



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

Elektrotechnisches Institut

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

<b>JAHRESBERICHT ANNUAL REPORT</b>	<b>2019</b>
--	-------------



Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe



## Inhalt

---

1	Vorwort.....	5
2	Lehraufgaben.....	7
2.1	Lehraufgaben für Fakultät.....	7
2.2	Lehraufgaben für andere Fakultäten.....	12
2.3	Abgeschlossene Diplom- und Studienarbeiten.....	13
2.4	Exkursionen.....	14
2.5	Preise.....	15
2.6	Nachruf.....	19
3	Öffentlichkeitsarbeit.....	21
3.1	Veröffentlichungen.....	22
3.2	Vorträge und Berichte.....	24
3.2.1	Lehrstuhl und Institut.....	24
3.2.2	National und International.....	26
3.3	Kooperation.....	30
4	Forschung.....	33
4.1	Forschungsprofil – Schwerpunkt Energieforschung.....	33
4.2	Forschungsprojekte.....	33
4.3	Dissertationen.....	34
4.4	Ausgewählte Forschungsergebnisse in Kurzform.....	37
5	Ausstattung des Lehrstuhls.....	57
5.1	Prüfstand Elektrische Maschinen und Antriebe.....	57
5.2	Weitere Versuchsstände für die Forschung.....	58
5.3	Versuchsstände für die Lehre.....	60
5.4	Sonderausstattungen.....	60
6	Personelle Besetzung.....	61
7	Anschrift.....	63
8	Impressum.....	65
9	Lageplan.....	67



## 1 VORWORT

Liebe Kollegen, Mitarbeiter und Freunde,

es ist mittlerweile zur guten Tradition geworden zum Ende des Jahres innezuhalten und Bilanz zu ziehen. Da unser Lehrstuhl ein integrierter Bestandteil des Elektrotechnischen Instituts ist, steht in diesem Jahr das 125-jährige Bestehen des Instituts im Vordergrund. Seit seiner Gründung im Jahre 1894 hat es mehrere Wandlungen erfahren. Sehr bald differenzierte sich die Elektrotechnik in mehrere Fachgebiete aus, einige bildeten eigene Institute, neue Fachgebiete kamen hinzu. Die elektrischen Maschinen jedoch und ab der Mitte des letzten Jahrhunderts die elektrischen Antriebe sind geblieben. Das unterstreicht zum einen ihre Bedeutung für ein modernes Industrieland wie Deutschland aber auch ihre ungebrochene Innovationskraft. Die aktuellen Herausforderungen zur Weiterentwicklung der Energieversorgung und Energieanwendung im Einklang mit dem Klimaschutz bieten für unser Lehr- und Forschungsgebiet ein immens großes Arbeitsfeld. Analysiert man die aktuellen Studentenzahlen und ihren Trend, so gibt das allerdings wenig Anlass zur Freude. Ein gut ausgebildeter Nachwuchs in benötigter Zahl wird demnach immer weniger zur Verfügung stehen. Neue Arbeitswelten, die durch maschinelles Lernen oder künstliche Intelligenz im Entstehen sind, werden dieses Defizit kaum auffangen können.

In diesem Jahr konnte ein größeres Verbundvorhaben KLEE rund ums Autonome Fahren erfolgreich abgeschlossen



werden. Die Ergebnisse aus Sicht des Energieverbrauchs waren jedoch weit weniger gravierend als zunächst erwartet. Sie zeigen, dass auch hier viele kleine Entwicklungsschritte zur Verbesserung der Energiebilanz gegangen werden müssen. Abgeschlossen wurde ebenfalls eine 5-jährige Projektserie zu energieeffizienten Antrieben für die Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA). Aktuelle Projekte für die FVA zum Maschinellen Lernen für den Maschinenentwurf und Auswahlssystematiken für rein elektrische Antriebsstränge in der Fahrzeugtechnik bieten dem Lehrstuhl eine ideale Möglichkeit, Ergebnisse aus der Grundlagenforschung auf ihre Praxistauglichkeit zu prüfen. Daneben werden mehrere DFG-Projekte fortgesetzt und Spezialthemen für die Industrie aufbereitet und untersucht.

Für die geleistete Arbeit der Mitarbeiter und Studenten, die kollegiale Zusammenarbeit in Institut und Fakultät sowie die Unterstützung von vielen Seiten, insbesondere seitens der DFG, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.



Wilfried Hofmann

## 2 LEHRAUFGABEN

### 2.1 Lehraufgaben für Fakultät

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann*

Elektrische Maschinen 1 (3/1/1), WS

Pflichtfach Elektroenergietechnik (EET), Wirtschaftsingenieure (WING), Regenerative Energiesysteme (RES)

Mechatronik (2/1/0), WS, Wahlpflichtfach Mechatronik (MT)

Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung; Einphasen-Transformator; Drehstrom- und Spezialtransformatoren; Grundlagen der Drehfeldmaschinen; Induktionsmaschinen; Stromortskurve der Käfigläufermaschine; Betriebsverhalten der Käfigläufermaschine; Betriebsverhalten der Schleifringläufermaschine; Wechselstrom-Induktionsmaschinen; Synchronmaschinen; Vollpoläufer-Synchronmaschinen; Schenkelpolläufer-Synchronmaschine; spezielle Synchronmaschinen; Grundlagen der Gleichstrommaschinen; Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine; Linearmotoren und Sonderbauformen; Wachstumsgesetze und Maschinenausnutzung; Maschinenprüfung.

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann*

Elektrische Antriebe (3/1/1), SS

Pflichtfach Elektroenergietechnik (EET), Wahlpflichtfach mit (2/1/0) Mechatronik (MT), Wirtschaftsingenieure (WING)

Grundlagen und Dimensionierung elektrischer Antriebe: Einführung; Elektromechanische Energiewandlung; Erwärmungsvorgänge; Bewegungsvorgänge; Lösungen und Anwendungen der Bewegungsgleichung; Arbeitsmaschinen; Bewegungswandler; Motorauswahl für stationären Betrieb; Motorauswahl für dynamischen Betrieb.

Drehzahl- und Drehmomentsteuerung von Antrieben: Stromrichter gespeiste Gleichstromantriebe; pulstellergespeiste Gleichstromantriebe; Drehzahlsteuerung von Drehstrom-Asynchronantrieben; Spannungsgesteuerte Drehstrom-Asynchronantriebe; frequenzgesteuerte Drehstrom-Asynchronantriebe; Steuerung von Drehstrom-Synchronantrieben; Stell- und Schrittantriebe.

Regelung von Antrieben: Antriebsregelungen; geregelte Gleichstromantriebe, geregelte Drehstromantriebe; Anwendungen: Fahrzeugantriebe; Werkzeugmaschinenantriebe, mechatronische Systeme.

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann*

Elektromaschinendynamik (2/1/0), WS

Wahlpflichtfach Elektroenergie-technik (EET), Regenerative Energiesysteme (RES), Mechatronik (MT)

Einführung in das Theoriengebäude; Dynamisches Verhalten der Gleichstrommaschine; Dynamisches Verhalten von Wicklungsanordnungen; Kraft- und Drehmomentbildung in Maschinen; Grundlagen der Raumzeigertheorie; Rechengesetze für Raumzeigergrößen; Raumzeigertheorie der Induktionsmaschine; dynamische Betriebszustände der Induktionsmaschine; Übertragungsverhalten der Induktionsmaschine; Raumzeigertheorie der Synchronmaschine; dynamische Betriebszustände der Synchronmaschine; Übertragungsverhalten von Synchronmaschinen; Nullsystem elektrischer Maschinen; Elektromagnetische Wellenvorgänge in Maschinen.

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann*

Geregelte Energiesysteme (2/0/0), SS

Wahlpflichtfach Regenerative Energiesysteme (RES), Elektroenergie-technik (EET)

Einführung in die Modellierung der Regelstrecken moderner elektrischer Energieanlagen und deren Regelung, insbesondere Leistungsregelung.

Energie- und Leistungsgrundbegriffe; Synchronmaschine als Energiewandler; Modellierung von Synchrongeneratoren; vereinfachtes Übertragungsverhalten von Synchrongeneratoren; Regelung von Synchrongeneratoren; Beispielregelung eines Turbogenerators; Asynchronmaschine als Energiewandler; Modellierung des einfach gespeisten Asynchrongenerators; Modellierung des doppelt gespeisten Asynchrongenerators; Regelung von Asynchrongeneratoren; Beispielregelung einer Windkraftanlage; Betrieb unter Auslegung eines Schwungradspeichers; Netzregelung; FACTS.

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann*

Entwurf und Berechnung elektrischer Maschinen (2/1/1), SS

Wahlpflichtfach Elektroenergie-technik (EET), Regenerative Energiesysteme (RES)

Wicklungen elektrischer Maschinen; Wicklungsentwurf; Wicklungsaufbau und -herstellung; Magnetischer Kreis; Magnetkreis mit Permanentmagneten; Magnetkreisentwurf; Stromwendung; Berechnung von Induktivitäten und Reaktanzen; Verluste elektrischer Maschinen; Erwärmung und Kühlung, Kräfte und Drehmomente; prinzipieller Entwurfsgang; Optimierung; Entwurf einer Asynchronmaschine; Entwurf einer PM-Synchronmaschine. CAD-Labor zu FEM-Simulation

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann*

Direktantriebe und Magnetlagertechnik (2/0/1), WS

Wahlpflichtfach Elektroenergietechnik (EET), Mechatronik (MT)

Direktantriebe: Einleitung, Torquemotoren, Hochgeschwindigkeitsantriebe, Linearantriebe, Anwendungen, Regelung von Direktantrieben

Magnetlagertechnik: Einleitung, aktive Magnetlagerung, passive Magnetlagerung, Auslegung von Magnetlagern, Dynamik magnetgelagerter Rotoren, Regelung eines Magnetlagers, lagerlose Maschinen, Anwendungen.

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann*

Elektrische Fahrzeug- und Traktionsantriebe (2/0/1), WS

Wahlpflichtfach Elektroenergietechnik (EET), Mechatronik (MT)

Traktionsantriebe: Grundlagen, Mechanik der Zugförderung, Fahrmotoren, Stromrichtertechnik, Regelung von Fahrmotoren und Netzstromrichter, bahntechnische Regelkreise.

Fahrzeughantriebe: Hybrid-/Elektroantriebsstrukturen, Antriebsanforderungen, Fahrmotoren, Stromversorgung, Stromrichter, Antriebsregelung, Nebenantriebe.

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann*

Automatisierte Antriebe (2/1/2), SS

Wahlpflichtfach Mechatronik (MT), Elektroenergietechnik (EET),

Elemente des Antriebssystems: Energetische Komponenten; informationstechnische Komponenten des Antriebssystems; Signalverarbeitungseinheiten.

Automatisierte Drehstromantriebe: Umrichterspeisung frequenzgesteuerter Antriebe; Pulssteuerverfahren zur Umrichterspeisung; Steuerverfahren für umrichter gespeiste Asynchronantriebe; dynamisches Verhalten von Asynchronantrieben; Feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine; dynamisches Verhalten von Synchronantrieben; Steuerung und Regelung umrichter gespeister Synchronantriebe; Wechselwirkungen von Stellglied und Motor.

Systemintegration automatisierter Antriebe: Antriebe in Systemlösungen; Antriebssysteme mit komplexer Mechanik; Regelung von Antriebssystemen mit komplexer Mechanik; funktionsintegrierte und Kombinationsantriebe.

*Prof. Dr.-Ing. P. Schegner/ Prof. Dr.-Ing. St. Berner/ Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann*

Elektroenergietechnik (2/1/0), WS

Pflichtfach Elektrotechnik (ET), Mechatronik (MT), Regenerative Energiesysteme (RES)

Grundlagen zu Aufbau und Wirkungsweise elektromagnetischer Energiewandler; Elektromagnetische Energiewandlung (Durchflutungsgesetz, Flussgesetze, Magnetwerkstoffe, Magnetfelder, Induktionsgesetz, Kraft- und Drehmomentbildung, Leistungsbilanz); Leistungstransformatoren (Wechselfelder, Spannungsinduktion,

Einphasen-, Drehstromtransformator, Anwendungen); Gleichstrommaschinen, Synchronmaschinen (Magnetfelder, Spannungsinduktion, Drehmoment, Ersatzschaltbild, Betriebsverhalten, Anwendungen); Asynchronmaschinen (Magnetfelder, Schlupf, Spannungsinduktion, Drehmoment, Ersatzschaltbild, Betriebsverhalten, Anwendung).

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. V. Müller*

Schaltungstechnik (2/1/0), SS

Pflichtfach Mechatronik (MT), Regenerative Energiesysteme (RES)

Bauelementmodelle und Verstärker, analoge Grundsaltungen mit Bipolar- und Feldeffekttransistoren; Stromquellen und Stromspiegel, Referenzquellen; Differenzverstärker; Leistungsverstärker; Operationsverstärker; aktive Filter; Signalgeneratoren; digitale Grundsaltungen; Kombinatorische und sequentielle Schaltungen.

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. V. Müller*

Entwurf von Antriebssystemen (2/1/0), WS

Wahlpflichtfach Mechatronik (MT: Makromechatronik), Elektroenergietechnik (EET)

Grundlagen und Komponenten, mechanisches Übertragungssystem; Auswahl und Dimensionierung elektrischer Antriebe; Stellantriebe und Schrittantriebe; Netzrückwirkungen von elektrischen Antrieben; Bewegungssteuerung und Technologiefunktionen; Informationsverarbeitung in Umrichtern; Feldbusse für elektrische Antriebe; Hard- und Softwarestruktur digitaler Reglerbaugruppen; Modellbildung und numerische Algorithmen; Methoden der Systemsimulation; rechnergestützter Entwurf (Rapid Prototyping); Modelle der Elektroenergietechnik; Entwurf und Simulation des Bandantriebs einer Gurtbandförderanlage.

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner*

Leistungsflussorientierte Modellbildung (2/1/0), WS

Wahlpflichtfach Mechatronik (MT: Makromechatronik), Elektroenergietechnik (EET), Regenerative Energiesysteme (RES)

Grundlagen leistungsflussorientierter Modelle, Einführung in Bondgraphen, POG und EMR, SIMULINK-Erweiterungsbibliothek BG V2.1, skalare und vektorielle Modelle, Zustandsdarstellung mit Energie- und Leistungsmatrix, Modellvereinfachungen auf Basis von Leistungsfluss, Modelle elektrischer Maschinen, Ableitung von Modellen für Umlaufträgergetriebe, Systematisierung der Modellbildung, Faltung und Ketten, nichtlineare Modelle, modellbasierte Optimierung von Reglern.

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner*

Aktorik (2/0/2), SS

Pflichtfach Mechatronik (MT), Wahlpflichtfach Studienrichtung Automatisierungs-, Mess- und Regeltechnik (ART)

Elektrische Aktoren als Elemente zur Bewegungssteuerung, ausgewählte Grundprinzipien gesteuerter Aktoren, Grundlagen der Projektierung, Grundlagen geregelter Aktoren, Einführung in die leistungsflussbasierte Modellbildung.

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner*

Digitale Antriebsregelung (2/1/0), SS

Wahlpflichtfach Mechatronik (MT: Makromechatronik), Elektroenergie-technik (EET), Regenerative Energiesysteme (RES)

Ableitung von Differenzgleichungen, Quasikontinuierlicher Reglerentwurf, Grundlagen des Entwurfs diskontinuierlicher Regler, Angewandte Z-Transformation, Abtastsignalflussplanmethode, das Digitale Betragsoptimum (BOD), schnelle Regler auf EEZ-Basis, Modellbildung, Nichtlinearitäten, Begrenzungsvarianten, graphische Programmierung des Reglers, Einführung in Bondgraphen als Streckenmodelle.

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner*

Regelung elektrischer Systeme (2/1/0), WS

Wahlpflichtfach Regenerative Energiesysteme (RES), Wirtschaftsingenieure (WING)

Signalflusspläne als dynamische Modelle elektrischer Antriebe, Normierung, Anwendung von Laplace- und Z-Transformation, Elementar- und Grundglieder, Umformungsregeln, Regelstrukturen, Näherungen für Modellelemente, Definition, Optimierung und Realisierung von kontinuierlichen, quasikontinuierlichen und diskontinuierlichen Reglern für elektrische Systeme, Grundlagen zur Berücksichtigung von Begrenzungen, Nichtlinearitäten und Verkopplungen, Anwendung von ingenieurtechnischer Software, alternative dynamische Modelle.

