



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

Jahrbuch 2018

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.**





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,

im Jahr 2018 hat sich für das Institut eine erfreuliche Entwicklung vollzogen.

Besonders zu nennen ist dabei die Erweiterung des Instituts durch einen neuen, im Rahmen des vom BMWi geförderten Projektes HiPE-Wind eingesetzten Laborraum mit mehr als 600 m² Fläche, der in 2018 bezogen werden konnte. In diesen Laborraum werden im weiteren Verlauf des Projektes Großversuchsstände aufgebaut, an denen ganze Stromrichter für Windenergieanlagen mit Leistungen bis 10 MW gleichzeitig unter definierten Umwelt- und Lastbedingungen untersucht werden können.

Parallel dazu konnte für die Untersuchung von Stromrichtern mit Leistungen bis ca. 50 kVA ein Klimaschrank mit einem Prüfvolumen von 1 m³ beschafft werden, in dem die Umrichter in einem Temperaturbereich von -50 °C bis +80 °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 10 % bis 95 % unter Belastung untersucht werden können. Damit konnte die Infrastruktur für den Arbeitsschwerpunkt „Lebensdauer von Leistungselektronik unter multimodalen Belastungen“ spürbar erweitert werden.

Sehr erfreulich entwickelt sich auch die Zusammenarbeit des Instituts mit dem Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme IWES in Bremerhaven. Durch die gemeinsame Arbeit in mehreren Forschungsprojekten hat sich unsere Kooperation persönlich intensiviert und fachlich ausgeweitet.

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 Studierenden der Elektrotechnik, die ihre Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten in den innovativen Forschungsgebieten Antriebstechnik, Mechatronik, regenerativer Energietechnik oder Zuverlässigkeit von Leistungselektronik durchführen wollen. Das IALB ist aber nicht nur für Studierende attraktiv. Auch war wieder ein Gastwissenschaftler aus Japan das Jahr über bei uns. Shigeto Honda von Mitsubishi Electric aus Fukuoka erforschte mit dem Feuchteam zusammen das Verhalten seiner Halbleitermodule. Erfreulich ist, dass das Drittmittelvolumen des Instituts im Verlauf des Jahres 2018 weiter gesteigert werden konnte.

Darüber hinaus hat das IALB das vom European Center for Power Electronics (ECPE) e.V., Nürnberg, veranstaltete Anwendertraining zur Wide-Bandgap Systemintegration im Gästehaus der Universität Bremen auf dem Teerhof ausgerichtet und konnte so den Leistungselektronikern der Region ein attraktives Weiterbildungsangebot machen.

Das Institut konnte auch im Laufe des Jahres 2018 wieder im großen Umfang interessante Lehrveranstaltungen anbieten. Ein Überblick dazu befindet sich im Abschnitt „Lehre“ dieses Jahrbuchs.

Mit Hilfe unseres Lehrbeauftragten, Herr Prof. Dr.-Ing. Meinhardt, SMA Solar Technology AG, Niestetal, konnte das Fach „Photovoltaik“ auch im Jahr 2018 wieder angeboten werden. Herrn Prof. Meinhardt danken wir für sein großes Engagement ganz herzlich.

Wir danken allen für ihre Unterstützung und ihr Vertrauen.

Bremen im September 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 2018.....	4
Forschungsberichte 2018.....	5
Krogmann 15-50 WEA: Gondelversuchsstand und Freifeldanlage	6
Untersuchung verschiedener Regelungsansätze für ein magnetisch gelagertes Radsystem für Satelliten.....	7
Modellbildung zur Restlebensdauerermittlung von WEA-Leistungselektronik	8
Lebensdauer von SiC-MOSFETs unter erhöhtem Feuchteinfluss	10
Einfluss von bipolarer Degradation auf die Temperaturmessung bei Lastwechseltests an Siliziumkarbid MOSFETs.....	11
Modellbildung und Regelung von Kettenkratzerförderern für Bergbauanwendungen	12
Verteilte Simulation von Windparknetzen	13
Modellbasiertes Überwachungssystem für Frequenzrichter in Windenergieanlagen.....	14
Regelung einer Windenergieanlage mit doppeltgespeister Asynchronmaschine mit einem fiktiven Synchronmaschinenmodell	15
Validierung einer neuen Regelstrategie für Windenergieanlagen durch den Einsatz eines Zentralrechners zur Modellberechnung	16
Leistungsausgleich in einem dezentral geregelten Gleichstromübertragungsnetz	17
Synchronisierte Messsysteme	18
Prüfquelle für passive Komponenten auf Basis von SiC-Leistungshalbleitern.....	19
Intelligentes Transportsystem auf Basis innovativer Linearantriebe mit berührungsloser Energie- und Signalübertragung	20
Überstromschutzschalter für Gleichspannung.....	21
Multimodale Belastungen der Hochleistungselektronik von Windenergieanlagen.....	22
Lehrveranstaltungen 2018.....	23
Lehrveranstaltungen des Instituts	24
Elektromagnetische Energiewandlung	24
Stromrichtertechnik	24
Elektrische Antriebstechnik	25
Praktikum Antriebstechnik	25
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
Praktikum Schaltungstechnik in der Mechatronik.....	28
Windenergieanlagen I	29
Photovoltaik.....	30
Windenergieanlagen II.....	30
Technische Mechanik	31

Mitarbeiter des IALB im Jahr 2018



Institutsleitung

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

Oberingenieure

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

Sekretariat

E. Krüger
H. Janssen
C. Hiller

Technische Mitarbeiter

G. Schwerdt-
feger
F. Trocha
B. Vahlenkamp

Forschungsgruppen

Elektrische Antriebe

M. Huchulski
A. Ernst
D. Matthies

Elektrische Maschinen

S. Behrens
M. Joost
A. Norbach
J. Ulbrich

Leistungs- elektronik

T. Y. Hoa Dinh
W. Holzke
S. Menzel
R. Reimann
H. Sauerland

Zuverlässig- keit

A. Brunko
S. Clausner
M. Hanf
F. Hoffmann
J.-H. Peters
S. Rugen
C. Zorn

Leistungs- bauelemente

M. Adelmund
H. Lutzen
A. Würfel

Forschungsberichte 2018

Krogmann 15-50 WEA: Gondelversuchsstand und Freifeldanlage

Zur Durchführung von praxisnaher Windenergieforschung wurde am IALB ein 50 kW WEA-Gondelversuchsstand mit einer aerodynamischen Echtzeit-Rotornachbildung entwickelt und aufgebaut. Dazu wurde die vollständige Gondel einer Krogmann 15-50 WEA mit demontierten Rotorblättern in der Maschinenhalle des IALB aufgebaut und in Betrieb genommen. Das Antriebsmoment des Windes wird in der Maschinenhalle durch eine aerodynamische Rotornachbildung berechnet und mit einer Transversalflussmaschine bereitgestellt. Ziel des Versuchsstandes ist es, dass vollständige Verhalten einer realen Windenergieanlage in einer sicheren Laborumgebung möglichst genau nachzubilden. Das Konzept des Gondelversuchsstandes ist in Abb. 1 dargestellt.

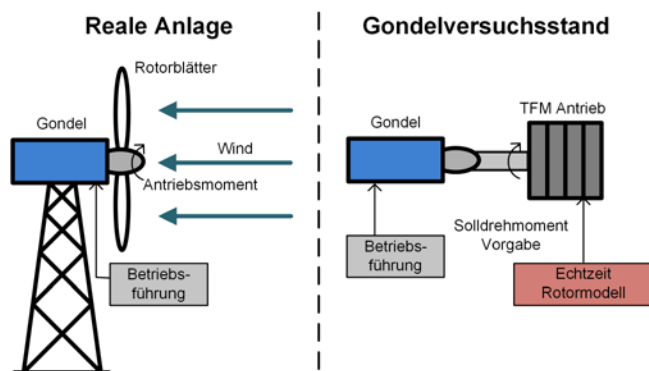


Abb. 1: Konzept des Gondelversuchsstands

Parallel dazu wird in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWES eine zweite WEA des Typs Krogmann 15-50 im Freifeld aufgebaut und in Betrieb genommen. In Kombination ermöglichen diese beiden Versuchsstände Forschungen im Bereich Windenergieanlagen – beginnend bei Simulationen, über Versuche unter realitätsnahen Bedingungen in sicherer Laborumgebung bis hin zur Verifikation der Ergebnisse an einer Freifeldanlage.

Im vergangenen Jahr wurde am IALB ein umfassendes

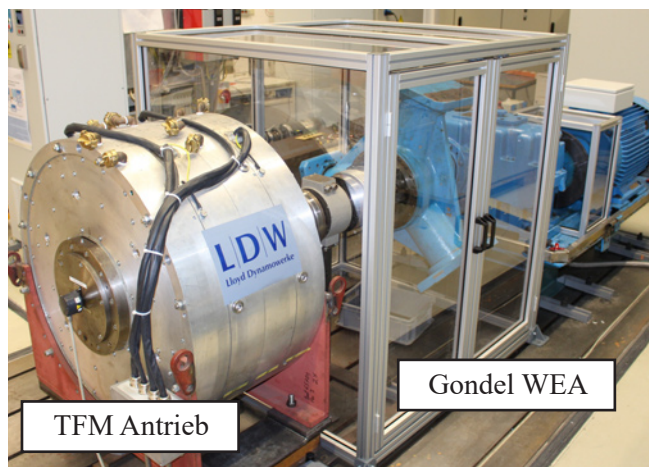


Abb. 2: Gondelversuchsstand mit Antrieb

Sicherheitskonzept erarbeitet und auf dem Prüfstand installiert. Der fertig aufgebaute Prüfstand ist in Abb. 2 zu sehen.

Das Sicherheitskonzept umfasst u.a. Sicherheitsroutinen in der Software und Berührungsschutz für die rotierenden sowie die unter Spannung stehenden Teile. Weiterhin wurde ein frei programmierbarer Vollumrichter auf IGBT-Basis aufgebaut und auf dem Prüfstand installiert.

Beim Aufbau der Freifeldanlage wurden im vergangenen Jahr zwei wesentliche Meilensteine erreicht. Zum einen wurde die Anlage vollständig aufgebaut. Dies umfasst den Aufbau des Turmes, die Installation der Gondel inklusive der Rotorblätter, die Betriebsführung und den Umrichter. Im zweiten Schritt wurde die Krogmann 15-50 WEA



Abb. 3: Krogmann 15-50 Freifeldanlage

wieder in Betrieb genommen. Die Freifeldanlage ist in Abb. 3 zu sehen.

Für den Gondelversuchsstand ist wichtig, dass die Dynamik der gesamten Anlage und das elektrische Moment am Generator identisch mit denen auf der realen Anlage sind. Um dies zu erreichen, wird eine Echtzeit-Skalierung in der Rotornachbildung durchgeführt.

Im Laufe des vergangenen Jahres wurde der Gondelversuchsstand weiter ausgebaut. Es wurden Sicherheitskonzepte umgesetzt und ein frei programmierbarer Umrichter integriert. Mit der Inbetriebnahme dieses Prüfstandes sichert sich das IALB einen führenden Platz in der realitätsnahen Windenergieforschung.

Untersuchung verschiedener Regelungsansätze für ein magnetisch gelagertes Radsystem 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 evaluiert. Basierend auf den Ergebnissen wurden am IALB verschiedene Regelungsansätze für die magnetische Lagerung untersucht. Das Lagerkonzept besteht aus acht unabhängig voneinander angesteuerten Aktuatoren auf Lorentzkraft Basis. Die prinzipielle Struktur eines Aktuators ist in Abb. 1 gezeigt.

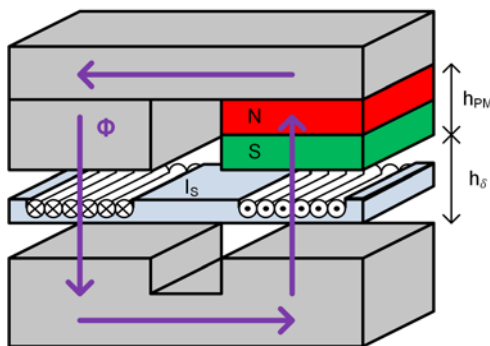


Abb. 1: Konzeptskizze eines Aktuators

Durch einen Permanentmagneten und einen Eisenkern wird ein magnetischer Fluss erzeugt, der ein konstantes magnetisches Feld im Luftspalt aufbaut. Abhängig vom eingepprägten Lagerstrom I wird eine Lorentzkraft F_L erzeugt. Für diese gilt:

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

Die auftretende Kraft ist dabei direkt proportional zum Lagerstrom.

