



# IALB

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

## Jahrbuch 2013

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

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

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

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Josef Binder

Das IALB ist eine Forschungseinrichtung im  
Bremer Centrum für Mechatronik

BCM 





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



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



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



Univ.-Prof. rer. nat. Josef Binder

## Vorwort

Das Jahr 2013 war in starkem Maße geprägt durch die Einrichtung der neuen Vertiefungsrichtung „Erneuerbare Energien“ in den Bachelor- und Masterstudiengängen der Elektrotechnik. Für diese Vertiefungsrichtung hat das Institut für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente vier neue Vorlesungen entwickelt und fünf neue Praktika aufgebaut. Es trägt damit die Vertiefungsrichtung „Erneuerbare Energien“ in ganz wesentlichen Teilen.

Diese Ausweitung des Lehrangebotes konnte nur erreicht werden, weil Herr Dr.-Ing. Holger Groke auch nach seiner Promotion am IALB als Oberingenieur verblieben ist und das IALB mit Herrn Dipl.-Ing. Guido Tisborn zusätzlich einen Akademischen Rat einstellen konnte.

Einen weiteren wichtigen Beitrag bildet die Berufung von Herrn Dr.-Ing. Jan Wenske vom Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) in Bremerhaven zum Honorarprofessor am IALB. Er wird die neuen Vorlesungen „Windenergieanlagen I und II“ halten.

Zusammen mit unserem langjährigen Lehrbeauftragten, Herrn Prof. Dr.-Ing. Thorsten Völker, konnte das IALB im Jahr 2013 ein vielfältiges Lehrangebot im Bereich der elektrischen Energietechnik entwickeln und anbieten. Erfreulich ist, dass es dadurch gelungen ist, bei den Studierenden wieder ein stärkeres Interesse an der

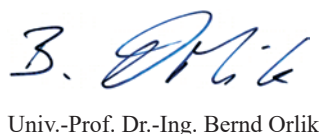
elektrischen Energietechnik zu wecken. Für Ihr großes Engagement in der Lehre möchten wir an dieser Stelle unserem Lehrbeauftragten ganz herzlich danken.

Die im Abschnitt „Forschungsberichte“ zusammengestellten Projektberichte geben einen Überblick über die Aktivitäten des Instituts bei der Entwicklung von elektrischen Maschinen, leistungselektronischen Bauelementen und Schaltungen sowie digitalen Antriebs- und Generatorregelungen. Unsere Arbeiten im Bereich der Windenergie-technik behandeln insbesondere Themen des Antriebsstrangs, der Netzintegration und der Regelung von Windenergieanlagen. Ein Schwerpunkt des Instituts liegt bei der Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Leistungselektronik und Mechanik einerseits sowie Leistungselektronik und Netz andererseits. Durch die enge Verbindung zum Fraunhofer IWES über Herrn Prof. Wenske wird dieses Forschungsgebiet weiter gestärkt werden.


Die große Breite der Aktivitäten des Instituts in Forschung und Lehre war nur durch das weit überdurchschnittliche Engagement aller Institutsmitarbeiter sowie aller im Rahmen von Studien-, Bachelor- und Diplomarbeiten oder als studentische Hilfskräfte tätigen Studierenden möglich.

Allen Freunden des IALB und allen Geschäftspartnern danken wir für ihre Unterstützung und ihr Vertrauen.

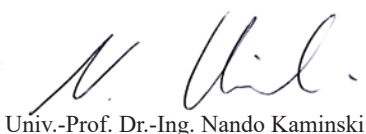
Bremen, im Mai 2014




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



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



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



Univ.-Prof. rer. nat. Josef Binder

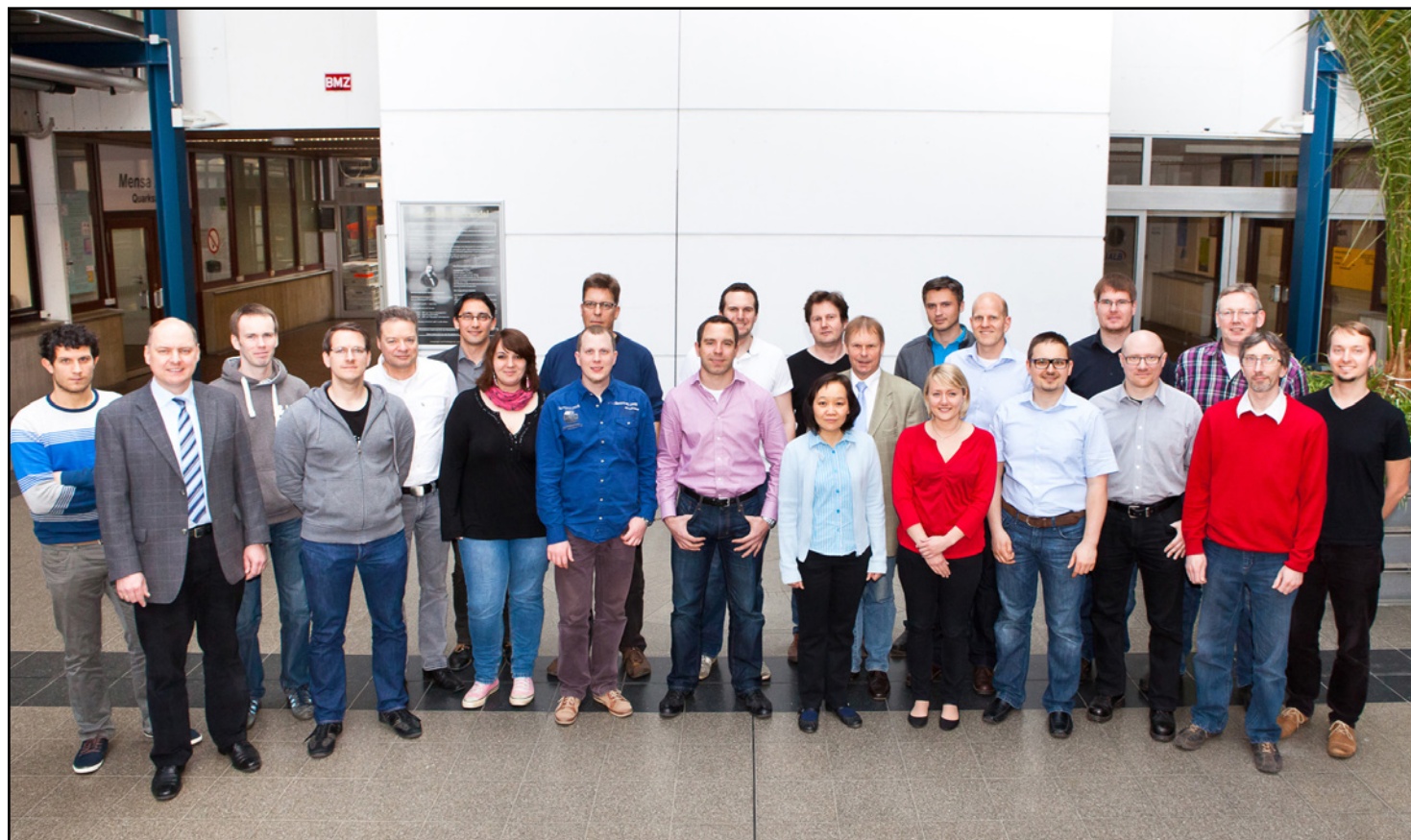




## Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Mitarbeiter des IALB im Jahr 2013.....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>Forschungsberichte 2013.....</b>  | <b>3</b>  |
| Multi-Level Umrichter motor für das Mittelspannungsnetz.....   | 4         |
| Feldorientierte Regelung zur Minimierung von Lagerströmen bei umrichter gespeisten Asynchronmaschinen.....           | 5         |
| Regelung von doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren in Windenergieanlagen bei Netzunsymmetrien und Netzfehlern..... | 6         |
| Regelung von Windenergieanlagen als fiktives Turbinen-Generator-System .....   | 7         |
| 50 kW Labor-Windenergieanlage für das IALB.....  | 8         |
| Netzanbindung von Offshore-Windparks mit kombinierter HGÜ .....  | 9         |
| Magnetloser Pitch-Antrieb mit Transversalfluss-Reluktanzmaschinen.....   | 10        |
| Transversalfluss-Linearantrieb für industrielle Anwendungen.....   | 12        |
| Ausgleich der Hysteresis-Effekte bei der magnetischen Lagerung durch einen nichtlinearen Regelungsentwurf.....       | 13        |
| Digital geregeltes Netzteil für den Einsatz im Passagierbereich eines Großraumflugzeuges .....                       | 14        |
| Transientenrekorder mit EtherCAT-Feldbus Anbindung .....   | 15        |
| Entwicklung eines neuartigen elektronischen Leistungsschutzschalters für Gleichspannungsnetze .....                  | 16        |
| Prüfstand für Lastwechseltests an diskreten Leistungshalbleitern .....   | 17        |
| THB Testing on IGBT Modules at High Bias Levels.....   | 18        |
| <b>Lehrveranstaltungen des Instituts.....</b>  | <b>19</b> |
| Grundlagen der Elektrotechnik B – Teil 1 .....   | 19        |
| Stromrichtertechnik .....  | 20        |
| Elektrische Antriebstechnik .....  | 20        |
| Mechatronik .....  | 20        |
| Grundlagenlabor der Elektrischen Energietechnik .....  | 20        |
| Antriebstechnisches Praktikum.....   | 21        |
| Energietechnisches Praktikum I.....  | 21        |
| Werkstoffe der Elektrotechnik .....  | 21        |
| Halbleiterbauelemente und Schaltungen .....  | 21        |
| Elektrotechnik I und II für Produktionstechniker und System Ingenieure .....   | 22        |
| Bauelemente der Leistungselektronik.....   | 22        |
| Qualitäts- und Verbesserungsmethoden.....  | 22        |
| Berechnung elektrischer Maschinen.....   | 23        |
| Digitale Signalverarbeitung in der elektrischen Energietechnik .....   | 24        |
| Grundlagen der Elektrischen Energietechnik .....   | 24        |
| Netzdynamik und Netzschutz .....   | 24        |
| <b>Septemberakademie Regenerative Energie.....</b>   | <b>25</b> |
| <b>AG Wind .....</b>   | <b>26</b> |

## Mitarbeiter des IALB im Jahr 2013



### Institutsleitung

Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlik  
 Prof. Dr.-Ing. Nando Kaminski  
 Prof. Dr. rer. nat. Josef Binder  
 Prof. Dr. phil. nat. Dieter Silber

### Oberingenieure

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

#### Sekretariat

E. Krüger  
 H. Janssen  
 J. Geibel

#### Technische Mitarbeiter

G. Schwerdtfeger  
 F. Trocha  
 B. Vahlenkamp

#### Forschungsgruppen

##### Elektrische Antriebe

H. Groke  
 J. Borecki  
 M. Schmidt  
 G. Tisborn  
 C. Mehler  
 M. Joost

##### Elektrische Maschinen

M. Siatkowski  
 A. Norbach

##### Leistungs- elektronik

J. Adler  
 F. Fein  
 T. Y. Hoa Dinh  
 W. Holzke  
 H. Sauerland

##### Leistungs- bauelemente

C. Bödeker  
 F. Hoffmann  
 A. Würfel  
 C. Zorn



# **Forschungsberichte 2013**

## Multi-Level Umrichtermotor für das Mittelspannungsnetz

Drehzahlvariable Antriebe werden in beinahe allen Anwendungen und Leistungsklassen eingesetzt. Gerade bei einer verteilten Aufstellung von Antrieben ist es dabei vorteilhaft, wenn das Gesamtsystem aus Motor und zugehörigem Frequenzumrichter möglichst wenig Bauraum einnimmt. Zur Vermeidung von abgestrahlten Störungen ist es dabei erforderlich, Motor und Frequenzumrichter möglichst dicht beieinander anzuordnen.

Bei weit verteilter Installation kommt eine Sonderform zum Einsatz, bei welcher der Frequenzumrichter mit dem Motor verbunden und direkt im Motorklemmenkasten integriert ist. Diese sogenannten Umrichtermotoren sind mit Leistungen von unter 1 kW bis 1.000 kW am Markt verfügbar. Der besondere Vorteil von Umrichtermotoren liegt in der schnellen Austauschbarkeit des Gesamtsystems bei einem Motor- oder Umrichterdefekt. Ohne eine lange Fehlersuche kann das Gesamtsystem getauscht werden und die Produktion somit nur kurzzeitig unterbrochen werden. Der Betrieb von Umrichtermotoren ist derzeit allerdings nur an Niederspannungsnetzen mit Außenleiterspannungen von 400 V oder 690 V möglich.

Soll beispielsweise ein 1.000 kW Umrichtermotor direkt an einem Mittelspannungsnetz mit 3.300 V betrieben werden, ist ein zusätzlicher Transformator zum Herabsetzen der Spannung auf 400 V oder 690 V notwendig. Hierdurch wird das Gesamtsystem jedoch unnötig größer und schwerer. Um die Vorteile des Umrichtermotors auf das Mittelspannungsnetz zu erweitern, muss also ein Mittelspannungs-Frequenzumrichter soweit verkleinert werden, dass dieser in einen Klemmenkasten unter Beachtung der notwendigen Isolationsabstände und der auftretenden hohen

Feldstärken integriert werden kann.

Aktuelle Frequenzumrichter mit einer Leistungsklasse von 1.500 kW benötigen einen Bauraum von etwa 6 m<sup>3</sup>. Die Verkleinerung der Umrichtertechnik auf eine Größe, die als vergrößerter Klemmenkasten an einen Motor angeflanscht werden kann, stellt dabei eine enorme Herausforderung dar.

Für den Betrieb an derart hohen Spannungen müssen komplexe Umrichterschaltungen, sogenannte Multi-Level Umrichter, zum Einsatz kommen, bei denen mehrere Halbleiterschalter zur Aufteilung der Spannung in Reihe geschaltet werden.

Im Rahmen eines aktuellen Forschungsvorhabens wird gemeinsam mit einem Hersteller von Motoren und Umrichtern für Spezialanwendungen ein Umrichtermotor mit einer Nennleistung von 1.500 kW bei einer Netzspannung von 3.300 V entwickelt und als Labormuster aufgebaut.