*Dr.-Ing. N. Hildebrand*

Transformatoren (2/1/0), WS

Modul „Elektromagnetische Energiewandler“

Wahlpflichtfach Elektroenergie-technik (EET) und Regenerative Energiesysteme (RES)

Leistungstransformatoren in der Elektroenergie-technik, Wachstumsgesetze und TK-Zahl; Aufbau, Ausführungsformen, stationärer Betrieb, nichtstationärer Betrieb; Wicklungsaufbau, Wicklungsausführungen; Begriffe, Isoliersysteme, Isolierstoffe für Transformatoren; Entwurf von Transformatoren: Kernausslegung, Wick-

lungsauslegung Optimierung, Isolierungsgestaltung; Begriffe, Prinzipien, Materialien; Auslegung der Schenkelpresselemente, Kesselgestaltung; Zusatzverluste; Modellierung elektromagnetischer Felder.

## 2.2 Lehraufgaben für andere Fakultäten

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. V. Müller*

- Elektrische Antriebe für Maschinenbauer (2/1/0), WS  
Pflicht- und Wahlpflichtfach - Lehrexport für Fakultät Maschinenwesen
- Elektrotechnik für Fernstudium Maschinenbau (1/0/0), WS und SS  
Lehrexport für Fakultät Maschinenwesen
- Elektrotechnische Systeme für Fernstudium Maschinenbau (1/0/0), WS und SS
- Elektrische Antriebe für Fernstudium Maschinenbau (1/0/0), WS

*Dr.-Ing. N. Hildebrand*

- Praktikum Elektrotechnische Systeme im Maschinenbau (0/0/2),  
WS und SS, Lehrexport für Fakultät Maschinenwesen

## 2.3 Abgeschlossene Diplom- und Studienarbeiten

### Diplom- und Masterarbeiten

Leif Pinnecke / Betreuer: A. Brix

*„Prädiktive Betriebsstrategie eines hybriden Energiespeichersystems in autonomen Elektrofahrzeugen.“*

Dennis Guhl / Betreuer: R. Liebfried, Dr. Ch. Klotz (VEM)

*„Leistungsbeschreibung einer aktiven Magnetlagerung für schnelllaufende elektrische Maschinen mittlerer Leistung.“*

Johann Skatulla / Betreuer: M. Leubner, Christian Korte (IAV)

*„Untersuchung der dynamischen Eigenschaften einer flachheitsbasierten Regelung für permanent-erregte Synchronmaschinen bei Umrichterspeisung.“*

Michael Jaster / Betreuer: R. Seifert

*„Auslegung eines kombinierten Radial-/Axialmagnetlagers aus Pulververbundwerkstoffen zur Integration in ein neuartiges Hochgeschwindigkeits-Antriebskonzept.“*

Luzie Johanna Kirchner / Betreuer: N. Remus

*„Entwicklung eines Prüfungs- und Bewertungsschemas für die Fähigkeit von Windkraftanlagen, die Netzstabilität zu unterstützen.“*

Silvester Stoiber / Betreuer: R. Liebfried

*„Auslegung eines lagerlosen Motors zur aktiven Schwingungsdämpfung.“*

Johannes Porstmann / Betreuer: R. Seifert

*„Untersuchung der Auswirkungen von Hysterese- und Sättigungserscheinungen auf das Frequenzverhalten einer massiven Ringkernspule.“*

Hannes Ramm / Betreuer: N. Remus, Dr.-Ing. Michael Homann (IAV GmbH)

*„Untersuchung und Implementierung einer Delta-Sigma-Pulsweitenmodulation zur Ansteuerung von elektrischen Antrieben.“*

### Studienarbeiten

Jonas Rose / Betreuer: G. Steinborn

*„Messung an Ringkernproben von Elektroblech zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der Eisenverluste.“*

Lijiang Zhou / Betreuer: D. Kranz

*„Erweiterung der Optimalwirkungsgradsteuerung einer permanent-erregten Synchronmaschine um überschwungsbedingte Zusatzverluste.“*

Dennis Guhl / Betreuer: R. Liebfried

*„Aufbau und Inbetriebnahme eines Praktikumsversuchsstands zur Antriebssteuerung mittels digitalem Signalcontroller.“*

Lukas Duchow / Betreuer: D. Kranz

*„Optimale Steuerung einer permanenterregten Synchronmaschine unter Variation der Maschinenparameter.“*

Marta Potyka / Betreuer: D. Kranz

*„Untersuchung von Parametervariationen einer Asynchronmaschine unter Verwendung optimaler Steuerverfahren.“*

Gino Sturm / Betreuer: S. Yuan

*„Untersuchung von Energieeinsparungspotential der Mehr-Motoren Konzepten bei Elektrofahrzeugen.“*

Yuheng Wang / Betreuer: N. Hildebrand

*„Konzeption Visio- und Audioguide elektrischer Maschinen.“*

Zihao Jin / Betreuer: C. Evers

*„Modellbildung elektrischer Speicherstrukturen.“*

Andre Rasenack / Betreuer: T. Micklitz

*„Entwurf schnelldrehender Synchron-Kleinmaschinen mit Permanenterregung.“*

Clemens Bromann / Betreuer: C. Evers

*„Modellbildung und Verifikation für elektrische Antriebskomponenten.“*

## 2.4 Exkursionen

Folgende Exkursionen wurden den Studenten angeboten:

- am 14.01.19 Sachsenwerk Dresden,
- am 21.01.19 WITTUR Electric Drives Dresden und
- am 28.01.19 Siemens Transformatorenwerk Dresden.

## 2.5 Preise

Prof. Peter Büchner

### Goldene Promotion

1969 Dissertation zum Thema „*Theoretische Analyse und Simulation des Systems indirekter Drehstromumrichter-Last*“.



(Bild: L. Lorenz)

#### Laudatio:

Die Fakultät gibt sich die Ehre, Herrn Prof. Peter Büchner anlässlich der 50. Wiederkehr seines Promotionsjahres mit der Goldenen Promotion der Fakultät zu ehren. Herr Prof. Büchner ist im Jahr 1969 promoviert worden bei Prof. Pommer mit dem Thema: „Theoretische Analyse und Simulation des Systems Drehstromumrichter –Last“ und er hat sich im Jahre 1972 habilitiert bei Prof. Schönfeld zur Thematik: „Untersuchung des Einsatzes der Rechentchnik als Hilfsmittel zum Entwurf automatisierter Elektroantriebe“. Seit dieser Zeit war er bis zu seiner Berufung zum Professor Oberassistent am Lehrstuhl für Automatisierte Elektroantriebe.

Seine Arbeitsschwerpunkte waren die Modellierung und Simulation von Drehstromantrieben insbesondere für die Elektrotraktion und die Beherrschung von NetZRückwirkungen beim industriellen Einsatz von Stromrichterantrieben. Hier entstand auch seine richtungsweisende Monografie zu „Stromrichter-NetZRückwirkungen und ihre Beherrschung“ im Jahre 1982 in bisher 2 Auflagen. Prof. Büchner spielte nach der friedlichen Revolution von 1989 beim Neuaufbau der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik eine besondere Rolle. Er war Mitglied der Personalkommission und wurde zum Professor für Grundlagen der Elektroenergie-technik berufen. Prof. Büchner hat sich als Dekan der Fakultät für Elektrotechnik und Vorstandsmitglied des Fakultätentags für Elektrotechnik, dessen Vorsitzender er von 1996-1998 war, um die Integration der hiesigen Bildungs-

einrichtungen in die gesamtdeutsche Universitätslandschaft besonders verdient gemacht. Als Initiator und Sprecher des DFG-Graduiertenkollegs (GRK 338) Lokale innovative Energiesysteme von 1996 - 2005 hat er maßgeblich zum hohen wissenschaftlichen Ansehen der Dresdner Schule der energetischen Elektrotechnik beigetragen. Nach seiner Pensionierung blieb Prof. Büchner der TU und seiner Fakultät auf vielfältige Weise verbunden. Bis zum heutigen Tag finden auf seinem Spezialgebiet Stromrichter-Netzurückwirkungen Weiterbildungsseminare für die Industrie statt, die er maßgeblich mitgestaltet.

Besonders hervorzuheben ist sein über fünf Jahrzehnte währendes Engagement zur Alumni-Pflege, indem er regelmäßige Treffen ehemaliger Doktoranden des Elektrotechnischen Instituts organisiert. In den letzten Jahren nahm er zudem die Pflichten des Schriftführers des VDE-Bezirksvereins Dresden wahr und sorgte damit für eine angemessene Präsenz energietechnischer Themen in der Öffentlichkeit.

Wir ehren Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Büchner aufgrund seiner langjährigen Verdienste um die Fakultät mit der Goldenen Promotion.

W. Hofmann

*Dr. Thomas Windisch*

## ETG-Literaturpreis

Mit dem ETG-Literaturpreis werden **hervorragende Veröffentlichungen auf dem Gebiet der elektrischen Energietechnik** jährlich ausgezeichnet. Der mit einer Geldprämie verbundene Preis ist eine Anerkennung für eine besondere wissenschaftliche und publizistische Leistung.

Thema: *A Novel Approach to MTPA Tracking Control of AC Drives in Vehicle Propulsion Systems.*

publiziert in IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume: 67, Issue: 10, October, 2018.

### Laudatio:

Der Einsatz elektrischer Antriebe in Elektrofahrzeugen verlangt einen sorgsamsten Umgang mit Elektroenergie, die durch die mitgeführte Energiequelle limitiert ist und die Reichweite des Fahrzeuges im Wesentlichen bestimmt. Der Gegenstand der Arbeit ist auf den elektrischen Antriebsstrang ohne Einbeziehung einer konkreten Energiequelle fokussiert und besitzt demzufolge eine größere Allgemeingültigkeit, sodass sowohl Serienhybride als auch vollelektrische batterie- oder brennstoffzellen-gespeiste Fahrzeugantriebe adressiert werden. Ausführlich behandelt werden ein modellbasiertes und ein on-line Optimierungsverfahren für die beiden wichtigsten Antriebsmotoren, die beide in Simulation und Experiment untersucht werden. Modellbasierte off-line Optimierungsverfahren berücksichti-

gen alle modellrelevanten Nichtlinearitäten wie Sättigung und Ummagnetisierung im Motor sowie Schalt- und Durchlassverluste des Wechselrichters. Die verlustminimalen Arbeitspunkte für ein angefordertes Drehmoment werden numerisch bestimmt, was zu etwas anderen Ergebnissen führt als mit den bekannten analytisch bestimmten MMPA- und MMPV-Kurven bei entsprechenden Vernachlässigungen. Der Autor kann nachweisen, dass seine verlustminimale Steuerung zu geringeren Verlusten (ca. 5%) als mit der MMPA-Steuerung führt. Ein diskreter Suchalgorithmus zur on-line Optimierung beider Antriebsmotoren über den Stromwinkel wird systematisch erarbeitet und die Ergebnisse mit der analytischen Methode bzgl. seiner Leistungsfähigkeit verglichen. Das Paper macht Vor- und Nachteile einer energieeffizienten Steuerung und Regelung zu ermitteln und ggf. anwendungsspezifische Unterschiede sichtbar, die von hohem wissenschaftlichem aber auch wirtschaftlichem Interesse sind. Die wichtigsten Maschinenarten PSM und ASM werden einer Einzelfalluntersuchung unterzogen bei der es dem Autor gelingt durch eine stringente Untersuchungssystematik einen Rahmen zu schaffen, für den die Regelverfahren trotz ihrer Unterschiede, systematisch entwickelt und verständlich erklärt werden können. Grundlage dafür ist, dass bewährte Beschreibungsmittel wie Ersatzschaltbilder und Zeigerbilder mit neuen Werkzeugen wie die FEM souverän miteinander verknüpft werden um sinnvolle und nachvollziehbare Ergebnisse zu erzeugen. Parametersätze, Koeffizienten zur Nachbildung von Nichtlinearitäten und FEM-Daten werden ausführlich dokumentiert, sodass dem Fachmann eine schnelle Nachprüfung ermöglicht wird, was die Transparenz der Arbeit auf ein höchstmögliches Niveau hebt.

Vereinfachungen, wo nötig und angewandt, werden abgewogen und bzgl. ihres Geltungsbereiches geprüft. Besonders wertvoll können die Ergebnisse zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit der untersuchten praktischen On-line-Optimierungsverfahren bewertet werden. Sehr eindrucksvoll wird die Überlegenheit der Simplex-Methode demonstriert, was als Erkenntnisgewinn in der Antriebstechnik verbucht werden kann.

Aus den Simulationsergebnissen sind für beide Verfahren sehr gute Übereinstimmungen zwischen vorgegebenem und erreichtem Drehmoment nachgewiesen. Ein wertvoller Beitrag zur Weiterentwicklung des Standes der Forschung auf dem Gebiet des energieoptimalen Betriebs von PM-Synchronmotoren und Asynchronkäfigläufermotoren als Fahrmotor wurde geleistet, der die Möglichkeiten zum energieoptimalen Betrieb von Wechselrichter und Fahrmotor insbesondere aus praktischer Sicht auslotet und einen umfassenden theoretischen wie soliden praktischen Nachweis zur Effizienzsteigerung führt. Der Fortschritt liegt in der Entwicklung einer online-Optimierung der Arbeitspunkte sowohl für den permanent erregten Synchronmotor als auch für den Asynchronmotor. Es kann gezeigt werden, dass er durch relativ einfache und robuste Maßnahmen - ohne auf ein detailliertes Motormodell angewiesen zu sein -, Einsparungen im Prozentbereich erreichen kann. Die von Herrn Windisch optimierte Antriebsstrangregelung wurde unter seiner engagierten Mitwirkung in der AUTOTRAM, einem hochkapazitiven

Transportmittel zwischen Bus und Straßenbahn, installiert und hat maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss eines BMBF-Wachstums-kernprojekts in Sachsen beigetragen und wurde im Rahmen eines DFG-Projekt vertieft wissenschaftlich untersucht.

*Dipl.-Ing. Benjamin Mößner*

## Johannes-Görges-Preis

Gesponsert von Wacker Chemie AG, **verliehen für die beste Abschlussarbeit auf dem Gebiet Elektrotechnik** zum Thema: *"Auslegung eines Tubular-PM-Synchrone-Generators nach dem Vernier-Prinzip mit Quasi-Halbach-Magnetisierung"*

Die Diplomarbeit wurde mit dem Prädikat „sehr gut“ (1,3) abgeschlossen. Die Arbeit wurde von einem Universitätsprofessor und einem promovierten Ingenieurwissenschaftler begutachtet und übereinstimmend mit „sehr gut“ bewertet.

Die Diplomarbeit ist auf dem Gebiet der Elektroenergie-technik/Antriebstechnik angesiedelt und liefert einen wertvollen Beitrag zur Lösung aktueller Fragestellungen im Zuge der Elektrifizierung von mobilen Arbeitsmaschinen. Herr Mößner ist es gelungen eine sehr anspruchsvolle, wissenschaftlich fundierte Arbeit vorzulegen, die die Voraussetzungen zur Kopplung einer thermohydraulischen Freikolbenmaschine mit einem Lineargenerator schafft. Sie verbindet damit die beiden bekannten Prinzipien einer thermohydraulischen und thermoelektrischen Freikolbenmaschine zu einem neuartigen thermohydraulischen Lineargenerator, mit dem eine Systemversorgung mit elektrischer und hydraulischer Energie umgesetzt werden kann. Der Anspruch an das Analysevermögen des Bearbeiters war sehr hoch und überstieg das übliche Niveau von Diplomarbeiten. Hinzu kam, dass bei der Bearbeitung nur sehr wenig auf bestehende Literatur zurückgegriffen werden konnte, da die Aufgabenstellung ein neuartiges Gebiet elektrischer Maschinen zumindest in der hier favorisierten Variante betrifft. Dem besonderen Anspruch, einen PM-Synchron-Lineargenerator nach dem Vernierprinzip zu konzipieren und diese sowohl mit analytischen Methoden als auch FEM-Simulationen zu untersuchen, konnte Herr Mößner vollauf gerecht werden. Dafür gelang es Herrn Mößner eine weitgehend geschlossene analytische Beschreibung zu finden, die sich auf das Zusammenwirken von Feld- und Permeanzwellen stützt. Die dazu benötigte Mathematik wurde mit viel Geschick formuliert und angepasst. Vereinfachungen werden anschaulich und zunächst ausführlich begründet. Dabei wird sehr methodisch vorgegangen und unterschieden zwischen konventioneller und Vernier-Polteilung. Ebenfalls sehr gründlich wurden von ihm die in Betracht gezogenen Magnetisierungsarten der Permanentmagnete und ihre Auswirkungen auf das Betriebsverhalten untersucht. Die Arbeit hat angeregt zu weiteren wissenschaftlichen Forschungsarbeiten (DFG, BMBF, AiF), die an der Schnittstelle von

Elektrotechnik und Maschinenbau angesiedelt sind und ein hohes Potential für eine verstärkte interdisziplinäre Zusammenarbeit besitzen. Herr Mößner hat die Ergebnisse seiner Diplomarbeit gemeinsam mit seinem Betreuer zur International Conference on Electrical Machines (ICEM) 2018 im September einem Fachpublikum vorgestellt.

