



Christian Doppler
Forschungsgesellschaft

Wissenschaftlicher Jahresbericht 2011

Technische Universität Graz

- **Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik (IGTE)**
- **Institut für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen (EAM)**

CD-Labor für Christian Doppler Laboratory for Multiphysical Simulation, Analysis and Design of Electrical Machines

Laborleiter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Oszkár Bíró

Autoren:

Oszkár Bíró,
Andrej Stermecki,
Martin Hettegger,
Bernhard Weilharter,
Martin Mohr,
Paul Handgruber,
Stephan Klomberg,
Maximilian Schrittwieser

Datum:

30.01.2012

Seit 1. Jänner 2011 sind Herr Stermecki, Herr Weilharter und Herr Handgruber im Modul „*Coupling and Validation*“ angestellt. Herr Hettegger arbeitete bis 30. September 2011 im Modul „*Thermal Analysis*“ und seit Oktober 2011 ist er auch im Modul „*Coupling and Validation*“ angestellt. Herr Mohr verbleibt nach wie vor im Modul „*Electromechanics*“. Im November 2011 wurde das Modul „*Heat Transfer*“ in Zusammenarbeit mit der Firma Andritz Hydro gestartet. Die Forschungsschwerpunkte in diesem Modul sind 3D-CFD Untersuchungen von Wickelköpfen und Statorschlitzten in Generatoren. Herr Stephan Klomberg wurde für dieses Modul mit 01.11.2011, Herr Maximilian Schrittwieser mit 01.01.2012 eingestellt.

Vom CD Labor wurde ein Vortrag von Herrn Dr.-Ing. Igor Kartashev zum Thema: „*Piezoelectric Inducers.*“, organisiert. In diesem Vortrag erläuterte er die theoretischen Hintergründe von piezoelektrischen Effekten und deren Anwendungsbeispiele (Piezo-Motoren).

Im Zeitraum von 01. April 2011 bis 26. Juni 2011 hat Herr Handgruber einen dreimonatigen Forschungsaufenthalt am Department of Electrical Engineering an der Aalto University in Finnland verbracht. Das Department of Electrical Engineering, unter der Leitung von Prof. Antero Arkkio zählt zu den führenden Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der Eisenverlust-Berechnung elektrischer Maschinen mit Hilfe numerischer Methoden. In Form einer Forschungsarbeit wurde dort, im angegebenen Zeitraum, die Möglichkeit geboten, den aktuellen Stand der Technik kennenzulernen und sich in vorhandene Methoden und Möglichkeiten der numerischen Berechnung, namentlich der Methode der finiten Elemente, einzuarbeiten.

Weiters wurde dieses Jahr ein Programm zur Geräuschberechnung (LMS VirtualLab Acoustics) erworben. Dazu hat Herr Bernhard Weilharter eine Schulung im LMS Headquarter in Leuven besucht um die Handhabung des Simulationswerkzeugs zu erlernen. Desweiteren hat Herr Weilharter an einem Excite Power Unit Basic Training teilgenommen.

Wissenschaftliche Arbeit der einzelnen Module im Jahr 2010

Modul Thermal Analysis

Die thermische Analyse der elektrischen Maschinen konzentrierte sich im vergangenen Jahr weiterhin auf die Wärmeübergangszahlen welche, neben einer geeigneten Beschreibung der Wärmequellen, einen großen Einfluss auf die Berechnung des thermischen Feldes in einer elektrischen Maschine haben.

Auf der Konferenz *ICEM 2010* wurden gemessenen Wärmeübergangszahlen am Wickelkopf eines Asynchronmotors den mit Computational Fluid Dynamics (CFD) numerisch berechneten Werten gegenübergestellt. Diese Arbeit wurde im vergangenen Jahr wesentlich erweitert und im Journal *IEEE Transactions on Industrial Electronics* veröffentlicht. Im Rahmen des *IGTE-Symposiums 2010* wurden ebenfalls Messergebnisse den simulierten Werten gegenübergestellt. Diese Arbeit wurde für die Veröffentlichung im Journal *COMPEL* akzeptiert und ebenfalls im vergangenen Jahr publiziert.