Für die Ansteuerung des Multi-Level Umrichters in NPC Topologie wurde eine Mikrorechnerkarte basierend auf einem F28M35x Concerto Mikrocontroller von Texas Instruments entwickelt und als erstes Versuchsmuster mit einem Multi-Level Umrichter mit einer Leistung von 30 kVA bei einer Netzspannung von 400 V teilweise in Betrieb genommen (siehe Abb. 1). Die hierbei erprobten Regelungs- und Modulationsverfahren sollen später auf den zeitgleich in Kooperation mit dem Projektpartner entwickelten realen Multi-Level Umrichter für das Mittelspannungsnetz überführt werden. Der Gesamtaufbau des Mittelspannungs-Umrichtermotors wird zum Abschluss des Projektes im Prüffeld unter realen Bedingungen erprobt.

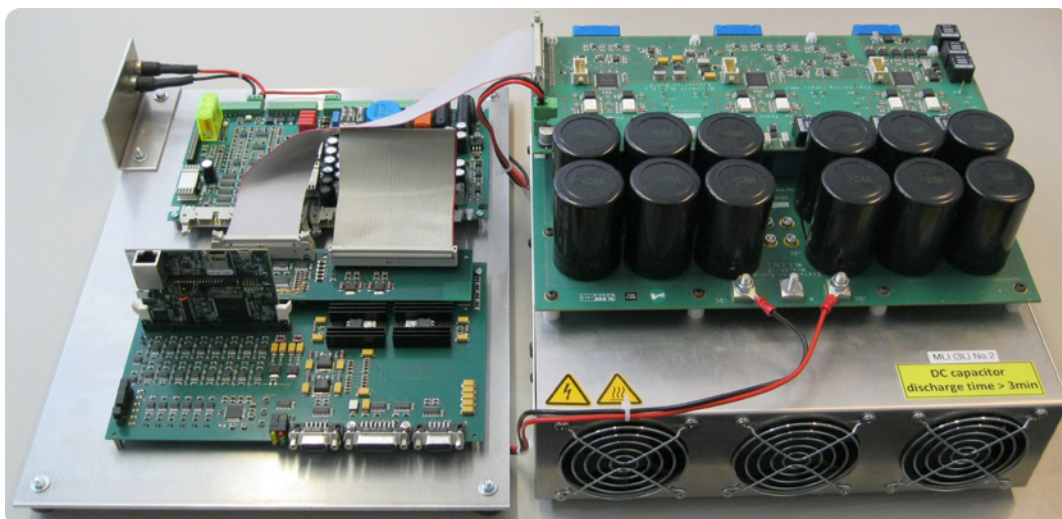


Abb. 1: Mikrorechnerkarte und Multi-Level Umrichter des Versuchsmusters



## Feldorientierte Regelung zur Minimierung von Lagerströmen bei umrichter gespeisten Asynchronmaschinen

Für die Asynchronmaschine existieren bereits viele Regelverfahren für einen drehzahlregelmäßigen Betrieb am Umrichter. Dadurch können der Wirkungsgrad und die dynamische Leistungsfähigkeit der Antriebe verbessert werden. Schon seit Beginn der Anwendung der Drehstrommotoren sind die schädlichen Lagerströme bei mittleren und großen Antriebsleistungen bekannt, vom einfachen und unkomplizierten Pumpen- oder Lüfterantrieb bis hin zum komplexen und leistungsfähigen Generator für Windanlagen.

Das Verhalten der Antriebstechnik einer Asynchronmaschine mit Umrichter und feldorientierter Regelung (FOC) entspricht dem Antrieb einer Gleichstrommaschine im Ankerspannungs- und Feldstellbereich. Wegen der hohen Leistungsfähigkeit, extremen Robustheit und gutem Leistungsfaktor ist die FOC bei der Asynchronmaschine weit verbreitet. Neben den vielen Vorteilen erzeugt die FOC eine hohe Gleichtaktspannung, die bei der Frequenzsteuerung der Asynchronmaschine

mit schnell schaltenden Pulsumrichtern entstehen und häufig Ursache von Lagerausfällen sind. Aus diesem Grund ist ein neuer Algorithmus für die PWM bestehend aus der Raumzeigermodulation und einer dreiphasigen Sinus- Dreieck Modulation entwickelt worden.

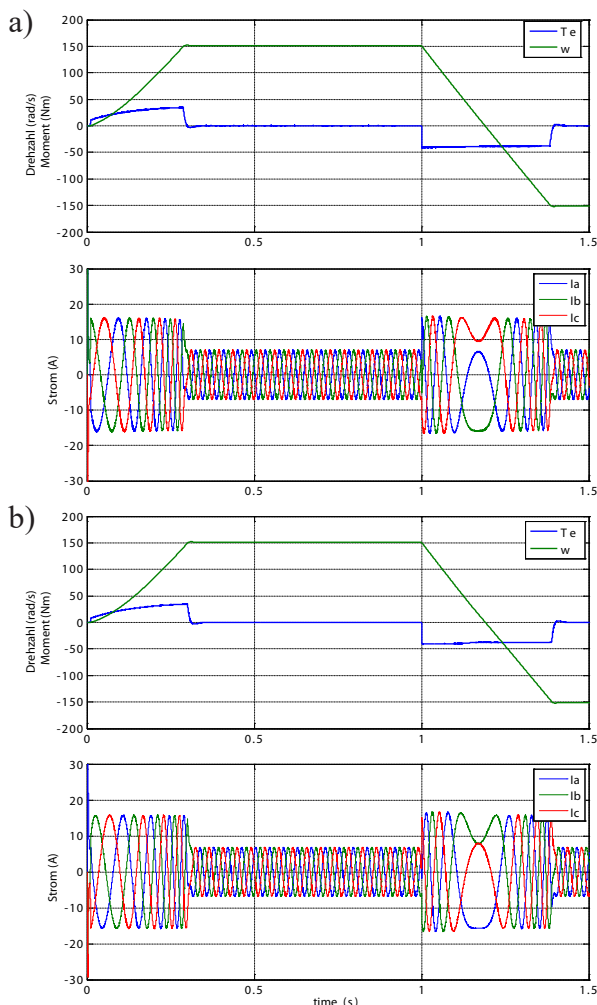
Es handelt sich um eine Kombination aus SVPWM und Offset-Wert (kurz SVCO), die es erlaubt, das Auftreten von Lagerströmen zu vermeiden. Das SVC-Offset wird mit einem Asynchronmotor und der FOC verwendet, um zu demonstrieren, dass die Amplitude der Gleichtaktspannung reduziert wird.

Um den neuen Algorithmus zu validieren, werden numerische Simulationsstudien unter Verwendung von Matlab/Simulink durchgeführt.

Die Verläufe für Strom, Drehzahl, und Drehmoment des Motors sind in Abb. 1 dargestellt.

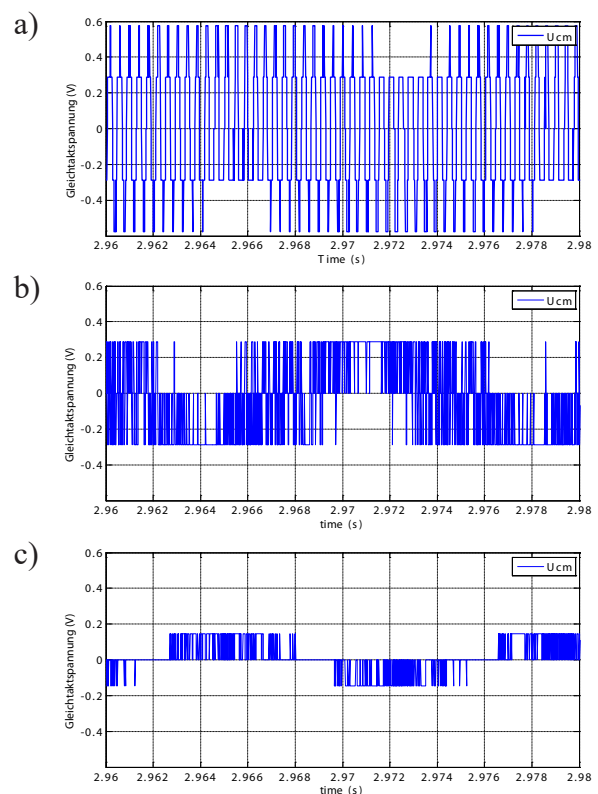
Der Unterschied zwischen der Gleichtaktspannung der traditionellen FOC-SPWM und der neuen FOC-SVCO ist in Abb. 2 gezeigt.

Das neue SVC-Offset kann auf Mehrpunkt-Umrichter ohne Änderung des Steuerkreises angewendet werden. Das Simulationsergebnis für einen fünf Level Umrichter ist in Abb. 2 c) dargestellt. Aus dem Vergleich der Verläufe in Abb. 2 b) und 2 c) zeigt sich recht deutlich die verringerte Gleichtaktspannung.



**Abb. 1:** Die Zeitverläufe der Drehzahl, des Drehmoments und des Stroms des Motors bei einem System mit:

- a) traditioneller FOC-SPWM und
- b) neuer FOC-PWM.



**Abb. 2:** Die Gleichtaktspannung durch:

- a) 3-Level Umrichter (traditionelle SPWM)
- b) 3-Level Umrichter (neue FOC-PWM)
- c) 5-Level Umrichter (neue FOC-PWM)

## Regelung von doppelt gespeisten Asynchronengeneratoren in Windenergieanlagen bei Netzunsymmetrien und Netzfehlern

Seit vielen Jahren werden doppelt gespeiste Asynchronmaschinen als drehzahlvariable Generatoren in Windenergieanlagen eingesetzt und sind zurzeit der bevorzugte Generatortyp. Bei ungestörten symmetrischen Netzspannungen lässt sich das Umrichter-Generatorsystem mit einer feldorientierten Regelung sowohl bezüglich der Wirk- und Blindleistung als auch bezüglich Drehzahl und Drehmoment mit hoher Dynamik betreiben. Bei den meisten bisherigen Arbeiten zur Generatorregelung wird vorausgesetzt, dass das genutzte Drehstromnetz völlig symmetrisch und starr ist.

Netzstörungen haben jedoch neben Schwingungen im Luftspaltmoment überhöhte Generatorströme zur Folge. Bezüglich des Generators dürfen kurzzeitige Ströme von bis zum 10-fachen des Nennstromes auftreten, die in der Regel durch Netzstörungen nur selten erreicht werden. Bedingt durch die geringe Überlastfähigkeit des Umrichters, mit dem ca. 1,2 - 1,5-fachen des Nennstromes, muss dieser jedoch schon bei kleinen und mittleren Netzstörungen geschützt werden. Dabei müssen kurzfristige Netzstörungen laut Netzanschlussbedingungen sicher durchfahren werden, wobei die Anlage im Regeleingriff bleiben muss. Der Einsatz einer „Crowbar“ ist in solchen Fällen nur bedingt möglich.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten werden neue Stra-

tegien zur Regelung doppelt gespeister Asynchronengeneratoren und des Umrichters im Rotorzweig entwickelt, die es ermöglichen sollen, den geregelten Betrieb des Asynchrongenerators über den rotorseitigen Frequenzumrichter auch bei Netzstörungen, insbesondere auch bei Kurzschlüssen, aufrecht zu erhalten und den aktuellen Netzanschlussbedingungen gerecht zu werden.

Ein Lösungsansatz besteht darin, die durch eine Netzstörung auftretenden Oberschwingungen in den Rotorströmen separat auszuregeln. Abb. 1 zeigt die erweiterte Struktur der Rotorstromregelung zur Kompensation der durch Netzstörungen verursachten Ausgleichsströme zum Schutz des rotorseitigen Umrichters.

Dabei wird die ursprüngliche Generatorregelung durch parallele Oberschwingungsregelkreise erweitert, in denen nur jeweils ein Frequenzanteil verarbeitet wird. Im Gegensatz zur Standard-Regelung des rotorseitigen Umrichters kann damit sowohl für einen symmetrischen als auch für einen unsymmetrischen Netzspannungseinbruch eine unzulässige Überhöhung der Ströme unterbunden werden, so dass der Umrichter während der Netzstörung im Eingriff und somit der Generator regelbar bleibt.