Herr Mößner hat über die gesamte Diplomstudienzeit, die er in der Regelstudienzeit von 10 Semestern absolvierte, sehr motiviert und wissbegierig studiert und gezielt Lehrveranstaltungen ausgewählt, die ihn zu einem sehr guten Studienziel geführt haben. Sowohl in der Studienarbeit als auch im Industriepraktikum und zuletzt mit der Diplomarbeit hat er seine außergewöhnlichen Fähigkeiten unter Beweis gestellt und an seine Stärken bei der mathematischen Durchdringung auch komplizierter physikalischer und insbesondere elektromagnetischer Sachverhalte weiterentwickelt.

## 2.6 Nachruf

### Prof. Dr.-Ing. habil. Gernar Müller

Am 25. Juli 2019 ist Professor Dr.-Ing. habil. Gernar Müller in Dresden im Alter von 89 Jahren verstorben. Sein Name ist eng verbunden mit einem hochgeschätzten Lehr- und Fachbuchwerk auf dem Gebiet der elektrischen Maschinen.



Aus Zittau gebürtig, nahm er nach einer Lehre zum Elektromaschinenbauer 1950 das Studium der Elektrotechnik an der TH Dresden auf, wo er anschließend als wissenschaftlicher Assistent und Oberassistent am Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe arbeitete und 1959 promoviert wurde. 1961 wechselte er in die Industrie und war als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Chefkonstruktors im Sachsenwerk Dresden tätig. In dieser Zeit habilitierte

er sich und ging einer Dozententätigkeit nach.

Von 1966 bis 1977 war er Professor für Elektromechanische Energiewandlung an der TH Ilmenau. 1977 wechselte er wieder für 10 Jahre in die Industrie als Forschungsdirektor im damaligen Kombinat Elektromaschinenbau, bis er 1987 zum ordentlichen Professor auf den Lehrstuhl für Elektrische Maschinen an die TU Dresden berufen wurde, den er bis zu seiner Pensionierung 1996 leitete. Prof. Müller war Mitglied in zahlreichen Normungsgremien wie im TC2 (Rotating Ma-

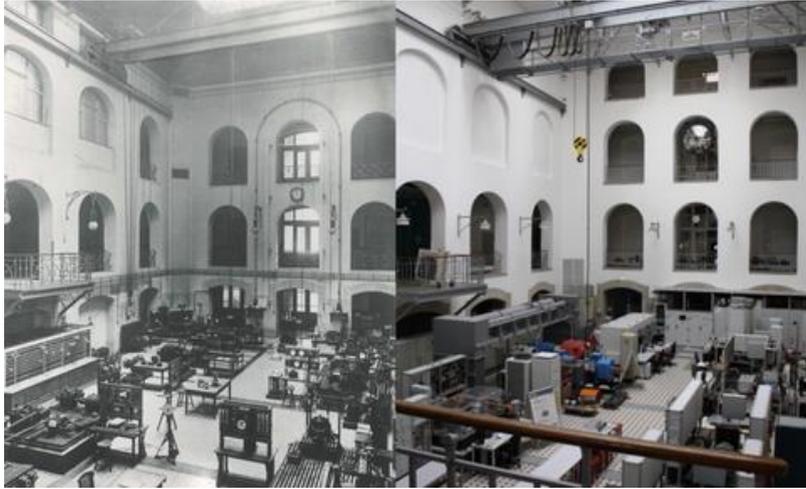
chines) und mehreren Working Groups der IEC und im Komitee K311 der DKE des DIN und des VDE. Nach seiner Pensionierung nutzte er sein Arbeitszimmer am Institut fast täglich und wirkte bis zu seinem 86. Lebensjahr aktiv mit bei der erfolgreichen Bearbeitung von industriellen Drittmittelprojekten u. a. für VEM Sachsenwerk, Siemens und Voith-Hydro, behandelte Spezialthemen und entwickelte Berechnungsprogramme für elektrische Maschinen.

Prof. Müller war ein exzellenter Wissenschaftler, der es selbst in seinen Vorlesungen noch verstand, seinen Hörern die „Schönheit“ der Theorie elektrischer Maschinen nahezubringen. Er hinterlässt den Studenten, Mitarbeitern und der Fachwelt ein außerordentlich umfangreiches Lehr- und Fachbuchwerk von 10 Titeln in mehrfachen Auflagen, das mehrere Generationen von Elektromaschinenbauern und Antriebstechnikern auf ihrem Berufsweg begleitet hat.

Text: Prof. W. Hofmann

### 3 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

#### 125 Jahre Elektrotechnisches Institut



Der Lichthof des Görges-Baus 1911 und 2019. (© Archiv ETI/E.N. Hildebrand)

Vor 125 Jahren wurde an der Königlich Sächsischen Technischen Hochschule in Dresden das Elektrotechnische Institut (ETI) als eine der ersten selbstständigen Lehr- und Forschungseinrichtungen für Elektrotechnik in Deutschland gegründet. Heute gehört es mit modernster Ausstattung und einer hochqualifizierten Lehre zu den anerkanntesten und leistungsfähigsten Einrichtungen seiner Art in der Bundesrepublik.

Das Elektrotechnische Institut ist die Keimzelle der Elektrotechnik an der TU Dresden. Mit der Entdeckung des elektrodynamischen Prinzips im Jahr 1866, das die Stromerzeugung ermöglichte, und der Vorstellung der ersten elektrischen Lokomotive im Jahr 1879, die ein Beispiel für die breite Nutzung der elektrischen Energie eröffnete, war es notwendig, die Zusammenhänge systematisch und wissenschaftlich zu erfassen und zu einem eigenen Fachgebiet zu entwickeln. Heutzutage sind Produkte und Entwicklungen der Elektrotechnik allgegenwärtig und unverzichtbar; z. B. für: Mobilfunk und Internet, Biomedizintechnik, Unterhaltungselektronik, moderne Energiesysteme, Robotik, Automobilindustrie und Luft- und Raumfahrt.

Dem Elektrotechnischen Institut ist es gelungen, ein modernes Forschungs- und Lehrprofil auf dem Gebiet der energetischen Elektrotechnik aufzubauen, kontinuierlich weiterzuentwickeln und zukunftssicher zu machen. Gemeinsam mit dem

benachbarten Institut für elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik und den energetischen Instituten der Fakultät Maschinenwesen gestaltet das ETI eine der fünf strategischen Profillinien der TU Dresden zur energetischen Wende in Deutschland und insbesondere für den Strukturwandel in der Lausitz.

Forscher am ETI beschäftigen sich heute beispielsweise mit der Optimierung von Entwurfsprozessen und der Erhöhung der Energieeffizienz von Bewegungs- und Stellvorgängen elektrischer Maschinen. Die Energieeinsparungen gerade auf diesem Gebiet spielen eine Schlüsselrolle auf dem Weg zur Energiewende. In Deutschland wird die Hälfte des erzeugten elektrischen Stroms in der Industrie verbraucht. Davon wiederum werden 66 Prozent für die Energieumwandlung durch elektrische Antriebe benötigt. Die Lösungen, die am ETI erarbeitet werden, kommen sowohl der Umwelt als auch der Industrie zugute. Künftig werden die ETI-Ingenieure den Entwurf elektrischer Maschinen durch den Einsatz von Methoden der Künstlichen Intelligenz revolutionieren. In einem von der Industrie vorangetriebenen und von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) geförderten neuen Forschungsprojekt „Potenziale maschinellen Lernens für die Auslegung drehender elektrischer Maschinen“ werden lernfähige Algorithmen und Methoden entwickelt, die Entwurf und Auslegung elektrischer Motoren, Generatoren und anderer elektromagnetischer Energiewandler auf eine zukunftssträchtige Art und Weise ermöglichen.

Text: Prof. W. Hofmann, Dr. N. Hildebrand

### 3.1 Veröffentlichungen

- [1] A. Brix, V. Müller, W. Hofmann: Energy Efficient Predictive Rotor Flux Control of Induction Machines in Autonomous Driving Electric Vehicles, IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Novi, Michigan, USA, 2019.
- [2] D. Ernst, M. Faghii, R. Liebfried, M. Melzer, D. Karnaushenko, W. Hofmann, O. G. Schmidt, T. Zerna: Packaging of Ultrathin Flexible Magnetic Field Sensors with Polyimide Interposer and Integration in an Active Magnetic Bearing, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2019.
- [3] C. Evers, V. Müller, W. Hofmann: Energiespeicher für Antriebssysteme mit fluktuierenden Lastprofilen, Internationaler ETG-Kongress 2019, 08. – 09.05.2019 in Esslingen am Neckar; Verlag: Berlin; Offenbach: VDE VERLAG GMBH; ISBN 978-3-8007-4954-6, S. 318 - 323, 2019.
- [4] G. Komurgoz, G.-H. Geitner: Systems featuring chain structures – a generalized Bond Graph modelling, International Journal of General Systems, vol. 48, issue 8, S. 861-889, 2019.
- [5] G.-H. Geitner, G. Komurgoz: Synchronous Reluctance Machine - A Power Flow based Modelling, IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisboa, 2019.

- [6] Stephan Günther: Hochausgenutzte synchrone Reluktanzmaschinen für den Einsatz als elektrische Fahrmotoren, Hrsg.: Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und Antrieben, Band 17, 240 Seiten, ISBN: 978-3-8440-6844-3, Shaker Verlag, Aachen, August, 2019.
- [7] R. Liebfried, W. Hofmann: Untersuchung des Übertragungsverhaltens eines aktiven Magnetlagers mit Flussdichtemessung im Luftspalt, Tagungsband 12. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz, Rektor der Hochschule Zittau/Görlitz Prof. Dr. phil. Friedrich Albrecht, S. 11-18, 2019.
- [8] S. Miersch, U. Schuffenhauer, T. Schuhmann, J. Gründer, C. Kästle, T. Rabhansl, M. Wolf: Modellierung von Kurzschlussläufer-Asynchronmaschinen mit Kupferkäfig und axial segmentierten Endringen für Hochdrehzahl-Anwendungen, 2. Freiburger Kolloquium Elektrische Antriebstechnik, 70. BHT - Freiburger Universitätsforum, Deutschland, Freiberg, 2019.
- [9] D. Schmitz, U. Schuffenhauer, M. Breuckmann, A. Kahveci, K. Machalitz, S. Miersch: Design and test of squirrel cage induction machines with high power density, cast copper cage and high-strength low-loss NGO-electrical steel, 11. Expert Forum on electric vehicle drives and e-mobility, Deutschland, Schweinfurt, S. 179 - 186, 2019.
- [10] P. Szilagyi, D. Schmitz, M. Breuckmann, S. Tilders, S. Miersch, U. Schuffenhauer, T. Schuhmann: High-Performance Cast Rotors with zero porosity, 11. Tagung Elektrische Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Deutschland, Würzburg, S. 1 - 6, 2019.
- [11] J. Pecho, W. Hofmann: Analysis of the effect of parameter variations on the start-up characteristics of LSPSM, European Conference on Power Electronics and Applications - EPE 2019, Genova, Italy, 2019.
- [12] L. Pinnecke, A. Brix, W. Hofmann: Prädiktive Betriebsstrategie eines hybriden Energiespeichersystems in autonomen Elektrofahrzeugen, 70. BHT – Freiburger Universitätsforum, Freiburger Kolloquium Elektrische Antriebstechnik (FKEA) in Freiburger Forschungshefte A932, TU Bergakademie Freiberg, S. 192 - 202, 2019.
- [13] R. Seifert, W. Hofmann: Sensorlose Flussdichteregelung für axiale Magnetlager auf Basis fraktionaler Systeme, 12. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz, Vol. 12, S. 1-9, 2019.
- [14] R. Seifert, C. Steiert, W. Hofmann, K. Röbenack: Einführung in die fraktionale Flusschätzung in elektromagnetischen Aktoren, Automatisierungstechnik 2019; Bd. 67, H.7, S. 572 - 586, 2019.
- [15] Y. Zhang, H. Peng, W. Hofmann: Load Cycle-Based Design Optimization of Induction Motor Drives for Highly Dynamic Applications, IEEE Int. Conference on Industrial Technologies. Melbourne, S. 286 - 291, 2019.

## 3.2. Vorträge und Berichte

### 3.2.1 Lehrstuhl und Institut

#### Technische Berichte

- D. Kranz: Bestimmung der Magnetverluste unter Berücksichtigung der Einflüsse eines Pulswechselrichters und der Nutharmonischen, Zwischenbericht, TB 2019-06
- T. Micklitz, D. Kranz: Potentiale maschinellen Lernens für die Auslegung drehender elektrischer Maschinen. FVA-Sachstandsbericht, TB 2019-05.
- A. Brix, G. Steinborn: Energieeffiziente Antriebsregelung und Kühlungssteuerung. BMBF-Abschlussbericht im Projekt KLEE, TB 2019-04.
- A. Brix, G. Steinborn: Energieeffiziente Antriebsregelung und Kühlungssteuerung. BMBF-Abschlussbericht im Projekt KLEE, TB 2019-03.
- S. Yuan: Komponentenauslegung und Verlustberechnung des EV-Antriebsstrangs. TB 2019-02.
- T. Micklitz: Eisenlose Axialfluss-Permanentmagnet-Synchronmaschine mit Keramikwicklungsträger für Schwungradspeicher. DFG-Zwischenbericht; Entwurf von Grundabmessungen und Magnetkreis; Gestaltung, Wicklungsfaktoren und Oberwellenstreuung verschiedener Wicklungsvarianten. TB 2019-01.

## Forschungsvorträge

18.01.2019

---

Robin Liebfried, Dipl.-Ing.

*„Flussdichtebasierte Regelung aktiver Magnetlager.“*

22.02.2019

---

Johann Pecho, Dipl.-Ing.

*„Einfluss des Trägheitsmomentes auf die Drehmomentkennlinie von netzanlauffähigen Permanentmagnet- und Reluktanzmaschinen.“*

22.03.2019

---

Shaohui Yuan, M.Sc.

*„Komponentenauslegung und Verlustberechnung des EV-Antriebsstrangs.“*

24.05.2019

---

Nico Remus, Dipl.-Ing.

*„Neue Generatoranordnung mit der DASM für besseres Verhalten beim Durchfahren von Netzfehlern.“*

Stefan Staudt, M. Eng.

*„Wirkungsgradoptimierung der Indirekten Statorgrößenregelung für Synchron-Reluktanzmaschinen in Flurförderfahrzeugen.“*

21.06.2019

---

Ludwig Schlegel

*„Bericht aus der Applikation von großen 3-Level-Wechselrichtern in der Antriebstechnik.“*

12.07.2019

---

Tobias Micklitz, M.Sc.

*„Potentiale maschinellen Lernens für die Auslegung drehender elektrischer Maschinen.“*

19.07.2019

---

Swen Bosch, M.Sc.

*„Repetitive Regler beim Active Power Filter - Möglichkeiten und Grenzen.“*

15.11.2019

---

Robert Seifert, Dipl.-Ing.

*„Stabilität und digitale Implementierung des fraktionalen Flussschätzers für aktive Magnetlager.“*

## Gastvorträge

05.04.2019

---

Dr.-Ing. Marco Schramm, Siemens AG Erlangen

*“Facing challenges in E-Motor design for ultra-lightweight applications.”*

13.12.2019

---

Prof. U. Beekert, TU Bergakademie Freiberg

*„Berechnung der Wirbelströme und Wirbelstromverluste in den Permanentmagneten von hochausgenutzten PM-Synchronmaschinen.“*

## 3.2.2 National und International

### Vorträge ohne Publikation

W. Hofmann: Energieeffiziente Antriebstechnik in der praktischen Anwendung – von der Komponente zum System. Vortrag zur AK-Sitzung *Rationelle Energienutzung* der IHK Saarbrücken, Saarbrücken 21.01.2019.

