



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

Elektrotechnisches Institut

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

**JAHRESBERICHT  
ANNUAL REPORT**

**2020/21**



Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe



## Inhalt

---

1	Vorwort .....	5
2	Lehraufgaben .....	6
2.1	Lehraufgaben für Fakultät .....	6
2.2	Lehraufgaben für andere Fakultäten .....	10
2.3	Abgeschlossene Diplom- und Studienarbeiten.....	11
2.4	Exkursionen .....	12
2.5	Preise.....	12
3	Öffentlichkeitsarbeit.....	17
3.1	Veröffentlichungen .....	17
3.2.	Vorträge und Berichte .....	20
3.2.1	Lehrstuhl und Institut.....	20
3.2.2	National und International .....	23
3.3	Kooperation .....	25
4	Forschung .....	28
4.1	Forschungsprofil – Schwerpunkt Energieforschung.....	28
4.2	Forschungsprojekte.....	28
4.3	Dissertationen.....	29
4.4	Ausgewählte Forschungsergebnisse in Kurzform.....	36
5	Ausstattung des Lehrstuhls.....	75
5.1	Prüfstand Elektrische Maschinen und Antriebe.....	75
5.2	Weitere Versuchsstände für die Forschung .....	76
5.3	Versuchsstände für die Lehre .....	78
5.4	Sonderausstattungen .....	78
6	Personelle Besetzung .....	79
7	Anschrift.....	81
8	Impressum.....	83

9	Lageplan .....	85
---	----------------	----

# 1 VORWORT

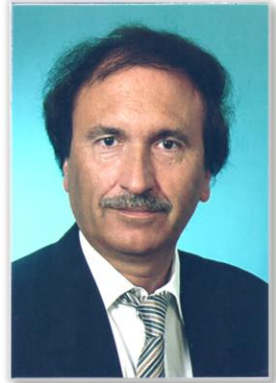
Liebe Kollegen, Mitarbeiter und Freunde,

nach einjähriger Pause setzen wir unsere Jahresberichte der Vorjahre mit einem 2-Jahresbericht fort und wollen Sie informieren über unsere Arbeiten. Dass diese Zeit in jeglicher Hinsicht herausfordernd war, muss ich sicher nicht weiter ausführen. In der Lehre haben wir versucht, so lange wie möglich in Präsenz zu unterrichten, bis es uns per Erlass untersagt wurde. Während Vorlesungen und Übungen dann digital abliefen, haben wir die Praktika weiterhin an realen Versuchsständen in verkleinerten Praktikumsgruppen durchgeführt.

Dafür geht mein herzlicher Dank an alle Mitarbeiter, die sich dieser Aufgabe gestellt haben und bei der es zu keinen bekanntgewordenen Infektionen gekommen ist. Die Forschung konnte teils im Homeoffice teils im Labor weiterlaufen, sodass wir diesbezüglich unsere aktuellen Arbeiten fortführen konnten. Besonders erfreulich war die Bewilligung eines Verbundprojekts durch das BMWi für den Asynchronen, Rotierenden Energie-System-Stabilisator (ARESS), in das langjährige Vorarbeiten zum doppelspeisenden Drehstromgeneratoren in Wind- und Pumpspeicherkraftwerken und zum Matrixumrichter einfließen können. Den Drittmittelgebern wie DFG, BMBF, BMEL, AiF und FVA sei an dieser Stelle für ihre vielfältige Unterstützung gedankt.

Noch ein Wort in eigener Sache: Ich führe nun den Lehrstuhl das 2. Jahr nach meiner Pensionierung als Vakanz-Seniorprofessor weiter in der Hoffnung, dass es in absehbarer Zeit einen Nachfolger für das hochinteressante und wichtige Lehr- und Forschungsgebiet der elektrischen Maschinen und Antriebe gibt.

Herzlichen Dank für Ihr Interesse und Ihre Unterstützung!



## 2 LEHRAUFGABEN

### 2.1 Lehraufgaben für Fakultät

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, Elektrische Maschinen 1 (3/1/1), WS*

Pflichtfach Elektroenergietechnik (EET), Wirtschaftsingenieure (WING), Regenerative Energiesysteme (RES), Mechatronik (2/1/0), WS, Wahlpflichtfach Mechatronik (MT)

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

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, Elektrische Antriebe (3/1/1), SS*

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

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

Drehzahlvariable Antriebe: Drehzahlsteuerung von Drehstrom-Asynchronantrieben; spannungsgesteuerte Drehstrom-Asynchronantriebe; frequenzgesteuerte Drehstrom-Asynchronantriebe; Steuerung von Drehstrom-Synchronantrieben; thyristorstromrichter gespeiste Gleichstromantriebe; pulstellergespeiste Gleichstromantriebe; Stell- und Schrittantriebe.

Regelung von Antrieben: Antriebsregelungen; geregelte Gleichstromantriebe, geregelte Drehstromantriebe; Regelung elektromechanischer Systeme, Anwendungen

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, Elektromaschinendynamik (2/1/0), WS*

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

Einführung in das Theoriengebäude; Dynamisches Verhalten der Gleichstrommaschine; Dynamisches Verhalten von Wicklungsanordnungen; Kraft- und Drehmo-

mentbildung in Maschinen; Grundlagen der Raumzeigertheorie; Rechengesetze für Raumzeigergrößen; Raumzeigertheorie der Induktionsmaschine; dynamische Betriebszustände der Induktionsmaschine; Übertragungsverhalten der Induktionsmaschine; Raumzeigertheorie der Synchronmaschine; dynamische Betriebszustände der Synchronmaschine; Übertragungsverhalten von Synchronmaschinen; Nullsystem elektrischer Maschinen; Elektromagnetische Wellenvorgänge in Maschinen.

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, Geregelte Energiesysteme (2/0/0), SS*

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

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

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

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, Entwurf und Berechnung elektrischer Maschinen (2/1/1), SS*

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

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

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, Direktantriebe und Magnetlagertechnik (2/0/1), WS*

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

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

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

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann*, Elektrische Fahrzeug- und Traktionsantriebe (2/0/1), WS

Wahlpflichtfach Elektroenergietechnik (EET), Mechatronik (MT)

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

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

*Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann*, Automatisierte Antriebe (2/1/2), SS

Wahlpflichtfach Mechatronik (MT), Elektroenergietechnik (EET),

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

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

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

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

Elektroenergietechnik (2/1/0), WS

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

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

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. V. Müller, Entwurf von Antriebssystemen (2/1/0), WS*

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

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner (bis 2020), Leistungsflussorientierte Modellbildung (2/1/0), WS (bis 2020/2021)*

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

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

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner (bis 2020), Dr. Ing. Nicol Hildebrand (ab 2021), 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 (bis 2020)*

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 (2/1/0), WS

Modul „Elektromagnetische Energiewandler“

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

Leistungstransformatoren in der Elektroenergie-technik, Wachstumsgesetze und TK-Zahl; Aufbau, Ausführungsformen, stationärer Betrieb, nichtstationärer Betrieb; Wicklungsaufbau, Wicklungsausführungen; Begriffe, Isoliersysteme, Isolierstoffe für Transformatoren; Entwurf von Transformatoren: Kernausslegung, Wicklungsauslegung Optimierung, Isolierungsgestaltung; Begriffe, Prinzipien, Materialien; Auslegung der Schenkelpresselemente, Kesselgestaltung; Zusatzverluste; Modellierung elektromagnetischer Felder.

## 2.2 Lehraufgaben für andere Fakultäten

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

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

*Dr.-Ing. N. Hildebrand*

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

## 2.3 Abgeschlossene Diplom- und Studienarbeiten

### Diplom- und Masterarbeiten 2020/2021

Marta Potyka / Betreuer: Robin Linus Liebfried

*Auslegung, Konstruktion und Inbetriebnahme eines radialen Störkraftgenerators*

Simon Röschner / Betreuer: Daniel Kranz, Stefan Ulbrich (VEM)

*Anforderungsgerechte Anpassung der Auslegung einer Synchronreluktanzmaschine ohne Einsatz von Feldeberechnungsmethoden*

Gino Sturm / Betreuer: Tobias Micklitz

*Betriebsstrategien für Schwungradspeicher mit eisenlosen, permanentmagnetisch erregten Axialflussmaschinen*

Markus Weihrauch / Betreuer: Chris Evers

*Modellbasierte prädiktive Regelung zur Planung mehrdimensionaler Bewegungsabläufe eines elektrischen Antriebssystems mit Speicher*

Lukas Duchow / Betreuer: Dennis Guhl

*Entwicklung eines Programms zur Untersuchung elektromagnetischer Felder in vergrabenen Permanentmagneten*

Tobias Knapp / Betreuer: Ludwig Schlegel

*Bestimmung der Verluste von permanentmagneterregten Synchronmaschinen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Stromrichtertopologien*

Fabian Melkowski / Betreuer: Markus Weihrauch

*Betrieb elektrischer Speicher bei Regalbediengeräten in einem von Erneuerbaren Energien geprägten Netz*

Yuchen Mo / Betreuer: Shaohui Yuan

*Funktionsentwicklung für den Schaltablauf eines Hybridantriebs*

André Rasenack / Betreuer: Dennis Guhl

*Analytische Bestimmung der Haupt- und Streuinduktivitäten einer lagerlosen permanenterregten Synchronmaschine*

### Studienarbeiten

Clemens Bromann / Betreuer: Chris Evers

*Modellbildung und Verifikation für elektrische Antriebskomponenten*

Jonas Klotsche / Betreuer: Ludwig Schlegel

*Analyse der Anforderungen an hochdynamische Antriebsstrangprüfstände in der Automobilindustrie*

Jan Klötzer / Betreuer: Markus Weihrauch

*Vergleich eines gesteuerten und geregelten Speicherbetriebs zur Leistungsspitzenreduktion*

## 2.4 Exkursionen

Folgende Exkursionen wurden den Studenten angeboten:

- 2020 Sachsenwerk Dresden,
- 2021 Ausfall wegen Corona

## 2.5 Preise

### Franz-Stolze-Preis 2020 für Dennis Guhl

Der diesjährige Franz-Stolze-Preis wird aufgeteilt und geht an die Verfasser von zwei hervorragende Abschlussarbeiten. Dennis Guhl studierte an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik. Seine Diplomarbeit zum Thema „*Leistungsbeschreibung einer aktiven Magnetlagerung für schnellaufende elektrische Maschinen mittlerer Leistung*“ wurde ebenfalls mit „sehr gut“ bewertet und mit 500 Euro dotiert. Der Gutachter Prof. Wilfried Hofmann ist voll des Lobes: „Der Anspruch an das Analysevermögen des Bearbeiters war sehr hoch und überstieg das übliche Niveau von Diplomarbeiten. [...] Die Arbeit hat angeregt zu weiteren wissenschaftlichen Forschungsarbeiten (DFG, BMBF, AiF), die an der Schnittstelle von Elektrotechnik und Maschinenbau angesiedelt sind und ein hohes Potenzial für eine verstärkte interdisziplinäre Zusammenarbeit besitzen.“ Der Franz-Stolze-Preis wird für herausragende wissenschaftliche Abschlussarbeiten auf dem Gebiet der Energietechnik vergeben. Er wurde im Jahr 2010 vom internationalen Experten für Gasturbinentechnik und Ehrendoktor der Fakultät Maschinenwesen, Dr. E. h. Manfred Freimark gestiftet. Der Preis ist mit 1500 Euro dotiert. Er ist benannt nach dem Berliner Erfinder Dr. Franz Stolze (1836-1910), der u.a. die erste Gasturbine entwickelte.

(<https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/die-fakultaet/news/franz-stolze-preis-fuer-zwei-herausragende-abschlussarbeiten>)

### ETG-Literaturpreis 2020 für Robert Seifert

Junge Elektroenergietechniker unserer Fakultät gewinnen in diesem Jahr alle drei Literaturpreise der Energietechnischen Gesellschaft des VDE e.V. (ETG). Mit dem ETG-Literaturpreis werden hervorragende Publikationen auf dem Gebiet der elektrischen Energietechnik jährlich ausgezeichnet. Veröffentlichungen junger Wissenschaftler/innen, welche in origineller und anschaulicher Weise den innovativen wissenschaftlichen Inhalt darstellen, werden mit einer Geldprämie von 3.000 Euro gewürdigt. Robert Seifert beschreibt in seinem prämierten Artikel einen

neuartigen regelungstechnischen Flussdichteschätzer, der eine präzisere und dynamischere Regelung elektromagnetischer Aktoren und Magnetlager erlaubt. Magnetlager dienen der berührungslosen und schmiermittelfreien Lagerung von Rotoren in elektrischen Antrieben und finden in einem breiten Feld Anwendung, angefangen bei tonnenschweren Gasexpandern bis hin zu filigranen Herzpumpen. In der Luft- und Raumfahrtindustrie kommen sie z. B. in hochpräzisen Werkzeugspindeln zum Einsatz und erfordern dort eine hochdynamische Stellung von Position und Kraft des Werkzeugs. Die hochfrequenten Steuerspannungen führen zur Ausbildung von Wirbelströmen in den Eisenkernen der Lager, die eine Verdrängung des magnetischen Feldes und Dämpfung der wirksamen Kraft zur Folge haben. In seiner Publikation stellt Herr Seifert ein Verfahren vor, diese Phänomene auf Basis der Diffusionsgleichung mathematisch abzubilden und in Form fraktionaler Systeme zu beschreiben. Dieser Ansatz, der in der Akkorregelung bisher wenig Beachtung fand, erlaubt ihm erstmalig die Ableitung eines echtzeitfähigen digitalen Filters, welcher die auftretenden Wirbelstromeffekte regelungstechnisch kompensiert. Die Bandbreite von Magnetlagern und Aktoren, insbesondere solche mit massiven Eisenkernen, lässt sich auf diese Weise erheblich erhöhen. Die Gutachter der prämierten Publikationen sind voll des Lobes. „Die Arbeit von Herrn Seifert zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass ein regelungstechnisch höchst komplexes und anspruchsvolles Problem in hervorragender Weise gelöst wurde“, so der Laudator Prof. Martin Doppelbauer vom Karlsruher Institut für Technologie.

(<https://tu-dresden.de/ing/elektrotechnik/die-fakultaet/aktuelles/news/junge-elektroenergietechniker-der-tu-dresden-gewinnen-in-diesem-jahr-alle-drei-etg-literaturpreise>)

## Hans-Pundt-Preis 2020 für Simon Röschner

Der vom VDE-Bezirksverband Dresden ausgelobte Preis ging dieses Jahr an Herrn Simon Röschner für seine Diplomarbeit *„Anforderungsgerechte Anpassung der Auslegung einer Synchron-Reluktanzmaschine ohne Einsatz von Feldberechnungsmethoden“*.

Synchronreluktanzmaschinen nehmen unter den elektrischen Maschinen einen besonderen Platz ein, da keinerlei zusätzliche Hilfsmittel wie eine Wicklung im Rotor oder Permanentmagnete verwendet werden müssen, um ein Drehmoment zu entwickeln. Daher bieten diese Maschinen das Potential, kostengünstig hergestellt zu werden und gleichzeitig einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen, da auf der Rotorseite keine Stromwärmeverluste zu erwarten sind. Die VEM Sachsenwerk GmbH hat bereits Prototypen von Synchronreluktanzmaschinen (SynRM) verschiedener Achshöhen entwickelt, welche einen IE5-Wirkungsgrad im Bemessungspunkt erbringen. Darüber hinaus ist dieser Maschinentyp robust und im

Feldschwächbereich einsetzbar, weshalb er sich auch für den Einsatz als Hochgeschwindigkeitsantrieb eignet. Die Auslegung von Synchronreluktanzmaschinen lässt sich im Wesentlichen durch zwei Teilprozesse beschreiben. Während die Konstruktion der Rotorgeometrie einer Maschine bestimmter Baugröße verhältnismäßig selten erfolgt, ist der Berechnungs-Ingenieur täglich mit der Anpassung von Konstruktionsparametern wie der Länge des Aktivteils und der Windungszahl beschäftigt. Daher soll die Anpassung möglichst schnell realisierbar sein und gleichzeitig zu genauen Ergebnissen führen. Die durch den Kunden gestellten Anforderungen an Drehzahl und Drehmoment der auszulegenden Maschine bestimmen diesen Prozess maßgeblich. In seiner Diplomarbeit entwickelt Herr Simon Röschner ein neuartiges analytisches Anpassungsverfahren für Auslegungen von Synchronreluktanzmaschinen (SynRM) unterschiedlicher Baugröße. Im Gegensatz zu bereits vorgestellten analytischen Methoden berücksichtigt das Verfahren das magnetische Sättigungsverhalten der Maschine mit Hilfe einer vorliegenden numerisch berechneten Datengrundlage. Des Weiteren finden die reduzierenden Einflüsse von mechanischen Reibungs- und Ummagnetisierungsverlusten der Grundschiwingung Berücksichtigung. Dadurch gelingt die Kombination einer hinreichend genauen und zugleich rechenzeiteffizienten elektromagnetischen Auslegung von SynRMs unterschiedlicher Spulenwindungszahl und Aktivlänge, welche alle die durch den Kunden gestellten Anforderungen an Drehzahl und Drehmoment erfüllen können. Aufgrund der deutlich reduzierten Rechenzeit (30 Auslegungen in 13 min) gegenüber numerischer Feldberechnungsmethoden ist die Methode für den täglichen Einsatz durch den Maschinenhersteller geeignet. Die unmittelbaren Folgen aus den Erkenntnissen und entwickelten Werkzeugen sind eine drastische Verkürzung von Markteinführungszeiten und die Senkung von Entwicklungskosten. Zudem kann das Unternehmen VEM Sachsenwerk schneller auf Kundenwünsche und - nachforderungen, langfristige Marktendenzen und kurzfristige Marktentwicklungen reagieren. Das wiederum hilft dem sächsischen Elektromaschinenbauunternehmen sich in einer immer schwieriger werdenden Wettbewerbssituation gegenüber Anbietern aus Fernost im hartumkämpften Maschinenbaumarkt zu behaupten bzw. seine Marktanteile zu halten. Herrn Röschner ist zugutezuhalten, dass er sich bei der Themenbearbeitung nicht nur auf den rein wissenschaftlichen Teil der Arbeit konzentriert hat, sondern darüber hinaus eigene Impulse zum Erreichen der Praxistauglichkeit des entwickelten Berechnungswerkzeuges gesetzt hat, die weit über den gesteckten Rahmen der ursprünglichen Diplomaufgabe hinausgingen.

## BASF-Preis 2021 für Markus Weihrauch

Dipl.-Ing. Markus Weihrauch erhielt den Förderpreis für seine Diplomarbeit im Fachgebiet Elektrotechnik und Informationstechnik: „Modellbasierte prädiktive Regelung zur Planung mehrdimensionaler Bewegungsabläufe eines elektrischen Antriebssystems mit Speicher“ anlässlich des Tags der Fakultät Maschinenwesen.

Der durch die BASF Schwarzheide GmbH gestiftete und mit 3.000 Euro dotierte Preis wurde 2021 zum zweiten Mal in Kooperation mit der Gesellschaft von Freunden und Förderern der Technischen Universität Dresden e.V. vergeben. Das Preisgericht setzt sich aus Vertretern der BASF Schwarzheide GmbH sowie aus Hochschullehrern der Fakultäten Chemie und Lebensmittelchemie, Elektrotechnik und Informationstechnik, Informatik, Maschinenwesen und Umweltwissenschaften der TU Dresden zusammen.