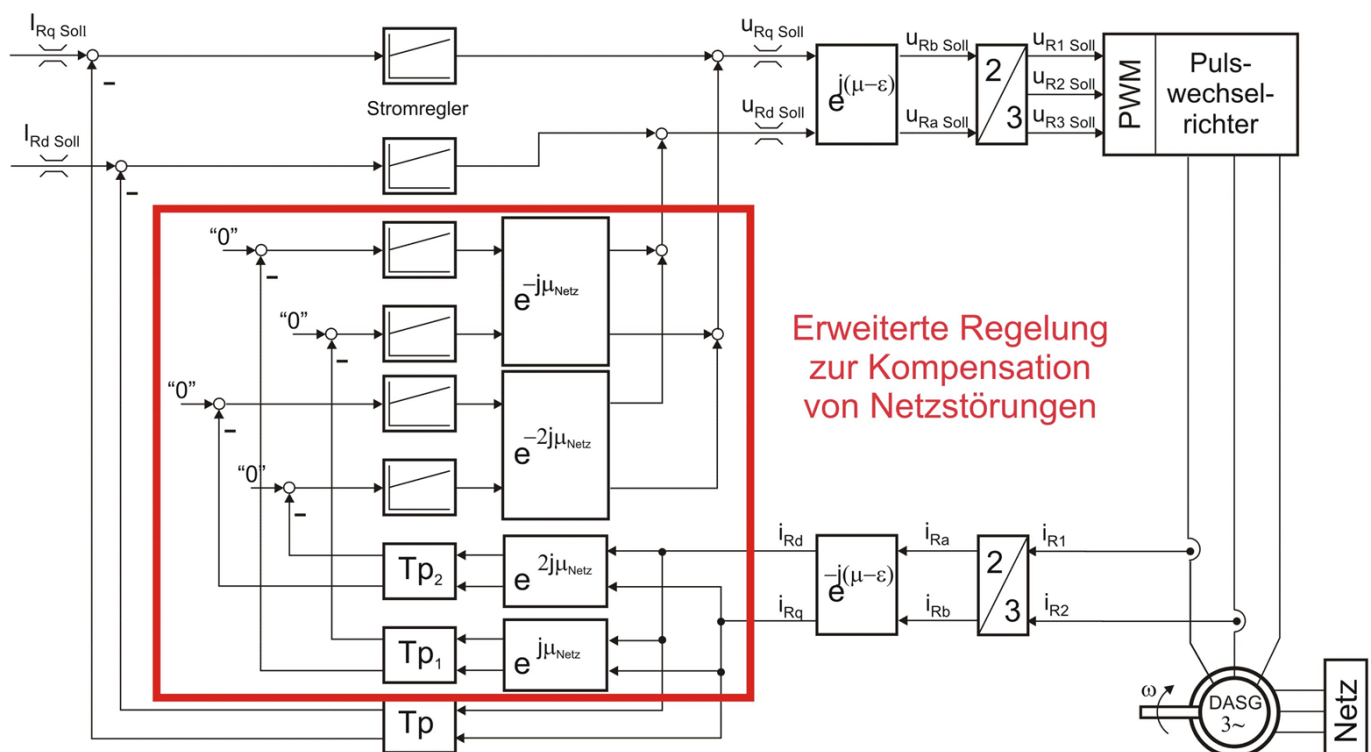
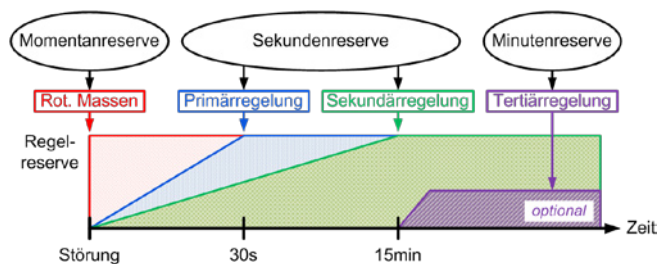


Abb. 1: Erweiterte Regelung zur Kompensation von Netzstörungen



## Regelung von Windenergieanlagen als fiktives Turbinen-Generator-System

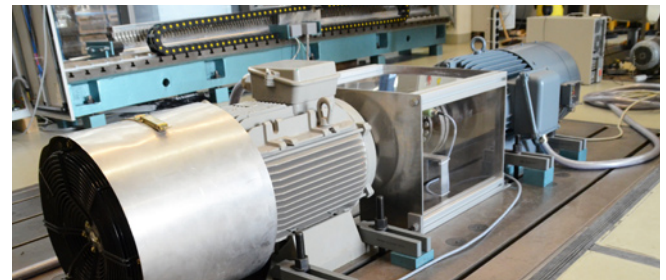
Der Ausbau erneuerbarer Energien wird stetig vorangetrieben. Entscheidend dabei ist aber nicht nur, wie viele Windparks errichtet werden, sondern genauso wichtig ist auch, wie sich jede einzelne Windenergieanlage vom Stromnetz betrachtet verhält. Noch sind es die großen Dampfkraftwerke, die die Funktionen für die Netzregelung übernehmen und mit ihrer Schwungmasse des Turbinen-Generator-Satzes eine wichtige Speicherfunktion, die Momentanreserve, erfüllen. Wenn immer mehr Windenergieanlagen errichtet werden, um damit konventionelle Dampfkraftwerke zu ersetzen, ist es naheliegend, dass die Funktionen von den Dampfkraftwerken auf die dafür aufgestellten Windenergieanlagen übertragen werden müssen, damit ein gewisses Maß an Kraftwerksdienstleistungen, wie die Primärregelung und die Bereitstellung einer Momentanreserve in Abb. 1, auch weiterhin für die Regelung des Stromnetzes zur Verfügung steht.



**Abb. 1: Klassifikation von unterschiedlicher Regelreserveleistung im Verbundnetz**

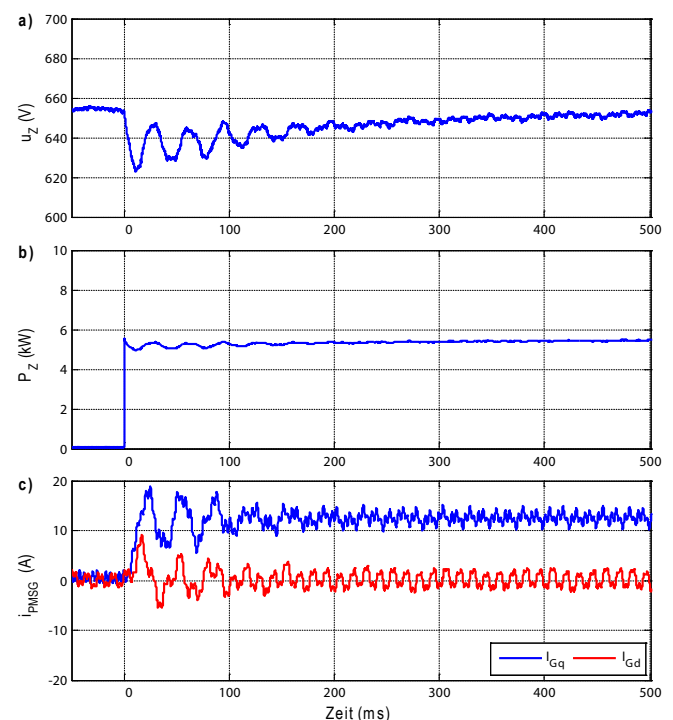
Zu diesem Zweck ist ein neues Verfahren vorgeschlagen und zunächst in Simulation untersucht worden, dass durch eine Änderung der heutigen Betriebsführung das Verhalten von einem konventionellen Dampfkraftwerk auf eine Windenergieanlage mit Vollumrichter überträgt. Somit können auf Netzstatiken basierende Regelungskonzepte eingesetzt und die Bereitstellung einer Momentanreserve verfügbar gemacht werden. An dieser Stelle ist ein grundlegender Unterschied zu den konventionellen Anlagenbetriebsführungen entwickelt worden: Die Regelung der Zwischenkreisspannung erfolgt nicht mehr über den netzseitigen, sondern über den generatorseitigen Wechselrichter mit Synchron-generator und angeschlossenen Windrad. In ersten experimentellen Untersuchungen konnte diese Funktion an dem Versuchsstand in Abb. 2 getestet werden. Die Zwischenkreisspannung in Abb. 3 wird bei einem aufgeschalteten Lastsprung in Höhe von 5 kW in tolerierbaren Grenzen ausgeregelt.

In Kombination mit der hier eingesetzten Regelung ist mit den Komponenten einer Windenergieanlage das Verhalten einer Turbine aus einem Dampfkraftwerk nachempfunden worden. Als Stellglied wird der Pitch-



**Abb. 2: Synchron-generator (30 kW) und Asynchronmotor (45 kW) als Antrieb auf dem Prüffeld**

winkel in Analogie zum Frischdampfventil verwendet, um die zugeführte Leistung aus dem Wind zu steuern und durch Begrenzung eine Primärregelreserve nach den Vorgaben der ENTSO-E zu jedem Zeitpunkt vorzuhalten. Der netzseitige Wechselrichter wird dann mit Hilfe eines fiktiven Synchrongenerators geregelt, wodurch der Stromverlauf dem dynamischen Verhalten eines Kraftwerksgenerators gleicht. Es ist hier notwendig gewesen, eine Strombegrenzung zum Schutz der Leistungselektronik zu implementieren.



**Abb. 3: Verhalten der neuen, über den generatorseitigen Wechselrichter realisierten Zwischenkreisspannung bei dem Aufschalten einer 5 kW ohmschen Last im DC-Kreis. Zu sehen sind die:**

- a) Zwischenkreisspannung  $u_z$ , die vom Wechselrichter geregelt wird,
- b) die aufgeschaltete ohmsche Leistung  $P_z$  direkt im Zwischenkreis und
- c) der daraufhin eingeregelt Generatorlängs- ( $I_{Gd}$ ) sowie -querstrom ( $I_{Gq}$ ) zur Kompensation des Lastsprunges.

## 50 kW Labor-Windenergieanlage für das IALB

Bei Anlagen mit Leistungen bis über 6 MW hat sich derzeit das Konzept der dreiflügeligen Windenergieanlage mit im Anstellwinkel verstellbaren Rotorblättern etabliert. Dem IALB gelang es, sich im Jahr 2013 zwei der wenigen Anlagen zu sichern, die bereits bei einer Nennleistung von nur 50 kW sämtliche Funktionsmerkmale einer „großen“ Windenergieanlage aufweisen. An solchen „kleinen“ Anlagen sind Änderungen und Anpassungen mit einem vertretbaren Aufwand möglich. Die Anlagen stammen aus dem Raum Niedersachsen sowie dem Weserbergland und wurden nach nun 20 Jahren Betrieb im Zuge von RePowering Maßnahmen gegen leistungsfähigere Nachfolger ausgetauscht (siehe Abb. 1 und Abb. 2).

Die Gondel einer der Anlagen wurde im Prüffeld des IALB aufgestellt und soll zukünftig in Kombination mit einer Antriebsmaschine die Nachbildung von unterschiedlichen Belastungen im Labor ermöglichen (siehe Abb. 3). Als Antriebsmaschine kommt eine 50 kW Transversalflussmaschine, die in einem vorangegangenen Projekt als getriebeloser Generator für Windenergieanlagen entwickelt wurde, zum Einsatz. Der Prüfstand ermöglicht so den direkten Vergleich zwischen getriebelosem und getriebebehaftetem Triebstrang.

Die Aufstellung einer weiteren Anlage ist für den Sommer 2014 in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWES im Raum Bremerhaven geplant. Hierbei soll die Anlage auf einer Freifläche zunächst im Original Zustand wieder aufgebaut und betrieben werden.

Durch den dualen Aufbau in Labor und Original können Verfahren und Optimierungen ausgiebig im Labor getestet und Aufbauten oder Messsysteme erprobt werden, bevor diese an der realen Anlagen installiert wer-

den müssen. Durch den Abgleich von Messungen aus der Anlage im Feldeinsatz mit dem Prüfstand kann das Verhalten der Laboranlage optimal angepasst werden und somit realitätsnahe Ergebnisse im Labor erzeugt werden.

Mit der Aufstellung dieser Anlagen sichert sich das IALB einen führenden Platz in der realitätsnahen Windenergieforschung.



Abb. 1: Gondel der Windenergieanlage vor dem Abbau



Abb. 2: Abbau der Anlage in Wildeshausen

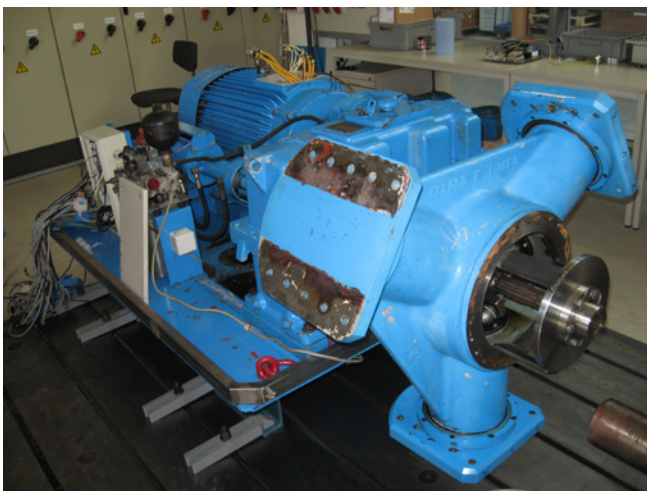


Abb. 3: Gondel der Windenergieanlage im Prüffeld des IALB



## Netzanbindung von Offshore-Windparks mit kombinierter HGÜ

Zur Netzanbindung großer Offshore-Windparks oder sog. Windpark-„Cluster“ untersucht das IALB derzeit im Rahmen eines DFG-Forschungsvorhabens das Konzept einer kombinierten HGÜ-Struktur. Diese besteht aus einer Kombination von selbst- und netzgeführten Konverterstationen, die an einer gemeinsamen DC-Leitung betrieben werden (Abb. 1). Das selbstgeführte System arbeitet nach den bekannten Prinzipien zur Anbindung von Offshore-Windparks: Der festlandseitige Umrichter mit Spannungszwischenkreis (Festland-VSC) regelt die Gleichspannung auf der Übertragungsstrecke, während der windparkseitige VSC mit einer Inselnetzregelung betrieben wird. Inselnetzregelung bedeutet, dass das Drehspannungssystem im Windparknetz in Betrag und Phase eingeprägt wird. Das selbstgeführte System soll allerdings nur auf 10 % der Gesamtleistung ausgelegt sein. Dies genügt, um den Windpark bei Flaute mit dem Eigenbedarf zu versorgen und die gewandelte Windleistung bei kleinen Windstärken ans Festland zu übertragen. Bei mittleren bis hohen Windstärken werden die netzgeführten Konverter auf Thyristorbasis (LCC) leistungsgeregelt zugeschaltet. Diese übertragen dann den Großteil der Leistung verlustarm ans Festland.

Problematisch ist der hohe Blindleistungsbedarf der beiden LCC, insbesondere des Windpark-LCC, da der Raum für passive Kompensationsanlagen auf Plattformen im offenen Meer stark begrenzt ist. Die gesamte Grundswingungsblindleistung setzt sich dabei aus Steuer- und Kommutierungsblindleistung zusammen. Da das netzgeführte System jedoch nur für die Leistungsübertragung vom Windpark zum Festland vorgesehen ist, können die Stromrichtertransformatoren so ausgelegt werden, dass der Windpark-LCC bei Vollast mit sehr kleiner Zündverzögerung (Zündwinkel  $\alpha \approx 5^\circ$ ) betrieben wird, so dass die Steuerblindleistung minimiert wird. Aufgrund der unvermeidlichen Kommutierungsblindleistung ergibt sich dennoch ein Blindleistungsbedarf von etwa 35 % der übertragenen

Wirkleistung. Bei dem hier untersuchten Konzept wird die Blindleistung aus drei Quellen geliefert: Einer möglichst kleinen Kondensatorbank, die gleichzeitig als Filter für hochfrequente Harmonische dient, den Windenergieanlagen, sowie dem Windpark-VSC, der in letzter Instanz für das Blindleistungsgewicht im Windparknetz verantwortlich ist.

