



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Elektrotechnisches Institut

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

JAHRESBERICHT ANNUAL REPORT	2022
--	-------------



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	10
2.4	Exkursionen.....	11
3	Öffentlichkeitsarbeit	12
3.1	Veröffentlichungen.....	12
3.2	Patente.....	13
3.3	Vorträge und Berichte.....	13
3.4	Kooperation	19
4	Forschung.....	21
4.1	Forschungsprofil – Schwerpunkt Energieforschung	21
4.2	Forschungsprojekte.....	21
4.3	Dissertationen.....	23
4.4	Ausgewählte Forschungsergebnisse in Kurzform	26
5	Ausstattung des Lehrstuhls	50
5.1	Prüfstand Elektrische Maschinen und Antriebe	50
5.2	Weitere Versuchsstände für die Forschung	51
5.3	Versuchsstände für die Lehre	53
5.4	Sonderausstattungen	53
6	Personelle Besetzung	54
7	Anschrift.....	55
8	Impressum	56
9	Lageplan	57

1 VORWORT

Liebe Kollegen, Mitarbeiter und Freunde,

nach zwei außergewöhnlichen Jahren können wir nun wieder auf ein Jahr zurückschauen, in dem sich vieles normalisiert hat und über das wir auch gern wieder berichten wollen.

Nachwirkungen, insbesondere was die abnehmende Hörerzahl in den Lehrveranstaltungen anbetrifft, sind überall zu spüren und werden uns noch einige Zeit beschäftigen. Die Verzögerungen im Studienablauf machen sich besonders bei der Gewinnung von Nachwuchswissenschaftlern bemerkbar und bremsen manch bewilligtes Projekt in der Bearbeitung aus.



Den Drittmittelgebern wie DFG, BMBF, BMEL, AiF und FVA sei an dieser Stelle für ihre vielfältige Unterstützung und ihre Geduld gedankt.

Noch ein Wort in eigener Sache: Mit drei Jahren Verspätung wurde nun die Professorenstelle des Lehrstuhls neu ausgeschrieben, sodass eine Staffelstab-Übergabe am Lehrstuhl absehbar wird. Bis es soweit ist, werde ich die Vakanz-Seniorprofessur mit Unterstützung meiner Mitarbeiter nach Kräften weiterführen.

Herzlichen Dank für Ihr Interesse und Ihre Unterstützung!

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

Wilfried Hofmann

2 LEHRAUFGABEN

2.1 Lehraufgaben für Fakultät

Der Lehrstuhl bietet Lehrveranstaltungen in der Studiengängen Elektrotechnik, Mechatronik, Regenerative Energiesysteme und Wirtschaftsingenieurwesen an und übernimmt Lehrexport für den Studiengang Maschinenbau. Im einzelnen sind das die folgenden Lehrfächer:

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; Bewegungswandler; Motorauswahl für stationären Betrieb; Motorauswahl für dynamischen Betrieb.

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

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

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

Elektromaschinendynamik (2/1/0), WS

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

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

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

Geregelte Energiesysteme (2/0/0), 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; Stromwindung; 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

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 frequenzgesteuerter Antriebe; Pulssteuerverfahren zur Umrichterspeisung; Steuerverfahren für umrichtergespeiste Asynchronantriebe; dynamisches Verhalten von Asynchronantrieben; Feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine; dynamisches Verhalten von Synchronantrieben; Steuerung und Regelung umrichtergespeicherter 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)

Grundlagen zu Aufbau und Wirkungsweise elektromagnetischer Energiewandler; Elektromagnetische Energiewandlung (Durchflutungsgesetz, Flussgesetze, Magnetwerkstoffe, Magnetfelder, Induktionsgesetz, Kraft- und Drehmomentbildung, Leistungsbilanz); Leistungstransformatoren (Wechselfelder, Spannungsinduktion, Einphasen-, Drehstromtransformator, Anwendungen); Gleichstrommaschinen, Synchronmaschinen (Magnetfelder, Spannungsinduktion, Drehmoment, Ersatzschaltbild, Betriebsverhalten, Anwendungen); Asynchronmaschinen (Magnetfelder, Schlupf, Spannungsinduktion, Drehmoment, Ersatzschaltbild, Betriebsverhalten, Anwendung).

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. V. Müller

Schaltungstechnik (2/1/0), SS

Pflichtfach Mechatronik (MT), Regenerative Energiesysteme (RES)

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

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. V. Müller

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

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

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

Dr.-Ing. N. Hildebrand

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.

Dr.-Ing. N. Hildebrand

Transformatoren (2/1/0), WS

Modul „Elektromagnetische Energiewandler“

Wahlpflichtfach Elektroenergietechnik (EET) und Reg. Energiesysteme (RES)

Leistungstransformatoren in der Elektroenergietechnik, Wachstumsgesetze und TK-Zahl; Aufbau, Ausführungsformen, stationärer Betrieb, nichtstationärer Betrieb; Wicklungsaufbau, Wicklungsausführungen; Begriffe, Isoliersysteme, Isolierstoffe für Transformatoren; Entwurf von Transformatoren: Kernausslegung, Wicklungsauslegung 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 Maschinenbau (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

Jan Gießgen / Betreuer: Shaohui Yuan

„Erstellen von Simulationsmodellen für Mehrmotorenantriebe zur Untersuchung von Motorsteuerverfahren und Betriebsstrategien“

Fabian Melkowski / Betreuer: Markus Weihrauch

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

Studienarbeiten

Bowen Fang / Betreuer: Shaohui Yuan

„Vergleich von Ausführungsvarianten der Hauptkomponenten im Antriebsstrang batteriegetriebener Elektrofahrzeuge“

Lorenz Fanslau / Betreuer: Tobias Knapp

„Untersuchung des Betriebsverhaltens einer Synchronreluktanzmaschine“

Clemens Wenzel / Betreuer: Dennis Guhl
„Aufbau Praktikumsstand Digitale Antriebsregelung“

Richard Zimmermann / Betreuer: Tobias Knapp
„Analyse und Vergleich der Standardwicklung und einer kombinierten Wicklung für eine Synchronreluktanzmaschine“

2.4 Exkursionen

Folgende Exkursionen wurden den Studenten angeboten:

- am 14.01.22 Sachsenwerk Dresden,
- am 25.11.22, Siemens-Trafowerk Dresden.

3 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

3.1 Veröffentlichungen

S. Yuan und W. Hofmann: Systematische Identifizierung energieeffizienter Antriebskonfigurationen in Elektrofahrzeugen. In: e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Band 139, p. 271-281, 03/2022, Springer, Wien

Robert Seifert: Fraktionale Flussschätzung in aktiven Magnetlagern. Hrsg.: Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und Antrieben. Band: 23, 278 Seiten, ISBN 978-3-8440-8824-3, Shaker Verlag Aachen, Nov. 2022.

Henry Barth: Einsatz von Siliziumkarbid-Bipolartransistoren in Antriebsstromrichtern zur Verlustreduktion. Hrsg.: Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und Antrieben, Band 21, 142 Seiten, ISBN: 978-3-8440-8489-4, Shaker Verlag, Aachen, März, 2022

Sören Miersch: Erhöhung der Ausnutzung permanentmagneterregter Außenläufermaschinen durch Verbesserung der Wärmeabführung. Hrsg.: Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und Antrieben, Band 22, 284 Seiten, ISBN: 978-3-8440-8500-6, Shaker Verlag, Aachen, März, 2022

T. Knapp and L. Schlegel and W. Hofmann: Comparison of Losses in Permanent Magnet Synchronous Machines fed with 2-level or 3-level-NPC Converter. PCIM Europe 2022, p. 682-690, 2022

L. Schlegel and W. Hofmann: Harmonic Current Control of High Dynamic Periodical Torque Reference Values for Permanent Magnet Synchronous Machines. 2022 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Sorrento, p. 82-87, 2022

M. Heroth and H. Schmid and W. Hofmann: Efficient Sampling Algorithm for Electric Machine Design Calculations incorporating Empirical Knowledge. 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Valencia, p. 1089-1095, 2022

S. Röschner and W. Hofmann: Multiplanar Eddy Current Analysis of Interior Permanent Magnets in Synchronous Machines. 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Valencia, p. 1027-1033, 2022

H. Joshi and A. Held and Y. Burkhardt and M. Seilmeier and W. Hofmann: Error Compensation of Measured Stator Temperature in Electric Motors using a Thermal model of Sensor and Hardware Range-Switch. 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Valencia, p. 1355-1361, 2022

L. Schlegel and W. Hofmann: Comparison of High-Power 2-Level and 3-Level Converters in Terms of Power Density, Costs and Performance. 2022 24rd European

3.2 Patente

- WO 2022/243053 A1, Motorspindel, Fräsvorrichtung mit einer Motorspindel und Verfahren. Erf.: D. Guhl, R. Liebfried, W. Hofmann. Anm.: TU Dresden, Datum: 24.11.2022

3.3 Vorträge und Berichte

Technische Berichte

- Knapp, T.: Strategien zur Wirkungsgradsteigerung von Asynchronmaschinen durch den Einsatz kombinierter Wicklungen am Beispiel einer 4 kW-Käfigläufermaschine. 1. Zwischenbericht. TB 2022-01
- Seifert, R.: Fraktionale Flusschätzer zur Regelung axialer Magnetlager unter dem Einfluss von Wirbelströmen. DFG-Zwischenbericht. TB 2022-02
- Weihrauch, M.: Leistungsmessung im stationären dynamischen Betrieb. DFG-Zwischenbericht. TB 2022-03
- Miersch, S.: Experimentelle Bestimmung der Druck-Volumenstrom-Kennlinie elektrischer Maschinen mit Fremdbelüftung und Eigenkühlung. Abschlussbericht. TB 2022-04
- Schlegel, L.: Oberschwingungs-Stromregelung zum Stellen hochdynamischer periodischer Drehmomentprofil. Zwischenbericht. TB 2022-05
- Hildebrand, N.: Testbericht Kompressor-Motor. Testbericht. TB 2022-06
- Guhl, D.: Abschlussbericht MinErWA. TB 2022-07
- Schlegel, L.: Modularer breitbandiger Wechselrichter für hochdynamische Prüfstandsantriebe. Zwischenbericht. TB 2022-08
- Röschner, S.: Multiplanare Berechnung von Wirbelstromverlusten in Permanentmagneten einer IPM-Synchronmaschine. TB 2022-09
- Sturm, G.: Abschlussbericht zur Inbetriebnahme des ARESS-Demonstrators. TB 2022-10
- Sturm, G.: Zwischenbericht zum BMWi-Förderprojekt: ARESS. TB 2022-11
- Sturm, G.: ARESS-Transient Studies. TB 2022-12
- Röschner, S.: Abschlussbericht zur Bestimmung der Magnetverluste unter Berücksichtigung der Einflüsse eines Pulswechselrichters und der Nutharmonischen. TB 2022-13

Vorträge im Lehrstuhlkolloquium

28.01.2022

Dengwei Hong, Diplomabschlussvortrag

Umsetzung von akustisch optimierten Antriebsregelverfahren an einem Akkuschauber

25.02.2022

Kamran Imanov, Diplomzwischenvortrag

Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Einzelverluste permanentmagneterregter Synchronmaschinen

Dipl.-Ing. Robin Liebfried, Forschungsvortrag

Chancen und Herausforderungen einer flussdichtebasierten Regelung aktiver Magnetlager

11.03.2022

Fabian Melkowski, Diplomabschlussvortrag

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

M. Sc. Michael Heroth, Forschungsvortrag

Effizienter Sampling Algorithmus für EM-Auslegungsberechnungen unter Berücksichtigung von Erfahrungswissen

25.03.2022

Dipl.-Ing. Johann Pecho, Forschungsvortrag

Feldverläufe beim Zuschalten von Käfigläufermaschinen mit und ohne Dauermagneten

01.04.2022

Clemens Wenzel, Oberseminar

Einsatz kombinierter Wicklungen bei Synchronmaschinen

Vladislav Dolgich, Oberseminar

Maßnahmen zur Effizienzoptimierung von Traktionsmotoren für Elektrofahrzeuge und ihre Verbesserungspotenziale

08.04.2022

Dipl.-Ing. Tobias Knapp, Forschungsvortrag
Einführung in kombinierte Wicklungen für elektrische Maschinen