Die Berechnung der Wärmeübergangszahlen mit CFD ist aufgrund der hohen Anforderungen an das Rechnernetz und damit auf Rechenzeit und Arbeitsspeicher auf relativ kleine Flächen begrenzt. Um diese Einschränkung zu umgehen wird daran gearbeitet die Endzone einer elektrischen Maschine mit dem Verfahren *Global-Local Domain Decomposition* zu unterteilen. Die Arbeiten dazu sind noch nicht abgeschlossen und wurden noch keinem Fachpublikum vorgestellt.

Ein weiteres Thema in der thermischen Analyse beschäftigt sich mit einer allgemeinen Beschreibung der Wärmeübergangszahlen für spezielle Maschinenteile, wie z.B. den Wickelkopf, durch dimensionslose Kennzahlen. Das Ziel dabei ist, den Einfluss bestimmter geometrischer Abmessungen in die Kenngrößen aufzunehmen. Unter Verwendung der dimensionslosen Darstellung und der richtigen charakteristischen Längen ist eine flexible Beschreibung des Wärmeüberganges möglich. Eine Anwendung auf skalierte bzw. ähnliche Geometrien ist ebenso möglich wie eine Untersuchung verschiedener Ventilationsverhältnisse an der selben Geometrie. Die ersten Ergebnisse zu diesem Thema wurden bereits auf der *15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 2010)* vorgestellt. Im vergangenen Jahr wurde diese Arbeit für den zweidimensionalen Fall mit mehreren geometrischen Varianten erweitert und auf der Konferenz *ISEF 2011* vorgestellt. Analysen dieser geometrischen Varianten für den dreidimensionalen Fall wurden ebenfalls im Jahr 2011 durchgeführt und werden voraussichtlich auf der Konferenz *ICEM 2012* vorgestellt.

Anfang des Jahres 2011 wurde für die Messung am Rotor einer elektrischen Maschine eine Sensortelemetrie gekauft, welche die Erfassung von Wärmeübergang und Temperatur am drehenden Rotor unter Last, also unter realistischen Bedingungen, ermöglicht. In Zusammenarbeit mit der Firma *Traktionssysteme Austria GmbH* wurde eine Asynchronmaschine für diese Messung mit Wärmefluss und Temperatur-Sensoren bestückt. Für den Betrieb dieser Maschine ist ein Hilfslagerschild und eine Hilfswelle notwendig welche zum momentanen Zeitpunkt noch nicht fertig gestellt wurde.

Mit Ende September 2011 wurde das Modul *Thermal Analysis* geschlossen und in das Modul *Coupling and Validation* integriert. Mit dem Industriepartner *ELIN Motoren GmbH* wurde Ende November 2011 die Fertigung eines Prüfstandes vereinbart, welcher dazu dienen sollte die Strömungsverhältnisse in den Statorschlitz zu visualisieren. Die Messungen werden mit dem Verfahren *Particle Image Velocimetry (PIV)* am *Institut für thermische Turbomaschinen* an der *TU Graz* durchgeführt und sollten zur Validierung von CFD-Simulationen herangezogen werden.

Modul Coupling and Validation

Hinsichtlich der Eisenverlust-Berechnung in elektrischen Maschinen wurden zunächst verschiedene Verlustmodelle in einer Literaturrecherche überblicksmäßig untersucht.

Im Rahmen des „*International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering 2011*“ wurde ein Modell zur Analyse der Oberschwingungsemissionen von Windkraftanlagen mit doppelt gespeister Asynchronmaschine vorgestellt. Das Oberwellenmodell beruht auf einfachen analytischen Ansätzen und erlaubt eine schnelle und effiziente Berechnung aller relevanten harmonischen Effekte. Eine Erweiterung dieses Modells für die Eisenverlust-Berechnung bietet sich an.

Im zweiten Halbjahr wurden verschiedene, teilweise aus der Literatur bekannte, Eisenverlust-Berechnungsverfahren implementiert und im Hinblick auf ihre Effizienz und Genauigkeit gegenübergestellt. Ergänzend zu den bekannten Methoden wurde ein finite Elemente Modell entwickelt, das es erlaubt die dreidimensionale Wirbelstromverteilung in einem Einzelblech einer rotierenden elektrischen Maschine zu berechnen. Das dreidimensionale Modell wird von zeit- und positions-abhängigen Randbedingungen aus einer klassischen zweidimensionalen Analyse erregt. Die separate Behandlung der Stator- und Rotorbleche vermeidet aufwändige transiente finite Elemente Simulationen mit Rotorbewegung. Die erhaltenen Ergebnisse werden voraussichtlich auf der „*International Conference on Electrical Machines 2012*“ vorgestellt.

Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Verlustberechnung wurden auch in diesem Jahr, auf Initiative unseres Industriepartners *ELIN Motoren GmbH*, nicht nur auf die Eisenverluste im aktiven Eisen begrenzt. Eine Methode, die auf der erweiterten *A, V-A*-Formulierung basiert, wurde schon im Jahr 2010 und Anfang des Jahres 2011 entwickelt und eingesetzt um Zusatzverluste festzustellen, die als Folge von höherharmonischen Rotorstrom-Komponenten in Rotorstäben und im Rotor Kurzschlussring einer Asynchronmaschine entstehen. Nach Abschluss der Untersuchungen wurden die Ergebnisse dieser Arbeit im Juli 2011 auf der Konferenz „*Compumag 2011*“ in Sydney, Australien präsentiert. Das eingereichte Full-Paper wurde für die Veröffentlichung in der Zeitschrift *Transactions on Magnetics* unter den Titel „*3-D Finite Element Analysis of Additional Eddy Current Losses in Induction Motors*“ akzeptiert und wird später im Jahr 2012 erscheinen. Weiterhin wurden diese eingeführten Methoden auch angewandt um die Wirbelstromverluste im Rotorwicklungsträger einer Asynchronmaschine mit Schleifringen zu bestimmen und die Trägergeometrie zu optimieren. *Weitere Publikationen zu dieser Thematik sind für das Jahr 2012 geplant.*

Auch die Wickelkopfkräfte und strukturdynamischen Untersuchungen waren eine wichtige Forschungsthematik im vergangenen Jahr. Zum einen wurden die Arbeiten an Simulationen der Verformungen der Wickelköpfe bei Synchronmaschinen fortgesetzt, zum anderen wurden die Methoden entsprechend erweitert, um auch die Verformungen bei Asynchronmaschinen ermitteln zu können. Bei unseren Industriepartnern gewinnt diese Problematik immer mehr an Bedeutung. In Kooperation mit der Universität in Maribor, Slowenien wurde ein Präprozessor-Programm entwickelt, womit diese sehr anspruchsvollen FE Simulationen genügend vereinfacht werden um sie auf industrieller Ebene sehr zeiteffizient durchführen zu können. Die Methoden und Simulationsergebnisse wurden durch zahlreiche Messungen überprüft und bei der Konferenz „*Coupled Problems 2011*“ auf Kos, Griechenland im Juni als Gastvortrag einem breiten wissenschaftlichen Auditorium präsentiert. Weiterhin sind diese Untersuchungen auch als zwei Full-Paper mit den Titeln "*Numerical Simulation of Electromagnetic Phenomena in Motor End-Regions*" und "*Numerical Simulation of the End-Winding Deformations in the Synchronous Machine under Short-Circuit Conditions using FEM*" im Journal „*E&I*“ (*Elektrotechnik und Informationstechnik, Springer Verlag*) erschienen. Dieses Thema ist sowohl für die Industriepartner als auch für akademische Diskurse so wichtig, dass auch im folgenden Jahr weitere Veröffentlichungen auf diesem Gebiet zu erwarten sind.

Bezüglich dem Thema Geräuschberechnung wurden aufbauend auf die im Jahr 2010 durchgeführten numerischen Untersuchungen einer geschrägten Asynchronmaschine der Firma ELIN Motoren GmbH weitere Analysen vorgenommen, um zusätzliche Einflüsse auf eventuell problematische Geräuschpegel zu erurieren. Dazu wurden Simulationen im Frequenzbereich von 1000 Hz bis 2200 Hz durchgeführt und der Einfluss unterschiedlicher Kraftwellen auf das Strukturverhalten ermittelt. Prinzipiell hat die Untersuchung ergeben, dass, je höher die räumliche Ordnungszahl der Kraftwelle, desto niedriger der Einfluss auf die Verformung der Struktur, was auf eine geringere Durchbiegung der Joche zurückgeführt werden kann. Es hat sich jedoch gezeigt, dass Kraftwellen mit Ordnungszahlen, die im Bereich der Statorzähnezahl (oder Vielfache davon) liegen, einen erheblichen Einfluss auf das Schwingungsverhalten der Maschine haben, da sich durch die „Abtastung“ der Zähne, Kraftwellen niedrigerer Ordnung ausbilden. Diese Arbeit wurde auf der ISEF 2011 vorgestellt und ein Full-Paper wird voraussichtlich im Journal *Compel* 2012 veröffentlicht.

