



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

Elektrotechnisches Institut

Prof. Dr.–Ing. W. Hofmann

<b>JAHRESBERICHT ANNUAL REPORT</b>	<b>2016</b>
--	-------------



Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe



## Inhalt

---

1	Vorwort.....	5
2	Lehraufgaben .....	7
2.1	Lehraufgaben im Grund- und Hauptstudium der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik .....	7
2.2	Lehraufgaben im Grund- und Hauptstudium für andere Fakultäten.....	12
2.3	Abgeschlossene Diplom- und Studienarbeiten.....	12
2.4	Exkursionen .....	14
3	Öffentlichkeitsarbeit.....	15
3.1	Veröffentlichungen .....	15
3.2	Forschungsberichte .....	15
3.3	Vorträge.....	16
3.4	Kooperation.....	22
3.5	Gremien und Gutachten .....	23
4	Forschung.....	25
4.1	Forschungsprofil – Schwerpunkt Energieforschung	25
4.2	Forschungsprojekte .....	25
4.3	Dissertationen .....	28
4.4	Ausgewählte Forschungsergebnisse in Kurzform ..	30
5	Ausstattung des Lehrstuhls.....	51
5.1	Versuchsstände für die Forschung .....	53
5.2	Versuchsstände für die Lehre.....	54
5.3	Sonderausstattungen .....	55
6	Personelle Besetzung.....	57
7	Anschrift .....	59
8	Impressum .....	61
9	Lageplan .....	63



# 1 VORWORT

Liebe Kollegen, Mitarbeiter und Freunde,  
wie in jedem Jahr überreiche ich Ihnen  
hiermit unseren Jahresforschungsbericht,  
mit dem wir Bilanz ziehen für das vergan-  
gene Jahr 2016.

Stabile Studentenzahlen insbesondere in  
der Elektroenergietechnik und interessante  
Forschungsprojekte geben Anlass, eine  
positive Rückschau auf die erreichten Er-  
gebnisse zu halten.

Eine wissenschaftlich positive Bilanz des  
Jahres kann auch an der Anzahl von insge-  
samt 6 eingereichten Dissertationen fest-  
gemacht werden.



Im Rahmen des DresdenConcept engagiert sich der Lehrstuhl im Cluster  
Speichertechnologien, wo Aktivitäten zu neuartigen Motor-/Generator-  
systemen für magnetgelagerte Schwungradspeicher laufen.

Zahlreiche Grundlagenprojekte, gefördert durch die DFG, wurden in diesem  
Jahr fortgesetzt bzw. neu beantragt, sodass der Vorlauf zu industrienaher  
Forschung weiter gestärkt werden kann. Eine langanhaltende sehr gute  
Zusammenarbeit mit der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) hat  
sich bewährt und dem Lehrstuhl viele Ideen und Impulse gebracht, die in  
neue Graduierungsarbeiten einfließen.

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

Ihr

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'W. Hofmann'. The signature is fluid and cursive.

Wilfried Hofmann



## 2 LEHRAUFGABEN

### 2.1 Lehraufgaben im Grund- und Hauptstudium der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

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

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

Pflichtfach Elektroenergie-technik (EET), Wirtschaftsingenieure (WING), Regenerative Energiesysteme (RES)

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; Schenkelpolläufer-Synchronmaschine; Permanentmagneterregte 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 Elektroenergie-technik (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 Elektroenergietechnik (EET), Regenerative Energiesysteme (RES)

Einführung in das Theoriegebäude; 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 (2/0/1), SS

Wahlpflichtfach Regenerative Energiesysteme (RES),

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 (2/1/1), SS

Wahlpflichtfach Elektroenergietechnik (EET), Regenerative Energiesysteme (RES)

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, CAD-Labor

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

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

Wahlpflichtfach Elektroenergietechnik (EET)

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 (2/0/1), WS

Wahlpflichtfach Elektroenergie-technik (EET), Mechatronik (MT)

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

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

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

Automatisierte Antriebe (2/1/1), SS

Wahlpflichtfach Mechatronik (MT), Elektroenergie-technik (EET), Wirtschaftsingenieure (WING)

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 (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; Netzurückwirkungen 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 (1/1/0), WS

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

Grundlagen leistungsflussorientierter Modelle, Einführung in Bondgraphen, POG und EMR, SIMULINK Erweiterungsblockbibliothek 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 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), Elektroenergietechnik (EET), Regenerative Energiesysteme (RES)

Ableitung von Differenzengleichungen, Quasikontinuierlicher Reglerentwurf, Grundlagen des Entwurfs diskontinuierlicher Regler, Angewandte Z-Transformation, Abtastsignalfussplanmethode, 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)

Signalfusspläne 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 (2/0/0), WS

Modul „Vertiefung Elektrische Maschinen“ Studienrichtung Elektroenergietechnik

Leistungstransformatoren in der Elektroenergietechnik, 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; Zusatzverluste; Modellierung elektromagnetischer Felder.

## 2.2 Lehraufgaben im Grund- und Hauptstudium 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
- Elektrische Antriebe für Maschinenbau im Fernstudium (1/0/0) im WS

*Dr.-Ing. N. Hildebrand*

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

## 2.3 Abgeschlossene Diplom- und Studienarbeiten

### Diplom- und Masterarbeiten

**D. Kranz** / Betreuer: N. Hildebrand

*„FEM-Modellierung eines realen PM-Traktionsgenerators – Modellverifikation, Modifikation sowie Ableitung von Ersatzschaltbild-Daten für das Oberschwingungsverhalten.“*

**D. Bernet** / Betreuer: R. Seifert

*„Vergleich direkter prädiktiver Regelungsstrategien für den Einsatz in einem linearen PM-Synchrongenerator.“*

**P Pechmann** / Betreuer: A. Brix

*„Untersuchungen zur feldorientierten Regelung einer Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine auf Basis des zu messenden Rotorstrefelfeldes.“*

**A.-M. Schuppan** / Betreuer: M. Leubner

*„Energieeffiziente Modulationsverfahren für einen Vollbrückenwandler.“*

**E. Eggerichs** / Betreuer: N. Hildebrand

*„Auslegung eines Fahrmotors für das Team Elbflorace der Formula Student Electric.“*

**M. Bruhns** / Betreuer: V. Müller

*„Erweiterung eines Antriebsprüfstandes um eine Leistungsmessung zwischen Stromrichter und Motor.“*

**P. Bi** / Betreuer: V. Müller

*„Projektierung von energieeffizienten Antriebssystemen für Kompressoranlagen.“*

**H. Labidi** / Betreuer: F. Bahr

*„Entwurf und Untersuchung von Reglern gebrochen-rationaler Ordnung für Magnetlager.“*

## Studienarbeiten

**R Noske** / Betreuer: A. Brix

*„Leistungsflussorientierte Modellierung eines elektrischen Fahrantriebes mit einem hybriden Energiespeicher.“*

**J .Neubacher** / Betreuer: St. Tenner/Th. Windisch

*„Messtechnische Untersuchung zur energieoptimalen Regelung von Synchronmaschinen mit ausgeprägtem Reluktanzeffekt für Fahrzeuganwendungen.“*

**M. Kirsten** / Betreuer: N. Remus

*„Vergleich von direkten und indirekten Regelungsverfahren für den AC-Chopper als Hochsetzsteller.“*

**St. Bailleu** / Betreuer: T. Micklitz

*„Elektrischer Aufbau und Inbetriebnahme eines Prototyps schelldrehender Axialfluss-Synchronmaschinen.“*

**P. Scheibner** / Betreuer: St. Michel/Ch. Evers"

*„Entwurf energieoptimierter Trajektorien in Logistikprozessen unter Berücksichtigung der DC-Zwischenkreiskopplung und Integration von Leistungsspeichern.“*

**M. Heeg** / Betreuer: Y. Zhang

*„Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchstandes zur Bestimmung der durch die dynamische Stromverdrängung bedingten Stromwärmeverluste in Rotorstäben.“*

**H. Peng** / Betreuer: Y. Zhang

*„Gekoppelte elektromagnetisch-thermische Feldberechnung im Nut-Zahn-Gebiet bei dynamischer Stromverdrängung.“*

**S. Wang** / Betreuer: A. Brix

*„Entwurf einer heuristischen Betriebsstrategie für hybride Energiespeicher im elektrischen Fahrtrieb.“*

**R. L. Liebfried** / Betreuer: Y. Zhang

*„Untersuchung und Implementierung der Identifikationsverfahren der Rotorparameter von Asynchronmaschinen mit häufigen Drehmomentwechseln.“*

**R. Franke** / Betreuer: G. Geitner

*„Entwurf eines Simulink-GUI zur Regleroptimierung für die kaskadierte Regelung von Strom und Drehzahl elektrischer Maschinen auf Basis von Bondgraphen.“*

**M. Jauernik** / Betreuer: H. Barth

*„Entwurf und Aufbau eines Versuchstandes für kalorimetrische Messungen.“*

**A. Jakob** / Betreuer: St. Ulbrich/ N. Hildebrand

*„Aufbau eines Funktionsmusters für eine permanentmagneterregte eisenlose Axialflussmaschine.“*

**J. Haase** / Betreuer: M. Leubner/N. Remus"

*„Entwicklung einer Schaltung zur Messung der UCE-Spannungen von IGBT-Halbleiterventilen in bidirektionalen Schaltmodulen.“*

**F. Kaphengst** / Betreuer: N. Hildebrand

*„Aufbau, Inbetriebnahme und Dokumentation eines Versuchstands für das Hauptseminar Elektrische Energietechnik.“*

**M. Matic** / Betreuer: Th. Windisch

*„Antriebsregelung für einen elektrischen Rennwagen mit Einzelradantrieb.“*

**Ch. Bornheimer** / Betreuer: J. Döring

*„Ermittlung des Oberwellengehalts im Luftspaltfeld dreiphasiger Maschinen mit verteilter und kombinierter Wicklung bei Speisung mit Frequenzumrichter.“*

**St. Schwarz** / Betreuer: A. Brix

*„Vergleichende Untersuchungen zu Schaltungen eines bidirektionalen und potentialgetrennten DC/DC-Wandlers.“*

## 2.4 Exkursionen .

Folgende Exkursionen wurden den Studenten angeboten:

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

## 3 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

### 3.1 Veröffentlichungen

- [1] F. Bahr, I. Mönch, D. Ernst, T. Zerna, O. G. Schmidt, W. Hofmann: Direct Field Control of AMBs using Flux Feedback based on Integrable Hall Sensors, The 15th International Symposium on Magnetic Bearings – ISMB15, Kitakyushu, Japan, 2016.
- [2] M. Leubner, N. Remus, M. Stübig, W. Hofmann: Active stabilization of direct matrix converter input side filter through grid current control, Applied Power Electronics Conference - APEC, Long Beach, CA USA, pp. 2175 - 2181, 2016.
- [3] E. Fleischer, W. Hofmann: Linear and nonlinear control of a three pole combined radial and axial active magnetic bearing - a comparison, Bulletin of the JSME Mechanical Engineering Journal, Vol.3, No.1 (2016), 13 pages, 2016.
- [4] M. Leubner, N. Remus, M. Stübig, W. Hofmann: Active stabilization of direct matrix converter input side filter through grid current control, IEEE Applied Power Electronics Conference - APEC, Long Beach, CA USA, pp. 2175 - 2181, 2016.
- [5] N. Remus, M. Leubner, W. Hofmann: Efficiency Comparison of Active and Passive Grid Filter Damping Methods using Direct Matrix Converter, European Power Electronics and Applications - EPE, Karlsruhe, Germany, 2016.
- [6] R. Seifert, W. Hofmann: Analytical Asymmetric Air Gap Model for Active Magnetic Thrust Bearings of Mixed Materials Including Eddy Currents, ISMB15 - International Symposium on Magnetic Bearings, 2016.
- [7] G.-H. Geitner, G. Kömürçöz: Generalised Power Flow Model for Electric Machines, 42th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Firenze, Italy, pp. 8, 2016.
- [8] J. Schützhold: Auswahlssystematik für energieeffiziente quasistationäre elektrische Antriebssysteme am Beispiel von Pumpen- und Förderbandanlagen. Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und Antrieben Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann, Dresden, Shaker-Verlag Dez. 2016

### 3.2 Forschungsberichte

**T. Windisch,**

Großer Antriebsprüfstand: „*Dokumentation zu den mechanischen Schnittstellen für Prüflinge*“

**T. Windisch**

Großer Antriebsprüfstand: „*Dokumentation zum Experimentier-Wechselrichter.*“

**T. Micklitz**

„*Refined calculation of circulating currents in turbine generators - Verfeinerte Schlingstromberechnung für Turbogeneratoren*“ Oktober 2016

**St. Tenner**

„Rotierender Aktiver Gleichrichter für 2polige Turbogeneratoren.“ BMBF-Abschlussbericht, September 2016

