



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

Elektrotechnisches Institut

Prof. Dr.–Ing. W. Hofmann

<b>JAHRESBERICHT ANNUAL REPORT</b>	<b>2014</b>
--	-------------

Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe



## Inhalt

---

1	Vorwort.....	5
2	Lehraufgaben .....	7
2.1	Lehraufgaben im Grund- und Hauptstudium .....	7
2.2	Lehraufgaben für andere Fakultäten.....	11
2.3	Abgeschlossene Diplom- und Studienarbeiten.....	12
2.4	Exkursionen.....	13
3	Öffentlichkeitsarbeit.....	15
3.1	Veröffentlichungen .....	15
3.2	Vorträge und Berichte.....	17
3.3	Patente.....	24
3.4	Ehrungen, Preise.....	24
3.5	Kooperation.....	25
	3.5.1 Forschung und Lehre .....	25
	3.5.2 Gremien und Gutachten .....	26
4	Forschung.....	27
4.1	Forschungsprofil .....	27
4.2	Forschungsprojekte .....	27
4.3	Ausgewählte Forschungsergebnisse in Kurzform ..	31
5	Ausstattung des Lehrstuhls.....	51
5.1	Forschungsversuchsstände.....	51
5.2	Lehrversuchsstände.....	53
5.3	Sonderausstattung.....	53
6	Personelle Besetzung.....	55
7	Anschrift .....	57
8	Impressum .....	59
9	Lageplan .....	61



# 1 VORWORT

Liebe Kollegen, Mitarbeiter und Freunde,

wie in jedem Jahr überreiche ich Ihnen hiermit unseren Jahresforschungsbericht, mit dem wir Bilanz ziehen für das vergangene Jahr 2014.

Gestiegene Studentenzahlen und interessante Forschungsprojekte geben Anlass dazu, eine insgesamt positive Rückschau auf die erreichten Ergebnisse zu halten, die wir auf den Elan unserer Mitarbeiter und Studenten zurückführen.

Die weitgehend ausgebliebene Unterstützung von verantwortlicher Stelle, um die enorme Lehrlast von ca. 250% zu schultern, hat leider dazu geführt, dass der Lehrstuhl die Unterstützung von Lehrfächern im Grundstudium zurückfahren musste. Das betrifft insbesondere Übungen und Praktika mit großen Teilnehmerzahlen. Andererseits wurde die Übungsbetreuung in den Fächern Elektroenergie-technik und Elektrische Maschinen intensiviert, was zu einer signifikanten Verbesserung der Prüfungsergebnisse beigetragen hat.

Eine wissenschaftlich positive Bilanz kann nun auch in Form von eingereichten Dissertationen zum BMBF-Wachstums-kern AUTOTRAM (Querkühlung) und zur industriena-hen Forschung im Elektromaschinenbau (Kombinationswicklungen) gezogen werden, die demnächst verteidigt werden. Der zweite BMBF-Wachstums-kern LEAN-TEC konnte nach einer Verlängerung mit einem lauffähigen Prototypen abgeschlossen werden und liefert somit eine Technologiebasis für weitere industrienahe Forschung.

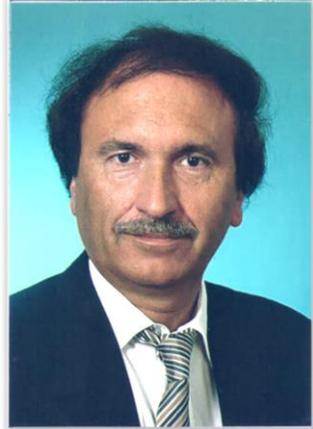
Im Rahmen des DresdenConcept engagiert sich der Lehrstuhl im Cluster Speichertechnologien, in dessen Rahmen in der internationalen Sommerschule die Schwungradspeichertechnik eingebracht wurde. Zahlreiche Grundlagenprojekte, gefördert durch die DFG, wurden in diesem Jahr fortgesetzt bzw. neu beantragt, sodass der Vorlauf zu industriena-hen Forschung weiter gestärkt werden kann.

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

Ihr



Wilfried Hofmann





## 2 LEHRAUFGABEN

### 2.1 Lehraufgaben im Grund- und Hauptstudium

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

Elektrische Maschinen 1

Pflichtfach für Elektroenergietechnik (EET), Wirtschaftsingenieure, Regenerative Energiesysteme (3/1/1), WS

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

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; Vollpolläufer-Synchronmaschinen; Schenkelläufer-Synchronmaschine; Spezielle Synchronmaschinen; Grundlagen der Gleichstrommaschinen; Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine; Linearmotoren und Sonderbauformen; Wachstumsgesetze und Maschinenausnutzung; Maschinenprüfung.

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

Elektrische Antriebe

Pflichtfach für Elektroenergietechnik, Wirtschaftsingenieure (3/1/1), SS

Wahlpflichtfach Mechatronik, Regenerative Energiesysteme (2/1/0), SS

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 für Elektroenergietechnik, Regenerative Energiesysteme

Einführung in das Theoriegebäude; Dynamisches Verhalten der Gleichstrommaschine; Dynamisches Verhalten von Wicklungsanordnungen; Kraft- und Drehmomentbil-

dung 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 (2/0/1), WS

Wahlpflichtfach für Regenerative Energiesysteme, Elektroenergietechnik

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; Modellierung eines Solargenerators; Regelung eines Solargenerators; Netzregelung; FACTS.

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

Entwurf und Berechnung elektrischer Maschinen (2/1/0), SS

Wahlpflichtfach für Elektroenergietechnik, Regenerative Energiesysteme,

Wicklungen elektrischer Maschinen; Wicklungsentwurf; Wicklungsaufbau und –herstellung; Magnetischer Kreis; Magnetkreis mit Permanentmagneten; Magnetkreisentwurf; Stromwindung; Berechnung von Induktivitäten und Reaktanzen; Verluste elektrischer Maschinen; Erwärmung und Kühlung, Kräfte und Drehmomente; Prinzipieller Entwurfsgang; Optimierung; Entwurf einer Asynchronmaschine; Entwurf einer Synchronmaschine.

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

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

Wahlpflichtfach Elektroenergietechnik (EET), Mechatronik (MT)

Direktantriebe : Einleitung; Torquemotoren; Hochgeschwindigkeitsantriebe; Linearantriebe; Anwendungen.

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 (2/0/0), WS

Wahlpflichtfach Elektrotechnik/Elektroenergietechnik, Mechatronik

Traktionsantriebe: Grundlagen, Mechanik der Zugförderung. Fahrmotoren, Stromrichtertechnik, Regelung von Fahrmotor und Netzstromrichter, Bahntechnische Regelkreise, Übung

Fahrzeugantriebe: Hybrid-/Elektroantriebsstrukturen, Antriebsanforderungen, Fahrmotoren, Stromversorgung, Stromrichter, Antriebsregelung, Praktikum

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

Schaltungstechnik (2/1/0), SS

Pflichtfach für Mechatronik und Regenerative Energiesysteme

Bauelementmodelle und Verstärker, Analoge Grundschaltungen mit Bipolar- und Feldeffekttransistoren; Stromquellen und Stromspiegel, Referenzquellen; Differenzverstärker; Leistungsverstärker; Operationsverstärker; Aktive Filter; Signalgeneratoren; Digitale Grundschaltungen; Kombinatorische und sequentielle Schaltungen.

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

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

Wahlpflichtfach für Mechatronik (Makromechatronik) und Elektroenergietechnik

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.

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

Automatisierte Antriebe (2/1/2), SS

Wahlpflichtfach für Mechatronik (MT) und Elektroenergietechnik (EET), Wirtschaftsingenieure

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

Automatisierte Drehstromantriebe: Umrichterspeisung frequenzgesteuerter Antriebe; Pulssteuerverfahren zur Umrichterspeisung; Steuerverfahren für umrichtergespeiste Asynchronantriebe; Dynamisches Verhalten von Asynchronantrieben; Feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine; Dynamisches Verhalten von Synchronantrieben; Steuerung und Regelung umrichtergespeister 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. Bernet/ Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann*

Elektroenergie-technik (3/1/1), WS

Pflichtfach Elektrotechnik, Mechatronik Regenerative Energiesysteme

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. G.-H. Geitner*

Leistungsflussorientierte Modellbildung (1/1/0), WS

Wahlpflichtfach für Makromechanik, Elektroenergie-technik, Regenerative Energiesysteme

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 Umlaufrädergetriebe, 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 für Mechatronik, Wahlpflichtfach für Studienrichtung Automatisierungs-, Mess- und Regeltechnik

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 für Makromechanik, Elektroenergie-technik, Regenerative Energiesysteme

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*

Antriebssysteme (2/1/0), WS

Beschreibungsmöglichkeiten für Bewegungsabläufe, Dimensionierung des elektrischen Aktors, steuerbare Motorspeisequellen, der Motor als dynamisches Übertragungsglied, kontinuierliche, quasi-kontinuierliche und diskontinuierliche Regelung elektrischer Antriebe, Einführung in Bondgraphen.

*Dr.-Ing. N. Hildebrand*

Transformatoren (2/0/0), WS

Modul „Vertiefung Elektrische Maschinen“ Studienrichtung Elektroenergie-technik

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, Wicklungsauslegung, Isolierungsgestaltung; Begriffe, Prinzipien, Materialien; Auslegung der Schenkelpresselemente, Kesselgestaltung; Sensoren zur Überwachung des Öls, Monitoring, EMV; Sensoren am Transformator.

## **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

*Dr.-Ing. N. Hildebrand*

- Elektrotechnisches Praktikum (0/0/2), WS und SS  
Lehrexport für Fakultät Maschinenwesen

## 2.3 Abgeschlossene Diplom- und Studienarbeiten

### Diplomarbeiten

**Fabian Probst** / Betreuer: Dipl.-Ing. F. Bahr

*„Positionssensorlose, flussbasierte Regelung eines aktiven Magnetlagers.“*

**Helda Agustina** / Betreuer: M. Sc. R. Suryana

*„Wirkungsgradoptimaler Betrieb von Windkraftanlagen mit doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren (DGAG).“*

**Yunchao Mo** / Betreuer: Dipl.-Ing. Th. Windisch

*„Parameterbestimmung an einer permanenterregten Synchronmaschine mit Reluktanzeffekt.“*

**Sebastian Dörnbach** / Betreuer: Dipl.-Ing. J. Schützhold

*„Projektionierung und Betrieb energieeffizienter Ventilationsanlagen.“*

**Frank Bernhard** / Betreuer: Dipl.-Ing. K. Benath

*„Experimentelle Untersuchung der Energieeffizienz eines Servoantriebes mit stufenlos variabler Getriebeübersetzung.“*

**Tao Xu** / Betreuer: M. Sc. R. Suryana

*„Experimentelle Untersuchungen zur Regelung von Netzspannung und Netzfrequenz mit doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren.“*

**Chris Evers** / Betreuer: Dipl.-Ing. J. Schützhold

*„Steigerung der Energieeffizienz von elektrischen Servoantriebssystemen.“*

**Roman Pärschke** / Betreuer: Dipl.-Ing. J. Jung

*„Steigerung der Drehmomentdichte einer permanenterregten Axialflussmaschine durch einseitige Segmentierung der Statorelemente.“*

**Shixuan Ai** / Betreuer: Dipl.-Ing. Y. Zhang

*„Feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine bei hoher Drehmomentdynamik und dynamischer Stromverdrängung.“*

**Krauter Nico** / Betreuer: Dipl.-Ing. F. Bahr

*„Alternative Treiberkonzepte für SiC-Bipolartransistoren“*

**Robert Seifert** / Betreuer: Dipl.-Ing. J. Jung

*„Untersuchung der Eisenkreiszeitkonstante eines axialen Magnetlagers.“*

## Studienarbeiten

**Frank Bernhardt** / Betreuer: Dipl.-Ing. K. Benath

*„Optimale Bewegungssteuerung von Servoantrieben unter Berücksichtigung last- und drehzahlabhängiger Verluste in Motor und Getriebe.“*

**Maximilian Frydetzki** / Betreuer: Dipl.-Ing. J. Jung

*„Auslegung und Inbetriebnahme eines Tretlager-Drehmomentsensors für ein Pedelec.“*