Durch die geschickte Anordnung der Aktuatoren kann die Positionsregelung entlang der X-, Y- und Z-Achse unabhängig voneinander durchgeführt werden. Die dafür notwendige Anordnung der Aktuatoren ist in Abb. 2 dargestellt.

Die vier, außen angeordneten, Aktuatoren ermöglichen

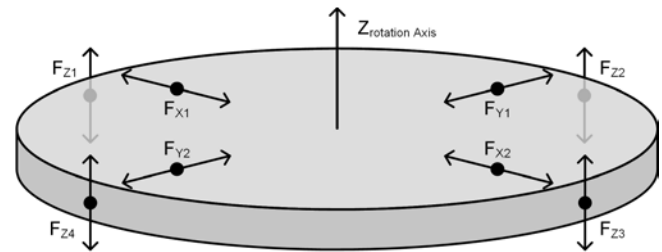


Abb. 2: Lagerkonzept mit acht Aktuatoren

zusätzlich eine Verdrehung der Schwungmasse um die X- bzw. die Y-Achse.

Die Verdrehungen um die X- und Y-Achse sind regelungstechnisch besonders herausfordernd, da hier gyroskopische Effekte die Verdrehungsmomente, abhängig von der Drehzahl der Schwungmasse, von der einen auf die andere Achse koppeln.

Ziel ist es, eine Regelung zu entwickeln, die die Schwungmasse stabil in Position hält, die gyroskopischen Effekte kompensiert und die auftretenden Vibrationen im System reduziert. Dazu wurden herkömmliche kaskadierte Regelungsstrukturen mit Zustandsregelungen verglichen und hinsichtlich ihrer Dynamik und Robustheit beurteilt.

Um die gyroskopischen Effekte zu kompensieren, wurde eine Entkopplung der Verdrehungsachsen basierend auf den Eingangsspannungen entworfen. Dazu wurde ein Beobachter in die Regelung integriert. Abb. 3 zeigt die Sprungantworten der untersuchten Regler.

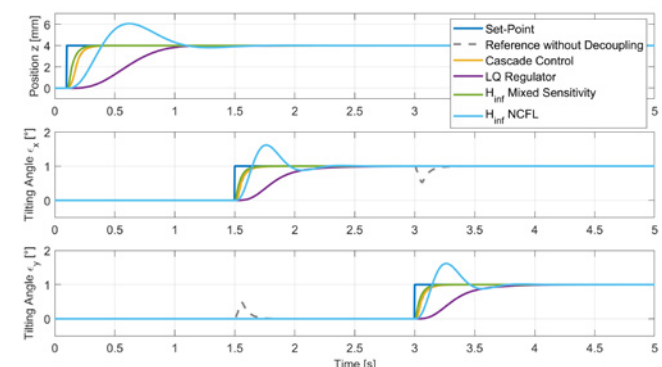


Abb. 3: Sprungantworten der untersuchten Regler

Alle untersuchten Regler sind in der Lage, das System ohne konstante Reglerabweichung und innerhalb der definierten Stellgrößen zu regeln. Unterschiede zeigen sich in der Dynamik, den benötigten Messgrößen und damit in den benötigten Sensoren. Es wurden Auslegungsstrategien herausgearbeitet, die an einem realen Radsystem evaluiert werden sollen.

Modellbildung zur Restlebensdauerermittlung von WEA-Leistungselektronik

Hintergrund

Im Rahmen des Projekts WEA-Retrofit wurden 8 Windenergieanlagen über 2,5 Jahre untersucht. Das Hauptziel des Projektes ist die Lebensdauerabschätzung der in den Anlagen eingebauten Leistungshalbleiter anhand ihres thermomechanischen bzw. elektrochemischen Status.

Das Model basiert auf der Analyse der Umgebungsparameter und der elektrischen Belastungen, denen Leistungsbaulemente im Feld ausgesetzt sind. Die Daten ermöglichen es, die Alterungsbedingungen im Labor zu imitieren und sie zu beschleunigen. Die darauffolgende Untersuchung erlaubt eine Abschätzung zur Restlebensdauer.

Coffin-Manson-Modell, thermomechanischer Status

Mit Hilfe des Coffin-Manson-Modells wird in der Werkstofftechnik eine Zuverlässigkeitsabschätzung eines Werkstücks unter mechanischer Beanspruchung erstellt. Da Bonddrähte und Verbindungen des Halbleiterbauelementes unter ständigen Temperaturschwankungen mechanischen Belastungen unterliegen, lässt sich eine ähnliche Gesetzmäßigkeit anhand von Temperaturhuben zur Beschreibung der Zuverlässigkeit mit Gleichung 1 angeben.

$$N_f = A \cdot \Delta T_j^{-\alpha} \exp\left(\frac{E_a}{k_B \cdot T_m}\right) \quad (1)$$

Die Gleichung stellt einen Zusammenhang zwischen der mittleren Sperrschichttemperatur des Halbleiters und der Lebensdauer dar. Hierbei ist k_B die Boltzmann Konstante und E_a die Aktivierungsenergie. Der Exponent γ sowie der Faktor A ermöglichen die genauere Anpassung der Formel an Messungen. Für eine korrekte Ermittlung der Testparameter werden mehrere Lastwechseltests durchgeführt.

Peck-Modell, elektrochemischer Status

Das Peck-Modell wurde entwickelt, um die Restlebensdauer einer gekapselten Mikroschaltung (PEM) unter dem Einfluss von Korrosion zu untersuchen.

Bei beschleunigten Tests wird ein gekapseltes Bauelement einer Atmosphäre von 85 °C und 85 % rel. Feuchte über einen Zeitraum von 1000 Stunden ausgesetzt. Ein 1000 Stunden Standardzuverlässigkeitstest H³TRB, der auf Pecks Modell basiert, entspricht 25 Jahren Belastungen unter normalen Bedingungen.

In der Gleichung 2 beschreibt a_f die Alterungsbeschleunigung der Bauelemente bei Testbedingungen (Index a) gegenüber den normalen Bedingungen im Feld (Index u). RH stellt dabei die relative Feuchte, x und y empirisch

ermittelte Konstanten, E_a die Aktivierungsenergie, k die Boltzmann Konstante, T die Temperatur und V die angelegte Spannung dar.

$$a_f(RH, T, V) = \left(\frac{RH_a}{RH_u}\right)^x \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k} \cdot \left[\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a}\right]\right) \cdot \left(\frac{V_a}{V_u}\right)^y \quad (2)$$

Abschätzung zur Restlebensdauer

Im Projekt wurden bestehende Windkraftanlage untersucht. Die durch die Versuche abgebildeten Einsatzbedingungen sind allerdings auch auf die Anlagen der neueren Generationen anwendbar. Ausgehend von der Analyse der Phasenströme und Phasenspannungen werden Schalt- und Leitungsverluste berechnet. Diese Daten, zusammen mit den Kühlbedingungen, dienen als Eingangsdaten zur Berechnung der Sperrschichttemperatur mittels Cauer-Netzwerk, dessen Z_{th} zuvor im Labor bestimmt wurde. Nachfolgend liefert die Rainflow-Methode die Information für die Berechnung des Lebensdauerverbrauchs. Jeder Zyklus basiert dabei auf der Coffin-Manson-Formel. Die voraussichtliche Lebensdauer wird linear akkumuliert (Miner's Rule) und liefert den thermomechanischen Status des Moduls.

Analog dazu wird der elektrochemische Zustand basierend auf der angelegten Spannung, der Sperrschichttemperatur und dem Mikroklima um die Chipoberfläche abgeschätzt, was die Umgebungsdaten und ein weiteres Cauer-Netzwerk zur Modellierung des Feuchteintritts erfordert. Das Gesamtmodell wurde echtzeitfähig implementiert, so dass Restlebensdauer im täglichen Betrieb abgeschätzt werden kann.

Felddaten und Rückschlüsse

Um das Gesamtmodell zu speisen, wurden mehrere Windturbinen während typischer und außergewöhnlicher Arbeitsbedingungen überwacht. Als Beispiel zeigt Abb. 1 die Protokolldaten über eine Woche im Sommer bzw. über zwei Wochen im Winter, während Abb. 2 aufgenommene Strom- und Spannungsdaten während der Durchfahrt des Synchronpunkts der DFIG-Windenergieanlage zeigt.

Die auf der Grundlage der Sommerzeitdaten berechnete Lebensdauer beträgt etwa 1000 Jahre sowohl für den thermo-mechanischen als auch für den elektrochemischen Status, während die Winterdaten 200 Jahre für den thermomechanischen und 3000 Jahre für den elektrochemischen Status ergeben. Die Abkühlung auf 0 °C während der Abschaltung im Winter verursacht die strengeren Temperaturzyklen im Vergleich zum Normalbetrieb, wobei die moderaten Sperrschichttemperaturen und die trockene Luft feuchtigkeitsbedingte Probleme verhindern. Die Daten deuten jedoch darauf hin,

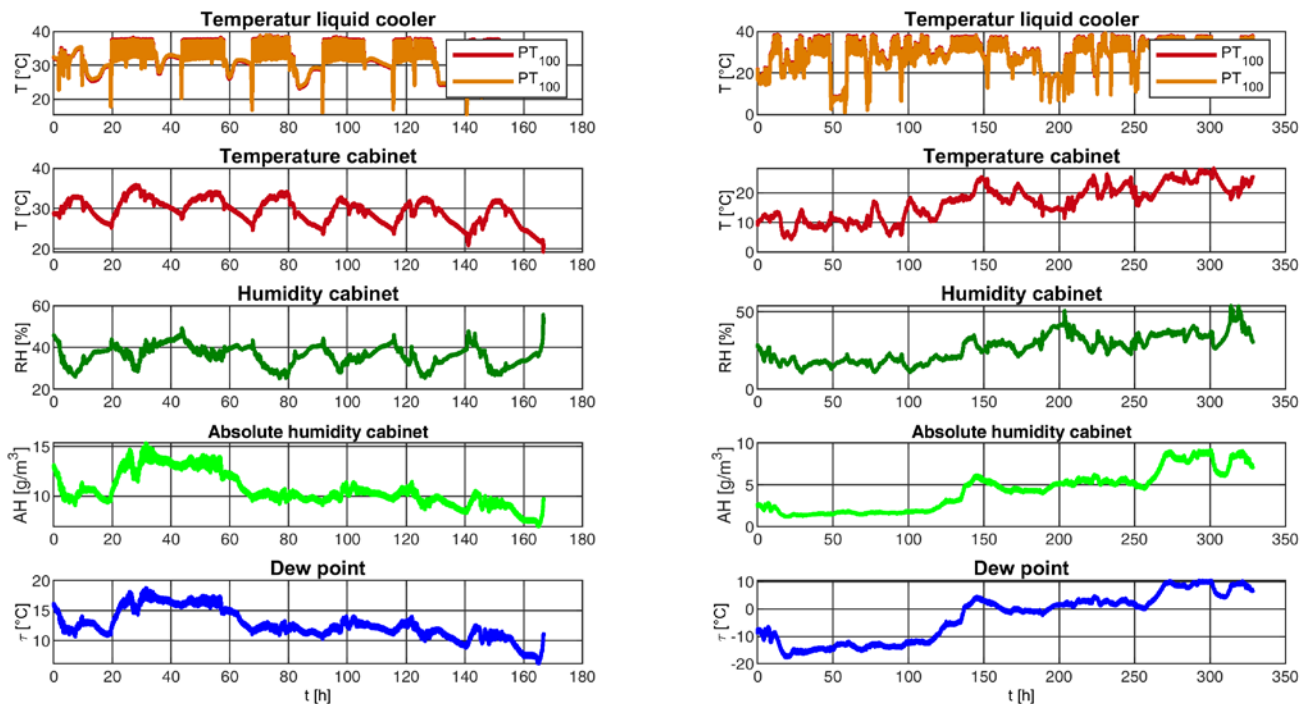


Abb. 1: Messdaten über eine Woche in Sommer (16.08.2017-23.08.2017, links) bzw. zwei Wochen im Winter (27.02.2018-13.03.2018, rechts, nur erste Woche analysiert)