**G. Steinborn**

„Energieoptimaler Beschleunigungsantrieb und Downsizing-Schleifen“, Ergebnisbericht zum DFG-Forschungsprojekt November 2016

**H.-D. Eberhardt**

„Untersuchungen zur Intensivierung der Kühlung von Transnormmotoren - Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen.“ Abschlussbericht, März 2016

**St. Tenner**

„Rotierender Aktiver Gleichrichter für 2polige Turbogeneratoren - Experimentelle Untersuchungen.“, Februar 2016

**St. Michel**

„Entwicklung eines energieeffizienten Steuerungsverfahrens für maschinelle Verpackungsvorgänge“, Abschlussbericht zum ZIM-Forschungsprojekt, November 2016

**C. Evers**

„Auswahlkriterien für energieeffiziente elektrische Mehrachsantriebe“ Abschlussbericht zum FVA-Thema 673-III, Dezember 2016

**K. Benath**

„Energieoptimale Bewegungssteuerung von Wickel- und Stellantrieben mit variabler Getriebeübersetzung“. DFG-Abschlussbericht, Dezember 2016

### **3.3 Vorträge**

#### **Vorträge ohne Publikation**

**W. Hofmann:**

Wege zu energieeffizienten Industrie- und Fahrzeugantrieben., 597. Elektrotechnisches Kolloquium, Dresden, 22.Juni 2016

**W. Hofmann und St. Günther:**

Hochausgenutzte synchrone Reluktanzmaschinen für den Einsatz als elektrische Fahrmotoren. Technischer Tag der VEM, Wernigerode Okt. 2016

**W. Hofmann:**

Wege zu energieeffizienten elektrischen Fahrzeugantrieben. Innovation Day, Berghof GmbH, September 2016

**H. Barth:**

Entwicklung eines rückspeisefähigen Werkstattladegeräts. Innovation Day, Berghof GmbH, September 2016

## Forschungsvorträge

08.01.2016

---

**J. Döring**

*„Forschungsvortrag Transversalfeldreluktanzmaschine mit mechanisch robusten und elektromagnetisch hochausgenutzten Aktivteilen.“*

26.02.16

---

**M. Leubner**

*„Aktive Stabilisierung des eingangsseitigen LC-Filters am direkten Matrixumrichter durch eine Netzstromregelung.“*

11.03.2016

---

**M. Eckart**

*„Betriebskennfelder eines kleinen Windenergiegenerators.“*

01.04.2016

---

**N. Remus**

*„Filterauslegung beim hochsetzenden Matrixumrichter mit AC-Chopper.“*

22.04.2016

---

**Y. Zhang**

*„Auslegung und Messvorhaben von hochdynamischen Asynchronantrieben unter besonderer Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung.“*

11.06.2016

---

**S. Staudt**

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

24.06.2016

---

**P. Miska**

*„Entwurf, Simulation und Erstellung passiver EMV-Filter für hochfrequente DC/DC-Wandler im Rahmen netzkonformer Rückspeisung.“*

**L. Schlegel**

*„Regelverfahren zur hochdynamischen Drehmomentregelung großer elektrischer Maschinen unter Berücksichtigung der Parameterempfindlichkeit.“*

15.07.2016

---

**J. Pecho**

*„Entwurf von netzanlauffähigen permanentmagneterregten Synchronmaschinen.“*

29.07.2016

---

**S. Bosch**

*„Prädiktives Regelverfahren zur aktiven Kompensation von Verzerrungsströmen in Niederspannungsnetzen.“*

**A. Brix**

*„Erste Untersuchungen zu hybriden Energiespeichersystemen im elektrischen Fahr-antrieb - Modellierung, Dimensionierung, Betriebsstrategie.“*

02.09.2016

---

**S. Miersch**

*„Transiente Simulation des Luftspaltwärmeüberganges bei Taylor-Couette-Strömung.“*

23.09.2016

---

**A. Arias**

*„Modellierung des Z-Source Wechselrichters.1“*

23.10.2016

---

**P. Miska**

*„Entwurf, Simulation und Erstellung passiver EMV-Filter für hochfrequente DC/DC-Wandler im Rahmen netzkonformer Rückspeisung.“*

11.11.2016

---

**H. Barth**

*„Aufbau und Inbetriebnahme eines Kalorimeters zur Bestimmung der Gesamtverlustleistung eines Umrichters.“*

**N. Remus**

*„Kommutierung auf Basis der UCE-Spannungsmessung am AC-Chopper.“*

25.11.2016

---

**R. Seifert**

*„Thermohydraulischer Lineargenerator - Wirkprinzip, Design und technologische Herausforderungen.“*

15.12.2016

---

**G. Steinborn**

*„Modellbildung und energieoptimale Kühlungssteuerung.“*

## 25-jähriges Jubiläum des Darmstädter-Dresdner Doktoranden-seminars „Elektrische Maschinen und Antriebe“

Zum 25. Mal fand das Doktorandenseminar des Instituts für Elektrische Energiewandlung, TU Darmstadt, Prof. A. Binder, und des Elektrotechnischen Instituts, Lehrstuhl für Elektrische Maschinen und Antriebe, TU Dresden, Prof. W. Hofmann, statt, diesmal in Klingenthal/Sachsen vom 14.-18.9.2016.



Die Talsperre Muldenberg ist eine Talsperre im Vogtlandkreis des Freistaates Sachsen. Sie versorgt 100.000 Menschen in 21 Orten mit Trinkwasser und dient darüber hinaus dem Hochwasserschutz. Quelle: Wikipedia, privat

Bald nach der Wiedervereinigung Deutschlands 1989 beschlossen die beiden Institute (damals Elektrische Energiewandlung, TU Darmstadt, Prof. E.-Ch. Andresen und Elektrische Maschinen, TU Dresden, Prof. G. Müller), künftig den Austausch zwischen Ost und West in Deutschland auch auf dem Gebiet der E-Maschinen und Antriebe regelmäßig zu pflegen. So fand 1991 das erste Doktorandenseminar statt, bei dem die wissenschaftlichen Mitarbeiter und externen Doktoranden in abendlichen Vorträgen mit anschließender Fachdiskussion den aktuellen Stand ihrer Promotionsvorhaben vorstellen. Daneben werden tagsüber Fachexkursionen durchgeführt. In den ungeraden Jahren organisiert das Institut für Elektrische Energiewandlung, TU Darmstadt, dieses Treffen, in den geraden Jahren der Lehrstuhl der TU Dresden. Und so fanden im Darmstädter Haus im Kleinen Walsertal, im Chalet Giersch in den Savoyer Alpen, den Gästehäusern der TU Darmstadt, und an unterschiedlichen Orten in Sach-

sen, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Brandenburg sowie Tschechien seitdem regelmäßig im Spätsommer diese Seminare mit großem Erfolg statt. Von Seiten der TU Dresden begleitete Prof. Müller die Seminare bis 1995, sein Nachfolger Prof. Liese bis 2007 und seitdem dessen Nachfolger Prof. Hofmann; von der Darmstädter Seite bis 1997 Prof. Andresen und seitdem sein Nachfolger Prof. Binder.

Nun im 25. Jahr wurde dieses Seminar mit dem Thema „Leistungselektronik“ (Prof. Griepentrog, TU Darmstadt) erweitert, so dass über 40 Teilnehmer in Klingenthal dabei waren. So wird das Doktorandenseminar künftig unter dem Titel „Elektrische Maschinen, Antriebe und Leistungselektronik“ weitergeführt werden.

(Verfasser: A. Binder)

#### *Vorträge TU Darmstadt*

---

- Messenger, Gael  
Observer-based pole placement control for a double conical high-speed bearingless permanent magnet synchronous motor
- Kappes, Philipp  
Regelung einer Synchron-Reluktanzmaschine ohne Lagegeber
- Deusinger, Björn  
Rotorgeometrie-Konzepte für hochpolige Permanentmagnetmaschinen mit verborgenen Magneten
- Drozhzhin, Danil  
Suppression of conducted high frequency signals in aerospace DC/AC converters designed with SiC MOSFETs
- Holbein, Markus  
Dreiphasige Wechselrichter für unsymmetrische Lasten und Netze
- Schuster, Martin  
Two PMSMs and the influence of their geometry on common-mode bearing currents
- Bienholz, Markus  
Interaction of power electronics through the LV power grid
- An, Jeongki  
Analysis of sudden short-circuit current of interior permanent magnet synchronous machines.
- Smailus, Erik  
Entwicklung eines DCDC-Wandlers auf Basis der Dual Active Bridge Topologie mit leiterplattenintegriertem Planartransformator
- Montazeri, Ali  
Dynamic Programming-based optimal torque control of ASM
- Lehr, Marcel  
Design, construction and measurements of a permanent magnet axial flux machine
- Liu, Tao  
Servoantriebe für Industrieroboter

- Neusüs, Sascha  
Dimensionierung von Flussbarrieren für synchrone Reluktanzmaschinen
- Li, Xing  
Applications for Flywheel Energy Storage Systems: Residential Photovoltaic Installations
- Erd, Nicolas  
Applications for Flywheel Energy Storage Systems: Light Train Vehicles
- Sauer, Alexander  
Simulative Abschätzung der Verluste eines 3-Level Umrichters mittels Look-Up Tabellen
- Nguyen, Lich  
Concept for self-adapting and flexible power supply in remote areas/islands based on power electronics converters

#### *Vorträge TU Dresden*

---

- Arias, Arturo  
Modellierung des Z-Source Wechselrichters
- Bahr, Falk  
Flussbasierte Magnetlagerregelung mit integrierten Wismut-Hall-Sensoren
- Barth, Henry;  
Entwicklung eines DC/DC Wandlers mit bidirektionalem Energiefluss
- Brix, Arne  
Entwicklung eines DC/DC Wandlers mit bidirektionalem Energiefluss
- Eckhardt, Martin  
Retrofit eines PM Generators mit Blick auf die thermische Ausnutzung
- Stephan, Günther  
Hochausgenutzte synchrone Reluktanzmaschinen für den Einsatz als elektrische Fahrmotoren.
- Leubner, Martin  
Vergleich von einem passivem und einem aktivem Dämpfungsverfahren für den direkten Matrixumrichter
- Michel, Stephan  
Entwicklung eines energieeffizienten Steuerungsverfahrens für maschinelle Verpackungsvorgänge - ZIM-Kooperationsprojekt KF2306504PK3
- Micklitz, Tobias  
Berechnungsmodell für die Wicklungsstäbe großer Synchronmaschinen
- Seifert, Robert  
Thermohydraulischer Lineargenerator
- Steinborn, Gunnar  
Kühlungssteuerung & Modellbildung eines elektrischen Fährantriebs
- Windisch, Thomas  
Online-optimale Betriebsweise von permanent-erregten Synchronmaschinen mit Reluktanzeffekt

- Zhang, Yuanpeng  
Messvorhaben von hochdynamischen Asynchronantrieben unter besonderer Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung
- M. Sc. Swen Bosch, Hochschule Aalen  
Prädiktives Regelverfahren zur aktiven Kompensation von Verzerrungsströmen in Niederspannungsnetzen
- Pecho, Johann, Siemens  
Bestimmung des Einschaltstromes und Einschaltmomentes eines Asynchronmotors mit eingepprägtem Gleichfeld
- Ludwig Schlegel, M & P Dresden  
Regelverfahren zur hochdynamischen Drehmomentregelung großer elektrischer Maschinen unter Berücksichtigung der Parameterempfindlichkeit
- Stefan Staudt, Hochschule Aschaffenburg  
Arbeitspunktabhängige Optimierungen und Regelverfahren für eine Synchron-Reluktanzmaschine als Traktionsantrieb

### 3.4 Kooperation

#### IAESTE – Praktikanten

**Ernest Owusu Bediako – Ghana** / Betreuer: Falk Bahr  
*“Signal conditioning electronics for Hall sensors.”*

**Jorge Perez – Nicaragua** / Betreuer: Nico Remus  
*“Design of diode clamped circuit for the direct matrix converter.”*

**Okan Bayrak – Türkei** / Betreuer: Arne Brix  
*“Design of a heuristic Energy Management Strategy for a Hybrid energy Storage System in full Electric Vehicles.”*

**Renchindorj Chuluunbataar – Mongolei** / Betreuer: Yuanpeng Zhang  
*“Field Oriented Control of 3-Phase AC-Motors.”*

**Asaad Makhalfih – Palästina** / Betreuer: Chris Evers  
*“Surge protection and thermal cutoff in supercapacitor modules.”*

**Seethal Ramadas Menon - Indien** / Betreuer: Stephan Günther  
*“Electromagnetic FEA of Traction Drives.”*

**Enas Othman – Palästina** / Betreuer: Tobias Micklitz  
*“Design and Operation of Electrical Machines.”*

**Divya Mishra – Indien** / Betreuer: G. Steinborn  
*„ Loss and heat calculation for a 3-phase induction motor, „*

**Mulham Soudan – UAE** / Betreuer: Th. Windisch  
*„Discrete current and flux control for an induction machine in a vehicle application „*