(Foto: Niederlausitz aktuell)

Die Diplomarbeit von Herrn Weihrauch hatte zum Ziel für Antriebssysteme, wie sie in Logistikzentren in Regalbediengeräten zum Einsatz kommen, eine vorausschauende Regelung zu entwickeln und zu erproben, die eine energieeffiziente Betriebsweise der Anlagen gestattet und damit einen sparsamen Umgang von Elektroenergie unter den Randbedingungen einer Energieversorgung aus überwiegend regenerativen Energiequellen vorsieht. Im Sinne der Energiewende und steigender Energiepreise ist außerdem die Senkung des Energiebedarfs der Logistik, der im Jahr 2017 für Deutschland immerhin 57 TWh und damit 2 % des Energiebedarfs der Industrie ausmachte, ein wichtiges Anliegen. Herr Weihrauch hat sich mit großem Engagement und Elan bei einer sehr selbständigen Arbeitsweise seinem Diplomthema gewidmet. Ob es die theoretischen Grundlagen mit der Lösung komplexer Optimierungsprobleme mit Hilfe numerischer Methoden sind, eine modellprädiktive Regelung von mehrdimensionalen Bewegungsabläufen oder eine spezifische Speichersteuerung zu entwickeln gilt, Herr Weihrauch bewegt sich immer auf sicherem Terrain und wendet bekannte Algorithmen souverän an, indem er sie mit problemangepassten Strategien auf sinnvolle Weise verknüpft. Wertvoll sind die vielfältigen Untersuchungen zur leistungsangepassten Kombination gleichzeitiger Bewegungsvorgänge von Hub- und Fahrantrieben. Dabei werden nicht nur die antriebsorientierten Gütekriterien wie geringste Ver-

luste oder höchster Energienutzungsgrad mittels energieoptimaler Vorgänge einbezogen, sondern auch prozess- und verfahrensspezifische Kriterien wie höchster Durchsatz bzw. höchste Effektivität durch zeitoptimale Bewegungsverläufe gebührend berücksichtigt. Alle Überlegungen werden an praktischen Logistikprozessen, wie sie in Regalbediengeräten durch verwendete Einzel- und Doppelspiele bei ABC-Zonierung erforderlich sind, gespiegelt und anschaulich erläutert. Überhaupt kann der Arbeit ein hohes Maß an Anschaulichkeit attestiert werden, da alle Bemühungen zur Optimalität an realen Abläufen gemessen werden. Dem Einsatz und der Steuerung von Speichern, in dem Fall SuperCaps, wird besonderes Augenmerk in der Arbeit gewidmet. Dadurch, dass so viel wie möglich Energie im System gehalten wird, kann eine hohe Nachhaltigkeit für den Gesamtprozess erreicht werden, die zum einen weiteren Effizienzgewinn verbuchen lässt und zum anderen den Bezug von Leistungsspitzen aus dem Energienetz erheblich reduzieren hilft. Ein wesentlicher Nebeneffekt besteht zu dem darin, dass die elektrischen Komponenten wie Transformator, Kabel, Schalter und sonstige elektrische Installationen kleiner dimensioniert werden können und damit neben Energie- auch Materialeinsparungen zeitigen. Herr Weihrauch hat es zudem verstanden, eine umsichtige experimentelle Überprüfung seiner theoretischen und simulativen Arbeiten vorzunehmen. Dazu wurde eine durchgängig digitale Regelung des Antriebssystems für ein Regalbediengerät implementiert. Die Ergebnisse konnten zum Großteil durch Messungen bestätigt werden und wo größere Abweichungen im Ergebnis auftraten, wurden Vorschläge zur Modellverbesserung eingebracht und diskutiert. Herrn Weihrauch ist es gelungen eine theoretisch anspruchsvolle Arbeit mit erheblichem praktischen Anwendungspotential vorgelegt zu haben, sodass ihm eine herausragende Leistung zu bescheinigen ist, und die zur Preisverleihung mit dem BASF-Preis nachdrücklich empfohlen werden kann. Aus seiner Diplomarbeit sind zwei Publikationen entstanden, die zum Internationalen ETG-Kongress im Mai 2021 und zur ETG-Fachtagung Antriebssysteme im November 2021 vorgestellt worden sind.



## 3 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

### 3.1 Veröffentlichungen

Jan Döring: Elektromagnetische Auslegung einer Transversalflussreluktanzmaschine in Scheibenläuferbauweise mit weichmagnetischen Pulververbundwerkstoffen, Hrsg.: Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und Antrieben, Band 18, 160 Seiten, ISBN: 978-3-8440-7268-6, Shaker Verlag, Aachen, Mai, 2020.

Chris Evers, Volkmar Müller, Wilfried Hofmann: Design and application of energy storage for electrical multi-drive systems with fluctuating load on the example of a storage and retrieval machine. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives and Motion - SPEEDAM, S. 1 - 6, 2020.

W. Hofmann, M. Stiebler: Kap. 22 – 28 in DUBBEL Taschenbuch für den Maschinenbau 2: Anwendungen, Hrsg.: B. Bender, D. Göhlich, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 26. Auflage, S. 521 - 662, 2020.

H. Joshi, Y. Burkhardt, M. Seilmeier, W. Hofmann: Error Compensation in Initial Temperature Estimation of Electric Motors using a Kalman Filter. 24th International Conference on Electrical Machines, Goteborg, Sweden, S. 840-846, 2020.

S. Miersch, R. Schubert, T. Schuhmann, U. Schuffenhauer, M. Buddenbohm, M. Beyreuther, J. Kuhn, M. Lindner, B. Cebulski, J. Jung: Ceramic-like Composite Systems for Winding Insulation of Electrical Machines. 24th International Conference on Electrical Machines, Göteborg, Schweden, S. 1540 - 1546, 2020.

P. Harnisch, S. Miersch, U. Schuffenhauer, T. Schuhmann, J. Gründer, C. Kästle, T. Rabhansl, M. Wolf, A. Boric-Renz: Optimized Manufacturing Process and Modelling of Squirrel-Cage Induction Machines with Copper Cage and Axially Segmented End Rings for High-Speed Applications. 10th Electric Drives Production Conference, Ludwigsburg, Deutschland, S. 1 - 8, 2020.

J. Pecho, W. Hofmann: Analytical Approach and Solution for Line-Start Permanent Magnet Synchronous Machines with Anisotropic Rotor Reluctance, 24th International Conference on Electrical Machines. Goteborg, Sweden, S. 59 - 65, 2020.

S. Yuan, W. Hofmann: Data Sheets based Design of an Energy Efficient Powertrain of Electric Vehicles. 15th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies - EVER, S. 1 - 9, 2020.

Swen Bosch: Hybridfilter zur Kompensation von Grundschrwingungs- und Verzerungsblindleistung in Niederspannungsnetzen, Hrsg.: Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und Antrieben, Bd. 20, 170 Seiten, ISBN: 978-3-8440-8073-5, Shaker Verlag, Aachen, Juni, 2021.

S. Miersch, R. Schubert, T. Schuhmann, et al.: Keramikähnliche Kompositsysteme für die Wicklungsisolierung elektrischer Maschinen. 3. Freiburger Kolloquium Elektrische Antriebstechnik, 72. BHT - Freiburger Universitätsforum, in Freiburger Forschungshefte A942, Freiberg, S. 119 - 132, Juni 2021.

L. Schlegel, T. Knapp, W. Hofmann: Vergleich der Verluste in permanentmagneterregten Synchronmaschinen gespeist durch 3-Level-TNPC- oder 2-Level-Stromrichter. 3. Freiburger Kolloquium Elektrische Antriebstechnik, 72. BHT - Freiburger Universitätsforum, in Freiburger Forschungshefte A942, Freiberg, Deutschland, S. 18 - 34, Juni 2021.

Stefan Staudt: Optimierter sensorloser Betrieb von Synchron-Reluktanzmaschinen in Nutzfahrzeugen, Hrsg.: Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und Antrieben, Band 19, 140 Seiten, ISBN: 978-3-8440-7988-3, Shaker Verlag, Aachen, April, 2021.

M. Weihrauch, C. Evers, W. Hofmann: Prädiktive Trajektorienoptimierung und Speichersteuerung in Intralogistiksystemen zur Senkung der Netzbelastung. Internationaler ETG-Kongress 2021. Das Gesamtsystem im Fokus der Energiewende, 18. - 19.05.2021 in Wuppertal; ETG-Fachbericht 163, S. 234- 239, VDE-Verlag 2021.

S. Yuan, V. Mueller, W. Hofmann: A novel approach for fast assessment of energy efficient powertrain configurations in electric vehicles. GMM-Fachbericht 99: AmE 2021 - Automotive meets Electronics, 12th GMM-Symposium, VDE-Verlag, S. 68 - 73, 2021.

D. Guhl, R. Liebfried, W. Hofmann: Design and Comparison of Dual-Purpose Stator Windings for Active Chatter Suppression in Milling Spindles. 17th International Symposium on Magnetic Bearings, S. 186-199, 2021.

M. Hecht, R. Seifert, W. Hofmann: Application of Selected Numerical Methods to Model the Fractional Order System Behavior of Nonlaminated Magnetic Actuators. IEEE TechRxiv: Robotics and Control Systems, S. 1 - 8, 2021.

R. Seifert, W. Hofmann: Highly Dynamic Thrust Bearing Control Based on a Fractional-Order Flux Estimator, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 57, S. 6988-6999, 2021.

R. Seifert, J. Porstmann, W. Hofmann: Consideration of Hysteresis, Saturation, Fringing and Leakage Fluxes in the Frequency-Dependent Analytical Model of Nonlaminated Cylindrical Actuators, IEEE TechRxiv: Fields, Waves and Electromagnetics, S. 1 - 17, 2021.

R. Seifert, W. Hofmann: Introduction of a Novel Highly Dynamic Thrust Bearing Control Based on a Fractional-Order Flux Estimator. 17th International Symposium on Magnetic Bearings, S. 41- 43, 2021.

G. Sturm, W. Hofmann: Auslegung eines modularen Mehrpunkt-Stromrichters (M2C) für eine eisenlose Hochdrehzahl-Axialflussmaschine. VDE-Fachtagung Elektromechanische Antriebssysteme 2021, ETG-Fachbericht 164, S. 277 - 283, VDE-Verlag 2021.

M. Weihrauch, K. Turek, W. Hofmann, T. Schmidt: Optimierte Bahnplanung für Regalbediengeräte in Hochregallagern. VDE-Fachtagung Elektromechanische Antriebssysteme 2021, ETG-Fachbericht 164, S. 49 - 55, VDE-Verlag 2021.

S. Yuan, W. Hofmann: Auslegungsmethodik für energieeffiziente Antriebsstränge in Elektrofahrzeugen, VDE-Fachtagung Elektromechanische Antriebssysteme 2021; ETG-Fachbericht 164, S. 9 - 14, VDE-Verlag 2021.

R. Liebfried, W. Hofmann: Effect of the System's Time Constants on the Dynamic Behavior of an Active Magnetic Bearing with an GaN-H-Bridge-Converter, 23rd European Conference on Power Electronics and Applications, S. 1 - 10, 2021.

S. Miersch, R. Schubert, M. Lindner; T. Schuhmann, U. Schuffenhauer, E. Gießmann, M. Beyreuther, J. Kuhn: Magnet Excited Synchronous Machine in Outer Rotor Construction for an Electric Vehicle Drive. VDE-Fachtagung Elektromechanische Antriebssysteme 2021; ETG-Fachbericht 164, S. 206 - 211, VDE-Verlag 2021.

S. Ulbrich, S. Röschner: Application specific selection and design of Synchronous Reluctance Machines using pre-calculated data. VDE- Fachtagung Elektromechanische Antriebssysteme 2021; ETG-Fachbericht 164, S. 43 - 48, VDE-Verlag 2021.

## 3.2. Vorträge und Berichte

### 3.2.1 Lehrstuhl und Institut

#### Technische Berichte

- D. Kranz, S. Yuan: Bestimmung der Magnetverluste unter Berücksichtigung der Einflüsse eines Pulswechselrichters und der Nutharmonischen, Zwischenbericht, TB 2020-01
- T. Micklitz, D. Kranz: Potentiale maschinellen Lernens für die Auslegung drehender elektrischer Maschinen TB 2020-02
- D. Kranz: Bestimmung der Magnetverluste unter Berücksichtigung der Einflüsse eines Pulswechselrichters und der Nutharmonischen TB 2020-03
- T. Micklitz, D. Kranz: Potentiale maschinellen Lernens für die Auslegung drehender elektrischer Maschinen TB 2020-04
- S. Yuan: Auswahlssystematik für energieeffiziente Antriebsstränge in rein elektrischen Straßenfahrzeugen TB 2020-05
- T. Micklitz: Losses in air-coil windings TB 2020-06
- A. Nooriansaravi: Modellierung, Auslegung, Optimierung und Steuerung von Hybridspeicher-Topologien für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung dynamischer Fahrzustandswechsel. Zwischenbericht 1 zum Promotionsvorhaben. TB2021-01
- S. Yuan: Auswahlssystematik für energieeffiziente Antriebsstränge in rein elektrischen Straßenfahrzeugen. FVA-8861 Abschlussbericht. TB 2021-2
- N. Remus, A. Leubner, R. Liebfried: Control and dimensioning of an DFIG with an M3C in for the use as an asynchronous condenser. Final report Siemens ASCO Projekt. TB 2021-3
- G. Sturm, R. Liebfried: M3C dimensioning report for the Demonstrator. Ergebnisbericht aus der Nutzung des dimensioning tools, erstellt im Rahmen des ASCO Projektes. TB 2021-4
- G. Sturm, R. Liebfried: M3C dimensioning report for a 60 Hz machine. Ergebnisbericht aus der Nutzung des dimensioning tools. TB 2021-5
- G. Sturm: Gestaltung des Rotors und Optimierung des Magnetdesigns für eine eisenlose Hochdrehzahl-Axialflussmaschine. 1. Zwischenbericht zur Promotion: Entwurf einer eisenlosen, permanentenerregten Axialflussmaschine für Schwungradspeicher. TB 2021-6
- M. Weihrauch: Leistungsflussmodelle und Trajektorienoptimierung für ein Regalbediengerät. 1. Zwischenbericht zur Promotion. TB 2021-7

- S. Röschner: Bestimmung der Magnetverluste unter Berücksichtigung der Einflüsse eines Pulswechselrichters und der Nutharmonischen. 1. ZB ZF/2021. TB 2021-8
- L. Schlegel: Modularer breitbandiger Wechselrichter für hochdynamische Prüfstandsantriebe. 2. Zwischenbericht für ZIM-Projekt mit M&P Motion Control and Power Electronics GmbH. TB 2021-9
- M. Wang: Auswahlssystematik für energieeffiziente Antriebsstränge in brennstoffzellenbetriebenen Elektrofahrzeugen. 1. Zwischenbericht zur Promotion. TB 2021-10
- S. Röschner: Bestimmung der Magnetverluste unter Berücksichtigung der Einflüsse eines Pulswechselrichters und der Nutharmonischen. 2. ZB ZF/2021. TB 2021-11
- A. Guhl: Wicklungsentwurf eines lagerlosen Frässpindelmotors. 1. Zwischenbericht zur Promotion. TB 2021-12.
- L. Schlegel: Oberschwingungs-Stromregelung zum Stellen hochdynamischer periodischer Drehmomentprofile. 2. Zwischenbericht zur Promotion. TB 2021-13

## Forschungsvorträge

17.01.2020

---

Sören Miersch, Dipl.-Ing.

*„Forcierte Kühlung zur Steigerung der Ausnutzung permanenterregter Außenläufermaschinen.“*

22.10.2020

---

Johann Pecho, Dipl.-Ing.

*„Analytische Berechnung von Strom und Drehmoment beim Netzanlauf von Permanentmagnet-Synchronmaschinen.“*

16.10.2020

---

Dennis Guhl, Dipl.-Ing.

*„Neudesign der Statorwicklung einer Motorspindel zur aktiven Schwingungsdämpfung.“*

27.11.2020

---

Robert Seifert, Dipl.-Ing.

*„Hochdynamische Regelung eines magnetischen Axiallagers auf Basis eines fraktionalen Flussdichteschätzers.“*

23.04.2021

---

Shaohui Yuan

*„Auslegungsmethodik für energieeffiziente Antriebsstränge in Elektrofahrzeugen.“*

07.05.2021

---

Markus Weihrauch, Dipl.-Ing.

*„Trajektorienoptimierung und Speichersteuerung eines Regalbediengerätes.“*

14.05.2021

---

Simon Röschner, Dipl.-Ing.

*„Ermittlung subtransienter Induktivitäten zur Bestimmung von Oberschwingungsbedingten Magnetverlusten einer IPM-Synchronmaschine.“*

21.05.2021

---

Azadeh Nooriansaravi, M. Sc.

*„Grundlagen einer hybriden Energiespeicher-Topologie aus Batterien und Doppelschichtkondensatoren.“*

04.06.2021

---

Ludwig Schlegel, Dipl.-Ing.

*„Vergleich der Verluste in permanentmagneterregten Synchronmaschinen gespeist durch 3-Level-TNPC- oder 2-Level-Stromrichter.“*

Gino Sturm, Dipl.-Ing.

*„Gestaltung des Rotors und Magnetooptimierung für eine eisenlose Hochdrehzahl-Axialflussmaschine.“*

25.06.2021

---

Nico Remus, Dipl.-Ing.

*„Regelung des doppelt gespeisten Asynchrongenerators mit dem hochsetzenden direkten Matrixumrichter.“*

Robin Liebfried, Dipl.-Ing.

*„Einfluss der Systemzeitkonstanten auf das dynamische Verhalten eines aktiven Magnetlagers.“*

02.07.2021

---

Mingyi Wang, M. Sc.

*„Theoretische Modellierung der Einzelkomponenten in einem Brennstoffzellensystem zur Beschreibung der Luft- und Wasserstoffversorgung.“*

09.07.2021

---

Francesco Quattron, Dipl.-Ing.

*„Elektromagnetische Gestaltung permanentmagneterregter Synchronmaschinen für den geberlos geregelten Betrieb im gesamten Drehzahlbereich.“*

23.07.2021

---

Hrishikesh Joshi, M. Sc.

*„Kompensation von Stator-NTC Eigenerwärmungseffekten in elektrischen Maschinen durch Modellierung eines thermisches Netzwerk unter Berücksichtigung einer hardware basierten Messbereichsumschaltung.“*

Stefan Engelmann, Dipl.-Ing

*„Untersuchung zur Energieeffizienzsteigerung von Holzbearbeitungsmaschinen am Beispiel einer Kantenanleimmaschine.“*

26.11.2021

---

Dennis Guhl, Dipl.-Ing.

*„Wicklungsentwurf einer mehrphasigen Motorspindel.“*

03.12.2021

---

Dominik Thyroff, Dipl.-Ing.

*„Die Vernier-Maschine als Direktantrieb für Traktionsanwendungen.“*

## Gastvorträge

### 3.2.2 National und International

#### Vorträge ohne Publikation

W. Hofmann: *Maschinelles Lernen als Entwurfshilfe für elektrische Maschinen*. 18. Technischer Tag, VEM Wernigerode, 15.09.2021

S. Yuan: Auslegungsmethodik für energieeffiziente Antriebsstränge in Elektrofahrzeugen - FVA 886 I „E-Antrieb, Energieeffizienz, Systemoptimierung“. FVA Informationstagung 2021, 01.12.2021

#### Doktorandenseminar

2020 Ausfall wegen Corona

2021 als Online-Veranstaltung vom 21-22.09.2021

Die zweitägige Veranstaltung wurde dankenswerter Weise von den Kollegen der TU Darmstadt organisiert.

## Vorträge TU Darmstadt

Weiker, M.: Auswirkungen von statischer Rotorunwucht und drehzahlvariablen Betrieb auf umrichterbedingte Lagerströme – Ein Einblick in die aktuelle Forschung

Safdarzadeh, O.: Electrical characteristics of a bearing under electrical currents

Dietz, D.: Bearingless PM Synchronous Machine with Axial Active Magnetic Bearing fed by a Zero-Sequence Current

Köster, R.: Windgeneratoren mit supraleitender Erregerwicklung – Modellierung und Optimierung

Clauer, M.: Erhöhung der Effizienz eines elektrischen Antriebsstrangs durch Reduzierung der Rotormassenträgheit

Erd, N.: Konstruktion und Fertigung einer drehmomentstarken PMSM mit Zahnspulenwicklung und massivem Rotorjoch

Möller, A.: Loss Minimum Operation of a Five-Phase Induction Motor using Third Harmonic Injection

Li, X.: Loss Measurement of a Flywheel System

## Vorträge Uni Graz

Hartmann, M.: Power Electronics – Challenges and Impacts

Saed, N.: Effect of the Interaction of Different Manufacturing Imperfections on the Unbalanced Radial Forces in a Sub-Fractional HP Single-Phase BLDC Motor

Krall, F.: Electromagnetic Emissions of FHP BLDC Drives

Leitner, St.: Analysis of Claw Deflections in Low-Cost Sub-Fractional Horsepower BLDC Claw-Pole Motors

Riegler, B.: Volume Comparison of Passive Components for Current- and Voltage-Source-Inverters

## Vorträge TU Dresden

Liebfried, R.: Einfluss der Systemzeitkonstanten auf das dynamische Verhalten eines aktiven Magnetlagers

Sturm, G.: Auslegung eines modularen Mehrpunkt-Stromrichters für eine eisenlose Hochdrehzahl-Axialflussmaschine

Seifert, R.: Hochdynamische Regelung eines magnetischen Axiallagers auf Basis eines fraktionalen Flussdichteschätzers



Yuan, S.: Auslegungsmethodik für energieeffiziente Antriebsstränge in Elektrofahrzeugen

Weihrauch, M.: Optimierte Bahnplanung für Regalbediengeräte in Hochregallagern

Nooriansaravi, A.: Grundlage einer hybriden Energiespeicher-Topologie aus Batterien und Doppelschichtkondensatoren

Wang, M.: Theoretische Modellierung der Einzelkomponenten in einem Brennstoffzellensystem zur Beschreibung der Luft- und Wasserstoffversorgung

Knapp, T.: Verluste in permanentmagneterregten Synchronmaschinen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Stromrichtertopologien

Schlegel, L.: Stabilitätsuntersuchung einer parallel aufgebauten Stromregelung zum hochdynamischen Stellen von Drehmomenten

Miersch, S.: Keramikähnliche Kompositsysteme für die Wicklungsisolierung elektrischer Maschinen

Engelmann, S.: Untersuchung zur Energieeffizienzsteigerung von Holzbearbeitungsmaschinen am Beispiel einer Kantenanleimmaschine

Röschner, S.: Berechnung von Wirbelstromverlusten in Permanentmagneten einer IPM-Synchronmaschine

Heroth, M.: Abbildung klassischer Entwurfsmethoden im EM-Auslegungsprozess durch lernfähige Algorithmen

Guhl, D.: Design and Comparison of Dual-Purpose Stator Windings for Active Chatter Suppression in Milling Spindles

Pecho, J.: Parameterbestimmung von netzanlauffähigen PM-Synchronmaschinen

### 3.3 Kooperation

## Gremien und Gutachten

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

---

- Ordentliches Mitglied der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech)
- Ordentliches Mitglied der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig (Technikwissenschaftliche Klasse)
- Member of Editorial Board of Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik), Springer Verlag
- VDE: ETG-FB A1: Elektrische Maschinen und Antriebe; Mechatronik: AK19 Elektrische Maschinen und Antriebe; ETG-FB Q1: Leistungselektronik;
- VDI: Mitglied der Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, GMA

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

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. G.-H. Geitner (bis 03/2020)*

---

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

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

---

- VDE - VDI-FA 823 Motion Control.

