



**Institut für elektrische Antriebe,
Leistungselektronik und Bauelemente**

Jahrbuch 2017

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlik

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nando Kaminski

Univ.-Prof. i.R. Dr. phil. nat. Dieter Silber

**Das IALB ist eine Forschungseinrichtung im
Bremer Centrum für Mechatronik.**



Universität Bremen



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlik



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nando Kaminski



Univ.-Prof. i.R. Dr. phil. nat. Dieter Silber

Vorwort

Liebe Freunde und Kooperationspartner des IALB,

das Jahr 2017 war in starkem Maße durch die Weiterentwicklung der Forschungsaktivitäten zum Thema „Lebensdauer leistungselektronischer Systeme“ zu einem institutsübergreifenden Forschungsgebiet geprägt, das sowohl die leistungselektronischen Bauelemente als auch vollständige Frequenzumrichter-systeme umfasst. Dabei spielen die Anwendungen der Leistungselektronik in der Windenergie eine besondere Rolle. Besonders erfreulich ist, dass im Zuge dieser Arbeiten auch die enge Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Windenergiesystem IWES in Bremerhaven nachhaltig noch weiter intensiviert worden ist. Der Abschnitt „Forschungsberichte“ gibt einen Überblick über die Arbeitsgebiete des Instituts. Die große Breite der Aktivitäten, von elektrischen Maschinen über die Leistungselektronik bis hin zur angewandten Mikroelektronik und Leistungshalbleiterbauelementen, macht das IALB zu einem Magneten für alle Studierende der Elektrotechnik, die ihre Studien-, Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten in den innovativen Forschungsgebieten Antriebstechnik, Mechatronik, regenerativer Energietechnik oder Zuverlässigkeit von Leistungselektronik durchführen wollen. Erfreulich ist, dass das Drittmittelvolumen des Instituts im Verlauf des Jahres 2017 weiter gesteigert werden konnte. Die Einbettung des Instituts in das Bremer Centrum für Mechatronik (BCM) hat sich dabei als eine wichtige Größe erwiesen.

Unser langjähriger Lehrbeauftragter, Herr Prof. Dr.-Ing. Völker hat mit Ende des Wintersemesters 2016/2017 seine Lehrtätigkeit bei uns aufgrund zunehmender Arbeitsbelastungen in seinem Hauptamt an der Hochschule Bremen leider eingestellt. Die Veranstaltung „Berechnung elektrischer Maschinen“ konnte deshalb zunächst nicht weiter angeboten werden. Wir danken Herrn Prof. Völker für die langjährige Tätigkeit als Lehrbeauftragter ganz herzlich und wünschen ihm beruflich und persönlich alles Gute.

Mit Hilfe unseres weiteren Lehrbeauftragten, Herrn Prof. Dr.-Ing. Meinhardt, SMA Solar Technology AG, Niestetal, konnte das Fach „Photovoltaik“ auch im Jahr 2017 wieder angeboten werden. Auch Herrn Prof. Meinhardt danken wir für sein großes Engagement ganz herzlich. Insgesamt konnte das Institut auch im Laufe des Jahres 2017 vielfältige und interessante Lehrveranstaltungen anbieten. Ein Überblick dazu befindet sich im Abschnitt „Lehrveranstaltungen“ dieses Jahrbuchs. Die umfassenden Aktivitäten des Instituts in der Lehre und in der Forschung waren nur möglich durch das große Engagement aller Institutsmitarbeiter sowie aller im Rahmen von Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten oder als studentische Hilfskräfte tätigen Studierenden. Sie haben hoch motiviert und mit großem persönlichem Einsatz einen wesentlichen Beitrag zur Forschung und Lehre des Instituts geleistet. Wir danken allen für ihre Unterstützung und ihr Vertrauen.

Bremen im Mai 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "B. Orlik".

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlik

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "N. Kaminski".

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nando Kaminski

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "D. Silber".

Univ.-Prof. i.R. Dr. phil. nat. Dieter Silber

Inhaltsverzeichnis

Mitarbeiter des IALB im Jahr 2017.....	4
Forschungsberichte 2017.....	5
50 kW WEA-Gondelversuchsstand mit aerodynamischer Rotornachbildung.....	6
Analyse und Optimierung einer magnetischen Lageregelung für Satelliten	7
WEA-Kraftwerksregelung	8
Modellbildung und Regelung von Kettenkratzerförderern für Bergbauanwendungen	9
IALB-Mikrorechnerkarte	10
Mess- und Überwachungssystem für Frequenzumrichter in Windenergieanlagen.....	11
Regelung einer doppeltgespeisten Asynchronmaschine mit einem fiktiven Synchronmaschinenmodell.....	12
Regelung eines HGÜ-Verbundnetzes auf Basis eines fiktiven Maschinensatzes.....	13
Berechnung von Wirbelströmen auf Basis der Diffusionsgleichung.....	14
Intelligentes Transportsystem auf Basis innovativer Linearantriebe mit berührungsloser Energie- und Signalübertragung	15
Passive Komponenten für Anwendungen mit schnell schaltenden SiC-Halbleitern in der Leistungselektronik ...	16
Multidimensionale Belastungen der Hochleistungselektronik von Windenergieanlagen	17
Forscherguppe Hochleistungselektronik für Windenergieanlagen.....	18
Shunt-Strukturen auf Leiterplattenbasis	19
Untersuchung des Durchbruchverhaltens von Siliziumkarbid MOS Kapazitäten.....	20
Risikobewertung für GaN Bauelemente in Langzeitanwendungen.....	21
Degradation von Leistungshalbleitern unter Feuchteinfluss.....	22
Lehrveranstaltungen 2017.....	23
Lehrveranstaltungen des Instituts	24
Elektromagnetische Energiewandlung	24
Stromrichtertechnik	24
Elektrische Antriebstechnik	25
Praktikum Antriebstechnik	25
Mechatronik	25
Praktikum Schaltungstechnik in der Mechatronik.....	25
Werkstoffe der Elektrotechnik	26
Halbleiterbauelemente und Schaltungen	26
Bauelemente der Leistungselektronik.....	26
Qualitäts- und Verbesserungsmethoden.....	27
Praktikum Leistungselektronik.....	27
Grundlagen der Elektrischen Energietechnik	27
Grundlagenlabor der Elektrischen Energietechnik	27
Digitale Signalverarbeitung in der elektrischen Energietechnik	28
Netzdynamik und Netzschutz	28
Elektrische Energieanlagen.....	28
Praktikum Energietechnik.....	28
Windenergieanlagen I	29
Windenergieanlagen II.....	29
Photovoltaik	30
Berechnung elektrischer Maschinen.....	30
Technische Mechanik	31

Mitarbeiter des IALB im Jahr 2017



Institutsleitung
 Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlik
 Prof. Dr.-Ing. Nando Kaminski

Oberingenieure
 Dr.-Ing. Holger Groke
 Dipl.-Ing. Johannes Adler

Sekretariat		Technische Mitarbeiter		Forschungsgruppen		
E. Krüger H. Janssen C. Hiller	G. Schwerdtfeger F. Trocha B. Vahlenkamp	Elektrische Antriebe	Elektrische Maschinen	Leistungselektronik	Zuverlässigkeit	Leistungsbauemente
		J. Borecki M. Huchulski A. Ernst D. Matthies	S. Behrens M. Joost A. Norbach J. Ulbrich	T. Y. Hoa Dinh W. Holzke S. Menzel H. Sauerland	A. Brunko M. Hanf F. Hoffmann S. Rugen C. Zorn	M. Adelmund C. Bödeker A. Würfel

Forschungsberichte 2017

50 kW WEA-Gondelversuchsstand mit aerodynamischer Rotornachbildung

Zur Durchführung von praxisnaher Windenergie-Forschung wurde am IALB ein 50 kW WEA-Gondelversuchsstand mit einer aerodynamischen Echtzeit-Rotornachbildung entwickelt und aufgebaut. Ziel des Versuchsstandes ist es, das Verhalten einer realen Windenergieanlage in der Maschinenhalle möglichst genau nachzubilden. So können die Betriebsführung der Windenergieanlage, der zugehörige Umrichter und die mechanischen Komponenten der Gondel ohne aufwändige Freifeldversuche untersucht werden. Das Konzept des Prüfstandes ist in Abb. 1 dargestellt.

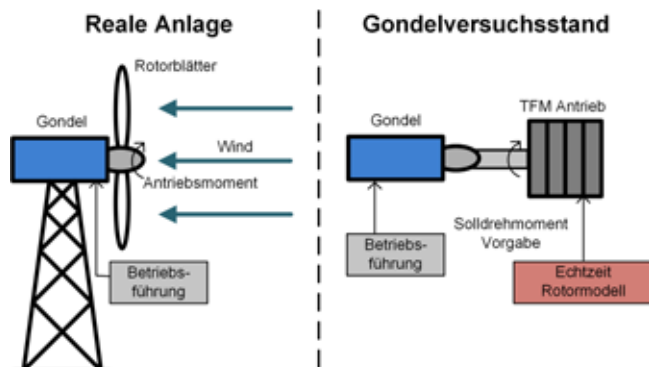


Abb. 1: Konzept des Gondelversuchsstands

Es wurde die komplette Gondel der 50 kW Windenergieanlage „Krogmann 15-50“ mit demontierten Rotorblättern in der Maschinenhalle des IALB errichtet. Das Antriebsmoment des Windes wird in der Maschinenhalle durch eine aerodynamische Rotornachbildung berechnet und mit einer Transversalflussmaschine bereitgestellt. Der fertig aufgebaute Prüfstand ist in Abb. 2 zu sehen.

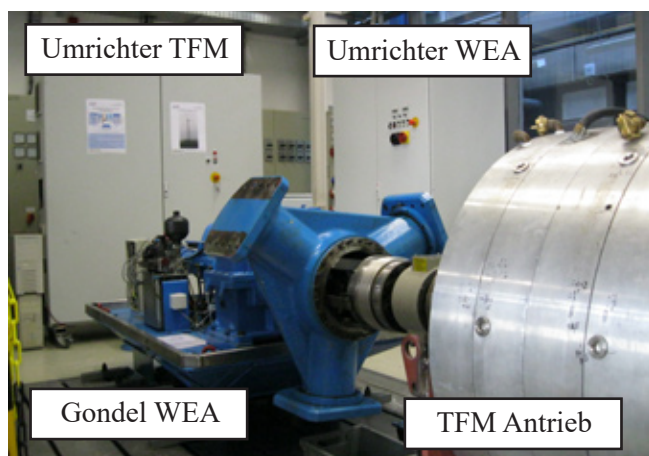


Abb. 2: Gondelversuchsstand mit Antrieb

Das Antriebsmoment einer Windenergieanlage hängt von verschiedenen Parametern ab. Diese sind die aktuelle Windgeschwindigkeit, die Querschnittsfläche des Rotors, die aktuellen Drehzahl des Rotors, das Profil der Rotorblätter und der Pitchwinkel. Der Zusammenhang ist im Blockschaltbild in Abb. 3 dargestellt.

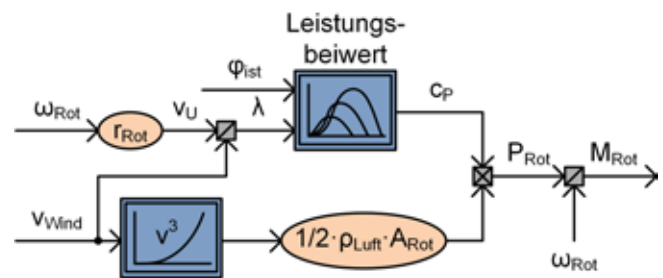


Abb. 3: Antriebsmoment einer WEA

Da in der Maschinenhalle kein Wind vorhanden ist und auch die Rotorblätter nicht aufgebaut werden können, wird das Antriebsmoment mit Hilfe einer Transversalfluss-Maschine (TFM) bereitgestellt. Dieser Maschinentyp eignet sich ideal für den Gondelversuchsstand, da er hohe Antriebsmomente bei vergleichsweise geringen Drehzahlen (die Drehzahl einer Windenergieanlage liegt unter 60 U/min) ermöglicht. Das Soll-Antriebsmoment wird dazu über eine aerodynamische Echtzeit-Rotornachbildung berechnet. Aus den Betriebsdaten der Windenergieanlage wird zunächst entsprechend Abb. 3 das Antriebsmoment des Windes berechnet. Für den Gondelversuchsstand ist dabei wichtig, dass die Dynamik der gesamten Anlage und das elektrische Moment am Generator identisch sind mit denen auf der realen Anlage. Aufgrund der unterschiedlichen Trägheitsmomente der Anlagen würde eine direkte Verwendung des Antriebsmomentes des Windes als Sollwertvorgabe für die TFM jedoch zu einer vollkommen anderen Dynamik auf dem Gondelversuchsstand führen. Um dies zu korrigieren, werden die unterschiedlichen Trägheitsmomente der realen Anlage und der Anlage auf dem Gondelversuchsstand so wie das elektrische Moment des Generators in der Echtzeit-Rotornachbildung berücksichtigt. Bei identischem generatorischem Moment muss die identische Kreisbeschleunigung des Rotors auf beiden Anlagen resultieren:

$$\alpha_B = \frac{m_{wind} - m_{gen}}{J_{realeWEA}} = \frac{m_{TFM} - m_{gen}}{J_{versuchsstand}}$$

Im vergangenen Jahr wurde der Gondelversuchsstand in Betrieb genommen. Dazu wurde eine Drehzahl- und Momenten-Regelung für die Antriebsmaschine implementiert und erprobt. Mit der Inbetriebnahme dieses Prüfstandes sichert sich das IALB einen führenden Platz in der realitätsnahen Windenergieforschung.



Europäische Union
„Investition in Ihre Zukunft“
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung



Die Förderbank
für Bremen und Bremerhaven
Wir finanzieren Zukunft

Analyse und Optimierung einer magnetischen Lageregelung für Satelliten

Zur Stabilisierung von Satelliten werden Drall- und Reaktionsräder eingesetzt. Diese bestehen aus einer gelagerten Schwungmasse, die durch einen integrierten Motor in Rotation versetzt wird. Stand der Technik ist dabei die Verwendung von Kugellagern. In diesen werden in der Regel Schmiermittel (z. B.: synthetische Öle) verwendet, die die Reibung reduzieren und die Verlustwärme abführen. Dabei treten zwei große Probleme auf. Einerseits sind die Lagerkräfte nicht konstant und auch nicht exakt beschreibbar. Dieser Effekt ist besonders bei sehr kleinen Drehzahlen der Schwungmasse problematisch, da hier Gleit- und Haftreibungseinflüsse auftreten, die den Rotor in ungewollte Schwingungen versetzen. Andererseits wird die Anwendung des Lagers durch den Temperaturbereich des Schmiermittels beschränkt.

Zur Verbesserung der Systemeigenschaften wurde am IALB in einem Kooperationsprojekt mit dem ZARM und der ZARM Technik AG eine magnetische Lagerung für Radsysteme entwickelt und als Teildemonstrator aufgebaut. Das magnetische Lager ist radialsymmetrisch aufgebaut und besteht aus einem Permanent-Ringmagneten und einer ringförmigen Flussführung im Rotor (oben). Der Stator bildet den magnetischen Rückschluss (unten) und besitzt vier Lagerspulen zur Krafterzeugung. Der Teildemonstrator ist in Abb. 1 zu sehen.

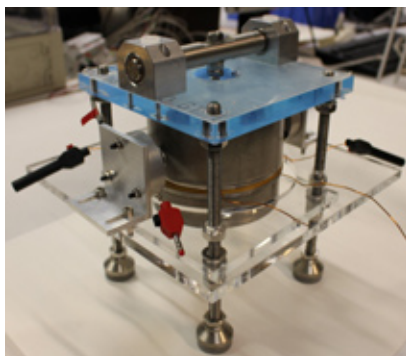


Abb. 1: Demonstrator magnetisches Lager

Der große Vorteil der magnetischen Lagerung liegt in der vollständigen Berührungslosigkeit, weshalb weder Haft- noch Gleitreibungseinflüsse auftreten. Mit Hilfe von Simulink-Simulationen wurde das Systemverhalten des Lagers, des gesamten Radsystems und der Regelung betrachtet und analysiert. Aufgrund der frei beweglichen Schwungmasse im Radsystem treten bei einer Rotationsbewegung gyroskopische Effekte (Kreisel-Effekte) auf, die mit Hilfe einer aktiven Regelung kompensiert werden müssen.