**Wael Hassanieh – Libanon** / Betreuer: R. Seifert  
*„Thermal Analysis of a Tubular-PM-Synchronous-Lineargenerator“*

**Ioan Gindea – Romania / Betreuer: Robert Seifert**  
*“Design and Simulation of the Mechanical Structure of the Translator a Thermohydraulic Linear Generator.”*

**Navin Angkanavin – Thailand / Betreuer: A. Arias**  
*“Measurement on test Bed.”*

**André Palhares de Magalhaes – Brasilien / Betreuer: H. Barth**  
*„Surge protection and thermal cutoff in supercapacitors modules“*

**Thais Franco – Brasilien / Betreuer: M. Leubner**  
*„Grid power control of an permanent magnet synchronous machine attached to a wind turbine in Simulink.“*

**Daria Petrenko – Russland / Betreuer: T. Micklitz**  
*„Application of soft magnetic composites in electrical machines.“*

### 3.5 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 – 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. Energieoptimale Bewegungssteuerung von Wickel- und Stellantrieben mit variabler Getriebeübersetzung  
DFG – HO 1483/63-1 2012 - 2016
2. Aktive verlustarme Magnetlager hoher Steifigkeit und Präzision mit integrierter Induktionsmessung und schneller Leistungselektronik  
DFG HO – 1483/64-2 2016 - 2018
3. Eisenlose Axialfluss-Permanentmagnet-Synchronmaschine mit Keramikwicklungs-träger für Schwungradspeicher  
DFG HO – 1483/77-1 2016 - 2018
4. Verlustarmer Umrichter mit SiC-Bipolartransistoren durch angepasstes Treiberdesign und Schätzung des Laststromverlaufs.  
DFG – HO 1483/62-1+2, 2015 - 2017
5. Energieoptimale Drehmomentsteuerung und Auslegung von hochdynamischen Asynchronantrieben unter besonderer Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung.  
DFG – HO 1483/60-1+2, 2011 - 2016
6. Generalized Space Vector Modulation for Impedance Source Inverters Applied to Fuel-Cell-Based Isolated Electric Power Generation.  
DFG - HO 1483/53-1 bis 3, 2008 - 2017
7. Diagnose von Mikrobürstenfeuer bei Reibkontaktierung von Graphit/Graphit-Bürsten/Schleifringssystemen.  
DFG - HO 1483/54-1 bis 3, 2009 – 2017

8. Verlustarme magnetische Radial-/Axiallagerung unter Verwendung von Pulververbundwerkstoffen  
DFG - HO 1483/55-1 bis 3, 2009 - 2017
9. Direkte Regelung der Netz- und Lastgrößen eines Matrixumrichters mit optimalen netz- und lastseitigen Filtern.  
DFG - HO 1483/59-1 2010 – 2017
10. Aktive Dämpfung filterbedingter eingangsseitiger Oberschwingungen am Matrixumrichter als Antriebsumrichter für direkte und PWM-basierte Regelverfahren  
DFG - HO 1483/59-2, 2013 - 2017
11. Hochausgenutzte synchrone Reluktanzmotoren durch lokale Beeinflussung der magnetischen Eigenschaften des Elektroblechs beim Laserschneiden  
DFG - HO 1483/69-1, 2013 - 2017
12. On-line Verfahren zur energieeffizienten Betriebsweise von hochausgenutzten elektrischen Antrieben  
DFG - HO 1483/67-1, 2014 – 2016
13. Maschinenwicklungen in Kombinationsschaltung  
DFG - HO 1483/71, 2014 – 2017
14. Theoretische Grundlagen zur Verknüpfung von thermohydraulischer und thermoelektrischer Leistungswandlung in einem Aggregat - Thermohydraulischer Linear-generator  
DFG - HO 1483/72, 2015 – 2017
15. Neue Generatoranordnung mit der doppelgespeisten Asynchronmaschine für besseres Verhalten beim Durchfahren von Netzfehlern  
DFG - HO 1483/74, 2015 – 2018

### *Industrieprojekte*

---

1. F/E-Arbeiten zur intensiven Kühlung von Transnormmotoren  
2010 - 2016
2. Binova; Softwareentwicklung und –test für Regelstruktur Mittelmotor  
2016
3. Siemens; Verfeinerte Schwingstromverlustbetrachtung von Turbogeneratoren  
2016

### *FVA Forschungsvereinigung Antriebstechnik*

---

1. Auswahlkriterien für energieeffiziente elektrische Mehrachsen-Servoantriebe  
2015 – 2016

## *BMBF*

---

1. Elektrifiziertes Lastenrad für urbanen Wirtschaftsverkehr  
2013 – 2016
2. Rotierender aktiver Gleichrichter  
2013 - 2016
3. Schaufenster Elektromobilität  
2013 – 2016
4. KLEE; Energieeffiziente Prädikative Antriebsregelung und Kühlungssteuerung  
2013 – 2016

## *ZIM*

---

1. Bidirektionales Ladegerät  
2015 – 2018
2. Entwicklung eines energieeffizienten Steuerungsverfahrens für maschinelle Verpackungsvorgänge  
2014 – 2016

## *Forschungspool*

---

1. Prädikative Entscheidungsmodelle für effiziente Leistungsfluss in Logistikanlagen  
2016
2. Eisenlose Axialflussmaschine für Schwungradspeicher  
2015 – 2016

## 4.3 Dissertationen

*Jörg Schützold*

### **Auswahlssystematik für energieeffiziente quasistationäre elektrischer Antriebssysteme – am Beispiel von Pumpen- und Förderbandanlagen**

Zusammenfassung:

Rund 70 % der Energieaufnahme von elektrischen Antriebssystemen wird von quasistationären Antrieben in Transportanlagen hervorgerufen. Zur Steigerung der Energieeffizienz dieser Transportanlagen werden in dieser Arbeit Methoden zur Auslegung der zugehörigen Antriebssysteme unter besonderer Berücksichtigung des Förderprozesses erarbeitet. Als repräsentative Transportanwendungen werden Pumpen- und Förderbandanlagen untersucht.

Dabei wird das gesamte elektromechanische System analysiert, um das volle Energiesparpotenzial zu erfassen - beginnend mit dem Lastprofil des transportierten Förderguts bis hin zur elektrischen Energieversorgung. Darauf aufbauend erfolgt die Erarbeitung praktikabler Projektierungshinweise und prozessspezifischer Auswahlprogramme, welche eine schnelle Vorauswahl der energieeffizientesten Antriebstopologie ermöglichen

*Rahmat Suryana*

### **Optimal Operation of Wind Power Plants with Doubly-fed Induction Generators under Considerations to Network Operation Regulations.**

Abstract:

The goal of this research is to develop control methods of wind power plant with doubly-fed induction generator in contribution to the network frequency and voltage stability. Then, the wind power generator must be controlled in the optimal operation point by implementing the maximum power point tracking (MPPT) method, distributing reactive power generation for getting the minimum power losses, and exploiting the kinetic energy. Two power system models for frequency analysis based on an isolated and an interconnected power system were developed. The network operator regulations were summarized. The wind power plants cannot be disconnected from the power system immediately during network frequency and voltage disturbances. Then, they must contribute to support the frequency and voltage control. A frequency control method of wind power plant combining two control methods based on pitch control and kinetic energy was developed, simulated, and investigated experimentally. This method can act very fast and support the frequency control in long period. Full contribution of wind power plants to the frequency control using the combination method was simulated and investigated experimentally. The wind power plants can control the network frequency without supporting from conventional power plants. All wind power plants are coordinated by a wind farm control center. They are divided

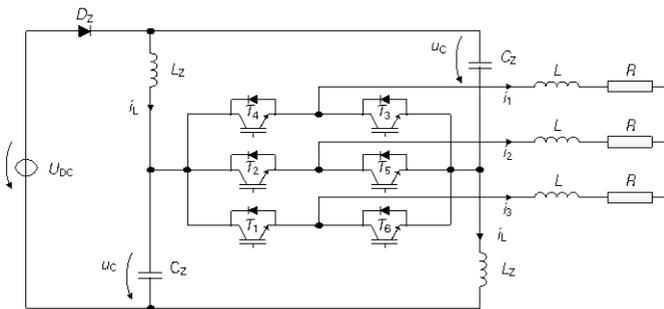
into two groups. The first group will discharge kinetic energy and the second group will deliver the reserve power to the network if the frequency disturbance happens. A power system model for voltage analysis was developed. A voltage control method of wind power plant was developed, simulated, and investigated experimentally. The wind power plants deliver additional reactive power for controlling the network voltage. Simulation using Matlab/Simulink Power Systems was done. The experiment using a wind power plant model was completed. A 15 kW induction motor represented a wind turbine. A 4 kW doubly-fed induction generator was controlled interactively in PC using dSPACE controller board 1103. The simulation and experimental investigation results proved the effectiveness of frequency and voltage control methods of wind power plant with doubly-fed induction generator.

## 4.4 Ausgewählte Forschungsergebnisse in Kurzform

*M.Sc. Arturo A. Arias M.*

### Berechnung des stationären Vorganges in Wechselrichtern

Der stationäre Zustand einer Variablen ist der Zustand, nach dem alle flüchtigen Vorgänge abgeklungen sind. Bei Wechselrichtern gibt es mehrere Vorgänge, die die Berechnung des stationären Zustands erschweren, wie zum Beispiel die Sequenz von Schaltzustände  $1, 2, \dots, n, \dots, N$ , wobei der Endwert des Schaltzustandes  $n - 1$  dem Anfangswert des Schaltzustandes  $n$  entspricht. Die Zustandsraumdarstellung des Schaltzustandes ist  $\underline{\dot{x}}(t) = \underline{A}_n \cdot \underline{x}(t_{n-1}) + \underline{B}_n \cdot \underline{u}$ , wobei  $\underline{x}$  bzw.  $\underline{u}$  der Zustand- bzw. Eingangsvektor ist, und  $\underline{A}_n$  bzw.  $\underline{B}_n$  die System- bzw. Eingangsmatrix ist. Jeder Schaltzustand hat eigene System- und Eingangsmatrizen. Die Lösung der Zustandsgleichung ist  $\underline{x}(t) = \underline{\Phi}_n \cdot \underline{x}(t_{n-1}) + \underline{\Gamma}_n$ , wobei  $\underline{\Phi}_n = \exp(\underline{A}_n(t - t_{n-1}))$  und  $\underline{\Gamma}_n = (\underline{\Phi}_n - \underline{I}) \cdot \underline{A}_n^{-1} \cdot \underline{B}_n \cdot \underline{u}$ . Wir betrachten die diskreten Schaltzustände an den Zeitpunkten  $t_0, t_1, \dots, t_n, \dots, t_N$  gegeben durch die Pulsweitenmodulation, PWM. Demzufolge ist der Zustandsvektor des letzten Schaltzustands  $\underline{x}(t_N) = \underline{\Phi}_N \cdot \underline{x}(t_{N-1}) + \underline{\Gamma}_N$ . Das ist eine Rekursionsgleichung, dann beim Ersetzen alle Rekursionsschritte bis Rekursionsanfang ergibt  $\underline{x}(t_N) = \underline{F} \cdot \underline{x}(t_0) + \underline{G}$ , wobei  $\underline{F} = \underline{\Phi}_N \cdot \dots \cdot \underline{\Phi}_2 \cdot \underline{\Phi}_1$  und  $\underline{G} = \underline{\Gamma}_N + \sum_{j=1}^{N-1} \underline{\Phi}_N \cdot \underline{\Phi}_{N-1} \cdot \dots \cdot \underline{\Phi}_{N-j+1} \cdot \underline{\Gamma}_{N-j}$ . Auf Grund der Periodizität ist  $\underline{x}(t_N)$  gleich  $\underline{x}(t_0)$ , demzufolge  $\underline{x}(t_0) = (\underline{I} - \underline{F})^{-1} \cdot \underline{G}$ . Mit dem Anfangszustand bei  $t_0$ , werden alle diskreten Schaltzustände berechnet (stationärer Vorgang). Als Beispiel betrachten wir den Z-Source Wechselrichter, Fig.1. Der Zustands- bzw. Eingangsvektor ist  $\underline{x} = [i_1 \ i_2 \ i_L \ u_C]^T$  bzw.  $\underline{u} = U_{DC}$ . Figure 2 stellt die Berechnung des stationären Vorganges dar. Im Vergleich werden auch simulierte (mit PLECS) Ergebnisse dargestellt. Beachten Sie, dass der berechnete Vorgang diskret, und der simulierte Vorgang kontinuierlich ist. Die Schaltwerte von berechneten und simulierten Vorgängen stimmen zum Schaltpunkt überein.