*Dr.-Ing. N. Hildebrand*

---

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

## IAESTE – Praktikanten

Martin Hecht - Schweiz / Betreuer: Robert Seifert

*Numerische Verfahren zur Identifikation und Ordnungsreduktion der Übertragungsfunktion eines axialen Magnetlagers*

Raquel Maria Casan Crespo - Spanien / Betreuer: Mingyi Wang

*Modelling of brushless DC motor for compressor driving in a fuel cell system*

Monica Hernandez Soto – Spanien / Betreuer: Shaohui Yuan, Azadeh Noori

*Model-based power loss calculation and its verification on a powertrain test bench*

Blanca Marquina – Spanien / Betreuer: Gino Sturm

*Development of a carrier for axialflux machine stator with CAD*

Atipat Purahong – Thailand / Betreuer: Dennis Guhl, Simon Röschner

*DSP-Programmierung und FEM*

Charlotte Van De Mieroop – Belgien / Betreuer: Robin Linus Liebfried  
*Magnetic bearing control*

Alexander Mercado – Belgien Betreuer: Simon Röschner  
*Eddy current loss analysis in interior permanent magnets of synchronous machines*

Jovana Kovacevic – Serbien / Betreuer: Dennis Guhl  
*Development of a speed control scheme for a high speed PMSM milling spindle*

## 4 FORSCHUNG

### 4.1 Forschungsprofil – Schwerpunkt Energieforschung

Das Profil des Lehrstuhles Elektrische Maschinen und Antriebe ist geprägt durch Grundlagen- und Anwendungsforschung auf folgenden Gebiete:

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

### 4.2 Forschungsprojekte

#### *DFG-Projekte*

---

1. Neue Generatoranordnung mit der doppeltgespeisten Asynchronmaschine für besseres Verhalten beim Durchfahren von Netzfehlern, DFG - HO 1483/74, 2015–2020
2. Aktive verlustarme Magnetlager hoher Steifigkeit und Präzision mit integrierter Induktionsmessung und schneller Leistungselektronik, DFG – HO 1483/64-2; 2017–2021
3. Eisenlose Axialfluss-Permanentmagnet-Synchronmaschine mit Keramikwicklungsträger für Schwungradspeicher, DFG – HO 1483/77-1, 2016 – 2019, 77-2, 2019 –2021
4. Fraktionaler Flussschätzer zur Regelung axialer Magnetlager unter dem Einfluss von Wirbelströmung, DFG – HO 1483/78-1, 2017- 2021
5. Maschinenwicklungen in Kombinationsschaltung, DFG - HO 1483/71-2, 2019 – 2021
6. Prädiktive Entscheidungsmodelle für effizienten Energieeinsatz in der Intralogistik durch Gleichstromverbund, DFG - HO 1483/84- 1, SCHM 2689/16- 1, 2020 - 2022

#### *FVA Forschungsvereinigung Antriebstechnik*

---

Maschinelles Lernen, Entwurf, Optimierung - Potentiale maschinellen Lernens für die Auslegung drehender elektrischer Maschinen FVA 858 I, 2019 – 2021

Auswahlsystematik für energieeffiziente Antriebsstränge in rein elektrischen Straßenfahrzeugen, FVA T 886 I, 2020 – 2021

### *BMEL*

---

Energieeffiziente Energiewandlung in der industriellen Holzbe- und -verarbeitung vom Prozess bis zum Stromnetz (Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe des BMEL) EEHBV-EMA, 2021 - 2023

### *ZIM*

---

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

### *Industrie*

---

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

### *SAB*

---

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

## 4.3 Dissertationen

### Swen Bosch

Thema: Hybridfilter zur Kompensation von Grundsicherungs- und Verzerrungsblindleistung in Niederspannungsnetzen

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann  
Prof. Dr.-Ing. Heinrich Steinhart, FH Aalen  
Dr. Ing. Peter Matthes

Tag der Einreichung: 05.10.2020

Tag der Verteidigung: 18.12.2020

### **Zusammenfassung:**

Durch die Kompensation von Blindleistung wird das Energieversorgungsnetz entlastet und damit freie Übertragungskapazitäten geschaffen. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund des für die Energiewende notwendigen Netzausbaus von Relevanz, da die Energieversorgungsnetze nicht für die zunehmend dezentrale Einspeisung elektrischer Energie konzipiert wurden und sich der Umbau kompliziert und zeitintensiv gestaltet.

Diese Arbeit behandelt die Kompensation von Verschiebungs- und Verzerrungsblindleistung in Niederspannungsnetzen. Hierzu wurde eine Versuchsanlage aufgebaut, die neben der Kompensationsanlage auch verschiedene Verbraucher umfasst, welche im industriellen Umfeld typisch sind. Die Kompensation der Verschiebungsblindleistung erfolgt über thyristorgeschaltete Kompensationskondensatoren (TSC-Anlage, "Thyristor Switched Capacitors"), die Kompensation der Verzerrungsblindleistung wird durch ein Aktives Leistungsfilter ("Active Power Filter", kurz APF) realisiert.

Bei der TSC-Anlage liegt das Hauptaugenmerk auf einer hohen Dynamik der Kompensation und einem möglichst netzrückwirkungsfreien Zuschalten der Kompensationskondensatoren auf das Netz. Es werden verschiedene Zuschaltverfahren betrachtet, welche sich in der Vorladespannung der Kompensationskondensatoren und dem Phasenwinkel des Zuschaltens unterscheiden, um so direkt nach dem Zuschalten den stationären, eingeschwungenen Zustand zu erreichen.

Das APF ist als selbstgeführter Stromrichter mit kapazitivem Zwischenkreisspeicher aufgebaut. Die gängigen Verfahren zur Kompensation von Verzerrungsblindleistung basieren darauf, die Oberschwingungen einzeln zu kompensieren, womit der Aufwand zur Berechnung der Regelalgorithmen proportional mit der Anzahl der zu kompensierenden Oberschwingungen steigt. Das in dieser Arbeit verwendete Regelungskonzept verfolgt das Ziel, die Oberschwingungen nicht einzeln zu kompensieren, sondern die Summe aller Oberschwingungen, also den Verzerrungsstrom.

Die Basis hierzu bildet ein P-Regler, welcher um eine modellbasierte Vorsteuerung erweitert wurde. Diese kompensiert den Phasenfehler und den Einfluss der Rechenzeit und sorgt somit für gutes Führungsverhalten bei ausreichend genauer Modellbildung. In der Praxis ist eine exakte Modellbildung aufgrund variabler Einflussfaktoren wie der Netzimpedanz zumeist nicht möglich. Darüber hinaus wirken sich Störgrößen, in diesem Fall die (verzerrte) Netzanschlusspunktspannung, negativ auf die Güte der Regelung aus. Um dem entgegenzuwirken, wurde die Regelstruktur um einen repetitiven Regler ergänzt und damit sowohl gutes Führungs- als auch Störverhalten erreicht.

Vor allem bei APFs ist aufgrund des breiten Frequenzspektrums der eingepprägten Ströme eine verlässliche Dämpfung der Resonanzstelle des netzseitigen LCL-Filters nötig. Um die Stabilität der Regelung auch bei variablen Netzverhältnissen gewährleisten zu können, wurde ein non-invasives Verfahren entwickelt, welches ausschließlich anhand bereits vorhandener Systemgrößen die Frequenz der aktiven Dämpfung der Resonanzfrequenz des LCL-Filters nachführt.

## Stefan Staudt

Thema: Optimierter sensorloser Betrieb von Synchron-Reluktanzmaschinen in Nutzfahrzeugen

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

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann  
Prof. Dr.-Ing. Johannes Teigelkötter, FH Aschaffenburg

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

Tag der Einreichung: 25.09.2020      Tag der Verteidigung: 18.12.2020

### Zusammenfassung:

Der Einsatz von Synchron-Reluktanzmaschinen (SynRM) hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung für elektrische Fahrtriebe gewonnen. Aufgrund des hohen Kostendrucks in der Elektromobilität stellt die SynRM eine attraktive Lösung zwischen der Asynchronmaschine (ASM) und der permanentmagneterregten Synchronmaschine (PSM) dar. Dazu wird in dieser Arbeit der Einsatz von Synchron-Reluktanzmaschinen als Traktionsantrieb in batteriebetriebenen Flurförderzeugen untersucht. Dabei wird unter Beibehaltung des Volumens und der geometrischen Form die bestehende Asynchronmaschine durch eine SynRM ersetzt. Im Vergleich zum bestehenden System soll der Wirkungsgrad des Antriebs, bei gleichzeitiger Reduzierung der Produktionskosten, erhöht werden. Um dies zu realisieren, wird der Aufbau eines Maschinenmodells mit verschiedenen Regelungsverfahren vorgestellt. Dieses Modell basiert auf den Maschinenparametern und den gemessenen Sättigungseigenschaften der Induktivitäten der SynRM. Für einen wirkungsgradoptimalen Betrieb wird für jedes der beschriebenen Regelverfahren eine passende Methode zur Minimierung der Systemverluste entwickelt. Im Bereich der Feldschwächung werden zur Erhöhung des verfügbaren Drehmoments und des Gesamtwirkungsgrads die blockkommutierenden Verfahren der Dreifachflanken-Modulation (3F) und der Grundfrequenztaktung (GFT) eingesetzt. Die sich daraus ändernde Belastung des Stromrichterzwischenkreises wird ebenfalls analysiert. Ein Wechsel zwischen den Regelverfahren ist aufgrund der unterschiedlichen Systemgrößen nicht zu jedem Zeitpunkt möglich. Durch die Beobachtung der Flussbahn wird zu einem optimalen Zeitpunkt nahezu transientenfrei umgeschaltet. Zur weiteren Steigerungen der Robustheit und zur Kostensenkung wird für die feldorientierte Stromregelung (FOR) und für die GFT eine geberlose Positionserkennung entwickelt. Abhängig von der Differenz zwischen der geschätzten und realen Rotorlage erhöhen sich der benötigte Maschinenstrom und somit auch die Stromwärmeverluste. Die Anforderungen an den Erhalt der bisher erzielten Wirkungsgradwerte und an eine sichere Erkennung der Rotorlage sind hoch. Für einen zuverlässigen Betrieb wird die Stromregelung durch ein überlagertes Trägersignal erweitert. Ein Lagebeobachter berechnet anhand der

gemessenen Stromsignale daraus die Rotorlage. Mit dem Beginn des Feldschwächbereichs wird auf das Modulationsverfahren GFT umgeschaltet. Für einen sensorlosen Betrieb wird die GFT um eine dynamische Berechnung der Flussverketzung mit einer Drifterkennung erweitert. Als Kriterium für eine betriebspunktabhängige Auswahl der Modulationsverfahren wird der Gesamtwirkungsgrad von Stromrichter und Maschine herangezogen. Abschließend werden die erzielten Messergebnisse der SynRM im geberlosen Betrieb (FOR + GFT) mit dem Gesamtwirkungsgradkennfeld der ASM verglichen. Zur Validierung der Ergebnisse werden zusätzlich die thermischen Eigenschaften beider Maschinentypen gemessen und gegenübergestellt. Zur Bewertung der Auswirkungen des Trägersignals der sensorlosen Regelung auf den Wirkungsgrad werden die Oberschwingungen im Strom und in der Spannung im Frequenzspektrum dargestellt.

## Henry Barth

Thema: Einsatz von Siliziumkarbid-Bipolartransistoren in Antriebsstromrichtern zur Verlustreduktion

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Ellinger

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann  
Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann

Tag der Einreichung: 21.09.2020

Tag der Verteidigung: 20.07.2021

### Zusammenfassung:

Ein Drittel des Jahresstromverbrauchs in Deutschland entfällt auf elektromotorisch angetriebene Systeme. Das Strom-Einsparpotenzial für elektrische Antriebe wird auf 33 TWh geschätzt, wobei ca.10 TWh allein durch den vermehrten Einsatz elektronischer Drehzahlregelungen eingespart werden könnte. Dafür werden Antriebsstromrichter benötigt. Insbesondere ein höherer Wirkungsgrad und damit niedrigere Betriebskosten sowie eine schnellere Amortisation des Antriebs können positive Impulse setzen, um dieses Stromeinsparpotenzial in unmittelbarer Zukunft zu erreichen. Die Reduzierung der in den Leistungshalbleiter-Bauelementen anfallenden Verlustleistung spielt dabei eine entscheidende Rolle. Stand der Technik sind IGBTs und Freilaufdioden aus Silizium (Si). Jahrzehntelange Forschung hat zu einer nahezu perfekten Technologie geführt. Jedoch werden die Fortschritte hinsichtlich der Reduzierung von Schalt- und Durchlassverlusten mit jeder neuen Generation von Si-IGBTs immer kleiner. Die anfallende Verlustleistung kann jedoch signifikant mit Leistungshalbleiter-Bauelementen aus Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) gesenkt werden. Zu Beginn dieser Arbeit gab es erste Muster verschiedener SiC-Transistor-Konzepte für Nennsperrspannungen von 1200V. Es konkurrierten der SiC-JFET in den Varianten „normally-on“ und



„normally-off“, der SiC-MOSFET und der SiC-Bipolartransistor miteinander. Mit letzterem war die Hoffnung verbunden, ein Bauelement mit einer einfachen Struktur gefunden zu haben, das die niedrigsten Durchlassverluste und gleichzeitig konkurrenzfähige Schaltverluste aufweist. Ziel dieser Arbeit ist es, zu untersuchen, ob und inwieweit mit diskreten SiC-Bipolartransistoren im TO-247-Gehäuse und SiC-Schottky-Dioden im TO-220-Gehäuse der Wirkungsgrad eines Antriebsstromrichters gesteigert werden kann. Ein Exkurs in die Siliziumkarbid-Halbleitertechnologie am Anfang der Arbeit soll dem Leser die Vorteile dieser Technologie in Hinblick auf die Leistungselektronik aufzeigen. Für die Fertigung von Halbleiterbauelementen wichtige physikalische Eigenschaften werden mit denen von Silizium verglichen. Anschließend wird auf die Funktionsweise und den Aufbau des Bipolartransistors eingegangen. Die Vorteile des SiC-Bipolartransistors werden im Vergleich zum ersten Leistungstransistor - dem Bipolartransistor aus Silizium - herausgearbeitet. Im Gegensatz zu seinen Hauptkonkurrenten - dem Si-IGBT und dem SiC-MOSFET - handelt es sich beim SiC-Bipolartransistor um ein stromgesteuertes Bauelement, d.h. im laststromführenden Zustand muss ein Steuerstrom in die Basis eingepreßt werden. Damit erhöht sich der Treiberaufwand. Deshalb wird der erste Themenschwerpunkt auf den Treiber gelegt. Verschiedene Treiberkonzepte werden vorgestellt und in Bezug auf die auftretenden Verluste im Bipolartransistor, die Verluste im Treiber und der Komplexität des Treibers verglichen. Für die späteren Untersuchungen werden zwei - ein einfacher und komplexer Treiber - davon ausgewählt, aufgebaut und evaluiert. Mit leichten Modifikationen können mit dem komplexeren Treiber auch IGBTs und SiC-MOSFETs angesteuert werden. Ein neuer Ansatz zur Reduzierung der Treiberverlustleistung im Wechselrichter mit SiC-Bipolar-Transistoren wird vorgestellt. Er setzt bei dem Kommutierungsalgorithmus des Wechselrichters an. Im Gegensatz zum konventionellen Kommutierungsverfahren vermeidet die Einschnittkommutierung unnötige Schalthandlungen. Es wird experimentell untersucht, ob mit diesem Kommutierungsverfahren die Treiber-Verlustleistung halbiert werden kann. Ein wesentlicher Teil der Arbeit widmet sich der Charakterisierung des SiC-Bipolartransistors, insbesondere dem Schaltverhalten. Mit Doppelpulstests am Tiefsetzsteller sowie der voll bestückten Halbbrücke werden die Ein- und Ausschaltwärmes für verschiedene Arbeitspunkte ermittelt. Dies wird mit nahezu identischen Randbedingungen für den Si-IGBT und den SiC-MOSFET wiederholt, um die Messergebnisse anschließend vergleichen zu können. Besonderes Interesse gilt bei den Untersuchungen den Spannungsanstiegen über dem jeweiligen Transistor und dem Verlauf der Ansteuerspannung. Am Ende der Arbeit wird ein zweiter SiC-Wechselrichter aufgebaut. Mit experimentellen Untersuchungen sollen die Potentiale aber auch die Grenzen des Einsatzes von SiC-Bipolartransistoren in Antriebsstromrichtern aufgezeigt werden. Mit reduzierter Zwischenkreisspannung können zwei unterschiedlich dimensionierte Asynchronmaschinen erfolgreich angetrieben werden. Aufgrund der schnellen Schalthandlungen kommt es zu Spannungsspitzen an den Motorklemmen, die eine Gefahr für die Wicklungsisolierung darstellen. Deshalb muss ein Flanken-Filter am Ausgang des Wechselrichters verwendet

werden. Bei voller Zwischenkreisspannung kommt es jedoch zur Zerstörung des Wechselrichters. Während der anschließenden Fehlersuche werden Spannungsspitzen in den Ansteuerspannungen als Hauptursache identifiziert. Eine reduzierte Treiberversorgungsspannung ermöglicht zwar den sicheren Umrichterbetrieb, die Schaltverlustleistung nimmt jedoch zu. Die niedrigen Schaltwärmern, welche aufgrund der Doppelpulstests prognostiziert wurden, konnten im Umrichterbetrieb nicht erreicht werden.

## Sören Miersch

Thema: Erhöhung der Ausnutzung permanentmagneterregter Außenläufermaschinen durch Verbesserung der Wärmeabführung

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. F. Großmann

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann  
Prof. Dr.-Ing. Norbert Michalke  
Dr.-Ing. Frieder Lörcher

Tag der Einreichung: 21.09.2021

Tag der Verteidigung: 21.12.2021

### Zusammenfassung:

Für Anwendungen mit niedrigen Drehzahlen und großen Drehmomentanforderungen wie z. B. Windenergiegeneratoren, Aufzugs-, Lüfter- und Radnabenmotoren werden häufig elektrische Direktantriebe in Außenläuferbauweise eingesetzt. Im Vergleich zur Innenläuferausführung ist die Abführung der Statorverluste aufgrund der schlechteren Konvektionsbedingungen im Luftspalt und an den Wicklungsköpfen sowie des geringen Wärmedurchganges in den Lagern erschwert. Die Anbindung des Stators an eine große Konvektionsoberfläche fehlt. Im Hinblick auf die maximal zulässige Wicklungstemperatur ist eine Einschränkung der elektromagnetischen Ausnutzung notwendig und bei Luftkühlung liegen erreichbare Ausnutzungsziffern meist im Bereich  $< 2 \text{ kVA} \cdot \text{min}/\text{m}^2$ . Eine Alternative bietet die Methode der Statorrohrinnenkühlung, wobei ca. 80 % der Statorverluste über ein im innenliegenden Bauraum des Stators integriertes Kühlsystem abgeführt werden. Im Vergleich zur herkömmlichen Bauweise sind durch die intensivierte Luftkühlung Ausnutzungsziffern  $C > 3 \text{ kVA} \cdot \text{min}/\text{m}^2$  realisierbar. Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist die Ableitung von Auslegungskriterien für Außenläufermaschinen mit einer intensivierten Statorrohrinnenkühlung, wobei als Anwendungsbeispiel ein Kleinwindenergiegenerator, der eine geöffnete Rotornabe besitzt und durch die natürliche Windströmung gekühlt wird, dient. Aus der hochpoligen Ausführung der permanentmagneterregten Synchronmaschine ergeben sich geringere magnetische Flüsse pro Pol und der innere Bauraum kann aufgrund der

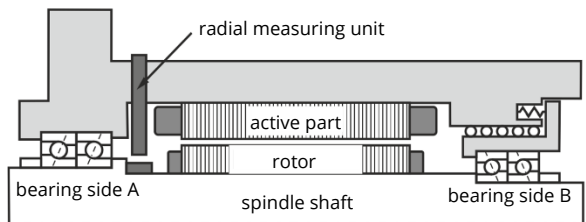
geringeren Rückenhöhe zur Kühlung genutzt werden. Für die Festlegung der Abmessungen des Aktiv- und des Kühlsystemvolumens der Maschine ist eine gekoppelte Erwärmungsberechnung erforderlich. Diesbezüglich wird die Erstellung eines elektromagnetisch strömungsmechanisch-thermisch gekoppelten Berechnungsmodells, das auf analytischen Ersatznetzwerken basiert und durch die Daten numerischer Teilmodelle gestützt wird, vorgeschlagen. Dabei sind die Schwerpunkte die Berechnungen des Arbeitspunktes des magnetischen Kreises, der Belastungskennlinien des Generators im Inselbetrieb, der lokalen Verlustverteilung, des Kühlluftvolumenstromes im Arbeitspunkt des Kühlsystems und der stationären Erwärmung der Maschine. Die Berechnung der Kühlsystemerwärmung erfolgt mit einem Subwärmequellennetz, wodurch der lokale konvektive Wärmeübergang und die Wärmeleitung im Kühlkörper berücksichtigt werden. Weitere Schwerpunkte der thermischen Modellierung sind u. a. die Berechnung der Wärmeübergänge im Luftspalt und in den Wicklungskopfbereichen, die Bestimmung der spezifischen Ersatzwärmeleitfähigkeiten der orthotropen Wärmeleitgebiete der Wicklung und des Elektroblechpaketes sowie die Berücksichtigung von Isolationsschichten, Füge- und Klebspalten. Experimentelle Untersuchungen in Form von Maschinenprüfungen an einem Prototyp des Kleinwindenergiegenerators sowie Windkanalmessungen an einem Strömungsmodell dienen der Verifikation der Berechnungen. Ausgehend von den Ergebnissen durchgeführter Parameterstudien zur Magnetkreis- und Wicklungsausführung in Kombination mit der Kühlsystemauslegung werden Schlussfolgerungen für die Projektierung der Außenläufermaschine mit intensivierter Statorrohrinnenkühlung zusammengefasst.