Zusätzlich wurde durch 3D FEM Simulationen das Design des Teildemonstrators genauer untersucht und optimiert. Der Fokus lag dabei auf der, mit dem Lager erzeugbaren, Lagerkraft (Lorentzkraft). Diese ist direkt abhängig von dem verwendeten Lagerstrom und der magnetischen Flussdichte im Bereich der Lagerspule. Für die Lorentzkraft gilt:

$$\vec{F}_L = N \cdot I \cdot (\vec{l} \times \vec{B})$$

Für die magnetische Flussdichte im Bereich der Lagerspulen sind der Arbeitspunkt des Permanentmagneten und der auftretende Streufluss von entscheidender Bedeutung. Um diese Faktoren genauer zu untersuchen, wurde ein 3D Modell des Lagers in der Simulationssoftware Flux erstellt und mit FEM Simulationen verifiziert. Das Modell des Lagers ist in Abb. 2 zu sehen.

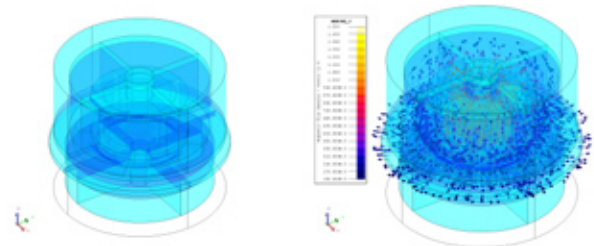


Abb. 2: 3D Modell des Lagers

Ausgehend vom Modell des Teildemonstrators wurde eine iterative Optimierung des magnetischen Designs des Lagers durchgeführt. Ziel dabei war eine möglichst hohe Lagerkraft bei vergleichbarem Lagerstrom.

Dazu wurden die Flussführung im Bereich der Lagerspulen, die Radien des magnetischen Kreises, der Permanentmagnet und die Lagerspulen in aufeinander aufbauenden Schritten variiert. Das wesentliche Ziel dabei war die Reduzierung von Streuflüssen. Alle Iterationsschritte wurden mit zwei verschiedenen Windungszahlen der Lagerspulen untersucht. Dabei wurde ein alternatives Verfahren zur Herstellung der Lagerspulen zu Grunde gelegt, welches den Füllfaktor der Spulen vergrößert.

Abbildung 3 zeigt die Verläufe der Lagerkraft für alle Iterationsschritte.

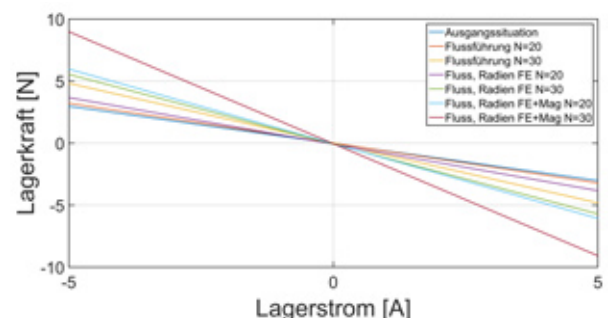


Abb. 3: Lagerkräfte der einzelnen Iterationen

Die Simulationsergebnisse bestätigen die Verbesserung der Lagerkraft mit jedem Iterationsschritt. Es wurden weitere Optimierungsmöglichkeiten herausgearbeitet, die in einem weiteren Projekt evaluiert werden sollen.

WEA-Kraftwerksregelung

Bisherige Windenergieanlagen passen sich nicht dem variierenden Leistungsbedarf der Verbraucher an, sondern speisen ausschließlich eine windabhängige Leistung in das Netz ein. Konventionelle Kraftwerke sorgen dann für eine ausgeglichene Bilanz aus erzeugter und verbrauchter Leistung.

Um die Netzstabilität auch bei einem hohen Anteil an Windenergieanlagen zu gewährleisten, wird am IALB ein neues Regelungskonzept erforscht. Die Funktionsweise konventioneller Dampfkraftwerke dient dabei als Grundlage (Abb. 1).

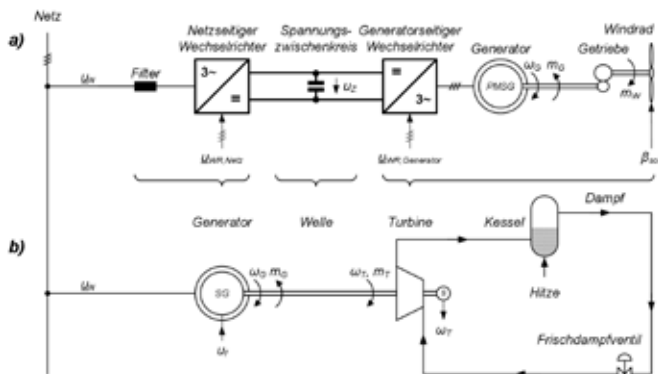


Abb. 1: Analogie zwischen Windenergieanlage (a) und Dampfkraftwerk (b)

Analog zu Abbildung 1 wird dem netzseitigen Umrichter das Verhalten eines direkt an das Netz angeschlossenen Synchrongenerators aufgeprägt. Dadurch ist es der Anlage möglich, dynamisch auf Laständerungen zu reagieren. Die sofortige Versorgung der Verbraucher bei einer Laständerung erfolgt durch Abbremsen der rotierenden Massen (Momentanreserve).

Weiterhin kann eine Primärreserve bereitgestellt werden. Die bisher in Kraftwerken eingesetzte Statikregelung (Drehzahl-/Leistungsregelung) wird übernommen und wirkt über das fiktive Antriebsdrehmoment m_a auf den Generator (Abb. 2).

In äquivalenter Struktur wird anhand der fiktiven Erregerspannung die Blindleistung bereitgestellt.

Die über den fiktiven Synchrongenerator festgelegte einzuspeisende Leistung muss ebenfalls durch den realen Generator der WEA erzeugt werden.

Weiterhin muss die zu- und abgeführte Leistung des Zwischenkreises im Mittel gleich sein, wobei die Zwi-

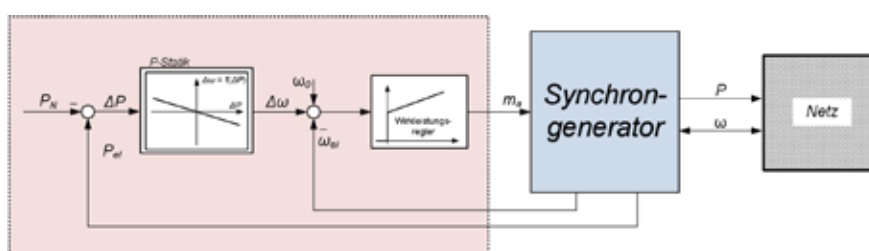


Abb. 2: Regelung der Wirkleistung über eine Statik

schlenkreisspannung bei dynamischen Leistungsänderungen ausreichend schnell nachgestellt werden muss. Einstellbar ist die Leistung, die dem Wind entnommen wird, über den Pitchwinkel der Rotorblätter, wobei die maximale Leistung von der aktuellen Windgeschwindigkeit abhängt.

Da sich die in das Netz einzuspeisende Leistung ständig ändert, muss eine Kombination aus Abbremsen des Windrotors und Verstellen des Pitchwinkels erfolgen, sodass immer ausreichend Leistung im Zwischenkreis zur Verfügung steht.

Das Abbremsen des Windrotors wird durch eine Verringerung des Pitchwinkels und damit einer Zunahme des aerodynamischen Drehmoments abgefangen.

Für die Berechnung der aktuellen und der noch zur Verfügung stehenden Reserveleistung ist die Messung der Windgeschwindigkeit allerdings erforderlich.

Zusätzlich ist eine genaue Kenntnis des Windrotors nötig, um Kurven des Leistungsbeiwerts (Abb. 3) abhängig von Drehzahl und der Windgeschwindigkeit zu berechnen.

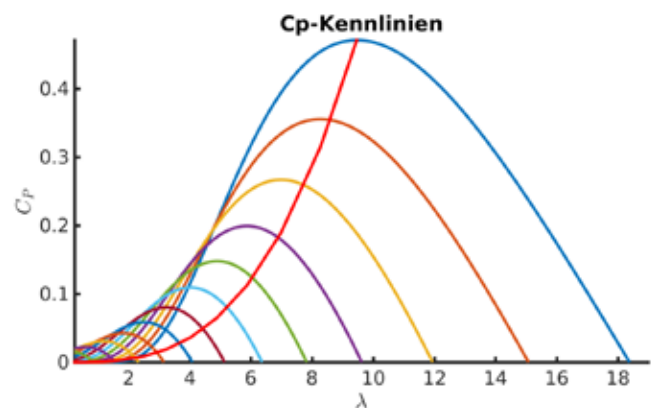


Abb. 3: Leistungsbeiwertkennlinien mit Nenndrehzahlkurve

Die Leistungsbeiwertkurven dienen als Basis zur Berechnung von Drehmomenten, sodass diese auch in einem Rotormodell verwendet werden können.

Weitere Überlegungen bestehen darin, die gewählten Reglerparameter, sowie insbesondere die Eigenschaften des fiktiven Synchrongenerators, während des Betriebs nachzustellen, um das System auf die aktuelle Windgeschwindigkeit anzupassen und optimieren zu können.

Im Gegensatz zu Dampfkraftwerken ist aufgrund unvorhersehbarer dynamischer Änderungen der Windgeschwindigkeit nicht garantiert, dass immer eine Bereitstellung der angeforderten Reserveleistung oder auch eine weitere Einspeisung der aktuellen Leistung möglich ist. Daher ist eine übergeordnete Leistungsbegrenzung erforderlich.

Modellbildung und Regelung von Kettenkratzerförderern für Bergbauanwendungen

Im Bergbau werden tief unter der Erde Rohstoffe aus großer Tiefe an die Erdoberfläche gefördert. Aber auch Untertage ist oft ein Transport über kilometerlange Strecken notwendig. Der Abbau und Transport von Steinkohle, Erz und Salz erfolgt heute ausschließlich mit mechatronischen Systemen. Aufgrund der hohen Feuchtigkeit, schwankender Temperaturen und mehr oder weniger vielen Gutbrocken, die beim Abbauprozess auf die Transportanlagen fallen, herrscht ein raues Klima.

Das gesamte Abbausystem besteht aus verschiedenen Abbau- und Transporteinheiten, wie z. B. Walzenladern, Kettenkratzerförderern und Transportbändern, die über Frequenzumrichter geregelte elektrische Antriebe in Kombination mit Getrieben bewegt werden. Aufgrund der Komplexität der Regelung, infolge der anwendungstechnischen Anforderungen, wird in einem aktuellen Forschungsprojekt insbesondere der Kettenkratzerförderer betrachtet.

Die Kohle wird mit einem Hobel aus dem Flöz abgetragen und fällt auf den Kettenkratzerförderer. Abb. 1 zeigt den prinzipiellen Vorgang. Aufgrund der inhomogenen Verteilung des abzubauenen Materials können beim Abbau unterschiedlich große Gutbrocken entstehen. Die ungleichmäßige Beladung des Kettenkratzerförderers mit diesen Gutbrocken führt zu unregelmäßigen bzw. ruckartigen Belastungen und zu einem erhöhten Verschleiß oder im Extremfall zur Zerstörung der Transportkette. Die lange Förderkette wird unter diesen Wechsellasten entsprechend gestaucht oder gedehnt. Das bedeutet zum einen eine starke mechanische Beanspruchung der Kette, zum anderen führt dies zu hohen Stromspitzen im Antrieb und Frequenzumrichter. Dies sowohl beim Aufbringen des Stromes, um unter Last zu beschleunigen, als auch beim Abfangen des Stromes

bei stoßartigen Bremsvorgängen oder bei kompletter Blockade. Die bisher eingesetzten Lastausgleichsregelungen zum Betrieb des Kettenkratzerförderers basieren auf stark vereinfachten dynamischen Modellen und ist nicht speziell für eine Belastungsreduzierung ausgelegt.

Daher soll die Möglichkeit zur regelungstechnischen Minimierung von Stoßbelastungen untersucht werden. Wesentliche Voraussetzung dafür und vorrangiges Projektziel ist eine detaillierte Modellbildung zur Simulation des gesamten Fördersystems, bestehend aus den Abbau- und Transporteinheiten, sowie des Antriebssystems, bestehend aus Motoren und Frequenzumrichtern. Basierend auf diesen Simulationen soll dann eine belastungsminimierende Regelung ausgelegt werden. Dabei soll auch ermittelt werden, welche Anforderungen dazu an die Stelleinrichtungen, insbesondere an die Frequenzumrichter zu stellen sind. Anschließend soll die neu entworfene Regelung in einem bergbauspezifischen Umrücker implementiert und in Betrieb genommen werden. Durch den Aufbau eines lastnachbildenden Prüfstandes werden die simulatorisch ermittelten Ergebnisse in die Praxis überführt und überprüft. Durch die Softwareoptimierten Frequenzumrichter sollen sowohl die Synchronisation der Einzelantriebe des Kettenkratzerförderers verbessert, als auch die auftretenden mechanischen Belastungen auf regelungstechnischem Wege vermindert werden.

GEFÖRDERT VOM

Förderkennzeichen:
02P16K531

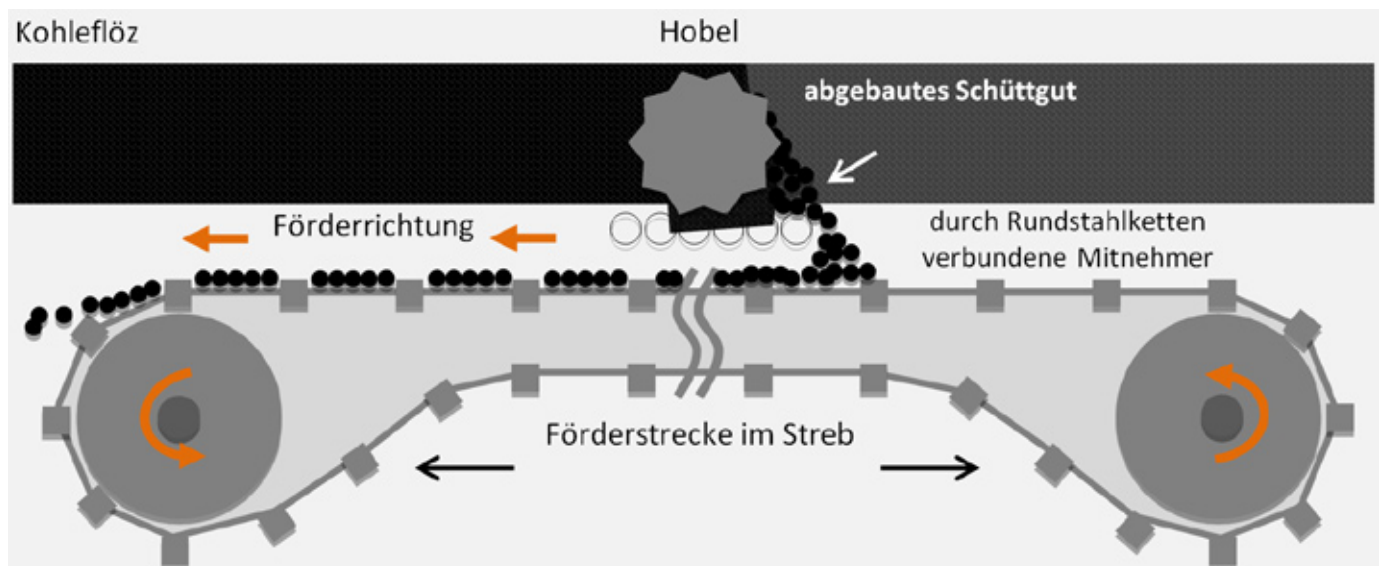


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Kettenkratzförderers und Hobels

IALB-Mikrorechnerkarte

Ein Schwerpunkt am IALB ist die Steuerung und Regelung von Frequenzumrichtern (FU) und elektrischen Maschinen. Eine wichtige Einheit in diesen Systemen ist eine digitale Rechnerkarte mit digitalem Signalprozessor (DSP) und entsprechender Peripherie. Da am IALB eine Vielzahl verschiedener Forschungsprojekte durchgeführt werden, haben nicht alle Prüfstände die gleichen Anforderungen an die Mikroelektronik. Die IALB-Mikrorechnerkarte fasst die von allen Prüfständen benötigten Eigenschaften zusammen. Prüfstandspezifische Anpassungen oder die Adaptierung an Leistungsteile von Frequenzumrichtern können über eine Adapterkarte realisiert werden. Neben dem Einsatz in mehreren Prüfständen am IALB arbeitet die Mikrorechnerkarte in einem Messsystem seit über einem Jahr (24/7) durchgängig und zuverlässig. Die Rechnerkarte wird, wie in Abb. 1 gezeigt, von der Erstellung des Schaltplanes, über das Layout bis hin zur Inbetriebnahme am IALB erstellt.

Auf dem DSP können Algorithmen für die Regelung von elektrischen Antrieben oder zur Signalverarbeitung und Auswertung von Messdaten implementiert werden. Für die Erfassung von Messdaten werden Drehgeber und Analog/Digital-Wandler (A/D-Wandler) eingesetzt.