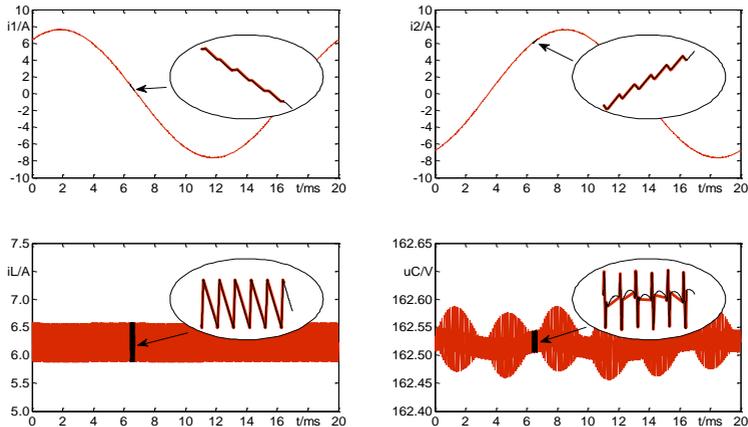
**Fig. 1:** Z-Source Wechselrichter / Z-source inverter, Parameter:  $L=20$  mH,  $R=10$   $\Omega$ ,  $L_Z=1.2$  mH,  $C_Z=820$   $\mu$ F and  $U_{DC}=150$  V.

## Steady-State Calculation in Three-Phase Inverters

Steady state is the condition of a specified variable at a time when no transients are present. In three-phase inverters there are multiple events that difficult the determination of the steady state. For example we have a sequence of periodic switching states  $1, 2, \dots, n, \dots, N$ , where the final condition of the switching state  $n - 1$  is the initial condition of the switching state  $n$ . The state space representation of the  $n^{\text{th}}$  switching state is given by  $\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A}_n \cdot \underline{x}(t_{n-1}) + \underline{B}_n \cdot \underline{u}$ , where  $\underline{x}$  and  $\underline{u}$  are the state and the input vector respectively, and  $\underline{A}_n$  and  $\underline{B}_n$  are the system and the input matrix respectively. Every switching state has its own system and input matrices. The solution of the state space equation is given by  $\underline{x}(t) = \underline{\Phi}_n \cdot \underline{x}(t_{n-1}) + \underline{\Gamma}_n$ , where

$\underline{\Phi}_n = \exp(\underline{A}_n(t - t_{n-1}))$  and  $\underline{\Gamma}_n = (\underline{\Phi}_n - \underline{I}) \cdot \underline{A}_n^{-1} \cdot \underline{B}_n \cdot \underline{u}$ , where  $\underline{I}$  is the identity matrix.

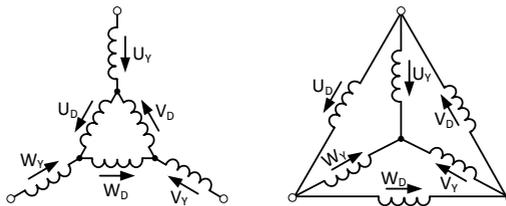
We are interested just on the discrete switching points  $t_0, t_1, \dots, t_n, \dots, t_N$  given by the pulse width modulation, PWM. Thus, the state vector at the last switching point is  $\underline{x}(t_N) = \underline{\Phi}_N \cdot \underline{x}(t_{N-1}) + \underline{\Gamma}_N$ . Since this is a recursive equation, replacing every recursion step until the base case yields  $\underline{x}(t_N) = \underline{F} \cdot \underline{x}(t_0) + \underline{G}$ , where  $\underline{F} = \underline{\Phi}_N \dots \underline{\Phi}_2 \cdot \underline{\Phi}_1$  and  $\underline{G} = \underline{\Gamma}_N + \sum_{j=1}^{N-1} \underline{\Phi}_N \cdot \underline{\Phi}_{N-1} \dots \underline{\Phi}_{N-j+1} \cdot \underline{\Gamma}_{N-j}$ . Because of periodicity,  $\underline{x}(t_N)$  equals  $\underline{x}(t_0)$ , and therefore,  $\underline{x}(t_0) = (\underline{I} - \underline{F})^{-1} \cdot \underline{G}$ . Knowing the initial state at  $t_0$ , all discrete switching points are calculated (steady-state response). As an example we consider the Z-source three-phase inverter, see Fig.1. The state and the input vectors are  $\underline{x} = [i_1 \ i_2 \ i_L \ u_C]^T$  and  $\underline{u} = U_{DC}$ , respectively. Figure 2 shows the calculation of the steady state. To demonstrate the accuracy of the calculation, simulated results (in PLECS) are plotted. Note that the calculated response is a discrete function and the simulated response is a continuous function. The values of the calculated response agree with the simulated response at the switching points.



**Fig.2:** Rechen- und Simulationsergebnisse bei  $f=50$  Hz,  $f_s=9600$  Hz, Modulationsindex  $M=0,99$  und Kurzschlussastgrad  $D=0,1$  / Calculation and simulation results

## Verbesserung des Grundwellenwicklungsfaktors und des Statorfeld-Oberwellengehaltes durch den Einsatz von kombinierten Stern-Dreieck Statorwicklungen

Kombinierte Wicklungen können als Stern-Dreieck oder als Dreieck-Stern Variante ausgeführt werden (Fig. 1), die sich hinsichtlich der Verschaltung der zum jeweiligen Dreiecks- bzw. Sternteil gehörenden Spulen unterscheiden.

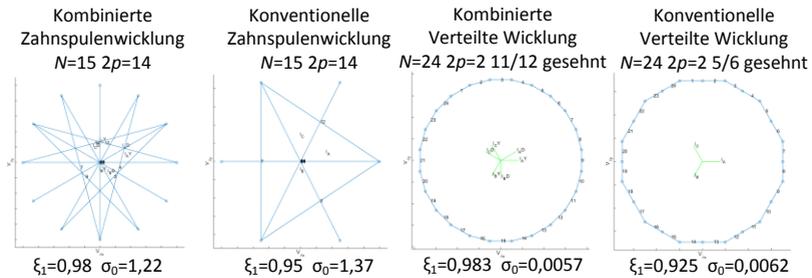


**Fig. 1:** Stern-Dreieck (links) und Dreieck-Stern Variante (rechts) für 3 Phasen  
Star-delta (left) and delta-star combination (right) for three phases

Die aufgeführten Schaltungen steigern die Phasenzahl von drei auf sechs. Beide Varianten haben gemein, dass die Phasenlage im Dreiecksteil um  $30^\circ$  elektrisch voreilt, sowie dass der Effektivwert des Stroms im Dreiecksteil um den Faktor  $\sqrt{3}$  geringer ist. Dementsprechend muss die Windungszahl im Dreiecksteil um das  $\sqrt{3}$ -fache erhöht werden, um die gleiche Durchflutung zu erzeugen. Sinnvoll ist es, dass im Uhrzeigersinn betrachtet immer Dreiecks- und Sternteil aufeinander folgen (Stern-Dreieck-Variante). Dadurch ergibt sich aufgrund der gegenteiligen Auswirkungen von räumlicher Verschiebung und Phasenverschiebung eine bestmögliche Addition der Spannungszeiger und somit ein gesteigerter Wicklungsfaktor. Weiterhin ist das Oberwellenspektrum des Statorrehfeldes bei kombinierten Wicklungen niedriger besetzt als bei dreiphasigen Wicklungen. Während sich die Grundwellen gleichphasig überlagern, löschen sich beispielsweise die 5te und 7te Harmonische aufgrund einer Phasenverschiebung zwischen Stern- und Dreiecksteil um  $180^\circ$  aus. Fig. 2 zeigt Beispiele für Görgespolygone von konventionellen sowie kombinierten Zahnspulen- und verteilten Wicklungen. Der Grundwellenwicklungsfaktor  $\xi_1$  wird durch den Übergang zu kombinierten Wicklungen verbessert und gleichzeitig der Oberwellenstreu- koeffizient  $\sigma_0$  gesenkt. Der Koeffizient  $\sigma_0$  ist dabei allgemein als Summe der Quadrate der Feld-Harmonischen bezogen auf die Grundwelle definiert. Durch Einsatz von kombinierten Wicklungen können die Verluste bei gleichem Materialeinsatz meist deutlich reduziert werden [1].

## Improved fundamental winding factor and harmonic stator field content by use of combined star-delta stator windings

Combined windings can be built in star-delta or delta-star combination. Both possibilities are shown in Fig. 1. Combined windings are also called semi-six-phase windings [2], because they show a phase shift of  $30^\circ$ . Thereby the phase shift of the delta connected coils is always electrically advanced. Furthermore the currents of the delta connected coils are smaller by factor  $\sqrt{3}$ . Therefore the number of turns must be increased in the delta connected coils by factor  $\sqrt{3}$  in order to obtain the same flux linkage in every coil. The fundamental winding factor will be maximized, if the voltage phasor and slot offset neutralize. The harmonic spectrum of the magnetic stator field of machines with combined windings is of smaller content, as of the field of machines with classical three phase windings. While the fundamental waves of star and delta connected coils add up, some harmonics cancel each other, because there phases are shifted  $180^\circ$ . Those are for example the 5<sup>th</sup> and 7<sup>th</sup> harmonic. Fig. 2 shows examples of Görges-polygons of classical and combined windings of tooth coil (left) and distributed windings (right).



**Fig. 2:** Beispiele für Görges-polygone von Zweischichtwicklungen  
Examples of Görges-polygons for two layer windings

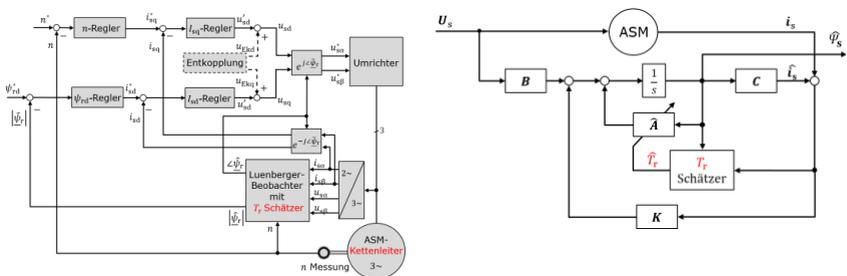
It shows that combined windings increase the fundamental winding factor  $\xi_1$  and decrease the double-linkage leakage coefficient  $\sigma_0$ , which is the sum of the squared field harmonics divided by the fundamental harmonic. The use of combined windings can reduce the losses of a machine compared with classical three phase windings [1].

## Literature

- [1] H. Kasten, Verbesserung der Betriebseigenschaften elektrischer Maschinen durch den Einsatz kombinierter Wicklungen, Dissertation, TU Dresden, Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und Antrieben, Band 5, Shaker Verlag, Aachen, 2015
- [2] M. V. Cistelecan, F. J. T. E. Ferreira, M. Popescu, Adjustable Flux Three-Phase AC Machines with Combined Multiple-Step Star-Delta Connections, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 25, No. 2 pp. 348-355, 2010

## Parameteridentifikation von Asynchronmaschinen bei hoher Drehmomentdynamik und transientser Stromverdrängung

An moderne stromrichterbetriebene Drehstromantriebe werden wachsende Anforderungen bezüglich einer hohen Drehmomentdynamik gestellt. Jedoch erfordert die schnelle Drehmomentänderung eine entsprechend schnelle Änderung der Wicklungsströme, die zur Anregung der Stromverdrängung in den Rotorstäben von Käfigläufermotoren führt. Die infolge der transienten Stromverdrängung sich ergebende dynamische Änderung der Rotorparameter führt zu einer falschen Berechnung der Entkopplung und zu einer falschen Einschätzung des Flusswinkels. Im Verlaufe der Forschung konnte gezeigt werden, dass die durch die transiente Stromverdrängung verursachte Parameteränderung durch das Identifikationsverfahren mit einem Luenberger-Beobachter in Echtzeit nachgeführt werden kann. Fig. 1 zeigt die prinzipielle Anordnung des adaptiven Regelverfahrens mit der Adaption der Rotorparameter. Dabei wird die Rotorzeitkonstante  $T_r$  mit einem „ $T_r$ -Schätzer“ kontinuierlich nachverfolgt. Die Rotorzeitkonstante errechnet sich aus dem Fehlervergleich von modellierten und gemessenen Statorstrom. Der Rotorfluss kann damit insbesondere bei der Rotorparameteränderung genau ermittelt werden. Fig. 2 zeigt die  $T_r$ -Adaptionsvorgänge jeweils mit einem I-Regler nach [1] und einem PI-Regler nach [2] für einen 170 kW-Asynchronmotor mit Hochstäben und damit ausgeprägtem Stromverdrängungseffekt. Vor 1,5 s erfolgt eine Vormagnetisierung und ein Hochlauf auf die Nenndrehzahl von  $500 \text{ min}^{-1}$ . Ab 1,5 s tritt ein Lastmomentwechsel zwischen Negativwert und Positivwert des Bemessungsmoments von 3247 Nm im Abstand von 0,2 s auf. Dabei sind häufige Drehmomentwechsel in der  $T_r$ -Adaption deutlich erkennbar. Der Beobachter mit PI-Struktur hat leichte Einstellungs Vorteile bei dynamischen Untersuchungen.