Ebenso ist der „induktive Gleichspannungsabfall“ von netzgeführten Stromrichtern für den Betrieb eines solchen kombinierten HGÜ-Systems von Bedeutung. Um auf der Festlandseite über den ganzen Arbeitsbereich mit geringst möglichem Blindleistungsverbrauch zu arbeiten, muss der Festland-LCC stets an der Stabilitätsgrenze betrieben werden. Dies gelingt nur dann, wenn der Sollwert für die Gleichspannung auf der Übertragungsstrecke, die durch den Festland-VSC geregelt wird, dynamisch an die Gleichstrom-Gleichspannungs-Charakteristik des Festland-LCC angepasst wird.

Der kombinierte Betrieb von selbst- und netzgeführter HGÜ wird derzeit an einem Versuchsaufbau (Abb. 2) experimentell nachgebildet.

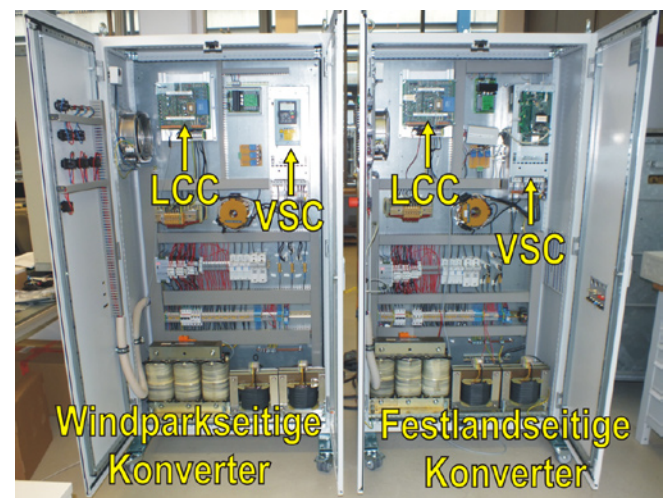


Abb. 2: Versuchsaufbau „kombinierte HGÜ“

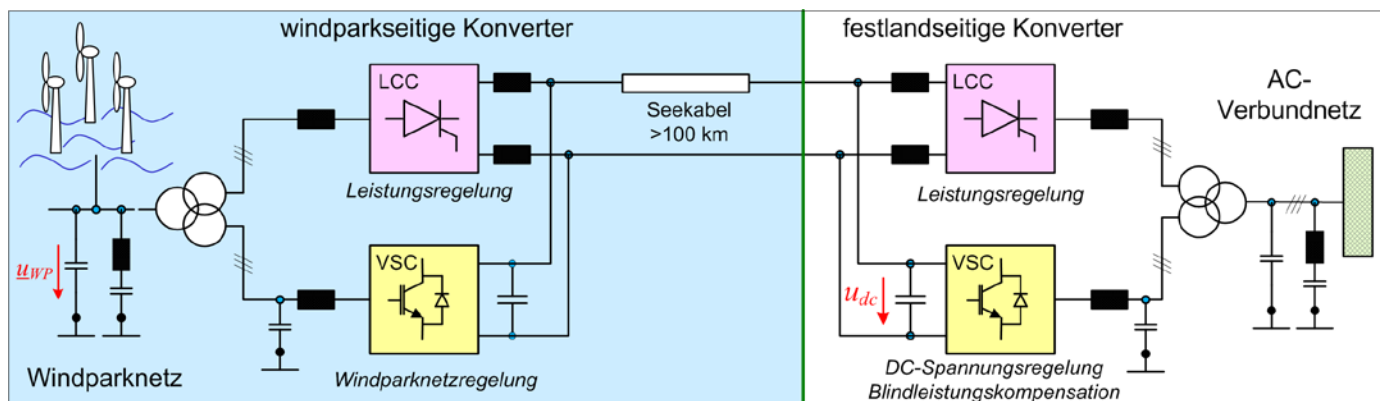


Abb. 1: Anbindung eines Windpark-Cluster durch kombiniertes HGÜ-System

## Magnetloser Pitch-Antrieb mit Transversalfluss-Reluktanzmaschinen

Chinas Weltmonopol bei den Seltenen Erden, die zur Herstellung von Permanentmagneten (PM) benötigt werden, treibt die Preise von hocheffizienten Antrieben mit permanenterregten Synchronmaschinen in die Höhe. Dank ihren besonderen Eigenschaften können geschaltete Reluktanzmaschinen (SRM) eine kostengünstige Alternative darstellen. Der Aufbau ist einfach und sie können preiswert produziert werden. Durch das Fehlen eines Kommutators, PM oder Wicklungen im Rotor sind sie kaum fehleranfällig.

Der unipolar Strom, der für SRM benötigt wird, ermöglicht ein ganzes Spektrum von neuen Umrichter-Topologien, die die Zuverlässigkeit verbessern können und mit weniger Halbleiterelementen auskommen. Enorme Fortschritte in Steuerelektronik wie z. B. DSP oder FPGA ermöglichen eine kosteneffektive Realisierung von vielen hoch entwickelten Regelungsverfahren, Fehlererkennungsmethoden und Fehlerbehandlungen. Alle oben genannten Aspekte erschaffen ein großes Potential für eine fehlertolerante, effektive, und vor allen kostengünstige Alternative zu PM erregten Maschinen. Heutzutage finden Reluktanzmaschinen ihren Platz in modernen, effizienten Haushaltsgeräten, insbesondere in Hochgeschwindigkeitsanwendungen. Da, wo ein großes Drehmoment bei kleiner Drehzahl erforderlich ist, wie z. B. bei Pitch-Antrieben, ist ein Getriebe mit großem Übersetzungsfaktor notwendig. Dieses stellt aber eine Schwachstelle hinsichtlich der Zuverlässigkeit dar und erhöht Gewicht und Kosten einer Anlage. Die vielversprechende und seit Jahren in IALB weiterentwickelte Transversalflusstechnologie bietet eine Lösung für solche Anwendungen. Im aktuellen Forschungsprojekt wird eine Transversalfluss-Reluktanzmaschine (TFRM) entwickelt.

Die bis jetzt durchgeführten Arbeiten konzentrieren sich auf das Anforderungsprofil für den Einsatz als Pitch-Antrieb, Spezifikation, Vorgaben der Fehlertoleranz

und Redundanz, sowie die Modellierung der TFRM. Der prinzipielle Aufbau der geplanten TFRM wird in Abb. 1 dargestellt. Die komplette Maschine wird später aus sechs derartigen Strängen bestehen, die um einen elektrischen Winkel von jeweils  $60^\circ$  zueinander verdreht sind. In Abb. 2 sieht man beispielhaft das Ergebnis einer Simulation: Es wird die Feldverteilung und die magnetische Flussdichte im Eisen dargestellt. Es wurde die höchste zulässige Durchflutung vorgegeben, um die beste Ausnutzung für das maximal erreichbare Drehmoment zu bekommen. Die TFRM wird in diesem Fall magnetisch hoch gesättigt betrieben.

In Abb. 3 sind die Drehmomentverläufe abgebildet, die über eine Periode für unterschiedliche Ströme aufgetragen sind. Als eine Periode wird die Stellung des Läuferpols bei der Überlappung zwischen den beiden Polen bezeichnet. Für den Betrieb des Motors wird je nach Drehrichtung jeweils nur eine Halbperiode benutzt, die Zweite bleibt inaktiv.

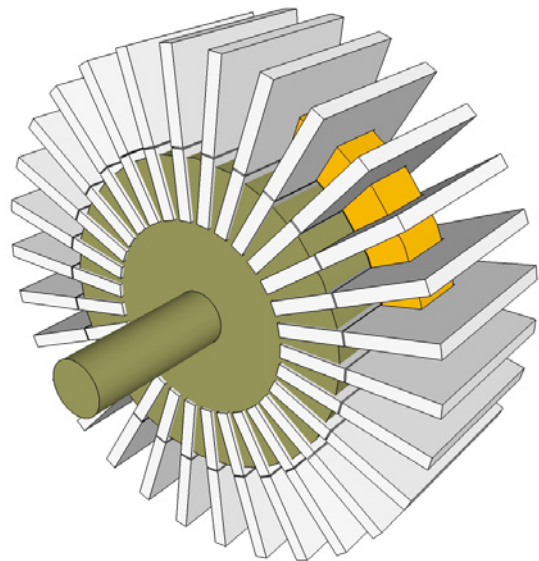


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau der TFRM (ein Strang)

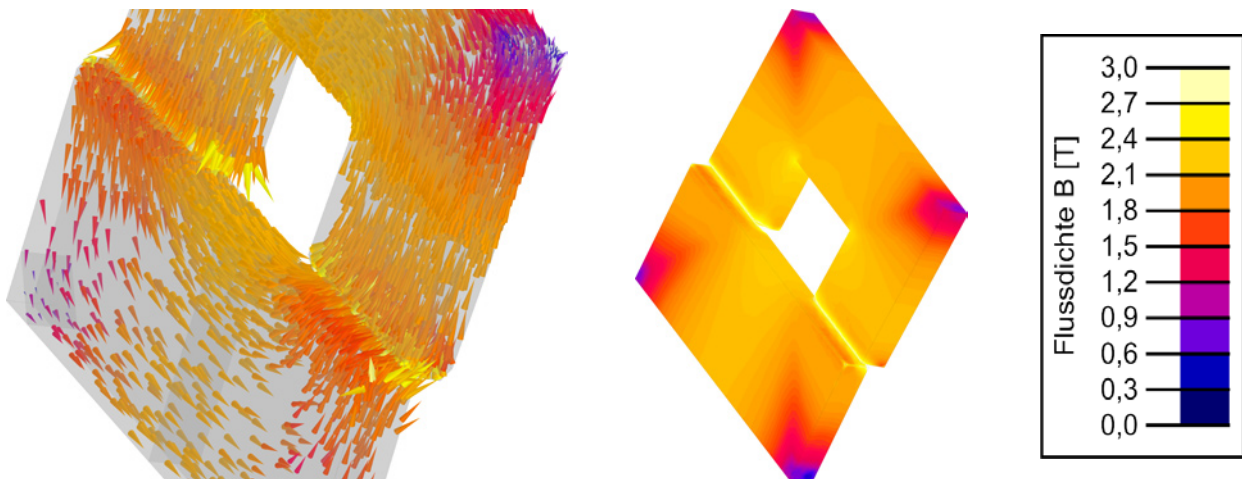
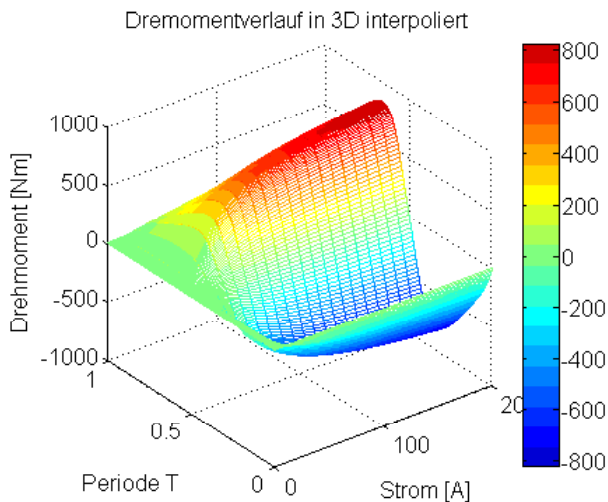


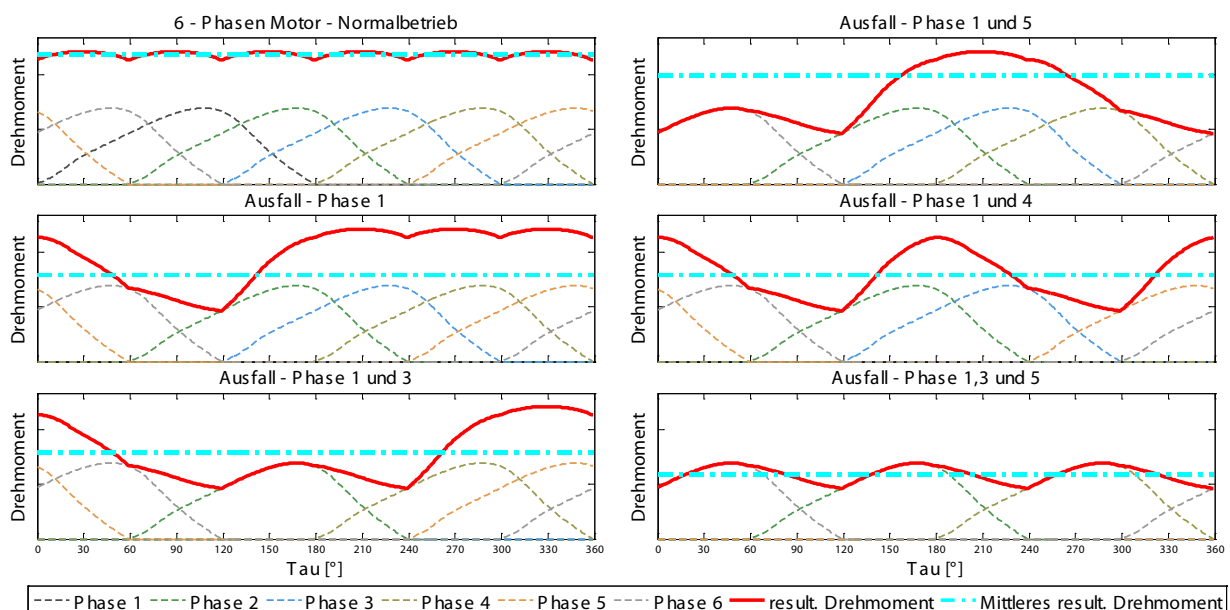
Abb. 2: Feldverlauf und Flussdichteverteilung in einem Pol der TFRM