**Christoph Gerber** / Betreuer: Dipl.-Ing. D. Wöhner

*„Aufbau und Inbetriebnahme einer mehrkanaligen Verstärkeranordnung für Schlingstrommessung.“*

**Mohammad Mehdi Pasanja** / Betreuer: Dr.-Ing. N. Hildebrand

*„Praktikumsversuch "Drehstromtransformator.““*

**Qingchen Cao** / Betreuer: Y. Zhang

*„Direkte Drehmomentregelung der Asynchronmaschine bei hoher Drehmomentdynamik und dynamischer Stromverdrängung.“*

**Max Bethke** / Betreuer: Dipl.-Ing. Y. Zhang

*„Parameteridentifikation der Asynchronmaschine.“*

**Dominique Suchert** / Betreuer: Dipl.-Ing. E. Fleischer

*„Entwurf einer Zustandsregelung für ein dreipoliges Kombilager.“*

**Mario Heinrich** / Betreuer: Dipl.-Ing. N. Remus und Dipl.-Ing. St. Ulbrich

*„Numerische Analyse der durch Umrichterspeisung verursachten zusätzliche Verluste in einer permanenterregten Synchronmaschine.“*

**Paul Piskun** / Betreuer: Dipl.-Ing. F. Rürger

*„Entwurf einer innovativen permanenterregten Synchronmaschine in Außenläuferausführung.“*

**Christopher Kunze** / Betreuer: Dipl.-Ing. H. Barth

*„Analyse der Ansteuerung von einer SiC-BJT-Halbbrücke.“*

**Leif Pinnecke** / Betreuer: Dipl.-Ing. St. Tenner

*„Programmierung einer kontaktlosen RS-485-Schnittstelle für einen rotierenden aktiven Gleichrichter in Turbogeneratoren.“*

## 2.4 Exkursionen

Folgende Exkursionen wurden den Studenten angeboten:

- VEM Sachsenwerk GmbH, Dresden; 11.01.2014
- WITTUR Electric Drives GmbH, Dresden; 25.01.2014
- Transformatorenwerk der Siemens AG, Dresden; 28.11.14



## 3 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

### 3.1 Veröffentlichungen

- [1] H. Barth, W. Hofmann: Decrease of SiC-BJT driver losses by one-step commutation, Int. Power Electronics Conference, IPEC-2014 - ECCE-ASIA, Hiroshima, pp. 2881 - 2886, 2014.
- [2] H. Barth, W. Hofmann: Efficiency increase of SiC-BJT inverter by driver loss reduction with one-step commutation, IEEE 26th. Int. Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD 2014) , Hawaii, pp. 233 - 236, 2014.
- [3] K. Benath, J. Schützhold, W. Hofmann: Advanced design rules for the energy optimal motor-gearbox combination in servo drive systems, Int. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM 2014, Ischia, pp. 94 - 99, 2014.
- [4] N.v. Binh, W. Hofmann: Low Voltage Ride-Through Control of Doubly-Fed Induction Generator at Synchronism, International Conference on Electrical Machines – ICEM 2014, Berlin, pp. 797-803, 2014.
- [5] D. Ernst, M. Melzer, D. Makarov, F. Bahr, W. Hofmann, O. Schmidt, T. Zerna: Packaging Technologies for (Ultra-)Thin Sensor Applications in Active Magnetic Bearings, IEEE 37th International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE 2014, Dresden, Germany, 2014.
- [6] E. Fleischer, W. Hofmann: Linear and Nonlinear Control of a Three Pole Combined Active Magnetic Bearing - a Comparison, 14th International Symposium on Magnetic Bearings, pp. 13-18, 2014.
- [7] G.-H. Geitner, G. Kömürköz: Power Flow Modelling Based Electric Drive Control Optimization, 11th ELECTRIMACS - International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems, pp. 622-627, Valencia, Spain, 2014.
- [8] S. Günther, S. Ulbrich, W. Hofmann: Efficient Driving Cycle-Based Design Optimization of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drives for Electric Vehicle Application, Int. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM 2014, Ischia, pp. 25 - 30, 2014.
- [9] W. Hofmann: Kapitel V. Elektrotechnik: in DUBBEL – Taschenbuch für den Maschinenbau, 24. Auflage, Springer 2014 74 Seiten
- [10] A. T. H. Houenouvo, W. Hofmann: Diagnostic of the transmission properties of slip ring system in doubly fed induction generators, 60th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, New Orleans, USA 12- 15 October, pp. 29 - 35, 2014.
- [11] J. Jung, S. Ulbrich, W. Hofmann: Design Process of a High Torque Density Direct Drive Involving a Transverse Flux Machine, IEEE International Conference on Electrical Machines – ICEM 2014, Berlin, pp. 1096 - 1102, 2014

- [12] S. Liu, A. F. Cupertino, S. R. Silva: Origem dos Harmônicos e Inter-harmônicos no Gerador de Indução Duplamente Alimentado, V SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, 2014.
- [13] C. D. Nguyen, W. Hofmann: Self-Tuning Adaptive Copper-Losses Minimization Control of Externally Excited Synchronous Motors, International Conference on Electrical Machines – ICEM 2014, Berlin, pp. 891-896, 2014.
- [14] F. Rüger, H.-D. Eberhardt, W. Hofmann, K. Milthaler: Energieeffiziente elektrische Antriebe mit permanenterregten Synchron-Außenläufermotoren für den Aufzugsbau, Lift-Report 3/ 2014, VFZ Verlag, Dortmund, S.4 - 13, 2014.
- [15] J. Schützhold, K. Benath, V. Müller, W. Hofmann: Design criteria for energy efficient belt conveyor drives, Int. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM 2014, Ischia, pp. 1256 - 1263, 2014.
- [16] J. Schützhold, W. Hofmann: Auswahlkriterien für eine energieeffiziente elektrische Antriebstechnik, SPS IPC Drives 2014 Kongressband, 10 Seiten, 2014.
- [17] J. Schützhold, K. Benath, W. Hofmann: Auswahl energieeffizienter elektrischer Antriebe am Beispiel Förderanlagen. In: Antriebstechnik 53 (2014), Nr. 03, Vereinigte Fachverlage Mainz, S. 28-38
- [18] S. Tenner, A. Brix, W. Hofmann: Energy optimal pulse pattern for Z-source inverter to increase the efficiency of electric drive systems in automotive applications, EPE'14-ECCE Europe, Lappeenranta, pp. 1-10, 2014.
- [19] T. Windisch, W. Hofmann: Automatic MTPA Tracking using Online Simplex Algorithm for IPMSM Drives in Vehicle Applications, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Coimbra, Portugal, 2014.

## 3.2 Vorträge und Berichte

### Vorträge ohne Publikation

#### W. Hofmann

*Die Zukunft der elektrischen Antriebstechnik liegt auch in der Leistungselektronik.*  
Praxisforum Antriebstechnik 2014, Würzburg 19.02.2014

*Moderne Generatorsysteme für Windenergieanlagen.*

Wiss. Kolloquium des VDE, VDI, Sächs. Akad. d. Wiss, TU Ilmenau, 07.07.2014

*Auswahlkriterien für energieeffiziente elektrische Antriebe*

13. Technischer Tag der VEM, Wernigerode, 30.09.2014

*Rotierender Aktiver Gleichrichter für Turbogeneratoren (RAG)*

Auftaktveranstaltung zur Förderbekanntmachung LES2, Bonn, 16.09.2014

*Electrical components of flywheel energy storages for stationary applications.*

Sommerschule Speichertechnologien, TU Dresden, 25.09.2014

#### K. Benath

*Auswahlkriterien für energieeffiziente elektrische Servoantriebe (FVA 673 II), FVA-Informationstagung 2./3.12.2014, Würzburg*

### Forschungsvorträge

17.01.2014

---

Dipl.-Ing. Th. Windisch

*„Online-optimaler Betrieb von permanenterregten Synchronmaschinen mit Reluktanzmoment.“*

Dipl.-Ing. (FH) M. Hohmuth

*„Forschungsvortrag: Auslegung der Leistungselektronik eines MOSFET Stromrichters für PMSM.“*

28. März 2014

---

M. Sc. R. Suryana

*„Beitrag von Windkraftanlagen zur Frequenzstabilität an den Regelzonen von TenneT und 50 Hertz.“*

Dipl.-Ing. D. Wöhner

*„Auslegungsberechnung von Schenkelpolsynchronmaschinen mit Massivpolen - Asynchroner Hochlauf.“*

4. April 2014

---

Dipl.-Ing. F. Klenke

*„Optimale Steuerung überlagerter Achssysteme.“*

11. April 2014

---

Dipl.-Ing. E. Jenßen

*„Implementierung einer Regelung mit PWM für geschaltete Reluktanzmaschinen auf einer FPGA-Steuerung.“*

25. April 2014

---

Dipl.-Ing. K. Benath

*„Auswahlkriterien für energieeffiziente elektrische Servoantriebe“*

Dipl.-Ing. J. Schützhold

*„Auswahlmethodik für energieeffiziente quasistationäre elektrische Antriebssysteme“*

15. Mai 2014

---

Dipl.-Ing. F. Rüger

*„Entwurf von Außenläufermotoren für Aufzüge.“*

27. Juni 2014

---

Dipl.-Ing. Stefan Staudt,

*„Optimaler Betrieb eines Synchron-Reluktanzmaschine als Traktionsantrieb.“*

8. August 2014

---

Dipl.-Ing. E. Fleischer

*„Lineare und nichtlineare Regelung eines dreipoligen Kombilagere - ein Vergleich.“*

19. September 2014

---

Dipl.-Ing. (FH) M. Eckart

*„Modellierung einer kleinen Windenergieanlage zur Herleitung wesentlicher Betriebsparameter“*

26. September 2014

---

Dipl.-Ing. M. Leubner

*„Drehmomentaufteilung in einem Lasten-S-Pedelec mit zwei separaten Elektromotoren“*

10. Oktober 2014

---

Dipl.-Ing. G. Steinborn

*„Strömung und Kühlung in einer Transversalfluss-Reluktanzmaschine.“*

7. November 2014

---

Dipl.-Ing. J. Döring

*„Vergleich von Methoden zur Magnetkreisauslegung einer Transversalfluss-reluktanzmaschine“*

14. November 2014

---

Dipl.-Ing. S. Ulbrich

*„Vergleich von Synchron- und Verniermaschinen mit Oberflächenmagneten“*

## Doktorandenseminar – 09.09.-14.09.2014

Alterode das "Tor zum Harz" – der diesjährige Treffpunkt für unser Doktorandenseminar. Gemeinsam mit der TU Darmstadt wird hier einer Vielzahl von Doktoranden und Mitarbeitern die Möglichkeit zu geben, sich in Form von Vorträgen und Diskussionsrunden weiterzubilden.

Zwischen den Bundesstraßen B 242 und B 180 erstreckt sich ein Landschafts- und Naturschutzgebiet von eigenwilliger Schönheit. Durchzogen von zahlreichen kleinen Bächen und Flüssen, die im Ostharz entspringen, sind in diesem östlichen Harzgebiet im Laufe der Zeit reizvolle Täler entstanden. In dieser charakteristischen Landschaft des Ostharzes und Vorharzgebietes zeugen heute noch zahlreiche Denkmale, wie Burgen, Schlösser und Mühlen, von einer bedeutenden historischen Vergangenheit.

Die heutige Gemeinde Alterode liegt am östlichen Harzrand, im Landschaftsschutzgebiet Einetal und gehört zu den ältesten "Rode"-Siedlungen. Das Dorf liegt im Schnittpunkt des Eine- und des Schwennecketales umgeben von Feldern, Wiesen und Wäldern. Durch Alterode fließt die Eine, ein kleines Flüsschen, das südlich von Harzgerode entspringt. Sie schlängelt sich durch ein reizvolles Tal und mündet nach ca. 38 km hinter Aschersleben bei Großschieferstedt in die Wipper. Folgt man dem Wanderweg vom Quellgebiet der Eine bis nach Aschersleben, so lernt man die Orte Schielo, Abberode, Stangerode, Alterode, Harkerode, Welbsleben und Westdorf kennen.