Weiters wurden Geräusch- und Schwingungsmessungen an einer Asynchronmaschine (Repower) der Firma ELIN Motoren GmbH durchgeführt. Die erste Messung wurde bei Nennbetrieb (Generator) mit 11 Messpunkten am Gehäuse und drei Messpunkten am Statorblechpaket durchgeführt. Die Schwingungen wurden mittels Beschleunigungssensoren gemessen und der Schalldruck mittels Messmikrophon in ca. 20 cm Abstand zu den Messpunkten am Gehäuse sowie in 1m Entfernung von der Maschine.

Für eine genauere Untersuchung des Schwingungsverhaltens des Statorblechpakets wurde der Messaufbau insofern geändert, als dass der Kühler der Maschine abgenommen wurde, was eine effizientere und umfangreichere Platzierung von Beschleunigungssensoren am Statorblechpaket ermöglichte. Es wurden mehrere stationäre Messpunkte bei unterschiedlicher Frequenz der Speisespannung (Sinus-Speisung) sowie der Hochlauf bei Umrichter-Speisung und Sinus-Speisung im Leerlauf aufgenommen. Diese Ergebnisse wurden gegenübergestellt und auch mit

den analytisch berechneten Ergebnissen verglichen. Diese Arbeit wird als Full-Paper für die Konferenz ICEM 2012 eingereicht. Es ist geplant numerische Berechnungen mit den bestehenden Methoden durchzuführen und die Ergebnisse mit den Messungen zu vergleichen.

Modul - Electromechanics

Das zweite Jahr des Moduls 5 (Electromechanics) startete mit einer Literaturrecherche über „Physical Phase Variable“-Modelle (PPV). Des Weiteren wurde ein entsprechendes Model in Matlab aufgebaut und mittels FEM-Simulation parametrisiert. Im Rahmen dieser Umsetzung wurde auch Optimierungspotentiale beim Modellansatzes sowie der Interpolationsmethode entdeckt. Die ersten Ergebnisse dieses Modelansatzes waren dermaßen zufriedenstellend, dass für das zweite Halbjahr weitere Untersuchungen sowie die Umsetzung in Fortran geplant wurden.

Als nächstes wurde der Solver für das elektrische Netzwerk in Fortran umgesetzt. Aufgrund der benötigten Modularität und der Vielzahl an unterschiedlichen Modellierungsansätzen für die einzelnen elektrischen Komponenten des Netzwerkes wurde ein Fixpunktansatz realisiert. Sämtliche umgesetzten Modelle sind in der aktuellen Release von EXCITE verfügbar.

Das eingereichte Digest für die *COMPUMAG 2011* wurde angenommen und weitere Untersuchungen der 3D-FEM Methode zur Berechnung von Wirbelströmen in Permanentmagneten einer permanenterregte Synchronmaschine wurden durchgeführt. Hierfür war zunächst die Implementierung der Methode in Elefant3D, einem am Institut entwickelten FEM-Programms, nötig. Weiteres wurden verschiedene Testbeispiele in Ansys und Elefant aufgebaut, berechnet und untersucht. Aus diesen Ergebnissen wurde ein Poster für die *COMPUMAG 2011* erstellt und auch auf der Konferenz präsentiert.

Für die Weiterentwicklung und Umsetzung von „Physical Phase Variable“-Modellen wurde als Validierungsbeispiel eine permanenterregte Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten in Ansys aufgebaut. Die Weiterentwicklung dieses Modelansatzes umfasste sowohl die Parameteridentifikation, die Umsetzung der Interpolation mittels tri-kubischer Splines sowie die Auswertung des Drehmoments. Anhand des Validierungsbeispiels wurde die Richtigkeit des Models gezeigt. Aus dieser Arbeit entstand ein Paper, welches bei der ICEM2012 eingereicht wurde.