**Abb. 3: Drehmoment über dem Rotorwinkel für unterschiedlichen Strangströme**

Die Ergebnisse der dreidimensionalen FEM-Simulation liefern sehr detaillierte Werte für das erreichte Drehmoment, die durch Wirbelströme auftretenden Verluste und viele andere Parameter, die für die weitere Entwicklung des Antriebssystems notwendig sind. Leider sind solche Simulationen sehr rechenintensiv, was für die Analyse eines Motors mit unterschiedlichen Phasenzahlen, verschiedenen Kombinationen von Störungen in den einzelnen Phasen mit einer enormen Berechnungszeit verbunden ist. Daher wurden für die Untersuchung des Antriebssystems die Vorteile zweier Berechnungsmethoden miteinander kombiniert, der dreidimensionalen FEM- und der Matlab/Simulink-Simulationen. Die besonderen Eigenschaften der TFRM sind dafür besonders prädestiniert. Die wichtigste Eigenschaft ist die nahezu vollständige magnetische und elektrische Entkopplung der einzelnen Phasen, so dass die detaillierten FEM-Simulationen nur für eine einzelne Phase

durchgeführt werden müssen. Die mit der FEM-Simulation gewonnenen Daten wurden verwendet, um unter Matlab/Simulink das Modell einer einzelnen Phase zu erstellen. Nach der Erstellung einer Phase kann eine Simulation des Motors ohne großen Mehraufwand mit unterschiedlichen Phasenzahlen und bei unterschiedlichen Fehlerfällen durchgeführt werden. Änderungen können einfach vorgenommen werden. Mit Hilfe der oben beschriebenen Modelle wurden verschiedene Konfigurationen der TFRM mit drei bis neun Phasen durchgeführt. Der Einfluss von defekten Phasen in allen möglichen Kombinationen wurde für alle Motorkonfigurationen untersucht und, die sich ergebenden Drehmomentverläufe, miteinander verglichen. In Abb. 4 wird die Beispielanalyse für einen sechsphasigen Motor durchgeführt. In dieser Konfiguration bewirkt der Ausfall einer Phase, zweier bestimmter Phasen oder im Einzelfall auch dreier Phasen nur eine Absenkung des mittleren Drehmomentes, der Motor kann aber weiter im Normalbetrieb mit vertretbaren Momentpulsationen betrieben werden und auch ein kurzzeitiger Überlast-Betrieb bleibt weiterhin möglich. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Betrieb der Maschine beim Ausfall einer Phase ab einer Phasenzahl von fünf möglich ist, jedoch schränkt dies die Möglichen Umrichtertopologien ein, welche auf symmetrischen Eigenschaften basieren. Eine übermäßig hohe Phasenzahl wiederum erhöht aufgrund der erhöhten Komplexität und Anzahl an Bauteilen die Ausfallwahrscheinlichkeit. Unter Beachtung dieser Ergebnisse wurde für den Pitch-Antrieb eine sechsphasige Konfiguration ausgewählt. Hierdurch gewinnt man Freiheitsgrade bezüglich der Umrichtertopologie, der Regelung, der Möglichkeiten für eine Fehlerdetektion und der Parametrierung des Antriebs.



**Abb. 4: Feldverlauf und Flussdichteverteilung in einem Pol der TFRM.**



## Transversalfluss-Linearantrieb für industrielle Anwendungen

In modernen Industrieanlagen werden zunehmend Lineardirektantriebe verwendet, die gegenüber traditionellen Lösungen für Linearbewegungen bereits viele Vorteile aufweisen. Sie sind fast wartungsfrei, haben keine mechanische Übersetzung und weisen ein spielfreies Ansprechverhalten auf. Allerdings besteht der Stator von bisherigen Lineardirektantrieben zum großen Teil aus Permanentmagneten. Der hohe Magnetpreis begrenzte deshalb bislang trotz obiger Vorteile den Einsatz dieser Lösungen, insbesondere bei größeren Verfahrenswegen. Zudem wirken die Permanentmagnete im Stator anziehend auf Späne, Bleche oder andere Metallteile, wodurch das Einsatzgebiet solcher Motoren eingeschränkt wird.

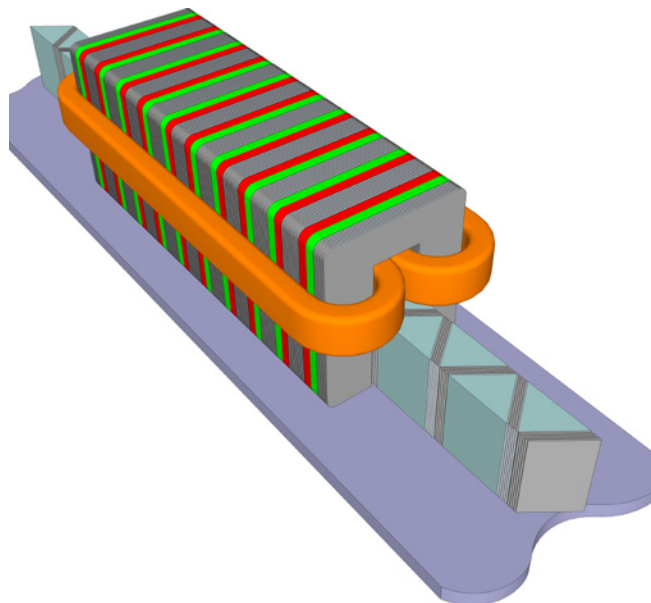
Unter Einsatz der Transversalflusstechnologie wird gemeinsam mit Industriepartnern ein innovativer Linearantrieb entwickelt, der durch seinen Aufbau erhebliche Vorzüge gegenüber konventionellen Lineardirektantrieben aufweist. Der Stator besteht nur aus Eisenblechen, vollständig ohne Magnete. Außerdem ist der Antrieb bei höherer Positioniergenauigkeit vor allem dynamischer und energieeffizienter als heutige Lösungen. Die Einsatzmöglichkeiten von TransInno sind z. B. Transferanlagen (Kranbahnen, Portale, Handlings- und Transportsysteme) zum schnellen und präzisen Positionieren von Werkstücken, die Medizintechnik (Patientenhandlingssysteme, Nachführung von Behandlungsgeräten in Echtzeit) oder der Maschinenbau (hochdynamische Laser- oder Fräsbearbeitung).

In einem vorangegangenen Forschungsprojekt wurde bereits ein Versuchsmotor aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen (Abb. 1). Mit Messungen wurde das Funktionsprinzip und die Eigenschaften des Motors

nachgewiesen.

Die besondere Herausforderung besteht nun vor allem darin eine Serientauglichkeit im Herstellungsprozess und der Fertigungstechnologie zu erreichen, um die Systeme wirtschaftlich herstellen zu können. Dazu werden mit Hilfe dreidimensionaler Magnetfeldsimulationen Freiheitsgrade identifiziert, die für eine optimale mechanische Konstruktion genutzt werden können und gleichzeitig die Vortriebskraft und den Wirkungsgrad des Antriebssystems steigern.

In Abb. 2 ist eine neue Geometrie-Variante des Motors dargestellt. Sie zeichnet sich durch eine deutlich vereinfachte Stator-Konstruktion aus, da keine gekröpften Bleche mehr verwendet werden.



**Abb. 2: Neue Magnetkreis-Geometrie mit einer deutlich vereinfachten Stator-Konstruktion**



**Abb. 1: Foto des Transversalfluss-Linearantriebs im Labor des IALB**

## Ausgleich der Hysterese-Effekte bei der magnetischen Lagerung durch einen nichtlinearen Regelungsentwurf

Ziel es, kleine modulare Bearbeitungseinheiten für die Mikrozerspanung zu entwickeln. Das Konzept derartiger Einheiten ergibt sich aus der Dekomposition klassischer Werkzeugmaschinen und der Funktionsintegration von Antrieb und Führungen. Zur exemplarischen Umsetzung wird zunächst ein Mikro-Schleifkopf (*GrindBall*) entwickelt. In Abb. 1 ist der prinzipielle Aufbau dargestellt.



Abb. 1: Aufbau GrindBall-Modul

Die Bestimmung der Position, für eine magnetische Lagerung, bei kleinen Kugeldurchmessern stellt eine Herausforderung dar. Die Position kann normalerweise aus der Feld- und Strommessung berechnet werden. Im dynamischen Betrieb entstehen jedoch zu den Strömen in den Spulen Wirbelströme im Modul, welche ein Gegenfeld erzeugen. In diesem Arbeitspaket werden verschiedene Konzepte für die Betrachtung der Wirbelströme im Magnetwerkstoff, welche durch die magnetische Flussänderung entstehen, aufgestellt und messtechnisch untersucht. Eine genauere Kenntnis der Wirbelströme und deren zeitliche sowie räumliche Verteilung verbessert das Systemverständnis im dynamischen Betrieb. Die Wahl des Magnetwerkstoffs sowohl für die Schleifkugel als auch für das Modul ist jedoch für die Regelung und Positionsbestimmung von entscheidender Bedeutung. Gleichzeitig werden verschiedene Regelungsmethoden, wie die Behandlung der Dynamik bei Wirbelströmen, untersucht, um eine für das gewählte Magnetlagerungskonzept geeignete Regelungsstruktur zu finden. Bei den meist verwendeten Magnetwerkstoffen ist die Restmagnetisierung selbst bei relativ großem Luftspalten deutlich bemerkbar. Die magnetische Kraft ist allgemein  $F \sim B^2$ . Somit kann die Restmagnetisierung auch als eine Vormagnetisierung (im regelungstechnischen Sinne Vorsteuerung) sinnvoll genutzt werden, so dass die Schleifkugel mit weniger Strom im Arbeitspunkt gehalten werden kann.

Das Ziel ist es, in diesen kleinen räumlichen Grenzen eine hohe Dynamik, Stabilität und gute Entkoppelbarkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten. Dies ist nur mit einem genauen mathematischen Modell und adaptivem Regelungsverfahren möglich. Hierbei sind ein elektromagnetisches Lagerungssystem und ein fluid-

dynamischer Antrieb verknüpft, um einen kugelförmigen Schleifkörper von wenigen Millimetern Größe in einer definierten Position zu lagern, anzutreiben und mit diesem einen Abtrag zu erzielen. Durch den kugelförmigen Aufbau wird die Rotationsachse nahezu beliebig zum aktuellen Kontaktpunkt der Bearbeitung ausgerichtet und so eine möglichst hohe Schnittgeschwindigkeit erzielt. Durch das Fehlen einer festen

Rotationsachse wird es als „achsenloses“ Mikroschleifwerkzeug bezeichnet. Der Einsatzbereich wird zunächst auf einfache Geometrien, wie rotationssymmetrische Kavitäten mit Abmessungen in der Größe des Schleifkörpers, beschränkt. Anhand der entwickelten Methodik sollen sich hieraus später mit überschaubarem Aufwand neue Module

ableiten lassen, die eine Bearbeitung von komplexeren Werkstückgeometrien, insbesondere von Freiform-Mikrostrukturen ermöglichen.

Es steht bei weitaus geringerem Bauraum eine größere nutzbare Funktionsfläche zur Verfügung. Dieser Effekt ist insbesondere für spanende Bearbeitungswerkzeuge von großem Nutzen, da mit kleiner werdenden Werkzeugen beispielsweise eine größere Regeldynamik erreicht werden und der Prozess somit besser an die jeweiligen Bearbeitungsbedingungen angepasst werden kann.

Zu diesem Zweck wird die Schleifkugel durch einen Fluidstrom angetrieben. Die abstoßende Kraft auf die Schleifkugel wird durch die regelbare Gegenkraft (Prinzip des aktiven Magnetlagers) so kompensiert, dass die Schleifkugel in einem definierten Abstand zum Schaft gehalten und eine Abdrängung der Kugel zur Seite verhindert wird.

Die Lagerung der magnetischen Schleifkugel wird mit einer nichtlinearen Regelung realisiert. Dabei wird die Methode der exakten E/A-Linearisierung verwendet.

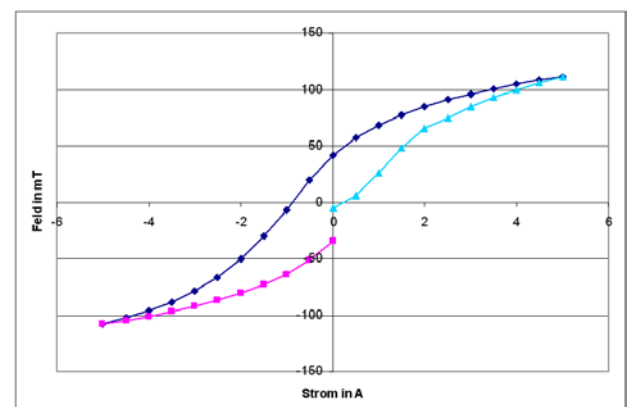


Abb. 2: Hystereseschleife

## Digital geregeltes Netzteil für den Einsatz im Passagierbereich eines Großraumflugzeuges

Am IALB wurde der Entwurf und die Erprobung eines Netzteils für den Einsatz in modernen Passagiermaschinen erfolgreich abgeschlossen. Dieses bildet die Basis für weitere Entwicklungen von Spannungsversorgungen im Passagierbereich, welche dort direkt in Sitzen verbaut werden. Als Ausgang werden Wechselspannungen von 115 V / 60 Hz bzw. 230 V / 50 Hz bei einer Leistung von bis zu 1 kW zur Verfügung gestellt, um z. B. das Laden von Laptops zu ermöglichen.

Die Herausforderung bei diesem Vorhaben lag dabei in der hohen Variabilität der Netzfrequenz von 360 - 800 Hz. Es sollte ebenfalls ein weiter Lastbereich von 20 - 80 % abgedeckt werden, über den der Leistungsfaktor sowie der Wirkungsgrad sehr gute Werte aufweisen. Aus diesem breiten Anforderungsprofil ergibt sich die Notwendigkeit einer digitalen Regelung. Diese ermöglicht, durch Adaption auf die jeweiligen Betriebszustände optimal zu reagieren.