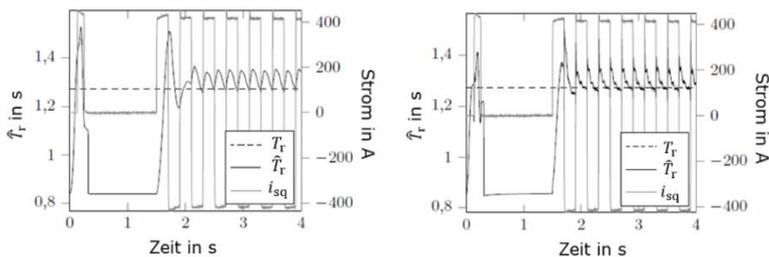
a) Regelstruktur / Control structure

b) Beobachter mit  $T_r$ -Schätzung / Observer with  $T_r$ -estimation

**Fig. 1:** Adaptive Regelverfahren mit dem Luenberger-Beobachter  
Adaptive control method with Luenberger observer

## Parameter identification of induction motors with high torque dynamics and transient skin effect

A high torque dynamic is demanded in modern power converter powered AC drives for a high productivity. The rapid change of torque, however, requires a correspondingly rapid change of the winding currents, which leads to stimulation of transient skin effect in the rotor bars of squirrel-cage motors. The skin effect, in turn, leads to a dynamic change in the rotor parameters, and therefore, an incorrect calculation of the decoupling and the flux angle. During the research, it was shown that the rotor parameter change caused by the transient skin effect can be effectively adapted by means of the on-line parameter identification procedure with Luenberger observer. Fig. 1 shows the basic structure of the adaptive control method with the adaptation of the rotor parameters. The rotor time constant  $T_r$  is continuously tracked with the " $T_r$  estimator". The rotor time constant is calculated from the error comparison of the modeled and measured stator currents. The rotor flux can thus be accurately determined, especially in the case of the rotor parameter change. Fig. 2 shows the  $T_r$  adaptation processes with an I-controller according to [1] and a PI-controller according to [2] for a 170 kW induction motor with high bars and thus a marked transient skin effect. A pre-magnetization and a ramp-up to the nominal speed 500  $\text{min}^{-1}$  are carried out before 1.5 s. From 1.5 s, a load torque change occurs between the negative value and the positive value of the rated torque of 3247 Nm with a period of 0.2 s. Frequent torque changes are clearly visible in the  $T_r$  adaptation. The observer with PI-controller has slight adjustment advantages in dynamic processes.



(a) Adaption mit I-Regler  
(b) Adaptation with I-Controller

(b) Adaption mit PI-Regler  
Adaptation with PI-controller

**Fig.2:** Adaption mit Luenberger-Beobachter für hohe Drehmomentdynamik  
Results of adaption by Luenberger-observer with high torque dynamics

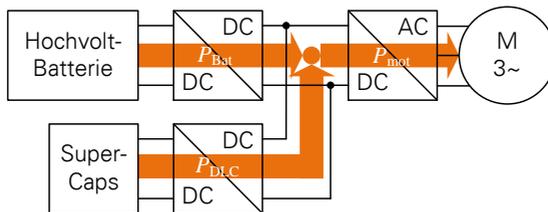
## Literature

[1] Kubota, H.; Matsuse, K.: Simultaneous estimation of speed and rotor resistance of field oriented induction motor without rotational transducers. IEEE PCC 1993, Yokohama, Proc.; S. 473-477

[2] Guo, S.; Li, Z.: Induction Motor Vector Control based on Adaptive Identification of Rotor Resistance. International Conference on Control Engineering and Communication Technology (ICCECT), Shenyang, 2012

## Betriebsstrategie eines hybriden Energiespeichersystems im elektrischen Antriebsstrang autonomer Fahrzeuge

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes *Kombinierte Logik für Energieeffiziente Elektromobilität (KLEE)* wird eine vorausschauende Betriebsstrategie für ein hybrides Energiespeichersystem untersucht. Das hybride Energiespeichersystem besteht aus einer Lithium-Ionen Batterie und einem Doppelschichtkondensator. Beide Speicherkomponenten sind über einen DC/DC-Wandler mit dem Zwischenkreis verbunden (Fig. 1). Dadurch ist es möglich, die vom Antrieb geforderte Leistung aktiv auf die beiden Speicherelemente zu verteilen. Die Aufgabe der Betriebsstrategie besteht darin, die Leistungsaufteilung so zu gestalten, dass die Belastung der Batterie minimiert wird. Durch die Streckenplanung, die für das autonome Fahren benötigt wird, ist eine zuverlässige Vorhersage des zukünftigen Lastprofils möglich. Diese Vorhersagedaten werden im Projekt *KLEE* zur Optimierung der Betriebsstrategie verwendet. Die im Doppelschichtkondensator gespeicherte Energie kann so effektiver genutzt werden, so dass eine Verringerung der benötigten Speicherkapazität des Doppelschichtkondensators zu erwarten ist.

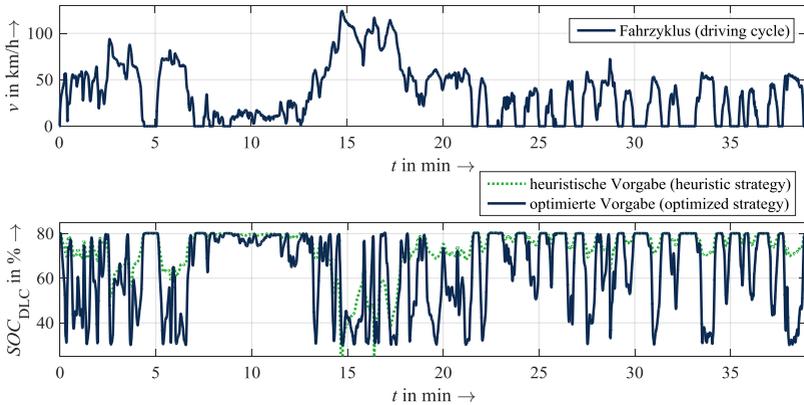


**Fig. 1:** Struktur des elektrischen Fahrtriebs mit hybridem Energiespeichersystem  
Structure of the electric drive including the hybrid energy storage system

In ersten Untersuchungen wurde davon ausgegangen, dass das komplette Lastprofil bekannt ist. Für den in Fig. 2 dargestellten Fahrzyklus, den der Projektpartner IAV GmbH bereitgestellt hat, wurde Betriebsstrategie berechnet, die den Effektivwert des Batteriestroms minimiert. Im Vergleich zu einer heuristischen Betriebsstrategie die so entstandene Referenzstrategie die Ausnutzung des Doppelschichtkondensators und reduziert die Verlustleistung der Batterie. In Fig. 2 ist zu erkennen, dass bei Fahrvorgängen mit kleinen Geschwindigkeiten und Anwendung der optimierten Betriebsstrategie der Ladegrad des Doppelschichtkondensators ( $SOC_{DLC}$ ) kleiner wird, als bei der heuristischen Strategie. Daraus lässt sich schließen, dass während eines Beschleunigungsvorgangs dem Doppelschichtkondensator mehr Energie entnommen und somit die Batterie entlastet wird. Das zeigt sich auch im Effektivwert des Batteriestroms, der gegenüber der heuristischen Strategie um 16% reduziert werden konnte und bei der durchschnittlichen Verlustleistung der Batterie, die um 28% kleiner ist.

## Operating Strategy for a hybrid energy storage system in the Electric Drive Train of Autonomous Vehicles

As part of the project *KLEE* (Combined Logic for Energy Efficient Electromobility), funded by the *BMBF*, a predictive operating strategy for a hybrid energy storage system is being investigated. The hybrid energy storage system consists of a lithium ion battery and a double layer capacitor. Both storage components are connected to the DC-link via DC/DC-converters (Fig. 1). This way it is possible to actively control the gathering of the power required by the electric drive from the two storage components. The task of the operating strategy is to compose a power flow that minimizes the load on the battery. The route planning, which is required for the autonomous driving, allows a trustworthy prediction of the future load profile. In the project *KLEE*, these forecast dates are used to optimize the operating strategy. Thus, the energy stored in the double layer capacitor can be used more effective. As a result, a reduction of the required storage capacity of the double layer capacitor is expected.



**Fig. 2:** Fahrprofil (oben) und Ladegrad des Doppelschichtkondensators (unten)  
Driving cycle (above) and state of charge of the double layer capacitor (below)

In initial investigations, an operating strategy, which minimized the rms value of battery current, was calculated assuming the complete load profile. The used driving cycle is shown in Fig. 2 and is provided by the project partner IAV GmbH. Compared to a heuristic operating strategy, the utilization of the double-layer capacitor can be improved and the power loss of the battery can be reduced. The lower half of Fig. 2 depicts a reduced state of charge of the double capacitor ( $SOC_{DLC}$ ) during driving operations at small speeds. In conclusion, more energy is extracted from the double layer capacitor during an acceleration process. Thus, the battery is unloaded. This fact also shows up in the rms value of the battery current, which could be reduced by 16% compared to the heuristic strategy. The required energy could be reduced by 28%.

## Entwicklung eines Werkstattladegeräts mit Netzurückspeisung für das intelligente Laden von Kfz-Kleinspannungsbatterien

Im Rahmen eines von dem Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) geförderten Forschungsprojekts arbeiten die Berghof Automation GmbH und die Professur an der Entwicklung eines Ladegeräts für Bordnetz-Batterien. Das Aufgabenpaket der Professur sieht dabei Untersuchungen zur Realisierung einer bidirektionalen einstufigen DC/DC-Wandlertopologie vor. Die Grundstruktur des Ladegeräts, welches mit einer Eingangsspannung von 200–350 V, einer Ausgangsspannung von 7–20 V und einer Spitzenleistung von 2 kW arbeitet, ist in Abb. 1 zu sehen.

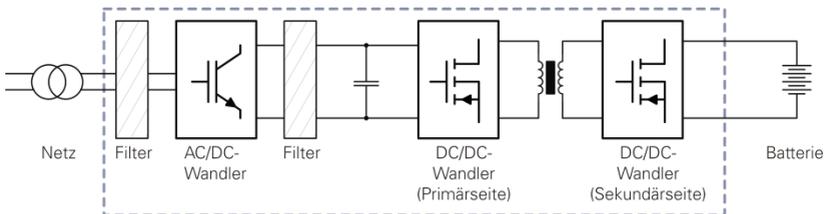


Fig. 1: Grundstruktur des bidirektionalen Werkstattladegeräts

Ausgangspunkt der Untersuchungen ist der in (J. Sabate, 1990) vorgestellte und in (AG, 2014) entwickelte Zero-Voltage-Transition (ZVT) Stromrichter. Der in der Topologie enthaltene Hochfrequenztransformator erfüllt dabei die Forderung nach galvanischer Trennung zur Batterie-seite. Gleichmaßen wird er für die geforderte Umwandlung zwischen Niederspannung und batterie-seitiger Kleinspannung benötigt sowie zur Realisierung einer hohen gravimetrischen Leistungsdichte.

Neben dem störungsempfindlichen Aufbau der Topologie stellt vor allem die Ansteuerung der primär- und sekundärseitig etablierten Vollbrücken mit 150 kHz Schaltfrequenz eine Herausforderung dar. Während des Ladens der Batterie funktioniert die Topologie ähnlich einem Tiefsetzsteller. Dabei muss die Sättigung des Transformators auf jeden Fall vermieden werden, um einen fehlerfreien Betrieb der Schaltung zu gewährleisten. Zur Minimierung der Verlustleistung ist die Totzeit zwischen den Schaltern einer Halbbrücke an die Stromstärke im Transformator ständig anzupassen. Auf diese Weise können Resonanzerscheinungen zwischen der Streuinduktivität des Transformators und der Schalterkapazität ausgenutzt werden. Im Entladebetrieb muss die Schaltung ähnlich einem Hochsetzsteller genutzt werden, sodass die Gefahr einer rapiden Stromänderung durch den Transformator oder eine eingebaute Filterdrossel besteht. Dies hätte eine destruktive Überspannung zur Folge. Unter Berücksichtigung der Leistungsdichte kann aufgrund der hohen Schaltfrequenz durch den Einsatz von Siliziumcarbid Halbleitern auf der Primärseite eine Verlustreduktion erwartet werden. Auch der Einsatz von GaN-Halbleitern auf der Sekundärseite bei Stromstärken über 100 A sollte die Verluste der Schaltung reduzieren.