T. Windisch: Energieeffiziente Regelung von Fahrzeugantrieben mit permanent-erregten Synchron- und Asynchronmotoren unter Berücksichtigung von Umrichter, Eisenverlusten und Sättigung. Vortrag zur 11. Tagung Elektrische Antriebstechnologie für Elektro- und Hybridfahrzeuge. HDT Essen, Würzburg, 18.09.2019.

W. Hofmann, T. Micklitz: Eisenlose permanentmagneterregte Axialfluss-Maschine mit keramischem Wicklungsträger für einen Schwungradantrieb. Vortrag zum 17. Technischen Tag der VEM, Wernigerode, 18.09.2019.

W. Hofmann, T. Micklitz: Potentiale Maschinellen Lernens für die Auslegung drehender elektrischer Maschinen. Vortrag zum Sachstandsbericht „Maschinelles Lernen, Entwurf, Optimierung“ (FVA 858 I), Frankfurt a.M. 23.10.2019.

S. Yuan: Datenblattbasierte Verlustbestimmung von Antriebssträngen in Elektrofahrzeugen, Vortrag zum Tag der Fakultät, Dresden 08.11.2019.

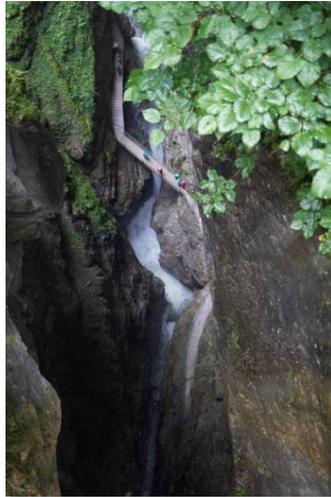
L. Schlegel: Verlustbestimmung von Komponenten in Antriebsprüfständen für die E-Mobility. Vortrag zum Tag der Fakultät, Dresden 08.11.2019.

## Doktorandenseminar (28.08.-01.09.2019) Kleinwalsertal

Wie schon in einige Male zuvor, ging es diesmal für einige Tage nach Hirschegg ins Kleinwalsertal, einem der schönsten Hochgebirgstäler der Alpen. Der im Herzen des österreichischen Kleinwalsertal gelegene Ort Hirschegg liegt auf einer Höhe 1120 m und ist nur von Deutschland aus erreichbar.

Die TU Darmstadt und die TU Dresden veranstalten seit einigen Jahren gemeinsam eine Seminarwoche. Um einer Vielzahl von Doktoranden und Mitarbeitern die Möglichkeit zu geben, sich in Form von Vorträgen und Diskussionsrunden weiterzubilden.

(Quelle: Wikipedia)



### *Vorträge TU Darmstadt*

---

- Erd, Nicolas: Berechnung der Energieeinsparung durch stationäre Schwungradspeicher bei Stadtbahnen
- Dietz, Daniel: Influence of PM-Material on the Parameter Uncertainty of Bearingless Synchronous Machines
- Köster, Robin: Untersuchung struktureller und dynamischer Eigenschaften von Ionischen Flüssigkeiten anhand von Molekulardynamik-Simulationen
- Safdarzadeh, Omid: Modellbildung für die thermische Beanspruchung von Schmierstoffen in Folge von elektrischer Belastung im Wälzkontakt bei Teilschmierung
- Weicker, Martin: Effects on bearing currents in induction motors due to changes in a system consisting of inverter, filter and motor supply cable
- Deusinger, Björn: Indirekte Wirkungsgradbestimmung von Permanentmagnet-Synchronmaschinen - Eine Zusammenfassung

### *Vorträge TU Dresden*

---

- Micklitz, Tobias: Potentiale maschinellen Lernens für die Auslegung drehender elektrischer Maschinen
- Miersch, Sören: Berechnungsansatz für den elektrischen Rotorwiderstand bei Kurzschlussläufer-Asynchronmaschinen mit axial segmentierten Endringen

- Seifert, Robert: Sensorlose Flussdichteregelung für axiale Magnetlager auf Basis fraktionaler Systeme
- Liebfried, Robin: Untersuchung des Übertragungsverhaltens eines AMB mit Flussdichtemessung im Luftspalt
- Pecho, Johann: Das quasistationäre Drehmoment der LSPSM
- Yuan, Shaohui: Ein Vergleich der Energieeffizienz von BEV- und FCEV-Antriebssträngen
- Bosch, Swen: Repetitive Regler beim Active Power Filter - Aufbau und Implementierung
- Evers, Chris: Antriebsdimensionierung auf Basis von Datenblattangaben: Energiespeicher – Lithium-Ionen-Akkumulator
- Remus, Nico: Neue Generatoranordnung mit der DASM für besseres Verhalten beim Durchfahren von Netzfehlern
- Leubner, Martin: Angepasstes Pulsverfahren für den 4x3 Matrixumrichter (Fortsetzung)
- Schlegel, Ludwig: Bestimmung des maximalen Ausgangsstroms eines großen 3-Level NPC Stromrichters

#### *Externe*

---

- Yuanpeng Zhang: Energieoptimale Drehmomentsteuerung und Auslegung von hochdynamischen Asynchronantrieben unter besonderer Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung
- Stefan Staudt, Hochschule Aschaffenburg  
Methoden zur Bestimmung der Flussverkettung für geberlose Regelverfahren in Flurförderfahrzeugen mit Synchron- Reluktanzmaschinen
- Swen Bosch, Hochschule Aalen Fakultät Elektronik und Informationstechnik  
Labor für elektrische Antriebstechnik und Leistungselektronik  
Repetitive Regler beim Active Power Filter - Aufbau und Implementierung
- Hrishikesh Joshi: Valeo Siemens eAutomotive Germany GmbH Research & Development Erlangen,
- Zustandsbeobachter für 3 Knoten im thermischen Netzwerk einer PMSM
- Falk Bahr: Felddichtebasierte Regelung mit Vorsteuerung des Unipolarlagers

## 1967/2019 – 52 Jahre ANEX – Ausflüge des Lehrstuhls und Treffen ehemaliger Kollegen

Das 10. Treffen ehemaliger Kollegen war wieder ein gelungenes Fest. Den größten Anteil daran hatte wohl das ausgezeichnete Wetter, das mit Fernsicht auf die Felsen der hinteren Sächsischen Schweiz diesen Tag in die Erinnerung einprägen wird. Auch der nett hergerichtete Ballsaal (von 1852), gutes Essen, ausreichend Hotelzimmer und das lockere Programm mit dem Spaziergang durch den Ort in der Abendsonne sorgten für gute Stimmung in unterschiedlichen Gesprächsgruppen.

Von 67 „Ehemaligen“ auf der ANEX-Liste hatten 51 geantwortet, wobei 36 Teilnahmemeldungen und 15 Absagen zurückkamen. Aus Krankheitsgründen gab es noch 4 rechtzeitige Absagen, 3 Teilnehmer konnten nicht mehr rechtzeitig absagen, sodass sich am Ende 29 Ehemalige treffen konnten. Der am weitesten Ange-reiste war diesmal unser Tolja Loginov aus St. Petersburg/Russland, im Unterschied zum letzten Treffen mit der weitesten Anreise von Quang aus Hanoi/Vietnam.



Wie immer war die Kommunikation innerhalb der „Schule Schöpfung“ problemlos. Der geplante Beginn verzögerte sich um eine Stunde, weil die Gäste sich nicht vom mittäglichen Biergarten des Berghofs trennen wollten. Da aber nur zwei Vorträge geplant waren: einer über Lichtenhain und die Geschichte von Peter Büchner und einer über die letzten zwei Jahre am Lehrstuhl von Wilfried Hofmann, reichte dennoch die Zeit an der schön geschmückten Viereck-Tafel des Ballsaals (14:15/16:00 Uhr). Nach dem anschließenden Kaffee-Buffer wurde der Ballsaal verlassen und es schloss sich ein ausführlicher Rundgang durch das Dorf mit Zoll-Einnehmer-Haus und für uns offener mittelalterlicher Dorfkirche an. Der Jeschken konnte allerdings nicht sehen werden, dafür aber alle von der Sonne

angestrahlten Felsen von den Schrammsteinen über die Affensteine bis zu den Bärenfangwänden. Dahinter schauten die Zschirnsteine und der Hohe Schneeberg aus Böhmen herüber.

Erst gegen 19 Uhr war die Truppe zu bewegen, wieder in den Ballsaal einzurücken, wo inzwischen das Abendbuffet aufgebaut worden war und eine festliche Tafel mit Kerzenlicht einlud. In wechselnden Gesprächsgruppen verging der Abend viel zu schnell.

Als Fazit des Abends wurde festgestellt, dass Peter Büchner in zwei Jahren doch noch einmal zur dann 11. ANEX der Ehemaligen einladen sollte. Es dürfte sogar noch einmal der gleiche Ort sein, was als recht positive Rückmeldung über die Location aufzufassen ist. Allerdings widerspricht das dem Prinzip, nicht noch einmal dahin zu fahren, wo es besonders schön war. Dazu gibt es immer noch zu viele weiße Flecken auf der Landkarte. Also wird es eine Überraschung werden, was der Peter plant ...

Am nächsten Morgen kam die Sonne von Osten und so ergab sich wieder ein neues plastisches Bild des nun schon bekannten Panoramas der Felsenwelt, ehe das Frühstück ausgiebig genossen wurde und die Abreise oder eine Wanderung vor dem Abschied voneinander anstand.

(P. Büchner/G.-H. Geitner)

## 3.3 Kooperation

### Gremien und Gutachten

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann*

---

- Ordentliches Mitglied der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech)
- Ordentliches Mitglied der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig (Technikwissenschaftliche Klasse)
- Mitglied des Präsidiums der Sächs. Akademie der Wissenschaften und Sekretar der Technikwissenschaftlichen Klasse
- Member of Editorial Board of Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik), Springer Verlag
- VDE: ETG-FB A1: Elektrische Maschinen und Antriebe; Mechatronik: AK19 Elektrische Maschinen und Antriebe; ETG-FB Q1: Leistungselektronik;
- VDI: Mitglied der Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, GMA
- Member of Electric Machine Committee of IEEE Industrial Electronics Society IES

- IEEE: Senior Member; Industry Application Society; Power Electronics Society; Industrial Electronics Society; Reviewer IEEE Transaction on Industrial Electronics/Mechatronics
- Sondergutachter DFG, VW-Stiftung
- Member of Intern. Steering (Scientific) Committees:
  - European Conference on Power Electronics and Drives, EPE
  - International Power Electronics Conferences Japan, IPEC
  - International Symposium on Magnetic Bearings, ISMB
  - International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner*

---

- Reviewer IEEE Transact. on Industrial Electronics
- Member of IEEE Industrial Electronics Society

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. V. Müller*

---

- VDE - VDI-FA 823 Motion Control.

*Dr.-Ing. N. Hildebrand*

---

- VDE - VDE-Arbeitskreis 19 "Elektrische Maschinen und Antriebe".

## IAESTE – Praktikanten

Mohamad Khaled Darder Mostafa – Ägypten / Betreuer: Tobias Micklitz  
*„Design and behavior of three-phase induction machines.“*

Szymon Wojtkiewicz – Polen / Betreuer: Chris Evers  
*„Automated dimensioning of a flywheel.“*

Singhasamanon Tapan – Thailand / Betreuer: Daniel Kranz  
*„Analysis of eddy current losses and demagnetization in permanent magnets of traction machines.“*

Laura Ribeiro Fardin – Brasilien / Betreuer: Shaohui Yuan  
*„Investigation and comparison of different methods for calculating power losses of the drive motor in electric vehicles.“*

Aleksandra Djordjevic – Serbien / Betreuer: Nico Remus  
*„Design and behavior of an induction machine.“*

Yahhya Asl Soleimani – Iran / Betreuer: Martin Leubner  
*„Dimension and design a drive inverter for an electrical machine.“*

Maja Varga – Kroatien / Betreuer: Robert Seifert  
*„Design of electrical machines and control of ac drives.“*

Chaninez Charksi – Tunesien / Betreuer: R. Liebfried  
*“Conceptual design and modulation of a voltage converter with 200 Hz switching frequency in MATLAB Simulink.”*

Yuk Luesakulkitpaisan – Thailand / Betreuer: Daniel Kranz  
*„Design optimization of electrical machines regarding optimum efficiency operating points.“*

## 4 FORSCHUNG

### 4.1 Forschungsprofil – Schwerpunkt Energieforschung

Das Forschungsprofil des Lehrstuhles Elektrische Maschinen und Antriebe ist geprägt durch Grundlagen und Anwendungen folgender Forschungsgebiete:

- Methodik, Modellbildung, Simulation und Werkzeuge für Maschinen und Antriebe
- Industrieelektronik und Stromrichter
- Magnetlager und Mechatronik
- Regenerative Energiequellen
- Hybrid- und Elektrofahrzeuge
- Kühlung elektrischer Maschinen

### 4.2 Forschungsprojekte

#### *DFG-Projekte*

---

1. Neue Generatoranordnung mit der doppeltgespeisten Asynchronmaschine für besseres Verhalten beim Durchfahren von Netzfehlern, DFG - HO 1483/74, 2015–
2. Aktive verlustarme Magnetlager hoher Steifigkeit und Präzision mit integrierter Induktionsmessung und schneller Leistungselektronik, DFG – HO 1483/64-2; 2017–
3. Eisenlose Axialfluss-Permanentmagnet-Synchronmaschine mit Keramikwicklungsträger für Schwungradspeicher, DFG – HO 1483/77-1, 2016 – 2019, 77-2, 2019 –
4. Fraktionaler Flussschätzer zur Regelung axialer Magnetlager unter dem Einfluss von Wirbelströmung, DFG – HO 1483/78-1, 2017-
5. Energieoptimale Drehmomentsteuerung und Auslegung von hochdynamischen Asynchronantrieben unter besonderer Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung. DFG – HO 1483/60-3, 2017-2019
6. Maschinenwicklungen in Kombinationsschaltung, DFG - HO 1483/71-2, 2019 – 2021

#### *FVA Forschungsvereinigung Antriebstechnik*

---

Maschinelles Lernen, Entwurf, Optimierung - Potentiale maschinellen Lernens für die Auslegung drehender elektrischer Maschinen 2019-2020

## *BMBF*

---

Projekt KLEE: Kombinierte Logik für Energieeffiziente Elektromobilität, 2016-2019

## *ZIM*

---

Modularer breitbandiger Wechselrichter für hochdynamische Prüfstandsantriebe, Entwicklung von Regelungskonzepten mit hoher Dynamik, 2019 -2022

## *Industrie*

---

1. Regelung eines Schwungradantriebs mit Modular Multilevel Matrix Converter
2. Untersuchung zu Verlusten in Permanentmagneten bei Traktionsmaschinen
3. High performance electric drives with magnetic gears – High speed motor

## *SAB*

---

1. Minimalinvasive Erweiterung der Antriebsfunktionalität zur aktiven Schwingungsdämpfung an Motorspindeln, 2019-2021

## 4.3 Dissertationen

Stephan Günther

### Thema: Hochausgenutzte synchrone Reluktanzmaschinen für den Einsatz als elektrische Fahrmotoren

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl. Math. Klaus Röbenack

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann  
Prof. Dr.-Ing. Hans Georg Herzog, TU München

Tag der Einreichung: 23.07.2018

Tag der Verteidigung: 21.06.2019

#### **Zusammenfassung:**

Die permanentmagneterregte Synchronmaschine mit Seltene-Erden-Magneten ist die aktuell am häufigsten eingesetzte Maschinenvariante in elektrisch angetriebenen Straßenfahrzeugen, da sie hohe Drehmomentdichten und hohe Wirkungsgrade ermöglicht. Der Einsatz von leistungsstarken Seltene-Erden-Magneten ist aufgrund von großen Preisschwankungen und möglichen Versorgungsgaps jedoch mit strategischen Risiken für die Fahrzeughersteller verbunden. Aus diesem Grund werden zunehmend Ansätze zur Reduzierung der Abhängigkeit von Seltenen Erden analysiert. Als alternative Maschinentypen kommen derzeit vorrangig die Asynchronmaschine und die elektrisch erregte Synchronmaschine in

Frage. Eine weitere, bisher kaum für hochtourige Fahrzeuganwendungen untersuchte Alternative ist die synchrone Reluktanzmaschine (SynRM). Zur Untersuchung der Potenziale der SynRM wird im Rahmen dieser Arbeit zunächst ein automatisierter Entwurfsprozess unter Verwendung eines multikriteriellen Optimierungsalgorithmus entwickelt. Auf Basis dieser Entwurfsumgebung wird ein Fahrmotor mit einer Bemessungsleistung von 47 kW und einer maximalen Drehzahl von 10000 1/min ausgelegt. Zur experimentellen Verifizierung der Berechnungen wird ein entsprechender Prototyp aufgebaut und am Prüfstand betrieben.