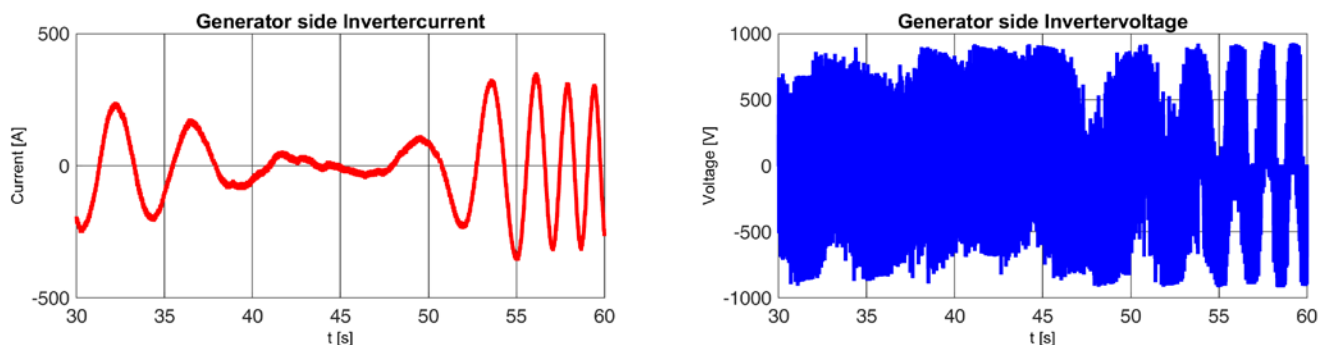


Abb. 2: Messdaten über eine Woche in Sommer (16.08.2017-23.08.2017, links) bzw. zwei Wochen im Winter (27.02.2018-13.03.2018, rechts, nur erste Woche analysiert)

dass keiner der Degradationsmechanismen zu Ausfällen führen sollte. Der Umrichter der Windturbine stellt sich als deutlich überdimensioniert für die aufgenommenen Belastungen dar.

Normalerweise wird der netzsynchrone Betrieb der DFIG-Windturbine als der kritischste Betriebspunkt angesehen, da der Strom in einem Halbleiter mehr oder weniger kontinuierlich ist und die Temperaturschwankung sehr hoch sind. Die aus den Daten in Abb. 2 berechnete Lebensdauer beträgt jedoch noch 200 Jahre, wenn der Umrichter das dargestellte Lastprofil wiederholt durchlaufen würde. Auch bei diesem hypothetischen Extrembetrieb ist nicht mit Ausfällen während der Lebensdauer der Windkraftanlage zu rechnen. Die Ergebnisse zeigen, dass beide untersuchten Mechanismen für die betrachteten Windkraftanlagen eine Le-

bensdauer von weit über 100 Jahren ergeben würden. Offensichtlich sind andere Mechanismen für die frühzeitigen Ausfälle verantwortlich. Dennoch ist das etablierte Echtzeitmodell ein hervorragendes Werkzeug, um entweder die untersuchten Mechanismen auch unter härteren Bedingungen auszuschließen oder ihre Relevanz unter Extrembedingungen nachzuweisen.

Gefördert durch:



Förderkennzeichen:
0325758A-D

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Lebensdauer von SiC-MOSFETs unter erhöhtem Feuchteinfluss

Am IALB werden seit vielen Jahren Untersuchungen zur Lebensdauer von Leistungshalbleiterbauelementen durchgeführt. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Zuverlässigkeit unter hoher Feuchte, hoher Temperatur und Spannung (H³TRB-Test). Durch solche Tests können Betriebsdauern von über 20 Jahren innerhalb von 1000 h simuliert werden. In aktuellen Testkampagnen werden vor allem Bauelemente aus neuen Materialien wie Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) untersucht.

Im Bereich der 1200 V Leistungshalbleiter wird der Markt aktuell von Si-IGBTs dominiert. Seit einigen Jahren drängen jedoch SiC-MOSFETs in diesen Spannungsbereich vor und bieten eine Alternative zum Si-IGBT. Über die Zuverlässigkeit der SiC-MOSFETs liegen zurzeit noch wenig Daten vor und die Lebensdauer im Feld kann noch nicht abgeschätzt werden. Für diesen Test wurden 1200 V SiC-MOSFETs im TO247-Gehäuse verwendet. Die Gehäuse wurden für den Versuch geöffnet und mit Silikongel vergossen, um eine optische Auswertung der Degradation zu ermöglichen.

Um einen Eindruck der Lebensdauer von Leistungshalbleiterbauelementen zu bekommen, gibt es verschiedene Indikatoren, welche im H³TRB-Test untersucht werden können. Die Degradation der Bauelemente erfolgt (unter Feuchteinfluss) primär am Randabschluss der Halbleiterchips und erhöht den parasitären Stromfluss (Leckstrom) unter Sperrspannung. Wird der Leckstrom zu groß, kann es zum Durchbruch am Rand bzw. zur Zerstörung des Bauteils kommen. Dieser Leckstrom kann während des Tests mitgeschrieben sowie in Zwischenmessungen bei definierten Spannungen erfasst werden. Bei Si-IGBTs wird dieser Effekt unterhalb von 1000 h im Test festgestellt und führt dort bereits (je nach Bauteil) zu Ausfällen. Im Gegensatz dazu kann dieses Verhalten bei den getesteten SiC-MOSFETs nicht fest-

gestellt werden (Abb. 1). Es treten zwar Fehler im Test auf, es handelt sich dabei jedoch nicht um katastrophale Ausfälle (Zerstörung des Bauteils). Weiterhin steigt der Leckstrom über die Zeit nicht signifikant an, sondern unterliegt lediglich den erwarteten Oszillationen. Innerhalb des Tests von nahezu 2000 h ist ein Bauteil katastrophal ausgefallen und war nach dem Fehler nicht mehr funktionstüchtig. Im Vergleich zu Si-IGBTs der gleichen Spannungsklasse ergibt sich beim SiC-MOSFET eine deutlich höhere Robustheit gegen Feuchtigkeit, trotz der, im Gegensatz zu Si-IGBTs, erhöhten Feldstärke am Randabschluss.

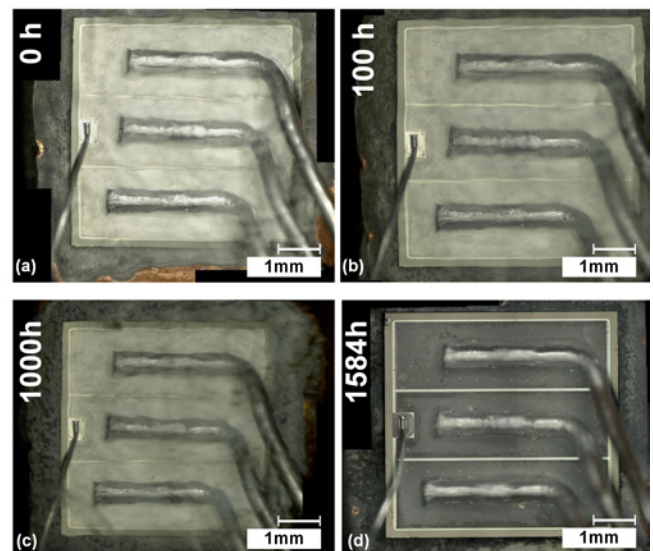


Abb. 2: Optische Untersuchung eines Chips nach unterschiedlichen Testzeiten

Zusätzlich zum Leckstrom kann die Degradation am Chip durch eine optische Untersuchung unter dem Mikroskop festgestellt werden. Am Randabschluss wird Aluminium-Korrosion oder Dentritenwachstum erwartet, kann jedoch bei den SiC-MOSFETs nach 1584 h nicht festgestellt werden (Abb. 2).

Aus dem Feuchtest mit SiC-MOSFETs ergeben sich einige Unterschiede zu bisherigen Tests mit Si-IGBTs. Die Degradation ist mit den bisherigen Mitteln nicht feststellbar oder findet erst deutlich später statt. Bei den angewandten Testmethoden ergibt sich auf Basis dieser Daten eine deutlich erhöhte, erwartete, Lebensdauer unter Feuchteinfluss bei SiC-MOSFETs. Es kommt zwar zu Ausfällen, jedoch sind diese nicht zerstörend, sondern führen nur zu einer kurzzeitigen Erhöhung des Leckstroms.

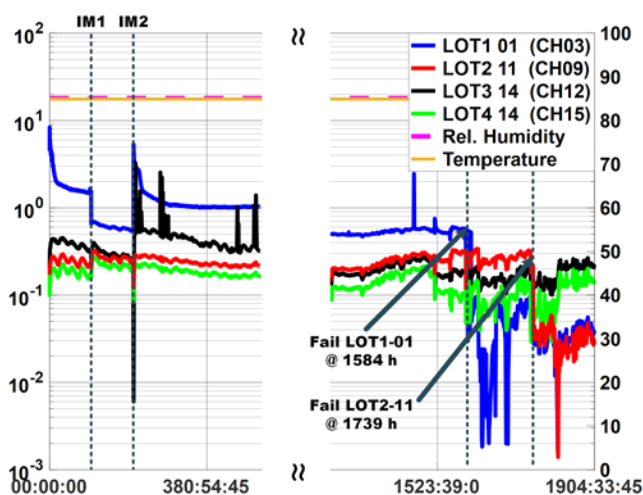


Abb. 1: Leckstrom bei H³TRB-Test 1

Einfluss von bipolarer Degradation auf die Temperaturmessung bei Lastwechseltests an Siliziumkarbid MOSFETs

Siliziumkarbid MOSFETs bieten aufgrund ihrer Unipolarität und ihrer integrierten pin-Diode Vorteile gegenüber Silizium IGBTs. Diese Diode kann aufgrund von Kristallfehlern degradieren, die sich unter Strombelastung irreversibel ausweiten. Dadurch erhöht sich die Durchlassspannung der Diode. Dieses Phänomen wird als bipolare Degradation (BD) bezeichnet und hängt stark von der Qualität des Basismaterials sowie der Prozessierung ab. Somit schwankt die Ausprägung von Bauteil zu Bauteil. Da bei Lastwechseltests der Spannungsabfall über der integrierten Diode bei einem kleinen Messstrom als Temperatursensitiver elektrischer Parameter (TSEP) herangezogen wird, kann BD eine Verfälschung der Temperaturmessung über die Laufzeit eines Lastwechseltests verursachen. Der Einfluss von BD wurde im Rahmen des SPEED Projektes an insgesamt vier 3,3 kV SiC-MOSFETs untersucht. Dazu wurden Lastwechseltests durchgeführt und die Sperrschichttemperaturen überwacht. Abb. 1 zeigt für einen der Prüflinge den Verlauf der Drain-Source Spannung, des thermischen Widerstandes sowie der minimalen und maximalen Sperrschichttemperatur ($T_{vj,min}$ bzw. $T_{vj,max}$), welche mittels der integrierten Diode gemessen wurde. Obwohl sowohl der thermische Widerstand als auch der Spannungsabfall und somit auch die Verlustleistung steigen, sinkt $T_{vj,min}$ um ca. 1 °C ab. Die anderen Prüflinge zeigten ein über die Testdauer konstantes $T_{vj,min}$. Um zu verifizieren, dass diese Absenkung der minimalen Sperrschichttemperatur ein durch BD hervorgerufener Effekt ist, wurden alle Prüflinge einer Dauerstrombelastung unterzogen. In Abb. 2 ist zu erkennen, dass der bereits auffällige Prüfling deutliche Degradation