## 4.4 Ausgewählte Forschungsergebnisse in Kurzform

Dipl.-Ing. Dennis Guhl

### Wicklungsentwurf eines lagerlosen Frässpindelmotors

Das Zeitspanvolumen ist beim Fräsen eine wichtige Produktivitätskenngröße. Eine Steigerung dieses Volumens ist somit erstrebenswert und Gegenstand zahlreicher Forschungsvorhaben. Limitierende Faktoren stellen die Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Werkstück dar, insbesondere die selbsterregten Schwingungen aufgrund des Regenerativeffektes, genannt „Rattern“. Dieser Effekt führt zu instabilen Systemzuständen und ein Eintreten ist unter allen Umständen zu vermeiden. Ratterschwingungen äußern sich in den Biegeeigenmoden der Rotorwelle der Frässpindel. Der Schwingungsbauch der dominanten Eigenmode liegt im Bereich des integrierten Elektromotors. Unter Ausnutzung des Prinzips des „lagerlosen Motors“, wie in Fig. 1 dargestellt, kann an dieser Stelle eine Kraft zur aktiven Schwingungsdämpfung eingebracht und somit die Grenzschnitttiefe erhöht werden. Dieses Ziel wird im aktuellen Projekt „MinErwA“ verfolgt.



**Fig. 1:** Konzept der aktiv gedämpften Motorspindel/  
Concept of the actively damped motor spindle

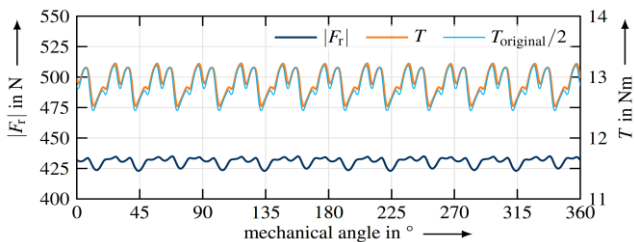
Der Betrieb des Frässpindelmotors als „lagerloser Motor“ war aufgrund der konservativen Gestaltungsmerkmale im Maschinenbau und einer angestrebten hohen Praxisnähe ausschließlich durch eine Neuwicklung des Stators zu erzielen. Zusätzlich war auf eine freie Leistungsverteilung zwischen Drehmoment- und Kraftbildung, eine äquivalente Drehmomentcharakteristik zum Originalmotor sowie eine ausreichend hohe Kraftwirkung mit möglichst kleinen Kraftwelligkeiten zu achten. Im Zuge einer Vorauswahl möglicher „kombinierter Wicklungen“ sowie sich anschließenden FE-Simulationen fiel die Wahl auf das Prinzip des lagerlosen mehrphasigen Motors. Die ursprüngliche dreiphasige Wicklung mit vier parallelen Zweigen pro Strang wurde hierzu am Sternpunkt aufgetrennt und jeder Zweig als eigene Phase herausgeführt. Die Wahl einer Phasenzahl von zwölf, sowie die identische Spulenweite ergaben sich aus qualitativen analytischen sowie simulativen Untersuchungen. Die simulativ ermittelten Kraft- und Drehmomentverläufe über einer Rotordrehung sind für eine Aufteilung des ursprünglichen Bemessungsstroms zu gleichen Teilen auf Drehmoment- und Kraftbildung in Fig. 2 zu sehen und zeigen die angestrebte äquivalente Drehmomentcharakteristik sowie eine exzellente Kraftwelligkeit von weniger als 3%.

## Winding design of a bearingless spindle motor

The metal removal rate is an important productivity parameter in milling. An increase in this volume is therefore desirable and the subject of numerous research projects. Limiting factors are the interactions between tool and work piece, especially the self-excited vibrations due to the regenerative effect, called "chatter". This effect leads to unstable system states and its occurrence must be avoided under all circumstances. Chatter vibrations manifest in the natural bending vibrations of the rotor shaft. The vibration antinode of the dominant eigenmode is located in the area of the integrated electric motor. By using the principle of the "bearingless motor", as depicted in fig. 1, we can produce a force for active chatter suppression at this point, thus increasing the limiting cutting depth.

The current "MinErwA" project pursues this goal. The operation of the spindle motor as a "bearingless motor" is achieved by a new stator winding due to the conservative design characteristics in mechanical engineering and the desired high practical relevance. In addition, a free power distribution between torque and force generation, a torque characteristic equivalent to that of the original motor and a sufficiently high force effect with a small ripple was required.

In the course of a preliminary selection of possible "combined windings" and subsequent FE simulations, we chose the principle of the bearingless multiphase motor. The original three-phase winding with four parallel branches per phase was separated at the star point and each branch represents its own phase. The choice of a phase number of twelve, as well as the identical coil width, resulted from qualitative analytical and simulative investigations. Figure 2 shows the simulated force and torque characteristics over one rotor revolution for an equal division of the original rated current between torque and force generation and demonstrates the desired equivalent torque characteristics as well as an excellent force ripple of less than 3%.



**Fig. 2:** Simulierte Drehmoment- und Kraftverläufe über einer Rotordrehung/  
Simulated torque and force characteristics over one rotor revolution

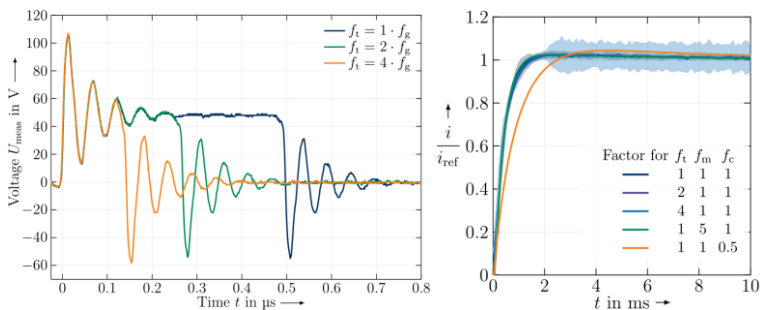
## Literature

- [1] M. Kang, J. Huang, J.-q. Yang, et al. "Analysis and experiment of a 6-phase bearingless induction motor," in 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE, 2008, pp. 990—994.

## Einfluss der Mess-, Schalt- und Regelzeitkonstante auf das dynamische Verhalten eines aktiven Magnetlagers

Während die Regelung und die Mechanik auf offensichtliche Weise Einfluss auf das dynamische Verhalten eines aktiven Magnetlagers (AMB) haben, gilt es in der praktischen Anwendung weitere Einflüsse zu berücksichtigen, welche oft vernachlässigt werden. Im Rahmen des DFG-Projektes HO 1483/64-2 wurden daher die drei wesentlichen Zeitkonstanten der Ansteuerung untersucht: Die Reglerabstastperiode bzw. Regelfrequenz  $T_c = 1/f_c$ , die Abtastperiode der Messung bzw. Abtastfrequenz  $T_m = 1/f_m$  und Schaltperiode bzw. Schaltfrequenz  $T_t = 1/f_t$ . Ausgangspunkt der Untersuchung ist die Einstellung mit Grundfrequenz  $f_g = f_c = f_m = f_t = 21.333$  Hz. Von dieser Referenzmessung ausgehend werden die Frequenzen mit Faktoren angepasst. Eigens dazu wurden zur Ansteuerung H-Brücken mit GaN-Halbleitern entwickelt, welche Schaltfrequenzen über 200 kHz zulassen [1].

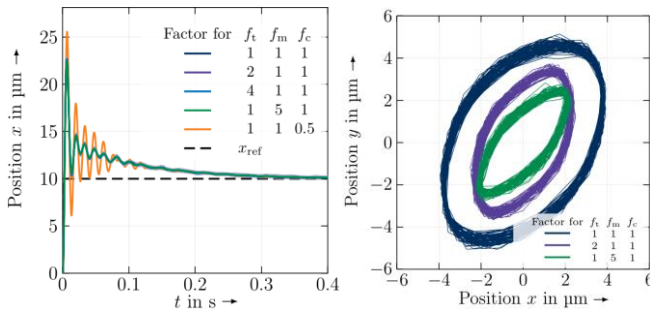
Die Erhöhung der Schaltfrequenz  $f_t$  führt bei kleinen Duty Cycles zu sehr geringen Einschaltzeiten und damit zu hohen Spannungintegralfehlern, welche sich negativ auf den Stromrippel bei konstantem Strom auswirken (Fig.1). Während beim Führungsverhalten (Fig.2 links) des Lageregelkreises Einfluss von  $f_t$  kaum sichtbar ist, wird besonders beim Störverhalten (Fig.2 rechts) ein positiver Einfluss deutlich, da in Rotation höhere Duty Cycle gestellt werden. Auch ein Erhöhen der Messfrequenz  $f_m$  verbessert das Verhalten, was auf eine kleinere Summenzeitkonstante und weniger Rauschen zurückzuführen ist. Ein verringern der Regelfrequenz  $f_c$  verschlechtert das Lagerverhalten signifikant.



**Fig.1:** Verlauf der Spannung am AMB bei 1 % Duty-Cycle (link) und Sprungantwort des Stromregelkreises gemittelt über 25 Sprünge mit  $3\sigma$ -Konfidenzintervall (rechts); Voltage at the AMB terminals at 1 % duty cycle (left) and average current control loop step response of 25 measurements with  $3\sigma$  confidence interval (right)

## Effect of the Measurement, Switching, and Control Time Constants on the Dynamic Behavior of an Active Magnetic Bearing

The mechanics and the control of an active magnetic bearing (AMB) have effect on its dynamic behavior. For general applications, we shall consider more effects. Under DFG grant HO 1483/62-2, we investigated the three main time constants of the AMB's peripherals: The controller time constant  $T_c = 1/f_c$ , the measurement sampling time  $T_m = 1/f_m$ , and the converter's PWM period  $T_t = 1/f_t$ . Starting from the default frequency  $f_g = f_c = f_m = f_t = 21,333$  Hz, we adjusted the different frequencies by changing factors. To reduce the PWM period time we built a GaN-H-Bridge-Converter enabling switching frequency above 200 kHz [1]. Increasing the switching frequency at tiny duty cycles leads to very short switch-on times and high voltage errors because of voltage oscillations when switching on and off. The voltage error results in a higher current ripple at constant current values (Fig.1). While  $f_t$  just minorly affects the reference-value response of the position control loop (Fig.2 left), it shows a positive effect on the disturbance response (Fig.2 right), mainly caused by the higher duty cycles in rotating operation. Increasing the measurement sampling frequency  $f_m$  also improves the orbit significantly (Fig.2 right), due to the reduced measurement noise lower uncompensated time constant of the inner control loop. Reducing  $f_c$  worsens the dynamic behavior in all conducted experiments.



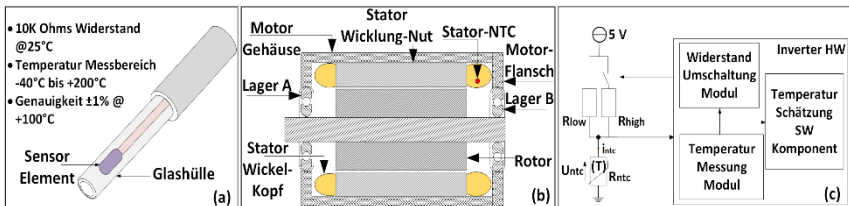
**Fig. 2:** Sprungantwort des Lageregelkreises im Stillstand gemittelt über 25 Sprünge (links) und Orbit des AMB bei 5000  $\text{min}^{-1}$  (rechts) /Average position control loop step response of 25 measurements at standstill and AMB's orbit at 5000 rpm

### Literature

- [1] R. Liebfried, W. Hofmann: Effect of the System's Time Constants on the Dynamic Behavior of an Active Magnetic Bearing with a GaN-H-Bridge-Converter, 23rd European Conf. on Power Electronics and Applications, 2021.

## Kompensation von Stator-NTC Eigenerwärmungseffekten durch Modellierung eines thermischen Netzwerks unter Berücksichtigung einer hardwarebasierten Messbereichsumschaltung

Permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PMSM) werden gegenwärtig in großem Umfang in EV/PHEV verwendet, da sie eine hohe Drehmomentdichte aufweisen. Um ein Drehmoment mit hoher Genauigkeit zu erzeugen, ist es wichtig, die Temperatur des Permanentmagneten (PM) so genau wie möglich zu schätzen. Im Projekt wird die Kompensation eines Sprungs in der gemessenen Statortemperatur mittels Stator-NTC implementiert, welche einen Sprung im geschätzten Rotortemperatur-Knoten verursacht und dadurch zu einer schlechteren Drehmomentgenauigkeit führt. Der Fokus ist gerichtet auf die Kompensation der eigenerwärmungsbedingten Temperaturüberhöhung, was die Modellierung eines thermischen Netzwerks von Sensorelemente und Glashülle (siehe Fig.1a und Fig.2) erforderlich macht. Das Ziel (in Lila Farbe) ist eine Temperaturkorrektur von ca. +5 K bei Aufheizphase und -3 K bei Abkühlphase (siehe Fig.3). Die hardwarebasierte Messbereichsumschaltung besteht nach Fig.1c aus zwei Parallelwiderständen  $R_{low}$  (-40°C...60°C) und  $R_{high}$  (60°C...220°C). Der temperaturabhängige Stator-NTC-Widerstand  $R_{ntc}$  ist verbunden mit dem Spannungsteiler. Die zwei Widerstände erhöhen die Sensitivität des Messsignals. Wenn der höhere Bereichswiderstand parallelgeschaltet ist, ist der Strom höher als bei niedrigerem Bereichswiderstand. Der höhere Strom verursacht eine Eigenerwärmung in dem Stator-NTC-Widerstand. Der Stator-NTC-Widerstand  $R_{ntc}$  reduziert sich während der Widerstandsumschaltung in der Aufheizphase um ca. 500  $\Omega$ , was einer Temperaturüberhöhung von ca. 5K entspricht, s. Fig.3. Der temperaturabhängige Stator-NTC-Widerstand  $R_{ntc}$  erhöht sich um ca. 400  $\Omega$  während Widerstandsumschaltung in der Abkühlphase passend zur Temperaturabsenkung von ca. 3K. Das beeinflusst die geschätzte Rotortemperatur. Das thermische Verhalten wurde anhand von zwei zusätzlichen Knoten im thermischen Netzwerk modelliert, s. Fig.1a, um den Sprung in der Stator-NTC-Temperatur zu kompensieren. Es wurde festgestellt, dass die Kompensation akzeptable Ergebnisse geliefert hat.

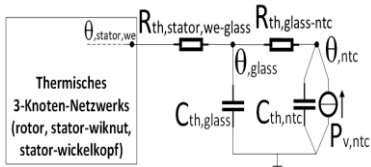


**Fig.1:** Messanordnung. a) Stator-NTC-Sensor, b) Axialschnitt der PMSM (c) Messbereichs-Umschaltung für Temperatursensor/ Measurement circuit. a) stator-NTC-sensor, b) axial section of PMSM, c) Hardware based measuring range switching



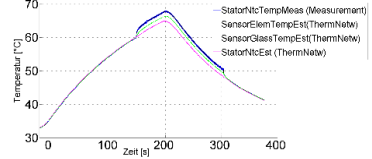
## Compensation of Stator-NTC self-heating effect via thermal modelling of hardware based range-switch used to achieve extended resolution of temperature measurement range

PMSM are currently used extensively in EV/PHEV due to their capability of generating high torque. In order to generate high accuracy torque it is important to estimate the temperature of the Permanent Magnets (PM), which are embedded in rotor of PMSM. The research work focuses on lumped parameter thermal network (LPTN) of PMSM (see Fig.2), which has been modeled to estimate PM temperature. In addition, extended thermal-nodes for Stator-NTC sensor element and cover glass (see Fig.1a) have been modelled in Fig.2 to compensate the self-heating phenomenon. This was observed during switching of a range-switch exclusively used for extending the resolution of stator temperature measurement range (see Fig.1c). The range-switch is designed to improve the sensitivity of the measured signal by stator-NTC using two resistors  $R_{low}$  and  $R_{high}$  in parallel connection as shown in Fig.1c. The resistors are active in a specific temperature range which is  $R_{low}$  (-40°C...60°C),  $R_{high}$  (60°C...220°C). When the measured temperature increases above 60°C the hardware based switch is activated  $R_{high}$  resistance such that  $R_{low}$  and  $R_{high}$  are in parallel connection. This implies voltage divider principle on the equivalent circuit shown in Fig.1c, which in turn causes a high current to flow through the equivalent resistance of  $R_{high}$  and  $R_{low}$  in parallel. This high current induces self-heating of the stator-NTC element and the cover glass. Since the stator-NTC resistance  $R_{ntc}$  is temperature dependent, it causes a change in resistance, which in turn induces a change in measured voltage  $U_{ntc}$ . Hence, a jump of ~5K is observed in measured stator-NTC temperature (blue) as shown in Fig.3. The aim of the research work is to compensate the jump of ~5K in measured stator-NTC temperature so that the consequence on estimated rotor temperature can be nullified. The measured stator-NTC signal serves as input to the 3-node LPTN of PMSM as a state correction vector for an integrated Luenberger observer in LPTN. As a result, a jump in measured stator-NTC temperature induces a jump of similar magnitude in estimated rotor temperature. The results revealed that self-heating effect was compensated (see Fig.3).



**Fig.2:** Erweitertes Ersatzschaltbild mit zusätzlichen 2-Knoten von Stator-NTC und Glashülle / Extended equivalent circuit with two additional nodes

Ergebnissen: Kompensation von Sprung in Statortemperatur durch Stator-NTC Eigenwärmeeffekten in elektrischen Maschinen



**Fig.3:** Gemessener (blau) und kompensierter (Lila) Stator-NTC Temperaturverlauf bei 30 Nm und 6000 rpm /Measured (blue) and compensated (lila) stator-NTC temperature at 30 Nm and 6000 rpm

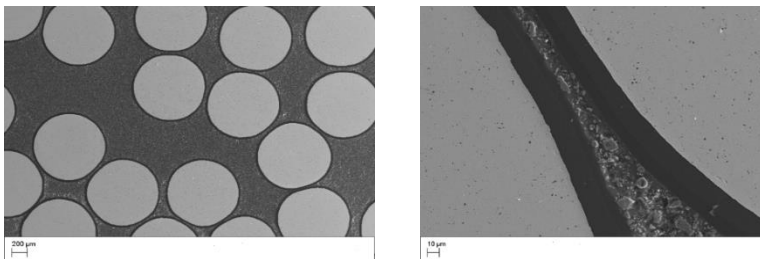
## Literature

- [1] Joshi, H., Burkhardt, Y., Seilmeier, M., & Hofmann, W. (2020, August). Error Compensation in Initial Temperature Estimation of Electric Motors using a Kalman Filter. In 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM) (Vol. 1, pp. 840-846). IEEE.