Am Beispiel dieser Maschine werden mögliche Ansatzpunkte zur Verbesserung des Betriebsverhaltens in Theorie und Praxis untersucht. Die Wahl der Blechgüte und die Anwendung neuer Verfahren zur Herstellung der Blechkonturen stehen dabei im Fokus. Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der SynRM erfolgt abschließend ein umfassender Vergleich mit Synchronmaschinen mit vergrabenen Magneten. Zu diesem Zweck wird eine neue Auswahlmethodik zur multikriteriellen Bewertung verschiedener Maschinenvarianten vorgestellt.

Jan Döring

## Thema: Elektromagnetische Auslegung einer Transversalflussreluktanzmaschine in Scheibenläuferbauweise mit weichmagnetischen Pulververbundwerkstoffen

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann  
Prof. Dr.-Ing. Ingo Hahn, Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:

Tag der Verteidigung: 01.07.2019

### Zusammenfassung:

In dieser Arbeit wird der aus SMC (Soft Magnetic Composites) bestehende elektromagnetische Kreis einer Transversalflussreluktanzmaschine in Scheibenläuferbauart untersucht. Neben der Vorstellung eines Modells zur Berechnung der Ummagnetisierungsverluste werden die verschiedenen Einflussfaktoren und deren praktische Grenzen auf die Drehmoment- und Leistungsdichte dargestellt. Weiterhin werden drei unterschiedlich komplexe Berechnungsmöglichkeiten des Hauptflusses und des Drehmomentes aufgezeigt und deren Genauigkeiten diskutiert. Abschließend werden exemplarisch die Messergebnisse zweier im Rahmen dieser Arbeit ausgelegter Motoren vorgestellt.

**Abstract:**

This thesis describes the investigations on the magnetic circuit made of soft magnetic composites (SMC) of a transverse flux reluctance machine with disc shaped rotors. An iron loss model for non-sinusoidal magnetic flux in SMC components is introduced and compared with measurements. The influence of certain parameters on torque and power density is presented and their practical limits are discussed. In addition, a comparison of three different ways of flux linkage and torque calculation in terms of calculation time and accuracy is presented. Finally, the results of two build up machines are presented.

## 4.4 Ausgewählte Forschungsergebnisse in Kurzform

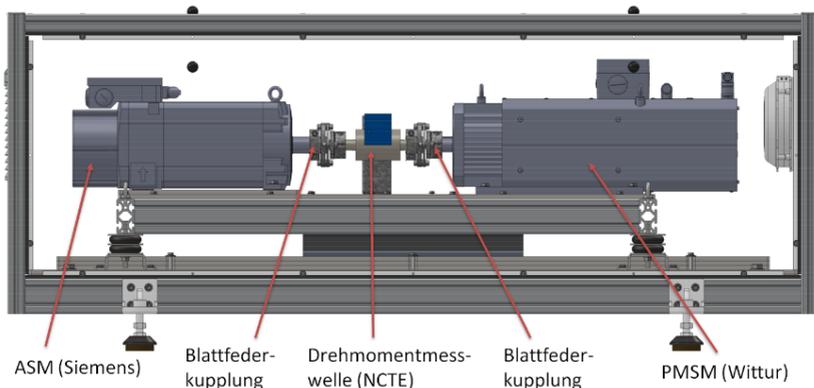
*Dipl.-Ing. Ludwig Schlegel*

### Vergleich der Verluste einer Permanentmagneterregten Synchronmaschine abhängig vom speisenden Stromrichter

Die Verluste von Permanentmagneterregten Synchronmaschinen lassen sich grob in 4 Gruppen einteilen: Wicklungs-, Ummagnetisierungs-, Reibungs- und Zusatzverluste. Abgesehen von den Reibungsverlusten werden alle Verluste auch vom speisenden Stromrichter beeinflusst. Im ersten Schritt wird untersucht, welchen Einfluss die Stromrichter-Topologie hat.

Bei der Firma M&P Motion Control and Power Electronics GmbH gibt es einen E-Maschinen-Prüfstand mit zwei Servomotoren (je ca. 14 kW Nennleistung). Der Prüfstand besteht aus einer permanentmagneterregter Synchronmaschine (PMSM) und einer Asynchron-Käfigläufermaschine (ASM). Die beiden Maschinen sind über Kupplungen und eine Drehmomentmesswelle verbunden, wie in Fig. 1 zu sehen ist.

Fig. 2 zeigt schematisch den elektrischen Aufbau des Prüfstands. Der zur Speisung der PMSM verwendete 3-Level-TNPC-Stromrichter (LT300-ML), kann auch als 2-Level-Stromrichter verwendet werden. Für einen Betriebspunkt (3000 1/min und 20 Nm) wurden bei 12 kHz Schaltfrequenz die Verluste der PMSM bestimmt. Gespeist mit einem 2-Level-Stromrichter betragen die Verluste 1,07 kW und damit der Wirkungsgrad 85,5 %. Bei Verwendung eines 3-Level-Stromrichters betragen die Verluste nur noch 0,73 kW. Damit steigt der Wirkungsgrad um 4 Prozentpunkte. Die Verluste sinken um 32 %.



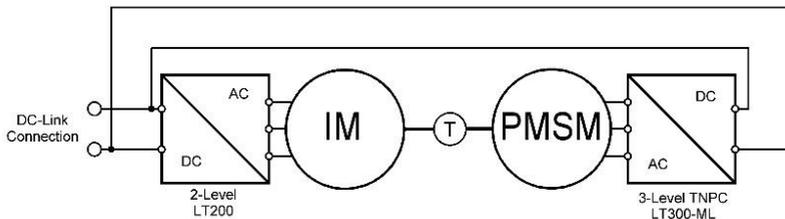
**Fig.1:** Prüfstand für die Untersuchung von E-Maschinen / Test stand for study of electric machines

## Comparison of Losses of a Permanent Magnet Synchronous Machine Fed by Different Converters

In general, the losses of PMSM can be divided into 4 groups: friction losses, winding losses, core losses and additional losses. Except the friction losses, all losses are also influenced by the feeding converter. In the first step, the influence of the converter topology is investigated.

The company M&P Motion Control and Power Electronics GmbH has an electric machine test stand with two servo machines (approx. 14 KW nominal power each). The test stand consists of a permanent magnet synchronous machine (PMSM) and a squirrel cage induction machine (ASM). The two machines are connected via couplings and a torque measuring shaft, as shown in Fig. 1.

Fig. 2 schematically shows the electrical design of the test stand. The 3-level TNPC converter (LT300-ML) used to supply the PMSM can also be used as a 2-level converter. For one operating point (3000 rpm and 20 Nm) the losses of the PMSM were determined at 12 kHz switching frequency. Powered by a 2-level converter, the losses amount to 1.07 kW and thus the efficiency 85.5 %. If a 3-level converter is used, the losses amount to only 0.73 kW. This increases efficiency by 4 percentage points and reduces losses by 32 %.



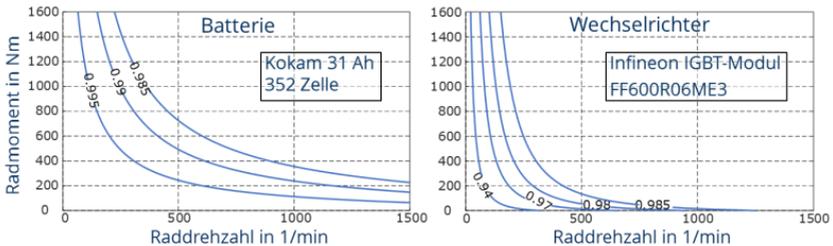
**Fig. 2:** Schematischer Aufbau des Prüfstands mit Stromrichtern / Schematic structure of the test stand with converters

## Datenblattbasierte Verlustbestimmung von Antriebssträngen in Elektrofahrzeugen

Für Elektrofahrzeuge existiert eine überschaubare Anzahl von Varianten zur Ausführung von Antriebssträngen. Dies ist z.T. der Einfachheit der elektrisch-mechanischen Energiewandlung geschuldet. Um in einem frühen Entwicklungsstadium die Effizienz verschiedener Varianten der Antriebsstränge ohne großen Aufwand quantitativ zu vergleichen, wird eine Methode der datenblattbasierten Verlustbestimmung verwendet. Die Methode erlaubt eine Verlustabschätzung der Antriebsstränge auf der Grundlage von Datenblattangaben der Komponenten. Aufwändige Messungen sind bei der Methode nicht erforderlich.

Im Datenblatt einer Batteriezelle werden in der Regel die Entladekurven angegeben. Mit Hilfe der Kurven sind die Energieverluste in Batterie abschätzbar. Aus den Entladekurven wird die Leerlaufspannung der Zelle angenähert. Die Differenz zwischen Klemmenspannung und Leerlaufspannung entspricht dem Spannungsabfall am Innenwiderstand, der die elektrischen Energieverluste in der Batterie verursacht.

Für Wechselrichter werden die Verluste in den IGBT's und Freilaufdioden berücksichtigt. Sie sind abhängig von Betriebsparameter des Motors wie z.B. Motorstrom, Motorspannung und Leistungsfaktor, die in Abhängigkeit von Momentensterverfahren des Motors zu bestimmen sind. Eine Verlustabschätzung der Motorverluste ist gemäß [1] durchführbar.



**Fig. 1:** Generierte Wirkungsgradkennfelder von Batterie und Wechselrichter / Estimated efficiency map of battery and inverter

Um die Verluste in Getriebe zu bestimmen, sind zuerst die Abmessungen von Wellen, Zahnradern und Lagern bzgl. ihrer zulässigen Torsionsfestigkeit zu überschlagen. Eine ausführliche Fassung der Formeln zur Verlustberechnung des Getriebes ist in [2] zu finden.

## Data-sheet based determination of the power losses in electric vehicle powertrain

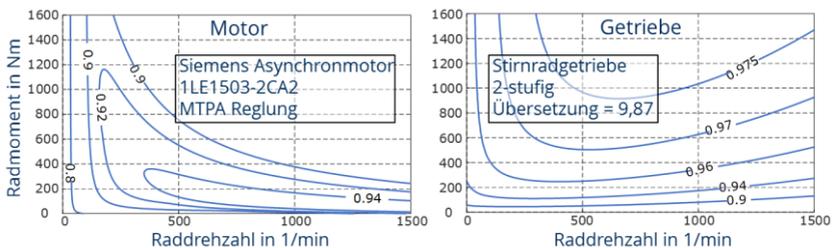
For electric vehicles, there are many different variants of the powertrain. It is partly due to the simplicity of the electric-mechanical energy conversion. In order to compare the efficiency of different variants in the early development stages quantitatively, a data-sheet based method of the power loss determination was developed. Only with the data sheets of the components, the power losses of the powertrain can be estimated. Expensive measurements are not necessary.

In battery data sheet, producers provide usually the discharge curve of the battery cell. The open-circuit voltage can be approached from the curve. The difference between the open-circuit voltage and the battery voltage is the voltage drop on the internal resistance, which causes the power losses in battery.

In inverter, the power losses of the power electronic devices should be taken into consideration. They depend on motor current, motor voltage and power factor, which should be calculated with the consideration of motor control strategies.

The method to calculate the motor power losses can be found in [1].

In [2], the formulas for calculating the power losses in reducer have been introduced. To use these formulas, the dimensions of the shafts, the gears and the bearings must be known. Considering the allowable torsional strength, these dimensions can be estimated.



**Fig. 2:** Generierte Wirkungsgradkennfelder von Motor und Getriebe / Estimated efficiency map of motor and reducer

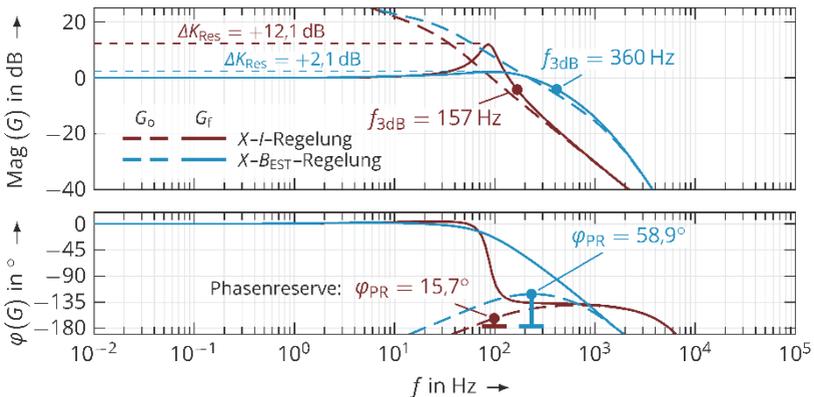
### Literature

- [1] J. Schützhold, K. Benath, W. Hofmann: Berechnung des drehzahl- und lastabhängigen Wirkungsgrads von elektrischen Maschinen anhand von Datenblattangaben, Int. ETG-Kongress 2013, ETG-Fachbericht 139, Berlin 2013.
- [2] S. Yuan: Überschlägige Berechnung der Getriebeverlustleistung und Entwurf eines Vorauswahlidiagramms, Lehrstuhl Technischer Bericht Nr. 12/2017, 2017.

## Sensorlose Flussdichteregelung für axiale Magnetlager auf Basis fraktionaler Systeme

Typischerweise wird die Rotorposition aktiver Magnetlager mit einer Lageregelung mit unterlagerter Kraft- bzw. Stromregelung geregelt. Dieser Ansatz erreicht jedoch insbesondere bei ungeblechten axialen Magnetlagern seine Grenzen, da Wirbelströme und Sättigungserscheinungen im Magnetkreis eine Diskrepanz zwischen den messbaren und kraftbildenden Spulenströmen hervorrufen. Die in der Folge erhebliche Verminderung der Lagersteifigkeit kann durch eine alternative Flussdichteregelung vermieden werden, da so unmittelbar die kraftbildende Komponente gestellt wird.

Im Rahmen des DFG-Projekts HO 1483/78-1 wurde eine Flussdichteregelung auf Basis eines fraktionalen Flussdichteschätzers entwickelt, welche ohne zusätzliche Sensorik auskommt und sich somit auch für bestehende Systeme implementieren lässt. Die zugrundeliegende, analytisch ermittelte, *effektive Induktivität*  $L_{\text{eff}}$  berücksichtigt die wirbelstrombedingte Feldverdrängung bei hohen Frequenzen und erlaubt in Echtzeit die Berechnung der kraftbildenden Flussdichte aus dem messbaren Spulenstrom. Anhand von berechneten Frequenzgängen (Fig. 1) zeigt sich das große Verbesserungspotenzial dieser neuen Variante (Fig. 2) in Bezug auf Regelgüte, Grenzfrequenz und Stabilität im Vergleich zu einer klassischen Lageregelung. Abschließend sollen die Ergebnisse messtechnisch validiert werden.

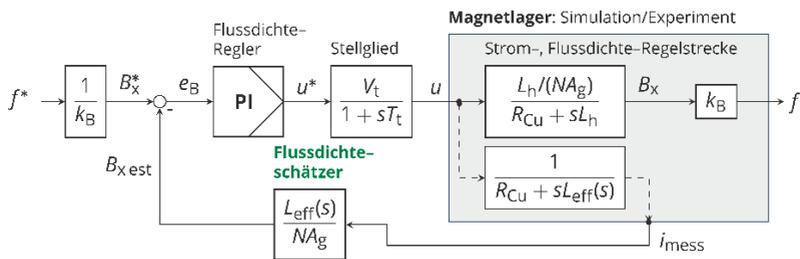


**Fig. 1:** Frequenzgang des offenen  $G_0$  und geschlossenen Regelkreises  $G_r$  der überlagerten Lageregelung für eine unterlagerte Stromregelung (X-I) und Flussdichteregelung mit Flussdichteschätzung (X-Best) / Frequency response of open-loop  $G_0$  and closed-loop  $G_r$  position control with subordinated current (X-I) and flux density control with flux estimation (X-Best)

## Sensorless Flux Density Control for Magnetic Thrust Bearings Based on Fractional Order Systems

Typically, the rotor position of active magnetic bearings is controlled by a cascaded position control with a subordinated current control. Especially in case of non-laminated magnetic thrust bearings, eddy currents and saturation significantly hamper the bearing stiffness, as there is a considerable discrepancy between the measurable and force-generating coil currents.