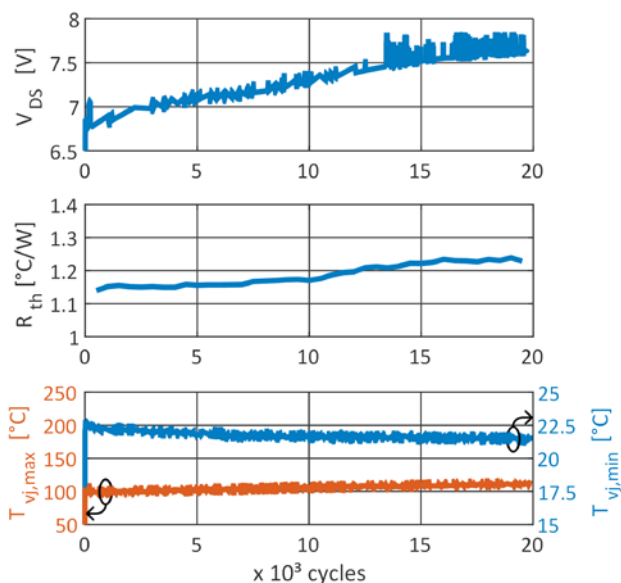


Abb. 1: Verlauf der Drain-Source Spannung, des thermischen Widerstands und der minimalen und maximalen Sperrschichttemperatur während eines Lastwechseltests an einem SiC MOSFET

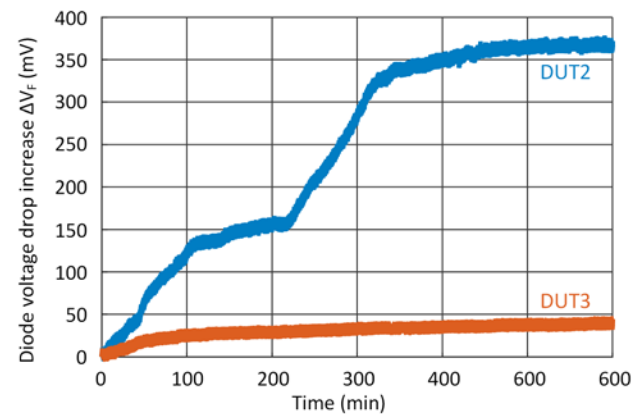


Abb. 2: Spannungsverlauf während der Dauerstrombelastung

aufweist, während die anderen Prüflinge (beispielsweise an DUT3 gezeigt), wesentlich geringere Degradation zeigen.

Um die Auswirkung zu quantifizieren wird die Kalibrierkurve nach der Dauerstrombelastung erneut aufgenommen. Es zeigt sich, dass der Effekt stark temperaturabhängig ist und mit steigender Temperatur abnimmt, dargestellt in Abb. 3. Das erklärt ebenfalls, den Effekt während des Lastwechseltests, wo ein Einfluss auf $T_{vj,min}$ deutlich erkennbar ist, jedoch kein Einfluss auf $T_{vj,max}$ zu sehen ist. Außerdem ist zu erkennen, dass die Auswirkungen mit geringerer Stromdichte abnehmen. Eine Verfälschung der Temperaturmessung während Lastwechseltests von SiC-MOSFETs kann also durch die Wahl eines entsprechend geringen Messstroms minimiert werden.

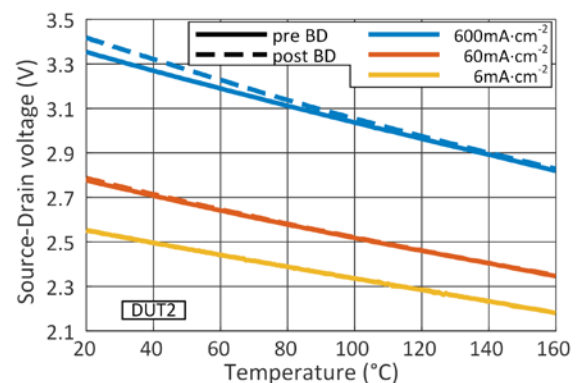


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Drain-Source Spannung und Temperatur für verschiedene Stromdichten vor und nach Dauerstrombelastung



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.

Modellbildung und Regelung von Kettenkratzerförderern für Bergbauanwendungen

Der Abbau und Transport von Steinkohle, Erz und Salz erfolgt heute ausschließlich mit mechatronischen Systemen. Das gesamte Abbausystem besteht aus verschiedenen Abbau- und Transporteinheiten, wie z. B. Walzenladern, Kettenkratzerförderern und Transportbändern. Diese werden über Frequenzumrichter geregelte elektrische Antriebe in Kombination mit Getrieben bewegt. Aufgrund der Komplexität der Regelung, infolge der anwendungstechnischen Anforderungen, wird in einem aktuellen Forschungsprojekt insbesondere der Kettenkratzerförderer betrachtet.

Der Kettenkratzerförderer besteht aus einem Kettentrog, in dem die Kette und die daran befestigten Mitnehmer geführt werden. Über elektrische Antriebe an beiden Enden des Kettentrogs werden die Kettensterne angetrieben und somit die Kette bewegt. Auf der Seite, zu welcher das Schüttgut gefördert wird, befindet sich der Hauptantrieb, welcher meist aus zwei Motoren besteht. Auf der anderen Seite befindet sich der Hilfsantrieb, dessen Aufgabe es ist, die Kette im Unterturm zurück zu ziehen. Je nach Auslastung des Hauptantriebes kann der Hilfsantrieb unterstützend wirken.

Der Abbauprozess findet meist Untertage statt. Dabei wird die Kohle mit einem Hobel aus dem Flöz abgetragen und fällt auf den Kettenkratzerförderer. 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 unterschiedlich stark gedehnt. Die bisher eingesetzte Lastausgleichsregelung zum Betrieb des Kettenkratzerförderers basiert auf stark vereinfachten dynamischen Modellen und ist nicht speziell für eine Belastungsreduzierung ausgelegt. Im Verlauf des Projekts wurde zunächst ein Entwurfsmodell

für eine belastungsreduzierende Regelung erstellt und auf dieser Basis eine entsprechende Regelung entwickelt.

Zur Evaluation dieser Regelung wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern ein komplexes DEM-Modell (Diskrete Elemente Methode) des Transportsystems erstellt, welches in Abb. 1 gezeigt ist. Weiterhin stehen detaillierte Modelle der Frequenzumrichter und Antriebe zur Verfügung. Die Optimierung der Reglerparameter wird auf Basis von Simulationen mit diesen Modellen erfolgen. Dabei soll auch ermittelt werden, welche Anforderungen dazu an die Stelleinrichtungen, insbesondere an die Frequenzumrichter zu stellen sind.

Weiterhin wurde ein Prüfstand zum Test der Regelung konzipiert. Im nächsten Schritt soll dieser Prüfstand im Prüffeld des Projektpartners aufgebaut und die Regelung auf entsprechenden bergbauspezifischen Frequenzumrichtern implementiert und in Betrieb genommen werden. Durch die softwareoptimierten Frequenzumrichter sollen sowohl die Synchronisation der Antriebe des Kettenkratzerförderers verbessert, als auch die auftretenden mechanischen Belastungen auf regelungstechnischem Wege vermindert werden.

Durch den Aufbau des lastnachbildenden Prüfstandes werden die simulatorisch ermittelten Ergebnisse überprüft und in die Praxis überführt.

Förderkennzeichen:
02P15K581

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

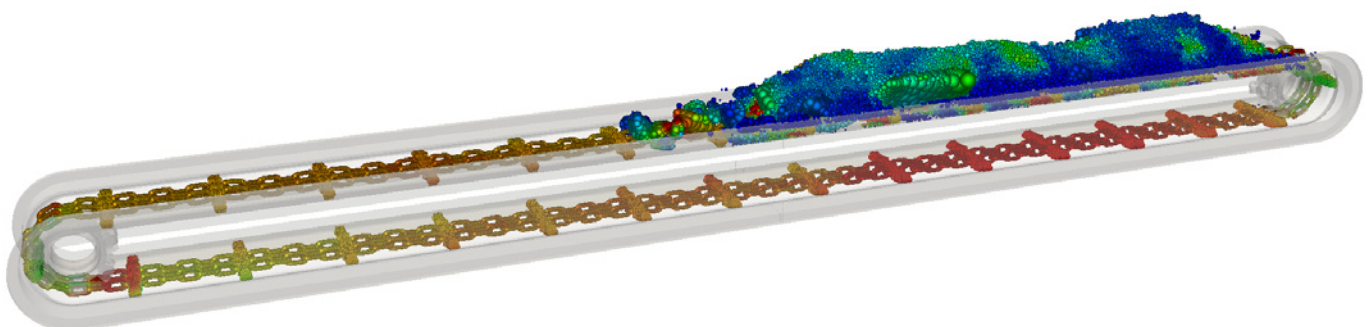


Abb. 1: DEM-Simulation eines Kettenkratzförderers zur detaillierten Regelung

Verteilte Simulation von Windparknetzen

Die Nutzung von regenerativen Energiequellen, wie z. B. Wind und Sonne, zur Erzeugung von elektrischer Energie führt beim Einsatz von Windenergie- und Photovoltaikanlagen zu mehr Frequenzumrichtern, die am Versorgungsnetz betrieben werden. Während konventionelle Kraftwerke einen Beitrag zur Stabilisierung des Versorgungsnetzes leisten, ist dies mit den Standardregelungen in Frequenzumrichtern noch nicht möglich. Gegenstand aktueller Forschung ist es, neue Regelungskonzepte für Frequenzumrichter zu erproben.

Voraussetzung für diese Arbeiten sind detaillierte Modelle. Mit steigendem Detailgrad der Modelle steigt aber auch die Komplexität und die benötigte Rechenzeit. Am IALB sind bereits Modelle von Teilsystemen einer WEA, wie z. B. Generator, mechanischer Triebstrang, Frequenzumrichter, usw. erstellt worden. Weiterhin wurde eine Netznachbildung mit dynamischem Verhalten modelliert, um die Reaktion des Netzes bei Einspeisung von Energie durch die WEA nachbilden zu können. Das Zusammenschalten dieser Teilmodelle zu einem Gesamtsystem erhöht den Rechenaufwand jedoch erheblich. Ziel eines Forschungsprojektes am IALB ist es, das komplexe Gesamtmodell eines Windparks auf mehrere Rechner oder Rechenkerne zu verteilen, um damit die Rechenzeit und Komplexität zu reduzieren.



Abb. 1: Rechnerverbund bestehend aus vier Einzelsystemen

Ein erster Ansatz ist, die Berechnung der Modelle der WEA auf jeweils einem Rechner durchzuführen sowie die Berechnung des Netzes auf einem weiteren. Um dies zu erproben, wurde am IALB ein Rechnerverbund aus Standardkomponenten aufgebaut (Abb. 1), welcher über ein Netzwerk Daten austauschen kann.

Zur Simulation wird ein Rechnersystem als Server verwendet, welcher die Simulation koordiniert. Sowohl auf dem Server als auch auf den Clients werden dann die Teilmodelle schrittweise berechnet. Nach jedem Rechenschritt werden die Daten ausgetauscht und jedes Teilmodell berechnet wieder einen kurzen Zeitschnitt. Dies wird fortlaufend durchgeführt, bis die Si-

mulation abgeschlossen ist.

Beim ersten Rechnerverbund war die Zeit für Datenübertragung im Verhältnis zur Rechenzeit unverhältnismäßig hoch. Deshalb wurde mit FPGA basierten PC-Erweiterungskarten (Abb. 2) ein spezialisierter Datenbus für kurze Distanzen und kleine Datenpakete aufgebaut. Hier konnten bereits Datenübertragungsraten erreicht werden die aktuell erst mit sehr leistungsfähigen Rechnern und Netzwerkkarten erzielbar sind.

