und reales Bauteil(re) [1]

Der dargestellte Simulationsansatz im oberen Bild besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen. Einem Offline- und einem Onlinepfad. Der Offlinepfad dient als Parametrierung des Onlinepfades und beinhaltet neben der Geometrie, die Eigenfrequenzen der Struktur, sowie die elektromagnetischen Kräfte im Luftspalt der Maschine. Für die Ermittlung der elektromagnetischen Kräfte wird dabei angenommen, dass es sich um umlaufende Wellen mit höheren Harmonischen handelt. Auf Basis des Wicklungsschemas und des Motorstromes lassen sich die Kräfte schließlich ermitteln und wie die Strukturmoden im Frequenzbereich darstellen. Über eine modale Kopplungsmatrix werden die Größen anschließend an den Onlinepfad übergeben.

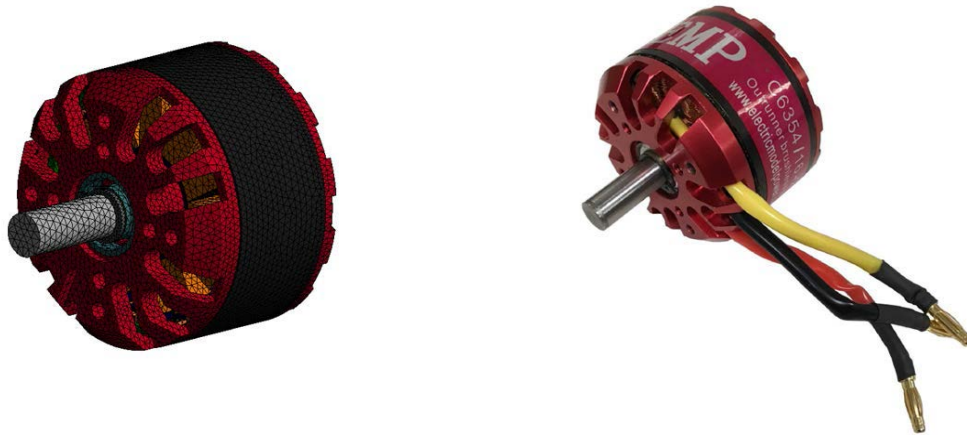
Im Onlinepfad wird zu Beginn ein Last-Zeit-Profil festgelegt, dass es zu simulieren gilt. Typischerweise werden hier Profile von Motorhochläufen verwendet, da diese auch recht einfach an geeigneten Prüfständen gemessen werden können. Das Last-Zeit-Profil wird ebenfalls in den Frequenzbereich überführt und mit der modalen Kopplungsmatrix aus dem Offlinepfad verrechnet. Als Ergebnis erhält man ein Campbell- oder auch Wasserfalldiagramm der auftretenden Oberflächenschnelle, wie nachfolgend dargestellt.



Ergebnis eines simulieren und gemessenen Motorhochlaufs [1]

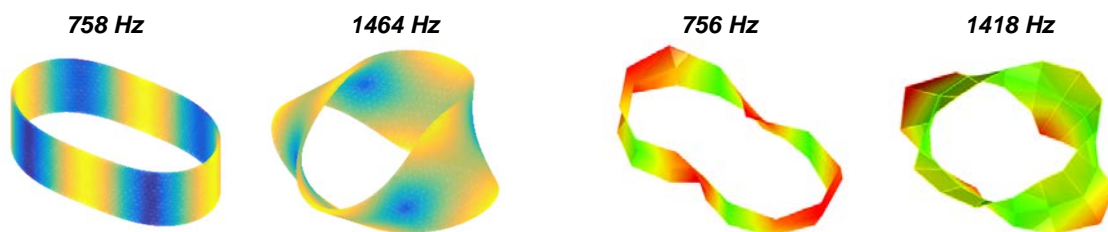
## ÜBERTRAGUNG DES BERECHNUNGSANSATZES AUF EINEN BRUSHLESS-MOTOR

Neben den Berechnungen der Synchronmaschinen der Robert Bosch GmbH galt es in einem Forschungsprojekt der Hochschule den Simulationsansatz auf ein bürstenloses Außenläufermotor zu übertragen.