Alternatively, we developed a subordinated flux density control based on a fractional order flux density estimator in the course of the DFG project HO 1483/78-1, which does not rely on any additional sensors. The underlying *effective inductance*  $L_{\text{eff}}$  considers the magnetic skin effect caused by the eddy currents and enables the calculation of the force-generating flux density in real-time. By means of calculated frequency responses (Fig. 1), we can show the significant improvement of the new control variant (Fig. 2) compared with the classic current based position control in terms of control quality, stability and threshold frequency. The final step is the validation of the results by the upcoming measurements.



**Fig. 2:** Lageregelung mit unterlagertem Flussdichteregelung und fraktionalem Flussdichteschätzer / Position control with subordinated flux density control and fractional order flux density estimator —  $N$ : number of coil turns,  $A_g$ : air gap area,  $T_t$ ;  $V_t$ : inverter delay, gain,  $R_{Cu}$ : coil resistance,  $k_B$ : force-flux density-factor

## Literature

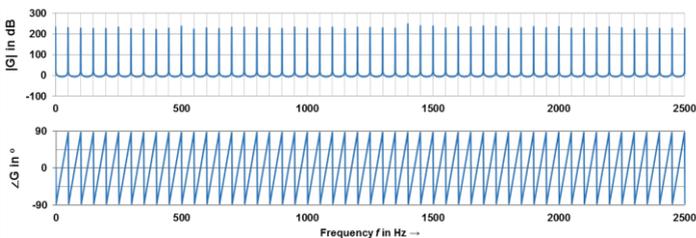
- [1] R. Seifert, C. Steiert, W. Hofmann, K. Röbenack: *Einführung in die fraktionale Flussdichteschätzung in elektromagnetischen Aktoren*, Automatisierungstechnik, Bd. 67, H.7, S. 572 - 586, 2019.
- [2] R. Seifert, W. Hofmann: *Sensorlose Flussdichteregelung für axiale Magnetlager auf Basis fraktionaler Systeme*, 12. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz, Vol. 12, S. 1-9, 2019.
- [3] R. Seifert, K. Röbenack, W. Hofmann: *Rational Approximation of the Analytical Model of Nonlaminated Cylindrical Magnetic Actuators for Flux Estimation and Control*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 55, Issue 12, 2019.

## Repetitive Regler beim Active Power Filter

Beim *Active Power Filter* (APF) handelt es sich um einen netzgebundenen, selbstgeführten Stromrichter. Dieser dient zur Kompensation von Verzerrungs-Blindleistung, welche durch Oberschwingungen im Verbraucherstrom verursacht wird. Dem Stand der Technik entsprechend werden die vom APF einzuprägenden Oberschwingungsströme separat geregelt. Dies geschieht entweder innerhalb eingebetteter rotierender Koordinatensysteme oder durch resonante Regler. Dadurch steigt jeweils der Rechenaufwand proportional zur Anzahl der zu kompensierenden Oberschwingungsströme.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird hierfür ein repetitiver Regler eingesetzt, dessen Übertragungsfunktion Polstellen bei ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz aufweist (hier: Netzfrequenz von 50 Hz, siehe Fig. 1) und sich damit insbesondere zur Regelung periodischer Ströme eignet. Es ist damit möglich, alle Oberschwingungsregler durch einen einzigen repetitiven Regler zu substituieren. Hierdurch ergibt sich eine deutliche Einsparung hinsichtlich der Rechenzeit, da der repetitive Regler lediglich aus einem positiv rückgekoppelten Totzeitglied besteht. Allerdings kann dieser so nicht direkt eingesetzt werden, da die grenzstabilen Polstellen vor allem bei höheren Frequenzen, die beim APF nicht benötigt werden, Stabilitätsprobleme verursachen können und daher durch Tiefpassfilter bedämpft werden müssen. Die durch die Dämpfung entstehende Phasenverschiebung muss wiederum kompensiert werden. Fig. 2 zeigt die Spektralkomponenten des Netzstroms mit und ohne Kompensation einer B6-Gleichrichterbrücke.

Ebenfalls untersucht wurde der Einsatz repetitiver Regler hinsichtlich praktischer Anforderungen an APFs wie variabler Kompensationsgrad je Oberschwingung oder Korrektur des frequenzabhängigen Amplituden- bzw. Phasenfehlers der Sensorik.



**Fig.1:** Bode-Diagramm des repetitiven Reglers / Bode plot of the repetitive controller

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Sollwertermittlung den Flaschenhals bei Verwendung repetitiver Reglern darstellt. Das Sollwertsignal entspricht bei Vollkompensation (und idealer Stromsensorik) dem leicht zu ermittelnden Verzerrungsanteil des Laststroms. Je größer allerdings der Anteil fre-

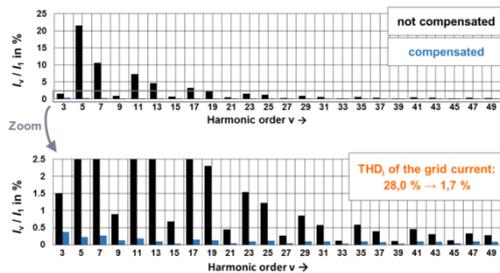
quenzselektiver oder frequenzabhängiger Korrekturen des Sollwertsignals ist, desto größer ist der Rechenaufwand für die Sollwertbestimmung.

## Repetitive Control for Active Power Filters

The APF is build up as a self-commutated converter (see Fig. 1b) and is utilized for the compensation of distortion power, which is caused by harmonics in the load currents. According to the state of the art, the harmonics are controlled separately by using embedded rotating systems or resonant controllers. By this, the computational effort is rising proportionally to the number of harmonics to compensate.

As part of this research work, a repetitive controller is applied, which offers poles at integer multiples of the fundamental frequency (here: the 50 Hz of the grid, see Fig. 1) and by this is especially suitable for controlling periodic currents. Thereby it is possible to substitute the separate controllers for every harmonic by a single repetitive controller. As the repetitive controller only consists of a fed back delay, the computational effort can be reduced significantly. However, a straightforward use is not possible, as the marginal stable poles, which are not needed for the APF, can cause stability problems and have to be damped by low-pass filters. In turn, the resulting phase shift caused by the low-pass filters has to be compensated. Fig. 2 shows the spectral components of the grid current without and with compensation.

In addition, the application of repetitive controllers concerning practical issues was investigated. This includes topics like variable degree of compensation or the correction of the frequency depending amplitude and phase error of the current sensors.

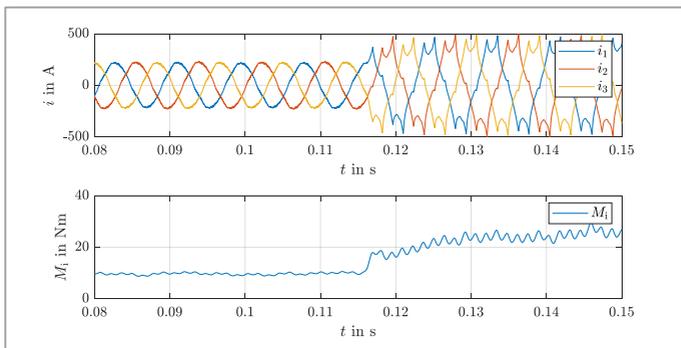


**Fig. 2:** Spektralkomponenten des Netzstroms ohne und mit Kompensation / Spectral components of the grid current without and with compensation

It can be summarized that the reference generation turned out as the bottleneck when applying repetitive controllers. At a full compensation (and ideal current sensors), the reference signal equals the distortion current of the load, which can be easily determined. However, the more frequency selective or frequency depending corrections of the reference signal are needed, the bigger the computational effort of the reference generation gets.

## Wirkungsgradoptimierter Betrieb von Synchron-Reluktanzmaschinen in Flurförderfahrzeugen für den gesamten Drehzahlbereich

Im Bereich der Traktionsanwendungen findet ein kontinuierlicher Wandel von der Verbrennungstechnik hin zur Elektrifizierung der Antriebe statt. Dabei wird stets ein hoher Anspruch an die Robustheit und an die Effizienz der einzelnen Komponenten im Antriebsstrang gestellt. In diesem Forschungsvorhaben wird als Maschinentyp eine Synchron-Reluktanzmaschine in einem batteriebetriebenen Flurförderfahrzeug eingesetzt. Zur Minimierung der Verluste, sowohl im Stromrichter, als auch in der elektrischen Maschine, werden zwei unterschiedliche Regel- bzw. Modulationsverfahren eingesetzt. Im Ankerstellbereich wird die Indirekte-Statorgrößenregelung (ISR) eingesetzt, während im Feldschwächbereich die Grundfrequenztaktung (GFT) ihren Einsatz findet. Für einen optimierten Betrieb hinsichtlich des Wirkungsgrades wird in Abhängigkeit der Batteriespannung, der Drehzahl und des geforderten Drehmoments zwischen den beiden Verfahren gewählt. Diese Entscheidungsmatrix basiert auf den zuvor gemessenen Drehzahl- und Drehmomentkennfeldern des Antriebsstrangs. Zur Anwendung zweier Regelstrategien über den gesamten Arbeitsbereich der Maschine wird ein transientenfreier Wechsel zwischen den Verfahren gefordert. Um diesen Übergang zu vereinfachen wurden Regelverfahren gewählt, die als Modellgröße den verketteten Fluss benötigen. In Fig.1 wird das Umschalten von der ISR zur GFT aufgrund eines Drehmomentsprungs durchgeführt. Anhand des Stromverlaufs ist der Wechsel zwischen den Verfahren deutlich zu erkennen.



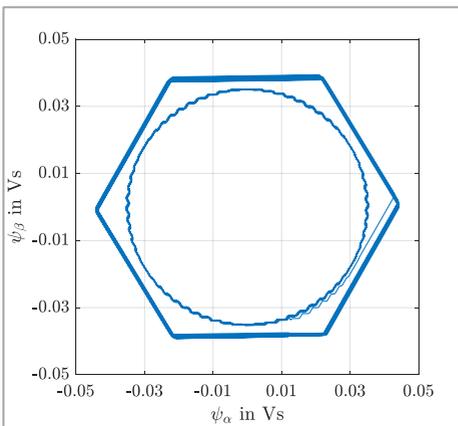
**Fig.1:** Wechsel des Regelverfahrens von ISR zu GFT: a) Gemessene Phasenströme, b) Berechnetes Luftspaltmoment  $M_1$  / Change of control method from ISR to GFT: a) Measured phase currents, b) Calculated air-gap torque  $M_1$

Fig. 2 zeigt die Trajektorie der Flussverkettung in der  $\alpha/\beta$ -Ebene. Während zu Beginn der Flussraumzeiger auf einer Kreisbahn geführt wird, geht dieser auf-

grund einer neuen Drehmomentanforderung auf einen hexagonförmigen Verlauf über. Die Vorteile der GFT-Regelung liegen in den deutlich reduzierten Schaltverlusten und in der Anhebung der maximal erreichbaren Leistung.

### Efficiency-optimized operation of synchronous reluctance machines in industrial trucks for the entire speed range

There is a continuous change from the combustion technology to the electrification of traction drive applications. Along with this change comes a high demand on the robustness and the efficiency of the individual components in the drive train. In this research project, a synchronous reluctance machine is used in a battery-operated industrial truck. To minimize the losses in the converter, as well as in the electrical machine, two different control schemes and modulation methods are used. The "Indirekte Statorgrößenregelung" (ISR) is applied in the base speed range, while square wave mode (GFT eng. SWM) operates in the field weakening range. For optimum efficiency, one of the two methods is automatically selected as a function of the battery voltage, the speed and the required torque. This decision matrix is based on the previously measured speed and torque characteristics of the powertrain. In order to apply two different control strategies over the entire operation range of the machine, the transition from one to the other method should be realized continuously without torque transients. To simplify this transition, flux linkage based control schemes were chosen. As a result of a torque step, the switching from the ISR to the GFT is performed, see Fig.1. This change is also visible regarding the current waveforms. Fig. 2 shows the trajectory of flux linkage in the  $\alpha / \beta$  coordinate system. During the operation with ISR, the flux space vector passes a circular trajectory, whereas it smoothly transforms to the hexagonal trajectory applying SWM. The advantages of the SWM control are the significantly reduced switching losses and the increase in the maximum achievable power.



**Fig.2:**

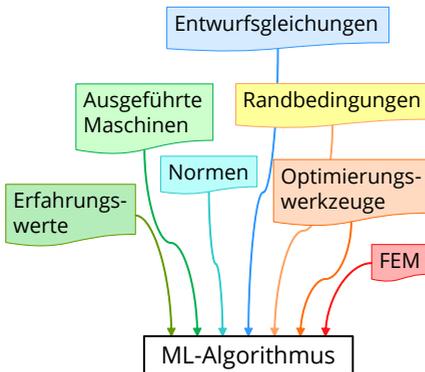
Gemessener Flussraumzeiger in Abhängigkeit des gewählten Regelverfahrens -

Measured flux linkage during a change from ISR (circle) to GFT (hexagon)

## Maschinelles Lernen für den Entwurf elektrischer Maschinen

Die Studie zum Thema „Potentiale maschinellen Lernens für die Auslegung drehender elektrischer Maschinen“ ist ein von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. gefördertes Projekt (FVA 858 I). Sie verfolgt das Ziel, die Anwendung von Algorithmen des Maschinellen Lernens (ML) auf domänenübergreifende Entwurfsprozesse drehender elektrischer Maschinen zu untersuchen und beispielhaft für eine Domänenverknüpfung zu erproben. Die „Domänen“ charakterisieren physikalische und wirtschaftliche Aspekte des Entwurfs, beispielsweise Elektrodynamik, Magnetik, Kinematik sowie Zuverlässigkeit oder Technologie.

Gegenüber der Gliederung in Domänen eignet sich aus der Programmierperspektive eine Systematisierung des Auslegungsprozesses hinsichtlich der Dimension der vorliegenden Daten (Fig. 2). Darüber hinaus ist, in Hinblick auf die Anwendung maschineller Lernalgorithmen, eine Unterteilung nach wiederkehrenden Problemstellungen sinnvoll. Einige Beispiele dafür sind: Regression/ Interpolation für die Abmessungen oder Windungszahlen, Dimensionsreduktion/ Merkmalsselektion für Feldkurvenparameter, Klassifizierung für Nutformen sowie Ballungsanalyse (*Clustering*) für Abmessungen je nach Polpaarzahl.



**Fig. 1:** Datenquellen eines ML-Algorithmus zur Auslegung elektrischer Maschinen / Data sources of a machine learning algorithm for electric machine design

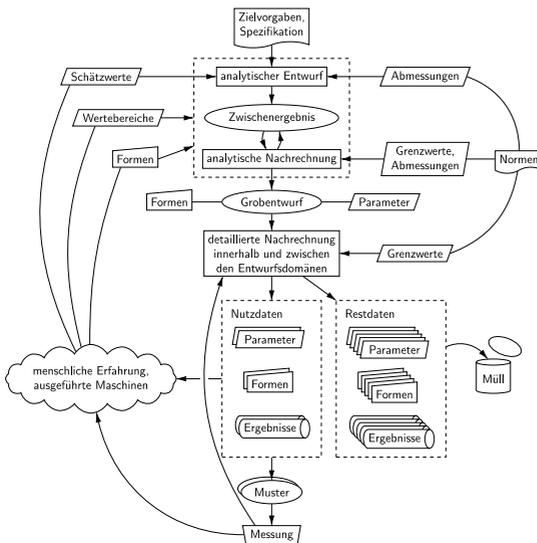
Zur Erprobung der Algorithmen entsteht ein Entwurfsprogramm, das andererseits zur Erstellung der Trainingsdaten dient. Die Grundlage für das Programm bildet der klassische Entwurf einer Drehstrom-Asynchronmaschine nach Vogt. Mit dem Ziel sowohl gute, also auch schlechte Entwürfe zu generieren, entsteht aus der Variation von Entwurfsparametern eine Vielzahl von Datensätzen. Als Referenz für gute Entwürfe dienen Maschinendaten eines Projektpartners sowie vorliegende Blechschnitte von Kienle+Spieß. Zukünftig sollen weitere Datenquellen zum Training herangezogen werden (Fig. 1).