22.04.2022

M. Sc. Azadeh Nooriansaravi, Forschungsvortrag
Elektrische Modellierung von Batterien in hybriden Energiespeichersystemen für Elektrofahrzeuge

M. Sc. Shaohui Yuan, Forschungsvortrag
Auslegungsmethodik für energieeffizienten Allradantrieb in Elektrofahrzeugen

29.04.2022

Dipl.-Ing. Simon Röschner, Forschungsvortrag
Entwicklung eines Prüfstands zur Bestimmung der Wirbelstromverluste in Permanentmagneten durch harmonische Feldüberschwingungen

Jan Gießgen, Diplomzwischenvortrag
Erstellen von Simulationsmodellen für Mehrmotorenantriebe zur Untersuchung der Motorsteuerverfahren und Betriebsstrategien

20.05.2022

M. Sc. Gulasalkhon Musinova, Forschungsvortrag
Optimal control of the grid-connected hybrid wind farm to improve system stability

17.06.2022

Dipl.-Ing. Ludwig Schlegel, Forschungsvortrag
Harmonic Current Control of High Dynamic Periodical Torque Reference Values for Permanent Magnet Synchronous Machines

Dipl.-Ing. Nico Remus, Forschungsvortrag
Blindleistungsbereich des hochsetzenden direkten Matrixumrichters

Pedro-Horacio Loss, Gastvortrag
Vorstellung der Lehrsysteme für Elektrische Maschinen und Antriebe der Fa. LD DIDAC-TIC GmbH

24.06.2022

Dipl.-Ing. Gino Sturm, Forschungsvortrag
Inbetriebnahme des ARESS Demonstrators

19.08.2022

Jan Gießgen, Diplomabschlussvortrag

Erstellen von Simulationsmodellen für Mehrmotorenantriebe zur Untersuchung von Motorsteuerverfahren und Betriebsstrategien

Alexander Aumer, Gastvortrag

Vorstellung der Lehrsysteme für Elektrische Maschinen und Antriebe der Fa. Lucas-Nülle

07.10.2022

Dipl.-Ing. Stefan Engelmann, Forschungsvortrag

Energieeffiziente Antriebsauslegung und -steuerungsverfahren für Kantenanleimmaschinen

M. Sc. Hrishikesh Joshi, Forschungsvortrag

Skalierbare Parametrierung für die Modellierung eines thermischen Netzwerks unter Berücksichtigung zweier Motorleistungsklassen

09.12.2022

Dipl.-Ing. Dennis Guhl, Forschungsvortrag

Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zur Untersuchung einer aktiv gedämpften Motorspindel

Vorträge ohne Publikation

W. Hofmann: Innovative Elektrische Maschinen für Industrieantriebe. Vortrag zum 23. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar 2022. TU Dresden. 04.07.2022.

W. Hofmann: Mehrphasiger lagerloser Motor zur aktiven Schwingungsdämpfung in Frässpindeln. Vortrag zum 19. Technischen Tag der VEM, Wernigerode 13.09.2022.

W. Hofmann: ARESS - eine neuartige Komponente des Energiesystems zur Netzstabilisierung. Vortrag zum Treffpunkt Netze Mitteldeutschland. BDEW Dresden. 22.11.2022.

W. Hofmann: Energieeffiziente Energiewandlung in der industriellen Holzbe- und -verarbeitung vom Prozess bis zum Stromnetz (EEHBV). Vortrag in der Technikwiss. Klasse der Sächs. Akad. d. Wiss. Leipzig 11.11.2022.

Doktorandenseminar (18.09.-22.09.2022)

Nach zwei Jahren der Unterbrechung eines seit mehr als 30 Jahren jährlich stattfindenden Traditionsseminars der Doktoranden der TU Darmstadt und der TU Dresden konnte 2022 erstmals wieder ein solche wissenschaftliche Veranstaltung in Präsenz durchgeführt werden. Im Jahr 2021 fand dieses Treffen leider nur online, aber mit einem neuen Partner, dem Institut für Antriebstechnik und Maschinen der TU Graz, statt.

Abseits des alltäglichen Trubels beherbergte die diesjährigen Teilnehmer das Kolping-Haus Bayrischer Wald in Lam bei hervorragender Verpflegung und in sehr ruhiger Lage. Das durchwachsene Wetter tat weder den zahlreichen wissenschaftlichen Vorträgen der Nachwuchswissenschaftler noch dem ungehemmten Drang nach gemeinsamen Tageswanderungen Abbruch.



Foto: Jens Jüttner, TU Dresden 2022

So bestiegen wir unter Anderem zusammen mit den Kollegen aus Darmstadt und Graz den Großen Arber, vertieften dabei fachliche Diskussionen und festigten die persönlichen Kontakte auch über die Fachsimpelei hinaus. Besonders interessant war dieses Jahr die große Anzahl ehemaliger Mitarbeiter unseres Lehrstuhls, die auch mit Vorträgen das ohnehin schon dicht bestückte Abendprogramm bereicherten.

Alles in allem haben wir versucht, die Tradition wiederaufzunehmen und damit auch gute Voraussetzungen für die Fortführung dieses Seminars nach der bevorstehenden Staffelstabübergabe seitens der Lehrstuhlleiter in Dresden und Darmstadt an ihre Nachfolger zu schaffen.

Wir Dresdner freuen uns schon auf ein Wiedersehen zur Veranstaltung 2023 im bestens bekannten und bewährten Darmstädter Haus im Kleinwalsertal.

Vorträge TU Darmstadt

- Omid Safdarzadeh, Transient Thermal Analysis of the Contact in Bearings Exposed to Electrical Currents
- Maximilian Clauer, Untersuchung von Maschinenkonzepten mit vergrabenen Magneten und Kohlefaserbandage

- Martin Weicker, Discharge and Rotor-to-Ground Bearing Currents in Small Inverter-Fed Induction Machines with Rated Power of 90 W
- Alexander Möller, Survey of Third Harmonic Voltage Injection in Star-Connected Five-Phase Windings for Induction and Permanent Magnet Synchronous Machines

Vorträge TU Dresden

- Gino Sturm, Regelungsstabilität in verschiedenen Netzfehlern
- Simon Röschner, Bestimmung von Wirbelstromverlusten in Permanentmagneten einer IPM-Synchronmaschine
- Ludwig Schlegel, Harmonic Current Control of High Dynamic Periodical Torque Reference Values for Permanent Magnet Synchronous Machines
- Tobias Knapp, Asynchronmaschinen mit kombinierter Stern-Dreieck-Wicklung: Leerlauf- und Zusatzverluste
- Stefan Engelmann, Energieeinsparpotenzial von Kantenanleimmaschinen im industriellen Umfeld
- Fabian Melkowski, Betrieb elektrischer Speicher bei Regalbediengeräten in einem von erneuerbaren Energien geprägten Netz
- Jens Jüttner, Sensorelektronik für ein berührungsloses induktives Messsystem
- Hrishikesh Joshi, Skalierbare Parametrierung für die Modellierung eines thermischen Netzwerks unter Berücksichtigung zweier Motor-Leistungsklassen
- Dennis Guhl, Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zur Untersuchung einer aktiv gedämpften Motorspindel
- Johann Pecho, Transiente Strom- und Drehmomentmessung einer LSPMSM
- Gulasalkhon Musinova, Optimal Control of the Grid-connected Hybrid Wind Farm to Improve System Stability under Normal and Transient Conditions (Research proposal)
- Nico Remus, Blindleistungsstellbereich der Generatoranordnung mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator und hochsetzendem direktem Matrixumrichter
- Michael Heroth, Effizienter Datengenerierungsprozess für E-Motor-Plattformoptimierungen

Externe

- Thomas Windisch, Akustik elektrischer Antriebssysteme
- Jörg Schützhold, Antriebsauslegung in der Praxis bei SEW

- Arne Brix, Mit Modellen zum Erfolg! – Modellbasierte Systementwicklung (MBSE)
- Jakob Jung, Trends in der Wickeltechnik für hochausgenutzte Traktionsmotoren
- Henry Barth, Kupferdickschicht-Technologie für die Leistungselektronik
- Henning Kasten, Magnetgelagerte High-Speed Antriebe

Vorträge TU Graz

- Shahin Asgari, PCB motor for low-cost sub-fractional hp fan applications
- Daniel Neuner, Model Predictive Current Control for Induction Machines
- Benedikt Riegler, Switching Loss Measurement of Reverse-Blocking Semiconductor Switches in Current-Source-Inverters

3.4 Kooperation

Gremien und Gutachten

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann

- Ordentliches Mitglied der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech)
- Ordentliches Mitglied der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig (Technikwissenschaftliche Klasse)
- Mitglied des Präsidiums der Sächs. Akademie der Wissenschaften und Sekretar der Technikwissenschaftlichen Klasse
- Member of Editorial Board of Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik), Springer Verlag
- VDE: ETG-FB A1: Elektrische Maschinen und Antriebe; Mechatronik: AK19 Elektrische Maschinen und Antriebe; ETG-FB Q1: Leistungselektronik;
- VDI: Mitglied der Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, GMA
- Member of Electric Machine Committee of IEEE Industrial Electronics Society IES
- IEEE: Senior Member; Industry Application Society; Power Electronics Society; Industrial Electronics Society; Reviewer IEEE Transaction on Industrial Electronics/Mechatronics
- Sondergutachter DFG, VW-Stiftung
- Member of Intern. Steering (Scientific) Committees:
 - European Conference on Power Electronics and Drives, EPE
 - International Power Electronics Conferences Japan, IPEC

- International Symposium on Magnetic Bearings, ISMB
- International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. V. Müller

- VDE - VDI-FA 823 Motion Control.

Dr.-Ing. N. Hildebrand

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

IAESTE – Praktikanten

Sena Türkü Cakmak / Betreuer: Gino Sturm

Discrete Filter Design with MATLAB/Simulink

Pawel Kolodziejski / Betreuer: Dennis Guhl

Extension and improvement of a python scripting framework for FE software "ANSYS Maxwell

Alexander Mercado / Betreuer: Simon Röschner

Eddy current loss analysis in interior permanent magnets of synchronous machines

Ricardo Lozada / Betreuer: Gulasalkhon Musinova

Modelling, simulation and control of power electronic converters for hybrid wind farms in Digsilent/Matlab Simulink

Stanislav Nikolic / Betreuer: Fabian Melkowski

4 FORSCHUNG

4.1 Forschungsprofil – Schwerpunkt Energieforschung

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

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

4.2 Forschungsprojekte

DFG-Projekte

- Aktive verlustarme Magnetlager hoher Steifigkeit und Präzision mit integrierter Induktionsmessung und schneller Leistungselektronik, DFG – HO 1483/64-2; 2017–2022
- Eisenlose Axialfluss-Permanentmagnet-Synchronmaschine mit Keramikwicklungsträger für Schwungradspeicher, DFG – HO 1483/77-1, 2016 – 2019, 77-2, 2019 –2023
- Fraktionaler Flusschätzer zur Regelung axialer Magnetlager unter dem Einfluss von Wirbelströmung, DFG-HO 1483/78-1, 2017-2022, HO 1483/78-2, 2022-2024
- Maschinenwicklungen in Kombinationsschaltung, DFG-HO 1483/71-2, 2019 – 2023
- Prädiktive Entscheidungsmodelle für effizienten Energieeinsatz in der Intralogistik durch Gleichstromverbund, DFG-HO 1483/84-1, SCHM 2689/16-1, 2020 -2022

Bundesministerien

- ARESS – Der asynchrone, rotierende Energiesystem-Stabilisator – eine echte vollintegrierte Netzwerkkomponente zur Netzstützung, Teilvorhaben: Dimensionierungs- und Regelungskonzept, BMBF, FKZ: 03EI6061D, 2022 – 2026

- Energieeffiziente Energiewandlung in der industriellen Holzbe- und -verarbeitung vom Prozess bis zum Stromnetz gemeinsam mit Institut für Naturstofftechnik – Lehrstuhl für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik, Sächs. Akad. d. Wiss. zu Leipzig, Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe des BMEL, EEHBV-EMA, 2021 – 2023

FVA Forschungsvereinigung Antriebstechnik

- Auswahlssystematik für energieeffiziente Antriebsstränge in rein elektrischen Straßenfahrzeugen, FVA 886 I, 2020 – 2021
- Auslegungsmethodik für energieeffiziente elektrische Mehrachsantriebe (Allradantriebe) in Elektrofahrzeugen, FVA 886 II, 2022 – 2023