Grundlage bei der Entwicklung neuer Regelungen ist die rechnergestützte Simulation des dynamischen Systems. Wurde ein Regelalgorithmus in der Simulation erfolgreich getestet und danach auf dem DSP implementiert, kann dieser mit dem bereits erstellten Streckenmodell getestet werden (Abb. 1). Der DSP liest dazu „Messdaten“ nicht über A/D-Wandler ein, sondern erhält diese aus dem Simulationsmodell. Die Ausgabe der Stellgrößen erfolgt wiederum an den Simulationsrechner und nicht an ein reales Stellglied. Um konsistente Simulationsdaten zu erhalten, wird auf beiden Systemen mit der gleichen festen zeitlichen Schrittweite gerechnet. Sobald der Simulationsrechner oder DSP Daten gesendet haben, wird jeweils auf das Eintreffen neuer Daten von dem anderen Rechnersystem gewartet. Mögliche Fehler in der Implementierung können so ohne Schäden an einem realen System gefunden werden.

Beim Einsatz der Mikrorechnerkarte in einem Frequenzumrichter kann eine Anbindung an einen Industrie-PC (IPC) über einen echtzeitfähigen In-

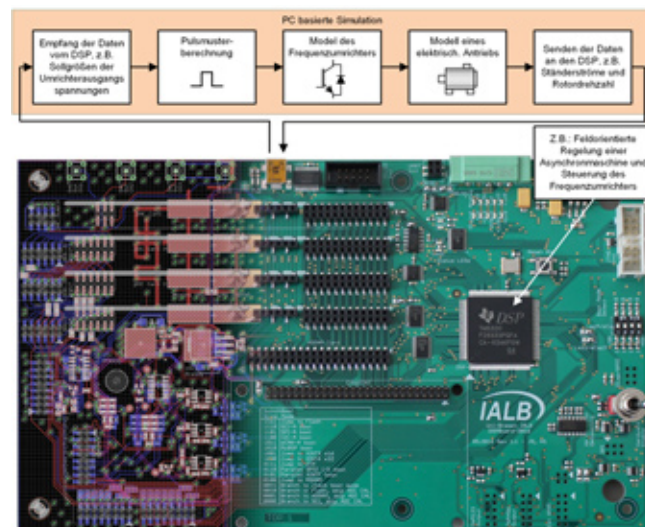


Abb. 1: Mikrorechnerkarte und prinzipieller Ablauf der Prozessor-In-The-Loop Simulation

dustriefeldbus, mit speziellen EtherCAT-Netzwerkkarten, erfolgen. Durch den EtherCAT-Feldbus ist das gesamte System leicht erweiterbar, d.h. weitere Mikrorechnerkarten können über den EtherCAT-Feldbus mit einem Industrie-PC verbunden werden. Eine Synchronisierung der Mikrorechnerkarten ist über sogenannte „verteilte Uhren“ („distributed clocks“) in den verwendeten EtherCAT-Netzwerkkarten möglich. Das IALB ist Mitglied der „EtherCAT Technologie Group“ (ETG) und hat die Möglichkeit, den Spezifikationen entsprechende EtherCAT-Geräte zu entwickeln und testen zu lassen.

Zusammenfassend hat die Rechnerkarte die folgenden Eigenschaften:

- Ansteuerung von 2- und 3-Level Umrichtern
- bis zu 18 A/D-Kanäle (16-Bit, simultane Abtastung, Anti-Aliasing-Filter)
- bis zu 16 A/D-Kanäle (12-Bit)
- Sin/Cos-Drehgeber Auswertung
- 4 D/A-Kanäle
- zwei serielle Schnittstellen (RS232, USB, SPI oder CAN-Bus)
- Anbindung eines FPGA über schnelles paralleles Interface
- 256 kB statisches RAM
- Status LEDs
- Erweiterung über I2C-Bus
- EtherCAT-Feldbus
- JTAG-Interface für die Programmierung
- speziell abgestimmte Spannungsversorgung

Mess- und Überwachungssystem für Frequenzumrichter in Windenergieanlagen

Für die Überwachung der Netzqualität und deren Auswirkungen auf angeschlossene Windenergieanlagen (WEA) ist eine kontinuierliche Überwachung am Netzanschlusspunkt zum Versorgungsnetz notwendig. Neben der Aufzeichnung von Spannungen und Strömen am Netzanschlusspunkt, können mit dem am IALB aufgebauten System ebenfalls Temperaturen und Feuchte in einem Frequenzumrichter aufgezeichnet werden.

Abb. 1 zeigt den schematischen Aufbau des Systems: Die Spannungen oder Ströme werden mit Wandlern auf eine für den A/D-Wandler geeignete Spannung gewandelt und mit bis zu 50 KHz abgetastet.

Die Verarbeitung der digitalen Werte wird mit dem digitalen Signalprozessor (DSP) TMS320F28335 der Firma Texas Instruments durchgeführt. Zur Speicherung der Messdaten werden die Daten über einen Feldbus zu einem Industrie-PC übertragen. Die vom Industrie-PC empfangenen Daten werden mit Zeitstempel abgelegt. Der Industrie-PC wird mit dem Betriebssystem

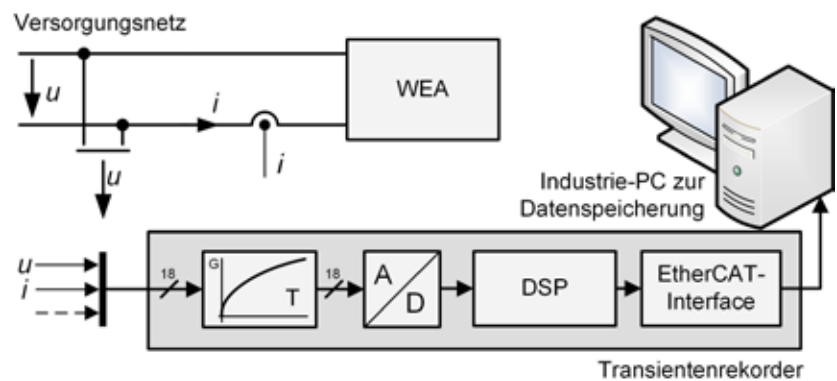


Abb. 1: Schematischer Aufbau

GNU/Linux und der Erweiterung RTAI für Echtzeitaufgaben betrieben.

Als Feldbus wird der EtherCAT-Feldbus eingesetzt. Der EtherCAT-Feldbus basiert auf dem Ethernet-Standard und ermöglicht durch spezielle EtherCAT-Netzwerkarten eine echtzeitfähige Kommunikation. Abbildung 2 zeigt die in einem Schaltschrank integrierten Komponenten für das Messsystem: Im oberen Bereich ist der IPC eingebaut. In der Mitte ist das Mikrorechnerboard mit EtherCAT-Feldbusschnittstelle sowie der Messverstärker und die dafür notwendigen Netzteile zu sehen. Im unteren Bereich befinden sich Steckdosen zum Anschluss des IPC, weitere Sensoren sowie die Versorgung der Netzteile. Eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) ermöglicht eine fortlaufende Datenaufzeichnung auch bei Netzausfällen.

Zur Aufzeichnung von Transienten wurde das Messsystem um weitere A/D-Wandler mit einer höheren Abtastrate erweitert. Die Messdaten können fortlaufend über eine in einem FPGA integrierte Logik ausgelesen und in einem Ringspeicher abgelegt werden. Nach Eintreten eines vorher definierten Ereignisses wird die Aufzeichnung gestoppt und die Messdaten können übertragen werden.

Das Messsystem soll zu einem Überwachungssystem zur Berechnung der Restlebensdauer von Leistungshalbleitern erweitert werden. Die Abschätzung der Restlebensdauer erfolgt modellbasiert. Die Implementierung der Modelle ist Gegenstand aktueller Arbeiten.



Abb. 2: Messsystem zur Aufzeichnung in einer WEA

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Förderkennzeichen:
0325758A-D

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Regelung einer doppeltgespeisten Asynchronmaschine mit einem fiktiven Synchronmaschinenmodell

Doppeltgespeiste Asynchronmaschinen werden bereits seit vielen Jahren wegen vieler Vorteile verwendet. Dazu zählt, dass nur ein Umrichter im Rotorkreis für die Schlupfleistung ausgelegt werden muss, der drehzahlvariable Betrieb oder die geringen Verluste im Vergleich zur Lösung mit Vollumrichter. Bei einer konventionellen feldorientierten Regelung ist die Ständerflussverkettung die Bezugsgröße. Die Stromregler verhindern die Ausbreitung transientser Dämpferströme in der Rotorwicklung. Daraus resultiert ein schwach gedämpftes System mit einer Resonanzfrequenz nahe der Netzfrequenz. In Abb. 1 ist das Pol- und Nullstellen-Diagramm dargestellt. Auf diesem Diagramm kann man erkennen, dass die Nullstellen in der Nähe von 50 Hz liegen.

Bei der überwiegenden Zahl der Anwendungen kann dies zu einer Verschlechterung der Stabilität des Netzes führen.

Da die Energiewende zunehmend voranschreitet, ist es wichtig, dass doppeltgespeiste Asynchrongeneratoren die Stabilität des Netzes positiv beeinflussen.

Der Unterschied zwischen der Asynchron- und Synchronmaschine liegt im Rotorkreis. Die Synchronmaschine hat zusätzliche Dämpferkreise in der d- und q-Achse. In Abb. 1 sieht man Stator- und Rotorwicklungen von beiden Maschinen.

Während Netzstörungen wirken Maschinen ohne Dämpferwicklungen in der d- und q-Achse nur schwach

netzstabilisierend. Das Ziel ist, das Verhalten eines Synchrongenerators auf einen Asynchrongenerator zu übertragen.

Zu diesem Zweck wird eine neue Regelung entwickelt, die in Abb. 3 gezeigt ist.

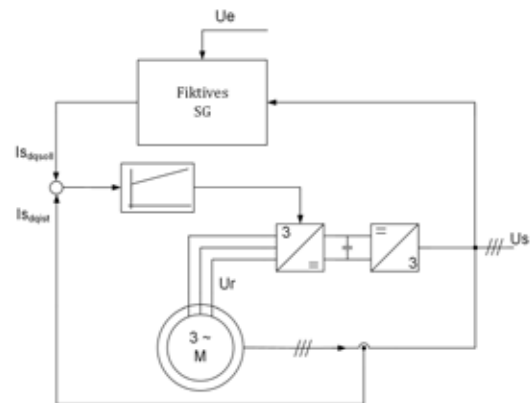


Abb. 3: DASG Regelkonzept mit fiktivem Synchron-generator

Wie bei konventionellen Regelungen von Drehfeldmaschinen werden die Wechselgrößen bei dieser Regelung auch in d- und q-Koordinaten transformiert. Die beiden Statorströme der doppeltgespeisten Asynchronmaschine und der fiktiven Synchronmaschine müssen in diesem Fall in dasselbe Bezugssystem transformiert werden. Die d- und q-Ströme der fiktiven Synchronmaschine werden als Sollwerte benutzt, wobei die Ströme des DASG die Regelgrößen sind.

Die Synchronmaschine ist in dieser Struktur nur ein fiktives Modell und daher können die Parameter der Maschine beliebig eingestellt werden, um die gewünschte Dynamik zu erreichen.

In dieser Regelung wird das Verhalten der Synchronmaschine auf den DASG übertragen, indem Einfluss auf seine Rotorspannungen genommen wird.

Ein großer Vorteil ist, dass die Methode softwarebasiert ist und keine Zusatzinvestitionen in die Anlagentechnik erfordert.

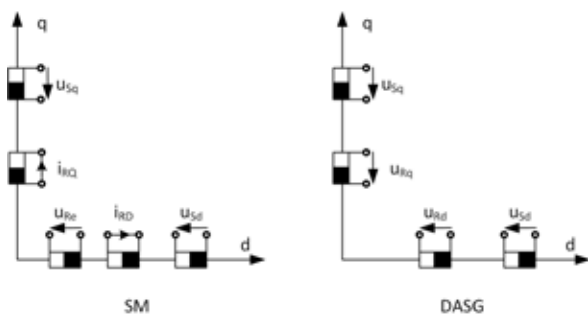


Abb. 1: Ersatzschaltbild von SM und DASG

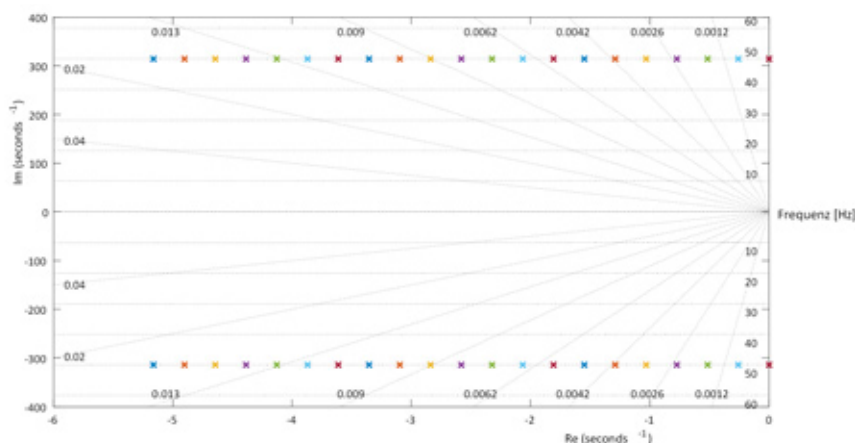


Abb. 2: Pol- und Nullstellen der doppeltgespeisten Asynchronmaschine

Regelung eines HGÜ-Verbundnetzes auf Basis eines fiktiven Maschinensatzes

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde am IALB ein Regelungskonzept für ein Hochspannungsgleichstromübertragungsnetz (HGÜ-Netz) untersucht. Innerhalb dieses Netzes sollen mehrere selbstgeführte IGBT-Stromrichter von unabhängigen Drehstromnetzen bzw. Drehstromquellen gespeist und auf der Gleichspannungsebene parallel geschaltet werden. Über dieses HGÜ-Netz soll ein dynamischer Austausch von Leistungen und Leistungsreserven zwischen den einzelnen Drehstromnetzen stattfinden. Die Regelung der Stromrichter basiert auf einem fiktiven Maschinensatz, welcher aus einer elektrisch erregten Synchronmaschine gekoppelt mit einer fremderregten Gleichstrommaschine besteht. Die jeweiligen Klemmenspannungen und Strangströme entsprechen somit den Eingangsgrößen des fiktiven Maschinensatzes. Ausgehend von vorangegangenen Simulationen eines Stromrichters bei stationären und dynamischen Lastflüssen wurde nun ein Simulationsmodell bestehend aus drei Stromrichtern im Parallelbetrieb aufgebaut und untersucht.

In Abb. 1 ist der prinzipielle Aufbau des Simulationsmodells bestehend aus drei Stromrichtern mit maschinensatzbasierter Regelung dargestellt. Die Kopplung der Stromrichter auf der Gleichstromseite erfolgt unter Berücksichtigung von Verbindungsleitungen zwischen den Stromrichtern, welche vereinfacht durch die Reihenschaltung eines Leitungswiderstands und einer Leitungsinduktivität nachgebildet werden. Die entsprechenden Kabelparameter wurden aus typischen Werten von HGÜ-Seekabeln berechnet.

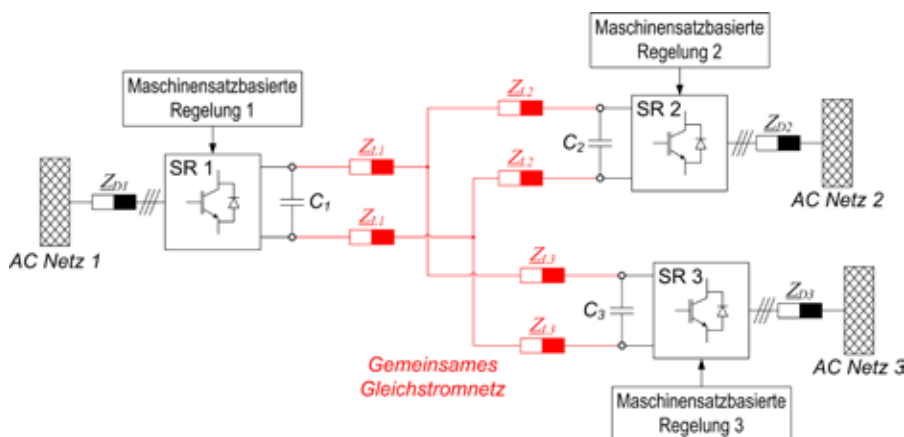


Abb. 1: Struktur des Simulationsmodells

Zur Analyse der Dynamik des Gesamtsystems im Bezug auf die Übertragung von eingespeister Leistung in eines der Drehstromnetze wird nun die Netzfrequenz eines Drehstromnetzes künstlich leicht erhöht, was einem Überangebot an eingespeister Wirkleistung entspricht. Das Ergebnis der Simulation ist in der Abb. 2 gezeigt.