Für das dritte Jahr dieses Moduls sind nun Untersuchungen der Induktionsmaschine geplant, wobei sowohl die FEM-Methode zur Wirbelstromberechnung als auch der PPV-Modelansatz auf ihre Anwendbarkeit untersucht werden sollen.

Modul - Heat Transfer

Herr Stephan Klomberg wurde mit der Untersuchung des konvektiven Wärmeübergangs im Bereich des Wickelkopfes bei verschiedenen Ventilationsstrategien betraut. Es sollen Modelle und Gleichungen zur Berechnung der Wärmeübergangszahl erstellt werden, um einfache Korrelationen des

Wärmeübergangs an der gesamten Wickelkopfoberfläche festzustellen.

In den bisher ersten 3 Monaten wurde eine Literaturrecherche zum Thema durchgeführt. Außerdem wurde ein vereinfachtes Modell des Wickelkopfes und seiner Umgebung, ein sogenanntes Nutsektormodell, erstellt. Es erfolgte auch eine Auswertung einer schon durchgeführten CFD Rechnung eines sogenannten Polsektormodells, damit für das Nutssektormodell genaue Randbedingungen generiert werden können.

In den folgenden Monaten des Jahres 2012 sollen mit Hilfe des Nutsektormodells erste Ergebnisse und Zusammenhänge des Wärmeübergangs erforscht werden.

Für die Untersuchung des Wärmeübergangs im Statorpaket (inklusive Statorwicklung) insbesondere in den Statorventilationsschlitzen sind ähnliche Arbeiten vorgesehen. Diese werden von Herrn Schrittwieser bearbeitet.

Vorerst sollen CFD Analysen mit Standardberechnungsprogrammen verglichen werden um die Abweichungen aufzuzeigen und evtl. ein Verbesserungspotential aufzuzeigen. Mit Hilfe von CFD Modellen gesamter Generatoren, kann die Strömung und der Wärmeübergang jedes einzelnen Schlitzes untersucht werden, mit dem Ziel Korrelationen zu finden.

In den ersten Wochen wurde eine Literaturrecherche durchgeführt.

Externe Arbeiten

Für genaue Eisenverlust-Berechnungen ist eine exakte Kenntnis der elektromagnetischen Blecheigenschaften unerlässlich. Deshalb wurden in Zusammenarbeit mit der Universität Maribor, Slowenien Messungen an verschiedenen Blechproben durchgeführt. Das dort vorhandene Messsystem erlaubt die Verlustbestimmung sowohl bei alternierendem als auch bei rotierenden Flussdichten. Insbesondere die Verlusteigenschaften bei rotierenden Feldern, die vorwiegend in Stator-Zahnwurzeln und Zahnsitzen auftreten, sind bei der Untersuchung von rotierenden elektrischen Maschinen von höchster Bedeutung.

Weiters hat Herr Dr. Peter Kitak von der Universität aus Maribor, Slowenien als externer Mitarbeiter zur Entwicklung effizienter Methoden für die Kraftberechnung in den End-Zonen elektrischer Maschinen beigetragen.

Wie auch schon in den Jahren zuvor haben sich auch 2011 einige Mitarbeiter des Instituts für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik (IGTE) sowie des Instituts für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen der Technischen Universität Graz, mit Arbeitsthemen des CD-Labors beschäftigt. Hier ist besonders Herr Siegfried Rainer hervorzuheben, der sich derzeit mit detaillierten Untersuchungen der Oberwellen der Stator- und Rotorströme, von denen auf die Oberwellen der Magnetfelder im Luftspalt und somit die geräuschanregenden Kräfte geschlossen werden kann, in geschrägten Asynchronmaschinen beschäftigt. Er hat seine Ergebnisse im Journal „*IEEE - Transactions on Magnetics*“ veröffentlicht.

Weiters ist Herr Imam Bakhsh zu erwähnen, der mit seinen Simulationen zu Untersuchungen der Verluste im Kurzschlussring eines Rotors einer Asynchronmaschine beigetragen hat.