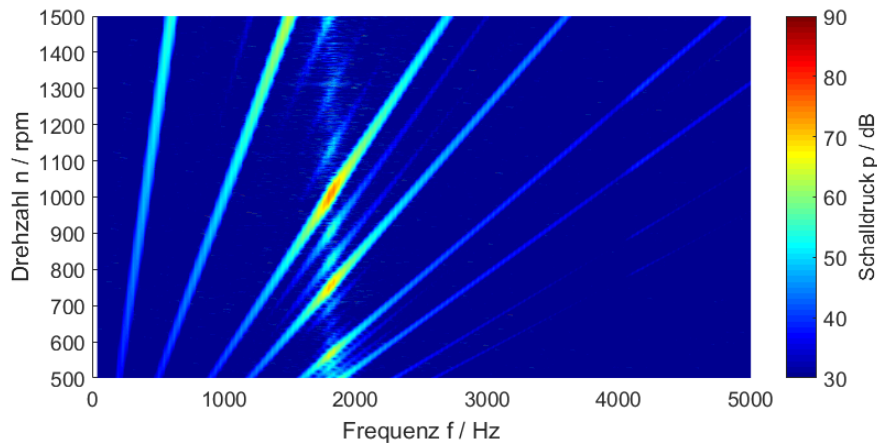
*Brushless Außenläufermotor von EMP als reales Bauteil(re) und FEM-Modell(li) [4]*

Das Ziel der Projektarbeit lag neben der Anwendung des Modells auch auf der Validierung des Ansatzes durch geeignete Messungen. Hierzu wurden an den Einzelkomponenten des Motors experimentelle Modalanalysen durchgeführt, mit denen die Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen bestimmt werden können. Diese lassen sich im Anschluss mit den Ergebnissen aus der strukturellen Simulation vergleichen.

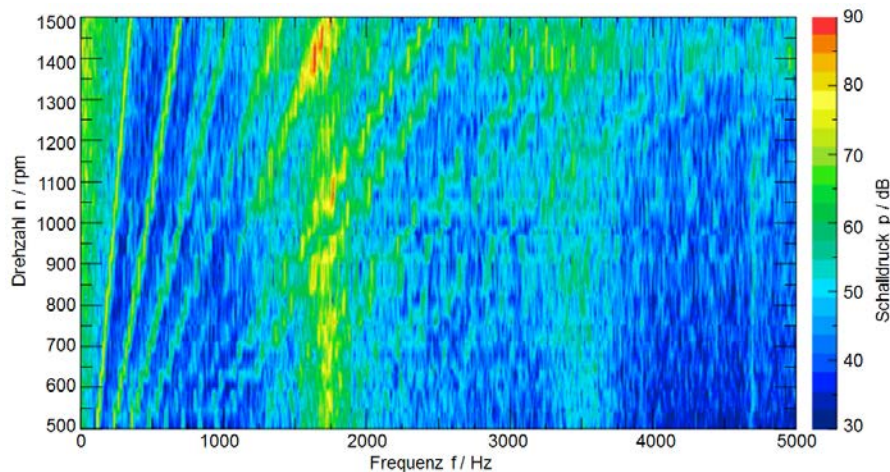


*Schwingformen und Eigenfrequenzen der Rotorhülse aus der Messung(li) und Simulation(re) [4]*

Zum Abschluss des Projektes wurde auch das dynamische akustische Verhalten in Form eines Motorhochlaufes untersucht. Neben den drehzahlunabhängigen Eigenfrequenzen, bei denen es sich meist um Strukturmoden handelt, können aus dem Ergebnis eines Motorhochlaufes auch die drehzahlabhängigen Eigenfrequenzen (Motorordnungen) der Maschine analysiert werden. Bei der Untersuchung wurden ebenfalls eine Simulation und eine Messung durchgeführt. Die nachfolgend dargestellten Grafiken zeigen, dass der Simulationsansatz sehr gut, das reale akustische Verhalten des Motors widerspiegelt.



*Frequenzspektrums eines simulierten Motorhochlaufs [4]*



*Frequenzspektrums eines gemessenen Motorhochlaufs [4]*

## TAGUNGSBEITRÄGE UND VERÖFFENTLICHUNGEN

- [1] P. Kotter, C. Köpf, J. Berkemer, O. Zirn and K. Wegener, „Acoustic Characterization of Electrical Motors Based on Magnetomechanical and Drive-System Issues“, 18. Internationales Stuttgarter FKFS-Symposium, Stuttgart, March 2018.
- [2] P. Kotter, C. Köpf, W. M. Bischof, and K. Wegener, “Efficient Noise-Vibration-Harshness-modeling for squirrel-cage induction drives in EV applications“, 17. Internationales Stuttgarter FKFS-Symposium, Stuttgart, March 2017.
- [3] C. Köpf, J. Berkemer, P. Kotter, T. Vogt, O. Zirn, „Akustisches Verhalten von elektrischen Maschinen – Ein Kooperationsprojekt“, Hochschulmagazin, Spektrum – Zeitschrift der Hochschule Esslingen, Ausgabe 45 S.40, Esslingen, November 2017.
- [4] C. Köpf, J. Berkemer, O. Zirn, P. Kotter, „Rechnerische und experimentelle Validierung des NVH-Verhaltens von Elektromotoren am Beispiel eines Brushless-Außenläufermotors“, 10. Symposium – Motor- und Aggregateakustik, Magdeburg, Juni 2018.