Sören Miersch

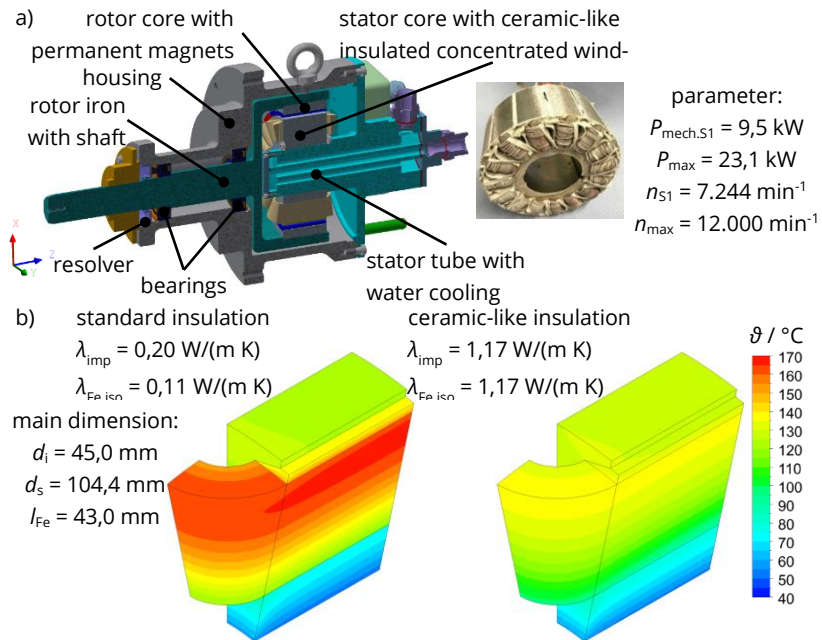
## Untersuchung von keramikähnlichen Verbundsystemen für die Wicklungsisolation hochausgenutzter elektrischer Maschinen

Ein Ziel bei der Auslegung von elektrischen Maschinen für den Einsatz in Elektrofahrzeugen ist das Erreichen einer hohen elektromagnetischen Ausnutzung des Aktivteils. Dies ist im Wesentlichen durch eine Steigerung des Strombelags  $A$  möglich. Dabei ergibt sich die Anwendungsgrenze aus der maximal zulässigen Temperatur der Isolierwerkstoffe der Wicklung (typ. 180 °C). Für die Haupt- und Phaseninsolation der Wicklung werden vorrangig Flächenisolierwerkstoffe, die eine spezifische Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda \leq 0,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  besitzen, eingesetzt. Ungefüllte Imprägniermittel z. B. auf Epoxid- oder Polyesterimidbasis weisen ebenfalls spezifische Wärmeleitfähigkeiten von ca.  $0,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  auf. Die Folge sind große Temperaturgradienten innerhalb der Maschinenwicklung und die Bildung von Hotspots z. B. im Querschnitt breiter Nuten sowie im Bereich der Wicklungsköpfe. Mit gefüllten Vergussmassen sind spezifische Wärmeleitfähigkeiten im Bereich  $(1...3) \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  erreichbar, wobei sich die Verarbeitungseigenschaften mit steigendem Füllgrad verschlechtern und diese Werkstoffe nicht zur Imprägnierung der Wicklung einer elektrischen Maschine geeignet sind [4]. Mit dem Ziel der Steigerung der Wärmeleitfähigkeit der Wicklungsisolation wurden am Fraunhofer Institut IKTS Hermsdorf keramikähnliche Polysiloxan-Kompositwerkstoffe entwickelt und charakterisiert. Als Füllstoffe kamen Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Aluminiumnitrid  $\text{AlN}$  und Bornitrid  $\text{BN}$  zum Einsatz, wobei spezifische thermische Leitfähigkeiten der Komposite im Bereich  $(0,83...2,76) \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  liegen [1]. Die Werkstoffe werden sowohl für das Aufbringen der Hauptisolation auf das Elektroblechpaket in einem Tauchprozess als auch für die Imprägnierung der Wicklung in einem Vakuum-Druck-Imprägnierverfahren eingesetzt. Dabei zeigten sich die besten Verarbeitungseigenschaften, elektrische Durchschlagfestigkeit (25 kV/mm) und gute thermische Wechselbelastbarkeit für das  $\text{AlN}$ -gefüllte Kompositensystem [2].



**Fig. 1:** Untersuchung von Wicklungsverbundproben mit  $\text{AlN}$ -gefüllter Imprägnierung / Investigation of winding composite samples with  $\text{AlN}$ -filled impregnation [2]

Mikroskopische Untersuchungen des Interfaces zwischen Draht und Imprägnierung zeigen eine komplette Füllung der Zwischenräume, eine vollständige Benetzung der Drahtoberfläche und eine gleichmäßige Verteilung der Füllstoffkörner (Fig. 1). Die spezifische thermische Leitfähigkeit des Wicklungsverbundes konnte ca. um den Faktor drei gesteigert werden [4]. Anhand der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung einer Demonstratormaschine sollte das Potential zur Steigerung der Leistungsdichte durch die neuartigen Isolierwerkstoffe aufgezeigt werden. Ausgehend von der Konzeptstudie eines Radnabenantriebs der IAV GmbH wurde an der HTW Dresden die in Fig. 2 a dargestellte Außenläufermaschine für Prüffelduntersuchungen konzipiert. Durch die Firma Hans Mayer Elektrotechnik erfolgte der Aufbau von zwei Prototypmaschinen, eine mit herkömmlicher Wicklungsisolierung und eine mit keramikähnlicher Isolierung, wobei der keramikähnliche Kompositwerkstoff für die Hauptisolierung des Elektroblechpaketes und die Imprägnierung der Wicklung eingesetzt wurde. Bei der Ausführung der Maschine mit einer Wicklungsisolierung in der thermischen Klasse H ( $\vartheta_{w,max} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ergeben sich für die Belastung im Bemessungspunkt die Ausnutzungsziffer  $C = 3,16\text{ kVA} \cdot \text{min}/\text{m}^3$  und ein charakteristisches Produkt  $A \cdot J = 374\text{ kA}/\text{m} \cdot \text{A}/\text{mm}^2$ .



**Fig. 2:** PSM-Außenläufermaschine mit keramikähnlicher Wicklungsisolierung/ Outer rotor PSM with ceramic-like winding insulation [2], [4]

In dem Betriebspunkt resultiert aus dem Vergleich der numerisch berechneten Statorerwärmung der beiden Isolationsvarianten in Fig. 2 b bei Einsatz des keramikähnlichen Isoliermaterials eine Reduzierung der maximalen Wicklungstemperatur von ca. 30 K, was einer relativen Änderung von ca. -18 % entspricht [2], [4]. Untersucht wurden vorerst zwei Betriebspunkte bei Bemessungsdrehmoment und den Drehzahlen  $1500 \text{ min}^{-1}$  und  $3000 \text{ min}^{-1}$  (Tab. 1). Dabei erfolgte die Bestimmung der Wicklungstemperaturen in den Heizpunkten mit Pt100-Temperatur Sensoren und die mittlere Wicklungstemperatur wurde mit dem Widerstandsmessverfahren ermittelt. In den untersuchten Betriebspunkten konnten durch das neuartige keramikähnliche Isoliersystem die maximale Wicklungsüber- temperatur um bis zu 45 K und die mittlere Wicklungsüber-temperatur um ca. 40 K reduziert werden (relative Änderungen der Wicklungsüber-temperatur im Bereich - (49...58) %). Mit dem geringeren Warmwiderstand der Statorwicklung und den damit niedrigeren Stromwärmeverlusten ergibt sich eine Wirkungsgradsteigerung von bis zu 0,75 %. Bei vergleichbarer maximaler Wicklungserwärmung konnte für die Maschine mit keramikähnlicher Wicklungs- isolation eine relative Steigerung der Leistungsdichte von bis zu 44 % experimentell nachgewiesen werden, wobei diese mit Zunahme des Anteils der Stromwärmeverluste in der Wicklung an den Gesamtverlusten ansteigt. Im Rahmen weiterführender Arbeiten ist die Untersuchung der Betriebsparameter im gesamten n-M-Kennfeld geplant [4].

**Tab. 1:** Ergebnisse der Variantenuntersuchung in ausgewählten Betriebspunkten / Results of the investigation of variants at selected operating points [4]

Insulation	$U$ (V)	$I$ (A)	$P_{el}$ (kW)	$n$ (rpm)	$T$ (Nm)	$P_{mech}$ (kW)	$\eta$ (%)	$\Delta\vartheta_{w,max}$ (K)	$\Delta\vartheta_{w,ave}$ (K)
<b>standard</b> (polyesterimide)	92,4	21,4	2,19	1500	12,6	<b>1,98</b>	<b>90,1</b>	<b>82,4</b>	<b>69,7</b>
	153,5	21,9	4,25	3000	12,6	<b>3,95</b>	<b>93,0</b>	<b>87,6</b>	<b>74,9</b>
<b>ceramic-like</b> (polysiloxane with AlN-filler)	94,9	20,8	2,19	1500	12,7	1,99	<b>90,8</b>	<b>36,3</b>	<b>29,6</b>
	96,9	30,2	3,28	1500	18,1	<b>2,85</b>	87,0	81,2	65,2
	158,1	21,5	4,27	2999	12,7	3,99	<b>93,5</b>	<b>44,2</b>	<b>37,3</b>
	160,2	30,5	6,14	3000	17,9	<b>5,64</b>	91,8	88,1	72,4

Es wurde gezeigt, dass keramikähnliche Kompositsysteme auf der Basis gefüllter Polysiloxane für die Isolation der Wicklung prinzipiell geeignet sind. Im Hinblick auf weiterführende Forschungsarbeiten wird die Vorbereitung der Zertifizierung der Isolierwerkstoffe und die Optimierung des Isolierprozesses im Fokus stehen.

## Investigation of ceramic-like composite systems for the winding insulation of highly utilized electrical machines

When designing electrical machines for electric vehicles, one goal is to achieve a high level of electromagnetic utilization of the active part. This is possible by increasing the current loading  $A$ , whereby the application limit is resulting from the maximum permissible temperature of the insulation materials of the winding (thermal class H:  $\vartheta_{w,max} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). The winding insulation consists of the main, phase and conductor insulation. Polyester films with a specific thermal conductivity  $\lambda < 0.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  are primarily used as surface insulation materials. The enamel insulation of the copper conductors (e.g. made of polyurethane) and unfilled impregnating materials based on epoxy, polyurethane or polyesterimide also only have a thermal conductivity of approx.  $0.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Because of the low specific thermal conductivity, large temperature gradients arise in the winding cross-section and hotspots are generated e.g. in the end windings. Thermal conductivities in the range  $(1\dots3)\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  can be achieved for filled casting compounds, though the processing properties deteriorate as the degree of filling increases and these materials are not appropriate for impregnation of the windings [4]. With the aim of increasing the thermal conductivity of the winding insulation, ceramic-like polysiloxane composite materials were developed and characterized at the Fraunhofer Institute IKTS Hermsdorf. Aluminum oxide  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , aluminum nitride  $\text{AlN}$  and boron nitride  $\text{BN}$  were used as fillers. The specific thermal conductivities of the composites are in the range  $(0,83\dots2,76)\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  [1]. The materials are used both for applying the main insulation to the electrical sheet package in a dipping process and for impregnating the winding in a vacuum pressure impregnation process. The best processing properties, a breakthrough voltage of approx.  $25\text{ kV}/\text{mm}$  and good thermal stress properties were found for the  $\text{AlN}$ -filled composite system [2]. The microscopic examinations of the interface between the enameled copper wire and the impregnation system show a complete filling of the winding test sample, a complete wetting of the wire surface with the impregnation agent and an even distribution of the filler grains even in the smallest wire gaps (cf. Fig. 1). The specific thermal conductivity of the winding compound has been increased by a factor of three [4]. Based on the results of the experimental investigation of a demonstrator machine, the potential for increasing the power density through the new insulating materials was to be demonstrated. With the concept study of a wheel hub drive from IAV GmbH, an external rotor machine was designed at HTW Dresden for test bench investigation (cf. Fig. 2 a). The company Hans Mayer Elektrotechnik built two prototype machines, one with conventional winding insulation and one with ceramic-like insulation. The ceramic-like composite material was used for the main insulation of the electrical sheet pack-

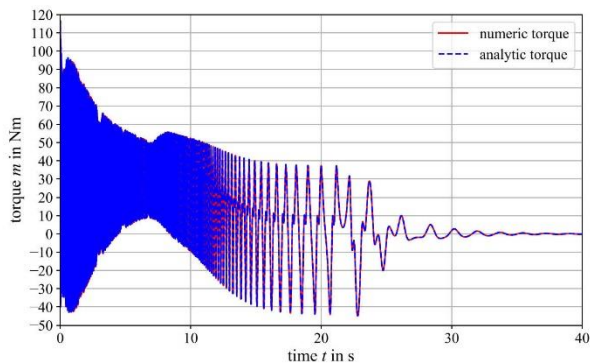
age and the impregnation of the winding. At the rated point, the machine with thermal class H has an electromagnetic utilization factor of  $C = 3.16 \text{ kVA} \cdot \text{min}/\text{m}^3$  and a characteristic product of  $A \cdot J = 374 \text{ kA}/\text{m} \cdot \text{A}/\text{mm}^2$ . Based on the simulation in Fig. 2 b, with the ceramic-like insulation the maximum winding temperature can be reduced by approx. 30 K, corresponding to a relative change of approx. -18 % [2], [4]. Two operating points were examined at rated torque and the speeds of 1500 rpm and 3000 rpm (cf. Tab. 1). The machines have Pt100 temperature sensors for determining the winding temperatures in the hot spots, the mean winding temperature is determined using the resistance measurement method. In the operating points examined, the new ceramic-like insulation system can reduce the maximum winding temperature rise by approx. 45 K and the mean winding temperature rise by approx. 40 K (change of relative excess temperature in the range of -(49...58) %). With the lower warm resistance of the stator winding and the resulting reduced ohmic losses, there is an increase in efficiency of up to 0.75 % for identical output power  $P_{\text{mech}}$ . With a comparable maximum winding heating  $\Delta\vartheta_{w,\text{max}}$ , a relative increase in the power density of up to 44 % has been proven experimentally for the machine with ceramic-like winding insulation, which even increases with an increasing share of the ohmic losses in the total losses. The investigation of the operational behavior in the entire speed-torque map is planned [4]. It was shown that ceramic-like composite systems based on filled polysiloxanes are suitable for the insulation. The focus will be on preparing the certification of the insulation materials and optimizing the insulation process.

## Literature

- [1] Miersch, S.; Schubert, R.; Schuhmann, T. u. a.: *Ceramic-like Composite Systems for Winding Insulation of Electrical Machines*. 24<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines, Sweden, Goteborg: 2020
- [2] Schubert, R.; Kuhn, J.; Beyreuther, M. u.a.: *Entwicklung und Analyse Polymer-Keramischer Isoliersysteme für die Wicklungsisolierung energieeffizienter und hochausgenutzter elektrischer Maschinen*. VDE Fachtagung Polymere Isolierstoffe in der Elektrotechnik, Zittau: 2021
- [3] Miersch, S.; Schubert, R.; Schuhmann, T. u.a.: *Keramikähnliche Kompositsysteme für die Wicklungsisolierung elektrischer Maschinen*. 3. Freiburger Kolloq. Elektr. Antriebstechnik, Freiburger Forschungshefte A942, S. 119–132. Freiburg: 2021
- [4] Miersch, S.; Schubert, R.; Lindner, M. u.a.: *Investigation of Ceramic-like Composite Systems for the Winding Insulation of a Permanent Magnet Excited Synchronous Machine in Outer Rotor Construction for an Electric Vehicle Drive*. VDE Fachtagung Elektromechanische Antriebssysteme, München: 2021

## Analytische Berechnung von transientem Strom und Drehmoment von netzanlaufenden permanentmagneterregten Synchronmaschinen

Netzanlaufende permanenterrechte Synchronmaschinen verfügen über einen Kurzschlusskäfig im Läufer, der einen selbständigen Netzanlauf ermöglicht. Ziel der Forschungsarbeit ist die analytische Berechnung des transienten Stroms und Drehmomentes während des Hochlaufs. Aufgrund der Anisotropie im Läufer wird das Differentialgleichungssystem aus Spannungs- und Flussverkeftungsgleichungen im dq-Koordinatensystem zu Grunde gelegt. Die analytische Lösung erfolgt über die Laplace-Transformation, wobei die mechanische Winkelgeschwindigkeit  $\omega_m$  des Rotors konstant ist. Herleitung und Lösung des Gleichungssystems sind in [1] beschrieben.



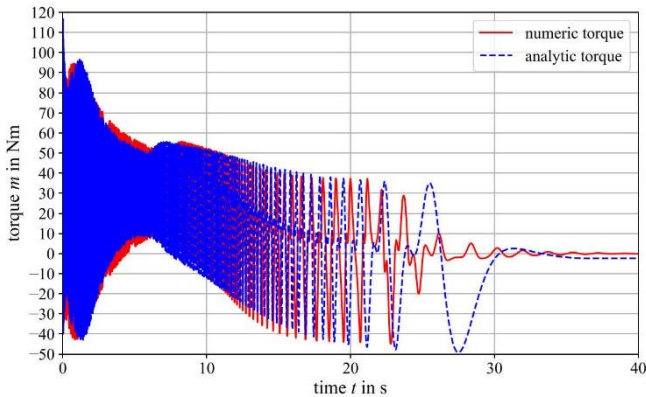
**Fig.1:** Analytisch berechnetes Drehmoment (blau) und numerisches Ergebnis (rot), bei gleichem Drehzahlverlauf / Comparison of transient torques, analytic solution (blue) and numeric solution (red), with same speed characteristic [1]

Die Validierung des analytischen Ergebnisses (blau) wird über einen Vergleich mit dem Ergebnis einer numerischen Simulation (rot) erbracht, siehe Fig. 1. Hierfür wurde für die analytische Rechnung der zeitliche Verlauf der Drehzahl aus der numerischen Simulation verwendet. Normalerweise ist der Verlauf der Drehzahl jedoch nicht bekannt. Den Ergebnisvergleich, bei dem für die analytische Rechnung der Drehzahlverlauf gemäß einer e-Funktion genähert wurde, zeigt Fig. 2. Es zeigt sich, dass mit diesem Ansatz die Spitzen des transienten Drehmomentes gut wiedergegeben werden.



## Derivation of the analytical calculation of transient current and torque of line-starting permanent-magnet synchronous machines

Line starting of permanent magnet synchronous machines have a squirrel cage in the rotor, which enables a self-start-up. The aim of the research is the analytical derivation of the transient current and torque. The system of differential equations is given in the dq-frame. The analytical solution is done by Laplace transform, with constant mechanical angular velocity  $\omega_m$ . The derivation and the solution are described in [1].



**Fig. 2:** Vergleich des analytisch berechneten transienten Drehmomentes mit der numerischen Lösung bei genäherter mechanischer Winkelgeschwindigkeit / Comparison of analytical calculated transient torque with numeric solution with approximated mechanical angular velocity [1]

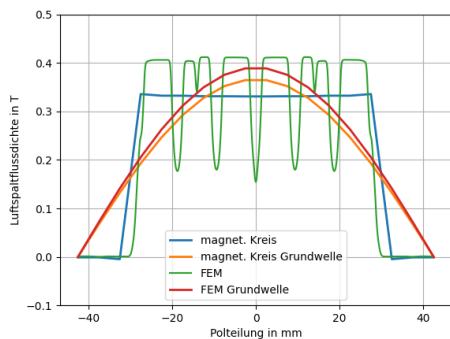
In Fig. 1 the validation of the analytical solution (blue) is done by comparing it with the result of a numerical simulation (red). For this purpose, the time characteristic of the speed from the numerical simulation was used for the analytical calculation. Normally, the speed characteristic is not known. The comparison of the results, in which the speed characteristic was approximated according to an e-function for the analytical calculation, is shown in Fig. 2. With this approach the maximum peaks of the transient torque are well reproduced.

## Literature

- [1] Pecho, J.; Hofmann, W., "Analytical Approach and Solution for Line-Start Permanent Magnet Synchronous Machines with Anisotropic Rotor Reluctance", 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), vol. 1, p. 59 – 65

## Parameterbestimmung netzanlauffähiger PM-Synchronmaschinen

Ziel der Forschungsarbeit ist die Bestimmung der Parameter für die analytische Berechnung netzanlaufender permanentmagneterregter Synchronmaschinen und die Untersuchung der Eignung analytischer Methoden zur Berücksichtigung der Sättigung. Zum einen treten Sättigungen durch den magnetischen Fluss aufgrund der Statorspannung auf. Zudem wird das Eisen durch den Permanentmagnetfluss belastet. Somit können beim Hochlauf, vor allem im Läufer, hohe Sättigungen auftreten. Mit einem magnetischen Netzwerk können die Flusspfade, die am stärksten gesättigt werden, modelliert und berücksichtigt werden.

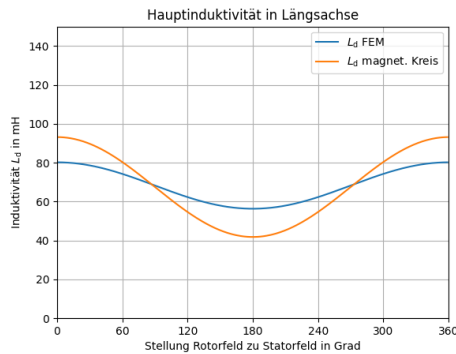


**Fig.1:** Vergleich der Luftspaltflussdichten und Grundwellen aus magnetischem Netzwerk (blau bzw. orange) mit FEM-Rechnung (grün bzw. rot) / Comparison of airgap flux densities and fundamentals from magnetic network (blue, orange) and FEM-Simulation (green, red)

In Fig. 1 ist ein Vergleich der ermittelten Flussdichten im Luftspalt dargestellt. Das Ergebnis des magnetischen Kreises (blau) wird mit dem Ergebnis einer FEM (grün) verglichen. Ein Vergleich der Grundwellen zeigt, dass das Ergebnis des magnetischen Netzwerks (orange) gut mit dem Ergebnis der FEM-Rechnung (rot) korreliert. Während einer Umdrehung beim Hochlauf ist das Statorfeld einmal in Richtung des Permanentmagnetfeldes orientiert und einmal entgegengesetzt. Diese Zustände erzeugen lageabhängige Hauptinduktivitäten. In Fig. 2 wird die Hauptinduktivität der Längsachse aus dem magnetischen Netzwerk mit der aus der FEM-Rechnung verglichen und zeigt, dass das Netzwerk hierfür geeignet ist. Die Bestimmung der Streufeldsättigung und der Streuinduktivitäten ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

## Parameter identification of line-start permanent magnet synchronous machines

The aim of the research work is to determine the parameters for the analytical calculation of line-starting permanent magnet synchronous machines and the suitability of analytical methods for taking saturation into account. On the one hand, saturations occur due to the magnetic flux due to the stator voltage. In addition, the iron is affected by the permanent magnetic flux. Thus, high saturations can occur during start-up, especially in the rotor. With a magnetic network, the flux paths that are most saturated can be modeled and considered.