In der Abb. 2 sind die Verläufe der Gleichströme der

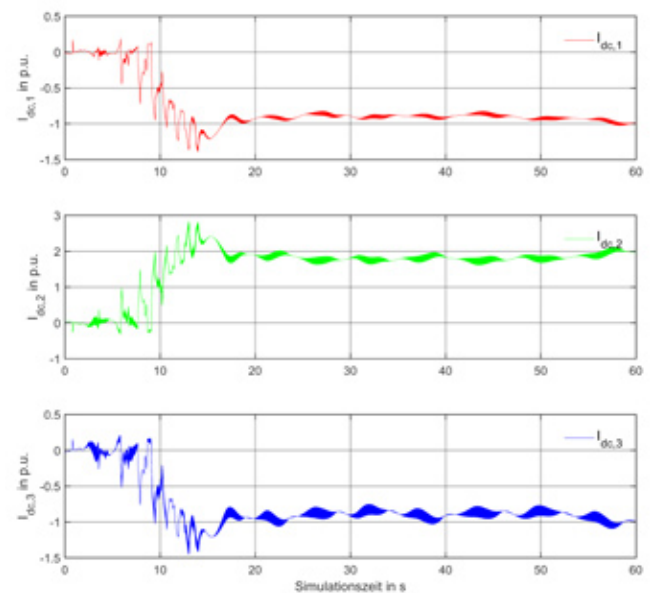


Abb. 2: Ergebnisse der Simulation

Stromrichter in Richtung des Gleichstromnetzes dargestellt. Ab einer Simulationszeit von 2 s steigt die Netzfrequenz des Drehstromnetzes des Stromrichters 2 an, dies bewirkt eine Stromeinspeisung in das Gleichstromnetz. Da sich der Strom in dem Gleichstromnetz nicht anhäufen kann, führen die Stromrichter 1 und 3 den Strom anteilig ab und speisen entsprechend in die angeschlossenen Drehstromnetze ein. Die Aufteilung der Stromanteile erfolgt über das Verhältnis der Leitungslängen und somit der Leitungsbeläge. Die Stromverläufe sind von Schwingungen überlagert, welche

sich zum Teil aus der Dynamik der fiktiven Maschinen ergeben. Die Optimierung des Regelverhaltens bzw. eine Verbesserung der Reglerstruktur ist Bestandteil weiterführender Arbeiten.

Parallel wurde mit dem Aufbau eines Prüfstands zur Erweiterung der am IALB bestehenden Niederspannungsgleichstromübertragung (NGÜ) hin zu einem Gleichstromnetz begonnen. Die bisherige Punkt-zu-Punkt-Strecke soll durch zwei weitere selbstgeführte IGBT-Stromrichter zu einem

Gleichstromnetz mit insgesamt vier Netzknoten erweitert werden. Anschließend wird das entwickelte Regelkonzept auf diesen Netzknoten implementiert und dessen Funktionsweise im Prüffeld verifiziert.

Gefördert von der Deutschen
Forschungsgemeinschaft unter
der Projektnummer OR 81/24-1



Berechnung von Wirbelströmen auf Basis der Diffusionsgleichung

Die Berechnung und Analyse der zeitlich veränderlichen Vorgänge stellt einen wichtigen Aspekt bei der Entwicklung und Auslegung technischer Systeme dar. Die meisten Systeme besitzen ein nichtlineares Verhalten und lassen sich mit Hilfe der nichtlinearen Methoden behandeln. Es gibt aber eine Vielzahl technischer Systeme, die sich nicht nur zeitlich beschreiben, sondern auch räumliche Komponenten und Verteilungen aufweisen. Dazu gehört zum Beispiel die Diffusionsgleichung und die Kontinuitätsgleichung für die Stromdichte:

$$\Delta \mathbf{J} = \mu \cdot \kappa \cdot \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} \quad \text{mit} \quad \nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

Die Diffusionsgleichung wird zur Berechnung der Wirbelströme verwendet. Das kann zum Beispiel für eine Berechnung der Beschleunigung oder der Verformung eines dünnen, leitfähigen Blechs erfolgen. Abb. 1 verdeutlicht dies.

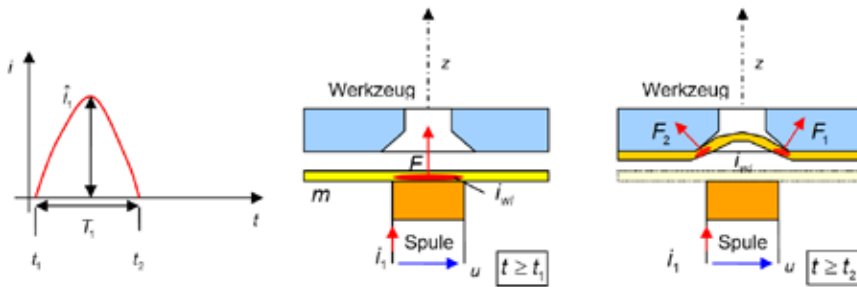


Abb. 1: Blechumformung

Am Rand des Bleches wird die Normalkomponente der Stromdichte null:

$$\mathbf{n}(\Omega) \cdot \mathbf{J} = 0$$

Bei gelöstem Feld oder Vektorpotential kann die Kraft wie folgt berechnet werden:

$$\mathbf{F} = \iiint_V \mathbf{J} \times \mathbf{B} \cdot d\tau = - \iiint_V \kappa \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \times (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\tau$$

Mit Hilfe von Simulationen und Analogie-Tests wird ein geeignetes Konzept zum Aufbau und zur Impulskrafterzeugung entwickelt. Der Prozess wird als Kaltumformung bezeichnet und stellt das plastische Umformen von Metallen unterhalb der Rekristallisationstemperatur dar. Wenn eine höhere Festigkeit erwünscht ist, muss eine anschließende Wärmebehandlung durchgeführt werden. Die Kaltumformung wird in diesem Fall angewendet, damit höhere Maßtoleranzen und gute Oberflächeneigenschaften erreicht werden. Das Ziel ist es, Blechdicken von 50 bis 300 μm mit dem elektromagnetischen Verfahren umzuformen. Dazu wird ein spezieller Aufbau mit einer Vorrichtung (Werkzeug)

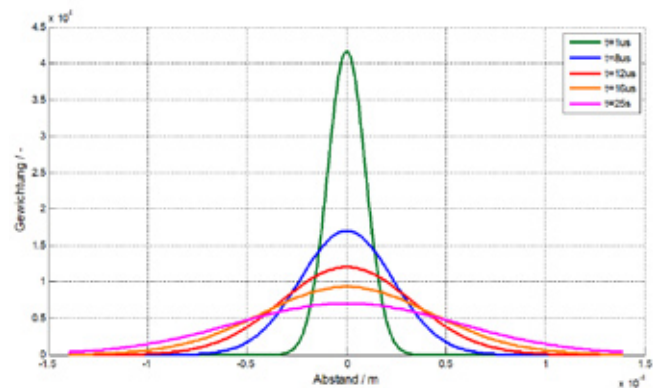


Abb. 2: Ausbreitung der Wirbelströme (Kern-Funktion)

verwendet, um das Blech in eine bestimmte Form zu bringen. Es wird untersucht, in wie fern eine Umformung des Blechs ohne eine Vorrichtung erfolgen kann. Eine zeitliche Vorsteuerung wird dabei betrachtet und soll weitestgehend untersucht werden, inwiefern eine bestimmte Stromform (Anzahl der Impulse) auf den

elektromagnetischen Diffusionsvorgang (Verteilung der Wirbelströme im Blech) einen positiven Einfluss hat. So werden steile Flanken, die Dauer, mehrere Flanken nacheinander sowie Anstiege am Anfang und am Ende getestet. Es sollen effektive Kraftdichten und Kraftdichteverteilungen untersucht werden. Dabei stellt sich vor allem die Frage, welchen Einfluss mehrere Impulse (oder andere

Stromformen) nacheinander auf den Umformprozess haben. Es soll eine zeitlich verschobene Umformung (1. Beschleunigung, Auftreffen, Verformung) erzeugt werden. In der Phase I wird das Blech beschleunigt. Für den beschleunigten Vorgang ergibt sich die Bewegungsgleichung:

$$m \cdot \ddot{z} = F_m(i, z) - G$$

Hierzu wird nach einer definierten Beschleunigung und nach einer bestimmten Dauer das Blech durch die kinetische Energie in das Werkzeug mit einer speziellen Form eingeprägt. In der zweiten und der ggf. dritten Phase ist das Nachwirken von Interesse. Dabei sind in dieser Phase ebenfalls die Stromform und die Dauer der Wirkung von Bedeutung, damit der Materialfluss an richtigen Stellen qualitativ erfolgen kann. Die zweite und die dritte Phase kann unter Umständen die Erhitzung beinhalten. Die Analyse für die schnellveränderlichen Felder kann ebenfalls analytisch und mittels der FEM-Software erfolgen. Die Berechnung der magnetischen Wellenausbreitung erfolgt durch die Lösung der Wellengleichung.

Intelligentes Transportsystem auf Basis innovativer Linearantriebe mit berührungsloser Energie- und Signalübertragung

Translatorische Bewegungen treten in der Logistik sowie bei der Automatisierung industrieller Prozesse in zahlreichen Situationen auf. Insbesondere bei der Bearbeitung von Werkstücken in mehreren Teilprozessen ist ein Transportsystem notwendig, dass schnell und präzise positioniert, auf Einflüsse flexibel reagiert und kosteneffizient ist. Daher wird zusammen mit Industriepartnern am IALB ein intelligentes Transportsystem basierend auf einer neuartigen Linearmaschine entwickelt. Zielsetzung ist ein Aufbau ohne Magnete im Stator sowie die Realisierung von Kurven und Weichen ohne mechanische Verstellung. Hiermit soll das bedarfsgerechte Ein- und Ausschleusen von Transportwagen ermöglicht werden.

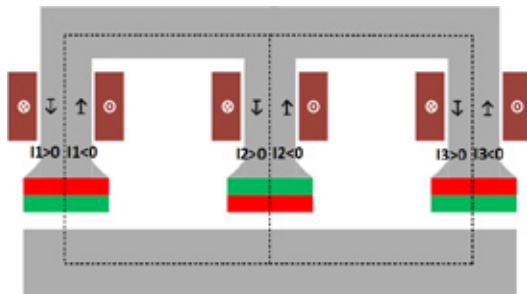


Abb. 1: E-Kern im Schnittbild (halbe Anordnung)

Die neuartige Linearmaschine basiert auf einer transversalen Flussführung mit Oberflächenmagneten im Luftspalt. Weiterhin wird der Stator als rein passives Bauteil ausgeführt. Sowohl die Spulenanordnung als auch die permanentmagnetische Erregung werden entsprechend im Translator vorgesehen. Mechanisch bilden zwei gespiegelte E-Kerne die Grundlage.

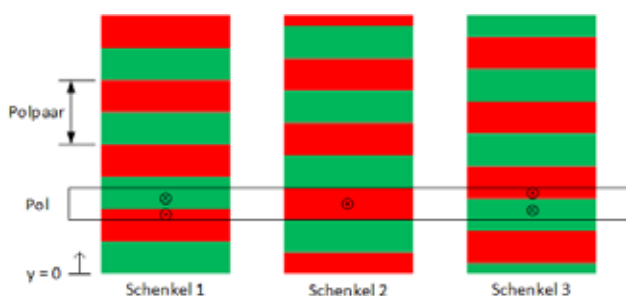


Abb. 2: Phasenversetzte Magnetanordnung

Die phasenversetzte Anordnung der Permanentmagnete ist schematisch in Abb. 2 gezeigt. Der Phasenversatz zwischen den drei Schenkeln des Translators beträgt 120° , da sich hierdurch ein symmetrisches Dreiphasensystem der Flüsse ergibt. Dass ein näherungsweise symmetrisches System vorliegt, lässt sich erkennen, indem man die Flächen mit ein- und austretendem Fluss pro Pol vergleicht: Hierzu ist in Abb. 2 ein schwarzer Kasten über die Breite des Translators an beliebiger Stelle in Bewegungsrichtung skizziert, der die Polfläche des Stators andeutet. Deutlich wird, dass der ein- und aus-

tretende Fluss innerhalb des Kastens in Näherung gleiche Flächenanteile aufweist und sich die Flüsse daher gegenseitig kompensieren.

In einer umfangreichen Parameterstudie mittels Finite-Elemente-Simulationen wurde das ausgewählte Konzept detailliert untersucht. Insgesamt konnte so ein sehr gut ausgenutzter Aufbau mit fünf Polpaaren und einer Abmessung von ca. $14 \times 13 \times 13$ cm für das bewegliche Teil sowie ein einfacher Statoraufbau aus massivem Stahl ohne Blechung hervorgebracht werden.

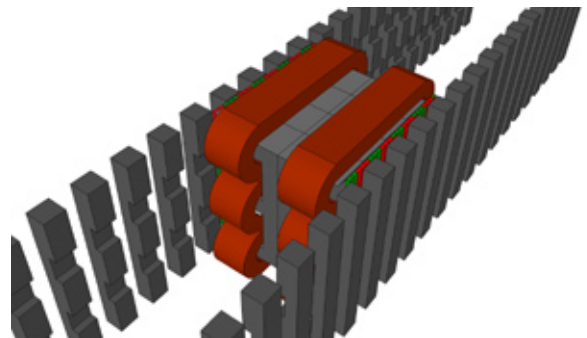


Abb. 3: Linearmaschine mit gespiegeltem Aufbau

Für die Regelung der Linearmaschine ist es sehr vorteilhaft, dass unabhängig vom neuartigen Aufbau jede Hälfte der Linearmaschine als Linear-Synchronmaschine betrachtet werden kann. Basierend hierauf erfolgt der Ansatz einer feldorientierten Regelung. Durch die gezielte Ausbildung einer Asymmetrie in Form von einer stärkeren Querkraft zu einer der beiden Seiten des Stators kann eine Vorzugsrichtung des Translators ausgebildet werden. Mit der resultierenden Differenzkraft wird die Richtungsentscheidung bei einer Verzweigung (Weiche) herbeigeführt. Ein Demonstrator mit Weiche, dargestellt in Abb. 4, wurde seitens der Projektpartner aufgebaut und ist in Teilen in Betrieb genommen.

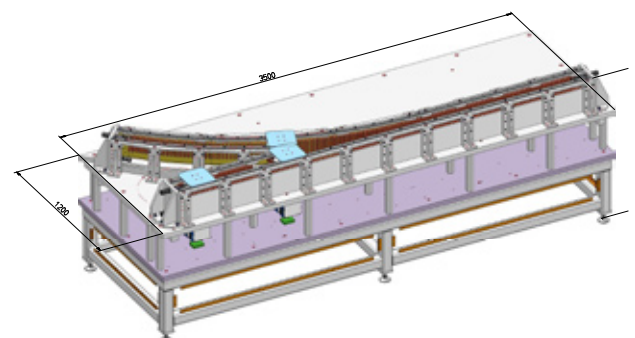


Abb. 4: Konstruktion Demonstrator

Förderkennzeichen:
02P15K581

Passive Komponenten für Anwendungen mit schnell schaltenden SiC-Halbleitern in der Leistungselektronik

Die besonderen Eigenschaften von WBG-Halbleiterschaltern ermöglichen es, bei gleichbleibender Leistung, höhere Schaltfrequenzen als mit klassischen Si-Halbleitern zu erreichen. Dadurch lassen sich Filterschaltungen und Speicherdrosseln kleiner auslegen, was zu kompakteren Bauformen des Gesamtsystems führt. Nachteilig sind hierbei aber die steileren Schaltflanken, welche zu Störungen führen können. Um den größtmöglichen Vorteil durch die Verwendung von WBGs zu bekommen, muss das gesamte System auf deren Verwendung angepasst werden.

In einem Forschungsprojekt sollen deshalb Drosseln speziell für den Einsatz mit schnell schaltenden WBG-Halbleitern entwickelt werden. Dabei liegt ein Fokus auf dem Einsatz mit Leistungselektronik im Kilowattbereich und möglichst kompaktem Aufbau, um den Vorteilen der neuen Schalter gerecht zu werden.

Der Einsatz mit schnell schaltenden WBG-Halbleitern stellt höhere Anforderungen an die verwendeten passiven Komponenten. So treten durch die steilen Schaltflanken größere Überspannungen auf, hervorgerufen durch parasitäre Induktivitäten und Kapazitäten. Die Flankensteilheiten liegen hierbei im Bereich von 10 - 50 kV/ μ s, im Vergleich von 0,5 - 5 kV/ μ s bei Si-Schaltern.

Abb. 1 zeigt beispielhaft den Einfluss eines schlechten Systemaufbaus (größere Werte der parasitären Bauelemente) und des schnelleren Schaltens auf die Überspannung bei Schaltvorgängen. Schnelleres Schalten führt hier bei gleichbleibenden Werten zu starkem Überspringen, welches vorher nicht auftrat. Schlechtere Werte für die parasitären Größen führen zum gleichen Effekt.