Quelle: [www.alterode-harz.de](http://www.alterode-harz.de)



## *Vorträge TU Darmstadt*

---

- An, Jeonki:  
Doppel-E Antrieb,
- Schuster, Martin:  
Calculation and validation of a bearing impedance model for ball bearings and the influence on EDM-currents
- Reis, Kersten:  
Development of a permanent magnet outer rotor direct drive for use in wheel-hub drives.
- Deunsinger, Björn:  
Bestimmung des Wirkungsgrads von permanentmagneterregten Synchronmaschinen im Einzelverlustverfahren
- Mink, Fabian:  
Servoreglerfunktionen für Hydraulikpumpen-Anwendungen.
- Wang, Jinou:  
Least squares slope calculation considered as a FIR low pass filter.
- Messenger, Gael:  
Double star winding for highspeed bearingless PMSM
- Lehr, Marcel:  
Aufbau und Funktionsprinzip einer Flux-Switching-Maschine.
- Gemeinder, Yves:  
Schmierstoffeinfluss auf EDM-Lagerströme.
- Li, Ciang:  
Size Determination of Flywheel Energy Storage System in Residential Photovoltaic Systems.

## *Vorträge TU Dresden*

---

- Döring, Jan:  
Grenzen bei der Auslegung einer Transversalfluss-Reluktanzmaschine mit Scheibenläufer.
- Bahr, Falk:  
Positionsensorloses Magnetlager mit integrierter Flusssichtesensorik.
- Fleischer, Erik:  
Regelung eines dreipoligen Kombilagere mit exakter Linearisierung.
- Günther, Stephan:  
Untersuchungen zur Auslegung von synchronen Reluktanzmaschinen (SynRM)
- Brix, Arne:  
Dualflussmaschine mit modularem Aufbau für elektrische Fahrtriebe – eine Projektidee.
- Eckart, Martin:  
Berechnung der Helikopterregelung einer Kleinwindenergieanlage.

- Miersch, Sören:  
Berechnung des Luftspaltwärmewiderstandes von Außenläufermaschinen mittlerer Baugröße.
- Jung, Jacob:  
Permanentterregte Axialflussmaschine mit konzentrierter Wicklung um das Statorjoch.
- Barth, Henry:  
Erhöhung des Wirkungsgrades eines Wechselrichters mit SiC-Bipolartransistoren durch Einschritt-Kommutierung.
- Ulbrich, Stefan:  
Maximierung der Drehmomentausbeute bei permanenterrregten Vernier Maschinen.
- Schützhold, Jörg:  
Auswahlkriterien für energieeffiziente elektrische Förderantriebe.
- Remus, Nico:  
Regelung des Direkten Matrixumrichters mit Eingangsseitigem AC-Chopper.
- Nguyen, Van Binh:  
Verhalten des doppeltespeisten Asynchrongenerators im Synchronbetrieb unter Netzspannungseinbruch.
- Suryana, Rahmat:  
Energieoptimaler Betrieb von Windkraftanlagen mit doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren unter Smart-Grid Anforderungen.
- Benath, Kenneth:  
Auswahlkriterien für energieeffiziente Servoantriebe.
- Liu, Silas:  
Harmonic Analysis in Doubly Fed Induction Generators.
- Arias, Arturo:  
Analyse von pulswertenmodulierten Signalen mittels erzeugender Funktionen.
- Zhang, Yuanpeng:  
Regelung von Asynchronantrieben bei hoher Drehmomentdynamik und transients Stromverdrängung.
- Nguyen, Chi Dung:  
Modellbasierte Minimierung der Verluste eines permanentmagneterregten Synchronmotors.

### 3.3 Patente

"Turbo-Generator-Einheit". DE 10 2011 000 420 A1, AT: 30.01.2011, Anm.: TU Dresden, Erf.: Gampe, U.; Hofmann, W.; Hildebrand, N.; Buchheim, G. und Bernet, St.

"Anordnung zur Kühlung einer elektrischen Maschine". DE 10 2013 104 117 A1, AT: 24.04.2013, Anm.: TU Dresden, Erf.: Hofmann, W.; Hildebrand, N.; Steinborn, G.; Döring, J.; Jenßen, E.; Eberhardt, H.-D. und Stentzel, Ch.

„Schutzschaltung für eine Stromgeneratoranordnung“. DE 10 2014 107 043.7, AT.: 19.05.2014, Anm.: TU Dresden, Prof. Hofmann; Erf.: Remus

„Use of flexible magnetic thin layer sensor elements“. US Patent 20,140,347,046, 2014, Anm.: IFW Dresden, TU Dresden, Inv.: F. Bahr, H. Barth, W. Hofmann, D. Makarov, M. Melzer

### 3.4 Ehrungen, Preise

*Franz Stolze-Preis 2013* für herausragende wissenschaftliche Abschlussarbeiten auf dem Gebiet der Energietechnik

---

Dipl.-Ing. Fanny Fischer

„Entwurf eines permanenterregten Läufers für eine Axialflussmaschine.“

*Franz Stolze-Preis 2014* für herausragende wissenschaftliche Abschlussarbeiten auf dem Gebiet der Energietechnik

---

Dipl.-Ing. Stefan Ulbrich

„Optimale Auslegung von synchronen Fahrmotoren mit vergrabenen Magneten unter besonderer Berücksichtigung der Schnittstelle Umrichter-Motor.“

2014 Paul and Dee-Dee Slade Young Investigator Award

---

Dipl.-Ing. Hermann A.T. Houenouvo

„Diagnostic of the transmission properties of slip ring system in doubly fed induction generators“ 60th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts

## 3.5 Kooperation

### 3.5.1 Forschung und Lehre

#### IAESTE – Praktikanten

Marion Mumbi Karanja / Kenya / Betreuer: M. Leubner

*„Development of a customized control board for a PMSM with voltage dc-link inverter and incremental encoder interface“*

Kutub Uddin – Bangladesh / Betreuer: A. Brix

*„Comparative Study to Soft-Switching, Bidirectional Power Supplies for Industrial Applications“*

Shasank Sinh – India / Betreuer: J. Schützhold

*„Programming Engineering-Tool“*

Jelena Stojkovic – Serbien / Betreuer: R. Suryana

*„Optimum operation of wind turbine with doubly fed induction generator“*

Pablo Mendiáldua Pinedo / Spanien/ Betreuer: R. Suryana

*„Simulation of wind power generator in Matlab/Simulink“*

Olena Zalytko – Ukraine / Betreuer: H. Barth

*Simulation of SiC-BJT inverter behavior*

Jan Rehacek – Czech Republik / Betreuer: N. Remus

*„Automatic calculation of d- and q-componenets for a PMSM with surface magnets“*

Rida Abboud – Libanon / Betreuer: F. Rüger

*„Performance Characteristic of Induction Motors“*

Karun Arjun Potty / Indien/Betreuer: V. B. Nguyen

*„Grid frequency and voltage control of doubly-fed induction generator based wind turbine“*

Nursultan Ormov Kasachstan / Betreuer: A. Arias

*„PCB Design for Output Filter“*

### ***3.5.2 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 Sekretär der Technikwissenschaftlichen Klasse
- Member of Editorial Board of European Transaction on Electrical Power (ETEP) Wiley & Sons
- Member of Editorial Board of Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik), Springer Verlag
  
- VDE: Mitglied des ETG-Fachbereiches A1: Elektrische Maschinen und Antriebe; Mechatronik; Mitglied ETG-Fachausschusses A1-1: Elektrische Antriebe in Kraftfahrzeugen; Mitglied im AK19 Elektrische Maschinen und Antriebe; Mitglied im ETG-Fachbereich Q1: Leistungselektronik; Mitglied der Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik
- VDI
- EPE-Association, International Steering Committee
- IEEE: Senior Member; Industry Application Society; Power Electronics Society; Industrial Electronics Society; Reviewer IEEE Transaction on Industrial Electronics/Mechatronics
- Sondergutachter DFG, VW-Stiftung.

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

---

- Reviewer IEEE Industrial Electronics Society Conference
- Reviewer IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference.

#### ***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".

#### ***Prof. Dr.-Ing. Heinz-Dieter Eberhardt***

---

- VDE  
VDE-Arbeitskreis 19 „Elektrische Maschinen“.

## 4 FORSCHUNG

### 4.1 Forschungsprofil

Das Forschungsprofil des Lehrstuhles Elektrische Maschinen und Antriebe ist geprägt durch folgende Forschungsgebiete und -bereiche:

- Grundlagen, Methodik und Werkzeug für Modellierung und Simulation,
- Kühlung elektrischer Maschinen,
- Industrieelektronik für Antriebsstromrichter
- Magnetlager und Mechatronik,
- Generatoren, Stromrichter und Regelung für Wind- und Wasserkraft,
- Fahrmotoren, Stromrichter und Regelung für Hybrid- und Elektroauto,

### 4.2 Forschungsprojekte

#### *DFG-Projekte*

---

1. Energieoptimale Drehstromsteuerung und Auslegung von hochdynamischen Asynchronantrieben unter besonderer Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung  
DFG – HO 1483/60-2, 2014 – 2016
2. Maschinenwicklungen in Kombinationsschaltung  
DFG-HO 1483/71-1, 2014 - 2016
3. Generalized Space Vector Modulation for Impedance Source Inverters Applied to Fuel-Cell-Based Isolated Electric Power Generation  
DFG - HO 1483/53-2, 2014 - 2016
4. Energieoptimaler Beschleunigungsantrieb und Downsizing-Schleifen.  
DFG HO 1483/57-2, 2014 - 2015
5. Diagnose von Mikrobürstenfeuer bei Reibkontaktierung von Graphit/Graphit-Bürsten/Schleifringssystemen.  
DFG HO 1483/54-2, 2013 - 2014
6. Verlustarme magnetische Radial-/Axiallagerung unter Verwendung von Pulververbundwerkstoffen.  
DFG HO 1483/55-1, 2, 2009 - 2015
7. Verlustarmer Umrichter mit SiC-Bipolartransistoren durch angepasstes Treiberdesign und Schätzung des Laststromverlaufes.  
DFG HO 1483/62-1, 2012-2014
8. Energieoptimale Bewegungssteuerung von Wickel- und Stellantrieben mit variabler Getriebeübersetzung  
DFG-HO 1483/63-1, 2012-2015

9. Prüfstand für elektrische Maschinen und Antriebe mit Schwerpunkten Energieeffizienz und Elektromobilität  
DFG INST 269/556-1 FUGG, 2013
10. Hochausgenutzte Synchrone Reluktanzmotoren durch lokale Beeinflussung magnetischer Eigenschaften des Elektroblechs  
DFG HO 1483/70, 2013-2015
11. Aktive Dämpfung filterbedingter eingangsseitiger Oberschwingungen an Matrixumrichtern als Antriebsumrichter für direkte und PWM-basierte Regelverfahren  
DFG HO 1483/59-2, 2013-2015
12. On-Line Verfahren zur energieeffizienten Betriebsweise von hochausgenutzten elektrischen Antrieben  
DFG HO 1483/67-1, 2013-2015
13. Aktive verlustarme Magnetlager hoher Steifigkeit zur Präzision mit integrierter Induktionsmessung und schneller Leistungselektronik  
DFG HO 1483/64-1, 2013 - 2015

### *Industrieprojekte*

---

1. Energieeffiziente elektrische Antriebe mit Außenläufermotoren für den Aufzugsbau  
2012 - 2014
2. F/E-Arbeiten zur intensiven Kühlung von Transnormmotoren  
2010 - 2016
3. Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet Wasserkraftgeneratoren.  
2003 – 2015
4. F/E-Arbeiten zum S-Pedelec Lastenrad  
2013 – 2015
5. Modellierung der Synchron-Reluktanzmaschine für ein Pumpentool  
2014

### *FVA Forschungsvereinigung Antriebstechnik*

---

Auswahlkriterien für energieeffiziente elektrische Antriebe

Auswahlkriterien für energieeffiziente elektrische Servoantriebe  
2013 - 2014

### *BMBF*

---

1. Wachstumskern LEANTEC-Antrieb - Verbundprojekt: Grundlagen und Untersuchung zu Rotor und Stator; Auslegung, Optimierung und Prüftechnik; Anwendungsspezifische Antriebsregelung und Motorerprobung.  
2011 – 2014
2. Schaufenster Elektromobilität;  
2013 – 2015

3. Elektrische und thermische Berechnung eines rotierenden dynamischen Gleichrichters.  
2013 – 2017

*BmWi*

---

SPL-S-Pedelec Lastenrad für urbanen Wirtschaftsverkehr  
2013 -2014

*AiF*

---

Energieeffiziente Verpackungsmaschinen  
2014 - 2016



### 4.3 Ausgewählte Forschungsergebnisse in Kurzform

Dipl.-Ing. Henry Barth

#### Treiberverlustreduzierung bei der Ansteuerung von SiC-Bipolartransistoren durch Einschrittkommutierung

Obwohl sich bei den Bauelementen aus Siliziumkarbid (SiC) in den letzten Jahren viel getan hat, besteht die überwiegende Mehrheit der leistungselektronischen Bauelemente weiterhin aus Silizium (Si). Der Si-IGBT ist das Bauelement der Wahl für die meisten industriellen elektrischen Antriebe. Die intensive Forschung der letzten 30 Jahre hat zu einer Perfektion der IGBT- und Freilaufdioden-Technologie geführt, so dass die Verbesserungen der IGBT-Eigenschaften, die mit jeder neuen IGBT-Generation einhergehen, immer kleiner werden. Deshalb besteht ein großes Interesse an Bauelementen aus Halbleitermaterialien mit großem Bandabstand wie SiC oder Galliumnitrid (GaN), da sie aufgrund ihrer Materialeigenschaften das Potenzial haben, die Si-IGBTs in Bezug auf ihren Wirkungsgrad bzw. die zulässige Schaltfrequenz deutlich zu übertreffen [1].