Der Unterschied dieses Netzteils zu früheren Lösungen ist, dass hier die gesamte Regelung digital durch ein Programmable Gate Array (FPGA) realisiert wird. Dabei handelt es sich um programmierbare Logikbausteine, in welchen die gesamte Rechen- und Reglerstruktur in digitaler Hardware umgesetzt wird.

Der große Vorteil von FPGAs ist, dass diese eine hohe Rechenleistung gepaart mit einer geringen Totzeit erreichen können, was für eine schnelle und stabile Regelung unabdingbar ist. Ebenso ist die Rechenstruktur in Hardware ausgeführt, was die vorgeschriebene Qualifizierung für den Einsatz in der Luftfahrt stark vereinfacht, da eine aufwändige Softwareprüfung entfällt.

In Abb. 1 ist der Systemaufbau sowie das entworfene Labormuster dargestellt. Dieses besteht aus den drei modularen Funktionselementen: Die PFC für eine aktive Leistungsfaktorkorrektur, der galvanisch getrennte DC/DC-Wandler für den Schutz von Personen gegen Stromunfälle und der DC/AC-Wandler zur Erzeugung der Ausgangswechselspannung.

Durch den Einsatz eines FPGA konnte eine Erhöhung der Schaltfrequenzen von 16 kHz auf 70 kHz erreicht werden, wodurch sich kleinere Induktivitäten mit geringerem Gewicht und Abmessungen verwenden lassen.

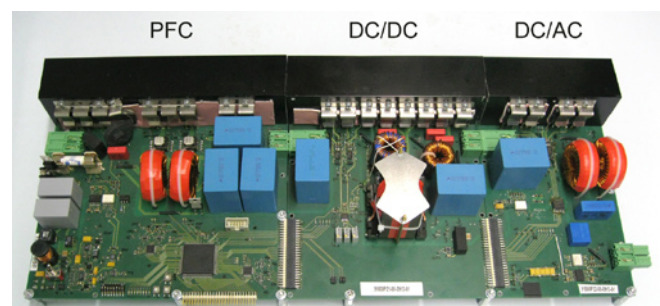
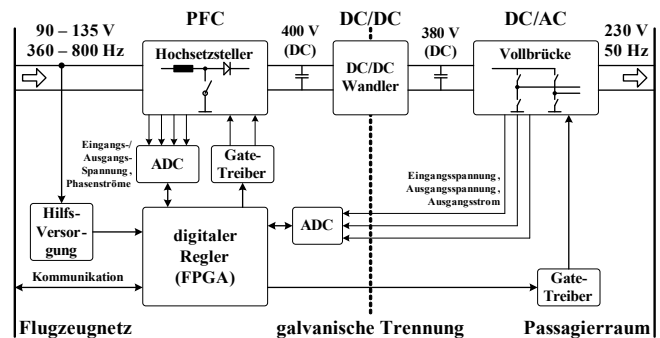


Abb. 1: Systemaufbau des Netzteils (oben) sowie Foto des entworfenen Labormusters (unten), bestehend aus drei Funktionsmodulen

Abschließende Messungen am Labormuster ergaben einen sehr guten Leistungsfaktor über den gesamten Einsatzbereich. Dieser lag bis 25 % Last über 0,9 und verbesserte sich auf 0,99 für höhere Auslastungen. Der Wirkungsgrad des Netzteils lag ab einer Belastung von 20 % über einem Wert von 80 %.

Nachfolgend sind einige Messwerte des Labormusters dargestellt. Abb. 2 zeigt die Eingangsgrößen des Netzteils bei Betrieb der aktiven Leistungsfaktorkorrektur. Es ist gut zu erkennen, dass Spannung und Strom in Phase liegen und es zu keiner Verzerrung der Sinusform kommt. Vor allem während des Nulldurchgangs ist ein sauberer Übergang vorhanden, was sonst ein Problem bei höheren Netzfrequenzen darstellt. Dies konnte durch den Einsatz einer speziellen Vorsteuerung verhindert werden.

Abb. 3 zeigt die Ausgangsspannungen der drei Stufen. Zu erkennen ist hier das schnelle Ausregeln nach einem großen Lastsprung sowie die saubere Form der Ausgangswechselspannung.

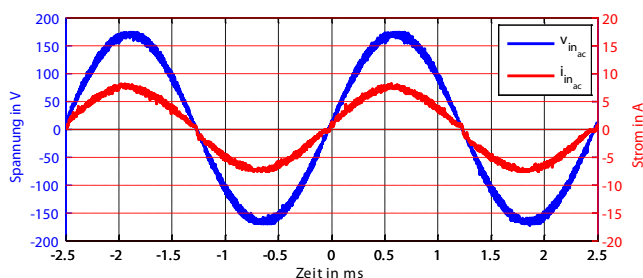


Abb. 2: Eingangsspannung und -strom bei 400 Hz Netzfrequenz und 450 W Last

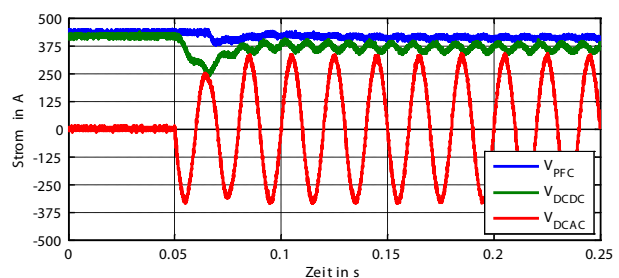


Abb. 3: Ausgangsspannungen der drei Stufen während des Einschaltens der Ausgangsstufe bei 450 W Last



## Transientenrekorder mit EtherCAT-Feldbus Anbindung

Für die Überwachung der Netzqualität und deren Auswirkungen auf angeschlossene Verbraucher ist eine kontinuierliche Überwachung der Spannungen des Versorgungsnetzes notwendig. Soll ein gesamtes System bestehend aus Transformator, Zuleitung, Umrichter und z. B. Generator überwacht werden, müssen neben dem Netzanschlusspunkt an verschiedenen weiteren Punkten Spannungen und Ströme gemessen werden. Um die Daten aller Messpunkte gemeinsam auswerten zu können, müssen die Messstationen untereinander synchronisiert werden. Ein Messsystem, das die zuvor genannten Anforderungen erfüllt, wird zur Zeit am IALB aufgebaut.

Der schematische Aufbau des Systems ist in Abb. 1 gezeigt: Die Spannungen oder Ströme werden mit Wandlern auf eine Spannung von  $\pm 10$  V gewandelt und mit Analog/Digital-Umsetzern mit 20 kHz abgetastet. Die Verarbeitung der digitalen Werte wird mit dem digitalen Signalprozessor (DSP) TMS320F28335 der Firma Texas Instruments durchgeführt. Hier ist eine Vorverarbeitung der Messsignale möglich, z. B. können Mittelwerte der Spannung und Frequenz berechnet werden, was eine erhebliche Reduktion der Messdaten erlaubt. 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 GNU/Linux und der Erweiterung RTAI für Echtzeitaufgaben betrieben.

Als Feldbus wird der echtzeitfähige EtherCAT-Feldbus eingesetzt. Der EtherCAT-Feldbus basiert auf dem Ethernet-Standard, welcher allerdings das gleichzeitige Senden aller Busteilnehmer erlaubt, was zu Kollisionen auf dem Bus führen kann. Erneutes Senden der Daten erfolgt nach einer zufälligen Zeit, was keine berechenbare Datenlaufzeit und somit keine echtzeitfähige Kommunikation erlaubt. Bei EtherCAT wird dieses Problem gelöst, in dem spezielle EtherCAT-Netzwerkkarten mit einer konstanten Durchlaufverzögerung eingesetzt werden. Dies ermöglicht die Berechnung der Laufzeit der Daten auf dem Bus und somit eine echtzeitfähige Kommunikation. Durch den EtherCAT-Feldbus ist das ge-

samte System leicht erweiterbar. Weitere Messstationen können aufgebaut und über den EtherCAT-Feldbus mit dem Industrie-PC verbunden werden. Eine Synchronisierung der Messstationen ist über sogenannte „verteilte Uhren“ („distributed clocks“) in den verwendeten EtherCAT-Netzwerkkarten möglich.



Abb. 2: Transientenrekorder

Die in ein Gehäuse integrierten Komponenten für das Messsystem sind in Abb. 2 gezeigt: Netzteile für die Spannungsversorgung, Wandler für die Spannungsmessung sowie eine Leiterkarte mit DSP, A/D-Umsetzer und EtherCAT-Interface. Die Zuführung der Versorgungsspannung und die zu überwachende Spannung erfolgt auf der linken Seite. Über entsprechende Buchsen werden auf der rechten Seite Netzkabel für den EtherCAT-Feldbus angeschlossen. Die Software für den DSP kann über eine USB-Schnittstelle aktualisiert werden.

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

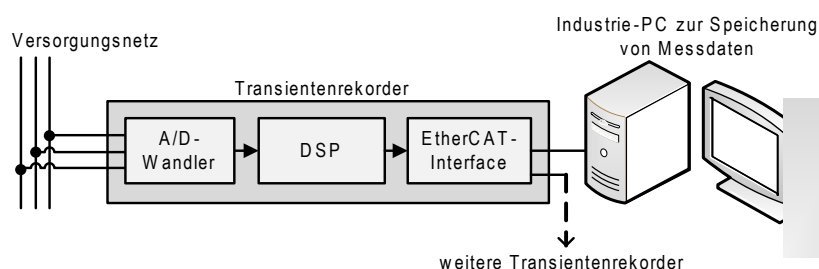


Abb. 1: Schematischer Aufbau

Für die Aufzeichnung von Daten über mehrere Monate wird das System um ein Festplattenwechselsystem erweitert. Dies ermöglicht den Austausch von Datenträgern während des laufenden Betriebs. Zur Absicherung des Systems gegenüber Netzfehlern, welche unter anderem das Ziel der Aufzeichnung sind, wird das System mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung betrieben.

## Entwicklung eines neuartigen elektronischen Leistungsschutzschalters für Gleichspannungsnetze

Ein aktueller Trend in der Leistungselektronik sind Gleichstromübertragung und -netze.

Gleichspannung in Verteilernetzen (Photovoltaik, Telekommunikation und Rechenzentren) und in Bordnetzen (Luftfahrt, Bahntechnik, Elektrofahrzeugen und Schifffahrt) erlauben eine höhere Effizienz im Transport, in der Wandlung und Anwendung von elektrischer Energie. Zudem besitzt heute fast jede leistungselektronische Lösung einen Gleichspannungszwischenkreis, der im Fehlerfall möglichst schnell und sicher vom Netz und von der Last getrennt werden muss.

Das volle Potential von Gleichspannungsnetzen und Anwendungen für die effiziente Wandlung und Nutzung von elektrischer Energie ist durch das Fehlen zuverlässiger und kostengünstiger Schutztechniklösungen zum Schalten großer elektrischer Leistungen limitiert.

Stand der Technik sind heute elektromechanische Schütze, die durch das Entstehen von Lichtbögen beim Schalten von Gleichspannungen und Strömen wenig robust sowie schwer, unhandlich und teuer sind. Anders als bei Wechselstrom gibt es prinzipbedingt bei Gleichstrom keinen Nulldurchgang, in dem sicher abgeschaltet werden kann.

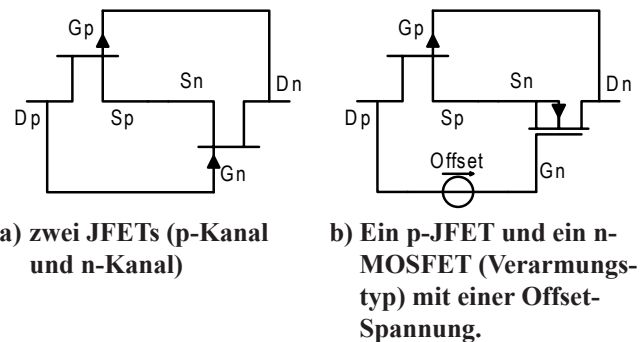
Das Vorhaben zielt auf eine komplette Neuentwicklung im Bereich der vollelektronischen Schutzschaltertechnik für Gleichspannungsnetze, um elektrische Energie möglichst verlustarm führen und lichtbogenfrei (EIN und AUS) schalten zu können.

Der neue Schalter soll wie eine Sicherung funktionieren und einen zu hohen Strom zuverlässig abschalten, um so das Netz vor Überlastung zu schützen. Dabei darf der Schalter selber nicht zerstört werden und muss dadurch nicht wie z. B. eine Schmelzsicherung ausgetauscht werden. Nach Abschalten eines Überstroms kann der Schalter nach Beseitigung der Fehlerquelle wieder in den normalen, leitenden Modus zurückgesetzt werden. Dazu kommt der Vorteil, dass der abzuschaltende Überstrom eingestellt werden kann und so z. B. hohe Anlaufströme durchgelassen werden können.

Eine der Aufgaben des IALB ist es, die ideale Struktur des neuen Halbleiterleistungsschutzschalters in einer integrierten Form zu konzipieren und durch Simulationen zu verifizieren.

Daneben werden auch hybride Realisierungen mit bereits verfügbaren Halbleiterbauelementen erarbeitet. Hier werden herkömmliche Silizium-FETs verwendet. Um eine höhere Spannungsfestigkeit zu erreichen, können diese z. B. in Kaskoden geschaltet werden. Auch werden Versuche mit neuen Siliziumkarbid-JFETs gemacht. Diese haben den Vorteil einer größeren Sperrfähigkeit bei geringerem Durchlasswiderstand.