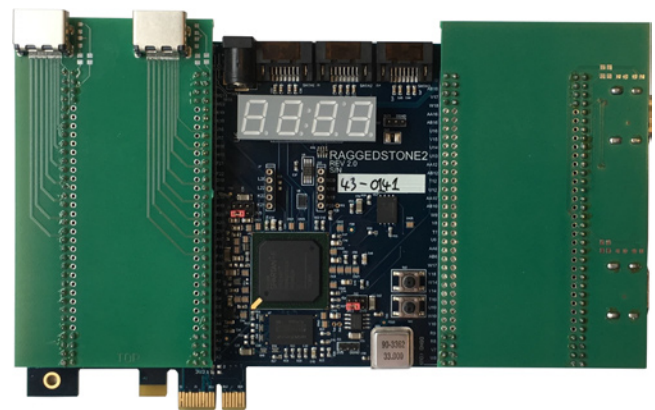


Abb. 2: FPGA basierte PC-Erweiterungskarte

Die Eingabe der Modelle soll möglichst mit Standard Werkzeugen erfolgen können. Um die Vielzahl der Modelle, die bereits für die Regelung von Generatoren und Frequenzumrichtern am IALB erstellt wurden, für einen Rechnerverbund weiter nutzen zu können, werden diese zurzeit so angepasst und modularisiert, so dass sie über einheitliche Schnittstellen zusammengesetzt werden können. Die Prozeduren für die Datenübertragung können aus den Modellen automatisch erzeugt werden. Aktuell wurde ein neuer Rechnerverbund aufgebaut. Dieser besteht aus vier Rechnern, welche mit einem Standard 10 Gbit Netzwerk verbunden sind. Mit der zuvor erprobten Lösung könnten auch noch höhere Datenübertragungsraten erzielt werden. Jeder Rechner hat 16 Rechenkerne, d.h. zusammen stehen in dem Rechnerverbund 64 Rechenkerne zur Verfügung. Gegenstand aktueller Arbeiten ist es, die Modelle so aufzubereiten, dass alle Rechenkerne für die Berechnung genutzt werden können.

Modellbasiertes Überwachungssystem für Frequenzumrichter in Windenergieanlagen

Im Bereich der erneuerbaren Energien hat die Nutzung der Windenergie einen großen Anteil. Zur Umwandlung der Energie aus dem Wind in elektrische Energie werden Windenergieanlagen eingesetzt. Diese bestehen aus mechanischen und elektrischen Komponenten. Hierzu zählen der Rotor, der Triebstrang, je nach Anlagentyp ein Getriebe, der Generator und ein Frequenzumrichter. Die Windenergieanlagen sind durch ihren Betrieb und die Umwelt verschiedenen Belastungen ausgesetzt. Um einen durchgängigen Betrieb der WEA sicherzustellen, muss der Zustand der einzelnen Komponenten überwacht werden, um Bauteile zu tauschen, bevor ihr Versagen zu einem Stillstand der ganzen WEA führen kann. Während für mechanische Komponenten bereits Zustandsüberwachungssysteme verfügbar sind, sind kommerzielle Systeme zur Überwachung von Leistungshalbleitern noch nicht Standard in einem Frequenzumrichter.

Zur Bestimmung des Zustandes von Leistungshalbleitern existieren verschiedene Möglichkeiten. Am IALB wurde ein modellbasierter Ansatz gewählt (Abb. 1). Anhand eines Modells werden der thermomechanische und der elektrochemische Status bestimmt.

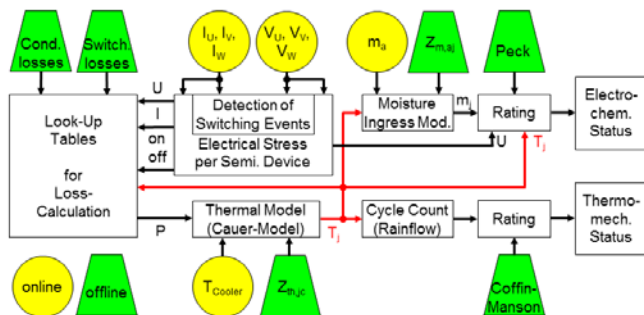


Abb. 1: Modell zur Bestimmung der Restlebensdauer von Leistungshalbleitern

Beide Degradationseffekte wirken unabhängig voneinander. Während die thermomechanische Beanspruchung der Leistungshalbleiter im leitenden Zustand entsteht, wirkt der elektrochemische Effekt im gesperrten Zustand. Die zur Bestimmung der Restlebensdauer benötigten Modellparameter müssen für jeden IGBT-Typ vorab im Labor bestimmt werden. Zur Implementierung des Modells wurde ein bereits am IALB aufgebaute Messsystem verwendet. Mit diesem Messsystem wurden bereits Spannungen, Ströme, Temperaturen und Feuchte in WEA, für eine Dauer von etwa 2,5 Jahren, aufgezeichnet. Die Spannungen und Ströme können mit bis zu 50 kHz abgetastet werden, Temperaturen und Feuchte werden mit 1 Hz erfasst. Zur Speicherung der Messdaten werden die Daten über einen Feldbus (EtherCAT) zu einem Industrie-PC (IPC) übertragen. Dies ermöglicht die Trennung der Messdatenerfassung



Abb. 2: Messsystem zur Aufzeichnung in einer WEA

und der Datenablageeinheit. Abb. 2 zeigt die in einem Schaltschrank integrierten Komponenten des Messsystems.

Das in Abb. 1 gezeigte Modell zur Abschätzung der Restlebensdauer wurde modular implementiert. Mit den Software-Modulen werden zunächst Schaltereignisse, die Verlustleistung eines IGBT beim Schalten und mit Hilfe eines thermischen Modells des IGBT-Moduls die Temperatur am Halbleiter bestimmt. Zur Abschätzung des thermomechanischen Status werden die Temperaturzyklen gezählt und nach Coffin-Manson bewertet. Die Sperrspannung und die Feuchte werden verwendet, um nach Peck den elektrochemischen Status zu bestimmen. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Berechnungen in Echtzeit durchgeführt werden können, d.h. der Status der Restlebensdauer kann fortlaufend aktualisiert und angezeigt werden, ohne dass eine Auswertung im Labor notwendig ist. Der modulare Aufbau des Systems erlaubt ebenfalls das Einlesen und Auswerten von bereits aufgezeichneten Daten. Gegenstand aktueller Arbeiten ist die Anpassung der Modellparameter, um eine präzise Abschätzung der Restlebensdauer zu erreichen.

Gefördert durch:



Förderkennzeichen:
0325758A-D

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Regelung einer Windenergieanlage mit doppeltgespeister Asynchronmaschine mit einem fiktiven Synchronmaschinenmodell

Die Stabilität des elektrischen Verbundnetzes wird bisher ganz wesentlich durch das Betriebsverhalten der konventionellen Kraftwerke gewährleistet. Die Lösung, die in diesem Forschungsvorhaben geschaffen werden soll, ist die Entwicklung eines Regelverfahrens für doppeltgespeiste Asynchrongeneratoren, welches den Turbinen zum Netz hin das Verhalten von Kraftwerksgeneratoren mit Dämpferwicklung aufprägt. Damit werden die Voraussetzungen für einen grundlegend neuen Ansatz zur netzkonformen Regelung von Windenergieanlagen geschaffen.

Die neu vorgeschlagene Betriebsführung der WEA beinhaltet das Modell einer Synchronmaschine, welche die Netzspannung als Eingangsgröße erhält. Die Statorströme dieser fiktiven Maschine bilden die Sollwerte für eine Stromregelung, so dass das Verhalten der Maschine auf den DASG mit Teilumrichter übertragen wird. Weiterhin kann die fiktive Maschine über die Erregerspannung und das Drehmoment verschiedene Arbeitspunkte anfahren.

Die vorgeschalteten Statiken für Blind- und Wirk-

leistung funktionieren wie in einem konventionellen Kraftwerk. Darüber lässt sich eine Momentanreserve vorhalten und bereitstellen. Die Primärregelung erfolgt über die Pitchregelung der WEA, so dass die maximal erreichbare Primärreserve vom Wind abhängig ist. Der netzseitige Frequenzumrichter wird für die Regelung der Zwischenkreisspannung verwendet, die aus einer Spannungsregelung mit unterlagerter Stromregelung besteht. Der rotorseitige Frequenzumrichter erhält seine Sollwerte aus der fiktiven Synchronmaschine.

Die fiktive Synchronmaschine ist als Vollpolgenerator mit Dämpferwicklung ausgelegt. Die Dämpferwicklung der Synchronmaschine kommt nur zum Tragen, wenn die Generatordrehzahl vom Synchronpunkt abweicht. Arbeitspunktänderungen, die aus Laststößen bei Windgeschwindigkeitsfluktuationen oder Änderungen der Netzanforderungen resultieren, führen dadurch selbst bei solchen dynamischen Schwankungen zu einem gleichmäßigen Leistungsfluss.

Wie bei konventionellen Kraftwerken wird auch bei dem hier vorgestellten Regelungskonzept bei der Nenn-

frequenz des Netzes, also 50 Hz, die Nennwirkleistung der Anlage abzüglich der vorgehaltenen Reserveleistung eingespeist (Ordinatenabschnitt in der P-Statik, Abb. 1). Die entstehende Drehzahlabweichung ist die Eingangsgröße eines PI-Reglers, welcher das Antriebsmoment der fiktiven Synchronmaschine als Stellgröße besitzt. Ähnlich ist es bei der statikbasierten Blindleistungsregelung. Zunächst wird eine Differenz aus Soll-Blindleistung und der aktuellen Blindleistung gebildet. Dabei entspricht die Soll-Blindleistung der Blindleistung der fiktiven Synchronmaschine und die Ist-Blindleistung berechnet sich aus dem Netzstrom und der Netzspannung. Durch dieses Konzept wurde erreicht, dass sich die WEA mit DASG von der Netzseite aus betrachtet wie ein konventionelles Kraftwerk mit Synchron-generator verhält und so stabilisierend auf das Netz wirkt.

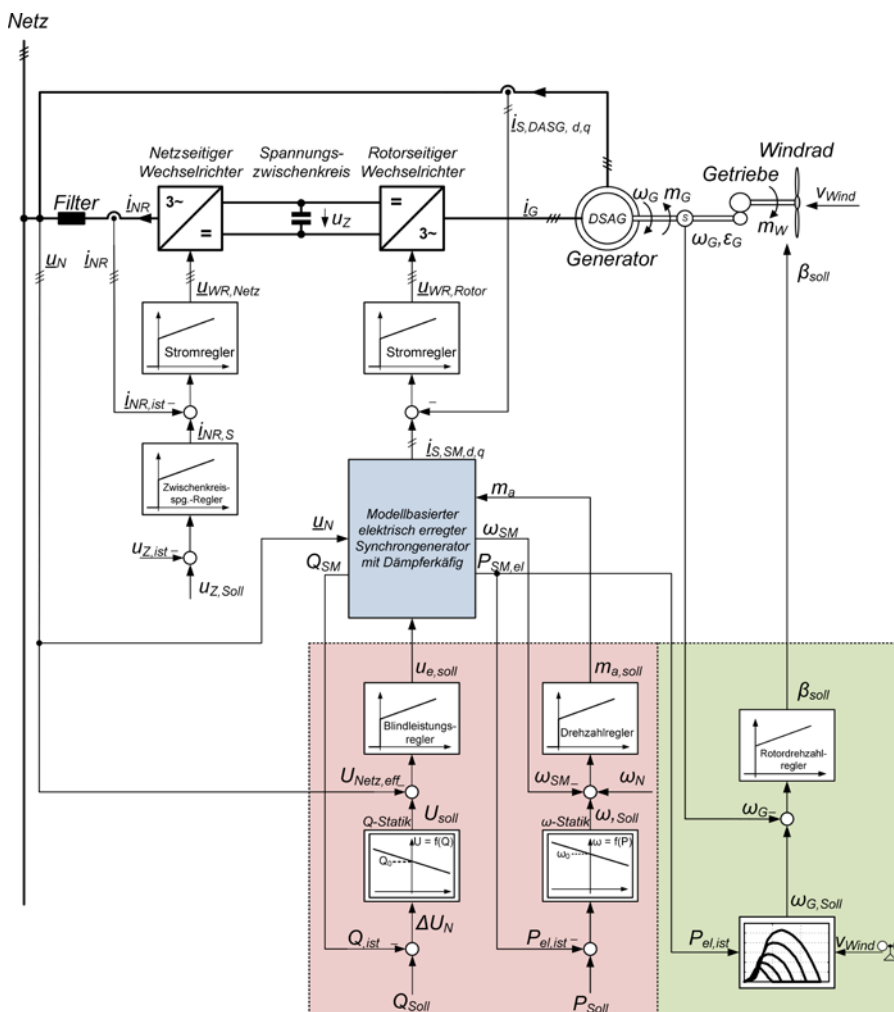


Abb. 1: Regelungskonzept des doppelt gespeisten Asynchrongenerators mit fiktiver Synchronmaschine

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

BAB Die Förderbank
für Bremen und Bremerhaven
Wir finanzieren Zukunft

Validierung einer neuen Regelstrategie für Windenergieanlagen durch den Einsatz eines Zentralrechners zur Modellberechnung

Für einen sicheren Betrieb des elektrischen Stromnetzes ist eine ausgeglichene Bilanz aus erzeugter und verbrauchter elektrischer Wirkleistung notwendig. Aufgrund dessen müssen Kraftwerke Regelleistungen bereitstellen, um sich auf die geforderte Leistung der Verbraucher anzupassen. Im Gegensatz dazu ist die konventionelle Betriebsweise von Windenergieanlagen (WEA) auf eine maximale Leistungsentnahme aus dem Wind ausgelegt.