Im Fall der im Zuge des Projektes zu entwickelnden Drossel bedeutet dies, dass besonderes Augenmerk der Auslegung der Isolation gelten muss. Es ist generell mit größeren Spannungsspitzen zu rechnen, als dies mit langsamer schaltenden Si-Halbleitern der Fall wäre.

Höhere zu erwartende Überspannungen benötigen zum Einen eine bessere Isolierung, was sich negativ auf die Größe der Spule auswirkt. Zum Anderen trägt die stärkere Beanspruchung zu einer beschleunigten Alterung bei, weshalb auf eine gute Qualität des Materials als auch die Fertigung der Drossel geachtet werden muss. In Verbindung mit einer möglichst kompakten Bauform stellt dies einen kritischen Punkt in der Entwicklung dar.

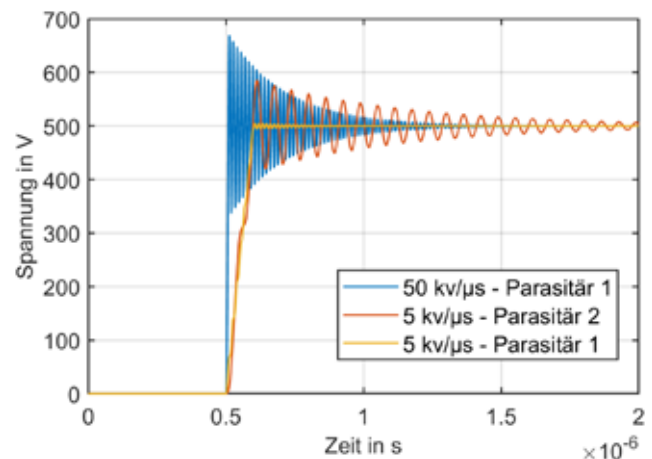


Abb. 1: Überspringen bei Schaltflanken mit unterschiedlicher Steilheit und parasitärer Effekte

Um zu überprüfen, an welchen Stellen die Isolation am stärksten beansprucht wird, wurden 2D- und 3D-FEM-Simulationen des Drosselaufbaus durchgeführt. Das Ziel hierbei war, die Geometrie hinsichtlich der auftretenden Feldstärken zu untersuchen, damit Schwachstellen lokalisiert und entsprechende Änderungen vorgenommen werden können.

Abb. 2 zeigt hier einige Ergebnisse dieser Simulationen, bei denen die Feldverteilung für unterschiedlich große Überspannungsspitzen verglichen wurde. Es ist zu erkennen, dass sich die qualitative Verteilung nicht verändert, die höheren auftretenden Spannungen haben aber einen direkten Einfluss auf die Feldstärke. Die Untersuchungen zeigten, dass die Steilheit der Spannungsflanken nur dahingehend einen Einfluss auf die Feldverteilung hat, dass durch sie größere Spannungsspitzen auftreten, welche die Feldstärken temporär erhöhen. Weitere Untersuchungen sollen dies nochmals bestätigen.

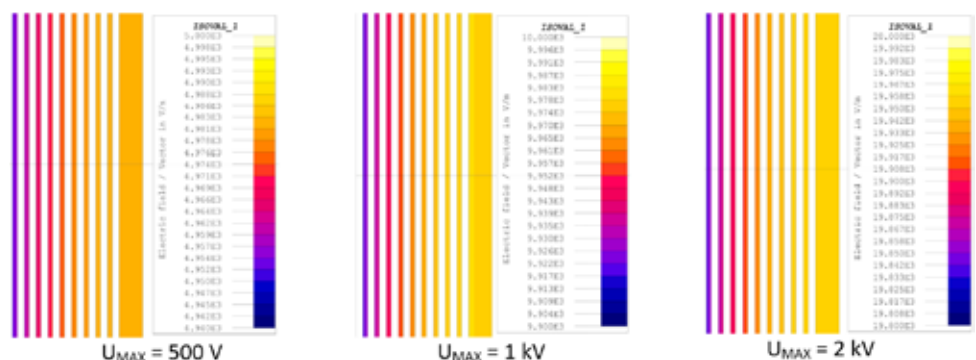


Abb. 2: 2D-Feldstärkeverteilung in der Isolation für verschiedene Überspannungsspitzen (Kern mit dickerer Isolierung auf der rechten Seite)

GEFÖRDERT VOM

Förderkennzeichen:
16ES0615



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Multidimensionale Belastungen der Hochleistungselektronik von Windenergieanlagen

Ziel des Forschungsprojektes HiPE-WiND ist es, die Hochleistungselektronik für Windenergieanlagen unter realen multimodalen Umwelt- und Lastbedingungen zu untersuchen, ihre Ausfallursachen zu erforschen und Konzepte für eine Optimierung ihrer Robustheit zu entwickeln und experimentell zu verifizieren. Dazu sind umfangreiche experimentelle Untersuchungen erforderlich, bei denen ganze Umrichtersysteme den multimodalen Belastungen reproduzierbar ausgesetzt sind. Ziel dieser Untersuchungen ist es, durch eine beschleunigte Alterung Hinweise auf Schwachstellen in der Systemhardware zu erhalten und zu analysieren, wie durch die gezielte Beeinflussung der elektrischen Belastungen eine Optimierung der Umrichterlebensdauer zu erreichen ist.

In der Windenergie ist die Leistungselektronik besonders harten Beanspruchungen ausgesetzt. Dort muss sie sowohl die Belastungen aus dem Wind als auch die aus dem Netz ertragen. Belastungen aus dem Wind stellen beispielsweise Schwachlast, Überlast oder starke Wechselbelasten durch Schwankungen des Windes dar. Belastungen aus dem Netz ergeben sich beispielsweise durch Spannungs- / Stromstöße durch Schaltvorgänge, Kurzschlüsse oder Blitzeinschläge. Hinzu kommen Umwelteinflüsse wie beispielsweise große Temperatursprünge, Feuchte oder salzhaltige Atmosphäre und Wechselwirkungen der verschiedenen Systeme untereinander. Selbst innerhalb eines Windparks können daher die Belastungen, denen die Leistungselektronik in den einzelnen Anlagen ausgesetzt ist, stark voneinander abweichen. Entscheidend für die Lebensdauer der Leistungselektronik ist jedoch die Kombination aus Umweltbeanspruchungen und elektrischen Betriebsbelastungen, denen die Anlagen ausgeliefert sind.

Um die Hochleistungselektronik der Windenergieanlagen unter kombinierten klimatischen und elektrischen Belastungen untersuchen zu können, ist eine Test- und Versuchsmethodik erforderlich, die es ermöglicht, die leistungselektronischen Prüflinge, vom leistungselektronischen Bauelement bis zum Gesamtsystem (Frequenzumrichter / Umrichter) einer Windenergieanlage in Klimakabinen definierten Umweltbedingungen (Temperatur, Feuchte, etc.) auszusetzen und dabei gleichzeitig sowohl den „normalen“ elektrischen Belastungen als auch nachgebildeten Störungen und Systemwechselwirkungen reproduzierbar und beliebig oft wiederholbar zu unterziehen. Solche Prüfeinrichtungen mit den notwendigen Lastfunktionen und anpassbar in Leistung und Betriebsspannung sind europaweit am Markt nicht verfügbar und sollen im Rahmen des Projektes zur Validierung von technischen Lösungen ebenfalls entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genom-

men werden. Diese ermöglichen herstellernerneutrale Forschung und Untersuchungen für Hochleistungselektronik von Windenergieanlagen entsprechend der Leistung moderner Anlagen.

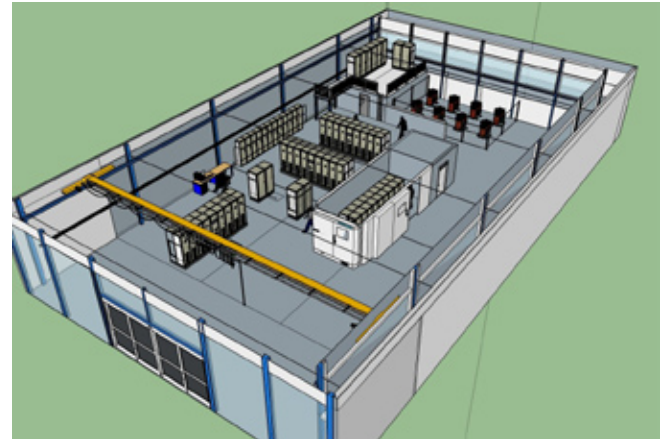


Abb. 1: Schematische Darstellung des geplanten Versuchsaufbaus

Um zu fundierten und gleichzeitig anwendungsnahen Ergebnissen zu kommen, arbeiten Wissenschaft und Industrie bei HiPE-WiND eng zusammen. Neben dem IALB und dem Fraunhofer IWES sind die Unternehmen Enercon (Wobben Research and Development GmbH), Breuer Motoren GmbH und wpd windmanager GmbH & Co. KG am Verbundprojekt beteiligt.

Die beteiligten Institute sind eng mit den Windenergieanlagen-Herstellern, sowie den Herstellern von Frequenzumrichtern und Bauelementen verzahnt. Durch die Kooperation mit den Instituten als unabhängige Stellen können Information und Daten gesammelt, anonymisiert und ausgewertet werden. Anschließend kann eine zielgerichtete Weiterleitung erfolgen. Hierdurch werden Informationsaustausche erreicht, die sonst aufgrund von Geheimhaltung oder organisatorischen Gründen nicht zu Stande kommen würden.

Durch diese zusätzlichen Informationen können langfristig Leistungshalbleiter Bauelemente und Frequenzumrichter entwickelt werden, die für die Bedingungen bei einem Einsatz in Windenergieanlagen optimiert sind.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Förderkennzeichen:
0324219A

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Forscherguppe Hochleistungselektronik für Windenergieanlagen

Mit dem Aufbau der Forschergruppe und der Ausrichtung auf anwendungsorientierte Forschung sowie Fort- und Weiterbildung im Bereich der Hochleistungselektronik soll im Bremer Centrum für Mechatronik (BCM) mit seinem Mitgliedsinstitut für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente (IALB) ein neues zukunftsweisendes Arbeitsgebiet etabliert werden und die Forschergruppe zu einer dauerhaften, sich selbst tragenden Einheit für Entwicklungsdienstleistungen im BCM entwickelt werden. Durch die engen Kooperationen mit Firmen aus der Windenergiebranche wird der schnellstmögliche Transfer der Forschungsergebnisse in die industrielle Anwendung angestrebt.

Die Forschergruppe bündelt die Kompetenzen des Fraunhofer Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) und des IALB der Universität Bremen.

Die Leistungselektronik als Bindeglied ist die Schlüsselkomponente sowohl für die Netzintegration der Windenergie als auch für den Transport der erzeugten elektrischen Energie über weite Strecken. Praktisch alle Windenergieanlagen der Multi-Megawatt-Klasse werden durch Leistungselektronik an das elektrische Netz angebunden. Integriert in riesige Stromrichter stellt sie einerseits die Energieübertragung und andererseits intelligent Spannungen und Ströme, um die Windturbinen bedarfsgerecht zu betreiben. In den Anlagen ist die Leistungselektronik besonders harten Herausforderungen ausgesetzt. Sie muss neben den stark schwankenden Umwelteinflüssen und den Belastungen aus dem Wind auch Störungen aus dem Netz ertragen.

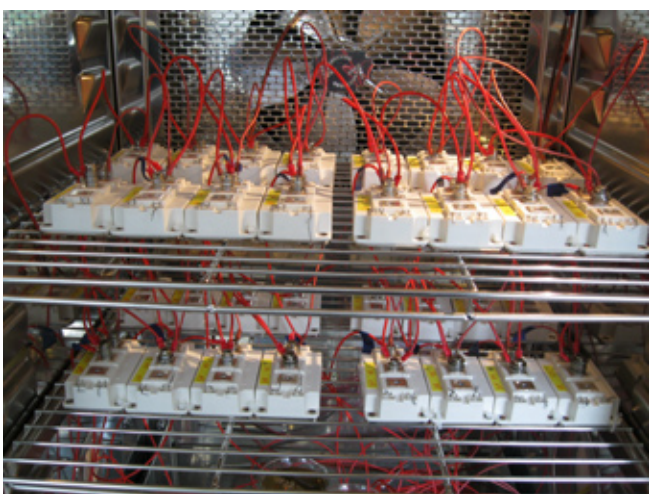


Abb. 1: Bauelementprüfung unter Umwelteinflüssen

Von größter Wichtigkeit ist daher die Herausforderung des zuverlässigen, langlebigen und effizienten Betriebs während der Stromerzeugung. Das neue Team soll als Forschungs- und Transfereinrichtung insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen bei der Entwick-

lung leistungselektronischer Anlagen für die Windenergie unterstützen und herstellerneutrale Untersuchungen zur Lebensdauer der Leistungselektronik unter den Aspekten der speziellen Einsatzbedingungen im On- und Offshore-Betrieb durchführen.

Die Arbeitsgebiete der neuen Transfergruppe sollen Tests sowie Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu leistungsfähigen Netz- und Anlagenmodellen umfassen, mit denen sich die dynamischen Aspekte der Netzintegration auch im Millisekundenbereich untersuchen lassen und mit deren Hilfe dann eine Optimierung der Regelung von Windenergieanlagen durchgeführt werden kann. Zusätzlich entstehen spezielle Experimentierplattformen, wie z. B. ein 50 kW Gondelprüfstand, an denen alternative Betriebskonzepte im kleinen Maßstab bereits im Labor experimentell erprobt werden können.

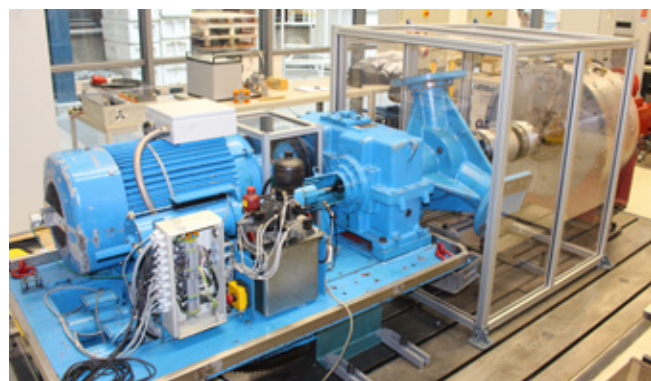


Abb. 2: Gondelprüfstand im Maschinenlabor des IALB

Das Ziel der Maßnahme aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung ist der Aufbau interdisziplinärer Kooperationen in Form von Forschungsaufträgen und Verbundprojekten mit Unternehmen. Daneben werden aus den erzielten Forschungsergebnissen Dienstleistungsangebote, z. B. Messkampagnen oder produktorientierte Verschleißuntersuchungen, sowie themenbezogene Workshops entwickelt. Somit stellt die Forschergruppe eine wichtige Kompetenzerweiterung des Windenergieclusters in Bremen dar.



Europäische Union
„Investition in Ihre Zukunft“
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung

Shunt-Strukturen auf Leiterplattenbasis

Aufgrund der zunehmenden Schaltgeschwindigkeiten wird die messtechnische Charakterisierung von leistungselektronischen Bauelementen vor immer neue Herausforderungen gestellt. Hierbei fällt die Wahl oftmals auf Shunt-Widerstände, welche Messungen bis hin zu einigen GHz ermöglichen. Derartige Stromsensoren müssen mehrere Anforderungen erfüllen: Einerseits sollte die Streuinduktivität im Lastkreis gering ausfallen, um die Stromanstiegsgeschwindigkeit nicht zu stark zu verringern. Andererseits muss die auf den Messkreis wirkende Induktivität größtmöglich reduziert werden, um Einkopplungen auf das Messsignal zu vermeiden.

Dementsprechend wurden am IALB unterschiedlichste Konzepte wie der Koaxial- oder der Hairpin-Shunt untersucht. Ein Vorteil des Koaxial-Shunts besteht in der nahezu unverfälschten Messwertaufnahme, welche im feldfreien Raum erfolgt. Diese Widerstandsform bringt mit 3-5 nH jedoch eine relativ große Induktivität in den Lastkreis ein. Zudem sind die Fertigung und Kühlung schwierig. Der Hairpin-Shunt hingegen ist simpel zu fertigen und die Kühlung ist einfacher realisierbar. Abhängig von Material und Widerstandswert sind sogar Induktivitäten deutlich unterhalb von 1 nH möglich, wobei diese gleichermaßen auf den Last- und Messkreis wirken. Daher ist eine Kompensation unerlässlich.