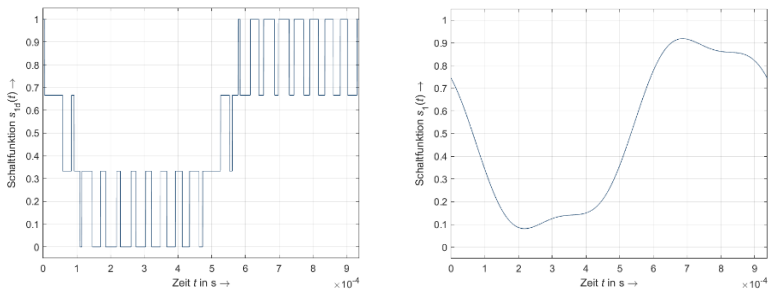


**Fig. 2:** Verlauf der Hauptinduktivität der Längsachse über dem Rotorpolwinkel / Characteristic of the main inductance of the direct axis over the rotor pole angle, magnetic network solution (orange) and FEM-Solution (blue)

Fig. 1 shows a comparison of the determined flux densities in the air gap. The result of the magnetic circuit (blue) is compared with the result of a FEM (green). A comparison of the fundamental waves shows that the result of the magnetic network (orange) correlates well with the result of the FEM calculation (red). During one revolution during start-up, the stator field is oriented once in the direction of the permanent magnetic field and once in the opposite direction. These states generate position-dependent main inductances. In Fig. 2, the main inductance of the direct axis from the magnetic network is compared with that from the FEM calculation. The determination of the leakage saturation and the leakage inductances is the subject of further investigations.

## Modellierung eines modularen Mehrpunkt-Stromrichters (M2C) für eine eisenlose Hochdrehzahl-Axialflussmaschine

Für den Betrieb eines Schwungradspeichers unter hohen Drehzahlen findet die eisenlose Axialflussmaschine Anwendung. Insbesondere in den Überlast- und Leerlaufphasen des Systems wird eine Minimierung der Gesamtverluste angestrebt, deren Grundlage ein analytisches Verlustmodell darstellt. Die Modellierung des modularen Mehrpunkt-Stromrichters soll dabei im Fokus stehen, um eine sinnvolle Wahl der Submodulanzahl je Stromrichterzweig treffen zu können. Im Kern des Stromrichtermodells steht die analytische Beschreibung der Schaltfunktion je Zweig in kontinuierlicher Form. Eine Gegenüberstellung mit der ursprünglichen diskreten Schaltfunktion erfolgt in Fig. 1.

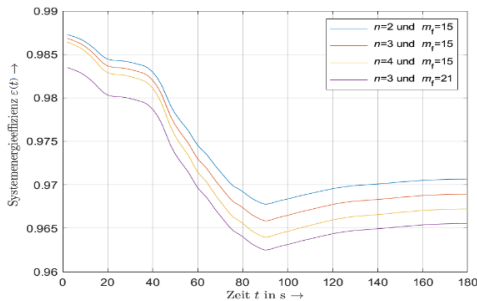


**Fig.1:** Diskrete und kontinuierliche Schaltfunktion / Discrete and continuous switching function

Ein wesentlicher Vorteil des modularen Mehrpunkt-Stromrichters besteht darin, durch den Übergang auf mehrere in Reihe geschaltete Submodule den Einsatz von Bauelementen geringerer Spannungsklassen zu ermöglichen. Konkret können 200 V - MOSFETs anstelle von 600 V - IGBTs verwendet werden, woraus eine signifikante Verlustreduktion resultiert. Vergleicht man Konfigurationen mit 200 V - MOSFETs untereinander für verschiedene Submodulanzahlen, zeichnet sich ein klares Bild ab: Während die Spannungsverzerrung mit steigender Modulanzahl sowie steigendem Frequenzmodulationsgrad sinkt, steigen die Stromrichterverluste. Für einen beispielhaften Lastzyklus zeigt Fig. 2 den Verlauf der Systemenergieeffizienz. In Hinsicht auf die Leerlauf- und Überlastphasen des Schwungradspeichers ist folglich ein Kompromiss zwischen Verzerrung und Verlusten zu finden, wobei eine tendenziell geringere Submodulanzahl sinnvoll erscheint.

## Modeling of a modular multilevel converter (M2C) for an ironless high-speed axial flux machine

For the operation of a flywheel energy storage under high speeds, the ironless axial flux machine is applied. Especially in the overload and no-load phases of the system, the aim is to minimize the total losses, the basis of which is an analytical loss model. The modeling of the M2C is the focus in order to be able to make a sensible choice of the number of submodules per converter branch. The core of the converter model is the analytical description of the switching function per branch in continuous form. A comparison with the original discrete switching function is depicted in figure 1. A major advantage of the modular multipoint current converter is to allow the use of lower voltage class components by switching to multiple submodules connected in series. Specifically, 200 V MOSFETs can be used instead of 600 V IGBTs, resulting in a significant loss reduction. A comparison of configurations with 200 V MOSFETs for different numbers of submodules shows a clear picture: While the voltage distortion decreases with increasing number of modules and increasing frequency modulation level, the converter losses increase. Figure 2 shows the system energy efficiency curve for an exemplary load cycle.



**Fig. 2:** Systemenergieeffizienz / System energy efficiency

With regard to the idle and overload phases of the flywheel accumulator, a compromise between distortion and losses must therefore be found, whereby a tendency towards a lower number of submodules seems sensible.

### Literature

- [1] S. Rohner: „Untersuchung des Modularen Mehrpunktstromrichters M2C für Mittelspannungsanwendungen“. Dissertation TU Dresden, 2010.

## Auswahlssystematik für energieeffiziente Antriebsstränge in brennstoffzellenbetriebenen Elektrofahrzeugen

Da die Entwicklungsmethoden und die Serienproduktion konventionelles Fahrzeugantriebsstrangs nicht direkt auf die Antriebskonzepte von Brennstoffzellenantriebssystem übertragen werden können, stehen die Entwickler in einer frühen Entwicklungsphase eines Brennstoffzellenfahrzeugs vor der Herausforderung mit weniger Information in einem riesigen Lösungsraum ein geeignetes Konzept zu identifizieren, was auf die Effizienz des Antriebsstrangs Einfluss nimmt. Dafür soll eine Auswahlssystematik eingeführt werden, die sich früh auf Energieeffizienz orientiert und in Abhängigkeit vorgegebener Anforderungen eine automatisierte Bewertung verschiedener Antriebsstrangtopologien und integrierter Teilkomponenten des Brennstoffzellensystems gestattet. Dabei werden die energieeffiziente Antriebstopologie und die vorausgewählten Antriebskomponenten unter Bewertung der Auswahl hinsichtlich der Kriterien „Energieeffizienz“ und „Fahrndynamik“ nach Fig.1 weiterentwickelt. Hierdurch werden die Anforderungen des elektrochemischen Energiewandlers, der Energieverbrauch des Gesamtantriebsstrangs, und die Kosten zur Konzeptentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugs für die Autoindustrie gewonnen. Mit steigender Anzahl an Komponenten im integrierten Teilsystem von Brennstoffzellen steigt die Anzahl möglicher Kombinationsmöglichkeiten und damit realisierbarer Topologien im Antriebsstrang. Mit den verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten der Einzelkomponenten im System stellt sich die Frage, wie die neuen Topologien identifiziert und beschrieben werden können.

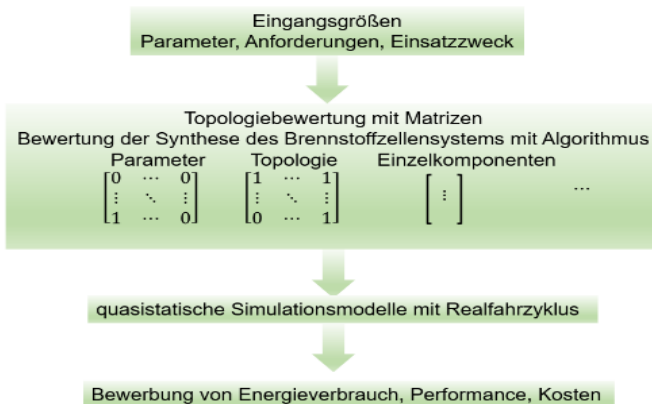
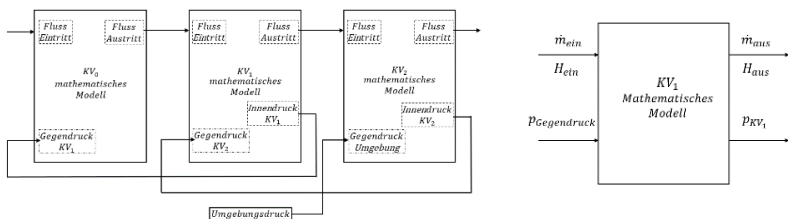


Fig.1: Ablauf der Auswahlssystematik/ Sequence of the selection system method

Dabei liefert die Zielsetzung die Möglichkeit, dass durch diese automatisierte Auswahlstrategie (Fig.1) mit den auf Energieeffizienz orientierten Kriterien auf Basis des Modell-in-the-Loop die Bewertung verschiedener Antriebsstrangtopologie und die energieoptimale Auswahl im Antriebssystem mit dem Projektierungshinweis sowie dem Auswahldiagramm realisiert werden. Um die modellbasierte Abschätzung von Energieeffizienz als Auswahlkriterien zu erstellen, werden die Einzelkomponenten im Brennstoffzellensystem durch das kontinuierliche Prozesssystem nach Fig.2 modelliert. Die Modelle sind in [1] näher beschrieben.

### Selection systematics for energy-efficient powertrains in fuel cell powered electric vehicles

Since the development methods and series productions of conventional vehicle powertrains cannot be directly transferred into the concepts of fuel cell drive systems, the developers in the early development phases of the fuel cell vehicle are faced with the challenge to identify a suitable conception for the fuel cell vehicle with less information in a huge solution space, which has a considerable influence on the efficiency of the powertrain. For this purpose, a selection systematics is to be introduced, which is oriented on energy efficiency and which is determined in dependence on predefined requirements by the automated evaluation of various powertrain topologies and various integrated subcomponents of the fuel cell system. Thereby the energy-efficient drive topology and the preselected drive components are developed with the criteria "energy efficiency" and "driving dynamics". Through this, the evaluations of the requirements about the electrochemical energy converter, the energy consumption of the overall drivetrain and the design-costs of the fuel cell vehicle for the automotive industry will be obtained.



**Fig. 2:** Zusammenspiel von Kontroll- und Prozessblock/ Interaction of the control block and process element - KV: control volume,  $\dot{m}_{ein}$ : input mass flow,  $\dot{m}_{aus}$ : output mass flow,  $p_{Gegendruck}$ : downstream pressure,  $p_{KV_1}$ : internal pressure of control volume 1,  $H_{ein}$ : input enthalpy,  $H_{aus}$ : output enthalpy

As the number of components in the integrated subsystem of fuel cells increases, so increases the number of possible combinations and the feasible topologies in

the powertrain. With the various possible combinations of the individual components in the system, the question arises as to how the new topologies can be identified and described. In this context, the objective provides the possibility of an automated selection system with the energy efficiency oriented criteria based on the model-in-the-loop to realize the evaluation of different powertrain topologies and the energy-optimal selection in the powertrain system with the project planning information as well as the selection diagram. To create the model-based estimation of energy efficiency as the selection criteria, the individual components in the fuel cell drive system are modelled by the continuous process system according to Fig.2. The complete models were presented in [1].

## Literature

- [1] M. Wang: Auswahlssystematik für energieeffiziente Antriebsstränge in brennstoffzellenbetriebenen Elektrofahrzeugen, Lehrstuhl EMA, Technischer Bericht Nr. 10/2021.

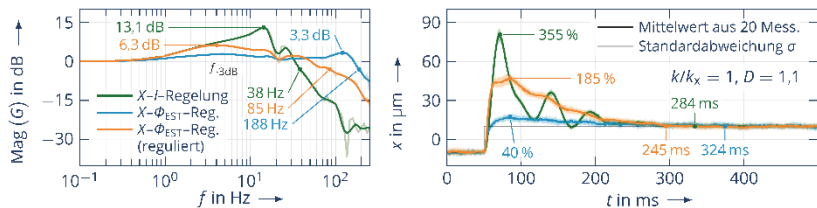


## Hochdynamische axiale Magnetlagerregelung auf Basis eines fraktionalen Flussschätzers

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

Im Zuge des DFG-Projekts HO 1483/78-1 wurde eine Flussregelung auf Basis eines fraktionalen Flussschätzers entwickelt, welche ohne zusätzliche Sensorik auskommt und somit auch in bestehende Systeme implementierbar ist. Die zugrundeliegende, *effektive Induktivität*  $L_{\text{eff}}(s)$  berücksichtigt die wirbelstrombedingte Feldverdrängung bei hohen Frequenzen. In Form eines digitalen Filters erlaubt sie in Echtzeit die Berechnung der kraftbildenden Flussdichte aus dem messbaren Spulenstrom. Im Gegensatz zu anderen fortschrittlichen Regelungstopologien bleiben dabei sämtliche physikalischen Bezüge zu jeder Zeit erhalten.

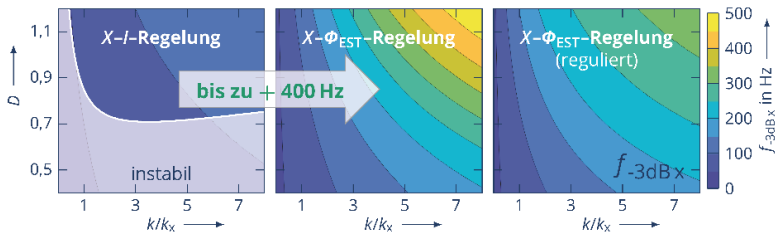
Für die Lageregelung konnte messtechnisch (Fig. 1) eine erhebliche Verbesserung der Regeleigenschaften nachgewiesen werden, wenn die unterlagerte Stromregelung durch eine schätzerbasierte Flussregelung ersetzt wird. Die Grenzfrequenz und Steifigkeit des Lagers konnte nachweislich vervierfacht werden, wobei mit leistungsfähigeren Umrichtern eine Steigerung um bis zu 400 Hz möglich ist (Trend in Fig. 2). Gleichzeitig kann das Überschwingen der Lage um 80 – 90 % reduziert und die Phasenreserve um 20 – 40° erhöht werden, wodurch das Lager sicherer und zuverlässiger wird. Über Vorfilter kann eine Regulierung des sonst deutlich erhöhten Spannungsbedarfs (ca. 20x) der Topologie erfolgen.



**Fig. 1:** Gemessener Amplitudengang und Sprungantwort der Lageregelung mit unterlagerter Strom- und Flussregelung im Vergleich / Measured amplitude and step response of the position control with a subordinated current and flux control in comparison.

## Highly Dynamic Magnetic Thrust Bearing Control Based on a Fractional-Order Flux Estimator

Typically, the rotor position of active magnetic bearings is controlled by a cascaded position control with a subordinated current control. Especially in case of non-laminated magnetic thrust bearings, eddy currents significantly hamper the bearing stiffness, as there is a considerable discrepancy between the measurable and force-generating coil currents. Alternatively, we developed a subordinated flux control based on a fractional-order flux estimator in the course of the DFG project HO 1483/78-1, which does not rely on any additional sensors. The underlying *effective inductance*  $L_{\text{eff}}(s)$  considers the magnetic skin effect caused by the eddy currents and enables the calculation of the force-generating flux in real-time maintaining all physical references. For the position control, we demonstrated by measurements (Fig. 1) a significant improvement of the control characteristics, when the subordinated current control is substituted by an estimator-based flux control. The cut-off frequency and stiffness of the bearing can be at least quadrupled, while with potent inverters an increase of up to 400 Hz is possible (Fig. 2). Furthermore, the overshoot is reduced by 80 – 90 % while the phase margin improves by 20 – 40°, leading to a safer and more reliable bearing. Pre-filters can regulate the otherwise considerably increased voltage demand (ca. 20x).



**Fig. 2:** Grenzfrequenz des Lageregelkreis in Abhängigkeit des Dämpfungsmaß'  $D$  und des Steifigkeitsverhältnisses  $k/k_x$  für unterlagerte Fluss- und Stromregelung / Cut-off frequency of the position control depending on the damping ratio  $D$  and stiffness ratio  $k/k_x$  comparing a subordinated current and flux control.

### Literature

- [1] R. Seifert, W. Hofmann: *Highly Dynamic Thrust Bearing Control Based on a Fractional-Order Flux Estimator*, IEEE Trans. on Ind. Appl. pp 1 - 12, 2021.
- [2] M. Hecht, R. Seifert, W. Hofmann: *Application of Selected Numerical Methods to Model the Fractional-Order System Behavior of Nonlaminated Magnetic Actuators*, IEEE TechRxiv: Robotics and Control Systems, S. 1-8, 2021, Pre-print.

## Kombinierte Wicklungen mit kleinen Lochzahlen

Als kombinierte Wicklungen werden solche Wicklungen bezeichnet, die einen dreiphasigen Anschluss haben, intern aber mehr Stränge zur Verfügung stellen. So sind z. B. Anordnungen mit sechs, neun oder zwölf Strängen denkbar [1]. Bei Maschinen mit kleiner Lochzahl kommt aufgrund der begrenzten Anzahl verfügbarer Nuten nur eine quasi-sechssträngige Stern-Dreieck-Kombinationsschaltung in Frage. Ein Schema der Schaltung sowie das resultierende Zeigerbild der Ströme zeigt Fig.1. Die drei zusätzlichen Phasen entstehen, da zwischen den beiden Wicklungsteilen eine Phasenverschiebung von  $30^\circ$  auftritt. Die Verkettung zwischen Wicklung und Magnetfeld verbessert sich gegenüber der dreisträngigen Wicklung, sodass der Gruppenwicklungsfaktor der Grundwelle um ca. 3,5 % steigt.

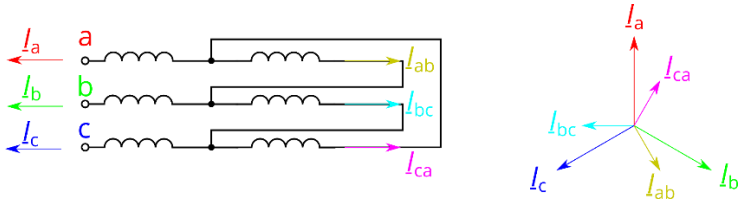


Fig. 1: Schema und Zeigerbild einer kombinierten Wicklung / Pattern and phasor diagram of combined windings

Bei den zunächst untersuchten Käfigläufer-Asynchronmaschinen (ASM) können die Verluste durch verschiedene Strategien reduziert werden. Wird die Windungszahl in dem Maße reduziert, wie sich der Verkettungsfaktor erhöht, sinkt der Wicklungswiderstand und somit die Stromwärmeverluste [1], das weitere Betriebsverhalten wird kaum beeinflusst. Wird die Windungszahl konstant gehalten, kann der feldbildende Strom und somit der magnetische Fluss abgesenkt werden, wodurch sich die Ummagnetisierungsverluste reduzieren. In Fig. 2 sind die Ergebnisse der analytischen Berechnung einer 4 kW-ASM mit reduzierter bzw. konstanter Windungszahl in Abhängigkeit der Belastung dargestellt. Die Statorstromwärmeverluste  $P_{Cu_s}$  (Fig. 2 links) sinken bei reduzierter Windungszahl aufgrund des geringeren Wicklungswiderstandes. Bei konstanter Windungszahl sinken sie ebenfalls, da bei kleinerem magnetischem Fluss ein kleinerer Magnetisierungsstrom aufgenommen wird. Das wirkt sich insbesondere bei Teillast für  $M < 26$  Nm aus. Die Ummagnetisierungsverluste  $P_{fe}$  (Fig. 2 rechts) sinken dagegen nur bei konstanter Windungszahl. Daher soll die kombinierte Wicklung der hier untersuchten ASM mit konstanter Windungszahl im Sternenteil ausgeführt werden. Im Dreieckteil muss die Windungszahl zum Aufbau der gleichen Durchflutung um den Faktor  $\sqrt{3}$  größer gewählt werden [1].

## Combined windings with a small number of slots per pole

Combined windings are windings, which have a three-phase connection, but offer more phases internally. For instance, arrangements with six, nine or twelve phases can be imagined [1]. For machines with a small number of slots per pole, only quasi six-phase star-delta combined windings are possible due to the limited number of slots. A pattern of the circuit and the resulting phasor diagram shows Fig. 1. The three additional phases are created because there is a phase shift of  $30^\circ$  between the two winding parts. The linkage between winding and magnetic field improves compared to the three phase winding, so that the group winding factor of the basic field wave increases by ca. 3.5 %.