Die einfachste hybride Realisierung mit bereits vor-

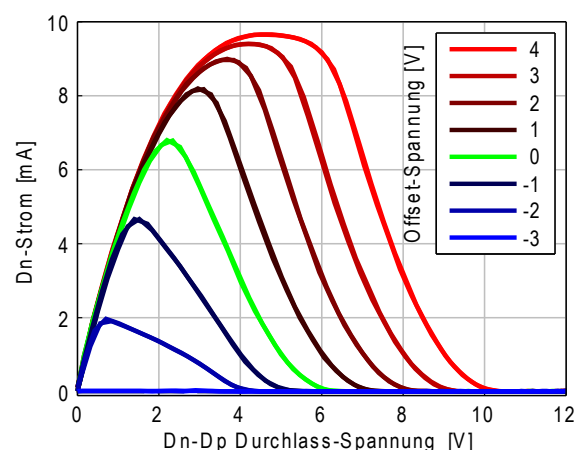


**Abb. 1:** Einfache Realisierungen vollelektronisch stromabschaltender Elemente mit vorhandenen Bauelementen

handenen Bauelementen ist die Verschaltung zweier JFETs. Dabei werden, wie in Abb. 1 a) zu sehen, ein n-Kanal-JFET und ein p-Kanal-JFET so geschaltet, dass die beiden Source-Anschlüsse ( $S_n$  und  $S_p$ ) miteinander verbunden werden. Die Gates ( $G_n$ ,  $G_p$ ) werden jeweils mit den Drain-Anschlüssen ( $D_n$ ,  $D_p$ ) des anderen JFETs verbunden. Die beiden Drain-Anschlüsse sind nun die zwei Anschlüsse des resultierenden Schalters.

Anstatt der JFETs können auch andere (Halbleiter-) Schalter wie z. B. MOSFETs verwendet werden. Diese können beide Plätze einnehmen. Durch eine Offset-Spannung an einem der Gates ist es zudem möglich, den abzuschaltenden Strom einzustellen. Diese Spannung ist auch nötig, wenn man anstatt Verarmungs-MOSFETs (selbstleitend) die üblicheren Anreicherungstypen (selbstsperrend) einsetzt.

Abb. 2 zeigt die Strom-Spannungs-Kennlinie der Schaltung aus Abb. 1 b), die mit Kleinleistungskomponenten realisiert wurde. Dabei wurde ein p-Kanal-JEFET sowie ein selbstleitender n-Kanal-MOSFET verwendet. Es ist deutlich die Stromabschaltung zu größeren Spannungen hin zu erkennen. In diesem Fall lässt sich der maximale Strom über die Offset-Spannung auf Werte zwischen 0 und ca. 10 mA einstellen.



**Abb. 2:** Strom-Spannungs-Kennlinien der Schaltung mit MOSFET aus Abb. 1 b) für verschiedene Offset-Spannungen

## Prüfstand für Lastwechseltests an diskreten Leistungshalbleitern

Leistungshalbleiter unterliegen im Feld einer starken thermischen Beanspruchung, zum einen durch die im Halbleiter umgesetzte Verlustleistung, aber auch durch wechselnde Umgebungsbedingungen. Ein wichtiger Einflussfaktor ist hier das jeweilige Lastprofil respektive die dadurch hervorgerufenen Temperaturzyklen. Diese belasten die Verbindungen der verschiedenen Schichten, insbesondere zwischen Bonddraht und Metallisierung sowie Metallisierung und Substrat, durch thermische Fehlanpassung und führen zu Alterung und schließlich zum Ausfall des Bauelements. Ziel eines Lastwechseltestes ist es, diese thermisch aktivierten Alterungsprozesse beschleunigt hervorzurufen, um in einem angemessenen Zeitrahmen Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit unter Feldbedingungen ziehen zu können. Der Beschleunigungsfaktor wird hierbei im Wesentlichen durch den Temperaturhub an der Sperrschicht sowie die mittlere Sperrschichttemperatur beeinflusst.

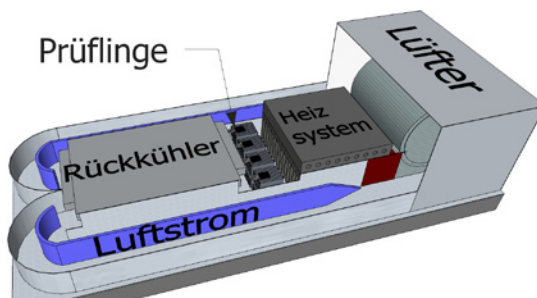


Abb. 1: Aufbau eines Prüfkanals

Der am IALB entwickelte Lastwechseltester bietet die Möglichkeit bis zu 16 Prüflinge zeitgleich zu testen, wobei diese jeweils in zwei parallelen Prüfzweigen untergebracht sind, die abwechselnd eingeschaltet werden. Abb. 1 zeigt den mechanischen Aufbau eines Prüfzweiges mit Lüfter, Heizsystem, den Prüflingen und dem Kühlsystem. Die Kühlung der Prüflinge findet über ein geschlossenes Luftkühlsystem mit einem was-

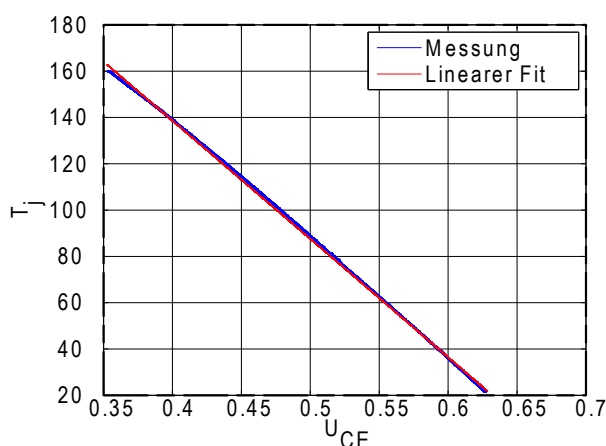


Abb. 2:  $U_{CE}$  Temperaturcharakteristik für 100 mA

sergekühlten Rückkühler statt. Die Kühllufttemperatur kann zwischen 25 °C und 70 °C geregelt werden.

Für die Einstellung des Temperaturwechsels ist eine genaue Messung der Sperrschichttemperatur erforderlich. Hierfür wird der bei Bauelementen mit pn-Übergang bei kleinen Stromdichten lineare Zusammenhang zwischen der Durchlassspannung und der Sperrschichttemperatur ausgenutzt. Abb. 2 zeigt die Temperaturkennlinie der Durchlassspannung eines IGBT bei einem Kollektorstrom von 100 mA.

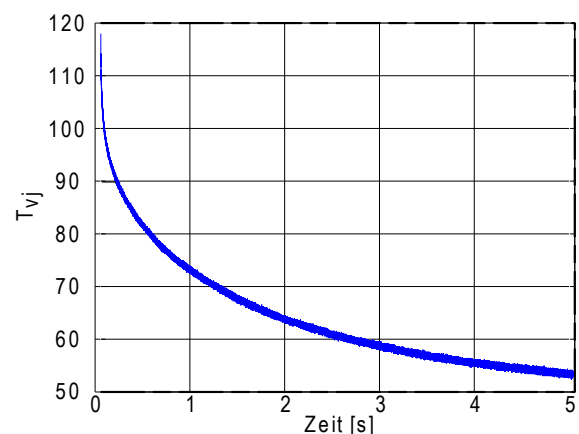


Abb. 3: Temperaturverlauf in der Abkühlphase

Die Steuerung des Testes erfolgt über feste Schaltzeiten. Die Ein- und Ausschalzeiten werden so gewählt, dass die Sperrschichttemperatur den gewünschten Temperaturhub ( $\Delta T$ ) bei gewünschter mittlerer Temperatur ( $T_m$ ) vollzieht. Abb. 3 zeigt den während einer Abkühlphase gemessene Verlauf der Sperrschichttemperatur beim Lastwechseltest. Aus mehreren Lastwechseltests mit variiertem  $\Delta T$  bzw.  $T_m$  kann aus der mittleren Ausfallrate bei den jeweiligen Testbedingungen ein Modell zur Lebensdauerabschätzung erstellt werden. Abb. 4 zeigt die Kennlinie eines solchen Modells.

Zusammen mit dem Lastprofil und dem daraus ermittelten thermischen Profil kann mit diesem Modell eine Restlebensdauerabschätzung des Bauelementes für die jeweilige Anwendung ermittelt werden.

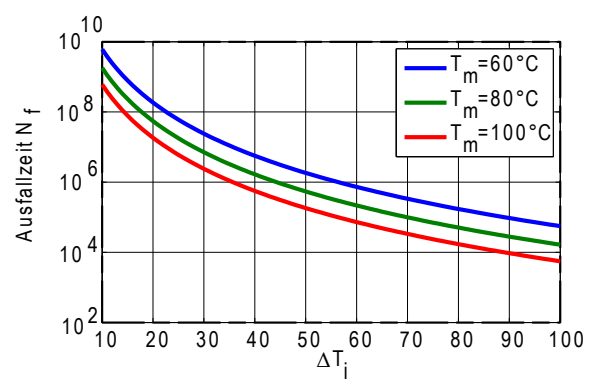


Abb. 4: Coffin-Manson Lebensdauermodell



## THB Testing on IGBT Modules at High Bias Levels

Since its development in the 1980s the Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) has achieved a key role in power electronic systems. Although usually operated in air-conditioned cabinets more and more IGBTs have to perform under harsh environmental conditions with high ambient relative humidity. IGBT modules are affected by the ingress of moisture because they are not hermetically sealed. Thus, moisture diffuses through the package materials and reaches the semiconductor chip. There a variety of corrosion mechanisms can occur, resulting in gradual degradation of the device's electrical performance and finally in a catastrophic failure. The most common mechanism occurring in electronic devices under high humid conditions is a three step process referred to as the electrochemical migration (ECM): Corrosion of one electrode, migration of the metal, and redeposition on the opposite electrode usually in the shape of a dendrite.

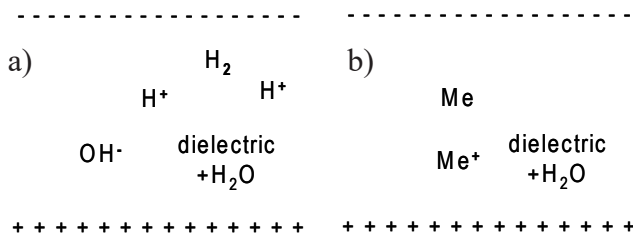


Fig. 1: ECM between metallisation stripes:

- a) Decomposition of water and metal corrosion  
b) Metal migration and formation of a dendrite

The temperature humidity bias (THB) test is a standard for accelerated life testing with respect to corrosion and other humidity driven degradation mechanisms. Usually, 1000 h tests at 85 °C and 85 % relative humidity are used to predict up to 25 years of operation. However, the bias is usually limited to 80 V.

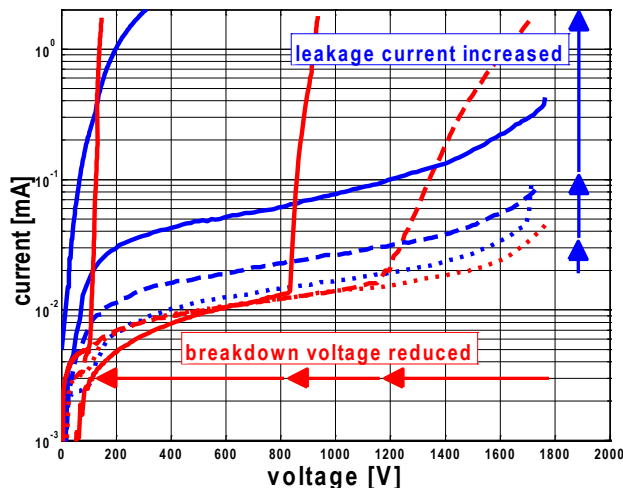


Fig. 2: Two types of degradation of the blocking behaviour

The IALB tested a variety of 1.7 kV and 1.2 kV IGBT modules from different manufacturers in THB at bias levels up to 90 % of nominal voltage. The higher bias resulted in significantly more stress symptoms compared to the respective 80 V references. Depending on the devices under test particular degradation modes were measurable.

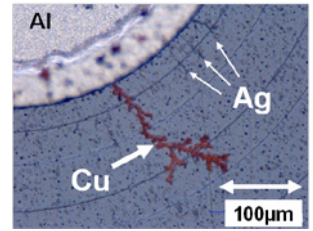


Fig. 3: Dendrites growing from the active area metallisation over the junction termination

To study the degradation of the DUTs a number of intermediate measurements as well as a final test were carried out. Different ways of degradation are distinguishable. Either there was premature avalanche breakdown without significant leakage increase before (red curves in Fig. 2) or there was a general leakage increase (blue curves in Fig. 2) without affecting the avalanche.

The failure analysis afterwards yielded clear indications of electrochemical migration (see Fig. 3). In order to investigate the influence of the applied voltage or rather estimate the acceleration factor of the voltage, 1.2 kV IGBT modules were THB tested at different voltages (65 % and 90 % of  $V_{nom}$ ). The devices showed blocking degradation behaviour with decreasing avalanche breakdown voltage (moving bend-off in the red case of Fig. 2). Here the remaining blocking voltage (position of the bend-off) was identified as the right measure to monitor the degradation by intermediate measurements.

The results shown in Fig. 4 indicate that higher bias leads to faster degradation. The acceleration factor between 90 % and 65 % of  $V_{nom}$  is 2.1.

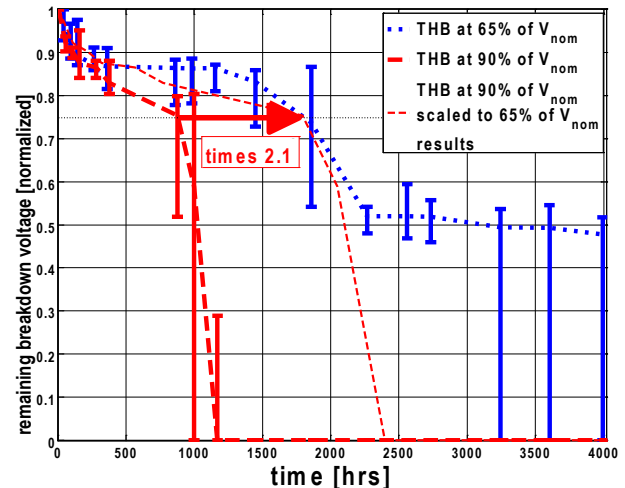


Fig. 4: Lower quartile, median, and upper quartile of the remaining breakdown voltage for two different bias-levels

## 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 selbständig 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-, Studien- und Diplomarbeiten sowie Bachelor- und Masterarbeiten. Dabei wird großer Wert darauf gelegt, dass den Studierenden die Nutzung von Ingenieur-Freiräumen bei der Lösung anwendungsbezogener Aufgabenstellungen vermittelt wird.