Zur Gewährleistung der Netzstabilität bei einem zunehmenden Anteil an errichteten WEA wurde am IALB ein geändertes Regelverfahren entwickelt. Hierbei wurden die Eigenschaften eines Dampfkraftwerkes auf eine Windenergieanlage übertragen, wodurch die Bereitstellung einer Momentan- und Primärreserve ermöglicht wird.

Abb. 1 stellt die Leistungsaufteilung zwischen der Windenergieanlage und einem konventionellen Kraftwerk bei verschiedenen Laständerungen der gemeinsam versorgten ohmsch-induktiven Last dar.

Es wird deutlich, dass die Leistungseinspeisung bei der Erzeuger der geforderten Leistung der Verbraucher folgt. Die Windenergieanlage weist das gleiche Verhalten wie das Kraftwerk auf.

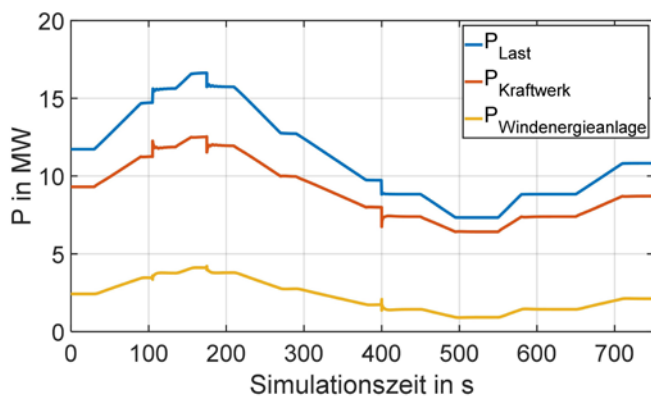


Abb. 1: Lastaufteilung zwischen Kraftwerk und WEA

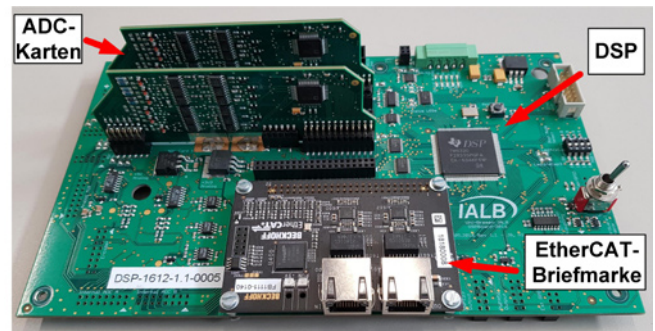


Abb. 3: Am IALB entwickelte digitale Rechnerkarte

Für die praktische Validierung ist ein Prüfstand zur Nachbildung eines Netz- und Windenergieanlagenverhaltens im Aufbau. Der Prüfstand mit einer Nennleistung von 30 kW besteht aus drei Vollumrichtern (Abb. 2).

Der Mittlere stellt den Umrichter einer Windenergieanlage mit einem angeschlossenen permanentmagnet-erregten Synchrongenerator (PMSG) dar. Dieser wird von einem Asynchronmotor (AM) zur Erzeugung eines realen Rotorverhaltens angetrieben. Die Windenergieanlage speist ihre Leistung in ein nachgebildetes elektrisches Netz ein.

Die jeweilige Ansteuerung der Umrichter und das Aufnehmen der Messgrößen wird mit einem digitalen Signalprozessor (DSP) durchgeführt. Vier dieser DSPs sind über einen EtherCAT-Feldbus an einen PC für eine zentrale Regelung angeschlossen. Die DSPs befinden sich auf einer am IALB entwickelten digitalen Rechnerkarte (Abb. 3).

Zur Anbindung an den Feldbus wird eine Beckhoff EtherCAT-Briefmarke mit einem EtherCAT Slave Controller (ESC) verwendet. Dieser stellt konfigurierbare SYNC0-Signale für die Synchronisierung der DSPs bereit. Hierdurch ist eine simultane AD-Wandlung aller Messgrößen möglich.

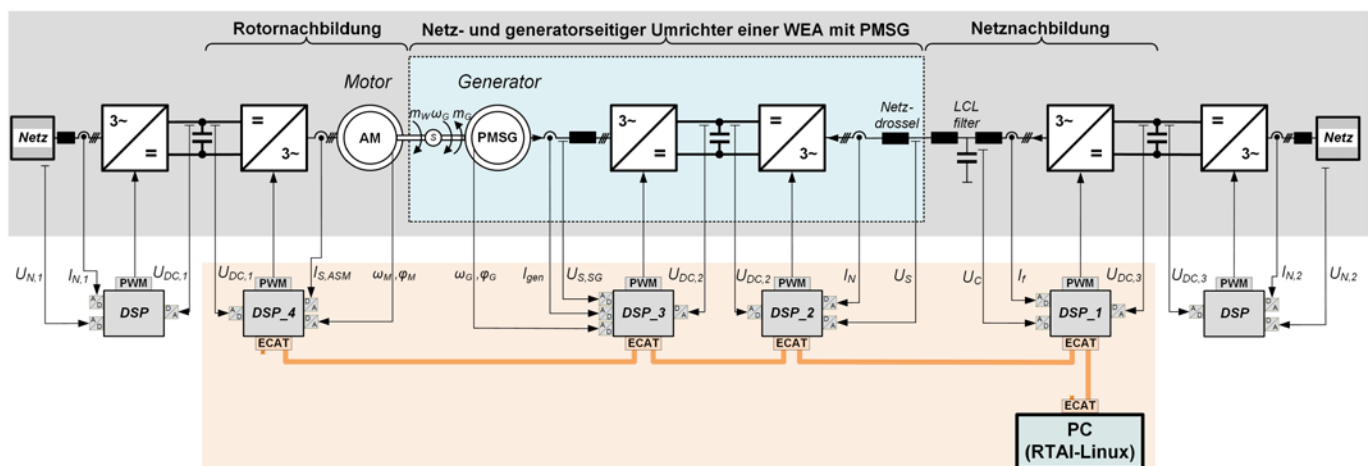


Abb. 2: Windenergieanlagen-Prüfstandskonzept mit DSPs, die für eine zentrale Regelung über einen EtherCAT-Feldbus an einen PC angebunden sind

Leistungsausgleich in einem dezentral geregelten Gleichstromübertragungsnetz

Durch den stetigen Aus- und Zubau der Hochsee-Windparks wird die Entfernung zu den Netzanschlusspunkten auf dem Festland zunehmend größer. Mit der Entwicklung leistungsstärkerer Windenergieanlagen (WEA) steigt zudem die notwendige Übertragungsleistung der Hochsee-Umspannplattformen, weshalb die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) zur Reduktion der Übertragungsverluste eingesetzt wird. Derzeit werden am IALB Möglichkeiten zum Aufbau und Betrieb eines HGÜ-Verbundnetzes, zur Kopplung der HGÜ-Trassen und damit zur Verbesserung der Netzverfügbarkeit untersucht.

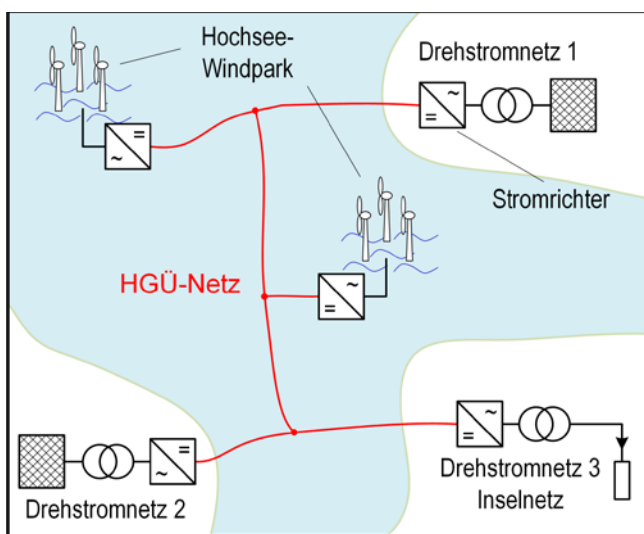


Abb. 1: HGÜ-Netz

In Abb. 1 ist exemplarisch ein solches HGÜ-Netz mit unterschiedlichen Stromrichterstationen zum Anschluss von Hochseewindparks und Drehstromnetzen dargestellt. In konventionellen Drehstromnetzen kann der Zustand des Netzes anhand von Frequenz-, Amplituden- und gegebenenfalls auch Phasenwinkelinformationen bestimmt werden. Wohingegen in Gleichstromsystemen lediglich die lokalen Werte für Strom und Spannung gemessen werden können. Am IALB wurde daher in einem vorangegangenen Forschungsprojekt ein Regelungskonzept auf Basis eines fiktiven Maschinensatzes entworfen. Mit diesem Konzept ist die dezentrale Regelung eines Gleichstromübertragungsnetzes im bidirektionalen Betrieb (Leistungseinspeisung in das Netz und Leistungsbezug aus dem Netz) möglich. Das Verhalten dieses Regelungskonzepts wurde bisher in umfangreichen Simulationen erprobt, an dieser Stelle werden exemplarisch zwei Betriebsfälle dargestellt. In einem Beispielnetz mit vier Netzknoten, welche jeweils über Leitungsnachbildungen verbunden sind, speisen im Szenario 1 zwei Stromrichterstationen (Stationen 1 und 2) Leistung in das Gleichstromnetz ein. Im zweiten Szenario beginnt Station 1 zunächst mit der Leistungs-

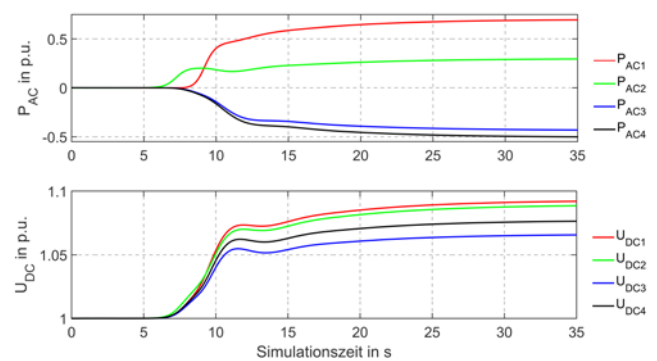


Abb. 2: Simulationsergebnisse Szenario 1

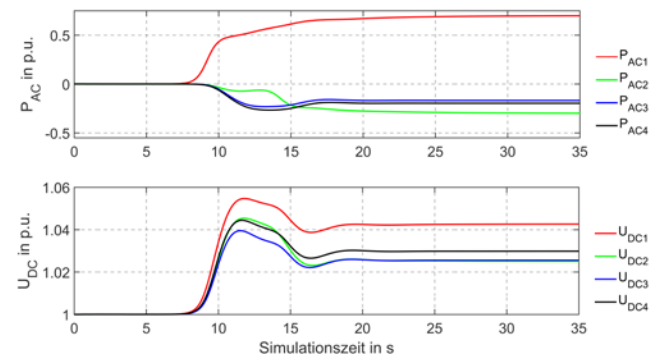


Abb. 3: Simulationsergebnisse Szenario 2

einspeisung in das Netz, während Station 2 Leistung aus dem Netz bezieht. Die Simulationsergebnisse für die Leistungen und die lokalen Gleichspannungen sind in Abb. 2 und Abb. 3 dargestellt.