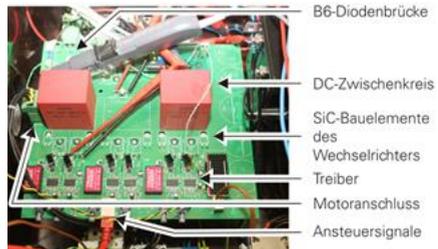


Fig. 1: Labor- SiC-Wechselrichter  
Test bench of SiC inverter

Der SiC-Bipolartransistor ist besonders für den Einsatz im Antriebsstromrichter prädestiniert, da er von allen aktiven Bauelementen aus SiC den geringsten Widerstand im eingeschalteten Zustand ( $R_{ON}$ ) und somit die geringsten Durchlassverluste hat. Auch die Schaltverluste liegen bei entsprechender Ansteuerung in der Nähe vom SiC-MOSFET. Diese Vorteile werden mit einem Nachteil erkauft. Da es sich um ein stromgesteuertes Bauteil handelt, fallen im Betrieb deutlich höhere Treiberverluste an.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten am Lehrstuhl für Elektrische Maschinen und Antriebe konnte an einem eigens dafür aufgebauten SiC-BJT-Wechselrichter (siehe Fig. 1) gezeigt werden, dass durch Anwendung der Einschrittkommutierung die Treiberverluste halbiert werden können (siehe Fig. 2) [2].

## Reduction of SiC-BJT driver losses by one-step commutation

Though, there has been enormous progress concerning semiconductor devices made of silicon carbide recently, the majority of semiconductor devices being used in power electronics is still made of silicon (Si). The device of choice for motor drive power converters is the Si-IGBT. Intense research of more than 30 years has led to a perfection of IGBT and free-wheeling diode technology. On the other hand this means that with each new IGBT generation the enhancements become smaller and smaller, too. Hence there is great interest in wide band gap semiconductor devices made of silicon carbide (SiC) or gallium nitride (GaN), since those are supposed to outperform Si-IGBTs in terms of efficiency and switching frequency because of their unique material properties [1].

The silicon carbide bipolar junction transistor (SiC-BJT) is a promising power semiconductor device for high efficient motor drive power converters.

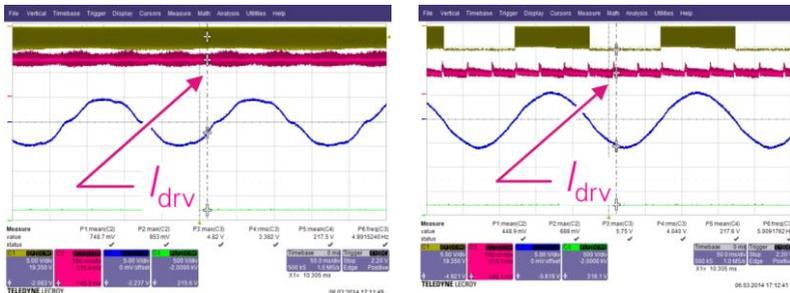


Fig. 2: Messergebnisse zur Treiberstromreduktion  
Measured results of reduced driver currents

Especially with the lowest on-state voltage drop of all SiC transistors and high switching speed, it challenges the Si-IGBT. The main disadvantage is the high driver loss in on-state compared to its voltage driven competitors, though.

At the department of Electrical Machines and Drives an inverter using SiC-BJTs and Schottky barrier diodes made of SiC has been set up (see Fig. 1). It has been shown, that by using one-step commutation instead of the conventional commutation algorithm driver losses can be cut in half (see Fig. 2) [2].

### Literatur/Literature

- [1] OSWALD, N. ET. AL. : An Experimental Investigation of the Tradeoff between Switching Losses and EMI Generation With Hard-Switched All-Si, Si-SiC, and All-SiC Device Combinations. In: *IEEE Transactions on Power Electronics*. vol. 29, 2014, pp. 2393–2407
- [2] BARTH, H. ; HOFMANN, W.: Decrease of SiC-BJT Driver Losses by One-Step Commutation. In: *International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA)* : IEEE, 2014, pp. 2881–2886

## Projektierungsregeln für energieeffiziente Servoantriebe

Es ist von hohem Interesse den Energieeinsatz mit Hilfe energieeffizienter Servoantriebe zu senken. Nicht nur weil die Energiekosten den größten Anteil an den Lebenszykluskosten (LCC) eines Servoantriebs haben, sondern auch wegen der geringeren thermischen Beanspruchung der Antriebseinheiten, so dass entweder die Produktivität gesteigert oder die Investitionskosten zugunsten kleinerer Antriebs- und Versorgungseinheiten reduziert werden können.

Neben technologischen Verbesserungen beim domänenspezifischen Entwurf einzelner Systemkomponenten, liegt ein großes Einsparpotenzial in der richtigen Projektierung des Gesamtsystems. Um jedoch von der gängigen Praxis abzuweichen, muss der Einfluss möglicher Projektierungsfreiheitsgrade auf die verschiedenen Verluste und Antriebsanforderungen quantifizierbar und transparent gemacht werden. In einem Forschungsvorhaben wurden dazu praktikable Methoden zur Berechnung der Verluste in den Antriebskomponenten entwickelt, die einerseits nur auf zugänglichen Datenblattangaben und Wachstumsbeziehungen basieren, und andererseits hinreichend genaue Ergebnisse in Abhängigkeit wechselnder Betriebs-, Drehzahl- und Drehmomentzustände liefern. Die anschließende Analyse der Projektierungsfreiheitsgrade offenbart ein z.T. sehr großes Energiesparpotenzial und führt zu grundlegenden Projektierungsregeln, die im wesentlichen im Projektierungsablauf der Fig. 1 zusammengefasst sind.

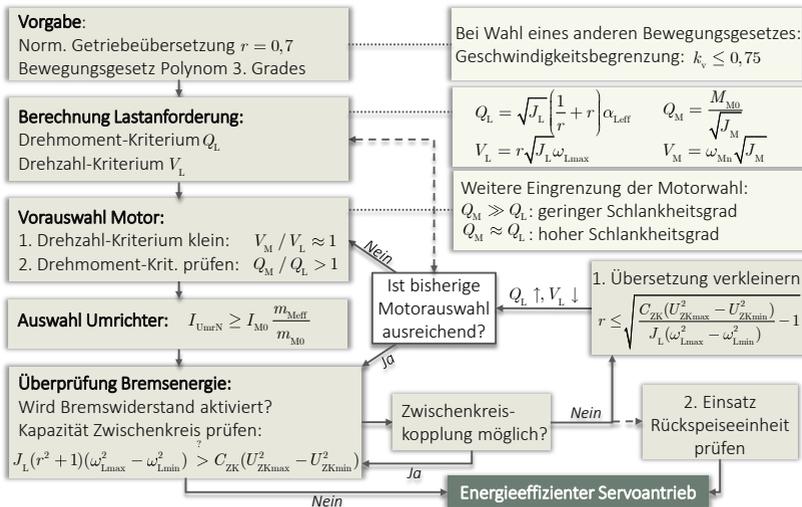


Fig. 1: Projektierungsablaufplan für einen energieeffizienten Servoantrieb

## Rules for Design of Energy Efficient Servo Drive Systems

It is of great interest to reduce the energy consumption by using energy efficient servo drives. Not only because the energy costs often have the largest share of the life cycle cost (LCC) of a servo drive, but also due to the lower thermal stress on the drive units so that either increased productivity or reduced investment costs in favor of smaller motive power units are possible.

In addition to technological improvements in the domain-specific design of single system components, a large potential for savings is in the correct design of the overall system. However, to differ from the practice as usual, the impact of any design degrees of freedom to the various losses and drive requirements must be quantifiable and transparent. Therefore, practical methods for the calculation of the losses in the drive components were part of a research project. These methods based on the one hand on accessible data sheet specifications and provide the other hand, sufficiently accurate results in dependence of varying operating, speed and torque conditions. The subsequent analysis of the degrees of freedom for servo drive design discloses a very large potential for energy savings and lead to fundamental design rules, which are summarized in much in the flowchart of Fig. 2.

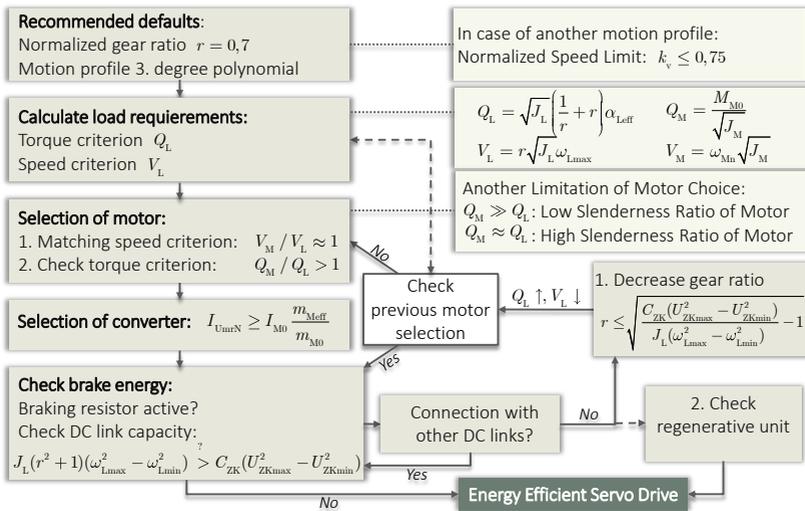


Fig.2: Flowchart for design of energy efficient servo drive systems

## Energieoptimale Pulsmuster für einen Z-Source Inverter

Der Z-Source Inverter ist ein einstufiger Wechselrichter mit Impedanzzwischenkreis (Fig.1). Durch geeignetes Kurzschließen des Zwischenkreises wird die Zwischenkreisspannung auf einen gewünschten Wert hochgesetzt [1]. Durch Verwendung der variablen Zwischenkreisspannung als Freiheitsgrad in einer energieeffizienten Regelung ist eine Reduzierung der Verlustleistung des elektrischen Fahrantriebes möglich [2]. Es ist jedoch zu beachten, dass die Kurzschlusszustände große Verlustleistungen

in den Leistungshalbleitern hervorrufen. Durch die energieoptimalen Pulsmuster erfolgt die Platzierung der Kurzschlusszustände (ST – shoot through) innerhalb eines konventionellen, symmetrischen Pulsmusters derart, dass die Verlustleistung des Z-Source Inverters minimiert wird [3]. Fig.2 zeigt

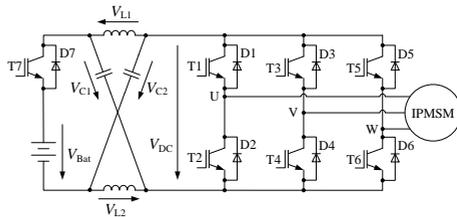


Fig. 1: Untersuchte Antriebstopologie  
Topology of the examined drive system

das konventionelle Pulsmuster und die zwei ermittelten energieoptimalen Pulsmuster eines Z-Source Inverters im hochsetzenden Betrieb. Diese Pulsmuster wurden mit Hilfe einer numerischen Optimierung der analytisch berechneten Verlustleistung des Z-Source Inverters ermittelt. Ein weiteres Ziel mobiler Anwendungen ist ein kompakter Aufbau des Antriebs mit geringem Bauraumbedarf. Hinsichtlich des Z-Source Inverters ist hier vor allem die Induktivität im Zwischenkreis zu minimieren. Diese begrenzt den Stromrippel  $\Delta I$  im Zwischenkreis. Dieser Stromrippel wird von der Platzierung der Kurzschlusszustände beeinflusst. Um diese Zielgröße in die Ermittlung geeigneter Pulsmuster einzubeziehen wurden energieoptimale Pulsmuster mit unterschiedlicher Anzahl an Kurzschlusszuständen berechnet und miteinander verglichen.