## Development of a workshop charger with bidirectional energy flow for intelligent charging of onboard starter batteries

Funded by the Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) the Berghof Automation GmbH and the Chair are working on the development of a charger for onboard power starter batteries. Researches to realize a single stage DC/DC-converter is main task within the chairs work schedule. The basic setup of the whole charger can be seen in Fig. 1. It works with an input voltage of 200-350 V, an output voltage of 7-20 V and realizes up to 2 kW peak power condition.

The research is based on the converter topology first proposed in (J. Sabate, 1990) and developed in (AG, 2014). The high frequency transformer is needed to implement the required galvanic isolation. Additionally, it accomplishes the wanted voltage transfer ratio as well as a high gravimetric power density. Besides the challenging Design to withstand electromagnetic distortions, the control of the primary and secondary full bridges with 150 kHz switching frequency is ambitious.

While loading the battery, the topology works like a step down converter. The saturation of the transformer has to be prevented at any time to avoid fault conditions. To minimize the primary side switching losses the dead time between the half bridge switches has to be adjusted depending of the transformer current. This way, advantage can be taken of the resonance behavior of transformer stray inductance and power switch output capacity. While the discharge process of the battery, the topology has to work like a step up converter. Here, the risk of a rapid current change through the transformer stray inductance or an implemented filter coil is always present. This would instantly lead to a destructive over voltage.

Taking the gravimetric power density and the high switching frequency into account the usage of silicon carbide will reduce the switching losses of the primary side. The deployment of gallium nitride on the low voltage full bridge will reduce the losses due to the high current rating of over 100 A.

### Literature

- [1] AG, I. T. (2014). Easy-Automotive Modules - HV to LV DC/DC-Converter Evaluation Kit with Easy Automotive Module F4-50R07W1H3\_B11A. AN2012-09, Rev. 1.3.
- [2] J. Sabate, V. V. (1990). Design considerations for high-voltage high-power full-bridge zero-voltage-switched PWM converter., (S. 275-284). Conference Proceedings of the Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Los Angeles, California.

## Projektierungsfreiheitsgrad Energievernetzung elektrischer Mehrachsenantriebe am Beispiel von Regalbediengeräten

Zur Analyse des Energieverbrauchs und von Projektierungsfreiheitsgraden eines Regalbediengeräts wird das gesamte System einschließlich des mechanischen Prozesses betrachtet. Die einzelnen Teilsysteme sind in Fig. 1 dargestellt. Jedes Teilsystem verursacht Verluste, welche in zugehörigen Verlustmodellen abgeschätzt werden. Ein Projektierungsfreiheitsgrad ist die Energievernetzung durch entsprechende Netz- und Speicheranbindung. Unter Energievernetzung versteht man die elektrische Kopplung der Antriebskomponenten, um die Rekuperationsenergie bei Verzögerungsvorgängen die kinetische Energie und/oder beim Absenken die potentielle Energie nicht als Wärmeenergie über einen Bremswiderstand aus dem System zu verlieren. Die verschiedenen Varianten der Energievernetzung sind in Fig. 2 illustriert.

1. Abführung der Rekuperationsenergie als elektrische Energie aus dem System (blau) mittels klassischer Netzurückspeisung über eine Rückspeiseeinheit: Hierbei entsteht erhöhte Verlustleistung bei der Rückspeisung durch die zusätzlichen Halbleiterventile am Netzeingang und dem Netzfilter. *Einsparpotential 30 %*
2. Bidirektionaler Fluss der Rekuperationsenergie zwischen mehreren Antriebsachsen durch die Zwischenkreiskopplung der Wechselrichter (orange): Dies bildet die Grundlage der Untersuchungen zur energieoptimale Bahnplanung des Prozesses. Vorausgesetzt die Bremsenergie der eines Antriebs kann unmittelbar durch die Beschleunigung des anderen genutzt werden. *Einsparpotential 20 %*
3. Einsatz eines Leistungs- bzw. Energiespeichers zum Zwischenspeichern der Rekuperationsenergie bis zum nächsten Beschleunigungsvorgang (grün): Es wird ein Leistungsspeicher wie z. B. ein Kondensator, ein Doppelschichtkondensator oder Energiespeicher wie z. B. ein Hochleistungsakkumulator mit einem vorgeschalteten Gleichspannungswandler im elektrischen Zwischenkreis eingesetzt. Durch den Speicher werden keine zusätzlichen Netzurückwirkungen verursacht und die Anlage kann kurzzeitig bei Spannungsausfall gestützt werden. Hierbei ist es nötig die Verlustleistung des Gleichspannungswandlers und die des Speichers gegenüberzustellen. *Einsparpotential 30 %*

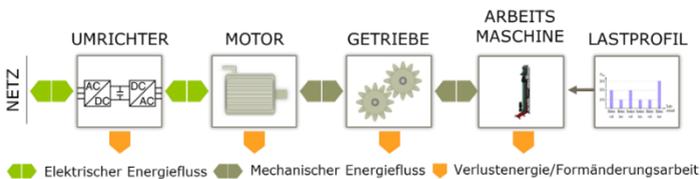
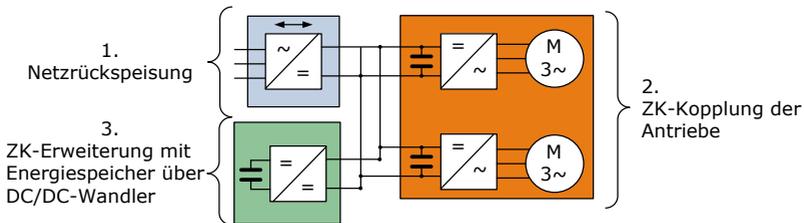


Fig. 1: Systemübersicht einer Antriebsachse eines Regalbediengeräts  
System overview of one drive train of a storage system

## Degree of freedom for project planning Energy interconnections of electric multi-axis drives using storage systems as an example

For analysis of the power consumption and the degree of freedom for project planning of a storage and retrieval machine, the entire system including the mechanical process will be considered. The individual subsystems are shown in Fig. 1. Each subsystem causes losses, which are estimated in loss models. A degree of freedom in the configuration is the interconnection of the energy by a suitable connection to the grid or to electrical energy storage. Energy interconnection is the electrical coupling of drive components in order not to lose thermal energy from the system via a brake resistor, by using recuperation energy, the kinetic energy during deceleration and/or potential energy during lowering. The various variants of the interconnection of the energy are illustrated in Fig. 2.

1. Dissipate the recuperation energy as electrical energy from the system (blue) by a classic recovery unit: This results in an increased power loss during the feedback due to the additional semiconductors at the input and the line filter. *Savings potential 30 %*
2. Bidirectional flow of the recuperation energy between two or more drive axes through the intermediate circuit coupling of the inverters (orange): This forms the basis for studies on the energy-efficient path planning of the process. As a requirement the recuperated energy of the one drive has to be used directly for the acceleration of the other one. *Savings potential 20 %*
3. Use of a power storage or energy storage system to temporarily store the recuperation energy for the next acceleration process (green): A power storage such as a capacitor, a double-layer capacitor or an energy storage such as a high-performance accumulator with a DC voltage converter is used in the electrical intermediate circuit. The power storage does not cause any additional harmonic distortions, and the system can be briefly supported in the event of a power failure. Therefore, it is necessary to compare the power losses of the DC voltage converter and the storage system. *Savings potential 30 %*



**Fig. 2:** Energievernetzung bei Mehrachsenantrieben  
Energy interconnections of electric multi-axis drives

Tobias Micklitz, M. Sc.

## Entwicklung einer eisenlosen Axialfluss-Permanentmagnet-Synchronmaschine

Zur Erhöhung der Energiedichte von Schwungrädern wird angestrebt, Drehzahlen bis zu 40.000 1/min zu fahren. Dieses Ziel ist nur mit einer kurzen, steifen Antriebswelle möglich und einer Arbeitsmaschine, die diese Drehzahlen mit einer hohen Energiedichte, hoch dynamisch und verlustarm antreiben kann. Das leisten insbesondere Axialfluss-Synchronmaschinen mit Permanentmagneterregung. Der Einsatz eines eisenlosen Stators verhindert drehzahlabhängige Ummagnetisierungsverluste. Als Material für den Statorwicklungsträger eignen sich besonders keramische Werkstoffe. Diese Isolierstoffe verbinden eine relative Permeabilität nahe eins mit einer guten thermischen Leitfähigkeit von  $\lambda \approx 30 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  [Keramik-Institut GmbH].

In Vorbereitung des Forschungsvorhabens entstand aus diesen Gründen ein Versuchsmuster einer genuteten Aluminiumoxid-Keramikscheibe in Zusammenarbeit mit dem Keramik-Institut GmbH Meißen. Ausgehend von diesem Wicklungsträger wurde eine rotierende Maschine mit 600 W Dauerleistung entworfen. Die Keramikscheibe wurde mit einer vierpoligen, gesehten Zweischichtwicklung konzentrischer Spulen bewickelt, die Fig. 1 zeigt. Der Rotor wurde zunächst für eine Maximaldrehzahl von 10.000 1/min konstruiert und gefertigt. Die Maschine befindet sich in einem Versuchsaufbau, dargestellt in Fig. 2, zur Erprobung der Betriebseigenschaften, insbesondere der induzierten Spannung und der Kupferverluste, sowie zur Messung der Wicklungstemperaturen (grüne Drähte in Fig. 1). Aktueller Forschungsgegenstand ist die Verbesserung der Aktivteilgestaltung. Für den Magnetkreis gilt es, eine geringe Induktivität zugunsten einer hohen Dynamik mit einer hohen Materialausnutzung und hohen Drehmomenten zu vereinen. Eine optimierte Litzendrahtwicklung soll die Stromverdrängungseffekte durch Luftspaltfluss und Wechselrichterspeisung mindern und gleichzeitig den größtmöglichen Kupferquerschnitt für eine gute Überlastbarkeit bereitstellen. Zusammen mit den Technologieträgern wird eine Neugestaltung des Wicklungsträgers angestrebt, die die Forderungen an die Wicklungseigenschaften sowie eine vereinfachte Herstellung der Wicklung ermöglicht.

Die Weiterentwicklung des Rotors soll ohne Klebstoffe gefügte, optional vergrabene Magnete enthalten, die eine oberwellenarme Pol-Flussdichte erzeugen. Die Zieldrehzahl von 40.000 1/min erfordert zudem die Anpassung des Designs auf Magnetlager

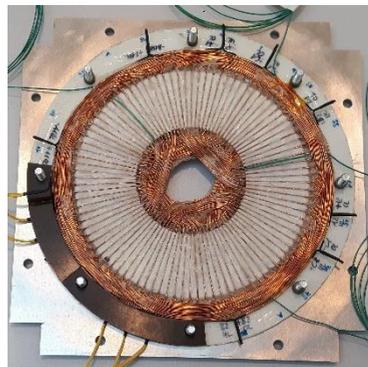


Fig. 1 Bewickelte Keramikscheibe / Wound ceramic plate

## Development of an ironless axial flux permanent magnet synchronous machine

For an increased volumic energy of a flywheel, it is intended to reach rotational speeds of up to 40,000 rpm. This requires a short, stiff shaft and a driving machine with a high volumic energy itself, a high dynamic capability and low losses. Therefore, especially axial flux synchronous machines with permanent magnetic excitation are suitable. Using an ironless stator avoids iron losses that are in direct or square proportion to the machine's speed. The material choice for the stator winding carrier is preferably ceramics. These insulating materials combine a relative permeability close to one with a good thermal conductivity of  $\lambda \approx 30 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  [Keramik-Institut GmbH].

A first example of an aluminum oxide plate was built in preparation of the current project in cooperation with Keramik-Institut GmbH Meißen. Based on this plate, a rotating electrical machine with 600 W power rating was designed. The ceramic plate has been wound with a four-pole, short pitch winding of concentric coils, as shown in Fig. 1. The rotor got designed and built for a maximum speed of 10,000 rpm. In the test setup shown in Fig. 2, the machine is now checked for its operating properties, especially electromotive force values and winding losses but also winding temperatures are measured (green wires in Fig. 1).

The current research takes on to improve the active parts design. For the magnetic circuit, a low inductance towards better dynamic behavior needs to match highly utilized materials and high torque. An optimized litz wire winding aims to reduce current displacement effects caused by the air gap flux density and the inverter feeding. At the same time, the winding shall provide enough copper cross section to allow a high overload capability. In cooperation with technology keepers, a new winding carrier design is approached that meets the required winding properties and simplifies the winding manufacturing.

Further development of the rotor aims for an adhesive-free mounting of the optional segmented magnets which shall also create a pole induction with few upper harmonics. The targeted rotational speed of 40,000 rpm requires an adapted design considering active magnetic bearings.