Im Jahr 2013 wurde erstmals der neu geschaffene Masterstudiengang „Regenerative Energien“ mit speziell auf die Thematik abgestimmten Lehrveranstaltungen angeboten. Die Einführung des neuen Masterstudiengangs wurde mit einer zunächst für zwei Jahre finanzierten Anstellung von Herrn Dipl.-Ing. Guido Tisborn als Akademischer Rat unterstützt. Im Bereich der „Automatisierung/ Mechatronik“ erfolgte eine Umstellung der Lehrinhalte des Diplomstudiengangs auf die Anforderungen des Curriculums des Master-Studiums.

Abgerundet wird das Angebot durch eine Vielzahl von Wahlpflicht-Veranstaltungen für die wieder Dozenten aus vielen Bereichen der Forschung und Lehre gewonnen werden konnten. Neu hinzugekommen sind die Veranstaltungen „Digitale Signalverarbeitung in der Elektrischen Energietechnik“ von Herrn Dr.-Ing. Holger Groke sowie die Veranstaltung „Netzdynamik und Netzschutz“ von Herrn Dipl.-Ing. Guido Tisborn.

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



### Grundlagen der Elektrotechnik B – Teil 1

Eingebettet in das übergreifende Thema der Erzeugung elektrischer Energie mit Windkraftanlagen werden in dieser Vorlesung für Studierende des 3. Semesters 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. Ausgehend 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 Studenten 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.

## **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.

## **Grundlagenlabor der Elektrischen Energietechnik**

Das Grundlagenlabor 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 können die Einflüsse von Frequenz, Leitung und Erregung auf die erzeugte Leistung und Spannung direkt experimentell erarbeitet werden. Alle Aufbauten sind dabei absolut berührungssicher ausgeführt und ermöglichen so das freie Experimentieren der Studierenden.



## Antriebstechnisches Praktikum

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

- Drehzahlregelung einer GSM:  
Simulation & Inbetriebnahme
- Feldorientierte Regelung einer ASM:  
Simulation & Inbetriebnahme

## Energietechnisches Praktikum I

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

- Oberschwingungen in elektrischen Netzen
- Berechnung von elektrischen Netzen
- Leitungsberechnung - Telegraphengleichungen
- Untersuchung von Solarzellen und Modulen

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



## Werkstoffe der Elektrotechnik

Diese Vorlesung ist eine Pflichtveranstaltung im 2. Semester.

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.

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. 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 MOSFET 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 durchgespielt.

**Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Josef Binder**



## **Elektrotechnik I und II für Produktionstechniker und System Ingenieure**

Diese Vorlesung ist eine Pflichtveranstaltung im 1. und 2. Semester.

Die Vorlesung besteht im Wesentlichen aus 2 Teilen, nämlich der Analyse und Berechnung von Gleichstrom- und von Wechselstromschaltungen.

Zunächst werden relevante physikalische Größen vorgestellt, diese sind das Elektrische Feld, das Magnetische Feld, sowie das Elektrische Potential.

Ferner werden davon abgeleitete Größen eingeführt, die

Spannung, die Stromstärke, der elektrische Widerstand, die Arbeit und die Leistung. Dabei ist ein Kernelement der Vorlesung Elektrotechnik I die Berechnung von linearen Gleichstromnetzwerken. Hier werden neben der Einführung der Kirchhoff'schen Regeln grundlegende Verfahren wie die Methode der Ersatzquelle, das Überlagerungsverfahren sowie das Knotenpotentialverfahren behandelt.

Zum Abschluss des Kurses Elektrotechnik I werden Elemente mit nichtlinearen Strom-Spannungskennlinien und deren Funktion in einfachen Schaltungen vorgestellt. Zu diesen elektrotechnischen Inhalten werden die wesentlichen physikalischen und – soweit erforderlich – mathematischen Grundlagen behandelt.

Der Kurs Elektrotechnik II umfasst den Bereich der linearen dynamischen Schaltungen.

Es werden zunächst Strom-Spannungsbeziehungen von Kondensatoren und Spulen als Speicherelemente von elektrischer und magnetischer Energie behandelt. Grundlegende Gesetze wie das Induktionsgesetz werden eingeführt.

Die Behandlung der dynamischen Vorgänge umfasst zum einen die Einschwingvorgänge von Netzwerken mit Energiespeichern, zum anderen harmonische Zeitfunktionen im Kontext von Wechselstrom und Wechselspannung.

Ein Kernelement dieses Kurses stellt die komplexe Wechselstromrechnung dar.

Als Anwendung dieser Grundlagen werden klassische Schaltungen wie z. B. Filterschaltungen, frequenzabhängige Spannungsteiler sowie serielle und parallele Schwingkreise behandelt.

Darstellungsmethoden wie Ortskurven, Bode Diagramm, Übertragungsfunktionen sind Bestandteil der Beschreibung dieser elektrotechnischen Inhalte.

Diese beiden Kurse stellen eine Basis für Inhalte in weiterführenden Veranstaltungen dar. Dies bezieht sich auf analoge Schaltungen auf der Basis von Transistorgrundschaltungen, einfache Verstärkerschaltungen bzw. Kombinationen aus Elektrotechnik I und II für mehreren Bauelementen.

**Prof. Dr.-Ing. Thorsten Völker**  
Hochschule Bremerhaven



## 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.



**Dr.-Ing. Holger Groke**



## **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 Übertragungsstrecken 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.

**Dipl.-Ing. Guido Tisborn**



## **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, Speicher, Netzen und Verbrauchern vermittelt. Neben der Energieerzeugung werden diese Kenntnisse auch in der heutigen Diskussion über die Energiewende benötigt.

## **Netzdynamik und Netzschutz**

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

## Septemberakademie Regenerative Energie

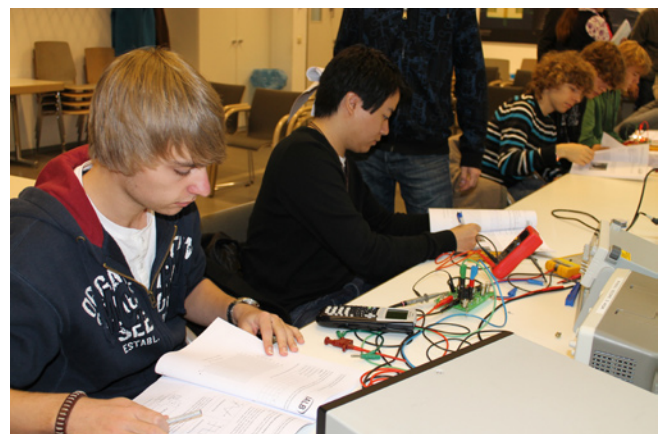
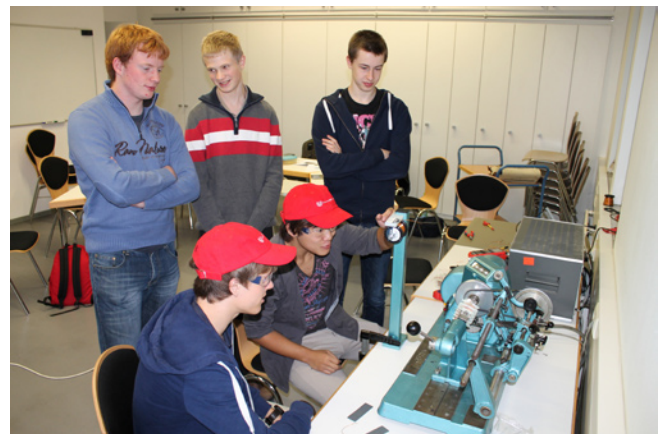
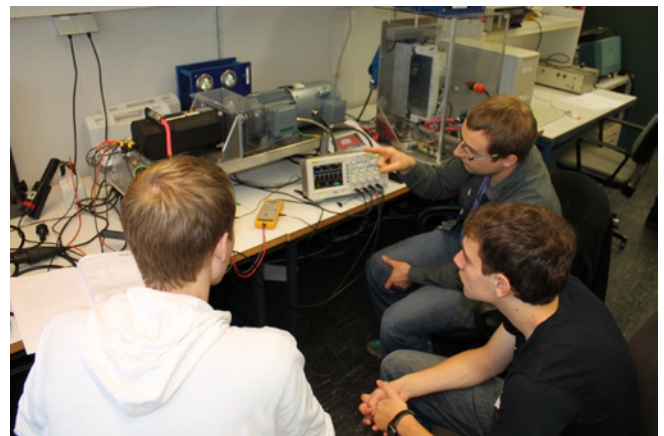
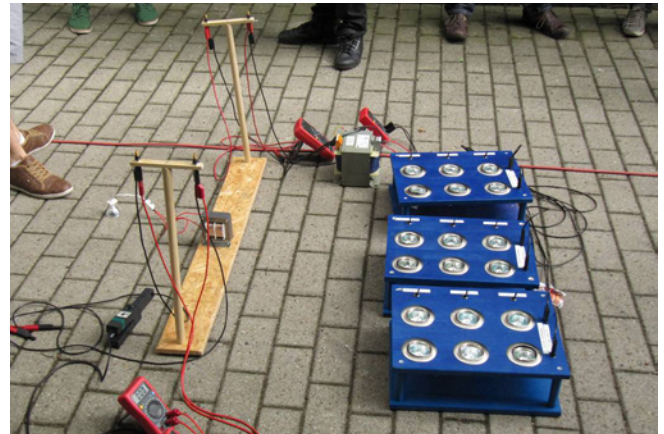
Forschend Studieren von Anfang an. Unter diesem Titel steht die im Jahr 2013 erstmals angebotene Septemberakademie „Regenerative Energie“. Wie funktioniert eine Windenergieanlage? Und wie kommt der Strom von einem Offshore-Windpark eigentlich zu mir nach Hause? Und wie war das noch mit diesen Solarzellen? Die Antworten auf diese und viele weitere Fragen zum Thema Regenerative Energie konnten Erstsemester im Rahmen der Septemberakademie selbst erarbeiten. Hierbei stand vor allem das Experimentieren und selbständige Bearbeiten der Fragestellungen im Vordergrund. Das Angebot richtet sich an Erstsemester an der Universität Bremen und ermöglicht noch vor dem Beginn der Vorlesungen eine erste Auseinandersetzung mit Forschungsmethoden und wissenschaftlichem Arbeiten.

Im Rahmen der fünftägigen Septemberakademie konnten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer Versuche aus vier Themenbereichen bearbeiten:

- Windenergieanlagen
- Photovoltaiksysteme
- Energieübertragung und Transformatoren
- Leistungselektronik

Hierbei hatten alle Teilnehmenden intensiven Kontakt mit Forschenden und Studierenden der Universität. Aufgrund des großen Interesses wird die Septemberakademie auch in diesem Jahr wieder angeboten. Aktuelle Informationen sind auf der Webseite der Septemberakademie zu finden:

[www.fb1.uni-bremen.de/regenerative-energie](http://www.fb1.uni-bremen.de/regenerative-energie)



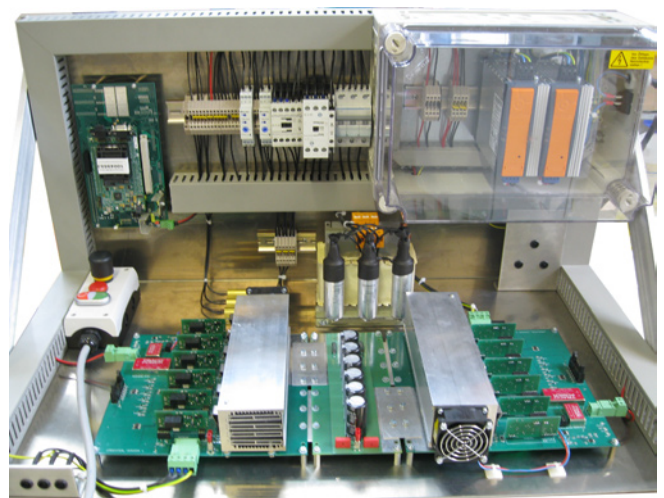


## AG Wind

In der Windenregiebranche herrscht ein immenser Bedarf an Qualifikationen, Forschung und Entwicklung. Bremische, nationale und europäische Industrievorhaben im Themengebiet der Windkraft laufen derzeit erfolgreich in den Fachbereichen Elektrotechnik und Produktionstechnik an der Universität Bremen. Um Studierende bereits früh mit diesem spannenden Forschungsgebiet in Kontakt zu bringen, besteht seit dem Jahr 2009 die studentische Arbeitsgemeinschaft Wind. Im Rahmen dieser offenen AG beschäftigen sich Studierende parallel zu ihrem Studium mit Fragestellungen aus dem Bereich der Windenergie. Hierbei stehen der AG Wind mehrere kommerzielle Klein-Windenergieanlagen mit einer Leistung von 500 W bis 1000 W zur Verfügung.

Dank der Förderung durch die Kellner & Stoll Stiftung sowie die Stiftung der Universität wurde es ermöglicht, eine 500 W Klein-Windenergieanlage auf einer Freifläche hinter dem Universitätsgebäude des IALB aufstellen zu können. Hierzu wurde ein Fundament gegossen und ein 3 m hoher klappbarer Stahlmast konstruiert und aufgebaut. In direkter Nähe der Anlage wurde eine Stromsäule mit allen notwendigen Anschlüssen und Absicherungen installiert. Die Anlage kann nun einfach für Messungen auf und danach wieder abgebaut werden.

Die Planungen für eine automatische Windrichtungsnachführung sowie die Anbindung der Windenergieanlage über einen Frequenzumrichter werden momentan von der Arbeitsgemeinschaft durchgeführt.





**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](mailto:ial@uni-bremen.de)  
Internet: <http://www.ialb.uni-bremen.de>

Satz und Layout: Henning Sauerland  
Titelfoto: Roman Hirsch  
Professorenfotos: Christian Renz

1. Auflage, Mai 2014