Um die Vorteile des Koaxial- und des Hairpin-Shunts miteinander zu kombinieren, wurde der M-Shunt entwickelt. Abb. 1 zeigt einen derartigen Messwiderstand, dessen Struktur der Querschnittsfläche eines planaren Koaxial-Shunts bzw. zweier symmetrisch angeordneter Hairpin-Shunts entspricht. Analog zum koaxialen Messwiderstand ist bei dieser Anordnung keine Kompensation des Messsignals notwendig. Ebenso wie der Hairpin-Shunt bringt auch der M-Shunt nur eine geringe Induktivität in den Lastkreis ein, ist einfach und kostengünstig zu fertigen und gut zu kühlen. Ein

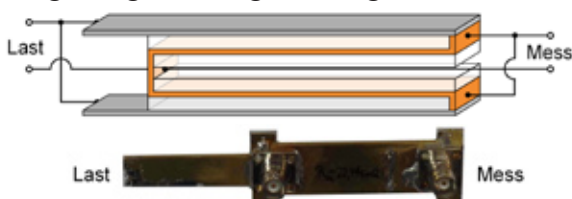


Abb. 1: Schematischer Aufbau (oben) und Prototyp (unten) eines M-Shunts

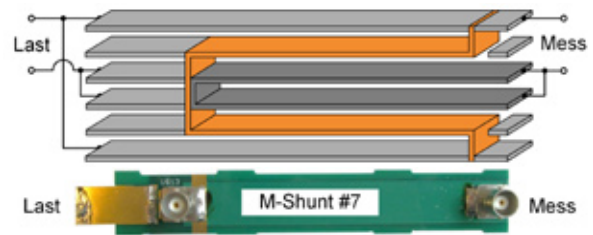


Abb. 2: Schematischer Aufbau (oben) und Prototyp (unten) eines M-Shunts auf Leiterplattenbasis

Prototyp des M-Shunts ist in Abb. 1 dargestellt. Bei der Charakterisierung der Prototypen konnte das erwartete Verhalten bestätigt werden. Vor allem bei der Fertigung zeigte sich jedoch Optimierungspotential. Um geringe, reproduzierbare Toleranzen zu gewährleisten, wurde eine industrielle Herstellungsvariante gewählt. Daher wurde das 5-lagige Konzept des Messwiderstands (Abb. 1) auf die in Abb. 2 gezeigte, 6-lagige Leiterplatte (Printed Circuit Board, kurz: PCB) übertragen.

Somit war eine exaktere Auslegung der einzelnen Lagen wie auch eine gleichmäßigere Stromverteilung umsetzbar. Im Rahmen eines vom European Center for Power Electronics e.V. geförderten Projekts wurden unterschiedlichste Formen und Abmessungen für den Lagenaufbau der Leiterplatte ausgelegt, gefertigt und charakterisiert. Abb. 2 zeigt beispielhaft einen der PCB-M-Shunts. Der resultierende Kennlinienverlauf ist mit dem eines Koaxial-Referenzshunts in Abb. 3 dargestellt. Hieran zeigt sich die geringe induktive Einkopplung in den Messkreis. Zudem fällt die Streuinduktivität im Lastkreis (ca. 0,55 nH) und die Abweichung vom theoretischen Wert (ca. 0,5 nH) viel geringer als beim Koaxial-Shunt aus.

Shunts mit noch besseren Eigenschaften werden durch den Einsatz der Dickschichttechnologie erwartet und befinden sich derzeit in der Entwicklung.

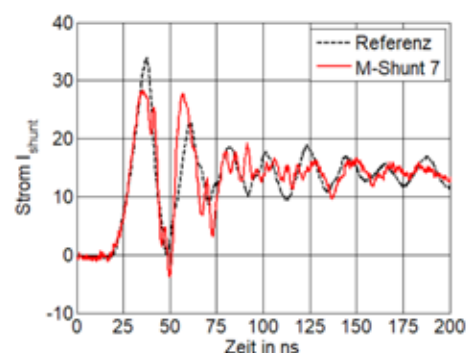


Abb. 3: Einschaltverhalten von M- und Koaxial-Shunt

Untersuchung des Durchbruchverhaltens von Siliziumkarbid MOS Kapazitäten

Der Durchbruch des Dielektrikums von Siliziumkarbid-Leistungs-MOSFETs ist eines der größten Herausforderungen mit Blick auf die langfristige Zuverlässigkeit der Bauelemente. Obwohl das Dielektrikum bei SiC MOSFETs mit dem von Si MOSFETs identisch ist (SiO_2), beeinflussen zwei Faktoren die Zuverlässigkeit der Schnittstelle zwischen Halbleiter und Oxid: Die Tatsache, dass Kohlenstoff im Oxidationsprozess entfernt werden muss und die größere Bandlücke von SiC, die in einem – im Vergleich zu Silizium – geringeren Abstand der Leitungsbandkanten zwischen Halbleiter und Oxid resultiert.

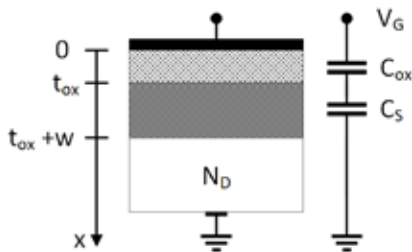


Abb. 1: Querschnitt einer idealen MOS-Kapazität

Um die elektrischen Eigenschaften und die Zuverlässigkeit von MOSFETs zu untersuchen, werden üblicherweise Teststrukturen in Form von MOS-Kapazitäten eingesetzt (siehe Abb. 1). Obwohl diese isoliert betrachtet in der Praxis keine Verwendung finden, sind sie ein einfaches Hilfsmittel, um eine Reihe von Parametern zu bestimmen und die Qualität des Halbleitermaterials und der Schnittstelle zum Oxid abzuschätzen sowie andere Effekte auszuschließen.

Am IALB wird dazu im Rahmen des SPEED Projektes die Zuverlässigkeit des Dielektrikums von Siliziumkarbid-MOSFETs anhand von Siliziumkarbid-MOS-Kapazitäten mithilfe der Constant-Current-Stress Time Dependent Dielectric Breakdown (CCS-TDDDB) Methode untersucht. Bei dieser Methode wird ein konstanter Strom durch die MOS-Kapazität eingeprägt und die Zeit bis zum Durchbruch des Oxids gemessen. Der Strom durch das Oxid wird bei der SiC/SiO₂ Schnittstelle durch das Fowler-Nordheim-Tunneln bestimmt, welcher durch den geringeren Abstand der Leitungsbandkanten auch bei niedrigem elektrischen Feld der vorherrschende Tunnel-Mechanismus ist. Der Durchbruch, der durch den Strom entsteht, wird in extrinsischen und intrinsischen Durchbruch unterschieden. Der extrinsische Durchbruch wird durch Verunreinigungen im Material verursacht und kann durch Verbesserungen im Herstellungsprozess vermieden werden. Zum intrinsischen Durchbruch kommt es durch die Entstehung von Defekten im Oxid.

Abb. 2 zeigt die Weibull-Verteilungen für die Messungen, die an einem Siliziumkarbidwafer (hergestellt

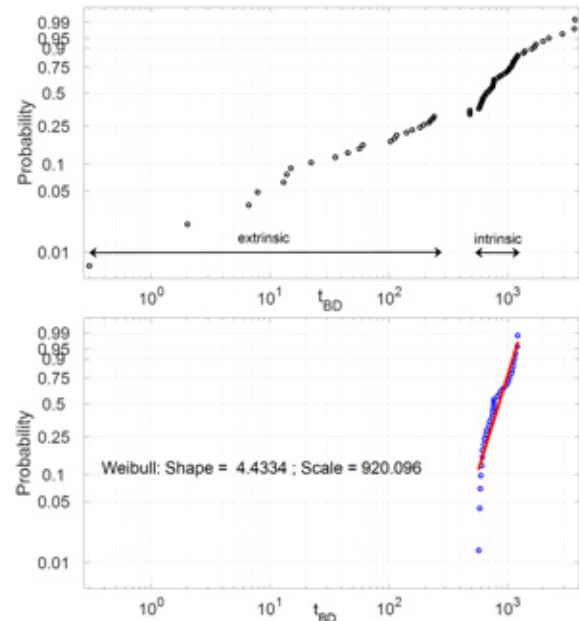


Abb. 2: Weibull-Verteilung für die TDDDB-Messungen an SiC-MOS-Kapazitäten: oben alle Messungen, unten nur die intrinsischen Ausfälle

vom Fraunhofer IIS Erlangen) durchgeführt wurden. Oben sind alle durchgeführten Messungen zu sehen, wobei hier der linke Bereich den extrinsischen Durchbruch kennzeichnet. Der untere Teil der Abbildung zeigt die Verteilung für die Messungen mit intrinsischem Durchbruch.

Abb. 3 zeigt den Spannungsverlauf einer Messung mit konstantem Strom für einen intrinsischen Durchbruch. Der extrinsische Durchbruch hat für den untersuchten Prozess noch einen hohen Anteil gemessen an der Gesamtzahl der Messungen. Dies bedeutet, dass der Herstellungsprozess für die gemessenen Wafer weitere Verbesserungen benötigt.

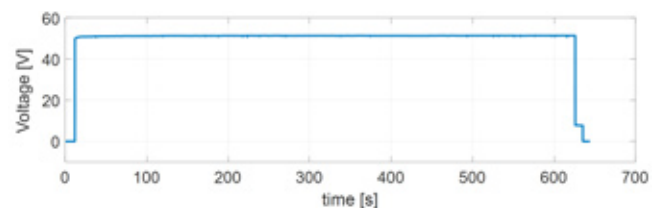


Abb. 3: Spannungsverlauf an einer MOS-Kapazität auf Waferebene bei einer konstanten Stromdichte von 13 µA



Diese Arbeit wurde von der Europäischen Kommission im Rahmenprogramm 7 unter der Finanzhilfvereinbarung Nr. 604057 SPEED (Silicon Carbide Power Technology for Energy Efficient Devices) unterstützt.

Risikobewertung für GaN Bauelemente in Langzeitanwendungen

Es besteht ein genereller Trend zu immer schnellerem Schalten, der Reduzierung von Verlusten und der Minimierung des Volumens und damit der Produktionskosten. Bauelemente auf der Basis von Galliumnitrid (GaN) bieten hier erhebliches Potenzial und kommen in immer mehr Anwendungen zum Einsatz. Da GaN Bauelemente vorerst nur einige 100 V sperren können, sind vor allem Anwendungen wie beispielsweise die Fotovoltaik betroffen. Aufgrund der höheren Schaltfrequenzen können passive Komponenten wie die Filter am Ausgang deutlich kleiner ausfallen. Die Leistungselektronik kann auf diese Weise erheblich kompakter werden.

Diese Vorteile werden zunichtegemacht, wenn das fertige Produkt keine ausreichende Robustheit und Zuverlässigkeit aufweist. Da der Aufbau und die physikalische Funktionsweise der GaN Bauelemente verschieden zu denen auf Si-Basis sind, herrschen in solchen Bauelementen andere Alterungsprozesse. Aus diesem Grund ist es noch ungewiss, ob die Methoden zur Lebensdauerberechnung für die Si Bauelemente auch auf die GaN Technologie übertragbar sind.

Das Projekt „Risk Assessment of GaN Devices for Long Life Application“ soll hier Abhilfe schaffen. Im Rahmen des Projekts werden beschleunigte Alterungstests entwickelt, durchgeführt und ausgewertet.

Der erste Teil des Projekts basiert auf der Analyse der Physik eines GaN HEMT (engl.: high electron mobility transistor). Die auf dem Markt verfügbaren Bauelemente sind derzeit ausschließlich lateral aufgebaut. Die Gate-, Drain- und Source-Anschlüsse befinden sich auf der gleichen Oberfläche. Der prinzipielle Aufbau eines GaN HEMT ist in Abb. 1 dargestellt. Die kritischste Stelle befindet sich im Bereich des Gates. Im Rahmen mehrerer Langzeittests sollen die problematischen

Zustände untersucht werden. Hierbei handelt es sich um sehr hohe elektrische Feldstärken, lokale kritische Temperaturen und heterogene Materialverbindungen wie zwischen Gate-Metall, Halbleitersperrschicht und Passivierungsschichten.

Die Physik der Fehlermechanismen in GaN Bauelementen ist unzureichend erforscht und verstanden. Oftmals ist es nicht möglich, die Wechselwirkungen zwischen mehreren Einflüssen mit den Standardtests festzustellen und zu separieren. Des Weiteren ist es sehr wichtig, die Ausfälle unter Laborbedingungen auf die Ausfälle im Feld zu übertragen sowie anders herum.

In Abb. 1 sind die bekannten Fehlermechanismen in einem lateralen GaN HEMT dargestellt:

- *Electron Trapping* in der Pufferschicht aufgrund der hohen Feldstärken.
- *Buffer Trap Ionisation* in der Nähe des Gates durch Elektronen mit hohen Energien (*Hot Electron Injection*).
- *Buffer Trap Ionisation* unter der Passivierung durch den piezoelektrischen Effekt.
- Bildung parasitärer Pfade wie *Punch-Through* oder *Vertical Leakage Through the Substrate*.
- Verschlechterung des ohmschen Kontakts bei höheren Temperaturen und erhöhter relativer Feuchtigkeit.
- *Trap Centers* durch thermo-mechanischen Stress.
- Negative Auswirkung der Elektronen mit hohen Energien auf das Gitter nahe dem Kanal.
- *Current Collaps* bei hohen elektrischen Belastungen.

In der zweiten Phase des Projekts werden für die Erforschung der beschriebenen Degradationseffekte sowohl

Standardtests wie HTRB, H³TRB, IOL als auch die speziell am IALB entwickelten, an die Physik des GaN HEMT angepassten Zuverlässigkeitstests „Cycled Climate Test“ und „Frequency Test“ durchgeführt.

Gefördert durch:
ECPE European Center for
Power Electronics e.V.

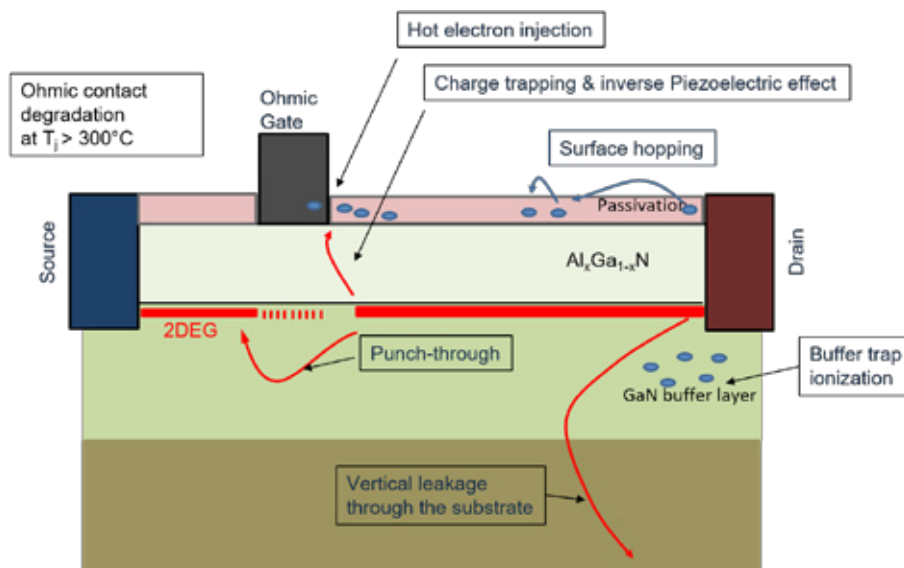


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau eines GaN HEMT



Degradation von Leistungshalbleitern unter Feuchteinfluss

Das IALB untersucht die Feuchteresistenz von IGBT Leistungsmodulen, aber auch von diskreten Siliziumkarbid (SiC) Bauelementen. Standard in Bezug auf Korrosion und andere feuchtegetriebene Degradationsmechanismen ist der sog. High Humidity High Temperature Reverse Bias (H^3TRB) Test. Innerhalb von 1000 Stunden wird eine Betriebsdauer von bis zu 25 Jahren simuliert.