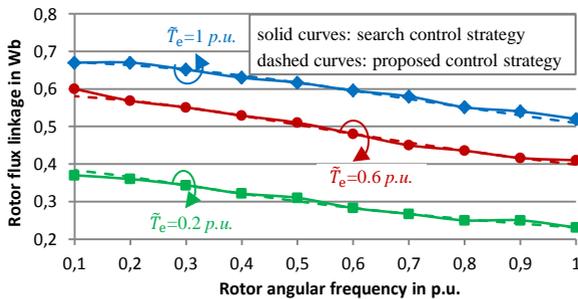


**Fig. 2:** Versuchsaufbau zur Erprobung der Axialflussmaschine  
Test setup for analyzing the axial flux machine

## Verlustminimale Steuerung eines Induktionsmotors

Heutzutage werden Induktionsmotoren (IM) aufgrund ihrer Robustheit und ihrer geringen Kosten sehr weit verbreitet eingesetzt. Gleichzeitig werden viele Bemühungen zum energiesparenden Betrieb der IM unternommen. Das Ziel der Arbeit ist es, eine verlustminimale Steuerungsstrategie zu entwickeln, um die feldorientierten Asynchronantriebe verlustarm zu betreiben.

In der Praxis ist die verlustminimale Steuerung eines Induktionsmotors eine komplexe Aufgabe. Die Gründe dafür sind, dass es schwierig ist, exakte Motorparameter zu bestimmen, und dass einige Motorparameter aufgrund des magnetischen Sättigungseffekts variieren können. In dieser Arbeit wird eine neue verlustminimale Steuerungsstrategie des Induktionsmotors vorgeschlagen, die auf der Kombination der modellbasierten Strategie und eines Suchverfahrens basiert. Die vorgeschlagene Strategie konzentriert sich darauf, eine verlustminimale Bedingung für die Berechnung des optimalen Rotorflusses zu etablieren. Weiterhin wird ein neuartiges Parameteridentifikationsverfahren vorgeschlagen, indem die mit dem Suchverfahren ermittelten optimalen Punkte verwendet werden, um unbekannte Motorparameter für die verlustminimale Bedingung zu bestimmen. Auf diese Weise kann die vorgeschlagene Steuerungsstrategie ohne Kenntnis der Motorparameter implementiert werden.



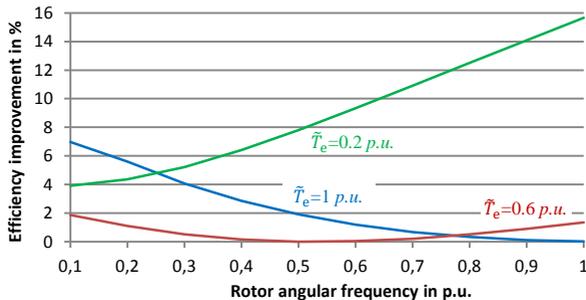
**Fig. 1:** Optimale drehmomentabhängige Rotorflussverkettung  
Optimal torque-dependent rotor flux linkage

Die Funktionsfähigkeit der vorgeschlagenen Steuerungsstrategie wurde experimentell mit einem 3 kW IM nachgewiesen. Wie erwartet zeigen die experimentellen Ergebnisse, dass die vorgeschlagene Strategie für jeden Betriebspunkt die gleichen Ergebnisse im Vergleich zum Suchverfahren liefert (siehe Fig. 1). Hinsichtlich der Energieeffizienz wird die vorgeschlagene Strategie durch Vergleich mit der konventionellen Steuerungsstrategie bewertet, die den Nennrotorfluss als Referenz für den Flussregler verwendet. Fig. 2 zeigt noch einmal die Wirksamkeit der vorgeschlagenen Strategie, insbesondere im Teillastbereich.

## Loss Minimization Control of Induction Motor

Nowadays, induction motors (IM) are very widely used in industrial applications because of their robustness and their low cost compared to other motors. Simultaneously, efforts to reduce losses of the IM have also been performed. The objective of this work is to contribute in these efforts by developing loss minimization control (LMC) strategies for field oriented IM drives.

In practice, reducing losses of the IM by using LMC strategies is a complex task because it is difficult to determine exactly motor parameters and, moreover, some motor parameters can be varied due to the magnetic saturation effect. In this work, a new LMC strategy based on the combination of the model-based control technique and the search control technique is suggested. This strategy focuses on establishing the loss minimization condition from the loss model for calculating the optimal value of the rotor flux. Furthermore, a novel parameter estimation method that uses optimal results obtained from a search control strategy to determine unknown parameters of this condition is also suggested. In this way, the proposed LMC strategy can be implemented without knowledge of motor parameters.



**Fig. 2:** Effizienzsteigerung durch die vorgeschlagene Strategie  
Efficiency improvement of proposed strategy

The proposed LMC strategy is verified by experiment performed for an example 3 kW IM. As expected, the experimental results indicate that for every operating point the suggested strategy gives the same results in comparison to the search control strategy (see Fig. 1). In respect of the energy, the suggested strategy is evaluated by comparing to the conventional control strategy that uses the rated rotor flux as the reference for the flux controller. As can be seen in Fig. 2, the experimental results once more stress the effectiveness of the proposed LMC strategy, especially in partial load range.

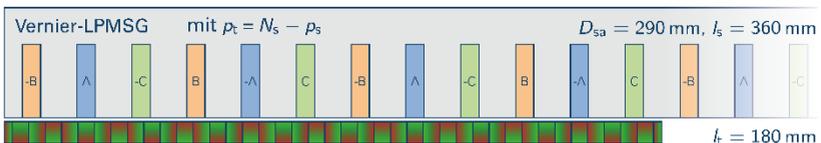
## Theoretische Grundlagen zur Verknüpfung von thermohydraulischer und -elektrischer Leistungswandlung in einem Aggregat

Zur Verbesserung der Krafterzeugung und Schadstoffeffizienz von mobilen Arbeitsmaschinen wird in Zusammenarbeit mit der Stiftungsprofessur für Baumaschinen ein thermohydraulischer Lineargenerator (Fig. 2) als Primäraggregate zur Energiebereitstellung entwickelt. Dieses neuartige Maschinenkonzept vereint das Wirkprinzip einer Freikolbenmaschine, welche über eine lineare Kolbenanordnung Verbrennungsenergie in hydraulische Energie umwandelt, mit dem eines linearen PM-Synchrongenerators. Die auf diese Weise bereitgestellte elektrische Energie erlaubt nicht nur die Versorgung der Bord- und Steuerelektronik, sondern auch die effizienzsteigernde Elektrifizierung verschiedener Verbraucher, wie den Fahrtrieb.

Im Zuge einer Machbarkeitsstudie wurden die Randbedingungen des Prozesses ermittelt und eine geeignete Maschinentopologie für den Generator abgeleitet, Hauptziele des Entwurfs waren die Maximierung der Krafterdichte und Minimierung der Translormasse, womit sich neben einer tubularen Langstator-Innenläufer Anordnung auch die Umsetzung des Vernier-Prinzips empfiehlt. Dessen Kombination mit einer Quasi-Halbach Magnetisierung (Fig. 1) ermöglicht zudem die Vermeidung von Nut-harmonischen und erlaubt den Verzicht auf Eisen im Translator zur Verkleinerung der Induktivität, als Voraussetzung für hohe Kraftanstiege, sowie die Reduktion der Um-magnetisierungsverluste.

Das Hydraulikaggregat basiert auf einem Konstantdrucknetz, infolgedessen rechteckige Kraftverläufe auf den Verbrennungskolben wirken. Um die etablierte Kraft- und Lagesteuerung der bereits vorhandenen thermohydraulischen Freikolbenmaschine beizubehalten, ist eine hochdynamische Stromregelung erforderlich, welche das Verhalten der Hydraulik nachbilden kann. Die hohen Kraftrippel oder vergleichsweise hohen Anregelzeiten konventioneller Verfahren, wie der Direkten Kraftregelung oder Feldorientierten Regelung, motivierten die Untersuchung prädiktiver Verfahren, die neben der Kompensation der genannten Schwachstellen auch eine Reduzierung der Schaltverluste ermöglichen.

Ziel fortführender Arbeiten ist der Aufbau eines Funktionsdemonstrators zur erstmaligen Verifizierung des Vernier-Prinzips in einer Linearmaschine und die Erprobung verschiedener Regelverfahren sowie einer sensorlosen Lageerfassung.



**Fig. 1:** Längsschnitt durch den tubularen Linear-PM-Synchrongenerator mit Quasi-Halbach-Magnetisierung nach dem Vernier-Prinzip / Cross-section of tubular linear PMSG with quasi-Halbach excitation applying the Vernier topology

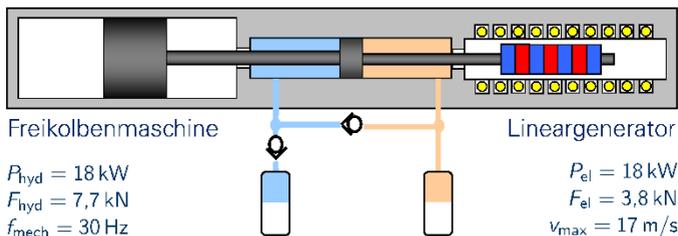
## Theoretical fundamentals for the combination of thermoelectric and thermohydraulic energy conversion in a single unit

In cooperation with the chair of construction machines a thermohydraulic linear generator (Fig. 2) is developed as primary unit in mobile machinery. The aim is to improve the power utilization and reduce the exhaust emissions. This new concept is unifying the working principles of a free-piston hydraulic cylinder, converting combustion energy into hydraulic energy, and a linear permanent magnet synchronous generator. Thus provided electrical energy not only allows the supply of on-board and control electronics but also the electrification of various loads, like a possible traction drive.

In the course of a feasibility study the boundary conditions of the process were determined and a suitable machine topology for the generator was deduced. The main objectives for the machine design were the maximization of the force density and minimization of the translator mass, whereby, beside a tubular structure with a long stator and internal translator, the application of the Vernier-principle is advisable. Its combination with a quasi-Halbach-magnetization (Fig. 1) hampers slot harmonics and enables waiving of the back iron in the translator. That way the hysteresis losses can be reduced as well as the inductance in favor of high force gradients.

The hydraulic unit is based upon a constant pressure leading to rectangular force trajectories opposing the piston of the combustion unit. To maintain the established force and position control of the existing free-piston hydraulic cylinder a high-dynamic current control is required to emulate the behavior of the hydraulic system. High force ripples or comparably high rise times of conventional control methods, like Direct Force Control or Field Oriented Control, were motivating the examination of predictive control schemes. Their application can compensate the weak points of the conventional schemes and additionally reduce switching losses.

Further studies aim to set-up a prototype to verify the Vernier-principle applied on a linear machine for the first time. The various control methods are to be tested and compared in practice. Furthermore, a sensorless position observer should be implemented and analyzed whether suitable or not for linear drives based on the Vernier-principle.

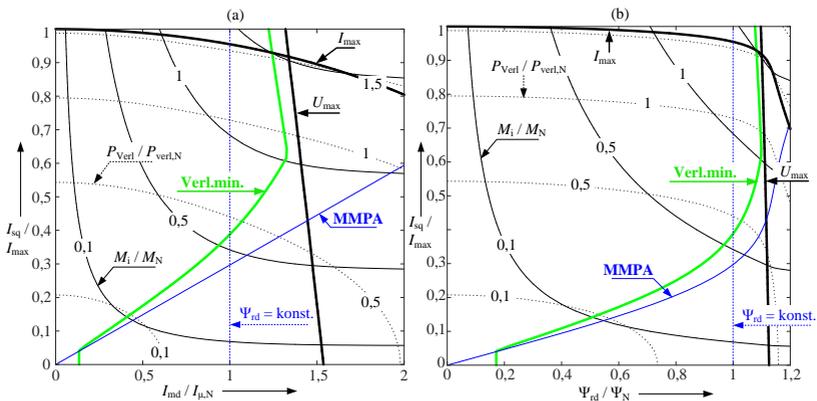


**Fig. 2:** Verknüpfung von thermohydraulischer und thermoelektrischer Freikolbenmaschine mit wählbarem Arbeitspunkt / Combination of thermohydraulic and thermoelectric free-piston engine with free scalable operation point

## Ein neues Suchverfahren ohne Maschinenparameter zum verlustminimalen Betrieb von Asynchron-Fahrmotoren

Elektrische Fahrzeugantriebe mit Käfigläufer-Asynchronmaschinen werden sowohl im PKW-Bereich sowie in Nutzfahrzeugen und Hybridbussen eingesetzt. Die Referenzmaschine, für die ein neues Online-Suchverfahren zum verlustminimalen Betrieb entwickelt wurde, ist eine Serienmaschine der Firma VEM Sachsenwerk GmbH, die in aktuellen Hybridbussen der DVB AG eingesetzt wird. Die Maschine im Fahrzeugantrieb wird feldorientiert geregelt und drehmomentgesteuert betrieben, wobei die Steuergrößen Rotorflussverkettung  $\Psi_{rd}$  und drehmomentbildende Statorstromkomponente  $I_{sq}$  vorgegeben werden müssen. Zunächst wurde eine modellbasierte Verlustminimierung durchgeführt, die zeigte, dass die Energieeffizienz des Antriebs in Referenzfahrzyklen zum großen Teil von der Wahl der Steuergrößen abhängt. Die klassische Wahl ist ein Betrieb mit konstanter Flussverkettung im Grundrezahlbereich. Eine Optimierung ohne Berücksichtigung der Sättigung führt zu einem Betrieb mit gleichen Statorstromkomponenten ( $I_{md} = I_{sq}$ ) und wird als MMPA-Lösung (Maximales Moment pro Ampere) bezeichnet. Fig. 1 zeigt, dass das wahre (frequenz- und sättigungsabhängige) Verlustminimum deutlich von dieser Lösung abweicht.