AiF/ IGF

- Modularer breitbandiger Wechselrichter für hochdynamische Prüfstandsantriebe, Entwicklung von Regelungskonzepten mit hoher Dynamik, ZIM-Projekt: ZF4236603LT3, 2019 – 2022
- Elektromagnetisch erregte oder hybride Sekundärteile in Linearmotoren. TP: Entwurf, Optimierung und Simulation hybrid erregter Linearmotoren ZIM-Projekt: KK5336101MP1, 2022 – 2024
- Urbane Windkraftanlagen mit performanten Stahlrotorblättern - TP Leistungselektronik und Strukturmechanik, 2022 - 2024

Industrie

- Regelung eines Schwungradantriebs mit Modular Multilevel Matrix Converter
- Untersuchungen zu Verlusten in Permanentmagneten bei Traktionsmaschine
- High performance electric drives with magnetic gears – High speed motor

SAB

- Minimalinvasive Erweiterung der Antriebsfunktionalität zur aktiven Schwingungsdämpfung an Motorspindeln, 2019-2022

4.3 Dissertationen

Robert Seifert

Thema: Fraktionale Flusschätzung in aktiven Magnetlagern

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

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann
Prof. Dr.-Ing. Ralf Werner, TU Chemnitz

Tag der Einreichung: 22.02.2022

Tag der Verteidigung: 28.09.2022

Zusammenfassung:

Seit jeher sind Wirbelströme ein fester Bestandteil der Leistungsbilanz und Verlustberechnung in zahlreichen elektromagnetischen Energiewandlern. In aktiven Magnetlagern und Aktoren haben sie jedoch häufig einen zusätzlichen Einfluss auf die Kraftdynamik, da die einhergehende Feldverdrängung parasitäre Magnetisierungsströme hervorbringt, welche die meist strombasierten Kraftregler beeinträchtigen. Besonders betroffen sind die in dieser Dissertation beispielhaft betrachteten magnetischen Axiallager mit ihrer dreidimensionalen Flussführung, für welche die sonst übliche und effektive Blechung des Kerns unwirksam wird. Aus diesen Gründen werden regelungsbasierte Lösungen angestrebt. Bekannte fortschrittliche Topologien nutzen mitunter aufwendige Regler und Beobachter, wobei der direkte physikalische Bezug zu den mechanischen Parametern Steifigkeit und Dämpfung meist verloren geht. Diese Analogie zu mechanischen Lagern ist jedoch essentiell für eine einfache Inbetriebnahme des Magnetlagers, ein Grund, weshalb sich viele alternative Topologien nicht nachhaltig durchsetzen konnten und die dezentrale kaskadierte Lageregelung mit unterlagerter Stromregelung noch immer als weit verbreiteter Industriestandard gilt. Die in Axiallagern eingeschränkte Stabilität, Dynamik und Bandbreite aufgrund der Wirbelstromeffekte wird dabei zu Gunsten der einfacheren Anwendbarkeit toleriert. Diese Arbeit stellt ein fraktionales Kompensationsglied in Gestalt eines Flusschätzers vor, welches im Rückführzweig der unterlagerten Regelung die Folgen der Wirbelströme dort herausrechnet, wo sie physikalisch wirken. Die resultierende modellbasierte Flussregelung erhält somit sämtliche physikalische Bezüge und die gute Anwendbarkeit, bei gleichzeitig verbesserten Regelungseigenschaften, sodass diesbezüglich keine Kompromisse notwendig sind. Das zugrundeliegende Modell leitet sich aus der Lösung der Diffusionsgleichung

chung für den massiven Kern ab und stellt zunächst ein transzendentes fraktionales System dar, welches nicht direkt in einer Regelung anwendbar ist. Über Kettenbruchentwicklungen und Frequenzganganalysen ist es jedoch möglich, eine rationale Systembeschreibung zu ermitteln, die in Form einer digitalen Biquad-Filter-Kaskade auch in bestehende Mikroprozessor-Regelungen echtzeitfähig implementierbar ist. Die Arbeit dokumentiert das Vorgehen für eine Vielzahl von Randbedingungen und berücksichtigt verschiedene denkbare Einschränkungen, die in praktischen Anwendungen erwartbar sind. Der messtechnische Funktionsnachweis zeigt eine nahezu vollständige Kompensation der Wirbelstromeffekte in der unterlagerten Regelung, während sich die Bandbreite der Lageregelung nachweislich mindestens vervierfacht bei einem um bis zu 90% reduziertem Überschwingen gegenüber dem Industriestandard.

Yuanpeng Zhang

Thema: Energieoptimale Drehmomentsteuerung und Auslegung von hochdynamischen Asynchronantrieben unter besonderer Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung

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

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann
Prof. Dr. Rik W. de Doncker (RWTH Aachen)

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner (TU Dresden)

Tag der Einreichung: 01.11.2021

Tag der Verteidigung: 29.09.2022

Zusammenfassung:

An moderne stromrichterbetriebene Drehstromantriebe werden wachsende Anforderungen bezüglich einer hohen Drehmomentdynamik gestellt. Jedoch erfordert die schnelle Drehmomentänderung eine entsprechend schnelle Änderung der Wicklungsströme, die zur Anregung der transienten Stromverdrängung in den Rotorstäben von Käfigläufermotoren führt. Die sich infolge der transienten Stromverdrängung ergebenden zusätzlichen Rotorverluste erzeugen bei schnellen Lastspie-

len eine nennenswerte zusätzliche Wärme im Rotor. Repräsentative Beispiele derartiger transienten Stromverdrängung bieten die Querschneiderantriebe in Papiermaschinen, die Scheren in Walzwerken und die Prüfstandantriebe in der Automobilindustrie. Die vorliegende Arbeit soll dem Leser aufzeigen, wie zusätzliche Rotorverluste, verursacht durch transiente Stromverdrängung, bei schnellen Lastspielen durch die energieoptimale Drehmomentsteuerung und Auslegung vermindert werden können, ohne dass die sonstigen Betriebs-eigenschaften des Asynchronantriebs gleichzeitig verschlechtert werden. Darüber hinaus wird das Trägheitsmoment des Antriebsmotors zugleich als eine andere Zielgröße durch das multiobjektive Optimierungsverfahren reduziert. Bei der Optimierungsarbeit wird großer Wert auf die interdisziplinäre Berechnungsmethodik gelegt, sodass die Wechselwirkung zwischen den elektromagnetischen, thermischen, strömungsmechanischen und regelungstechnischen Vorgängen durch die gekoppelte Berechnung berücksichtigt werden kann. Die in der Arbeit behandelten Herangehensweisen der energieoptimalen Drehmomentsteuerung und Auslegung können nicht nur auf hochdynamische Asynchronantriebe angewendet werden, sondern auch als Leitfaden für Optimierung von anderen Antriebsanwendungen dienen.

4.4 Ausgewählte Forschungsergebnisse in Kurzform

Dipl.-Ing. Gino Sturm

Untersuchungen zur Netzstützung des ARESS-Demonstrators

Anhand des Demonstrators soll die Funktionalität der entworfenen Netz- und Maschinenregelung des asynchronen, rotierenden Energiesystemstabilisators (kurz: ARESS) nachgewiesen werden. Im Detail besteht das System aus einer doppelt gespeisten Asynchronmaschine mit einem modularen Multilevel-Matrixumrichter zwecks Rotorspeisung und besitzt eine Gesamt-Scheinleistung von 10 kVA. Das Netz lässt sich mit Hilfe eines Emulators anpassen. Konkret geht es dabei um die Variation der Spannungsamplitude sowie der Frequenz des Netzes. Beide Szenarien erfordern eine definierte Netzunterstützung entsprechend der Vorschriften des Netzbetreibers. Im Falle einer Änderung der Spannungsamplitude kommt eine Blindleistungs-Spannungs-Statik zum Tragen. Zur Stützung der Netzfrequenz wird das Trägheitsverhalten eines Synchrongenerators nachgebildet, woraus ein Wirkleistungsaustausch proportional zur Frequenzänderung resultiert. Zur Veranschaulichung des Ansatzes der synthetischen Trägheit zeigt Fig. 1 eine Änderung der Netzfrequenz von 50 Hz auf 49,05 Hz mit einer Änderungsrate von -2 Hz/s sowie das innere Drehmoment der Maschine. Dazugehörig sind die Wirk- und Blindleistung am Netzanschlusspunkt (PCC) in Fig. 2 dargestellt.

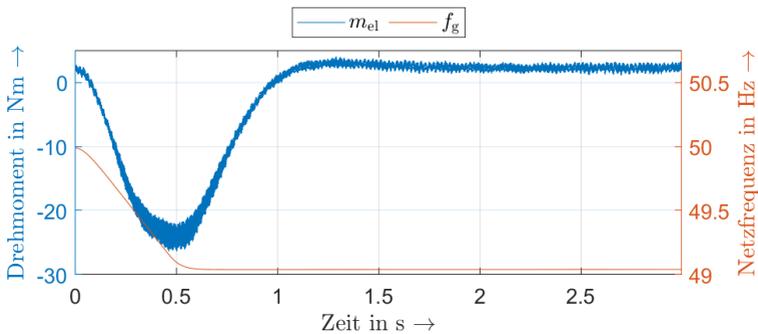


Fig.1: Luftspaltmoment und Netzfrequenz / Airgap torque and grid frequency

Das Drehmoment baut sich dabei analog zu dem Trägheitsverhalten eines Synchrongenerators auf. Der Endwert (circa -23 Nm) korrespondiert zur Änderungsrate der Frequenz. Sobald die Netzfrequenz auf einem konstanten Wert verbleibt, klingt die Trägheitsantwort wieder auf den Ausgangswert ab. Die zugehörige

Wirkleistungsaufnahme führt zu einem Abbremsen der Maschine. Aufgrund der konstanten Spannungsamplitude bleibt die Blindleistung dabei unverändert.

Investigations into the grid support of the ARESS-Demonstrator

The Demonstrator is used in order to prove the functionality of the designed grid and machine control of the asynchronous rotating energy system stabilizer (ARESS for short). In detail, the system consists of a doubly fed asynchronous machine with a modular multilevel matrix converter for rotor feeding and has a total apparent power of 10 kVA. The grid can be varied with the help of an emulator. Specifically, this involves varying the voltage amplitude and the frequency of the grid. Both scenarios require a defined grid support according to the regulations of the network operator. In case of a change of the voltage amplitude, a reactive power-voltage statics comes into effect. To support the grid frequency, the inertia behavior of a synchronous generator is emulated, resulting in an active power exchange proportional to the frequency change. To illustrate the synthetic inertia approach, Fig. 1 shows a change of the grid frequency from 50 Hz to 49.05 Hz with a rate of change of -2 Hz/s as well as the airgap torque of the machine. Associated with this, the active and reactive power at the point of common coupling (PCC) are shown in Fig. 2.

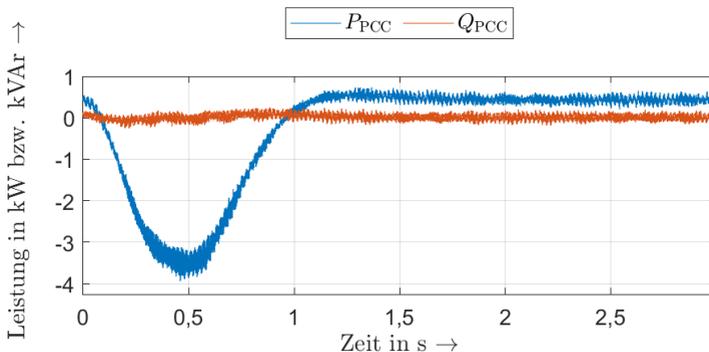


Fig. 2: Leistungen am PCC / Powers at the PCC

The torque builds up analogously to the inertia behavior of a synchronous generator. The final value (approx. -23 Nm) corresponds to the rate of change of the frequency. As soon as the grid frequency remains at a constant value, the inertia response decays back to the initial value. The corresponding active power consumption leads to a deceleration of the machine. Due to the constant voltage amplitude, the reactive power remains unchanged.