Besonders empfindlich reagiert der Randabschluss eines Leistungshalbleiter-Chips auf Feuchtigkeit. Dessen Isolationsvermögen wird durch Korrosion der Chip-Metallisierung drastisch reduziert. Sobald sich ein geschlossener Feuchtigkeitsfilm bildet, der die Metallisierung von Anode und Kathode leitfähig verbindet, entsteht bei Anlegen einer Sperrspannung eine Korrosionszelle. Getrieben vom Potentialunterschied findet ein Stofftransport statt, der als Elektrochemische Migration (ECM) bezeichnet wird. Nachdem das Metall an der Anode herausgelöst ist, wird es als Ion durch den Elektrolyten transportiert. An der Kathode angekommen, wird das Ion wieder zum Ausgangsstoff reduziert und abgeschieden (Abb. 1a). Die Metallabscheidung erfolgt dabei bevorzugt an Spitzen und Vorsprüngen, da hier eine erhöhte Feldstärke herrscht. Es bilden sich baumartige Strukturen (Dendriten) zwischen den Elektroden aus, die einen Kurzschluss bewirken können. Abb. 1b zeigt einen massiven Kupfer-Dendriten und drei kleine Silber-Dendriten, die innerhalb von 500 Std. auf dem Randabschluss einer 1,7 kV Diode gewachsen sind. Verglichen mit Kupfer und Silber, die als Vertreter der klassischen ECM gelten, vollzieht sich die Korrosion von Aluminium auf andere Weise. Gerät Al in Kontakt mit Wasser, bildet sich eine dicke Al-Hydroxid Schicht auf der Oberfläche, die in neutralen Milieus einen guten Korrosionsschutz bietet (Selbstpassivierung). Sinkt jedoch der p_H -Wert des Elektrolyten aufgrund der anliegenden Spannung an der Anode unter $p_H 4$ bzw. überschreitet er an der Kathode $p_H 9$, so wird an bei-

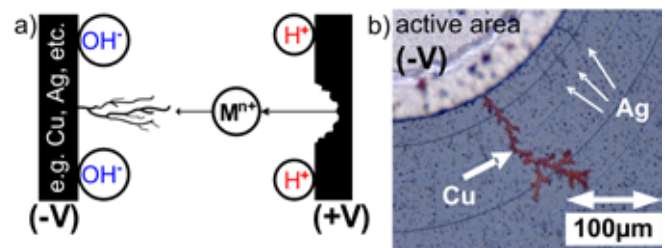


Abb. 1: Elektrochemische Migration (ECM) a) Prinzip; b) Dendriten auf dem Rand eines 1,7 kV Dioden-Chips

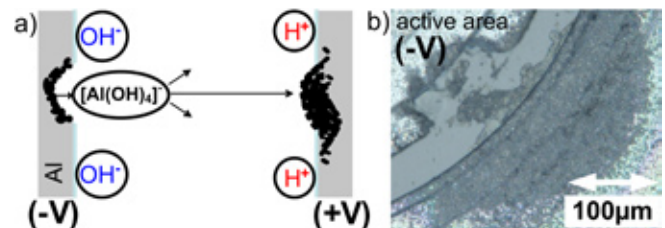


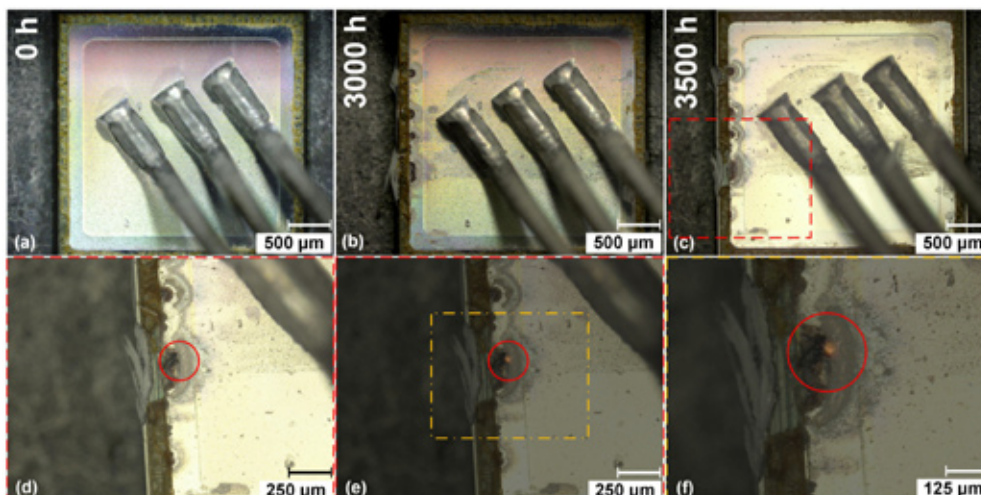
Abb. 2: Aluminiumkorrosion a) Prinzip; b) korrodierte Chip-Metallisierung auf dem Rand einer 1,2 kV Diode

den Elektroden das Al-Hydroxid abgebaut. Während die sich an der Anode bildenden Al^{3+} -Ionen instabil sind und schnell wieder zerfallen, ist das alkalische Milieu an der Kathode schädlicher. Hier findet eine Reduktion des $Al(OH)_3$ statt, wodurch stabile Aluminate $[Al(OH)_4]^-$ gebildet werden (Abb. 2a). Diese können durch den Elektrolyten wandern, sich zwischen den Elektroden oder auch an der Gegenelektrode abscheiden und lokale Feldverzerrungen bewirken, die schlussendlich zum Ausfall des Bauelements führen können. Abb. 2b zeigt die korrodierte Metallisierung einer nach ca. 1000 Std. ausgefallenen 1,2 kV Diode.

Al-Korrosion ist auch bei SiC-Leistungshalbleitern von Bedeutung. Abb. 3a-f zeigt die zeitliche Veränderung eines 650 V SiC-Diodenchips unter dem Mikroskop. Nach 3000 Std. ist bei 85 °C, 85 % rel. Luftfeuchte und einer Spannung von 425 V die Metallisierung an der linken Chipkante korrodiert (sog. „mouse-bites“). Überraschenderweise fiel das Bauelement aber erst 500 Std. später und nicht im Test, sondern während der

Messung der Sperrkennlinie bei Raumtemperatur aus. Der Fehlerort liegt im inneren Teil des Randabschlusses, genau im Bereich der ausgefressenen Metallisierungskante.

Abb. 3: Optische Analyse einer alternden 650 V SiC Diode a) vor H^3TRB ; b) nach 3000 Std.; c) nach 3500 Std.; d) vergrößerte Ansicht des rot gestrichelten Bereichs; e) Avalanche Lokalisierung (oranger Lichtpunkt); f) vergrößerte Ansicht des gelb gestrichelten Bereichs



Lehrveranstaltungen 2017

Lehrveranstaltungen des Instituts

Das Lehrveranstaltungsangebot des Instituts ist so konzipiert, dass in den Vorlesungen die allgemeinen und fachspezifischen Grundlagen der Antriebstechnik, Leistungselektronik und Energietechnik vermittelt werden. Dadurch werden die Absolventen in die Lage versetzt, sich während ihres gesamten Berufslebens selbstständig in neue Arbeitsgebiete einarbeiten zu können. Im Vordergrund stehen dabei technische Verfahren und Methoden, die über lange Zeit Bestand haben werden. Damit wird die Grundlage für die Befähigung zum lebenslangen Lernen geschaffen, die aufgrund des schnellen technischen Wandels immer stärker an Bedeutung gewinnt.

In den Praktika erfahren die Studierenden aktuelle Umsetzungen der vorher vermittelten Theorien. An realen Versuchsaufbauten führen sie vorbereitete Experimente durch. Die kreative Umsetzung der

vermittelten Vorlesungsinhalte in technische Verfahren und Schaltungen mit modernsten Technologien erfolgt dann im Rahmen der angebotenen Projekt-, Bachelor- und Masterarbeiten. Dabei wird großer Wert darauf gelegt, dass den Studierenden die Nutzung von Ingenieur-Freiräumen bei der Lösung anwendungsbezogener Aufgabenstellungen vermittelt wird.

Abgerundet wird das Angebot durch eine Vielzahl von Wahlpflicht-Veranstaltungen, für die wieder Dozenten aus vielen Bereichen der Forschung und Lehre gewonnen werden konnten.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Orlik



Elektromagnetische Energiewandlung

Eingebettet in das übergreifende Thema der Erzeugung elektrischer Energie mit Windkraftanlagen werden in dieser Vorlesung für Studierende des 3. Semesters des B.Sc.-Studienganges „Elektrotechnik und Informationstechnik“ bzw. des 5. Semesters des B.Sc.-Studienganges „Wirtschaftsingenieurwesen Elektrotechnik und Informationstechnik“ die Grundlagen aller wesentlichen Komponenten zur Energiewandlung und zum Energietransport behandelt.

Die Veranstaltung beginnt mit der Einführung des Drehstromsystems. Anschließend werden das Funktionsprinzip des Transformators erläutert und die darauf basierenden Betriebseigenschaften abgeleitet.

Abgerundet wird dieses Kapitel mit dem Aufbau von Drehstromtransformatoren und der Erläuterung der gebräuchlichsten Schaltgruppen.

Das Themenfeld der elektrischen Maschinen beginnt mit einer kurzen Einführung in die Berechnung magnetischer Kreise. Im Anschluss daran werden der Aufbau von Gleichstrommaschinen behandelt und die stationären Betriebseigenschaften der Reihenschluss-, Nebenschluss- und der fremderregten Gleichstrommaschine abgeleitet und diskutiert. Die Erzeugung von drehenden Magnetfeldern mit räumlich verteilten, feststehenden Wicklungen, der Aufbau und die Betriebseigenschaften von Asynchron- und Synchronmaschinen bilden weitere Kapitel. Abgeschlossen wird die Veranstaltung mit einer kurzen Einführung in das Übertragungsverhalten elektrischer Leitungen.

Stromrichtertechnik

Zu der Vorlesung werden umfangreiche Manuskripte angeboten. Die Vorlesung beginnt mit der Vorstellung von selbstgeführten Stromrichter-Topologien. Zuerst werden Aufbau und Betriebseigenschaften von Gleichstromstellern behandelt. In diesem Zusammenhang werden Pulsweitenmodulation, Oberschwingungen in Strom und Spannung, Totzeitgenerierung und totzeitbedingte Spannungsfehler erläutert. Mit einem Hochsetzsteller und einem DC/DC-Sperrwandler wird dieses Themengebiet abgerundet. Der folgende Abschnitt befasst sich mit Pulswechselrichtern. Ausge-

hend von der Wechselrichter-Topologie werden die Sinus-Dreieck- und die Vektormodulation besprochen und die Wirkung der totzeitbedingten Spannungsfehler bei Drehstrom-Brückenschaltungen diskutiert. Im Anschluss daran werden mit einfachen Grundsaltungen die netzgeführten Stromrichter eingeführt. An der dreipulsigen Mittelpunktschaltung werden die Kommutierung und der Lückbetrieb erläutert. Abschließend werden die Ergebnisse auf die sechspulsige Brückenschaltung übertragen.

Die Vorlesung wird von einer Übung begleitet, in der die Studierenden weitere Einblicke in die Leistungselektronik bekommen und in der neben der Vertiefung des Vorlesungsstoffes weitere Themen wie Simulationen, Kühlung und Leistungsfaktorkorrektur behandelt werden.

Für die Vorlesung gibt es ein Manuskript in deutscher und englischer Sprache.

Elektrische Antriebstechnik

Die Veranstaltung beginnt mit einigen mechanischen Grundlagen. Daran schließt sich ein kurzes Kapitel über die Erwärmung elektrischer Maschinen an. Danach werden die dynamischen Eigenschaften und die Regelung von Gleichstrommaschinen behandelt. Einen Schwerpunkt bildet dabei die Ableitung und Diskussion der Regelstrategie für fremderregte Gleichstrommaschinen, die als allgemeines Grundregelverfahren angesehen werden kann.

Die Regelung von Drehfeldmaschinen beginnt mit der Einführung der Vektordarstellung (Raumzeiger), an die die Ableitung des dynamischen Verhaltens anschließt. Das Prinzip der Feldorientierung wird ausführlich erläutert und die Theorie zur feldorientierten Regelung bis hin zur Umsetzung aufgearbeitet. Den Abschluss der Vorlesung bildet ein kurzes Kapitel über die Regelung permanenterregter Synchronmaschinen.

Für die Vorlesung steht ein Manuskript zur Verfügung.

Praktikum Antriebstechnik

Hier werden die Studierenden mit allen Teilsystemen elektrischer Antriebe vertraut gemacht. Das Praktikum umfasst Versuche zu folgenden Themen:

- Drehzahlregelung einer GSM: Simulation & Inbetriebnahme
- Pulswechselrichter in der Antriebstechnik

- Feldorientierte Regelung einer ASM: Simulation & Inbetriebnahme

Mechatronik

Gegenstand dieser Vorlesung sind Anwendungen elektrischer Antriebe in mechatronischen Systemen des Maschinen- und Anlagenbaus. Zuerst wird der Begriff „Mechatronik“ am Beispiel einer Farbmischanlage eingeführt. Es folgen elektronische Getriebe sowie die drehzahl- und lagesynchrone Regelung von Antriebssystemen.

Im folgenden Abschnitt wird die zeitoptimale Regelung auf feste und bewegte Zielpunkte behandelt. Daran schließt sich ein Kapitel zur Regelung elastisch gekoppelter Zweimassensysteme an.

Ein weiteres großes Themengebiet bildet die Regelung zum Transport und Wickeln elastischer Stoffbahnen. Dazu werden einige einfache Grundlagen der Materialdehnung und der Kontinuumsmechanik eingeführt.

Es folgt ein kurzes Grundlagenkapitel zur Analyse elektromechanischer Systeme mit Hilfe der Hamilton Funktion und die Berechnung elektromagnetischer Kräfte mit Hilfe der magnetischen Energie. Am Beispiel eines Schwebemagneten des Transrapid (magnetisches Rad) wird das Verfahren zur Analyse der dynamischen Eigenschaften angewendet. Anschließend werden dazu verschiedene Regelungskonzepte diskutiert.

Für diese Veranstaltung wird ein Manuskript angeboten.

Praktikum Schaltungstechnik in der Mechatronik

In diesem Praktikum werden den Studierenden die Programmierung von Mikrocontrollern und die Implementierung von Kommunikationsprotokollen vorgestellt. Das Praktikum umfasst neben der Einführung in die Programmiersprache C die SPI und die UART-Schnittstelle. Die Versuche umfassen die folgenden Themen:

- Einführung und Ein- und Ausgabe
- Kommunikationsschnittstellen zu A/D- und D/A-Wandlern
- PC-Kommunikation
- Programmierbares Netzgerät

Univ.-Prof. Dr.-Ing. N. Kaminski



Werkstoffe der Elektrotechnik

Diese Vorlesung ist eine Pflichtveranstaltung im 2. Semester des B.Sc.-Studienganges „Elektrotechnik und Informationstechnik“ bzw. im 4. Semester des B.Sc.-Studienganges „Wirtschaftsingenieurwesen Elektrotechnik und Informationstechnik“.

Im ersten Abschnitt werden die Grundlagen des Aufbaus der Materie behandelt. Das umfasst chemische Bindungen, Kristallstrukturen und amorphe Werkstoffe, soweit es für das Verständnis der elektrotechnischen Werkstoffe von Bedeutung ist. Zusätzlich gibt es eine einfache Einführung in die wichtigsten Phasen-Diagramme binärer Legierungssysteme und in die Supraleitung.

Den zweiten und größten Abschnitt bilden die dielektrischen Werkstoffe. Hier werden die Grundlagen der dielektrischen Polarisation (Polarisationsmechanismen) sowie deren Frequenzgang, Verluste und Anisotropie behandelt. Es folgen die wichtigsten Anwendungen in Kondensatoren und als Isolatoren. Außerdem enthält dieser Teil eine Einführung in piezoelektrische Werkstoffe (Ferroelektrika und Schwingquarz) sowie eine elementare Darstellung der Lichtwellenleiter.

Der letzte Abschnitt behandelt magnetische Werkstoffe und enthält zunächst die wichtigsten Grundlagen zu ferro- und ferrimagnetischen Ordnungszuständen. Im Weiteren wird besonders auf die Verluste in Werkstoffen für Transformatoren und Induktivitäten eingegangen.

Halbleiterbauelemente und Schaltungen

Diese Vorlesung ist eine Pflichtveranstaltung im 3. Semester des B.Sc.-Studienganges Elektrotechnik und Informationstechnik.

Zunächst erfolgt eine Einführung in die mikroskopische Theorie der elektrischen Leitfähigkeit von Halbleitern (Fermi-Verteilung, Energie-Bandstruktur, Dotierung, Generation, Rekombination) und Metallen. In der Näherung des klassischen Elektronengases werden dann Drift- und Diffusionsströme behandelt. Der Grundlagenteil endet mit den Halbleitergrundgleichungen (Poisson-Gleichung, Kontinuitätsgleichung) und der Behandlung des pn-Übergangs.

Der Abschnitt zu den Bauelementen ist eine Einführung in die Grundlagen und die wichtigsten Grundkonzepte von Halbleiterbauelementen. Zunächst werden pn- und Schottky-Dioden, Bipolartransistoren (auch mit Heterosperrschicht) und deren wichtigste Kennlinien und Ersatzschaltbilder behandelt. Es folgen Sperrschicht-Feldeffekttransistoren, MOSFETs und HEMTs. Am Ende des Abschnitts steht eine kurze Einführung in optoelektronische Bauelemente wie Fotodioden und -transistoren, Solarzellen, LEDs und Laserdioden.

Schließlich werden einfache Schaltungen der analogen und digitalen Schaltungstechnik behandelt. Zur analogen Schaltungstechnik zählen die Transistorgrundschaltungen, einfache Verstärkerschaltungen, aber auch Kombinationen aus mehreren Bauelementen (Darlington, Kaskode, Stromspiegel, Differenzverstärker, komplementärer Emitterfolger). Die digitalen Schaltungen beschränken sich auf NMOS- und CMOS-Inverter.