## Machine learning for the design of electrical machines

The study with the title “Potential of machine learning in dimensioning rotating electrical machines” is a project founded by the Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. (FVA 858 I). Its goal is the assessment and test of machine learning algorithm in application on multi-domain design processes of rotating electrical machines. The so-called “domains” describe physical and economical design aspects, e.g. electrodynamics, magnetics, cinematics as well as reliability or technology.

Against a domain structuring, a design process systematization regarding the dimension of the design data meets the programming perspective (Fig. 1). Furthermore, the nature of machine learning algorithms demands a subdivision respecting repeating problems. Those may be: regression/interpolation for dimensions or the number of winding turns, dimensionality reduction/feature selection for air-gap field characteristic, classification of slot shapes and clustering of dimensions regarding the number of pole pairs.

For the algorithm testing on the one hand, for the creation of training data on the other hand, a design program has been developed. It is based on the classical three-phase induction machine design by Vogt. With the goal of getting good and bad design examples, the variation of design parameters generates a large number of data sets. For the validation of good designs, datasets of a project partner as well as sheet data from Kienle+Spies are available. In the future, the training shall utilize additional data sources (Fig. 2).



**Fig. 2:**

Datentypen und deren Abfolge bei der klassischen Auslegung elektrischer Maschinen/

Data types and their flow for the conventional electric machine design process

## Wirbelstromverluste in den Magneten permanenterregter Synchronmaschinen

Permanenterregte Synchronmaschinen (PMSM) vereinen hohe Wirkungsgrade mit kompakter Bauweise. Hochausgenutzte Maschinen dieses Typs sind beispielsweise für Traktionsanwendungen gut geeignet, in denen Neodym-Eisen-Bor-Magnete mit besonders hoher Leistungsdichte zum Einsatz kommen.

Die Verluste in den Permanentmagneten entstehen durch Pulsationen der magnetischen Flussdichte, welche im leitfähigen Magnetmaterial Spannungen induzieren, die wiederum Wirbelströme treiben. Da in PMSM der Rotor synchron zum Hauptfeld läuft, entstehen diese Pulsationen ausschließlich durch Harmonische in der Feldkurve. Diese lassen sich nach der Ursache in Wicklungs-, Nutungs- und Umrichterharmonische unterteilen.

Die Bestimmung der Wirbelstromverluste kann analytisch oder numerisch erfolgen. Die analytischen Verfahren sind dabei meist auf vereinfachte Geometrien beschränkt, während numerische Verfahren rechenzeit- und ressourcenintensiv sind. Beispielverfahren sind in [1] (analytisch) und [2] (numerisch) aufgeführt.

Die Wirbelstromverluste führen in den Magneten zu einer Erwärmung, welche die Eigenschaften des Materials negativ beeinflusst. Darüber hinaus steigt mit der Magnettemperatur das Risiko einer Entmagnetisierung. Diese tritt auf, wenn ein ausreichend starkes Gegenfeld den Arbeitspunkt des Magneten aus dem linearen Arbeitsbereich verschiebt. Dieser Vorgang ist irreversibel und senkt die Leistungsfähigkeit des Magneten permanent, er ist daher unbedingt zu vermeiden.

Da die Verluste sich nur schwer abschätzen lassen, ist auch die zuverlässige Ermittlung der Magnettemperatur eine Herausforderung, da eine direkte Messung und Überwachung mit zusätzlichen Kosten verbunden ist und sich daher nicht für die Serienproduktion eignet.

Die Erwärmung wirkt sich bei einer Rotorbauweise mit vergrabenen Magneten besonders gravierend aus, da diese ohne Kontakt zum Luftspalt schwieriger zu kühlen sind als Oberflächenmagnete. Andererseits sorgt das Vergraben der Magnete gleichzeitig dafür, dass das darüber liegende Eisen einen Teil des eindringenden Feldes gegenüber den Magneten abschirmt, somit die Verluste effektiv senkt.

## Eddy-current losses in magnets of permanent magnet synchronous machines

Permanent magnet synchronous machines (PMSM) combine high efficiency with compact construction. Highly utilized PMSM are suitable for application in traction and are equipped with neodymium magnets, which provide exceptional power density.

Losses in permanent magnets occur due to pulsations of the magnetic flux density, which induce voltage in the conductive magnet material and lead to eddy currents. Since the rotor and the magnetic field rotate at identical speed, the induction pulsations solely result from field harmonics. These can be differentiated into winding harmonics, slot harmonics and inverter harmonics.

There are numerous procedures described as to determine the losses in the permanent magnets. Some of those present an analytical approach, which often sets constraints on the model accuracy (e.g. [1]), while others utilize numerical solutions (e.g. [2]) with higher resource and time consumption.

The losses cause heating within the magnets and subsequently affects the properties of the magnet material negatively. Furthermore, higher magnet temperature increases the risk of demagnetization, which occurs when the armature reaction field of the machine moves the magnet operating point out of the linear characteristic. This process is irreversible and causes permanent performance reduction.

Since the losses are difficult to predict, the estimation of the magnet temperature is challenging. Direct measurements cause additional costs, which are often not acceptable in serial production.

A rotor construction with interior permanent magnets as opposed to surface-mounted magnets complicates the temperature problem, since the magnets cannot be cooled via the air gap. On the other hand, the rotor iron on top of the magnets acts as screen to reduce the harmonics' effect on the magnets.

### Literature

- [1] Beckert, U. Berechnung zweidimensionaler Wirbelströme in kurzen Permanentmagneten von PM-Synchronmaschinen. *antriebstechnik* 46, S. 44–48 (Juni 2007).
- [2] Yamazaki, K. & Abe, A. Loss Analysis of Interior Permanent Magnet Motors Considering Carrier Harmonics and Magnet Eddy Currents Using 3-D FEM. in: 2007 IEEE International Electric Machines Drives Conference. 2 (Mai 2007), 904–909.

## Zustandsbeobachter basierte thermische Modellierung von elektrischen Maschinen für den Automotive Bereich

Permanentmagnet erregte Synchronmaschinen (PMSM) werden gegenwärtig in großem Umfang in EV/PHEV verwendet, da sie ein hohes Drehmoment erzeugen können. Außerdem bieten sie eine hohe Leistungsdichte sowie einen hohen Wirkungsgrad. Um ein Drehmoment mit hoher Genauigkeit zu erzeugen, ist es wichtig, die Temperatur des Permanentmagneten (PM), die in den Rotor der PMSM eingebettet sind, so genau wie möglich zu schätzen (siehe Fig. 1).

Im Projekt werden die Konsequenzen der Vernachlässigung der PM-Temperatur-Schätzung untersucht, welche hauptsächlich zu einer Entmagnetisierung der Permanentmagnete bei einer höheren PM-Temperaturen und einer schlechteren Drehmomentgenauigkeit führen können. In Fig. 2 wird ein umfassender Überblick zum Stand der Forschung gegeben einschließlich neuer Ansätze zur Temperaturschätzung in Permanentmagneten.

Der Fokus liegt auf der thermischen Modellierung von Elektromotoren, mit deren Hilfe die PM-Temperatur geschätzt wird. Darüber hinaus werden Nichtlinearitäten, welche in bisherigen Forschungen meist vernachlässigt werden, und der Schätzfehler im Anfangszustand des thermischen Netzwerks, der mit Hilfe eines Zustandsbeobachters kompensiert wird, ebenfalls berücksichtigt. Abschließend wird eine praktische Implementierung eines Luenberger basierten Zustandsbeobachters für das thermische Netzwerk und eine theoretische Analyse zur Integration eines Kalman-Filters in ein thermisches Netzwerk erläutert (siehe Fig. 2).

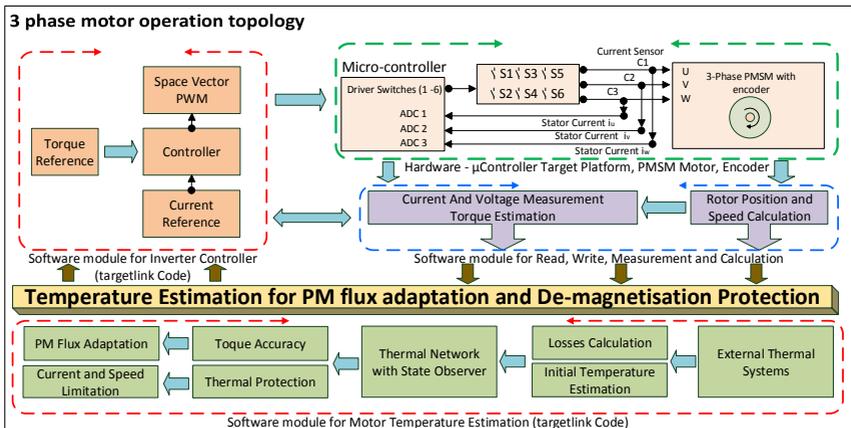


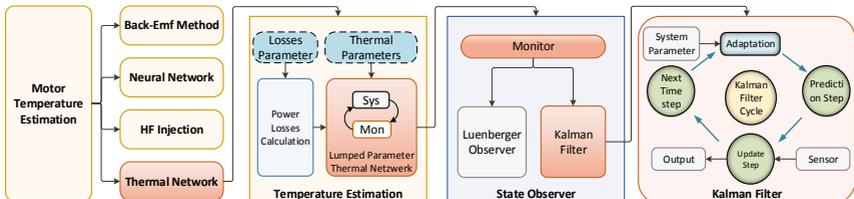
Fig. 1: Regelstruktur des Drehstrommotors/ Three phase motor control topology

## State observer based thermal modeling of electric machines for automotive application

Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) are currently extensively used in EV/PHEV due to their capability of generating high torque; also, they provide high power density and more important high efficiency. In order to generate high accuracy torque (see Fig. 1) it is important to estimate the temperature of the Permanent Magnets (PM), which are embedded in rotor of PMSM.

In this research work, the consequences of neglecting PM temperature estimation were analysed, which are mainly demagnetization of the PMs at higher PM temperatures and bad torque accuracy. In Fig. 2 a broad perspective on existing research results on PM temperature estimation methods along with the new scope of research is shown.

The research work focuses on thermal modelling of electric motors, which has been used to estimate PM temperature. In addition, the non-linearity and the estimation error in initial state of the thermal network, which are usually neglected and can be compensated with the help of a state observer approach, has been detailed. Finally, a practical implementation of Luenberger based state observer for thermal networks and theoretical research on Kalman filter integration in thermal network are explained (see Fig. 2).



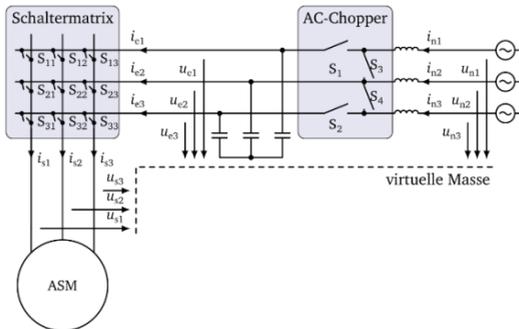
**Fig. 2:** Überblick zum Stand der Forschung / Overview of existing & ongoing research work

## Literature

- [1] G. Gelke, J. Kertzsch: Intuitive Sensorintegration zur thermischen Berechnung elektrischer Maschinen. 2. Freiburger Kolloquium Elektrische Antriebstechnik, 70. BHT - Freiburger Universitätsforum, Deutschland, Freiberg, 2019
- [2] Ogata, K.: Modern Control Engineering, Instrumentation and controls series, Prentice Hall, 2010.
- [3] H. Joshi (earlier known as Kamble), "Simulation and Control of PMSM Motor for an Embedded Platform" M.S. Thesis, Faculty Mechanical Engineering and Mechatronics, FH Aachen University of Applied Sciences, Aachen 2015 in cooperation with Forschungsgesellschaft Kraftfahrzeug Aachen (fka) GmbH, Aachen.

## Regelung des hochsetzenden direkten Matrixumrichters mit der Fähigkeit Netzspannungseinbrüche durchfahren zu können

Der direkte Matrixumrichter (DMC) liefert analog zum Spannungszwischenkreisumrichter einen sinusförmigen Ausgangsstrom einstellbarer Frequenz und Amplitude sowie sinusförmige Eingangsströme mit verstellbarem Leistungsfaktor. Ein Nachteil des Matrixumrichters ist der begrenzte Spannungsübertragungsfaktor kleiner eins, welcher den Umrichter für das Durchfahren von Netzfehlern unbrauchbar macht. In [1] wurde eine erweiterte Topologie des DMCs vorgeschlagen, in der ein AC-Chopper zwischen den Drosseln und Kondensatoren des Netzfilters ergänzt wurde (Fig. 1).



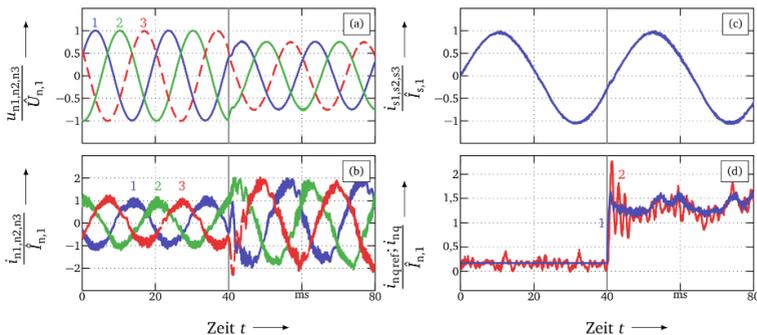
**Fig.1:** Hochsetzender direkter Matrixumrichter mit AC-Chopper / Buck-boost direct matrix converter with AC chopper

Für diese Umrichtertopologie wurde ein Regelungsverfahren entwickelt, das es ermöglicht, den Umrichter mit inaktivem AC-Chopper zu betreiben, wenn kein Netzfehler vorherrscht und der Spannungsübertragungsfaktor die Grenze des DMCs nicht erreicht. Tritt ein Netzfehler ein, wird der AC-Chopper aktiv und das Netz kann ohne Einfluss auf die Maschinenströme durch erhöhten Blindstrombeitrag unterstützt werden. Die Diagramme in Fig. 2 zeigen Messergebnisse mit diesem Umrichter, bei denen die Käfigläufer-Asynchronmaschine (ASM) bei halber Bemessungsdrehzahl und vollem Bemessungsdrehmoment betrieben wurde. Die nominelle Netzspannung wurde auf  $U_{n,N} = 115 \text{ V}$  reduziert, wodurch sich der AC-Chopper bereits im Hochsetzbetrieb befindet. Denn der maximale Spannungsübertragungsfaktor des DMCs allein reicht für diesen Betriebspunkt der ASM nicht aus. Zum Zeitpunkt  $t = 40 \text{ ms}$  tritt der Spannungseinbruch ein (Fig. 2 (a)). Von Fig. 2 (b) und Fig. 2 (d) kann entnommen werden, dass der Blindanteil des Netzstroms erhöht wird, um das Netz zu unterstützen, während der Statorstrom der ASM in Fig. 2 (c) unbeeinflusst bleibt.

## Control of the buck-boost direct matrix converter with low voltage ride-through capability

Similar to the voltage source converter (VSC) the direct matrix converter (DMC) delivers sinusoidal output currents with adjustable frequency and amplitude as well as sinusoidal input currents with controllable power factor. A drawback is the restricted voltage transfer ratio less than one. Consequently, the DMC cannot be utilized for riding through grid faults. An extended topology of the DMC was proposed in [1]. An AC chopper is added between the chokes and capacitors of the grid filter (Fig. 1).

A control approach was developed for this converter topology, which enables the converter to operate with inactive AC chopper, as long as no grid failure occurs and the voltage transfer ratio does not reach der DMCs limit. If a voltage drop arises, the AC chopper becomes active and the grid can be supported with additional reactive current without impact on the machine currents. The diagrams in Fig. 2 show experimental results with this converter driving an induction machine (IM) at half rated speed and full rated torque. Since the grid voltage was reduced to  $U_{n,N} = 115 \text{ V}$ , the AC chopper is already active. The voltage transfer ratio of the DMC himself is not sufficient for this operating point. At time  $t = 40 \text{ ms}$  a voltage drop to  $U_n = 0,75 U_{n,N}$  occurs (Fig. 2 (a)). It can be noticed from Fig. 2 (b) and Fig. 2 (d), that the reactive component of the grid current is increased for supporting the grid while the stator current of the IM keeps unaffected.