ARESS - Der asynchrone, rotierende Energiesystem-Stabilisator

Durch den steigenden Anteil der erneuerbaren Energien in der Energieversorgung und dem damit verbundenen Netzbau muss neben der Stromerzeugung auch die Netzstabilität gewährleistet werden. Ein neuer Ansatz zur Netzstabilisierung, um kurzzeitige Netzschwankungen ausgleichen zu können, ist der „ARESS“. Grundidee ist, durch Energieentnahme und Energieabgabe aus einen rotierenden Energiespeicher das Versorgungsnetz bzgl. der Frequenz und durch elektronischen Phasenschieberbetrieb bzgl. der Spannung zu stabilisieren.

Im Projekt sind zunächst Untersuchungen an einem kleinen Demonstrator (10 kVA) vorgesehen, die später auch an einen größeren Prototyp erprobt werden sollen. Der „ARESS“ besteht in Grundaufbau aus einer doppelt gespeisten Asynchronmaschine, einen Multilevel-Matrixumrichter, Transformatoren, Anlagentechnik sowie einer Steuer- und Regeleinheit, s. Fig. 1. Im Rahmen des Projektes wird eine Regelung entworfen werden, die auf die Netzschwankungen und Netzfehler stabilisierend wirkt. Damit diese Regelung korrekt arbeiten kann, müssen die Betriebszustände der Anlage schnell und korrekt erfasst werden. Neben genauer Kenntnis der Maschinenparameter ist auch der Einfluss der Sättigung relevant, da die Anlage auch bei größter Netzbelastung unterstützen und nicht ausfallen soll. Im Falle eines Kurzschlusses im Energienetz entstehen sehr hohe Kurzschlussströme, welche Maschine und Transformator in die Sättigung bringen können (Fig.2). Abhängig vom Betriebszustand der Anlage müssen die Parameter für die Regelung schnell umgeschaltet werden, da besonders die Übergangsvorgänge die Anlage stark belastet.

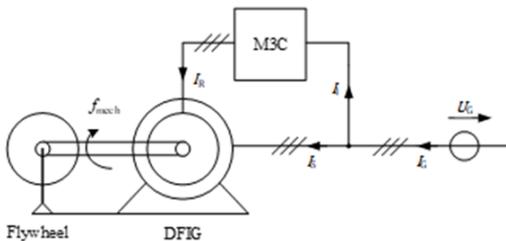


Fig.1: ARESS-Prinzipschaltbild/ ARESS principle circuit

Im Anbetracht auf die Verfügbarkeit und Anlagensicherheit entsteht ein Sicherheitskonzept, was eine Reaktion auf interne Fehler ermöglicht.

ARESS - The Asynchronous Rotating Energy System Stabilizer

Due to the increasing share of renewable energies in the energy supply and the associated grid restructuring, grid stability must be ensured in addition to the generation of energy. A new approach to grid stabilization in order to be able to compensate for short-term grid fluctuations is the "ARESS". The basic idea is to stabilize the supply network in frequency and voltage by drawing and releasing energy from a rotating energy storage system and phase shifter operation by converter.

For the project, investigations are initially planned on a small demonstrator, which will later be continued on a large prototype. The basic design of the "ARESS" consists of a doubly fed asynchronous machine, a multilevel matrix converter, transformers, plant technology and a control and regulation unit (Fig. 1). Within the scope of the project, a control system is to be designed that has a stabilizing effect on the grid fluctuations and grid faults. In order for this control system to work correctly, the operating conditions of the plant must be recorded. In addition to the knowledge of the machine parameters, the influence of the saturation is also relevant, since the plant should support and not fail even under the greatest network load. In the event of a short circuit in the power grid, very high short-circuit currents occur, which could bring the machine and the transformer into saturation (see Fig. 2). Depending on the operating state of the plant, the parameters for the control must be switched over quickly, since the transition processes in particular place a heavy load on the plants.

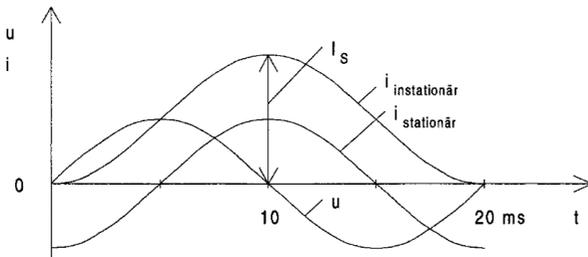


Fig.2: Prinzipieller Kurzschlussstromverlauf kurz nach Kurzschlusseintritt / Short-circuit current curve after the occurrence of a short circuit

In view of the availability and plant safety, a safety concept is to be worked out, which is to enable a reaction to internal errors.

Einzelverlustmessung an netzanlaufendem PM-Synchronmotor

Die Norm IEC 60034-2-1 [1] zur Wirkungsgradbestimmung elektrischer Maschinen sieht für PMSM nur eine direkte Wirkungsgradmessung vor, sodass keine Einzelverluste bestimmt werden können. Nach einem bekannten Verfahren zur Einzelverlustmessung [2] müssen die Reibungsverluste berechnet werden. Bei der untersuchten Maschine wird bei 50 Hz an einem Stelltransformator die Grundschnungsspannung U_1 zwischen Nennspannung und Polradspannung variiert, wobei die Drehzahl und somit die Reibungsverluste konstant sind. Eine Trennung in Reibungsverluste P_{mech} und Eisenverluste P_{fe} erfolgt durch Interpolation der lastunabhängigen (konstanten) Verluste P_{const} über U_1^2 , wie für Asynchronmaschinen üblich [1], siehe Fig. 1 links. Wird der gleiche Versuch am Netz (grid g) und Stromrichter (converter c) durchgeführt, ergibt die Differenz der Leistungen bei gleicher Spannung U_1 die stromrichterbedingten Zusatzverluste P_{harm} , wie Fig. 2 links zeigt. Nimmt man diese als Wirbelstromverluste an und bezieht den typischen Oberschwingungsgehalt U_{harm} von 2-Level-Stromrichtern (vgl. Fig. 1 rechts) hinzu [3], lässt sich ein gemischt linear-quadratischer Zusammenhang mit der Spannung U_1 feststellen. Die Eisenverluste P_{fe} in Abhängigkeit von Drehzahl und Spannung werden aus einem Leerlaufversuch mit U/f-Steuerung mit annähernd Polradspannung bestimmt, um den Stromfluss zu verhindern und keine stromabhängigen Verluste mitzumessen. Das Ergebnis zeigt Fig. 2 rechts. Berücksichtigt man die aus Strom und Widerstand bestimmten Stromwärmeverluste in einem Leerlaufversuch mit normaler U/f-Kennlinie und rechnet alle Teilverluste entsprechend der Spannung auf diesen Versuch um, verbleiben stromabhängige Zusatzverluste. Bei der vorliegenden Maschine sind diese nahe Null gemessen, fallen also sehr gering aus. Das beschriebene Verfahren ermöglicht, im Rahmen des DFG-Projektes *Maschinenwicklungen in Kombinationsschaltung*, einen Vergleich zwischen den Einzelverlusten eines PM-Synchronmotors mit Stern- und kombinierter Stern-Dreieck-Wicklung.

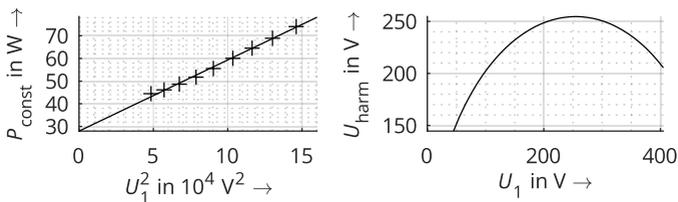


Fig. 1: Konstante Verluste aus Leerlaufmessung am 50 Hz-Netz und typischer Oberschwingungsgehalt von 2-Level-Stromrichtern/ Constant losses under no-load at 50 Hz grid and typical harmonic content of 2-level converters

Single loss measurement of a line-start PMSM

The standard IEC 60034-2-1 [1] for the efficiency determination of electrical machines only provides a direct efficiency measurement for PMSM, so that single losses cannot be determined. A well-known process for single loss determination [2] calculates the friction losses. The investigated machine is fed with 50 Hz on a transformer with a variation of the fundamental voltage U_1 between rated and induced voltage, so that speed and friction losses are constant. A separation of friction losses P_{mech} and iron losses P_{fe} is done by an interpolation over U_1^2 as it is used for induction machines [1], see Fig. 1 left. If the same experiment is carried out on grid (g) and converter (c), the difference of the powers at the same voltages gives the additional losses due to converter feeding P_{harm} , as Fig. 2 left shows. Assuming these losses as eddy current losses and taking the typical harmonic content U_{harm} of 2-level converters, see Fig. 1 right, into account [3], a mixed square/linear dependency on U_1 results. The iron losses P_{fe} in dependency from speed and voltage are determined by a no-load experiment with V/f-control and nearly the induced voltage, so that there is no current flowing and no current depending losses are measured. The result shows Fig. 2 right. Taking the copper losses, calculated from current and ohmic resistance, into account in a no-load test with normal V/f characterization and converting all single losses to the corresponding voltages, only current-dependent additional losses remain. For the investigated machine, they were measured as zero and therefore, are very small. In the DFG project *Combined machine windings*, the described process allows to compare the single losses of a PM synchronous motor with a star and star-delta combined winding.

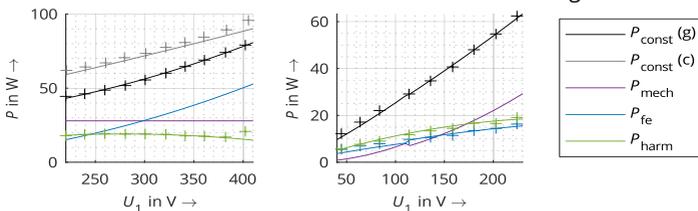


Fig. 2: Leerlaufverluste bei 50 Hz (links) und bei U/f-Steuerung (rechts) / No-load losses at 50 Hz (left) or V/f-control (right)

- [1] DIN IEC 60034-2-1, Drehende elektrische Maschinen – Standardverfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades aus Prüfungen, Norm, 2015.
- [2] B. Deusinger, Indirect Efficiency Determination and Parameter Identification of Permanent-Magnet Synchronous Machines, Dissertation, TU Darmstadt, 2021.
- [3] F. Jenni und D. Wüest, Steuerverfahren für selbstgeführte Stromrichter, vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Teubner, 1995.

Messung transienter Strom- und Drehmomentverläufe netzanlauffähiger PM-Synchronmaschinen

In den vorangegangenen Forschungsarbeiten wurde die analytische Berechnung des transienten Stromes und des Drehmomentes von netzanlaufenden permanentmagneterregten Synchronmaschinen hergeleitet. Die Ergebnisse der analytischen Rechnung sollen mit Messwerten verifiziert werden. Ziel ist es, die analytisch berechenbaren Betriebsarten mit den Messungen abzubilden. Um bei der analytischen Herleitung eine Lösung des Differentialgleichungssystems zu erhalten, muss die Rotorwinkelgeschwindigkeit ω als konstant angesehen werden. Dabei bildet der blockierte Läufer einen Spezialfall, bei dem $\omega = 0$ gilt. In den Versuchen wurde bei einer vierpoligen Maschine die Phasenströme, die Klemmenspannungen, das Drehmoment und die Drehzahl zeitabhängig aufgezeichnet. Zum einen wurde der Rotor blockiert, um die Drehzahl konstant zu Null festzustellen. In einer weiteren Messreihe wurde der Prüfling mit der Lastmaschine auf eine definierte Drehzahl beschleunigt und dann an das Netz zugeschaltet.

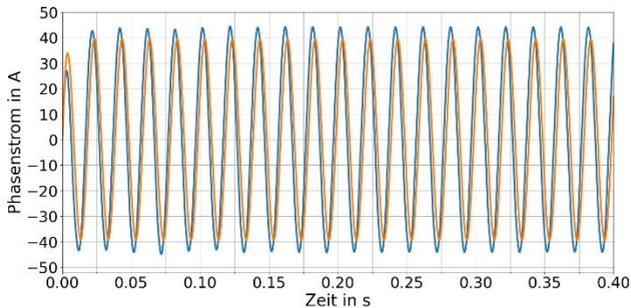


Fig.1: Vergleich des gemessenen Phasenstromes (blau) mit dem Ergebnis der analytischen Rechnung (orange) / Comparison of the measured phase current (blue) with the result of the analytical calculation (orange)

In Fig. 1 ist ein Vergleich des gemessenen Phasenstroms (blau) und des analytisch berechneten Stromes (orange) für den Betrieb mit blockiertem Rotor dargestellt. Die Phasenlage stimmt sehr gut überein, die Amplitude ist im stationären Bereich etwas kleiner. Das zu Fig. 1 zugehörige Drehmoment ist in Fig. 2 dargestellt. Die blaue Kurve ist das gemessene Drehmoment und die orange Kurve das analytisch berechnete Drehmoment. Die Phasenlage der beiden Kurven stimmt gut überein. Die Unterschiede und Abweichungen in den Amplituden der beiden Kurven soll in weiteren Untersuchungen analysiert werden.