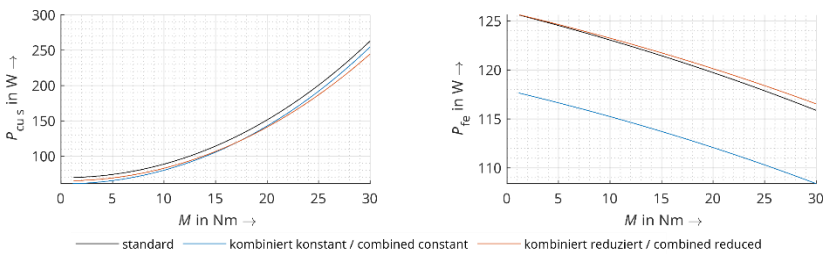


Fig. 2: Berechnete Verluste einer 4 kW-ASM / Calculated losses of a 4 kW-ASM

For the first investigated squirrel-cage asynchronous machines (ASM), the losses can be reduced by different strategies. If the number of turns is reduced by the same amount as the winding factor increases, the winding resistance and winding losses reduce [1], but the machine's behavior stays constant. If the number of turns is hold constant, the field-producing current and therefore the magnetic flux can be reduced, which reduces the core losses. In Fig. 2 the results of analytical calculations for a 4 kW-ASM with reduced or constant number of windings are shown as a function of load. The stator winding losses  $P_{Cu_s}$  (Fig. 2 left) fall in the case of reduced number of turns due to the smaller winding resistance. With constant number of turns they fall, too, as there is a smaller magnetizing current due to the smaller magnetic flux. This is especially remarkable at partial load  $M < 26$  Nm. The core losses  $P_{fe}$  (Fig. 2 right), on the other hand, fall only at a constant number of turns. Therefore, the combined winding of the investigated ASM should be carried out with a constant number of turns in the star winding. In the delta winding the number of turns must be increased by the factor  $\sqrt{3}$  to realize the same magnetomotive force [1]

## Literature

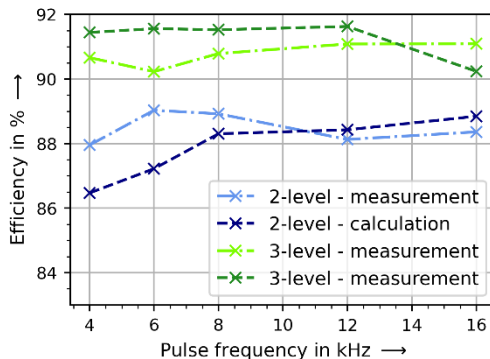
- [1] H. Kasten: Verbesserung der Betriebseigenschaften elektrischer Maschinen durch den Einsatz kombinierter Wicklungen, Shaker Verlag, Aachen, 2015

## Wirkungsgradverbesserung von stromrichteragespeisten Permanentmagneterregten Synchronmaschinen durch Einsatz von 3- statt 2-Level-Stromrichtern

Bei Stromrichtern zum Betrieb elektrischer Maschinen in der Industrie handelt es sich typischerweise um klassische 2-Level-Stromrichter. Der Name ergibt sich, da nur die zwei Spannungen vom Zwischenkreis-Pluspol und -Minuspol an den Ausgang geschaltet werden können. Beim 3-Level-Stromrichter ist es hingegen auch möglich, den Zwischenkreismittelpunkt an den Ausgang zu schalten. Damit ergeben sich die namensgebenden drei Spannungslevel.

Am Maschinenprüfstand (Abb. 2) der Firma M&P Motion Control and Power Electronics GmbH wurde ein 18 kW Servomotor vermessen. Die Maschine wurde bei einer Pulsfrequenz von 4, 6, 8, 12 und 16 kHz mit einem 2- und einem 3-Level-Stromrichter im Bemessungspunkt (57 Nm, 3000 1/min) betrieben [1].

Für den Betrieb mit 3-Level-Stromrichter ergeben sich gemessen und berechnet durchgehend 2-3 Prozentpunkte höhere Wirkungsgrade der Maschine als bei Betrieb mit 2-Level-Stromrichter, wie in der Abbildung 1 zu sehen ist. Insgesamt kann aber kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Pulsfrequenz und Wirkungsgrad nachgewiesen werden.



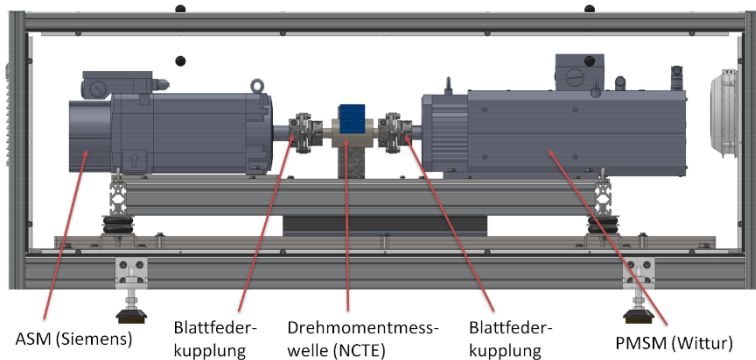
**Fig. 1:** Wirkungsgrad einer 18 kW-Permanentmagneterregten Synchronmaschine im Bemessungspunkt für unterschiedliche Pulsfrequenzen und Stromrichtertopologien [1] / Efficiency of an 18 kW permanent magnet synchronous machine at the design point for different pulse frequencies and converter topologies [1]

## Improvement of Converter-Fed Permanent Magnet Synchronous Machines by Using 3-Level Instead of 2-Level Converters

Power converters for the operation of electrical machines in industry are typically classic 2-level power converters. The name is derived from the fact that only the two voltages from the positive and negative DC link poles can be connected to the output. With 3-level converters, on the other hand, it is also possible to connect the center of the DC link to the output. This results in the three voltage levels that give the converter its name.

An 18 kW servo motor was measured at the machine test bench (Fig. 2) of the company M&P Motion Control and Power Electronics GmbH. The machine was operated at a pulse frequency of 4, 6, 8, 12 and 16 kHz with a 2- and a 3-level converter at the design point (57 Nm, 3000 1/min) [1].

Operation with a 3-level converter results in measured and calculated machine efficiencies that are consistently 2-3 per-centage points higher than operation with a 2-level converter, as can be seen in the figure 1. Overall no clear correlation of efficiency with the pulse frequency can be proven.



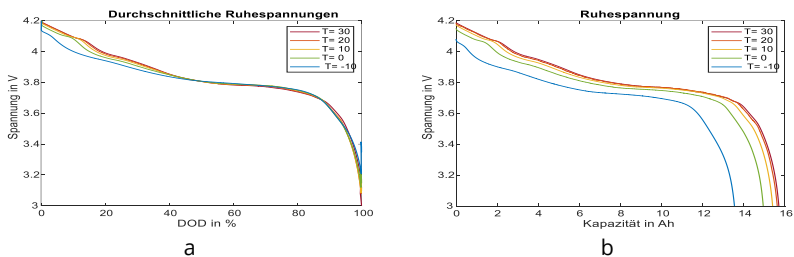
**Fig. 2:** Prüfstand für die Untersuchung von E-Maschinen / Test stand for study of electric machines

### Literature

- [1] Schlegel, L.; Knapp, T.: Vergleich der Verluste in permanentmagneterregten Synchronmaschinen gespeist durch 3-Level-TNPC- oder 2-Level-Stromrichter, 3. Freiburger Kolloquium Elektrische Antriebstechnik, 72. BHT-Freiburger Universitätsforum, Freiburger Forschungshefte A942, Freiberg: 2021, S.1-17.

## Batterien in Elektrofahrzeugen

Heutzutage gewinnen Elektrofahrzeuge aufgrund der Umweltbelastung und sinkender Kraftstoffvorräte immer weiter an Bedeutung. Batterien sind der wichtigste Bestandteil eines Elektrofahrzeuges. Deswegen ist deren genaue Modellierung von großem Interesse. Die elektrischen Modelle, die bis dato in den meisten Arbeiten untersucht wurden, sind einfache Modelle wie z. B. „rint“ oder „Thevenin“ Modell. Diese sind nicht in der Lage das dynamische Verhalten der Batterien genau nachzubilden, außerdem fehlt in den meisten Fällen der Einfluss der exakten Betriebsbedingungen auf die elektrischen Parameter. Ziel dieser Arbeit ist es, ein vollständigeres Modell zu entwickeln, welches mehrere Faktoren wie Ladezustand, Temperatur, Stromstärke und Lebensdauer berücksichtigt. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein zwei-Kettenmodell angewendet (Fig. 2-a). Zur Modellierung des Ersatzschaltbilds gehört erstens die Identifikation der elektrischen Parameter unter verschiedenen Betriebsbedingungen (SOC, Temperatur). Dabei wird zuerst die Ruhespannung der Batterie SW-82596 von „Swaytronic“ untersucht. Diese ist eigentlich vom Ladezustand der Zelle abhängig. Im Zuge dieser Untersuchung ist daher die maximal verfügbare Kapazität zu messen, die den Ladezustand charakterisiert. Dann werden die mittleren Ruhespannungen aus den Lade- und Entladekurven ermittelt (Fig. 1). Diese Abbildung veranschaulicht, dass sich die tatsächlich nutzbare Kapazität mit steigender Temperatur erhöht. Das liegt an den bei hohen Temperaturen schneller ablaufenden chemischen Reaktionen. Anschließend wird eine elektrochemische Impedanz-Spektroskopie (EIS) zur Identifikation weiterer Parameter des Ersatzschaltbilds durchgeführt. Dazu ist das Messgerät von Gamry zum Einsatz gekommen und die Batteriezelle befindet sich in einer Klimakammer. Die Messungen werden im Frequenzbereich 300 kHz bis 5 mHz bei verschiedenen Temperaturen und Ladezuständen vorgenommen. Beispielhaft ist das EIS-Ergebnis bei Temperatur 0 °C und Ladezustand 90% in Fig. 2-b dargestellt.

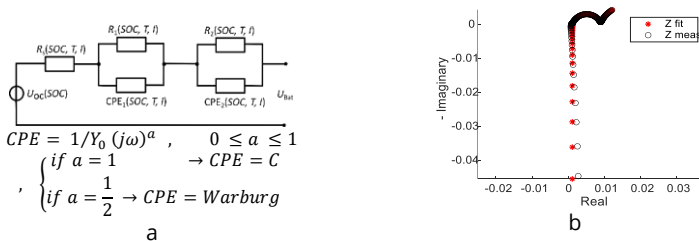


**Fig.1:** Temperaturabhängige Ruhespannung a- abhängig von Entladetiefe (DOD), b- abhängig von maximal verfügbarer Kapazität; Open circuit voltage at different temperatures a- versus depth of discharge, b-versus maximum available capacity

Die EIS-Kennlinie durch Fitting in MATLAB entspricht einem zweigliedrigen Constant Phase Element (CPE). Zur Zielstellung gehört, im nächsten Schritt die Modellierung des Temperatureffekts und der Alterung herauszuarbeiten.

## Batteries in Electric Vehicles

Nowadays, electric vehicles are becoming more and more important due to environmental pollution and decreasing fuel supplies. Batteries are the most important component of an electric vehicle. Therefore, their accurate modelling plays a major role in the transportation field. The models which have been studied so far in most literatures are simple models such as "rint" or "Thevenin" model. These are not able to accurately reproduce the dynamic behavior of the batteries. Also, in many cases, they did not consider the impact of the operating conditions. The aim of this work is to build a comprehensive model that will take into account all the factors such as state of charge, temperature, current and lifetime. In the framework of this promotion, a two-chain model is applied (Fig. 2-a). In order to modelling the equivalent circuit, firstly, the identification of the electrical parameters under various operating conditions (SOC, temperature) is required. Thereby the open circuit voltage of the battery SW-82596 of "Swaytronic" is examined. This is actually dependent on the state of charge of the cell. Therefore, during this experiment, the maximum available capacity is measured and used to calculate the state of charge accurately. Then the average of the charge and discharge curves is obtained as the open-circuit voltage (Fig. 1). This figure illustrates that the actual accessible capacity rises with increasing temperature. This is due to the fact that the chemical reactions occur faster at high temperatures. Next the electrochemical impedance spectroscopy (EIS) is performed to identify other parameters of the equivalent circuit. For this purpose, Gamry is used and the battery cell is placed in a climatic chamber. The measurements are performed in the frequency range 300 kHz- 5 mHz under different temperatures and state of charges. As an example, the EIS result at the temperature 0 °C and at the SOC 90% is shown in Fig. 2-b. it should be emphasized that the EIS characteristic corresponds to the 2-member with Constant Phase Element (CPE) by fitting in MATLAB.



**Fig. 2:** a: Ersatzschaltbild der Batterie, b- Nyquist Diagram; a: equivalent circuit model of battery, b- Nyquist diagram



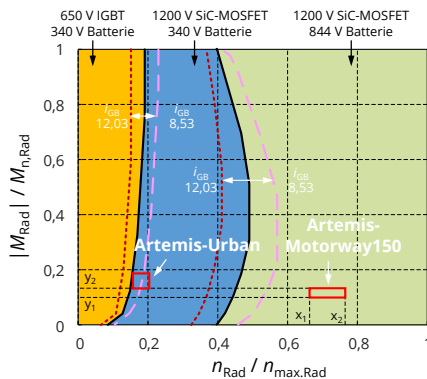
Shaohui Yuan, M.Sc.

## Auswahlssystematik für energieeffiziente Antriebsstränge in rein elektrischen Straßenfahrzeugen (FVA 886 I)

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Erarbeitung einer softwaremäßig nutzbaren allgemeinen Auswahlssystematik für Antriebsstränge in Elektrofahrzeugen. Ausgehend von wenigen fahrzeugspezifischen Vorgaben wie Fahrzeugklasse, Verkehrseinsatz (Kurzstrecke, Mittelstrecke, Langstrecke) und Einsatzgebiete (EU, China, USA) wird die energieoptimale Antriebskonfiguration aus einer Reihung aller möglichen Konfigurationen ermittelt und aus ausgewählten Komponenten wie Batterie, Wechselrichter, Motor, Getriebe zusammengestellt.

Um eine schnelle energetische Bewertung der generierten Antriebskonfigurationen zu ermöglichen, werden die Verlustleistungen des Antriebsstrangs analytisch abgeschätzt. Diese Verlustabschätzung basiert grundsätzlich auf physikalischen Modellen und frei zugänglichen Datenblattangaben der Komponenten.

Die energetische Bewertung führt schließlich zu einem informativen Auswahldiagramm, mit welchem die energieoptimalen Konfigurationen für beliebige Fahrprofile sofort abgeschätzt werden können. In Fig. 1 wird das Auswahldiagramm für beispielsweise Konfigurationen mit unterschiedlichen Batteriespannungen und Halbleitertypen dargestellt. Durch Fahrzyklus-Simulation (Fig. 2) wird die Abschätzung im Auswahldiagramm bestätigt.



**Fig.1:** Auswahldiagramm für die energieeffizienten Antriebskonfigurationen / Selection diagram for energy efficient powertrain configurations

## Selection systematics for energy efficient powertrains in full electric road vehicles (FVA 886 I)

The objective of the research project is to develop a methodology for designing energy efficient electric powertrains. On the basis of some vehicle-specifications such as vehicle class, vehicle-use (short ranges, medium ranges, long ranges) and using zones (EU, China, USA), the most efficient powertrain configuration will be identified from all the possible configurations and built with suitable components such as battery, inverter, motor and gearbox.

In order to guarantee a quick evaluation of energy efficiency, an analytical method has been developed to estimate the power losses of the powertrain. The estimating is based on physical models and freely accessible data sheets of the components.

The valuation result leads to an informative selection diagram. The diagram allows to estimate the most efficient configuration for any driving profiles. Fig.1 shows an example of the selection diagram. In this example, configurations with different battery voltages and power semiconductors are generated and compared with each other. The simulation result (Fig. 2) confirms the assessment with the selection diagram.

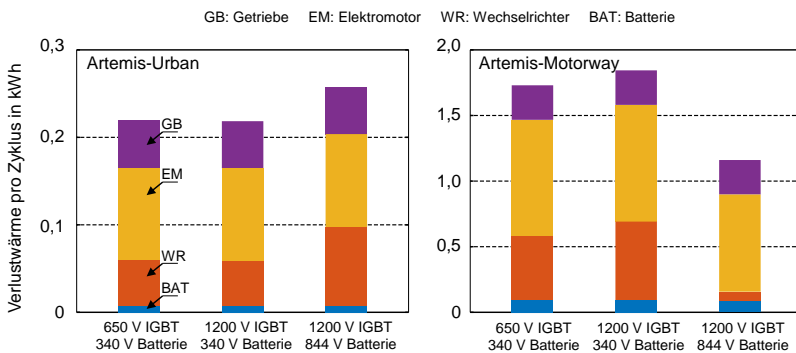


Fig. 2: Simulationsergebnisse zur Verlustwärme / Simulation results of heat losses

### Literature

- [1] S. Yuan: Auswahlsystematik für energieeffiziente Antriebsstränge in rein elektrischen Straßenfahrzeugen. FVA-Forschungsheft 1438, 2021.

Michael Heroth, M. Sc.

## Abbildung klassischer Entwurfsmethoden im EM-Auslegungsprozess durch lernfähige Algorithmen

Die angestrebten CO<sub>2</sub>-Ziele führen zu einem immer breiter werdenden Angebot an Elektrofahrzeugen auf dem Markt. Für jedes neue Fahrzeugmodell muss aus dem hochdimensionalen Lösungsraum der optimale elektrische Antrieb identifiziert werden. Dieser Prozess umfasst mehrere Iterationen zeitaufwändiger Berechnungsmethoden und Optimierungen, welcher am Ende zu vielen Zwischenergebnissen und einem finalen Design führt. Diese generierten Daten sollen wiederverwendet werden, um lernfähige Algorithmen zu trainieren und so Erfahrungswissen abbilden und zukünftig Entwicklungszeiten senken zu können. Die größten Herausforderungen stellen hierbei die Standardisierung der Daten und der hochdimensionale Lösungsraum dar. Beispielsweise kann das Problem von unterschiedlichen Geometrieparametrisierungen oder Topologien durch eine Transformation in eine einheitliche Pixelgrafik gelöst werden (siehe Fig. 1). Des Weiteren ist es möglich den hochdimensionalen Lösungsraum auf realisierbare Kombinationen einzuschränken und nur in diesen Bereichen lernfähige Algorithmen zu trainieren.

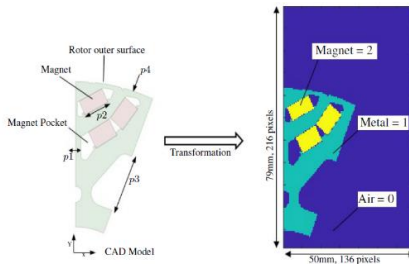


Fig. 1: Standardisierung durch Transformation in eine Pixelgrafik / Standardization through transformation into a pixel graphic [2]

Mit diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Projekts ein Gesamtkonzept (siehe Fig. 2) abgeleitet. Zu Beginn wird der Lösungsraum durch einen Limiter auf realisierbare Kombinationen beschränkt. Dem schließt sich eine Data Engine an, welche einen einheitlich festgelegten, detaillierten und automatisierten Auslegungsprozess darstellt. Die systematisch generierten Daten werden anschließend in einer Datenbank abgelegt. Ist diese ausreichend gefüllt, ist es möglich, lernfähige Algorithmen zu trainieren, um bei übergreifenden Fragestellungen wie beispielsweise der Topologie Auswahl unterstützen zu können.

## Mapping of classic design methods in the EM design process by adaptive algorithms

The desired CO<sub>2</sub> targets lead to an ever-expanding range of electric vehicle models on the market. For every new vehicle model, the optimal electric drive must be identified from the high-dimensional search space. This process includes several iterations of time-consuming calculation methods and optimizations, which in the end leads to many interim results and a final design. This generated data is to be reused to train adaptive algorithms and thus to map empirical knowledge and to be able to reduce development times in the future. The greatest challenges here are the standardization of the data and the high-dimensional search space. For example, the problem of different geometry parameterizations or topologies can be solved by transforming them into a uniform pixel graphic (see Fig.1). In addition, it is possible to restrict the high-dimensional solution space to realizable combinations and to train adaptive algorithms only in these areas. With this background, an overall concept (see Fig. 2) was derived as part of the project. At the beginning the solution space is limited to realizable combinations by a limiter. This is followed by a data engine, which represents a standardized, detailed and automated design process. The systematically generated data is then stored in a database. If this is filled, it is possible to train adaptive algorithms in order to support the selection of overarching questions such as the topology.