**Fig.2:** Experimentelle Ergebnisse bei einem Spannungseinbruch / Experimental results at a voltage drop to  $U_n = 0,75 U_{n,N}$ ,  $\bar{U}_{n,1} = 163,3 \text{ V}$ ,  $\bar{I}_{n,1} = 6,3 \text{ A}$ ,  $\bar{I}_{s,1} = 12,2 \text{ A}$

## Literature

- [1] Itoh, J.-I.; Koiwa, K. & Kato, K. Input current stabilization control of a matrix converter with boost-up functionality Proc. Int. Power Electronics Conf. (IPEC), 2010, 2708-2714

## Energiespeicher für Antriebssysteme mit fluktuierenden Lastprofilen

Der gemeinsame Gleichspannungsverbund mit Speichereinsatz ist das Mittel zur Energieeffizienzsteigerung von Antriebssystemen. Der Energiespeicher kann im Vergleich zu rückspeisefähigen Stromrichtern netzrückwirkungsfrei die Bremsenergie von Bewegungsvorgängen zwischenspeichern und für die nächste Beschleunigung zurückführen. Auch gewährleistet er gleichzeitig die Funktion der unterbrechungsfreien Versorgung des Antriebssystems in volatilen Netzen.

Für das Problem stark fluktuierender Lastprofile ist ebenfalls der Energiespeicher die passende Lösung. Im Fig. 1 ist beispielhaft ein fluktuierendes Lastprofil, gemessen am Anschlusspunkt von sechs Regalbediengeräten eines Logistikunternehmens mit je 40 kVA Anschlussleistung, dargestellt. Während die mittlere Leistungsaufnahme bei 8 kW liegt, sind Spitzenleistungen über 53 kW typisch. Bei einer höheren Gleichzeitigkeit der Geräte sind sogar Vielfache möglich. Der Anlagenbetreiber zahlt an den Netzbetreiber nicht nur für die Spitzenleistung, sondern auch für diesbezüglich ausgelegte Transformatoren, Schaltgeräte und Kabel. Mit Hilfe einer prädiktiven Steuerung des Energiespeichersystems lassen sich Spitzenlasten für das Netz drastisch reduzieren. Wie in der Logistik sind die geplanten Stellvorgänge eines oder auch mehrerer Antriebssysteme im Gleichspannungsverbund frühzeitig bekannt. Der Speicher kann auf Grundlage dieses Wissens in Phasen geringer Netzbelastung vorgeladen und während der Lastspitzen wieder entladen werden. Bild 2 zeigt dazu das Potential der Netzleistungsreduzierung.

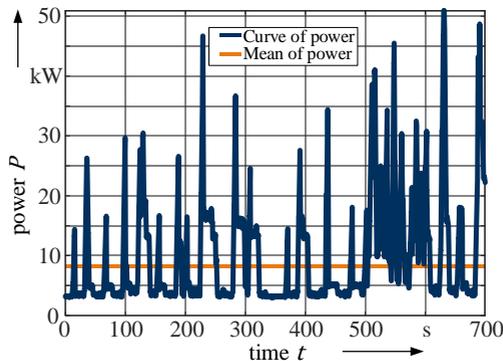
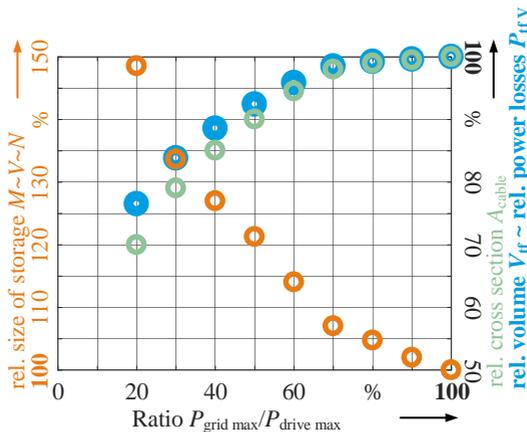


Fig.1: Leistungsmessung von sechs Regalbediengeräten / Power measurement of six storage and retrieval units

## Energy storage for drive systems with fluctuating load profiles

The dc-link with an energy storage is a way for energy efficiency increase of electrical drive systems. Compared to regenerative converters an energy storage saves breaking energy of a movement without additional distortion of the grid voltage and returns the energy for the next acceleration. At the same time, the storage also ensures the feature of uninterruptible power supply of the drive system in volatile grids.

For the problem, strongly fluctuating load profiles, is the energy storage an appropriate solution as well. Fig. 1 shows an example of a fluctuating load profile, measured at the connection point of six storage and retrieval units (SRU) of a logistics company with a connected load of 40 kVA for each SRU. While the average power consumption is 8 kW, peak outputs above 53 kW are typical. With a higher simultaneity factor of the SRUs multiples of this peak are possible. The plant operator pays to the grid operator not only for the peak power, but also for transformers, switchgear and cables designed for the high current. With the help of a predictive control of the energy storage system, peak loads for the grid can be drastically reduced. As in logistics, the planned positioning processes of one or several drive systems in the dc link are known at an early stage. Based on this knowledge the storage can be precharged in phases of low load and discharged during the load peaks again. Fig. 2 shows how high the potential of the storage with predictive control is.



**Fig. 2:** Relative Einsparungen und Änderung der Speichergöße bei Reduzierung der Netzleistungsaufnahme / Relative savings and change in storage size with reduction in grid power consumption

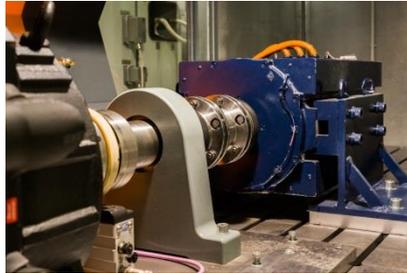
## 5 AUSSTATTUNG DES LEHRSTUHLS

Neben Arbeitsräumen für Diplomanden, Studienarbeiter, Gastwissenschaftler, IAESTE-Studenten, die mit modernster Büro- und Rechentechnik ausgestattet sind, verfügt der Lehrstuhl über eine Vielzahl von Versuchsständen für Forschung und Lehre.

- Lichthof (354 qm)
- 7 Forschungslabore (400 qm)
- 3 Labore für Praktika (112 qm)
- 1 PC-Pool (14+1 Rechner)



Lichthof des Instituts



Prüfstand Maschinen und Antriebe



Schaltschrankbatterie zum Prüfstand

### 5.1 Prüfstand Elektrische Maschinen und Antriebe

Der Prüfstand (Baujahr 2015, Förderung als Großgerät durch die DFG) im Lichthof des Görgesbaus ermöglicht die realitätsnahe Optimierung, Analyse und Validierung von Elektromaschinen sowie der zugehörigen Leistungselektronik im Leistungsbereich bis 200 kW. Die Prüfanlage ist mit rückspeisefähigen Netzstromrichtern auf der Belastungs- und Prüflingsseite ausgerüstet, so dass ein drehzahl- oder drehmoment geregelter Betrieb des Maschinensatzes in allen vier Quadranten möglich ist. Gegenwärtig sind eine hochtourige Belastungseinheit (106 Nm,  $13.500 \text{ min}^{-1}$ ) und eine niedertourige Belastungseinheit (1010 Nm,  $1.750 \text{ min}^{-1}$ ) zur Aufnahme der mechanischen Leistungen der Prüflingsmotoren verfügbar. Eine

Besonderheit ist die Bereitstellung einer variablen Zwischenkreisspannung für die Maschinenstromrichter auf der Prüflingsseite (10...800 VDC,  $\pm 600$  ADC). Damit ist die Anpassung an verschiedene Gleichspannungsebenen für EV/HEV-Antriebe und stationäre Industrieantriebe ausführbar. Zur Untersuchung neuer stromrichter-naher Steuer- und Regelalgorithmen ist zusätzlich ein Experimentierstromrichter in Kombination mit einem universellen Mikrorechnersystem der Fa. dSpace installiert.

Die Mess- und Automatisierungstechnik der Prüfanlage ist vor allem auf die lückenlose Erfassung von Leistungen, Effizienz- und Wirkungsgrade von der elektrischen Einspeisung bis zur Motorwelle im stationären bzw. dynamischen Betrieb des Antriebsstrangs ausgerichtet. Wesentliche Elemente der Messtechnik sind Leistungsmessgeräte WT 3000 und WT 1800 (Fa. Yokogawa) zur Messung von gepulsten Spannungen und Oberschwingungsbehafteten Strömen sowie Messflansche T12 (Fa. HBM) zur Drehzahl- und Drehmomentmessung. Die Messmittel besitzen die notwendige Messgenauigkeit, um auch im Teillastbereich auf der Grundlage von Differenzmessungen Aussagen zur Effizienz einer untersuchten Komponente zu treffen. Alle Vorgaben zur Messgenauigkeit bei der Bestimmung von Verlusten und Wirkungsgraden elektrischer Maschinen nach der Norm DIN EN 60034-2 werden eingehalten.

In unmittelbarer Nachbarschaft des Prüfstandes steht eine Druck-Volumenstrom-Messeinrichtung zur experimentellen Bestimmung thermischer und strömungstechnischer Eigenschaften elektrischer Maschinen. Die Kombination beider Anlagen kann Entwicklungsreserven bei der Erhöhung der Effektivität der Motorkühlung aufzeigen.

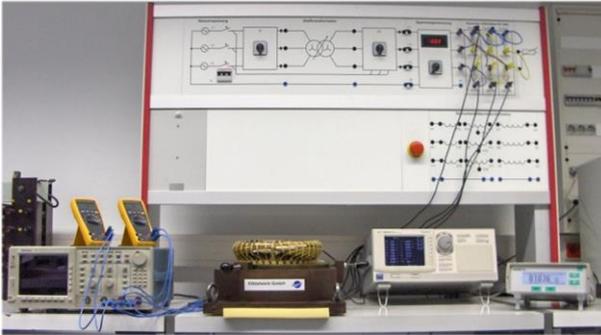
## 5.2 Weitere Versuchsstände für die Forschung

- Labor Energiesystemtechnik mit Netznachbildung, Filtertechnik und Modellanlage für Windenergie und zur Untersuchung von Netzrückwirkungen



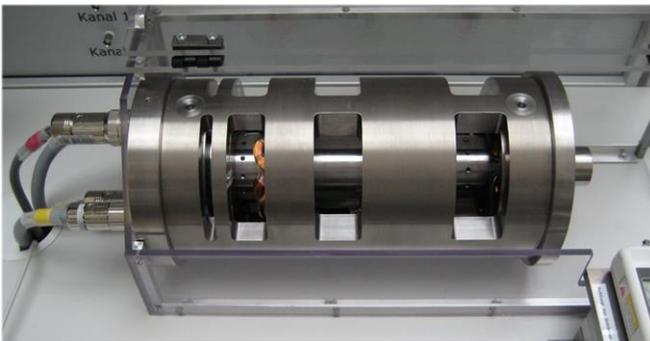
Netzmodell zur Untersuchung von Stromrichternetzrückwirkungen

- Optimale Bewegungssteuerung mit Rotations- und Linearantrieben
- Matrixumrichter, Z-Source-Inverter
- Rechnergestützte Bewegungssteuerung: automatisierter Entwurf des Programmkodes für Steuergeräte



Messplatz zur Bestimmung von Wirbelstromverlusten in Elektroblechen

- Messeinrichtungen zur Feld- und Wirbelstromverteilung
- Aktive Magnetlager
- Schleifringprüfstand
- Arbeitsplatz FEM-Modell der Vollpolmaschine



Versuchsstand Magnetlager

- Magnetlagerversuchsstand für die Lehre
- Hochgeschwindigkeitsmagnetlager für Forschung,
- Versuchsstand zur Messung des Wärmewiderstands von Wälzlager
- Versuchsstand zur Messung der Verluste im quergekühlten Statorblechpaket
- Motorenprüfstand für Luftkühlung

## 5.3 Versuchsstände für die Lehre

- Schrittmotoren, geschalteter Reluktanzmotor
- Binäre Steuerungen in der elektrischen Antriebstechnik
- Antriebsregelung, Buskommunikation, technologisch verkettete Antriebe am Netz (4 stromrichter gespeiste Antriebssätze Gleichstrommotor-Drehstrommotor (je 10 kW)
- Praktikum „Analyse des Betriebsverhaltens und Messung des Leistungsflusses im Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen“ am Versuchsstand Elektromobilität - Förderung im Rahmen der akademischen Bildungsinitiative im Schaufenster Elektromobilität.
- Drehstromtransformator
- Feldorientierte Regelung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine (sensorloser Betrieb)
- Stoßkurzschluss bei Synchronmaschinen
- Gleichstrom- und Drehstromstellantriebe
- Bewegungssteuerung, graphische Programmierung, Echtzeitcodegenerierung, Profibus (3 Drehstromstellantriebe)
- Weitere Versuchsstände zur Vertiefungsausbildung elektrische Maschinen und Antriebe in den Studiengängen Elektroenergietechnik und Mechatronik

## 5.4 Sonderausstattungen

- Separate Netzeinspeisung 0...400 V über Stelltransformator, 100 A
- Zwei Umformersätze 3x400 V, 190 kVA (bis 400 Hz) und 120 kVA (50 Hz / 60 Hz)
- Schwerlastversuchsfläche mit Zufahrt und Hallenkran (3 t)
- Pendelmaschinen zur Motorenprüfung
- Hochwertige Speicheroszilloskope (Bandbreite 600 MHz), Drehmomentmesswellen (2 Nm ... 200 Nm), Power-Analyzer, Echtzeitrechensysteme (Fa. dSpace)

## 6 PERSONELLE BESETZUNG

### Lehrstuhlinhaber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann

### Emeriti:

Prof. (i.R.) Dr.-Ing. habil. Peter Büchner

Prof. (i.R.) Dr.-Ing. Manfred Liese

Prof. (i.R.) Dr.-Ing. habil. Gernar Müller †

### Sekretariat

Peggy Martin

### Wissenschaftliche Mitarbeiter

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Gert-Helge Geitner

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Volkmar Müller

Dr.-Ing. Nicol Hildebrand

M. Sc. Arturo Arias

Dipl.-Ing. Arne Brix

Dipl.-Ing. Chris Evers

Dipl.-Ing. Kyoungseok Woo

Dipl.-Ing. Robin Linus Liebfried

Dipl.-Ing. Martin Leubner

M. Sc. Tobias Micklitz

M. Sc. Sumit Patil

Dipl.-Ing. Nico Remus

Dipl.-Ing. Ludwig Schlegel

Dipl.-Ing. Robert Seifert

Dipl.-Ing. Gunar Steinborn

M. Sc. Shaohui Yuan

Dipl.-Ing. Yuanpeng Zhang

### Freie Mitarbeiter

Prof. (i.R.) Dr.-Ing. Heinz-Dieter Eberhardt

### Fachpersonal

Sylvia Schad

Dipl.-Ing. Axel Rusch

### Doktoranden

Dipl.-Ing. Falk Bahr

Dipl.-Ing. Henry Barth

M.Sc. Swen Bosch

Dipl.-Ing. (FH) Martin Eckart

M.Sc. Hrishikesh Joshi

M.Sc. Sören Miersch  
Dipl.-Ing. (FH) Philipp Miska  
M.Sc. Johann Pecho  
M.Eng. Stefan Staudt

**Studentische Hilfskräfte:**

Jonas Rose  
Dennis Guhl  
Luzie Johanne Kirchner

## 7 ANSCHRIFT

### Postanschrift:

Technische Universität Dresden  
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
Elektrotechnisches Institut  
01062 Dresden

### Sitz:

Helmholtzstr. 9  
Görgesbau, Raum 206/207  
01069 Dresden

### Telefon, Fax, E-Mail:

Lehrstuhlinhaber: 0351-463-37634  
[wilfried.hofmann@tu-dresden.de](mailto:wilfried.hofmann@tu-dresden.de)  
Sekretariat: 0351-463-33223  
[peggy.martin@tu-dresden.de](mailto:peggy.martin@tu-dresden.de)  
Fax: 0351-463-33655

Website: <http://ema.et.tu-dresden.de>



## 8 IMPRESSUM

### Anbieter:

Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe  
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
Elektrotechnisches Institut  
01062 Dresden

### Kontakt:

Telefon: 0351-463-33186  
Telefax: 0351-463-33655  
e-Mail: [sylvia.schad@tu-dresden.de](mailto:sylvia.schad@tu-dresden.de)

### Verantwortlich:

Redaktion: Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner  
Gestaltung und Betreuung: Sylvia Schad