Measurement of transient current and torque characteristics of line-start permanent magnet synchronous machines

In previous research work, the analytical calculation of the transient current and torque of line-start permanent magnet synchronous machines was derived. The results of the analytical calculation are to be verified with measured values. The aim is to map the analytically calculable operating modes with the measurements. To obtain an analytical solution of the differential equation system, the rotor angular velocity ω must be considered as constant. Here, the locked rotor operation is a special case where $\omega = 0$. In the measurements, the phase currents, terminal voltages, torque and speed were recorded as a function of time for a four-pole machine. First, the rotor was locked to establish the speed constant to zero. In another series of measurements, the test machine was accelerated to a defined speed with the load machine and then connected to the mains.

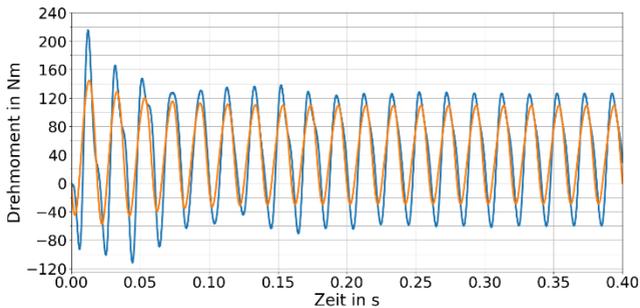


Fig. 2: Vergleich des gemessenen Drehmoments (blau) mit dem Ergebnis der analytischen Rechnung (orange) / Comparison of the measured torque (blue) with the result of the analytical calculation (orange)

Fig. 1 shows a comparison of the measured phase current (blue) and the analytically calculated current (orange) for operation with locked rotor. The phase angle agrees very well, the amplitude is slightly smaller in the stationary range. The torque corresponding with Fig. 1 is shown in Fig. 2. The blue curve is the measured torque, and the orange curve is the analytically calculated torque. The phase angle of the two curves agrees very well. The differences and deviations in the amplitudes of the two curves will be analyzed in further investigations.

Hochdynamische Stromregelung zur Nachbildung der Drehmomentverläufe eines Verbrennungsmotors mit einer PMSM

Die Automobilindustrie nutzt für die Tests der Schalt- und Automatik-Getriebe elektrische Maschinen. Eine der Maschinen bildet die Drehzahl der Antriebswelle nach. Auf der Verbrennungsmotorseite des Getriebes ist eine E-Maschine angeschlossen, die den Drehmomentverlauf (jeden Zündimpuls) des Verbrennungsmotors simuliert. Dort müssen hochdynamische periodische Drehmomente realisiert werden. Im Rahmen eines ZIM-Projektes mit der Firma M&P Motion Control and Power Electronics GmbH (M&P) wurde dazu das neue Oberschwingungsregelverfahren entwickelt und bereits auf einer internationalen Konferenz vorgestellt [1]. Das neue Verfahren wurde am Prüfstand (siehe Fig. 1) bei M&P erprobt. Aus einer Simulation wurde der Drehmomentverlauf eines 4-Takt-4-Zylinder-Motors gewonnen. Dieser Drehmomentverlauf musste auf das maximale Drehmoment des Prüfstandes adaptiert werden.



Fig. 1: Maschinen-Prüfstand bei M&P mit zwei ca. 15 kW betrieben an M&P 3-Level-Stromrichtern (LT300-ML) / M&P machine testrig with two machines

Das neue Oberschwingungsregelverfahren basiert auf der Feldorientierten Regelung (FOR) und nutzt, wie aus dem Bereich der aktiven Netzfilter bekannt [2], mehrere parallele rotierende Koordinatensysteme, sogenannte Oberschwingungsregelblöcke (OSB), um gezielt die notwendigen Stromoberschwingungen auszuregeln. Fig. 2 zeigt links die Soll- und Ist-Wertverläufe und rechts die Regelabweichung des q -Stromes. Mit der klassischen FOR ist die Regelabweichung mit fast 20 % des maximalen Sollwertes sehr groß. Mit ± 3 bzw. ± 5 OSB ist eine deutliche Reduktion der Regelabweichung auf maximal 2 % des maximalen Sollwertes zu sehen.

Highly dynamic current control for simulating the torque characteristics of a combustion engine with a PMSM

The automotive industry uses electrical machines for testing manual and automatic gearboxes. One of the machines simulates the speed of the drive shaft. On the combustion engine side of the gearbox, an electric machine is connected to simulate the torque curve (each ignition pulse) of the combustion engine. Highly dynamic periodic torques have to be realized there. Within a ZIM-project with the

company M&P Motion Control and Power Electronics GmbH (M&P), the new harmonic current control method was developed for this purpose and already presented at an international conference [1]. The new method was tested on the test bench (see Fig. 1) at M&P. The torque curve of a 4-stroke 4-cylinder engine was obtained from a simulation. This torque curve had to be adapted to the maximum torque of the test rig.

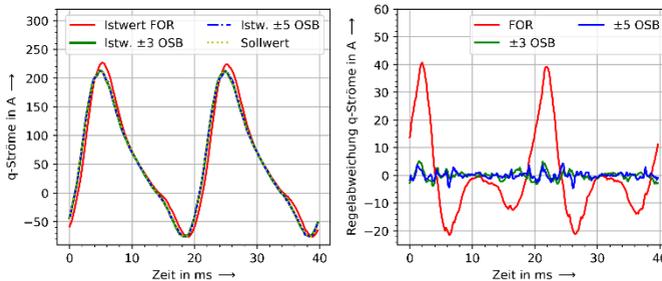


Fig. 2: Q-Strom-Soll- und -Ist-Werte und Q-Strom-Regelabweichung bei Messungen zur Nachbildung des auf den Prüfstand bei M&P adaptieren Drehmomentverlauf eines Verbrennungsmotors / q-current setpoint actual value and control error

The new harmonic control method is based on field-oriented control (FOR) and, as known from the field of active line filters [2], uses several parallel rotating coordinate systems, so-called harmonic control blocks (OSB), to specifically control the necessary current harmonics. Fig. 2 shows the setpoint and actual value curves on the left and the control error of the q current on the right. With the classical FOR, the control error is very large at almost 20 % of the maximum setpoint. With ± 3 or ± 5 OSB, a clear reduction of the control error to a maximum of 2 % of the maximum setpoint can be seen.

- [1] Schlegel, Ludwig; Hofmann, Wilfried: Harmonic Current Control of High Dynamic Periodical Torque Reference Values for Permanent Magnet Synchronous Machines, 2022 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Sorrento, 2022, S. 82–87, doi: 10.1109/SPEEDAM53979.2022.9842072.
- [2] Schlegel, Ludwig: Entwurf und Implementierung der Regelung eines aktiven Netzfilters auf Basis der 3-Level NPC-Topologie, Diplomarbeit, TU Dresden, 2012.

Steigerung der Energieeffizienz von Holzbearbeitungsmaschinen durch adaptive Steuerung von Prozesseinstellgrößen

Holz und Holzwerkstoffe werden überwiegend spanend bearbeitet [1]. Die Produktion von Möbelbauteilen findet häufig mit verketteten Durchlaufanlagen statt. Die elektrischen Antriebe der Durchlaufanlagen werden anhand von Prozessleistungsmodellen auf eine Bemessungsleistung ausgelegt, die ein breites Anwendungsspektrum der Maschinen ermöglichen soll. In der industriellen Praxis wird jedoch selten am Arbeitspunkt der Bemessungsleistung gearbeitet. Daher sind die elektrischen Antriebe für viele Anwendungen überdimensioniert und bieten daher ein Potential für Effizienzsteigerung. In diesem Forschungsvorhaben wurden die Einsparpotentiale durch Leistungsmessungen an Referenzanlagen untersucht. Durch die Verknüpfung von Prozessleistungs- und Antriebsverlustmodellen wurden Maßnahmen für Effizienzsteigerungen identifiziert und bewertet [1], [2]. Ein großes Einsparpotential liegt in der adaptiven Drehzahlsteuerung von Antrieben durch Frequenzumrichter, mit der sich eine Optimierung der Leistungsaufnahme an den aktuellen Last- und Drehzahlarbeitspunkt realisieren lässt (Fig. 2).

Messungen im industriellen Umfeld haben gezeigt, dass die Holzbearbeitungsanlagen meist nicht mit maximaler Vorschubgeschwindigkeit $v_{f,max}$, sondern einer reduzierten Vorschubgeschwindigkeit v_f betrieben werden. Dies führt zur Reduktion der benötigten Prozessleistung für den Zerspanungsvorgang. Ein Nebeneffekt der Reduktion der Vorschubgeschwindigkeit ist die Erhöhung der Oberflächenqualität, die durch die Abnahme der mittleren Spanungsdicke h erklärt werden kann (Fig. 1). Die Steigerung der Oberflächenqualität ist jedoch nicht ausschlaggebend für die Reduktion der Vorschubgeschwindigkeit, sondern ergibt sich meist aus anderen limitierenden Prozessen innerhalb der verketteten Anlage. Durch Steigerung der Oberflächenqualität wird demnach kein gesteigerter Nutzen für das Produkt erzielt.

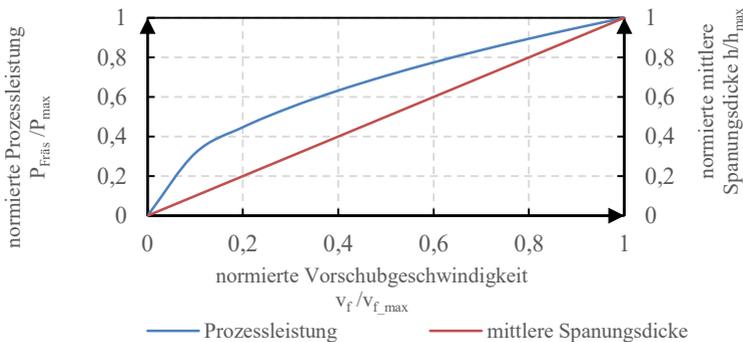


Fig. 1: Prozessleistung Istzustand / process performance current state

Increasing the energy efficiency of woodworking machines through adaptive control of process parameters

Wood and wood-based materials are predominantly machined [1]. The production of furniture components often takes place with interlinked continuous systems. The electrical drives of the continuous systems are designed using process performance models for a rated output that should enable a wide range of applications for the machines. In industrial practice, however, work is rarely carried out at the operating point of the rated power. Therefore, the electric drives are oversized for many applications and therefore offer potential for increasing efficiency. In this research project, the savings potentials were examined by performance measurements on reference systems. Measures for increasing efficiency were identified and evaluated by linking process performance and drive loss models [1,2]. A large savings potential lies in the adaptive speed control of drives by frequency converters, with which an optimization of the power consumption at the current load and speed operating point can be realized (Fig. 2).

Measurements in the industrial environment have shown that the wood processing systems are usually not operated with the maximum feed speed $v_{f,max}$, but with a reduced feed speed v_f . This leads to a reduction in the process performance required for the machining process. A side effect of reducing the feed rate is the increase in surface quality, which can be explained by the decrease in the mean chip thickness h (Fig. 1). However, the increase in surface quality is not decisive for the reduction in feed speed, but mostly results from other limiting processes within the linked system. Accordingly, no increased benefit for the product is achieved by increasing the surface quality.