Dabei zeigte sich ein Zielkonflikt zwischen kleinem Stromrippel und der Energieeffizienz. In erster Näherung stellt das energieoptimale Pulsmuster mit zwei Kurzschlüssen je Pulsperiode (Fig.2, Mitte) eine gute Kompromisslösung dar.

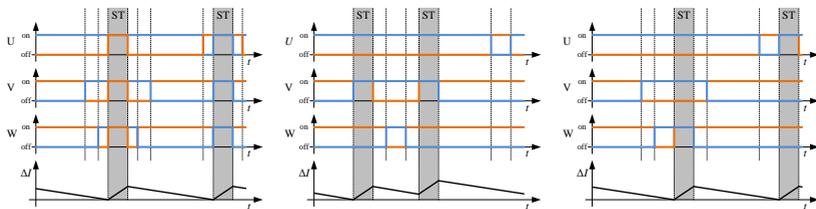


Fig. 2: Pulsmuster (Links: konventionell, Mitte: energieoptimal, Rechts: vergleichmäßigt)  
Pulse pattern (left: conventional, middle: energy optimal, right: equally spaced ST-states)

Gegenüber dem konventionellen Pulsmuster wird die Verlustleistung um 26,7 % reduziert, wobei der Stromrippel aufgrund des variierenden Abstandes zwischen den Kurzschlusszuständen um nahezu 50 % ansteigt. Durch das Pulsmuster mit äquidistanten Kurzschlüssen (Fig.2, rechts) bleibt der Stromrippel verglichen mit dem konventionellen Pulsmuster identisch. Die Verlustleistung wird um 12,7 % reduziert. Daher stellt dieses Pulsmuster den besten Kompromiss aus geringer Verlustleistung und niedrigem Stromrippel dar.

## Energy Optimal Pulse Pattern for Z-Source Inverter

In automotive applications, the Z-source inverter is a single stage inverter that provides the useful feature of boosting the DC-link voltage to a desired value independently of the battery voltage. Therefore, suitable shoot through (ST) states are inserted into the pulse pattern [1]. The advantage of an adjustable DC-link voltage can be used as a degree of freedom for a loss minimized control of electric drives [2]. However, the semiconductors experience high stress during boost operation. The energy optimal pulse pattern places the shoot through states in such a manner that the Z-source inverter losses are minimized [3]. Fig. 2 shows the conventional pulse pattern and the two proposed energy optimal pulse patterns of a Z-source inverter for the boost mode. These energy optimal pulse patterns were determined by a numerical optimization of the analytical calculated Z-source inverter losses. Another important target is the minimization of the inductor current ripple  $\Delta I$ . This current ripple is influenced by the positioning of the shoot through states. To involve this target into the search for an optimal pulse pattern, different pulse pattern with different number of shoot through states per pulse period were calculated and compared with respect to total power electronic losses and current ripple of the Z-source inverter. Thereby, a goal conflict between the two described targets was detected. As a first approximation, the energy optimal pulse pattern with two shoot through states per pulse period (Fig. 2, middle) gives a useful compromise between low losses and low current ripple. In comparison with the conventional pulse pattern the losses can be reduced by 26.7 %. However, the current ripple increases by nearly 50 %. The reason of this dramatically increase of current ripple is the variable distance between the two shoot through states. The energy optimal pulse pattern with equal spaced shoot through states (Fig. 2, right) reaches the same current ripple as the conventional pulse pattern and a reduction of the losses by 12.7 %. Thus, the presented energy optimal pulse pattern with two equally spaced shoot through states gives the best compromise between low losses and low current ripple.

### Literatur/Literature

- [1] Peng F. Z.: Z-Source inverter, IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 39 no. 2, pp. 504-510, 2003
- [2] Tenner S., Günther S., Hofmann W.: Loss Minimization of Electric Drive Systems Using a DC/DC Converter and an Optimized Battery Voltage in Automotive Applications, 7th IEEE VPPC, 2011
- [3] Tenner S., Brix A., Hofmann W.: Energy Optimal Pulse Pattern for Z-Source Inverter to Increase the Efficiency of Electric Drive Systems in Automotive Applications, 14th EPE, 2014

## Alternative Auslegungsmethoden einer Transversalfluss-Reluktanzmaschine

Im Rahmen des vom BMBF geförderten „Leantec“-Projekts wurde eine Transversalfluss-Reluktanzmaschine (TFRM) untersucht und optimiert. Der Aufbau der Maschine wird in [1] vorgestellt. Das nichtlineare Verhalten der teilweise gesättigten TFRM mit dreidimensionaler Flussführung bei nicht-sinusförmigen Speiseströmen lässt sich nicht durch einfache analytische Gleichungen berechnen. Da die Analyse mit Hilfe einer dreidimensionalen Finite-Elemente-Methode (FEM) sehr hohe Rechenzeiten erfordert (einige Stunden), wurden u.a. die Möglichkeiten der Berechnung mit magnetischen Ersatznetzwerken und mit einer modifizierten 2D-FEM untersucht.

Das Ersatznetzwerk besteht aus über 90 Elementen, welche überwiegend in den Stator- und Rotorzähnen sowie im Luftspalt angeordnet sind (s. Fig. 1). Außerdem wird die Nutstreuung und Sättigung durch ein iteratives Lösungsverfahren berücksichtigt. Das Ersatznetzwerk benötigt nur wenige Sekunden Rechenzeit, aber kann trotz eines hohen Entwicklungsaufwands nicht für stark voneinander abweichende Geometrien verwendet werden, da die Anzahl und Lage der definierten Flusspfade für bestimmte Geometrien ungeeignet ist.

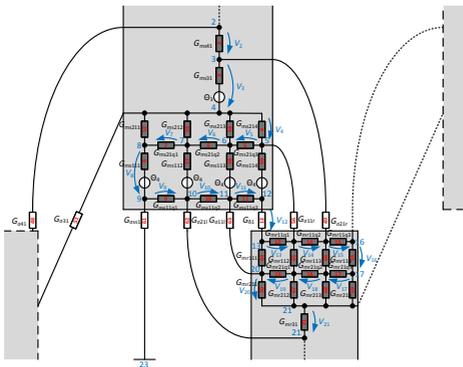


Fig. 1: Stator-Rotorausschnitt des magnetischen Ersatznetzwerks  
Section of MEC with stator and rotor teeth

Das 2D-FEM-Modell erfordert eine modifizierte Geometrie des zu untersuchenden Magnetkreises (s. Fig. 2). Die achsennahen und achsenfernen Polteilungen werden gemittelt und das Joch in eine Ebene gebogen. Das 2D-FEM-Modell benötigt ein Mehrfaches an Rechenzeit gegenüber dem Ersatznetzwerk (einige Minuten), aber ist für eine wesentlich größere Geometrievariation zulässig. Dabei weicht das berechnete Drehmoment maximal um 10 % von der 3D-FEM ab. Lediglich Geometrien mit großen Unterschieden in den Polteilungen der achsennahen und der achsenfernen Zähne lassen sich nicht ausreichend genau berechnen.

## Alternative design methods of transverse flux reluctance machines

A transverse flux reluctance machine (TFRM) was developed and optimized within the "Leantec"-project, funded by the BMBF. The motor design is shown in detail in [1].

Due to three spatial directions of the magnetic flux combined with local saturation and non-sinusoidal feed currents, this machine can't be calculated with simple analytical equations. Simulations with 3-D FEM software require a couple of hours computing time and are not useful for a fast design process. Therefore a magnetically equivalent circuit (MEC) and a 2-D FEM model were investigated.

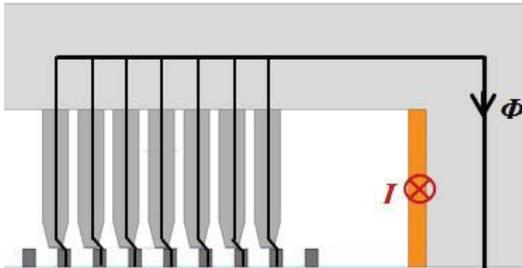


Fig. 2: 2-D FEM mit modifiziertem magnetischen Kreis  
2D-FEM model with modified magnetic circuits

The MEC consists of more than 90 elements, which are mainly located in the stator and rotor teeth and the air gap (see Fig. 1). The MEC also considers stray flux and saturation and requires only a few seconds computing time. Unfortunately the number and location of the defined flux paths doesn't fit all very different geometries.

The 2-D FEM model consists of a modified geometry. The stator yoke was bended straight and the inner and outer poles were averaged (see Fig. 2). The model takes much more computing time (several minutes) than the MEC, but it is useful for a much wider variety of different geometries. Thereby the deviation of calculated torque is maximum 10% compared to 3-D FEM results. Only geometries with large differences between the inner and outer poles can't be considered.

### Literatur/Literature

- [1] J. Doering, G. Steinborn, W. Hofmann: Torque, Power, Losses and Heat Calculation of a Transverse Flux Reluctance Machine with Soft Magnetic Composite Materials and Disc-shaped Rotor, IEEE Transactions on Industry Applications, 2015

## Lineare und nichtlineare Regelung eines dreipoligen Kombilagere im Vergleich

Als Teil des DFG-geförderten Projektes „Verlustarme magnetische Lagerung“ wurde ein neuartiges dreipoliges Kombilager entworfen und experimentell untersucht.

Die Struktur zeichnet sich durch eine minimale Windungs- und Polzahl verbunden mit einem zusätzlichen axialen Rückschluss aus. Dieser ist in Fig. 1 rechts dargestellt. Die so resultierende dreidimensionale Flussverteilung erfordert den Einsatz von Pulververbundwerkstoffen (SMC).

Es so möglich, die radialen Flüsse  $\Phi_1$  bis  $\Phi_3$  unabhängig voneinander einzustellen. Es ist somit sowohl eine lineare als auch eine nichtlineare Lageregelung des Lagers möglich. Letztere erlaubt einen Betrieb mit minimaler magnetischer Vorspannung.

Die lineare Regelungsstrategie basiert auf der Clarke-Transformation, wobei die Nullkomponente zur Vorspannung des Lagers verwendet wird. Für die nichtlineare Regelung wird hingegen eine globale Linearisierung verwendet. Dies bedeutet, dass vor die Strecke ein Glied geschaltet wird, das die Nichtlinearität der Strecke im gesamten Arbeitsbereich kompensiert.

Mit beiden Strategien ist ein stabiler Betrieb möglich. Ein Vergleich der gemessenen Frequenzgänge in Fig. 2 zeigt für beide Strategien eine Resonanzüberhöhung von maximal 8 dB und somit ein für aktive Magnetlager gut gedämpftes Verhalten bei einer ähnlichen Bandbreite von etwa 100 Hz. Die globale Linearisierung kann für die Lagerkraft sowohl die Abhängigkeit von der Lage als auch die nichtlineare Abhängigkeit vom Strom kompensieren und somit das Führungsverhalten des Lageregelkreises maßgeblich verbessern. Die gemessenen Frequenzgänge weisen experimentell nach, dass dies bis zu einer Frequenz von etwa 20 Hz tatsächlich möglich ist.

