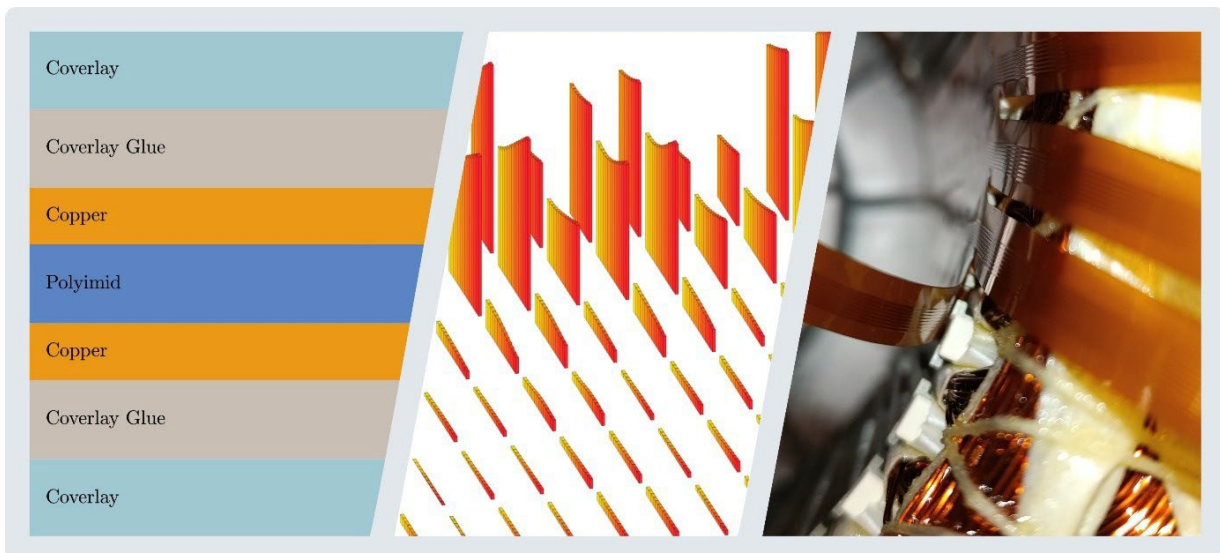


## **Verifizierung der simulierten Luftspaltkräfte im Elektromotor anhand von geeigneten Messungen**

Zur Bestimmung des mechanischen Verhaltens einer elektrischen Maschine werden üblicherweise Simulationen der Strukturmechanik durchgeführt, die als Eingangsgröße die elektromagnetischen Kräfte erhalten, die im Luftspalt zwischen Rotor und Stator der Maschine wirken. Aufgrund der Resonanzstellen im Übertragungsverhalten des mechanischen Gesamtsystems der elektrischen Maschine zwischen Kraft und Bewegung ist der Einfluss einer geringfügigen Abweichung der Kraftamplitude und -frequenz signifikant, da sich die Sensitivität hochgradig nichtlinear im Frequenzbereich ändert. Die präzise Kraftberechnung stellt demnach die Grundlage einer fundierten Prognose der Schwingformen und kritischen Frequenzen der Maschine dar. Im üblichen werden die Kräfte über die elektromagnetische Simulation berechnet, deren korrekte Parameter ausschlaggebend ist.

Der Fokus des Forschungsvorhabens ist die Verifikation der in elektromagnetischen Simulationen ermittelten Luftspaltkräfte einer permanent erregten Synchronmaschine mittels geeigneter Messungen. Anhand der Messungen wird die Qualität der Simulationsergebnisse der elektromagnetischen Modelle untersucht werden und liefert Anhaltspunkte, welche Effekte in der Simulation berücksichtigt werden müssen, um deren Ergebnisgüte zu erhöhen. Als Messmethode kommen Messspulen auf flexiblen Leiterplatten zum Einsatz, die in den Luftspalt eingeführt werden. Durch die Entwicklung von Messspulen, deren Fläche nur in einer der Raumrichtungen (radial, tangential, axial) aufgespannt ist, lassen sich die magnetischen Flüsse und Flussdichten im Luftspalt ermitteln. Anhand der Flussdichte im Luftspalt können damit genau wie in der Simulation über den Maxwell'schen Spannungstensor die dazugehörigen Luftspaltkräfte berechnet werden. Eine zeitsynchrone und dreidimensionale Messung der Flussdichte am gesamten Luftspaltumfang ermöglicht die räumlich und zeitlich aufgelöste Erfassung der Luftspaltkräfte und ist damit die Voraussetzung für einen fundierten Vergleich mit den elektromagnetischen Simulationsergebnissen. Im Projekt sind Designs von Leiterplatten entstanden, mit denen die radiale Kraft mit hoher und die tangentielle Kraft mit mittlerer Güte rekonstruiert werden können. Für die axiale Flussdichte wurden mehrere Designs implementiert und getestet, deren Güte noch nicht ausreichend für eine Anpassung der Simulationsergebnisse ist.