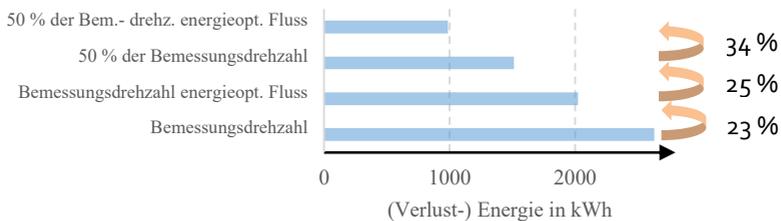


Fig. 2: Beispiel – Verlustwärmereduktion / Example - total loss reduction

- [1] B. Ettelt und H.-J. Gittel, Sägen, Fräsen, Hobeln, Bohren – Die Spannung von Holz und ihre Werkzeuge, Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag, 2004.
- [2] C. Gottlöber, Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen, Dresden: Fachbuchverlag Leipzig, 2014.
- [3] T. Krenke, S. Frybort und U. Müller, „Internationaler Stand zur Schnittkraftuntersuchung bei Holz - Teil 1,“ holztechnologie 55, 2014.

Leistungsspitzenreduktion bei Regalbediengeräten in der Intra-logistik

In der Intralogistik werden Regalbediengeräte (RBG), bestehend aus einem elektrischen Mehrachsenantrieb mit zwei Antriebssträngen für Hub- und Fahrwerk, in Hochregallagern eingesetzt, um automatisiert Waren ein- und auszulagern. Das aktuelle Forschungsprojekt DFG-HO 1483/84-1 verfolgt u. a. das Ziel, die Energieeffizienz des Gesamtsystems zu steigern, indem eine geschickte Wahl der Bahnkurven den Austausch von Rekuperation unter den Antriebsachsen fördert. Fig. 1 zeigt das Ergebnis der Bahnoptimierung für drei ausgewählte Doppelspiele. Außerdem sollen durch Doppelschichtkondensatoren, mithilfe von prädiktiven Ladestrategien, Netzleistungsspitzen reduziert werden.

Methodisch wird eine Ladestrategie verwendet, die anhand von Leistungsmodellen des Antriebssystems den prädizierten Energiebedarf für die nächste Transportfahrt vorlädt. Außerdem wurde eine Ladesteuerung entwickelt, die den Speicher in Abhängigkeit der Ladegrenzen und der aktuellen Netzleistung lädt. Nach Auswertung der Simulationsergebnisse konnten Energieeinsparungen durch Zwischenspeicherung von Bremsenergie von bis zu 6 % festgestellt werden. Mit der Ladesteuerung konnte zudem eine Vergleichmäßigung der bezogenen Netzleistung von 87 % erzielt werden. Die Höhe der durchschnittlichen Speicherspannung hat sich außerdem als größter Einflussfaktor auf die Speicherschädigung herausgestellt. Die Ergebnisse der Simulation sind in Fig. 2 zusammengefasst.

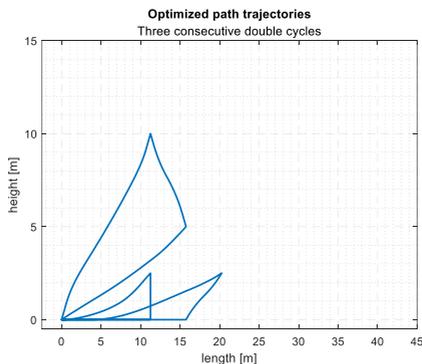


Fig. 1: Optimierte Bahntrajektorien für drei aufeinanderfolgende Doppelspiele /
Optimized path trajectories for three consecutive double cycles

Peak power reduction for stacker cranes in intralogistics

In intralogistics, stacker cranes, which consist of an electric multi-axis drive with two drive trains for lifting and running gear, are used in high-rack warehouses to automatically store and retrieve goods. The current DFG-HO 1483/84-1 research project aims to increase the energy efficiency of the overall system by selecting the motion curves to promote the exchange of recuperation among the drive axles. Fig. 1 shows the result of the trajectory optimization for three selected double cycles. In addition, predictive charging strategies for the energy storage system, consisting of double layer capacitors, are intended to reduce grid power peaks.

A charging strategy is used to precharge the predicted energy demand for the next transport trip based on models of the drive system. The charging times result from the duration of the storage and retrieval processes. In addition, a charging control strategy was developed in order to achieve even greater peak power reductions. By evaluating the simulation results, energy savings of up to 6 % were achieved through intermediate storage of braking energy. With the charging control, it was also possible to achieve even greater network regulations of about 87 %. However, the level of the average storage voltage was found to have the greatest impact on storage damage. The results of the simulation are summarized in Fig. 2.

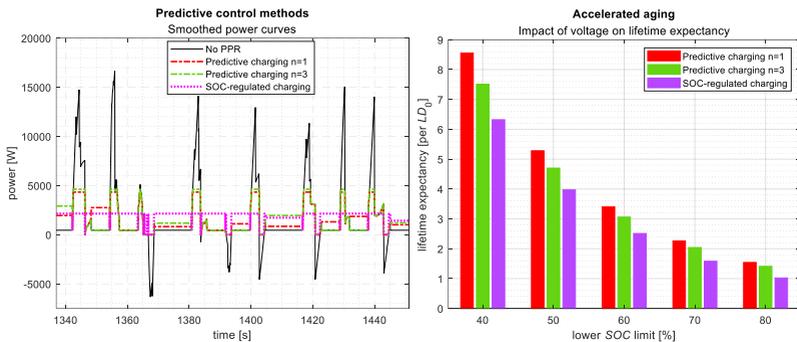


Fig. 2: Netzleistungsverläufe für unterschiedliche Betriebsstrategien (links) und Einfluss der Speicherspannung auf die Lebensdauererwartung (rechts) / Grid power curves for different operating strategies (left) and impact of the storage voltage on the lifetime expectancy (right)

Auslegungsmethodik für energieeffiziente elektrische Mehrachsantriebe in Elektrofahrzeugen (FVA 886 II)

Für Elektrofahrzeuge mit Allradantrieb können die Vorder- und Hinterachse jeweils mit einem Elektromotor betrieben werden. Das Energieeinsparungspotential der Mehrachsantriebe in Elektrofahrzeugen wurde aufgrund der zahlreichen Auslegungsmöglichkeiten hinsichtlich der Komponentenbauart, der Auslegungsparameter und der Betriebsstrategie bisher nur unvollständig untersucht. In diesem Forschungsvorhaben soll als Erweiterung des Projekts FVA 886 I eine Auslegungsmethodik für energieeffiziente Mehrachsantriebe in Elektrofahrzeugen erarbeitet werden. Einzubeziehen sind vor allem die Auslegungskriterien wie Performance, Energieeffizienz, Leistungsgewicht, Bauvolumen und Herstellkosten. Um fahrprofilübergreifende und technisch vorteilhafte Auslegungszusammenhänge zu identifizieren, sind im Projekt umfassende Berechnungen hinsichtlich der Auslegungskriterien unter Berücksichtigung unterschiedlicher Betriebsstrategien sowohl auf Systemebene als auch auf Komponentenebene analytisch durchzuführen. Dafür ist die Erzeugung von generischen Komponentendaten erforderlich, welche auf dem technisch sinnvollen Komponentenentwurf basieren sollen. In Fig. 1 wird bspw. die Methode zur Erzeugung von generischen Motordaten gezeigt. Die Ergebnisse des Projekts sollen die Abschätzung der besten Systemkonfiguration in einer frühen Entwicklungsphase ermöglichen und nachvollziehbare Aussagen zur Auswahl und Optimierung von mechanischen und elektrischen Komponenten im Antriebsstrang liefern (Fig. 2).

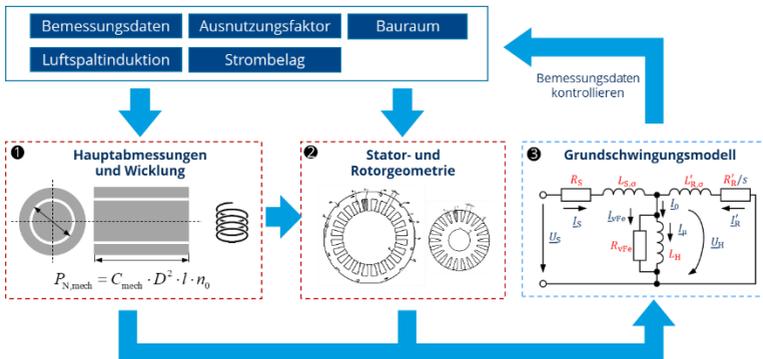


Fig. 1: Prozess zur Erzeugung von generischen Motordaten / Process of generating generic data of motors

Design methodology of energy efficient electric multi-axle drives in electric vehicles (FVA 886 II)

For the electric vehicles with all-wheel drive, the front axle and the rear axle can be driven by electric motors separately. The potential of multi-axle drive at energy-saving has not been studied completely because of a large number of options on the selecting of component types, design parameters and vehicle control strategies. As an extension of the project FVA 886 I, a methodology should be in this research project worked out to design energy efficient electric multi-axle drives for electric vehicles. Following design criteria should be considered: vehicle performance, energy efficiency, power/weight ratio, construction volume and cost. In order to identify the technically advantageous designs, a large number of calculations on the system and component level is inevitable. In the calculation, different vehicle control strategies with other design criteria should be considered holistically. For that purpose, important data of components based on general component design should be generated without great time-consuming (Fig. 1). Ultimately, the developed methodology should enable a quickly estimating the best system configurations in the early stage of development and provide transparent and comprehensible predication for the selecting of mechanical and electric components in the power train (Fig. 2).

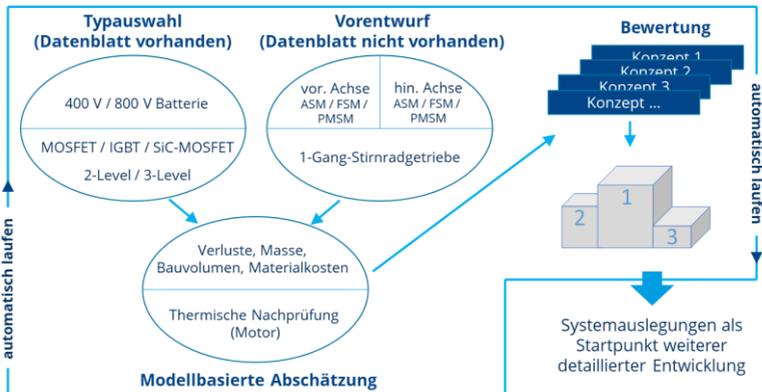


Fig. 2: Auslegungsmethodik im Projekt / Design methodology in this project

[1] S. Yuan, W. Hofmann: Systematische Identifizierung energieeffizienter Antriebskonfigurationen in Elektrofahrzeugen. e & i, Nr. 139, S. 271–281, 2022.

Michael Heroth, M. Sc.

Effizienter Datengenerierungsprozess für die Anwendung des Maschinellen Lernens und der Plattformp Optimierung

Um der steigenden Nachfrage nach Elektrofahrzeugen gerecht zu werden, entwickeln Automobilzulieferer modulare E-Motor (EM) Plattformen. Zur Suche von optimalen Plattformen und um Methoden des Maschinellen Lernens (ML) anwenden zu können, wird ein geeigneter Datensatz benötigt. In Fig. 1 ist ein Gesamtkonzept dargestellt, welches eine zentrale Datenbank beinhaltet. Damit ist es möglich, einen kontinuierlich wachsenden Datensatz aufzubauen und diesen systematisch zu erweitern, um die Auslegung von EMs mit einem datengetriebenen Ansatz zu unterstützen.

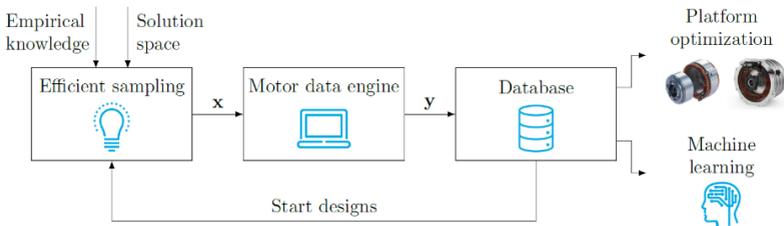


Fig. 1: Gesamtkonzept eines datenbasierten EM-Auslegungsprozesses / Basic concept of a data-based EM design process

Der in [1] beschriebene effiziente Sampling Algorithmus ermöglicht es, Erfahrungswissen von EM-Spezialisten mit in das Sampling einfließen zu lassen. Zusätzlich können bereits berechnete Designs im Sampling berücksichtigt werden, womit eine mehrmalige Berechnung identischer Designs ausgeschlossen wird. Eine effiziente Erzeugung eines großen Datensatzes wird erreicht, welcher den Einsatz von ML ermöglicht.