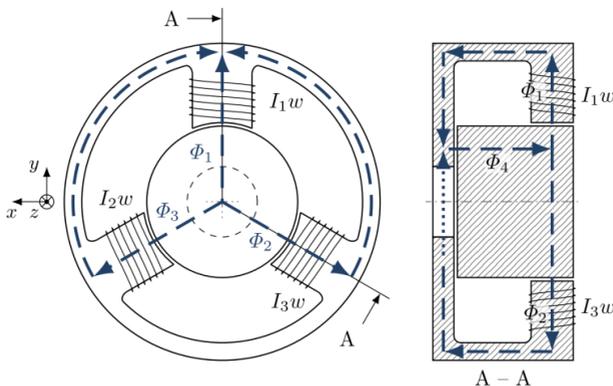


Fig.1: Vorder- und Seitenansicht des Magnetlagers  
Front and cross section view of the bearing

## Linear and Nonlinear Control of a Three Pole Combined Bearing – a Comparison

As part of the DFG funded project “Low Loss Magnetic Bearing” a novel three pole combined bearing has been designed and studied in experiments. Its structure is based around a minimal number of poles and coils and integrates an additional axial flux path, as shown in the right part of Fig. 1. This structure is made possible by the application of Soft Magnetic Composites in both stator and rotor. Each coil is driven separately therefore the flux components  $\Phi_1$  to  $\Phi_3$  can be controlled individually. This allows an operation of the bearing with both linear and nonlinear control strategies with the latter allowing an operation with minimal bias flux and thus with minimal losses in the bearing. The linear control scheme is based on the Clarke transformation. The zero component is used for setting the bias magnetization. For the nonlinear schemes a feedback linearization is applied, which means there is an additional block in front of the plant compensating the nonlinearities across the entire operation range. Both control schemes employ a PID controller with similar controller parameters. Stable operation of the magnetic suspension has been achieved with both schemes. The measured closed loop frequency responses in Fig. 2 show a maximum of 8 dB and therefore a good damping behavior in both cases. Both control schemes result in a similar bandwidth around 100 Hz with a slightly higher one for the linear scheme. The feedback linearization compensates both the nonlinearity of the plant and the position dependence of the magnetic forces in the low frequency range. This results in a much better tracking behavior up to 20 Hz as can be seen in the frequency responses in Fig. 2.

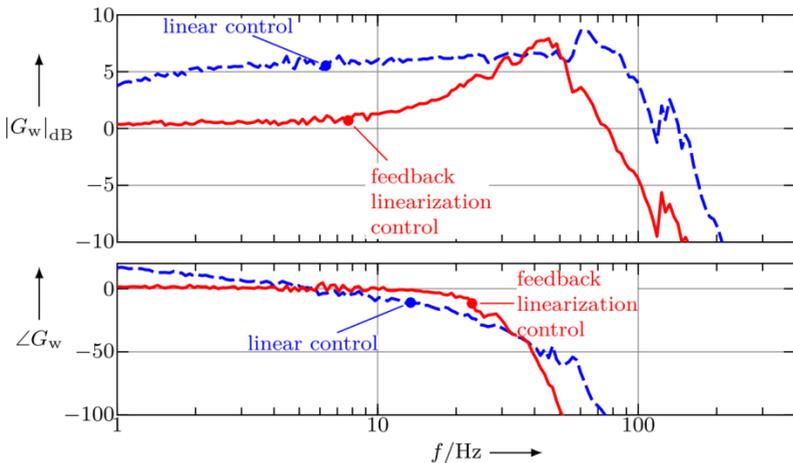


Fig.2: Gemessene Frequenzgänge bei geschlossenem Regelkreis  
Measured closed loop frequency responses

## Auswahlkriterien für eine energieeffiziente elektrische Antriebstechnik

Die Lebenszykluskosten von Antriebssystemen werden durch die Energiekosten dominiert. Eine kostenminimale Anlage erfordert daher stets eine gesteigerte Energieeffizienz. Um das vorhandene Energiesparpotenzial auszuschöpfen, wurden in diesem Forschungsvorhaben Methoden erarbeitet, die Antriebssysteme unter besonderer Berücksichtigung des bedienten Prozesses energieeffizient auszulegen. Beispielanwendungen sind dabei Pumpen- und Förderantriebssysteme. Das Ergebnis der Arbeit sind praktikable Projektierungshinweise sowie prozessspezifische Auswahlkriterien zur Auswahl von energieeffizienten Antriebssystemen.

Es wird gezeigt, wie bereits in einem frühen Projektierungsstadium auf der Grundlage von einem gegebenen Lastprofil ein energieeffizientes Antriebssystem projiziert werden kann. Für die Abschätzung des Energieverbrauchs mit den vereinfachten Verlustmodellen sind wenig Detailwissen und keine Energiemessungen erforderlich. Die Modelle basieren auf frei zugänglichen Datenblattangaben und wurden in einem benutzerfreundlichen Projektierungs-Tool mit grafischer Oberfläche implementiert.

Der Vergleich der vielen möglichen Antriebskonfigurationen und der Systemfreiheitsgrade führt zu einem Auswahldiagramm, welches die Auswahl eines energieeffizienten Antriebssystems mit wenigen Auswahlkriterien ermöglicht. Die Auswahlkriterien basieren auf dem bekannten Lastprofil einer Anlage. Die in den Fig. 1 und 2 dargestellten Auswahldiagramme gelten für die Anwendungsbeispiele der Pumpen und Förderantriebe. Durch die schnell zu berechnenden Auswahlkriterien wird in Fig. 1 das energieeffiziente System einer drehzahlgeregelten Pumpenkaskade mit 2 Pumpen gewählt.

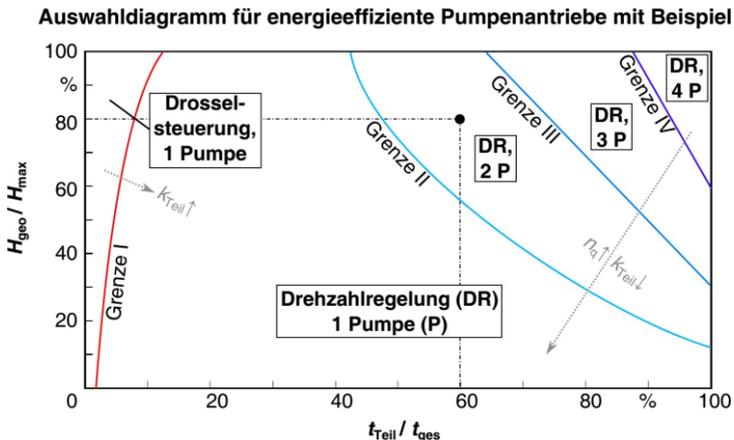


Fig.1: Auswahldiagramm für energieeffiziente Pumpenantriebe mit Projektierungsbeispiel  
Selection diagram for energy efficient pump drives with projected example

## Design Criteria for Energy Efficient Drive Systems

The life cycle costs of drive systems are dominated by their energy costs. Therefore, a low cost system always requires increased energy efficiency. In order to exploit the energy saving potential, a method to design an energy-efficient drive system with special consideration of the mechanical process underneath has been developed in this research project. Example applications are pump drive and conveyor drive systems. The results of the work are feasible design rules as well as process-specific selection criteria for the selection of energy-efficient drive systems.

It is shown, how at an early stage of project planning an energy-efficient drive system can be configured on the basis of a given load profile. The simplified loss models require little detailed knowledge and no energy measurements in order to estimate the electric energy consumption. The models are based on freely accessible data-sheet specifications and have been implemented in a user-friendly drive design tool with a graphical interface.

The comparison of the many possible configurations due to the various degrees of freedom in system design leads to a selection chart. The selection charts shown in Figs 1 and 2 apply to pumps and conveyor drives. They are feasible for selecting an energy-efficient drive system with few selection criteria. The selection criteria are based on the known load profile of a drive system. Using the calculated selection criteria of an exemplary pump system, the energy-efficient system in Figure 1 would be a variable speed pump cascade with 2 pumps.

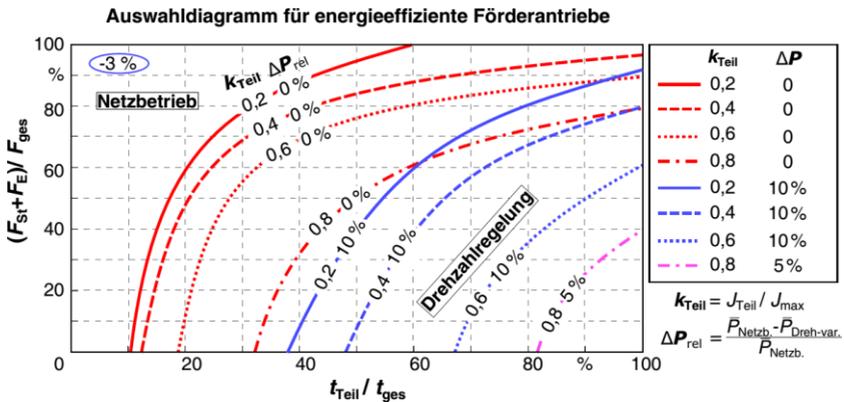


Fig.2: Auswahldiagramm für energieeffiziente Förderantriebe  
Selection diagram for energy efficient conveyor belt drives

## Neuentwurf eines kompakten Transversalflussmotors für den Einsatz im Vorderrad eines Lastenfahrrades

Neben der Umstellung des Individualverkehrs mit Pkw von fossil auf rein oder zumindest teilweise elektrische Antriebstechnologien besteht die Möglichkeit der Einsparung von Primärenergie über das Ersetzen von Fahrzeugen durch S-Pedelec Lastenräder im urbanen Verteilverkehr.

Auf Basis der Analyse eines bestehenden Entwurfs einer Transversalflussmaschine mit Permanentmagneten wurde ein Neuentwurf für eine Dauerleistung von  $P = 250 \text{ W}$  durchgeführt, um die Drehmomentdichte und den Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstranges über einen weiten Betriebsbereich zu steigern. Die Maschine wird neben der Bremse in das Vorderrad des Lastenfahrrades eingebaut und muss daher strengen räumlichen Anforderungen genügen. Um dieses Ziel zu erreichen und gleichzeitig den für die Drehmomenterzeugung wichtigen Permanentmagnetfluss zu erhöhen, wurde zu einer Flusskonzentrationsanordnung der Permanentmagnete im Rotor übergegangen. Zudem wurde die Polpaarzahl auf  $p = 26$  erhöht und alle, neben den Magneten, vom magnetischen Fluss durchsetzten Elemente aus weichmagnetischem Kompositmaterial aufgebaut. Der Entwurfsprozess erfolgte mehrstufig und mit unterschiedlichen Schwerpunkten wie in Fig. 1 dargestellt unter Nutzung des am Lehrstuhl vorhandenen Optimierungswerkzeuges, welches auf einem evolutionären Algorithmus basiert. Zur Einschätzung der Qualität einer Lösung wurde ein Faktor  $f_{\text{opt}}$  eingeführt, der sich mit der Motorkonstante  $k_m$  und dem Kupferwiderstand der Wicklung  $R$  ergibt zu:  $f_{\text{opt}} = \frac{k_m^2}{R}$

Die gewählte Variante ermöglichte eine Reduktion der Kupferverluste um rund 20% bei gleichzeitig stark verringerter Drehmomentwelligkeit. Am Arbeitspunkt erreicht die Maschine einen Wirkungsgrad von 89%. Das Gesamtgewicht liegt unter 4 kg und alle gestellten Anforderungen an Fahrdynamik und Bauraum wurden erfüllt. Eine schematische Darstellung der Maschine zeigt Fig. 2. Um eine genauere vergleichende Beurteilung zu erstellen sind repräsentative Fahrzyklen notwendig, die bisher aber nicht offiziell genormt sind.

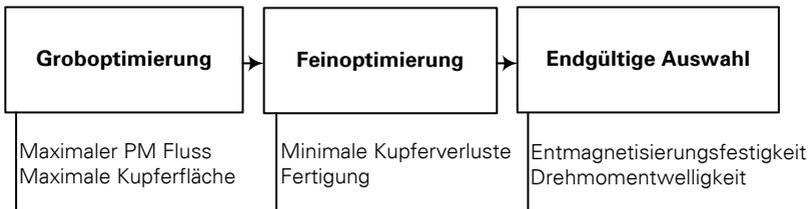


Fig. 1: Entwurfsschritte mit Multikriterieller Optimierung  
Design Procedure using Multicriterial Optimization

## Redesign of a compact Transversal Flux Motor for use in front-wheels of Cargo - Bicycles

In addition to the reduction of the use of primary energy throughout the change from fossil to fully or partly electrically powered drive systems there is the possibility to completely replace vehicles by cargo bicycles in the field of urban short-distance transportation.