Die Stromrichterstationen 3 und 4 besitzen jeweils keinen Leistungssollwert und sorgen aufgrund des verwendeten Regelungskonzepts für einen Leistungsausgleich im Gleichstromnetz, so dass die Leistungssumme aller Stationen zu jedem Zeitpunkt gleich null ist. Zwischen den einzelnen Stationen findet keinerlei Kommunikation statt. Anhand der Simulationsergebnisse ist ersichtlich, dass die verwendete Regelung einen dynamischen Leistungsausgleich gewährleistet. Die Abweichungen zwischen den lokalen Gleichspannungen ergeben sich aus dem stromabhängigen Spannungsabfall entlang der nachgebildeten Leitungen. Derzeit wird das Regelungskonzept zur Regelung eines Gleichstrom-Windparksammelnetzes erweitert. Außerdem ist ein Prüfstand mit einer Gesamtleistung von 1 MW zur Implementierung der Regelung und Nachbildung eines bipolaren HGÜ-Netzes im Aufbau.

MuTiG

Förderkennzeichen:
0350007A

Gefördert durch:

 Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Synchronisierte Messsysteme

Für die Überwachung der Netzqualität und deren Auswirkung auf angeschlossene Windenergieanlagen wurde am IALB ein Messsystem entwickelt, mit dem Ströme und Spannungen aufgezeichnet werden können. Dieses Messsystem wird aktuell weiterentwickelt und in Zukunft werden vier dieser Messsysteme für Messungen in verschiedenen Prüfständen verwendet. Vier weitere Messsysteme werden wieder für Messungen in Windenergieanlagen eingesetzt.

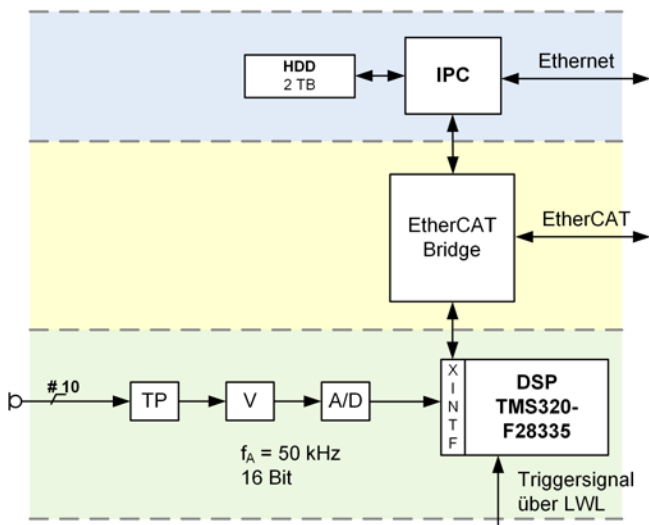


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Messsystems

In Abb. 1 ist der schematische Aufbau und in Abb. 2 ein Foto eines Messsystems dargestellt. Die Messsignale werden zuerst gefiltert und verstärkt und anschließend analog-digital gewandelt. Dabei können maximal 10 Kanäle mit 50 kHz und einer Auflösung von 16 Bit abgetastet werden. Der digitale Signalprozessor (DSP) TMS320F28335 der Firma Texas Instruments verarbeitet die gemessenen Daten. Zur Speicherung der Messdaten werden diese vom DSP über den EtherCAT-Feldbus zu einem Industrie-PC (IPC) übertragen. Auf dem IPC läuft das Betriebssystem GNU/Linux mit der Echtzeiterweiterung RTAI. Der DSP und der IPC werden über das EtherCAT-Netzwerk miteinander synchronisiert. Dabei wird der „Distributed Clocks“ Mechanismus von EtherCAT verwendet. Bei diesem Mechanismus befindet sich im ersten Busteilnehmer im EtherCAT-Netzwerk die Referenzuhr, auf den sich die anderen Busteilnehmer synchronisieren. Dazu wird zu Beginn die Signallaufzeit zwischen allen Busteilnehmern berechnet und der Offset zur Referenzuhr korrigiert. Anschließend wird periodisch die zeitliche Abweichung zur Referenzuhr korrigiert. Über eine Ethernet-Verbindung kann auf die Daten im IPC zugegriffen werden. Die Auswertung der Messdaten erfolgt in Matlab/Simulink.

Innerhalb des EtherCAT-Netzwerks ist eine Ether-

CAT-Bridge vorhanden. Über diese kann das interne EtherCAT-Netzwerk des Messsystems mit einem übergeordneten Netzwerk verbunden werden. Über das übergeordnete Netzwerk können dann Befehle zum Starten bzw. Stoppen der Messung an die Messsysteme geschickt werden. Zusätzlich wird eine grafische Oberfläche zum Steuern der Messsysteme entwickelt. Außerdem können die Messungen in allen Messsystemen über das übergeordnete EtherCAT-Netzwerk synchronisiert werden. Dabei wird ebenfalls der „Distributed Clocks“ Mechanismus verwendet. Mit dem übergeordneten EtherCAT-Netzwerk ist dabei eine Genauigkeit von $\pm 30 \text{ ns}$ bei der Synchronisierung der Messungen möglich.

Als Alternative zu der Synchronisierung über EtherCAT können die Messsysteme auch über ein gemeinsames Triggersignal synchronisiert werden. Dazu wird mit einem Mikrocontroller ein Rechtecksignal generiert, welches mit Lichtwellenleiter (LWL) zu den Messsystemen übertragen wird. Hierbei ist eine Genauigkeit von 1 ns möglich.



Abb. 2: Foto eines der Messsysteme

Prüfquelle für passive Komponenten auf Basis von SiC-Leistungshalbleitern

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 viel 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 schnell schaltender WBG-Halbleiter 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.

Am Markt sind keine Umrichter in SiC-Technologie verfügbar, weshalb die entsprechende Prüfquelle im Rahmen des Projekts selbst entworfen und aufgebaut werden musste. Durch die besonderen Anforderungen von SiC-Schaltern wurde sich für aktuelle Leistungsmodule entschieden, welche über Gehäuse verfügen die sehr geringe Streuinduktivitäten im Bereich von nur 6 nH aufweisen. Dieser Parameter ist bei SiC-Bauelementen noch kritischer, da durch die hohen Flankensteilheiten und auch schnellen Stromänderungen gefährliche Überspannungen auftreten können, welche die Halbleiter zerstören würden. Abb. 1 zeigt den Leistungsteil der Prüfquelle.

Nicht nur bei den verwendeten Gehäusen, auch beim Entwurf der Leistungsplatinen und bei der Aus-

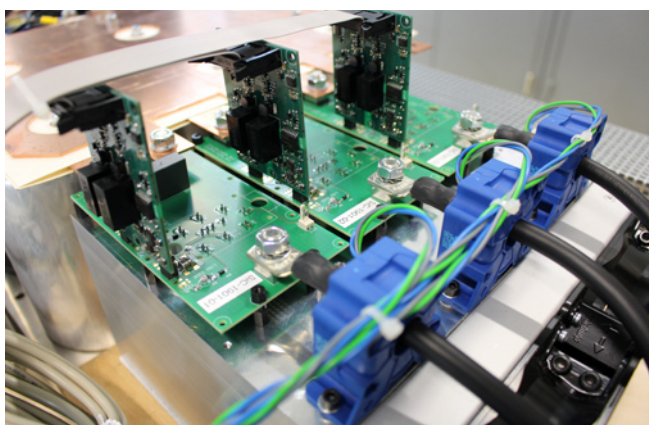


Abb. 1: SiC-Module mit Treiberboards

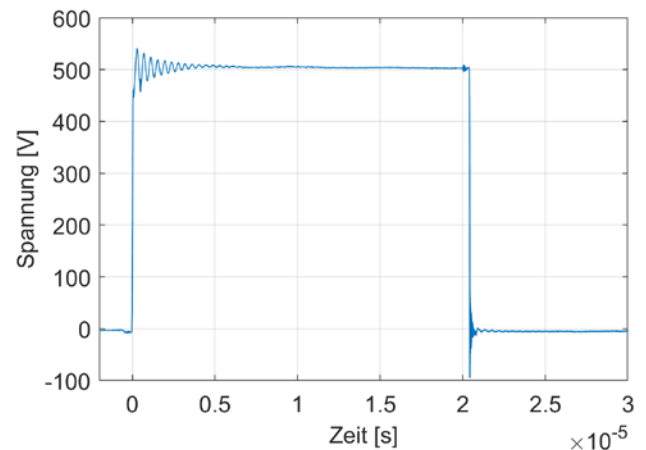


Abb. 2: Spannung über dem SiC-Schalter beim Schalten von 500 V und einem Strom von 105 A durch den Prüfling. Die Flankensteilheit beträgt 35 kV/ μ s.

wahl der eingesetzten Bauelemente, musste auf die Anforderungen von SiC-Schaltern geachtet werden. Es wurden neuartige Keramikkondensatoren mit sehr hoher Spannungsfestigkeit eingesetzt, da nur bei diese Typen die Streuinduktivität niedrig genug ist.

Weiterhin musste auch der Gatetreiber entwickelt werden, um den Anforderungen von SiC-Bauelementen gerecht zu werden. Das schnelle und häufige Schalten erfordert entsprechend ausgewählte Bauteile. Diese müssen den Effekten durch die schnellen Spannungsänderungen standhalten können. Ebenso muss der hohe Spitzenstrom während des Schaltens mit der nötige Leistung bereitgestellt werden können. Ebenfalls sehr kritisch ist die Überstromerkennung und -abschaltung am SiC-Modul selbst, welche im Bereich von unter 2 μ s geschehen muss. Im Vergleich hierzu sind bei Si-IGBTs 10 μ s noch ausreichend.

Mit der nun zur Verfügung stehenden Prüfquelle können sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Die Quelle auf Basis aktueller SiC-Leistungsmodule kann im dreiphasigen Betrieb eine Ausgangsleistung von über 50 kVA liefern. Dabei werden Ströme von 75 A_{eff}, Schaltfrequenzen von über 50 kHz und Flankensteilheiten von 35 kV/ μ s erreicht und dauerhaft zur Verfügung gestellt. Dank des sehr niederinduktiven Aufbaus treten während des Schaltens selbst bei solch hohen Flankensteilheiten und Strömen nur Überspannungen von 80 V auf, wie in Abb. 2 gezeigt. Es steht somit eine sehr leistungsfähige Prüfquelle für Untersuchungen passiver Bauelemente, welche an SiC-Leistungshalbleitern eingesetzt werden sollen, zur Verfügung.