Die Ergebnisse eines 2D-Beispiels sind in Fig. 2 dargestellt. Hierbei werden exemplarisch für eine permanentmagneterregte Synchronmaschine der maximale AC-Strom I_{AC} sowie die aktive Länge l_{act} variiert. Als Erfahrungswissen wird mitberücksichtigt, dass die Drehzahl bei Maximalleistung $n(P_{max})$ kleiner als $5000 \frac{1}{min}$ betragen soll. Hierdurch bilden sich abhängig von der Ausgangsgröße $n(P_{max})$ gültige und ungültige Bereiche aus. Nach einem initialen Scannen des Suchraums kann der gültige Bereich vorhergesagt und dort gezielt weitere Designs platziert werden. Dies ist an der höheren Sampleddichte zu erkennen. Im Vergleich zu einem Optimized Latin Hypercube Design (OLHD) können hierdurch 40 Prozent mehr gültige Designs bei gleicher Anzahl an Berechnungen erzeugt werden.

Efficient Data Generation Process for Machine Learning Applications and Platform Optimization

In order to meet the increasing demand for electric vehicles, automotive suppliers are developing modular electric motor (EM) platforms. A suitable data set is required to search for optimal platforms and to be able to apply methods of machine learning (ML). An overall concept that includes a central database is shown in Fig. 1. This concept makes it possible to build up a continuously growing data set and to systematically expand it in order to support the design of EMs with a data-driven approach. The efficient sampling algorithm described in [1] opens the way to incorporate the empirical knowledge of the EM specialists into the sampling. In addition, existing designs can be reused, and no design is calculated more than once. This achieves an efficient generation of a large data set, which enable the use of ML.

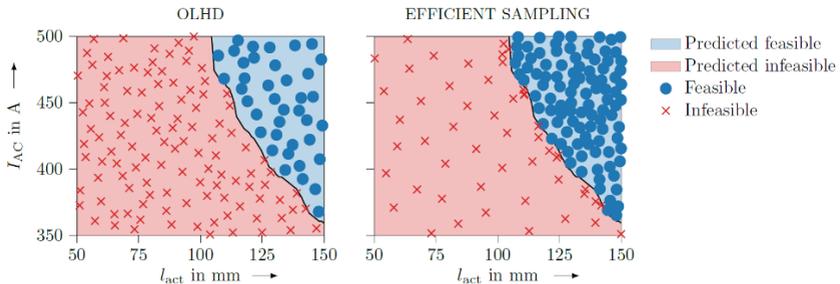


Fig. 2: Vergleich der Ergebnisse von Efficient Sampling und Optimized Latin Hypercube Design (OLHD) / Comparison of Efficient Sampling and OLHD results

The results of a 2D example are shown in Fig. 2. Here, the maximum AC current I_{AC} and the active length l_{act} are varied as an example for a permanent-magnet excited synchronous machine. Based on experience, it is also considered that the speed at maximum power $n(P_{max})$ should be less than 5000 rpm. As a result, feasible and infeasible areas are formed, depending on the output variable $n(P_{max})$. After an initial scan of the search space, the feasible area can be predicted, and further designs can be placed there. This can be seen from the higher sample density. Compared to Optimized Latin Hypercube Design (OLHD), this allows 40 percent more feasible designs to be generated with the same number of calculations.

[1] Heroth, M., Schmid, H., Hofmann, W.: Efficient Sampling Algorithm for Electric Machine Design Calculations incorporating Empirical Knowledge. In: 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 1089-1095, 2022

Elektrische und thermische Modellierung von Batterien

Bei Durchführung der elektrochemischen Impedanz-Spektroskopie (EIS) können die elektrischen Parameter des Batterie-Ersatzschaltbilds, welches aus einer Serienduktivität, einem Serienwiderstand und 2RCPE¹-Gliedern besteht, als Optimierungsproblem in MATLAB identifiziert werden. Fig.1 zeigt, wie sich die Parameter unter verschiedenen Betriebsbedingungen (Temperatur, Ladezustand) verhalten.

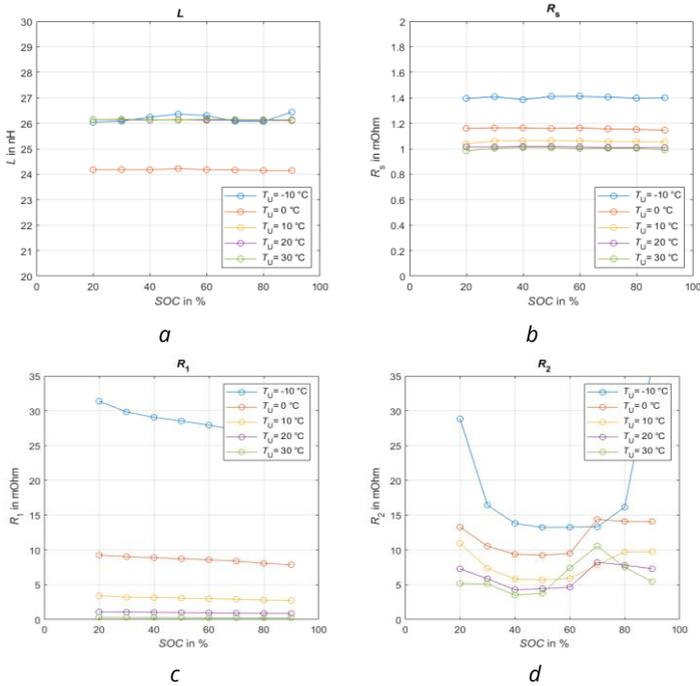


Fig.1: Parameter a- Induktivität, b- Serienwiderstand, c- R_1 , d- R_2 ;
Parameters a- Inductance, b-Series Resistance, c- R_1 , d- R_2

Die Induktivität ändert sich weder mit der Temperatur noch mit SOC und liegt im Nanobereich. Somit kann die Induktivität als konstant betrachtet werden mit $L = 25.75$ nH. Der Serienwiderstand zeigt keine Abhängigkeit vom SOC und erhöht sich mit sinkender Temperatur. Temperatur und SOC wirken sich auf R_1 und R_2 aus. Beide steigen mit sinkender Temperatur. Die Temperaturabhängigkeit der Wider-

¹ Constant Phase Element

stände kann mit einem exponentiellen Ansatz modelliert werden und die Abhängigkeit vom SOC der $R_{1,2}$ nach einem Polynom zweiten Grades. Damit werden aus Fig.1 die Koeffizienten a bis g von (1) und (2) bestimmt.

$$R_s(T_0) = ae^{-bT_0} + c \quad (1)$$

$$R_{1,2}(SoC, T_0) = (d_i + e_i SoC + f_i SoC^2)e^{-g_i T_0}, \quad i = \begin{cases} 1 & \text{für } R_1 \\ 2 & \text{für } R_2 \end{cases} \quad (2)$$

Thermisches Modell

Aus dem Fig. 1 wird ersichtlich, dass die Temperatur auf die elektrischen Parameter einen großen Einfluss hat. Dabei ist zu unterscheiden in Umgebungstemperatur T_U , Oberflächentemperatur T_0 und Kerntemperatur T_K . Diese Unterschiede können in einem thermischen 2-Körper-Modell nach Fig. 2 und gemäß Gl. (3) und (4) berücksichtigt werden.

Electrical and Thermal Model of Batteries

By implementing electrochemical impedance spectroscopy (EIS), the electrical parameters of the battery equivalent circuit, which consists of series inductance, series resistance and 2RCPE elements, can be identified as an optimization problem in MATLAB. Fig.1 shows how the parameters behave under different operating conditions (Temperature, State of charge). The inductance does vary neither with temperature nor with SOC and is in the nanoscale. Thus, the inductance can be considered as constant with $L = 25.75$ nH. The series resistance shows no dependency on SOC and increases with decreasing the temperature. Temperature and SOC have an effect on R_1 and R_2 . Both increase with decreasing temperature. The temperature dependency of the resistors can be modelled by an exponential approach and the dependency on SOC of $R_{1,2}$ by a second degree polynomial. Thus, the coefficients a to g for (1) and (2) are determined from Fig.1.

Thermal model

Fig. 1 shows that temperature has a major influence on the electrical parameters. A distinction must be made between ambient temperature T_U , surface temperature T_0 and core temperature T_K . These differences can be taken into account using a 2-body thermal model as shown in Fig. 2 and according to (3) and (4).

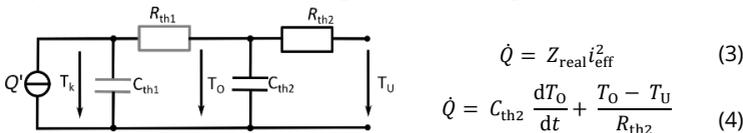


Fig. 2: Thermisches 2-Körper-Modell nach [1]; Thermal 2-body model according [1]

[1] J. P. Schmidt., Verfahren zur Charakterisierung und Modellierung von Lithium-Ionen Zellen, KIT Scientific Publishing, 2013.

Modellierung und Simulation von netzgekoppelten WEA Typs 4

Ziel dieser Forschung ist es, die Systemstabilität bei Netzstörungen zu analysieren und zu verbessern. Um die theoretische Analyse zu verifizieren, wurde eine Simulation des Netzes mit einem 15-MW-Windpark unter Verwendung von DigSILENT PowerFactory durchgeführt [2]. Zunächst werden die Wirk- und Blindleistungskurven, der Strom- und die Spannungsharmonische bei den verschiedenen Arten von Regelungsmodi im Detail analysiert. Darüber hinaus wird das Durchgangsverhalten des Windparks bei Unter- und Überspannung sowie die Blindleistungsfähigkeit dargestellt. Im Ergebnis der Analyse wird eine Kondensatorbank vorgeschlagen und durch Simulationsergebnisse für den netzgekoppelten Windpark validiert. Neben dem Normalbetrieb haben die Übertragungsnetzbetreiber in verschiedenen Ländern strenge Anforderungen an die Netzunterstützung von Windenergieanlagen (WEA) bei Netzfehlern gestellt. Bei einem Spannungsabfall im Netz muss die WEA Blindleistung bereitstellen, um zur Spannungswiederherstellung beizutragen [1]. WEA können nicht plötzlich und ohne Verzögerungszeit vom Netz getrennt werden, obwohl die Klemmenspannung der WEA Null ist. Wie in Fig. 1 dargestellt, zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass WEA Typs 4 den Generator effektiv vom Netz entkoppeln und ihr UVRT- und OVRT-Verhalten den Regeln des Netzkodex entsprechen.

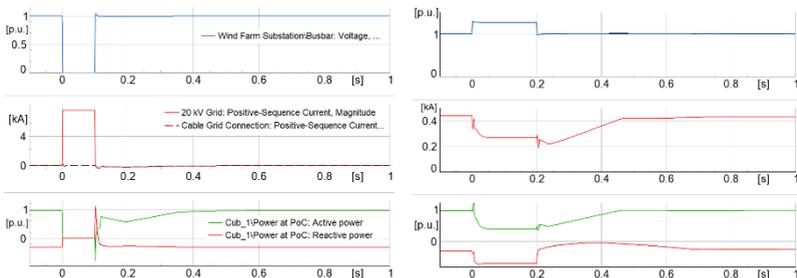


Fig.1: Spannungsdurchgangsverhalten des Windparks, links: bei Unterspannung (0% von U_n), rechts: bei Überspannung (130% von U_n), Voltage-Ride-Through behavior of wind farm, left: undervoltage (0%), right: overvoltage (130%)

Weiterhin wurden die Auswirkungen von zusätzlichen Blindleistungskompensationsanlagen auf die Leistungsfähigkeit von WEA untersucht. Aus den P-Q-Diagrammen des Windparks (Fig. 2) geht hervor, dass der Kondensator zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit beiträgt, wenn die Spannung am PCC 18,5 kV oder 21 kV beträgt.

Modeling and simulation of the grid-connected Type-4 WTGs

This research aims to analyze and improve system stability during grid disturbances. To verify the theoretical analysis, a simulation of the network including a 15 MW wind farm has been conducted by using DlgSILENT PowerFactory [2]. First, the real and reactive power curves, current, and voltage harmonics are analyzed in detail at the different types of control modes. Furthermore, the wind farm's under-voltage-ride-through (UVRT) and over-voltage-ride-through (OVRT) behaviors and reactive power capability are presented. Based on the analysis, the capacitor bank is proposed and validated by simulation results for the grid-connected wind farm. Besides the normal operation, trans-mission system operators in different countries have issued strict grid-supporting requirements for the WTs under grid faults. When the grid voltage sag is present, the WTs must provide reactive power to contribute to the voltage recovery [1].