Bauelemente der Leistungselektronik

Diese Vorlesung stellt die elementaren Grundprinzipien leistungselektronischer Schaltungen (im Vergleich zu anderen analogen und digitalen Schaltungen) dar. Als Anwendungsbeispiele dienen verschiedene Wandler-typen, vorallem DC-DC-Wandler. Aus dieser Darstellung werden die Anforderungen an die Schaltelemente der Leistungselektronik hergeleitet. Anschließend werden die wichtigsten leistungselektronischen Halbleiterbauelemente behandelt. Die Spanne reicht einerseits von der pin-Diode über den Bipolartransistor zu den verschiedenen Arten von Thyristoren und andererseits von Schottky-Dioden über MOSFETs bis zu den Varianten des IGBTs.

In den Übungen werden Grundlagen der Strommessung, der parasitären Effekte in den Leitungsführungen sowie einige wichtige Schutzbeschaltungen eingeführt. Diese Vorlesung ist so konzipiert, dass sie auch als Ergänzung zu den Veranstaltungen der mikroelektronischen Schaltungstechnik geeignet ist.

Qualitäts- und Verbesserungsmethoden

In dieser Wahlpflichtveranstaltung erlernen die Studierenden Methoden, mit denen sie nachhaltige Prozessverbesserungen realisieren können. Der Schwerpunkt liegt dabei zwar auf Produktionsabläufen, aber die Methodik lässt sich auch auf viele andere Bereiche anwenden. Den Rahmen der Veranstaltung bildet das Six Sigma Konzept, das durch den Einsatz bei General Electric bekannt geworden ist. Es beinhaltet einerseits Elemente aus Projektorganisation und -strukturierung und andererseits verschiedenste mathematisch-statistische Verfahren. In den Übungsanteilen, die jeweils in die Vorlesung eingebettet sind, wird vor allem die Statistik anhand von Würfelexperimenten behandelt und der Umgang mit Statistiksoftware erlernt. Zur Abrundung der Vorlesung wird von den Studierenden ein komplettes Verbesserungsprojekt an einer virtuellen Halbleiterproduktion durchgeführt.

Praktikum Leistungselektronik

Begleitend zur Vorlesung „Bauelemente der Leistungselektronik“ findet das Praktikum Leistungselektronik statt. Das Praktikum beinhaltet sieben Laborversuche. In den jeweils vierstündigen Veranstaltungen werden folgende Themen behandelt:

- Sicherheitsunterweisung und Untersuchung der Funktionsweise eines Fehlerstromschutzschalters (FI)
- Analyse der Methoden zur Strom- bzw. Spannungsmessung
- Parasitäre Effekte bei der Schwingungspaketsteuerung bzw. Phasenanschnittsteuerung
- Untersuchung des Schaltverhaltens eines IGBTs
- Untersuchung des Schaltverhaltens einer Diode
- Funktionsweise eines Sperrwandlers
- Funktionsweise eines Wechselrichters

Univ.-Lektor Dr.-Ing. H. Groke



Grundlagen der Elektrischen Energietechnik

Diese Vorlesung findet im 5. Semester des B.Sc.-Studienganges Elektrotechnik und Informationstechnik statt.

Sie vermittelt die grundlegenden Aspekte der Elektrischen Energietechnik, mit dem Blick auf Erzeugung und Übertragung. Den Studierenden werden die grundlegenden elektrotechnischen Zusammenhänge von Kraftwerken, Speichern, Netzen und Verbrauchern vermittelt. Neben der Energieerzeugung werden diese Kenntnisse auch in der heutigen Diskussion über die Energiewende benötigt.

Grundlagenlabor der Elektrischen Energietechnik

Das Grundlagenlabor der Elektrischen Energietechnik vermittelt an praxisnahen Versuchsaufbauten die Funktionsweise der Betriebsmittel innerhalb des Stromnetzes.

Begonnen wird mit den Eigenschaften von Freileitungen bei unterschiedlichen Belastungen, welche an einem Netzmodell nachgebildet werden. Anschließend werden die Eigenschaften von Transformatoren in unterschiedlichen Schaltungsgruppen und Belastungen an einer nachgebildeten Ortsnetzstation vermittelt. Zusätzlich wird auf die Problematik von Kraftwerken im Inselnetzbetrieb und Verbundbetrieb an einer 10 kW Kraftwerksnachbildung mit einem elektrisch erregten Synchrongenerator eingegangen. Hierbei werden so-

wohl die Einflüsse der mechanischen Leistung und der Erregung als auch der Synchronisationsvorgang auf das Netz experimentell erarbeitet. Alle Aufbauten sind dabei absolut berührungssicher ausgeführt und ermöglichen so das freie Experimentieren der Studierenden.

Digitale Signalverarbeitung in der elektrischen Energietechnik

Diese Vorlesung findet im 6. Semester des B.Sc.-Studienganges Elektrotechnik und Informationstechnik statt.

Ziel ist die Vermittlung der Kenntnisse für den anwendungsorientierten Entwurf von Mikrorechnersystemen, die Beurteilung und Erstellung eines Anforderungsprofils an eine Hardware, wie auch die Berechnung und Auslegung digitaler Regler und Filter.

Die Vorlesung gibt eine Einführung in die Grundlagen des Entwurfs und der Analyse zeitdiskreter Regelsysteme aus dem Bereich der elektrischen Energietechnik. Thematisch einführend mit der mathematischen Beschreibung zeitdiskreter Meßsignale durch Differenzgleichungen werden anschließend Transformationen der diskreten Wertefolgen in den Frequenzbereich behandelt.

Nach Behandlung dieser und weiterer grundlegender Zusammenhänge, wie der Betrachtung zusammengesetzter Übertragungstrecken oder der Berechnung zeitdiskreter Einschwingvorgänge, steht dann die digitale Messwertverarbeitung im Mittelpunkt. Unter anderem werden an dieser Stelle lineare digitale Filter- und Reglerstrukturen vorgestellt und angewendet. Die vermittelten Kenntnisse sollen dann an praxisnahen Beispielen veranschaulicht und vertieft werden.

Netzdynamik und Netzschutz

Diese Veranstaltung wird im 1. Semester des M.Sc.-Studienganges Elektrotechnik und Informationstechnik angeboten. Sie vermittelt den Studierenden, neben den dynamischen Verhalten der Übertragungsleitungen und Netztransformatoren, auch die wesentlichen Schutzrichtungen in Mittel- und Hochspannungsnetzen. Dadurch wird es den Studierenden ermöglicht, nicht nur die Lastflüsse in elektrischen Netzen zu berechnen, sondern auch entsprechende Schutzrichtungen zu entwerfen und zu dimensionieren.

Elektrische Energieanlagen

Die Veranstaltung elektrische Energietechnik findet im 1. Semester des M.Sc.-Studienganges Elektrotechnik und Informationstechnik und somit im Wintersemester statt.

Ziel ist die Vermittlung grundlegender Kenntnisse im Bereich der elektrischen Energietechnik. Zentrale Themen sind die Energieversorgung, Betriebsmittel und der Netzbetrieb im stationären Zustand. Die Studierenden erhalten eine Einführung in die Betrachtung und Modellierung der ihnen im Allgemeinen bekannten Betriebsmittel, wie Synchrongeneratoren, Leistungstransformatoren oder Leitungen und Kabeln aus energietechnischer Sicht.

Nach der Behandlung des stationären Netzbetriebs und der theoretischen Grundlagen zur Lastflussberechnung wird dann der unsymmetrische Betrieb symmetrisch aufgebauter Anlagen betrachtet. Abschließend werden die typischen und häufigsten Fehlerarten in elektrischen Netzen behandelt und berechnet.

Den Studierenden wird in der Veranstaltung der mathematische Formalismus zur Problembeschreibung und Problemlösung in praxisnahen Beispielen vermittelt und veranschaulicht.

Praktikum Energietechnik

Hier werden die Vorlesungsinhalte des Faches „Elektrische Energieanlagen“ sowie die Regelung von Kraftwerken und Netzen mit eigenen experimentellen Erfahrungen verknüpft. Das Praktikum umfasst Versuche zu folgenden Themen:

- Oberschwingungen in elektrischen Netzen
- Berechnung von elektrischen Netzen
- Leitungsberechnung - Telegraphengleichungen

Prof. Dr.-Ing. J. Wenske

Fraunhofer IWES, Bremerhaven



Windenergieanlagen I

Die Veranstaltung Windenergieanlagen I wird jährlich im Sommersemester angeboten. Dabei werden die physikalischen und technischen sowie wirtschaftlichen Grundlagen der Windenergienutzung und die Hauptkomponenten einer Windenergieanlage im Detail vorgestellt und die Lehrveranstaltungen durch Hörsaalübungen ergänzt. Wichtige Inhalte der Vorlesung sind:

- Allgemeine Einführung in die Nutzung der Windenergie – Geschichte, Bauformen, Begriffe & Abkürzungen, Windenergiesysteme
- Ressource Wind – Windsysteme, Modellierung bzw. Beschreibung des Windes und der Umgebung, Messtechnik für Windgeschwindigkeit und -richtung, Erstellung von Ertragsprognosen für die Standortsuche bzw. Planung
- Aerodynamik – Grundlagen, 2D / 3D Profile, Vergleich Tragflächen und Rotorblätter für Windenergieanlagen
- Rotor und Rotorblatt – Impuls- und Blatt-Element Theorie – BEM, Herleitung, parasitäre Effekte, Wandlungsverluste und Wirkungsgrade, Einführung in die Rotorblattauslegung
- Steuerung und Regelung – Automatisierung, Sicherheitskonzept, Betriebsführung verschiedener Anlagenkonzepte, Auslegungen für Azimut-, Pitch- und Generatorregelungen
- Antriebsstrang – mech. und elektrische Teilsysteme, Varianten, Vorstellung der Hauptkomponenten, Klassifizierung und Systemvergleiche
- Turm – Grundlagen, Varianten, Auslegung, Errichtung

- Lasten – Masse, Windkräfte, Extremlasten, Betriebsfestigkeit, Einführung in die Simulation und Lastenrechnung von Windenergieanlagen
- Planung und Betrieb – Zertifizierung, Vorschriften, Finanzierung, Planungsabläufe und Vorschriften, Service und Wartungsstrategien im Anlagenbetrieb

Windenergieanlagen II

Die Vorlesung Windenergieanlagen II wird jährlich im Wintersemester angeboten und vertieft die Grundlagen aus der Veranstaltung Windenergieanlagen I und legt einen Schwerpunkt auf die diversen technischen und nicht-technischen Aspekte von Windparks, insbesondere das Testen, Validieren und Zertifizieren von Anlagen und Subsystemen. Die Lehrveranstaltung wird durch Hörsaalübungen ergänzt. Wichtige Inhalte der Vorlesung sind:

- Transformation der Energiesysteme – Motivation für die Umstellung, Potentiale, aktueller Umsetzungsstand in Deutschland, Stand der Windenergienutzung weltweit
- Ähnlichkeitsgesetze – Einführung der Modell- und Wachstumsgesetze, Abhängigkeiten von Lasten und Kosten bei einer Windenergieanlage, allg. Ähnlichkeitsbetrachtungen
- Modellierung – Systemverhalten – Einführung in die dyn. BEM, Strukturbetrachtungen, math. Modellierung von Antriebssträngen für Windenergieanlagen
- Direkt-Drive Generatoren – Einführung in die elektromagnetische Auslegung, Kühlungskonzepte, Diskussion von Entwicklungstrends
- Regelung – Vertiefung der Gebiete Pitch-, Antriebsstrangregelung
- Netzintegration und Zertifizierung – Grid Codes, Systemdienstleistungen, elektrische Zertifizierung, allg. Anforderungen
- Testen und Validieren – Teststände für Windenergieanlagen und Subsysteme, Feldmessungen, Diskussion der technischen Anforderungen, Vorstellung von techn. Lösungen
- Technische Zuverlässigkeit – allg. Betrachtung von Ausfällen bei Windenergieanlagen, Schadensbilder, Root cause, Analysen, Condition Monitoring Systeme, detaillierte Diskussion am Beispiel der Leistungselektronik

**Prof. Dr.-Ing.
M. Meinhardt**

SMA Solar Technology AG



**Prof. i.R. Dr. phil.
nat. D. Silber**



Photovoltaik

Diese Vorlesung ist eine Pflichtveranstaltung im 2. Mastersemester. Die Veranstaltung ist in zwei Abschnitte eingeteilt.

Im ersten Abschnitt leitet Prof. Dr.-Ing. Mike Meinhardt der Firma SMA eine Blockveranstaltung. In der zweitägigen Veranstaltung gibt er zunächst eine Einführung zu erneuerbaren Energien in Deutschland und weltweit, bevor er über die Anwendung von Solaranlagen zur Netzeinspeisung und Inselnetznutzung spricht. Hier wird intensiv auf Photovoltaik-Umrichter eingegangen (z.B. Ansteuerung, Maximum Power Point).

Des Weiteren werden praktische Aspekte beim Betrieb von Solarzellen besprochen, wie z.B. Hintergründe und Auswirkung verschiedener Alterungseffekte. Eine Betrachtung von ökonomischen Aspekten und Energiemanagement sowie zukünftigen Trends in der Solarbranche runden die Veranstaltung ab.

Im zweiten Abschnitt der Vorlesung behandelt Prof. Dr. Silber die Theorie hinter der Photovoltaik. Es wird zunächst das Spektrum des Sonnenlichts erklärt, bevor die Grundlagen von Halbleitern sowie die Unterschiede zwischen direkten und indirekten Halbleitern behandelt werden. Es wird ausführlich über die Vorgänge im Halbleiter unter Einstrahlung von Sonnenlicht diskutiert.

Die vorlesungsbegleitende Übung frischt die Basiskenntnisse von Halbleitern auf.

Prof. Dr.-Ing. T. Völker

Hochschule Bremen



Berechnung elektrischer Maschinen

In dieser Vorlesung wird zunächst eine Einführung in den konstruktiven Aufbau und die Funktionsweise von Gleich- und Wechselstrommaschinen gegeben. Danach wird auf die Wicklungen, insbesondere auf die Drehstromwicklungen elektrischer Maschinen eingegangen.

Im Folgenden werden die Theorie elektrischer Maschinen anhand der Themen Strombelags- und Induktionswellen, Berechnung der Induktivitäten der Maschine und Stromverdrängungseffekte behandelt.

Die Erwärmung und Kühlung ist für die Konstruktion elektrischer Maschinen von großer Bedeutung und bildet einen weiteren Schwerpunkt der Vorlesung.

Basierend auf diesen Kenntnissen werden die maschinencharakteristischen Parameter Drehmoment, Drehzahl, Leistung und Wirkungsgrad sowie deren Zusammenhänge in Abhängigkeit von konstruktiven Daten ermittelt. Dies erfolgt konkret für die Asynchronmaschine und die Synchronmaschine. Im letzten Teil der Vorlesung werden noch diverse Sondermaschinen für spezielle Einsatzgebiete betrachtet.

Ziel der Vorlesung ist die Vermittlung sowohl der theoretischen als auch der in der Praxis gängigen Methoden zur Maschinenberechnung.

Dipl.-Ing. M. Joost



Technische Mechanik

Die Veranstaltung Technische Mechanik wird jährlich im Wintersemester angeboten. Dabei lernen die Studierenden wie eine Tragstruktur und ihre Belastung als Modell aufgefasst wird. Außerdem wird gezeigt, wie einfache Tragstrukturen aus Sicht der inneren Beanspruchung und der resultierenden Spannungen und Verformungen zu analysieren sind. Vermittelt wird außerdem, Bewegungen in Mechanismen zu analysieren. Am Ende erwerben die Studierenden Kompetenzen, die in Mechatronik und Robotik für das Systemverständnis hilfreich sind.

Die Veranstaltung ist in die folgenden Inhaltsschwerpunkte gegliedert:

- Statik der starren Körper
- Kraftsysteme, Lastformen und Resultierende
- Lagerungsformen und Lagerreaktionen
- Analyse von Fachwerkstrukturen
- Strukturanalyse von Balken und Rahmen (Schnittgrößen und ihre Verläufe)
- Elastostatik
- Elastostatik des geraden Stabs (1D Spannung und Dehnung)
- Biegetheorie des geraden Balkens
- Torsion kreiszylindrischer Wellen
- Kinematik
- Kinematik des Massenpunktes
- Kinematik des starren Körpers

Impressum

Herausgeber:
Institut für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente (IALB)
Otto-Hahn-Allee NW1
28359 Bremen

Telefon: 0421 / 218-62681
Telefax: 0421 / 218-62682
E-Mail: ial@uni-bremen.de
Internet: <http://www.ialb.uni-bremen.de>

1. Auflage, Mai 2018