Based on the analysis of an existing design of a Transversal Flux Motor with permanent magnets, a redesign for a machine with a constant power output of  $P = 250 \text{ W}$  was done to raise torque density and energy efficiency of the whole drive train in the full range of application. The machine is mounted inside the front-wheel next to a brake which is strictly limiting the available space. To fulfill the desired specifications a flux concentration arrangement of the permanent magnets in the rotor was chosen alongside a switchover to soft magnetic composite material for the iron back. The design process was conducted in three main steps which focused on two different criteria respectively. This is shown in Fig.1 with the maximization of PM flux and maximization of the copper cross area for the first step and the minimization of copper losses as well as the manufacturability in the second. The last step was to finally pick the solution with the lowest torque ripple and no demagnetization of magnets in possible fault situations. An evolutionary algorithm developed at this chair was used to investigate a broad variety of parameter combinations and automatically evaluate the results. For the evaluation itself a new factor called  $f_{\text{opt}}$  was implemented, which is derived from the motor constant  $k_m$  and the ohmic resistance of the winding  $R$  as:  $f_{\text{opt}} = \frac{k_m^2}{R}$

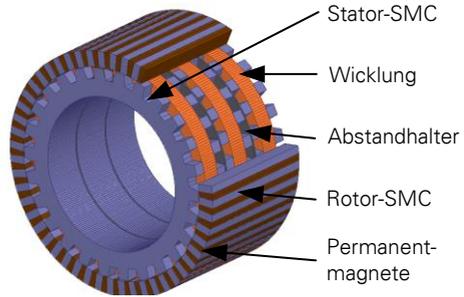


Fig.2: Räumliche Darstellung der Maschine  
Isometric view of the designed machine

The finally chosen variant is depicted in Fig. 2. Ohmic losses saw a 20 % reduction as well as torque ripple. Overall weight totals about 4 kg now. Although the pole pair number was raised to  $p = 26$  core losses still have no high impact on the overall efficiency. At rated point the machine has an efficiency of 89% and all requirements for torque density and comfort of driving were met. To comparatively evaluate the machine it is necessary to use official driving cycles which have not been defined so far.

## Regelung eines doppel gespeisten Asynchrongenerators im synchronen Betrieb beim asymmetrischen Netzspannungsfehler

Da der Anteil von Windenergieanlagen im Stromnetz zunimmt, müssen die Anlagen bei einem bestimmten Spannungsprofil am Netz bleiben, um weiter Energie in das Versorgungsnetz einspeisen zu können. Wenn ein asymmetrischer Spannungseinbruch auftritt, werden durch eine Regelungsstruktur mit optimalen Vorgaben für die Gegensystemregler negative Auswirkungen bzgl. Wirk- und Blindleistung, Drehmoment, sowie Ständer- und Rotorstrom gleichzeitig verringert (Fig. 1).

Mit unterschiedlichen Anteilen des Spannungseinbruchs und geregelten Gegensystem-Rotorstrom wird die Schwingung jeder Variablen (Statorstrom, Drehmoment, Wirk- und Blindleistung) verändert. Die Minimalsumme der Schwingungen wird durch einen Algorithmus bestimmt, in dem alle Werte von Gegensystem-Rotorstrom und Spannungseinbruch zugeführt werden. Damit wird die Vorgabe des Gegensystemreglers (NSC – engl. negative sequence controller) mit minimaler Vibrationssumme entsprechend eines anteiligen Spannungsfehlers ermittelt.

Dadurch wurden die Schwingungen der Größen um ca. 82 % gedämpft. Das experimentelle Ergebnis des elektromagnetischen Drehmoments mit dem minimalen Vibrationsoptimum (MVO) Ansatz unter zweipoligem Fehler wird in Fig. 2 vorgestellt.

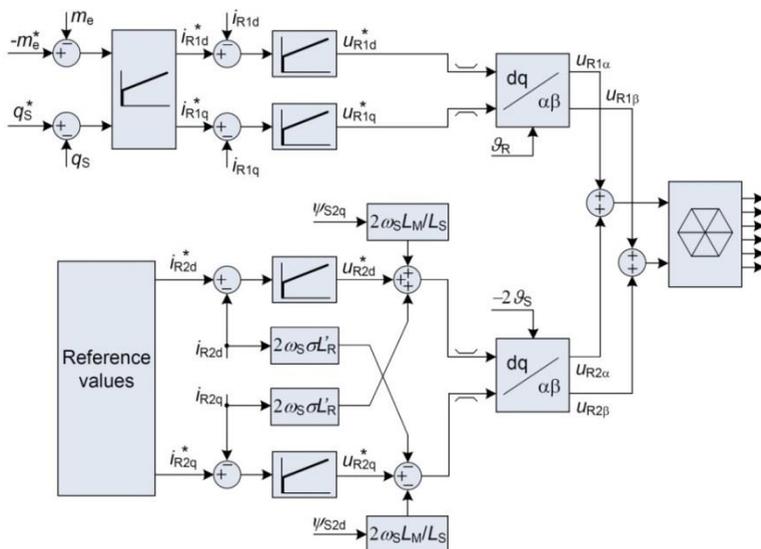


Fig. 1: Regelstruktur für Mit- und Gegensystemkomponenten  
Structure of the positive and negative sequence controllers

## Control of doubly-fed induction generator at synchronism under unbalanced grid voltage dip

Most control investigations of the DFIG assume the stator voltage to be symmetric. However, wind farms are usually built in remote areas and normally connected to a weak grid with inherently unbalanced three-phase voltage. Therefore, the grid code requires that the generator must deal with this problem and resist the unbalance of grid voltage. For distribution networks with great periodical unbalanced voltage, it causes fluctuation problems in generators. This work investigates the performance of the DFIG, at synchronism, with novel control implementations. When the asymmetric voltage sag occurs, variables in the machine—such as stator current, rotor current and torque—are influenced. In this case, both positive and negative systems exist simultaneously in the machine, and their rotating directions are opposite. Therefore, to minimize the effect of the negative sequence, two controllers that correlate with these sequences are implemented. The positive sequence controller supervises the quantities of active and reactive power, while the negative sequence controller (NSC) keeps the machine working under various criteria (Fig. 1). With different dip levels and controlled negative rotor current, the vibration of each variable (stator current, torque, active and reactive power) is changed. That means there exists a curve which corresponds to a dip level—a value of negative rotor current gives a minimum sum of the above vibrations. The minimum sum of vibrations is determined by an algorithm in which all values of negative rotor current and voltage dip levels are fed. A wide range of negative rotor current is considered for each voltage dip, while the sum of vibrations corresponding to each current is calculated and compared with each other. As a result, the current which offers a minimum vibration sum corresponding to a dip level is determined. The experimental performance of the electromagnetic torque with the minimum vibration optimal (MVO) approach under two-phase dip case is presented in Fig. 2. The oscillations in other variables are also reduced simultaneously up to 82 %. The maximum amplitude is reduced up to 60 % for rotor current and the average amplitude damping in all variables is more than 47 %.

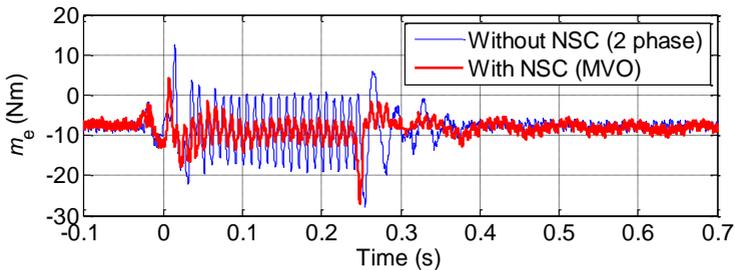


Fig. 2: Messergebnisse zum Drehmoment bei 2-phasigem Fehler  
Experimental result of electromagnetic torque under the two-phase dip

*Dipl.-Ing. Thomas Windisch*

## **Antriebsprüfstand „Schaufenster Elektromobilität“**

Die „Akademische Bildungsinitiative zur Elektromobilität“ war eines von insgesamt rund 50 Projekten im Schaufenster Bayern - Sachsen „Elektromobilität verbindet“ und wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Im Projekt wurde ein Antriebsprüfstand für ein Elektrofahrzeug am Lehrstuhl errichtet. Der Prüfstand besteht aus zwei elektrisch erregten Synchronmaschinen in Back-to-Back Anordnung und ihren Stromrichtern (Fig. 1). Diese werden in Renault Elektrofahrzeugen eingesetzt und wurden von der Firma Continental Temic Automotive Electric Motors GmbH geliefert. Sie werden hier statt von einer Batterie, von einer einstellbaren, rückspeisefähigen DC-Spannungsquelle versorgt. Die Antriebe arbeiten im Ringtrieb, wobei die Spannungsquelle die Verluste in beiden Antrieben deckt. Maschinen und Leistungselektronik sind wassergekühlt und werden von einem Luft-Wasser-Wärmetauscher versorgt. Eine Drehmoment-Messeinrichtung ermittelt die mechanische Leistung eines Fahrantriebes an der Abtriebswelle. Die Spannungsquelle misst den Eingangsstrom jedes Antriebs. Somit können Wirkungsgraduntersuchungen und Effizienzbestimmungen im Fahrzyklus erfolgen.

Die Maschine ist zusammen mit einem Getriebe und einem Differenzial in einem Gehäuse verbaut (Fig. 2). Das Differenzial wurde für den Versuchsstand gesperrt. Der Stator der Maschine ist mit einer verteilten Drehstromwicklung versehen. Die Rotormagnetisierung geschieht mittels einer Kupferwicklung, die über Schleifringe mit Gleichstrom gespeist wird. Die Regelung des Drehmoments erfolgt im feldorientierten Koordinatensystem durch die Elektronik des Stromrichters, so dass alle Stromkomponenten lastabhängig und damit verlustminimal geregelt werden können.

Im Praktikum wird das Verständnis der Verlustleistungen in Wechselrichter und Maschine unter fahrzeugtypischen Randbedingungen geschärft. Aus den einzelnen gemessenen Leistungen wird der Wirkungsgrad abgeleitet und am Versuchsstand gemessen. Außerdem können mit einer der beiden Maschinen Fahrzyklen abgefahren werden, wobei mit Hilfe der zweiten Maschine fahrzeugtypische Lastprofile auf die Abtriebswelle aufgebracht werden. Somit kann die Effizienz und der Energiebedarf im Fahrzyklus ermittelt werden.



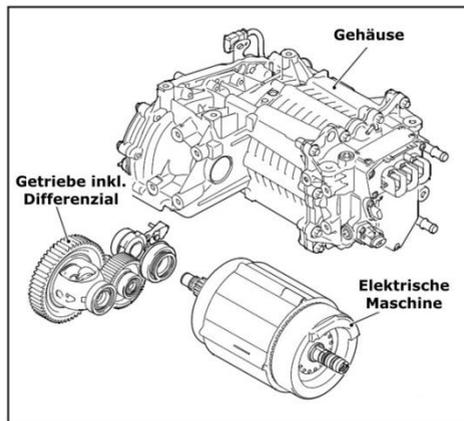
**Fig.1: Versuchsstand und Bedienteil**  
**Test bench and operator console**

## New Electric Drive Test Bench for a Vehicle Propulsion System

The „Academic Learning Initiative towards Electric Mobility“ was one of 50 projects in the showcase Bavaria-Saxony “Electric Mobility Connects” and was funded by the Federal Ministry of Education and Research. In this project an electric drive test bench for a vehicle propulsion system was installed at the institute. The test bench consists of two electrically excited synchronous machines in back-to-back configuration and their power converters (Fig. 1). They are used in Renault electric vehicles and were delivered by Continental Temic Automotive Electric Motors GmbH. They are supplied here from a tunable bidirectional DC power supply instead of a battery. The drives work in ring operation so that the power supply only has to cover the power losses in both drives. The machines as well as the power converters are water-cooled by a water-to-air heat exchanger. A torque transducer measures the mechanical power at the drive shaft. The power supply measures the DC current for each individual drive. Therefore the efficiency can be determined.