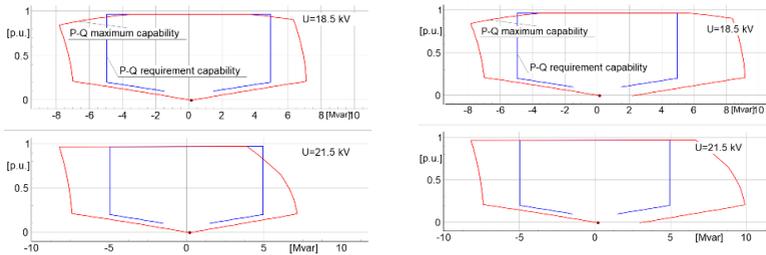


Fig.2: P-Q-Diagramm des Windparks, links: ohne C-Bank, rechts: mit C-Bank / P-Q diagram of wind farm, left: without C-Bank, right: with C-Bank

WTs cannot be disconnected from the grid suddenly without a delay time, although the terminal voltage of WT is zero. As described in Fig. 1 the investigation results show that Type-4 WTGs effectively decouple the generator from the grid and their UVRT and OVRT behaviors comply with the grid code rules. This research also investigated the effects of reactive power compensation devices on the power capability of WTs. It is seen from the WT P-Q characteristics (Fig. 2) when the voltage is 18.5 kV/21 kV at PCC, the capacitor improve capability.

[1] H. Berndt, M. Hermann, and others: "Network and system rules of the German transmission system operators 2007". In *TransmissionCode 2007*. VDN, Berlin, Germany, 2007.

[2] F. M. Gonzalez-Longatt: "Modelling and Simulation of Power Electronic Converter Dominated Power Systems in PowerFactory", *Springer Nature Switzerland AG*, 2021, ISBN 978-3-030-54124-8.

Aufbau eines Versuchsstands zur Untersuchung einer aktiv gedämpften Motorspindel

Für die Erprobung der im Jahresbericht 2020/2021 vorgestellten mehrphasigen lagerlosen Motorspindel ist im Versuchsfeld des Lehrstuhls für elektrische Maschinen und Antriebe ein entsprechender Versuchsstand aufgebaut worden.

Die Konstruktion des aufzubauenden Versuchsstands musste im Wesentlichen zwei sich häufig entgegenstehenden Ansprüchen gerecht werden, einerseits industrielle Anwendbarkeit durch minimale Änderungen an der Spindel selbst, andererseits umfassende Möglichkeiten zur Modularisierung des Versuchsaufbaus und der messtechnischen Erfassung von Versuchsergebnissen. Spindelseitig wurde dies auf mechanischer Ebene durch Verwendung eines industriell verfügbaren Produkts mit HSK-63C-Aufnahme realisiert, welches lediglich durch Maßnahmen zur Montage von Sensorik ergänzt wurde.

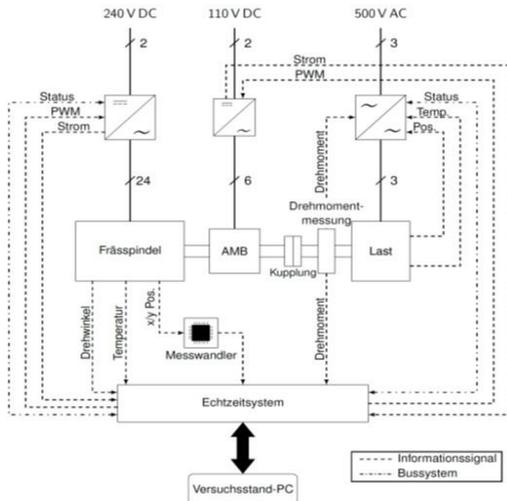


Fig. 1: Schematischer Versuchsaufbau / Schematic overview of the test bench

Für die Integration der weiteren benötigten mechanischen Elemente wurde ein axialer Aufbau gewählt. Dieser weist durch Verzicht auf Getriebeelemente die in dynamischer Hinsicht besten Eigenschaften auf. Der Gesamtaufbau des Versuchsstands ist in der Fig. 1 schematisch und in Fig. 2 in der Gesamtansicht dargestellt. Zentrale Steuereinheit ist der Versuchstands-PC in Verbindung mit einem Echtzeitsystem

der Firma dSPACE. Der Regeltakt beträgt 15 kHz, wobei die Ansteuerung der zwölf H-Brücken für die Versorgung der Motorspindel über den integrierten FPGA geschieht und Schaltfrequenzen bis zu 45 kHz möglich sind. Aufgrund von EMV-Problematiken musste die Zwischenkreisspannung reduziert werden, sodass aktuell ein Dämpfungsbetrieb bis 8000 min^{-1} realisierbar ist. Die Lastmaschine ermöglicht eine Belastung des Spindelmotors über sein gesamtes Kennfeld.

Construction of a test bench for an actively damped motor spindle

For the testing of the multiphase bearingless motor spindle presented in the annual report 2020/2021, a corresponding test bench was set up in the test field of the Chair of Electrical Machines and Drives. The design of the test bench essentially had to meet two frequently conflicting demands: on the one hand, industrial applicability through minimal changes to the spindle itself, and on the other hand, comprehensive options for modularizing the test setup and the recording of test results. On the spindle side, this was realized on the mechanical level by using an industrially available product, which was only supplemented by possibilities for mounting sensors.

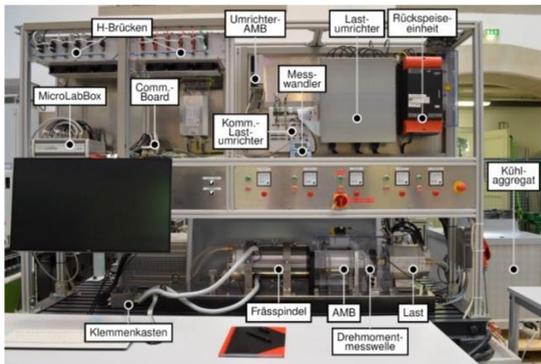


Fig. 2: Gesamtansicht des Versuchsaufbaus/Full view of the test bench

An axial design was chosen for the integration of the other required mechanical elements. This has the best dynamic properties as it does not have any gear elements. The overall design of the test bench is shown schematically in Fig. 1 and in full view in Fig. 2. The central control unit is the test bench PC in conjunction with a real-time system from dSPACE. The control cycle is 15 kHz, whereby the twelve H-bridges for the supply of the motor spindle are controlled via the integrated FPGA and switching frequencies of up to 45 kHz are possible. Due to EMC problems, the DC link voltage had to be reduced, so that active damping up to 8000 min^{-1} can currently be realized. The load machine enables the spindle motor to be loaded over the entire permissible characteristic diagram.

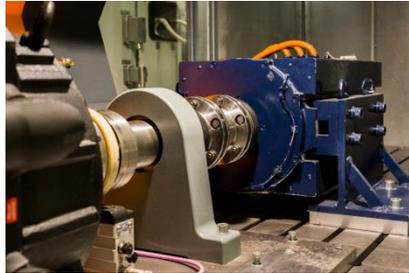
5 AUSSTATTUNG DES LEHRSTUHLS

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

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



Lichthof des Instituts



Prüfstand Maschinen und Antriebe



Schaltschrankbatterie zum Prüfstand

5.1 Prüfstand Elektrische Maschinen und Antriebe

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

die Bereitstellung einer variablen Zwischenkreisspannung für die Maschinenstromrichter auf der Prüflingsseite (10...800 VDC, ± 600 ADC). Damit ist die Anpassung an verschiedene Gleichspannungsebenen für EV/HEV-Antriebe und stationäre Industrieantriebe ausführbar. Zur Untersuchung neuer stromrichternaher Steuer- und Regelalgorithmen ist zusätzlich ein Experimentierstromrichter in Kombination mit einem universellen Mikrorechnersystem 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 überschwingungsbehafteten Strömen sowie Messflansche T12 (Fa. HBM) zur Drehzahl- und Drehmomentmessung. Die Messmittel besitzen die notwendige Messgenauigkeit, um auch im Teillastbereich auf der Grundlage von Differenzmessungen Aussagen zur Effizienz einer untersuchten Komponente zu treffen. Alle Vorgaben zur Messgenauigkeit bei der Bestimmung von Verlusten und Wirkungsgraden elektrischer Maschinen nach der Norm DIN EN 60034-2 werden eingehalten.

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

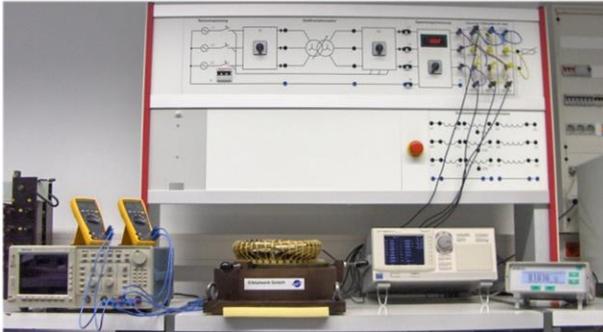
5.2 Weitere Versuchsstände für die Forschung

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



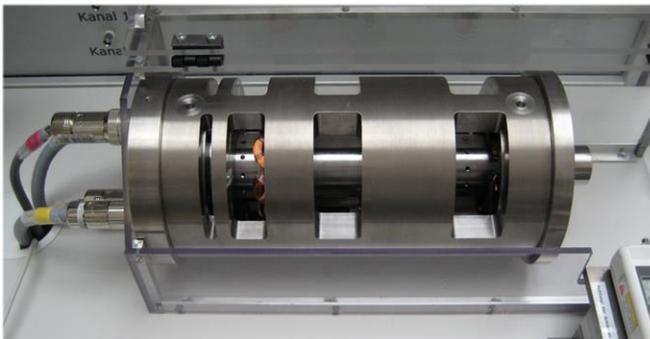
Netzmodell zur Untersuchung von Stromrichternetzrückwirkungen

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

5.3 Versuchsstände für die Lehre

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

Dr.-Ing. Nicol Hildebrand

Dipl.-Ing. Igor Danylyew

Dipl.-Ing. Stefan Engelmann

Dipl.-Ing. Dennis Guhl

M. Sc. Jens Jüttner

Dipl.-Ing. Tobias Knapp

Dipl.-Ing. Robin Linus Liebfried

M. Sc. Sören Miersch

Dipl.-Ing. Fabian Melkowski

M. Sc. Gulasalkhon Musinova

M. Sc. Azadeh Nooriansaravi

Dipl.-Ing. Simon Röschner

Dipl.-Ing. Ludwig Schlegel

Dipl.-Ing. Robert Seifert

Dipl.-Ing. Gino Sturm

M. Sc. Mingyi Wang

M. Sc. Shaohui Yuan

Fachpersonal

Dipl.-Ing. Axel Rusch

Doktoranden

Dipl.-Ing. Falk Bahr

M. Sc. Michael Heroth

M. Sc. Hrishikesh Joshi

M. Sc. Johann Pecho

Dipl.-Ing. Nico Remus

Studentische und Wissenschaftliche Hilfskräfte:

Clemens Wenzel, Florian Çollaku, Friedemut Weber, Christoph Scale,

Guasalkhon Musinova

7 ANSCHRIFT

Postanschrift:

Technische Universität Dresden
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Elektrotechnisches Institut
01062 Dresden

Sitz:

Helmholtzstr. 9
Görgesbau, Raum 206/207
01069 Dresden

Telefon, Fax, E-Mail:

Lehrstuhlinhaber: 0351-463-37634
wilfried.hofmann@tu-dresden.de

Sekretariat: 0351-463-33223
peggy.martin@tu-dresden.de

Fax: 0351-463-33655

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

8 IMPRESSUM

Anbieter:

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

Kontakt:

Telefon: 0351-463-33223
Telefax: 0351-463-33655
e-Mail: peggy.martin@tu-dresden.de

Verantwortlich:

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

9 LAGEPLAN

Lageplan des Campus (Südvorstadt)

Stand: 31. Juli 2011