GEFÖRDERT VOM

Förderkennzeichen:
16ES0615



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

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

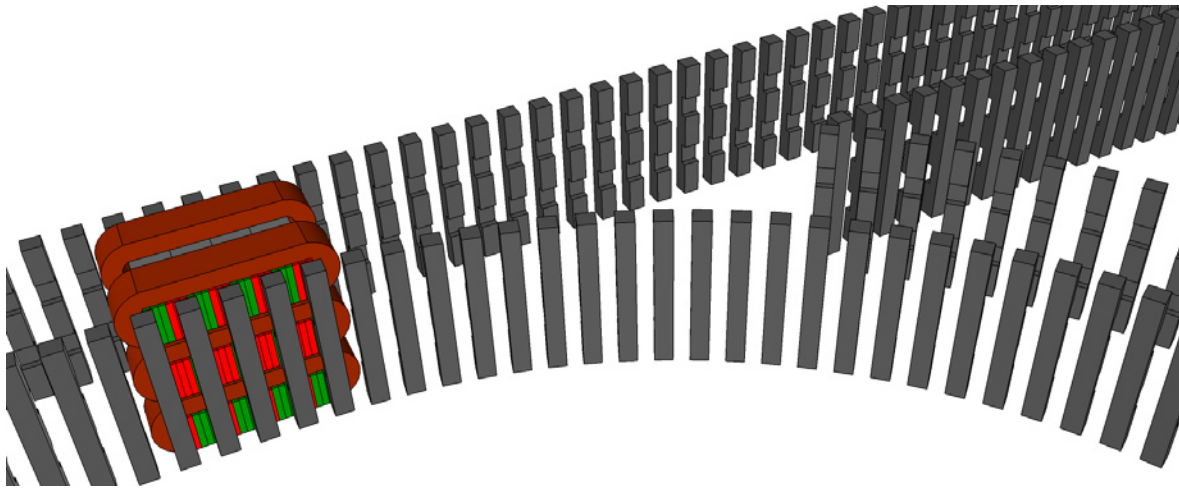


Abb. 1: Skizze des intelligenten Transportsystems

Für die Automatisierung industrieller Prozesse werden zunehmend Linear-Direktantriebe verwendet. Geringere Wartungsanforderungen sowie ein direkteres Ansprechverhalten sind wesentliche Vorteile. Konventionelle Linearmaschinen arbeiten beispielsweise nach dem Langstatorprinzip und sind nicht zuletzt seit dem Transrapid lange erforscht, erfüllen aber dennoch nicht die heutigen Anforderungen der Industrie 4.0. Daher wurde zusammen mit Industriepartnern am IALB ein

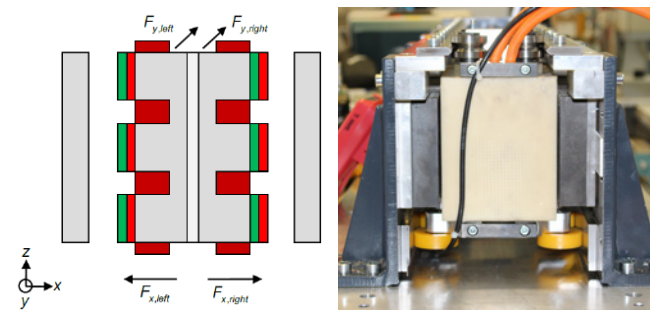


Abb. 2: Transportsystem basierend auf zwei Linearmaschinen: Struktur (links), Demonstrator (rechts)

intelligentes Transportsystem basierend auf einer Transversalfluss-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 der Transportwagen ermöglicht werden. Das Transportsystem entsteht aus der Kombination von zwei Linearmaschinen, wie in Abb. 2 (links) illustriert. Dabei werden die Translatoren jeweils an dessen Rückseite mechanisch starr verbunden. Die Statorelemente sind gegenüberliegend angeordnet und bilden einen Führungskanal.

Die beiden einzelnen Linearmaschinen basieren jeweils auf einer transversalen Flussführung mit Oberflächenmagneten im Luftspalt. Der Stator wird als rein passives Bauteil ausgeführt. Sowohl die Spulenanordnung

als auch die permanent-magnetische Erregung ist im Translator integriert. Die Besonderheit des entwickelten Maschinenkonzepts ist der dreiphasige Aufbau mit verkoppelten magnetischen Flüssen.

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 x 13 x 13 cm für das bewegliche Teil hervorgebracht werden.

Die Idee der feldorientierten Regelung wurde weitgehend von rotierenden Maschinen übernommen. Dabei wird die Periodizität einer Polteilung beibehalten, d.h. die relative Position des Translators bezogen auf eine Polteilung bildet die Grundlage der Transformation. Jede der Linearmaschinen (LM) wird von einer eigenen Leistungseinheit (Umrichter) versorgt. Beide Umrichter werden von einer gemeinsamen am IALB entwickelten Mikrorechnerkarte geregelt. Die Elektronik ist zusammen mit entsprechend dimensionierten Zwischenkreis-kondensatoren dabei auf den Transporteinheiten integriert und mitfahrend. Das Transportsystem wird mit einer induktiven Energieübertragung versehen und in den Bearbeitungs-/Haltestationen geladen. Zwischen den Stationen fahren die Transportwagen autonom, so dass das System für größere industrielle Anwendungen vorbereitet ist.

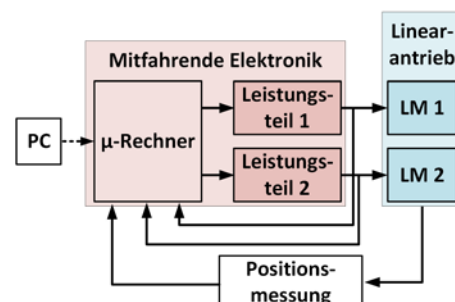


Abb. 3: Aufbau der Elektronik

Überstromschutzschalter für Gleichspannung

Für viele Anwendungen bietet Gleichspannung Vorteile gegenüber Wechselspannung und ist z. B. bei der Wandlung zwischen zwei Spannungsniveaus mit modernen Halbleitern effektiver. Photovoltaikanlagen liefern Gleichspannung und auch Netze mit Batterie wie Bordnetze in Elektrofahrzeugen sind Gleichspannungsnetze.

Gleichspannung hat jedoch den Nachteil, dass der Strom keinen natürlichen Nulldurchgang besitzt, so dass beim Schalten meist sehr viel mehr Verlustenergie anfällt. Bei einem mechanischen Schalter macht sich das als Lichtbogen bemerkbar, der entsprechend aufwändig gelöscht werden muss. Diese Problematik ist natürlich auch bei Schutzschaltern gegeben. Daher muss ein mechanischer Sicherungsautomat für Gleichspannung bei gleicher Leistung viel schwerer, größer und damit auch teurer sein als bei Wechselspannung.

Die Verwendung von Halbleiterschaltern (Transistoren) bietet die Möglichkeit den gefährlichen Lichtbogen zu vermeiden und die Energie stattdessen in ein Ableitelement umzuleiten. Um die Abschaltchwelle zu detektieren, wird im Allgemeinen jedoch eine kosten- und zeitaufwändige Stromdetektion benötigt.

Am IALB wurde ein Überstromschutzschalter entwickelt, der keine äußere Schaltung zum Stromdetektieren braucht, da er nach dem Prinzip des dualisierten Thyri-

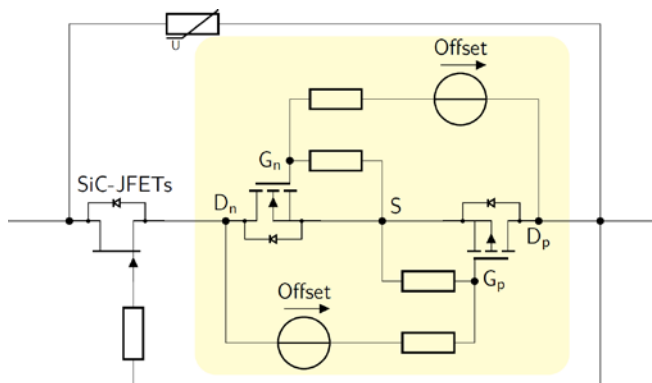


Abb. 1: Schaltplan. Der eigentliche Überstromschutzschalter ist im gelben Bereich. Die SiC-JFETs dienen dazu eine höhere Spannungsfestigkeit zu gewährleisten.

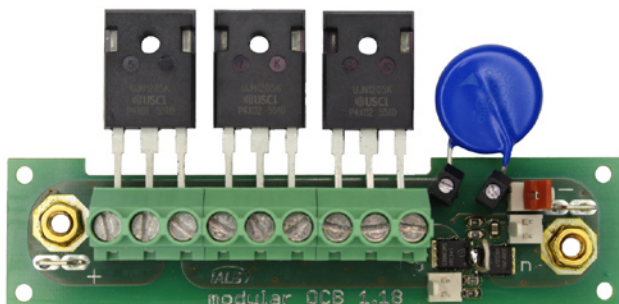


Abb. 2: Überstromschutzschalter mit der Möglichkeit verschiedenen Bauelemente zur Kaskodierung zu verwenden.

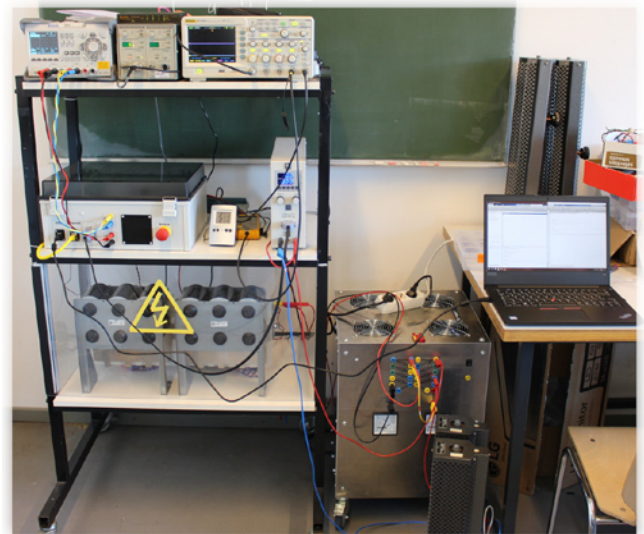


Abb. 3: Aufbau zum automatischen und reproduzierbaren Testen des Überstromschutzschalters.

stors funktioniert. Dabei werden ein p- und ein n-Kanal-Halbleiterschalter verschaltet, wie in Abb. 1 im gelben Bereich gezeigt. Über die Offset-Spannungen lässt sich der Auslösestrom einstellen. Um eine höhere Sperrfähigkeit zu erreichen, kann ein weiteres Bauelement als sogenannte Kaskode geschaltet werden. Dieses schaltet dann automatisch mit ab und nimmt einen Großteil der Spannung auf. Die verwendeten JFETs aus Siliziumkarbid (SiC) (in Abb. 2 in den Schraubklemmen) können z. B. eine Spannung von 1200 V sperren.

Zu dem Überstromschutzschalter wurde ein Messstand (Abb. 3) entwickelt, welcher automatisiert das Schaltverhalten aufzeichnen kann. Dies ist besonders wichtig, da so reproduzierbar verschiedene Zustände wie z. B. verschiedene Konfigurationen von Offset-Spannungen getestet werden können.

Zusätzlich zu der sehr schnellen Reaktion beim Erreichen eines Überstroms, der z. B. durch einen Kurzschluss ausgelöst werden kann, ist der Schalter durch zusätzliche Beschaltung ebenfalls in der Lage auf „langsame“ Fehler zu reagieren, die nicht zeitkritisch sind, auf Dauer dem Schalter jedoch schaden können. So wird ein leicht überhöhter Strom nach einer einstellbaren Zeit abgeschaltet, da sonst eine Überhitzung droht. Die Temperatur selber wird zusätzlich ausgewertet.

Der ganze Aufbau kann komfortabel von einem PC aus gesteuert werden, welcher gleich die Messdaten aufnimmt.

GEFÖRDERT VOM

Förderkennzeichen:
03INT501BG



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Multimodale 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.

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 genommen werden. Diese ermöglichen herstellernerneutrale Forschung und Untersuchungen für Hochleistungselektronik von Windenergieanlagen entsprechend der Leistung moderner Anlagen. Hierfür werden zurzeit die Ausschreibungen für den elektrischen Prüfstand erstellt.

Die Planung des Klimaraumes ist abgeschlossen und der Aufbau beauftragt. Er wird ein Volumen von ca. 170 m³, mit den Prüfraum Abmessungen 5,3 m x 4,3 m x 7,5 m, besitzen. Dadurch ist es möglich, den kompletten Aufbau eines Hochleistungs-Umrichtersystems unter definierten Umweltbedingungen zu testen. Diese bestehen bei den gewählten Leistungsklassen aus mehreren Schaltschränken und verursachen entsprechend hohe

Verlustleistungen, welche zusätzlich vom Klimaraum abgeführt werden müssen. Klimakabinen in den erforderlichen Dimensionen sind selten zu finden. Kabinen mit der notwendigen Wärmekompensation, wenn überhaupt, nur für firmeninterne Prüfungen im Automotive Sektor. Die, in diesem Forschungsprojekt konzeptionierte, Klimaprüfeinrichtung ermöglicht Prüfungen und Tests, welche vorher europaweit nicht durchgeführt werden konnten.

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 Fre-



Abb. 1: Aufnahme der Versuchshalle des geplanten Prüfstandes

quenzumrichtern 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 die Ergebnisse des Forschungsprojektes können langfristig Leistungshalbleiterbauelemente und Frequenzumrichter entwickelt werden, die für die Bedingungen bei einem Einsatz in Windenergieanlagen optimiert sind.



Förderkennzeichen:
0324219A

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Lehrveranstaltungen 2018

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 Farbenmischanlage 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.

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

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

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.

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, Juni 2019