The machine is installed together with a fixed gear ratio and a differential into one housing (see Fig. 2). The differential was locked for the test bench. The stator of the machine holds a distributed three phase winding. The rotor is magnetized by a copper winding that is fed with DC current using slip rings. The torque control is done in the field-oriented synchronous reference frame by the electronics of the power converters so that all current components are chosen depending on the load in order to minimize the power losses.

In the practical training the comprehension of the power losses in the converter and the machine under vehicle conditions is raised. From the measured power the efficiency is derived and measured on the test bench. Furthermore drive cycles can be executed by one of the machines whereas the other machine brings a load profile to the drive shaft that is typical for a vehicle. Using this setup the efficiency and the energy consumption can be determined for a specific drive cycle.



**Fig.2: Motorgehäuse mit Differentialgetriebe**  
Machine housing with differential gear

## Regelung von Asynchronantrieben bei hoher Drehmomentdynamik und transienter Stromverdrängung

Die Stromverdrängung, auch Skin-Effekt genannt, und ihr Einfluss auf das Regelverhalten sind Gegenstand theoretischer und experimenteller Untersuchungen am Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe. In modernen Antriebskonzepten gewinnt die genaue Modellierung der Antriebsmaschine zwecks wachsender Anforderung nach einer hohen Drehmomentdynamik zunehmend an Bedeutung. Da die schnelle Änderung des Drehmoments eine entsprechend schnelle Stromänderung erfordert, führt dies zur Anregung der Stromverdrängung in den Rotorstäben von Käfigläufermotoren. Die sich infolge der Stromverdrängung ändernden Rotorparameter haben bei hohen Umschaltsequenzen eine ständige Fehlberechnung des Flusswinkels und der Flussamplitude bei der feldorientierten Regelung sowie bei der direkten Drehmomentregelung zur Folge. Um den negativen Einfluss der Rotorparameteränderung auf das Regelungsverhalten zu verringern, wird das Kettenleiter-Modell zur genauen Modellierung der dynamischen Stromverdrängung verwendet. Dabei werden die häufig benutzten Regelverfahren (siehe Fig.1) zuerst entsprechend modifiziert und danach miteinander verglichen.

Bei der feldorientierten Regelung mit dem Einsatz des Kettenleiters ist die Statorflussorientierung im Vergleich zu den anderen zwei Steuerverfahren wegen ihrer kleinen Abhängigkeit von Rotorparametern besonders robust gegen Einfluss der dynamischen Stromverdrängung. Außerdem soll die Feldorientierung auf die erste Rotorflussverkettung des Kettenleitermodells (Pseudo-Rotorfluss) vorgenommen werden. Derselbe Rotorfluss kann zur Bestimmung des Differenzwinkels zwischen den drehmomentbestimmenden Flusszeigern bei der direkten Drehmomentregelung (DTC) verwendet werden. Bei der DTC ist das  $U_s I_s$  –Modell unabhängig von Rotorparametern und soll bevorzugt verwendet werden. Im Vergleich zur DTC mit kreisförmiger Flussstrajektorie hat DTC mit Raumzeigermodulation (DTC-SVM, siehe Fig. 2) eine konstante Schaltfrequenz. Außerdem können das Drehmoment und die Drehzahl mit zwei PI-Regler statt Hysterese-Regler schnell reagieren. Im Allgemeinen soll die DTC-SVM bevorzugt bei hoher Drehmomentdynamik und transienter Stromverdrängung verwendet werden. Alle modifizierten Verfahren mit Kettenleiter-Modell wurden am Ende am Versuchstand funktionsfähig implementiert.

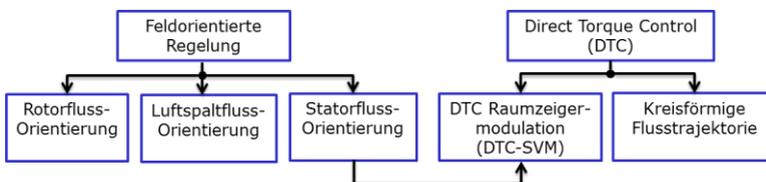


Fig.1: Regelungsverfahren der Asynchronmaschine  
Control methods for induction machines

## Control methods of induction motors with high torque dynamics and transient skin effect

The skin effect and its influence on the control performance are the subject of theoretical and experimental studies in the chair of Electrical Machines and Drives. In modern power converter powered AC drives, a high torque dynamic and therefore an accurate modeling of the driving machine are demanded for a high productivity. The rapid change of torque, however, requires a correspondingly rapid change of current leading to stimulation of transient skin effect in the rotor bars of squirrel-cage motors. The skin effect, in turn, results in the changing of rotor parameters and miscalculation of flux angle and flux amplitude. This is especially critical in dynamically controlled induction machines with deep rotor bars and small load cycles. Therefore, the skin effect is necessary to be taken into account at the control of motors. The rotor bars are often modeled as a ladder network to simulate the skin effect. The most convenient industrial control schemes (see Fig. 1) are firstly by using the ladder-model modified and afterwards compared.

In terms of field-oriented control, the stator flux orientation is especially robust to the influence of skin effect due to its small dependence of rotor parameters in compare with the other two control schemes. In addition, the field orientation should be performed on the first rotor flux linkage of the ladder model (pseudo rotor flux). The same rotor flux is used to determine the angle difference between the torque determining flux vectors in direct torque control (DTC). In terms of DTC, the  $U_s I_s$  - model is independent of rotor parameters and should preferably be used. Compared to the DTC with circular flux trajectory, the space vector modulated DTC (SVM-DTC, see Fig. 2) has a constant switching frequency. In addition, the torque and speed can respond quickly with two PI controllers instead of hysteresis control. In general, the DTC-SVM should be preferred at high torque dynamics and transient skin effect. In the end, the control schemes with the ladder model are implemented successfully at a test bench.

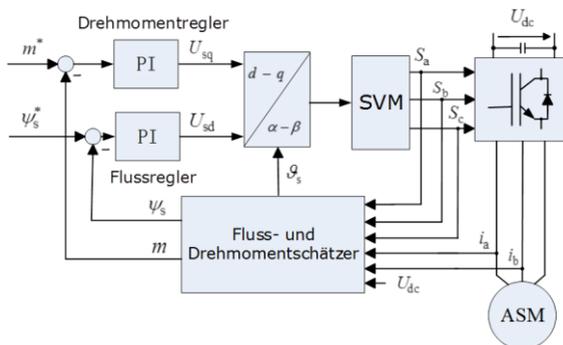


Fig.2: Raumveigermodulierte Direkte Drehmomentregelung  
Space vector modulated – direct torque control (DTC-SVM)

## 5 AUSSTATTUNG DES LEHRSTUHLS

Neben Arbeitsräumen für Diplomanden, Studienarbeiter, Gastwissenschaftler, IAES-TE-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 Lehr- und Praktikumlabor (112 qm)
- 1 PC-Pool



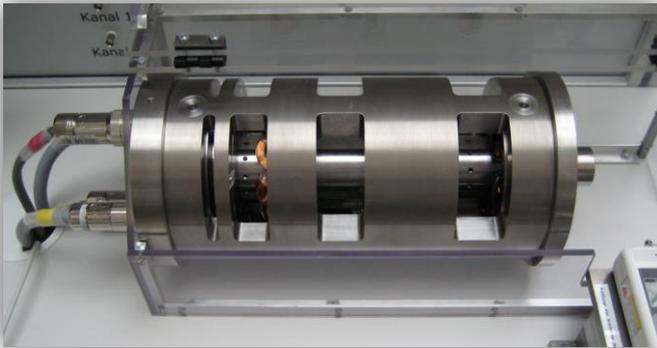
### 5.1 Forschungsversuchsstände

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

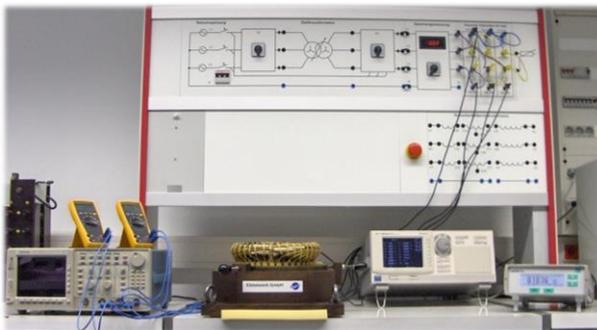


- Optimale Bewegungssteuerung mit Rotations- und Linearantrieben
- Matrixumrichter, Z-Source-Inverter

- Rechnergestützte Bewegungssteuerung: automatisierter Entwurf des Programm-kodes für Steuergeräte
- Experimentelle Aufbauten zur Messung der Feld- und Wirbelstromverteilung in rotierenden Massivteilen elektrischer Maschinen
- Aktive Magnetlager
- Schleifringprüfstand
- Arbeitsplatz FEM-Modell der Vollpolmaschine
- Magnetlagerversuchsstand für die Lehre
- Hochgeschwindigkeitsmagnetlager für Forschung,



- Feld- und Wirbelstromverteilung in Ständerdruckplatten
- Versuchsstand zur Messung des Wärmewiderstands von Wälzlagern
- Versuchsstand zur Messung der Verluste im quergekühlten Statorblechpaket
- Motorenprüfstand für Luftkühlung



## 5.2 Lehrversuchsstände

- Schrittmotoren, Switched-Reluctance Motor
- Binäre Steuerungen in der elektrischen Antriebstechnik
- Antriebsregelung, Buskommunikation, technologisch verkettete Antriebe am Netz (4 stromrichtergespeiste Antriebssätze Gleichstrommotor - Drehstrommotor (je 10 kW)
- Drehstromtrafo
- Feldorientierte Regelung (sensorloser Betrieb)
- Stoßkurzschluss bei Synchronmaschinen
- Gleichstrom- und Drehstromstelantriebe
- Bewegungssteuerung, graphische Programmierung, Echtzeitkodegenerierung, Profibus (3 Drehstromstelantriebe)
- Weitere Versuchsstände zur Vertiefungsausbildung elektrische Maschinen und Antriebe in den Studiengängen Elektroenergietechnik und Mechatronik

## 5.3 Sonderausstattung

- Separate Netzeinspeisung 0...400 V über Stelltrafo, 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. Germar 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. Falk Bahr

Dipl.-Ing. Henry Barth

Dipl.-Ing. Kenneth Benath

Dipl.-Ing. Arne Brix

Dipl.-Ing. Jan Döring

Dipl.-Ing. Erik Fleischer

Dipl.-Ing. Stephan Günther

Dipl.-Ing. Ahotondji Tomi Hermann Houenouvo

Dipl.-Ing. Eike Jenßen

Dipl.-Ing. Jacob Jung

Dipl.-Ing. Martin Leubner

M.Sc.E.E. Chi Dung Nguyen

M. phil. Van Binh Nguyen

Dipl.-Ing. Nico Remus

Dipl.-Ing. Ferdinand Rüger

Dipl.-Ing. Jörg Schützhold

Dipl.-Ing. Gunar Steinborn

M. Sc. Rahmat Suryana

Dipl.-Ing. Stephan Tenner

Dipl.-Ing. Stefan Ulbrich

Dipl.-Ing. Thomas Windisch

Dipl.-Ing. Daniel Wöhner

Dipl.-Ing. Yuanpeng Zhang

### **Freie Mitarbeiter**

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

Prof. (i.R.) Dr.-Ing. habil. Germar Müller

## **Fachpersonal**

Sylvia Schad

Dipl.-Ing. Axel Rusch

## **Doktoranden**

Dipl.-Ing. Thomas Bach

Dipl.-Ing. Sven Bosch

Dipl.-Ing. Li Chen

Dipl.-Ing. Bernd Cebulski

Dipl.-Ing. (FH) Martin Eckart

Dipl.-Ing. Marco Festa

Dipl.-Ing. Frederik Klenke

Dipl.-Ing. Stephan Kunckel

Dipl.-Ing. Sebastian Krauß

M.Sc. Sören Miersch

Dipl.-Ing. Stefan Staudt

Dipl.-Ing. Daniel Wöhner

## **Studentische Hilfskräfte:**

Andreas Pichl, Nico Krauter,

## **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