Die während des Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse zur Auslegung und Anwendung von Messspulen sind in Form von Skalierungsvorschriften für den zukünftigen Einsatz in der Industrie zugänglich gemacht. So wird den Unternehmen die Möglichkeit gegeben, eigene elektromagnetische Simulationsmodelle zu verifizieren und zu verbessern.



von links nach rechts: Aufbau einer FPC mit zwei Lagen, rekonstruiertes Spektrum der Radialkraft, arretierte FPC am Stator einer elektrischen Maschine

**Autoren:** **Alexander Pfannschmidt**  
 Professur für Elektrische Antriebe und Maschinen  
 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

**Kontakt:** Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA)  
**Christian Sander**  
 T 069- 6603 -1872

**Das IGF-Vorhaben IGF-Nr. 01|F22529 N der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit den Mitteln der [IGF](#) gefördert.**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
 des Deutschen Bundestages



## Die Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF)

Die Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) ist ein europaweit einzigartiges, themenoffenes und vorwettbewerbliches Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE), das kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) einen einfachen Zugang zu praxisorientierter Forschung und zu aktuellen Forschungsergebnissen ermöglicht. In der IGF

bestimmen Unternehmen bzw. Verbände, Forschungsvereinigungen und Forschungseinrichtungen gemeinsam den Forschungsbedarf und die Forschungsthemen ihrer Branche. Die Begleitung der Forschungsprojekte durch die Unternehmen garantiert die Praxisnähe der Forschungsprojekte. Die Ergebnisse der IGF-Projekte sind öffentlich und stehen allen interessierten Unternehmen zu gleichen Bedingungen zur Verfügung. So stärkt die IGF die Wettbewerbsfähigkeit des Mittelstands in Deutschland und trägt damit maßgeblich zu Deutschlands Innovationssouveränität bei.

**Die FVA (Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V.)** ist das weltweit erfolgreichste und größte Forschungs- und Innovationsnetzwerk in der Antriebstechnik. Zusammen mit rund 200 Unternehmen und 100 Forschungsinstituten haben wir bisher weit über 2.000 Projekte realisiert. Die Antriebstechnik voranzubringen – das ist das Ziel der FVA. Dazu bringen wir Industrie und Forschung zusammen. Dies zu moderieren, neues Wissen zu erforschen, Effizienz und Erkenntnisse zu schaffen – das macht uns zum Innovationsförderer unsere Branche. Für unsere Mitglieder bedeutet das einen mehrfachen Return-on-Invest: Austausch und Kenntnistransfer in der FVA-Community, Mitgestaltung an der Forschung, Teilhabe an neuestem Wissen, Ausbildung von jungen Ingenieur\*innen, passgenaue Weiterbildung, Reduzierung von F+E Kosten. Das kommt unseren Mitgliedsunternehmen, dem Forschungsstandort Deutschland und allen Beteiligten Menschen zu Gute. Denn unsere vorwettbewerbliche Gemeinschaftsforschung, finanziert über die IGF und Eigenmittel ist etwas ganz Besonderes. Gemeinsam geht einfach mehr. Dafür bündeln wir Ressourcen, auch finanzielle, moderieren Kommunikation und Prozesse. Wir helfen, Ideen zu verwirklichen. Weitere Informationen unter [www.fva-net.de](http://www.fva-net.de).