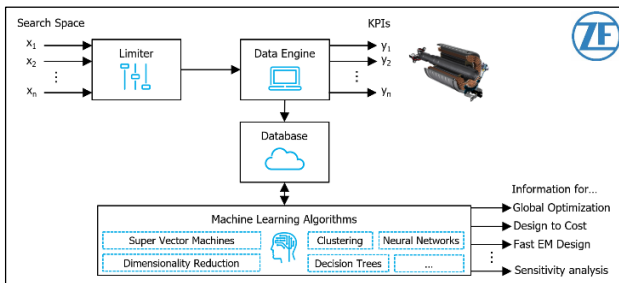


Fig. 2: Gesamtkonzept eines datenbasierten EM-Auslegungsprozesses / Overall concept of a data-based EM design process

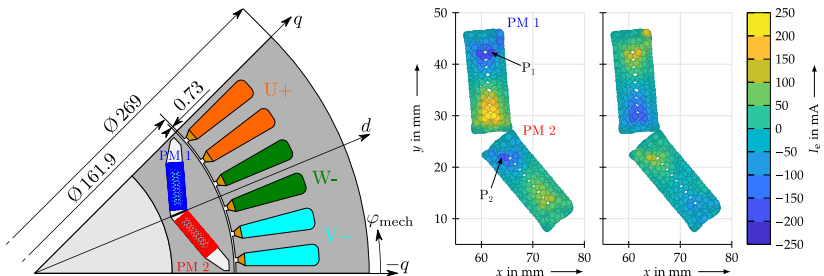
## Literature

- [1] G. Bramerdorfer, J. A. Tapia, J. J. Pyrhönen, A. Cavagnino, Modern Electrical Machine Design Optimization: Techniques, Trends, and Best Practices, in Proc. 20th Int. Conf. Elect. Mach. Syst. (ICEMS), Aug. 2017, pp.1-4.
- [2] V. Parekh, D. Flore, S. Schoeps, Deep Learning-based Prediction of Key Performance Indicators for Electrical Machines, in IEEE Access, vol. 9, pp. 21786-21797, 2021

## Untersuchung von Wirbelstromverlusten in vergrabenen Magneten permanenterregter Synchronmaschinen

Aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte und hohen Wirkungsgrade kommen heutzutage verstärkt permanenterregte Synchronmaschinen (PMSM) zum Einsatz. Selten-Erd-Magnete sind entweder auf der Rotoroberfläche angebracht oder unter ihr vergraben und stellen das notwendige Erregergleichfeld, welches sich synchron zur Grundwelle des magnetischen Statorfeldes dreht. Wicklungsverteilung, Statornutung und die durch die Umrichterspeisung nicht ideal sinusförmige Stromform sorgen für eine Einprägung von hochfrequenten Luftspaltfeldanteilen, welche elektrische Spannungen im Rotorblechpaket und in den Permanentmagneten induzieren, die wiederum Wirbelströme treiben. Die entsprechenden Stromwärmeverluste sind weniger relevant für den Wirkungsgrad der Maschine, vielmehr verursachen sie eine Temperaturerhöhung des Materials, was bei den Magneten zur Reduktion ihrer Koerzitivfeldstärke und im Extremfall zur Entmagnetisierung führt.

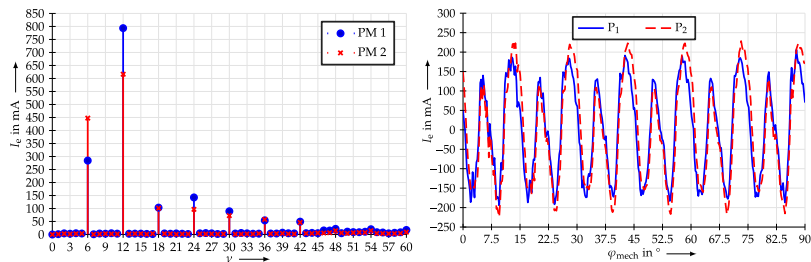
Die Berechnung der Wirbelstromverluste erfolgt für vergrabene Permanentmagneten in der Regel numerisch, da die elektromagnetische Schirmwirkung des Blechs analytisch schwer zu erfassen ist. In Fig. 1 ist beispielhaft ein einpoliges Maschinenmodell gezeigt sowie die Wirbelstromverteilung zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten bei Betrieb mit Bemessungsdrehzahl und ideal sinusförmiger Statorstromkurve, sodass nur die Effekte von Wicklung und Nutung für die Wirbelstromverluste verantwortlich sind. Fig. 2 zeigt die erwarteten Ordnungen  $\nu$  im Spektrum je Magnet, welches man aus den Wirbelstrom-Zeitverläufen aller Berechnungselemente erhält. Die Verläufe sind hier für zwei beispielhafte Punkte  $P_1$  und  $P_2$  gezeigt.



**Fig. 1:** FE-Simulationsmodell: Links: Einpoliges Maschinenmodell, rechts: Wirbelstromverteilung zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten / FEM: left: One pole machine model, right: eddy current distribution for two different points in time

## Eddy current loss investigation in interior permanent magnets of IPM synchronous machines

Due to their high power density and their ability to reach high efficiency values permanent magnet synchronous machines (PMSM) have been applied widely. Rare-earth-magnets can be set up either on the rotor's surface or beneath and they provide a constant magnetic excitation field which rotates synchronously to the stator's magnetic field. The winding distribution, the slotted stator and especially a not ideally sinusoidal stator current due to inverter operation cause higher field harmonics in the air gap which induce voltages in the rotor's iron and the magnets so eddy currents flow through the material. The corresponding eddy current losses are of minor relevance concerning efficiency but cause the material's temperature to rise which reduces the magnet's coercivity field strength and in extreme cases involves their demagnetization. The eddy current loss calculation process is usually conducted numerically for interior permanent magnets since the rotor iron's electromagnetic shield effect is very hard to calculate analytically. Fig. 1 shows a one pole machine model as well as the eddy current distribution in the magnets for two different points in time when operated at rated speed with sinusoidal stator current so that only the winding distribution and the stator slotting effect cause eddy current losses in the magnets. Fig. 2 shows the expected harmonic orders  $\nu$  in one spectrum per magnet which is yielded from the time dependent eddy current curves from every magnet element. These curves are also displayed for two exemplary points  $P_1$  and  $P_2$ .



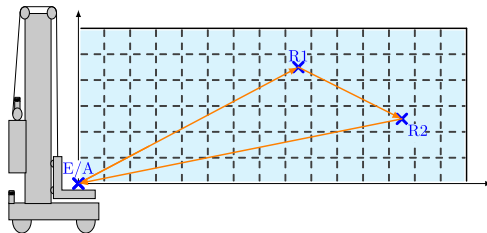
**Fig. 2:** Simulationsergebnisse. Links: Summierte Wirbelstromspektren je Magnet, rechts: Wirbelstromverlauf in  $P_1$  und  $P_2$  / Simulation results. Left: summed eddy current spectra per magnet, right: eddy current over mech. angle in  $P_1$  and  $P_2$

## Literature

- [1] S. Steentjes, S. Boehmer, and K. Hameyer, "Permanent Magnet Eddy-Current Losses in 2-D FEM Simulations of Electrical Machines," IEEE Trans. Magn., vol. 51, no. 3, pp. 1–4, 2015.

## Optimierte Bahnplanung für Regalbediengeräte

In der Intralogistik werden Regalbediengeräte (RBG) in Hochregallagern eingesetzt, um automatisiert Waren ein- und auszulagern. Ein RBG mit zugehöriger Regalfront zeigt Fig. 1. Der Aufbau eines RBG entspricht einem elektrischen Mehrachsenantrieb mit zwei Antriebssträngen: dem Fahrwerk (FW) und dem Hubwerk (HW). Das aktuelle Forschungsprojekt DFG-HO 1483/84-1 verfolgt u. a. das Ziel, die Energieeffizienz des Gesamtsystems zu steigern, indem eine geschickte Wahl der Bewegungskurven von FW und HW den Austausch von Rekuperation fördert. Methodisch wird eine Trajektorienoptimierung verwendet, die das System RBG mit den einzelnen Komponenten inkl. Zwischenkreiskopplung der Antriebe in einem Optimierungsproblem abbildet. Dieses berücksichtigt Systemgrenzen wie die Beschränkung der Geschwindigkeit und minimiert als Kostenfunktion den Energiebedarf der gesamten Bewegung. Ergebnis der Trajektorienoptimierung ist der Positionsverlauf im Bewegungsplan (s. Fig. 2), der das RBG von der Startposition unter minimalem Energieeinsatz in die Endposition überführt. Die bisherigen Untersuchungen in [1] zeigen durchschnittliche Energieeinsparungen durch die Trajektorienoptimierung von 3% bis 5%. Dennoch verbleibt weiterhin ein hoher Anteil zurückgespeicherter Energie, die über einen Bremschopper abgeführt werden muss. Der Einsatz eines Speichers oder ein Gleichspannungsverbund mit mehreren RBG können zusätzliche Lösungsansätze darstellen.

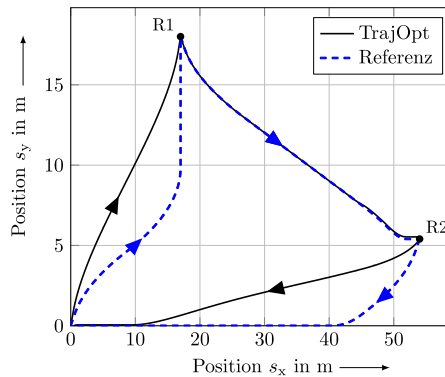


**Fig.1:** Regalbediengerät vor Regalfront mit beispielhaften Bewegungsaufgaben /  
Stacker crane in front of a rack with exemplary transport order

## Optimized trajectory planning for stacker cranes

Stacker cranes are used in high racking systems to automatically store and retrieve goods. Fig. 1 shows a stacker crane with a corresponding rack. A stacker crane can be characterized as an electrical multi-axis drive system consisting of two drives: chassis and hoist. The current research project DFG-HO 1483/84-1

aims on increasing the energy efficiency within the whole system by choosing a trajectory of chassis and hoist which increases the reuse of recuperation. The applied method is called trajectory optimization and utilizes an optimization problem which describes the stacker crane with its components, especially the DC link. System boundaries like maximum velocity are considered. The cost function minimizes the energy consumption of the whole system. Result of the optimization is the exact movement of the stacker crane within the rack as shown in Fig. 2. It transfers the stacker crane from the initial position to the final position with minimal energy consumption. Latest research [1] shows an average reduction in energy consumption by utilizing trajectory optimization within 3 % to 5 %. However, recuperation cannot be used completely and a brake chopper has to be applied. Additional approaches might be the use of an energy storage or combining multiple stacker cranes within one DC link.



**Fig. 2:** Bewegungsplan von 3 Fahrten als Ergebnis der Trajektorienoptimierung gegenüber zeitminimaler Bewegung als Referenz / Motion plan of 3 trips as a result of trajectory optimization in comparison to time minimal motion as a reference

## Literature

- [1] M. Weihrauch, K. Turek, W. Hofmann und T. Schmidt: „Optimierte Bahnplanung für Regalbediengeräte in Hochregallagern“. ETG-Fachbericht 164: Elektromechanische Antriebssysteme 2021, Berlin: VDE Verlag, 09.-10. Nov. 2021.



## Einfluss des Regelungstyps auf die Effizienz der Temperaturregelung am Beispiel eines Leimaggregates einer Kantenanleimmaschine

Die Holzverarbeitende Industrie zeichnet sich durch hohen Energiebedarf und Verlustwärme aus. Statistiken zum Energieverbrauch im Holzbe- und -verarbeitenden Gewerbe zeigen, dass sich durch Energieeffizienzmaßnahmen eine Einsparung dieser Energiemenge von bis zu 70% erreichen lässt [1]. Als Teil des BMEL-Projektes 2220HV046 „Energieeffiziente Energiewandlung in der industriellen Holzbe- und -verarbeitung vom Prozess bis zum Stromnetz (EEHBV)“ wurde die Effizienz unterschiedlicher praxisnaher Temperaturregler betrachtet: dem Zweipunktregler (ZP), dem PID-Regler (stetig) als Teil der Gruppe der stetigen Regler und dem Pulsweitenmodulationsregler (PWM). Für das Aufheizen des Klebstoffs werden Thermoelemente eingesetzt. Diese erwärmen ein Klebstoffgranulat auf eine einstellbare Solltemperatur. Beheizt werden in der untersuchten Kantenanleimmaschine (KAM) der Vorratsbehälter (Behälter) mit einer Nennleistung von 2,5 kW und die Leimauftragsrolle inklusive der Dosierleitungen (Dosierung) mit einer Nennleistung von 1,3 kW. Dabei kommt als Stellglied ein einfaches Relais zum Einsatz. Die Solltemperatur beträgt 200 °C. Für die Zweipunktregelung gilt eine Hysterese von  $\pm 1$  °C. Die Schaltzykluszeit für die PWM-Regelung liegt bei 20 s. Im industriellen Umfeld werden diese Anlagen im Dauerbetrieb betrieben. Bei durchschnittlichen 7000 h/a ist ein nicht unerhebliches Energieeinsparpotenzial mit der Wahl eines energieeffizienten Regelungstyps verbunden. Fig.1 zeigt den zeitlichen Verlauf der benötigten aufgenommenen Heizleistung für die unterschiedlichen Regelungstypen im eingeschwungenen Zustand. Der zugehörige Temperaturverlauf ist in Fig.2 abgebildet. Dabei ist eine Energieeinsparung bei Verwendung eines PWM- / stetigen Reglers anstelle eines Zweipunktreglers von ~2 %/~2,5 % zu erwarten, wobei der Effizienzvorteil des stetigen Reglers durch den zusätzlich benötigten Verstärker als Stellglied noch reduziert werden wird.

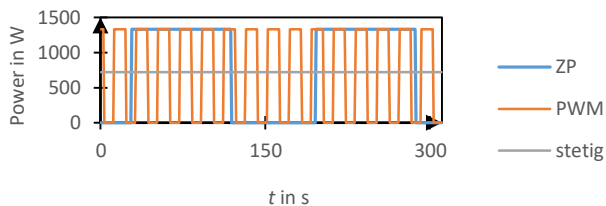
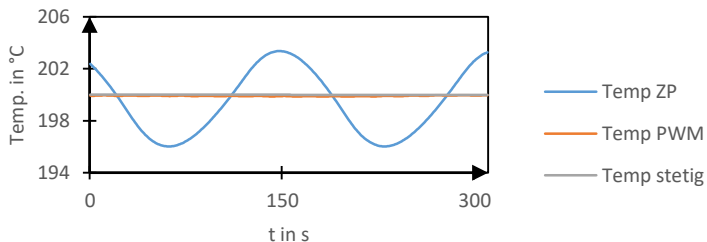


Fig.1: Reglerabhängige Heizleistungen / Control-dependent heating power

## Effect of the control type on the efficiency of a temperature control using the example of a gluing unit of an edge bending machine

The wood processing industry is characterized by a high energy consumption with a low efficiency. Statistics on the energy consumption in the wood working- and wood processing industry show that energy efficiency arrangements can reduce this amount of energy by 70% [1]. As a part of the BMEL-venture 2220HV046 „Energy efficient energy conversion in industrial wood processing from the process to the power grid“, the efficiency of different practical temperature controllers was considered: the two level controller (ZP), the PID (steady) controller as a part of the continuous controllers and the pulse width modulated (PWM) controller. Thermocouples are used to heat an adhesive. These heat the granulate to the target temperature. The storage reservoir and the dosing system with a nominal output of 2,5 kW respectively 1,3 kW are heated in the examined edge bending machine (KAM). A relays is used as the control element. The target temperature is 200 °C. A hysteresis of  $\pm 1$  °C is applied tot he two level controller. In an industrial environment the edge bending machines are operated uninterrupted. With an average of 7000 operating hours per year there is a lot of energy saving potential associated with the choice of an energy efficient controller. Fig.1 shows the required heating power for the different controllers over the time in a steady state. The associated temperature profile is shown in Fig.2. Energy savings of  $\sim 2\%$  can be expected when using a pulse width modulated controller instead of a two level controller and energy savings of  $\sim 2,5\%$  can be reached by using a continuous controller instead of a two level controller. But the efficiency advantage of the continuous controller will be reduced by the additional amplifier that is required instead of the relays as the control element.



**Fig. 2:** Regelungsabhängige Temperaturverläufe/Control-dependent temperatures

### Literature

- [1] T. Tech, P. Bodden und J. Albert: Rationelle Energienutzung im holzbe- und verarbeitenden Gewerbe, Braunschweig: Vieweg Verlag, 2003.

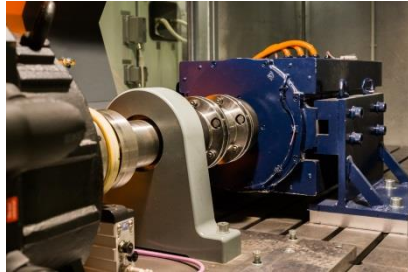
## 5 AUSSTATTUNG DES LEHRSTUHLS

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

- Lichthof (354 qm)
- 7 Forschungslabore (400 qm)
- 3 Labore für Praktika (112 qm)
- 1 PC-Pool (12+1 Rechner)



Lichthof des Instituts



Prüfstand Maschinen und Antriebe



Schaltschrankbatterie zum Prüfstand

### 5.1 Prüfstand Elektrische Maschinen und Antriebe

Der Prüfstand (Baujahr 2015, Förderung als Großgerät durch die DFG) im Lichthof des Gorgesbaus ermöglicht die realitätsnahe Optimierung, Analyse und Validierung von Elektromaschinen sowie der zugehörigen Leistungselektronik im Leistungsbereich bis 200 kW. Die Prüfanlage ist mit rückspeisefähigen Netzstromrichtern auf der Belastungs- und Prüflingsseite ausgerüstet, so dass ein drehzahl- oder drehmoment geregelter Betrieb des Maschinensatzes in allen vier Quadranten möglich ist. Gegenwärtig sind eine hochoberige 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,  $\pm 600$  ADC). Damit ist die Anpassung an verschiedene Gleichspannungsebenen für EV/HEV-Antriebe und stationäre Industrieantriebe ausführbar. Zur Untersuchung neuer stromrichter-naher Steuer- und Regelalgorithmen ist zusätzlich ein Experimentierstromrichter in Kombination mit einem universellen Mikrorechnersystem der Fa. dSpace installiert.

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

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

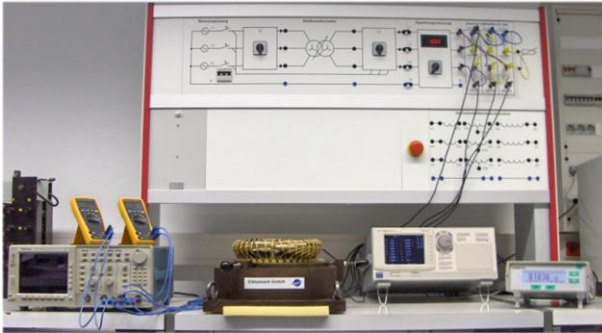
## 5.2 Weitere Versuchsstände für die Forschung

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



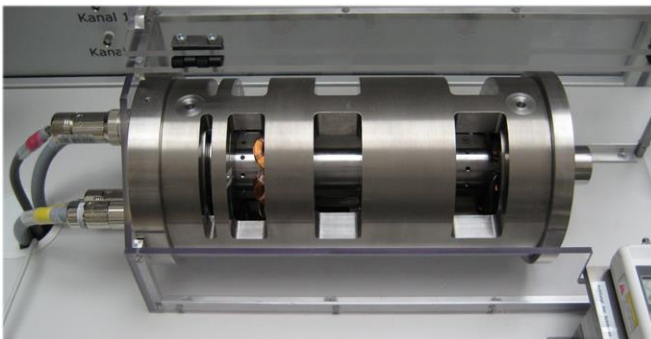
Netzmodell zur Untersuchung von Stromrichternetzrückwirkungen

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



Messplatz zur Bestimmung von Wirbelstromverlusten in Elektroblechen

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



Versuchsstand Magnetlager

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

### 5.3 Versuchsstände für die Lehre

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

### 5.4 Sonderausstattungen

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

## 6 PERSONELLE BESETZUNG

### Lehrstuhlinhaber

Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann

### Emeriti:

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

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

### Sekretariat

Peggy Martin

### Wissenschaftliche Mitarbeiter

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Gert-Helge Geitner (bis 03/2020)

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

Dr.-Ing. Nicol Hildebrand

Dipl.-Ing. Stefan Engelmann

Dipl.-Ing. Chris Evers

Dipl.-Ing. Dennis Guhl

Dipl.-Ing. Tobias Knapp

Dipl.-Ing. Robin Linus Liebfried

M. Sc. Sören Miersch

M. Sc. Tobias Micklitz

M. Sc. Azadeh Nooriansaravi

Dipl.-Ing. Simon Röschner

Dipl.-Ing. Nico Remus

Dipl.-Ing. Ludwig Schlegel

Dipl.-Ing. Robert Seifert

Dipl.-Ing. Gino ,Sturm

M. Sc. Mingyi Wang

Dipl.-Ing. Markus Weihrauch

M. Sc. Shaohui Yuan

### Fachpersonal

Sylvia Schad †

Dipl.-Ing. Axel Rusch

### Doktoranden

Dipl.-Ing. Falk Bahr

Dipl.-Ing. Henry Barth

M.Sc. Swen Bosch

M.Sc. Hrishikesh Joshi

M.Sc. Sören Miersch

M.Sc. Johann Pecho  
M.Eng. Stefan Staudt

**Studentische Hilfskräfte:**

Jan Klötzer  
Christopher Scale  
Friedemut Weber



## 7 ANSCHRIFT

### Postanschrift:

Technische Universität Dresden  
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
Elektrotechnisches Institut  
01062 Dresden

### Sitz:

Helmholtzstr. 9  
Görgesbau, Raum 206/207  
01069 Dresden

### Telefon, Fax, E-Mail:

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

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



## 8 IMPRESSUM

### Anbieter:

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

### Kontakt:

Telefon: 0351-463-33223  
Telefax: 0351-463-33655  
e-Mail: [peggy.martin@tu-dresden.de](mailto:peggy.martin@tu-dresden.de)

### Verantwortlich:

Redaktion: Prof. Dr. W. Hofmann  
Gestaltung und Betreuung: Peggy Martin



# 9 LAGEPLAN

## Lageplan des Campus (Südvorstadt)

Stand: 31. Juli 2011