Die Forschungsarbeiten konzentrierten sich auf die Frage, wie die wahren sättigungsabhängigen verlustminimalen Steuergrößen während des Betriebs ohne Nutzung von fehlerbehafteten Maschinenparametern durch ein Suchverfahren gefunden werden können. Publierte Lösungen verwenden zum Beispiel Intervallhalbierungsverfahren unter Nutzung des „Goldenen Schnitts“. Nachteil dieses Verfahrens sind recht große Drehmomentsprünge. Deshalb wurde ein neues Suchverfahren unter Nutzung des

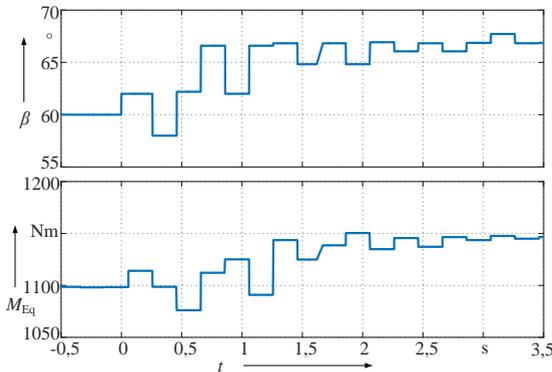


**Fig 1:** Lösung der modellbasierten Verlustminimierung bei Nennfrequenz in Abhängigkeit (a) der Ströme und (b) der Steuergrößen, Model based loss minimization solution at rated frequency depending on (a) stator currents and (b) reference values

Downhill-Simplex-Algorithmus von Nelder und Mead entwickelt. Fig. 2 zeigt die Messergebnisse nach Umsetzung am Antriebsversuchsstand. Das Drehmoment wird bei gleicher Stromamplitude durch Anpassung des Stromwinkels (Winkel zwischen resultierendem Statorstromzeiger und Längsachse im feldorientierten Koordinatensystem) automatisch erhöht. Das Drehmoment ist nicht messtechnisch in der Antriebsregelung verfügbar, sondern wird aus einer Leistungsbilanz geschätzt. Die Messung hat gezeigt, dass geschätztes und tatsächliches Drehmoment ihr Maximum beim gleichen Stromwinkel aufweisen.

## Online Loss Minimization Control of Induction Machines in Vehicle Applications

Electrical vehicle propulsion systems with squirrel-cage induction machines are common i.e. for hybrid busses. Field-oriented control is used in which the desired torque can be applied by choosing reference values for rotor flux  $\Psi_{rd}$  and torque producing stator current component  $I_{sq}$ . Model-based loss minimization shows, that the true loss minimal trajectory is saturation and frequency dependent and differs from constant flux or maximum-torque-per-ampere trajectory, see Fig. 1. Therefore an online-method is desired that can track the true loss minimum without using machine parameters and without any hardware changes. A torque equivalent can be calculated from measured stator currents, voltages and rotor speed. With constant current amplitude the angle between flux and torque producing current is varied to maximize the torque equivalent. For the optimization procedure a Nelder-Mead Downhill-Simplex-Method is used which has the advantage over Golden-Section-Technique that it produces less current and torque fluctuations. Fig. 2 shows measurement results obtained by our drive test bench proving that the optimization finds the maximum torque current angle. Torque equivalent and measured torque at the shaft both have their maximum at the same current angle.



**Fig. 2:** Messergebnis bei  $I_s = 350 \text{ A}$ .  $\beta$  bezeichnet den Stromwinkel,  $M_{Eq}$  das geschätzte Drehmoment, Measurement results at  $I_s = 350 \text{ A}$ ,  $\beta$  denotes the current angle,  $M_{Eq}$  denotes the estimated torque



## 5 AUSSTATTUNG DES LEHRSTUHLS

Neben Arbeitsräumen für Diplomanden, Studienarbeiter, Gastwissenschaftler und 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 Elektrotechnischen Instituts



Prüfstand zum „Prüfstand Elektrische Maschinen und Antriebe (200 kW)“



Schaltschrankbatterie zum „Prüfstand Elektrische Maschinen und Antriebe (200 kW)“

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

### **Neuer Antriebsprüfstand am Elektrotechnischen Institut der TU Dresden übergeben**

Im September 2015 wurde am Elektrotechnischen Institut der TU Dresden, Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe (Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann), im Lichthof des Görgesbaus ein Prüfstand für elektrische Maschinen und Antriebe übergeben. Damit steht ein wichtiges Werkzeug zur realitätsnahen Optimierung, Analyse und Validierung von Elektromotoren und der zugehörigen Leistungselektronik

im Leistungsbereich bis 200 kW zur Verfügung. Die Konzeption unterstützt insbesondere Forschungs- und Entwicklungsaufgaben auf den Gebieten der Elektromobilität sowie der Energieeffizienz stationärer und mobiler Antriebe. Der Prüfstand wurde im Rahmen eines Großgeräteantrags je zur Hälfte durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und das Land Sachsen finanziert im Werte von ca. 1 Mio. €.

Die Planung und Bauüberwachung erfolgte unter Leitung von Privatdozent Dr. Ing. habil. Volkmar Müller. Die Prüfanlage ist mit rückspeisefähigen Netzstromrichtern auf der Belastungs- und Prüflingsseite ausgerüstet, so dass ein drehzahl- oder drehmomentgeregelter Betrieb des Maschinensatzes in allen vier Quadranten möglich ist. Gegenwärtig sind eine hochtourige Belastungseinheit (106 Nm, 13.500 min<sup>-1</sup>) und eine niedertourige Belastungseinheit (1010 Nm, 1.750 min<sup>-1</sup>) 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, ± 600 ADC). Damit ist die Anpassung an verschiedene Gleichspannungsebenen für EV/HEV-Antriebe und stationäre Industrieantriebe ausführbar. Zur Untersuchung neuer stromrichternaher Steuer- und Regelalgorithmen ist zusätzlich ein Experimentierstromrichter in Kombination mit einem universellen Mikrorechnersystem als Rapid Control Prototyping System der Fa. dSpace installiert. Wegen der hohen Anforderungen an den Lärmschutz im Görgesbau wurden alle Umrichter und Motoren wassergekühlt ausgeführt und mit einer zusätzlichen Schutzumhausung ausgerüstet.

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 überschwingungsbehafteten 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

## 5.1 Versuchsstände für die Forschung

- Prüfstand Elektrische Maschinen und Antriebe (200 kW) – Gefördert von der Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Land Sachsen.

Die Prüfanlage ist mit rückspeisefähigen Netzstromrichtern auf der Belastungs- und Prüfungsseite ausgerüstet, so dass ein drehzahl- oder drehmomentgeregelter Betrieb des Maschinensatzes in allen vier Quadranten möglich ist. Es sind eine hochtourige Belastungseinheit (106 Nm, 13.500 min<sup>-1</sup>) und eine niedertourige Belastungseinheit (1010 Nm, 1.750 min<sup>-1</sup>) zur Aufnahme der mechanischen Leistungen der Prüfingsmotoren verfügbar. Eine Besonderheit ist die Bereitstellung einer variablen Zwischenkreisspannung für die Maschinenstromrichter auf der Prüfungsseite (10...800 VDC, ± 600 ADC). Zur Untersuchung neuer stromrichterlicher Steuer- und Regelalgorithmen ist zusätzlich ein Experimentierstromrichter in Kombination mit einem universellen Mikrorechnersystem als Rapid Control Prototyping System der Fa. dSpace installiert.

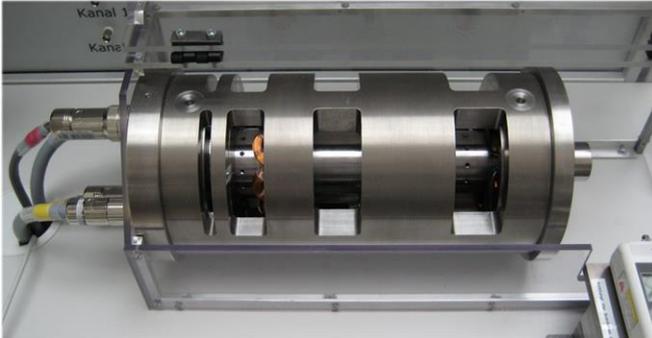
Wesentliche Elemente der Messtechnik sind Leistungsmessgeräte WT 3000 und WT 1800 (Fa. Yokogawa) zur Messung von gepulsten Spannungen und ober-schwingungsbehafteten Strömen sowie Messflansche T12 (Fa. HBM) zur Drehzahl- und Drehmomentmessung. Alle Vorgaben zur Messgenauigkeit bei der Bestimmung von Verlusten und Wirkungsgraden elektrischer Maschinen nach der Norm DIN EN 60034-2 werden eingehalten.

- Druck-Volumenstrom-Messeinrichtung zur experimentellen Bestimmung thermischer und strömungstechnischer Eigenschaften elektrischer Maschinen
- Labor Energiesystemtechnik mit Netznachbildung, Filtertechnik und Modellanlage für Windenergie und zur Untersuchung von Netzurückwirkungen
- Optimale Bewegungssteuerung mit Rotations- und Linearantrieben
- Matrixumrichter, Z-Source-Inverter
- Rechnergestützte Bewegungssteuerung: automatisierter Entwurf des Programm-kodes für Steuergeräte
- Messeinrichtungen zur Feld- und Wirbelstromverteilung
- Aktive Magnetlager
- Schleifringprüfstand



- Arbeitsplatz FEM-Modell der Vollpolmaschine
- Magnetlagerversuchsstand für die Lehre

- Hochgeschwindigkeitsmagnetlager für Forschung,



- Versuchsstand zur Messung des Wärmewiderstands von Wälzlagern
- Versuchsstand zur Messung der Verluste im quergekühlten Statorblechpaket
- Motorenprüfstand für Luftkühlung



## 5.2 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))
- Versuchsstand Elektromobilität - Förderung im Rahmen der akademischen Bildungsinitiative im Schaufenster Elektromobilität  
Zwei gegengekoppelte Antriebssätze (35 kW) der Fa. Continental für Elektrofahrzeuge mit Power Electronic Box und elektrisch erregter Synchronmaschine
- Drehstromtransformator
- Feldorientierte Regelung (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

### 5.3 Sonderausstattungen

- Separate Netzeinspeisung 0...400V über Stelltransformator, 100A
- Zwei Umformersätze 3x400V, 190kVA (bis 400Hz) und 120 kVA (50Hz / 60Hz)
- Schwerlastversuchsfläche mit Zufahrt und Hallenkran (3t)
- Pendelmaschinen zur Motorenprüfung
- Hochwertige Speicheroszilloskope (Bandbreite 600 MHz), Drehmomentmesswellen (2Nm ... 200Nm), 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. Arne Brix

Dipl.-Ing. Jan Döring

Dipl.-Ing. Chris Evers

Dipl.-Ing. Stephan Günther

Dipl.-Ing. Martin Leubner

Dipl.-Ing. Stephan Michel

M. Sc. Tobias Micklitz

M. Sc. E.E. Chi Dung Nguyen

Dipl.-Ing. Nico Remus

Dipl.-Ing. Jörg Schützhold

Dipl.-Ing. Robert Seifert

Dipl.-Ing. Gunar Steinborn

M. Sc. Rahmat Suryana

Dipl.-Ing. Stephan Tenner

Dipl.-Ing. Stefan Ulbrich

Dipl.-Ing. Thomas Windisch

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. Dipl.-Kfm. Kenneth Benath

M. Sc. Sven Bosch

Dipl.-Ing. (FH) Martin Eckart

Dipl.-Ing. Erik Fleischer

Dipl.-Ing. A.T. Hermann Houenouvo

Dipl.-Ing. Jacob Jung

M.Sc. Sören Miersch

Dipl.-Ing. Philipp Miska

Dipl.-Ing. Ludwig Schlegel

Dipl.-Ing. Stefan Staudt

## **Studentische Hilfskräfte:**

Postmann, Johannes

Fast, Alexander

Neubacher, Jens

Kolb, Johannes

Kranz, Daniel

Ye, Tianyu

## **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  
Sekretariat: 0351-463-33223  
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



# 9 LAGEPLAN

## Lageplan des Campus (Südvorstadt)

Stand: 31. Juli 2011

