



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

NW1

Jahrbuch 2012

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

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

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

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

Das IALB ist eine Forschungseinrichtung im
Bremer Centrum für Mechatronik



Universität Bremen



1. Auflage Mai 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



Themenübersicht

Vorwort	2
Mitarbeiter des IALB im Jahr 2012	3
Forschungsberichte 2012	4
Magnetische Lagerung einer Schleifkugel	5
Übertragung des Verhaltens eines Dampfturbinenkraftwerks auf eine Windenergieanlage	6
Digital geregelter Wechselrichter für frequenzvariable Flugzeugbordnetze	7
Detaillierte Modellbildung der Netzanbindung von Windenergieanlagen	8
Verhalten von doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren in Windenergieanlagen bei Netzunsymmetrien und Netzfehlern	9
Anbindung einer hochauflösenden DSP basierten Drehgeberauswertung an einen Umrichter über EtherCAT-Feldbus	10
Transversalfluss-Linearmotor mit passivem Stator	11
Kombinierte HGÜ mit netz- und selbstgeführten Stromrichtern zur Netzanbindung von Offshore-Windparks („Hybrid-HGÜ“)	12
Feuchtetest mit hoher Spannungsbelastung an Halbleitermodulen	13
Untersuchung der Robustheit von IGBTs gegenüber dynamischer Avalanche	14
Optimisation of Quasi-resonant Induction Cookers	15
Lehrveranstaltungen des Instituts	16
Elektromagnetische Energiewandlung	16
Grundlagenlabor Elektrische Energietechnik	16
Praktikum Antriebs- und Stromrichtertechnik	17
Power Converter Technology	17
Antriebsregelung und Mechatronik I	17
Antriebsregelung und Mechatronik II	17
Werkstoffe der Elektrotechnik	18
Halbleiterbauelemente und Schaltungen I und II	18
Halbleiterbauelemente	19
Modellbildung und Messverfahren für Leistungshalbleiterbauelemente	19
Qualitäts- und Verbesserungsmethoden	19
Leistungselektronik und Stromrichtertechnik I	19
Einführung in die Festkörperphysik	19
Elektrotechnik I und II für Produktionstechniker und System Ingenieure	20
Grundlagen der Elektrischen Energietechnik	20
Konstruktion elektrischer Maschinen	21
Berechnung elektrischer Maschinen	21
Schülerakademie Regenerative Energie	22
AG Wind	23



Vorwort

Mit diesem Jahrbuch möchten wir Ihnen einen Überblick über die Forschungs- und Lehraktivitäten des Instituts für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente vermitteln,

Die im Abschnitt „Forschung“ zusammengestellten Projektberichte zeigen die große Breite der Forschungsaktivitäten des Instituts, die sich von leistungselektronischen Bauelementen über Stromrichter bis hin zu elektrischen Maschinen erstrecken. In unseren regelungstechnischen Arbeitsschwerpunkten berücksichtigen wir zunehmend auch die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten. Unsere Arbeiten im Bereich der Windenergie-technik behandeln insbesondere Themen des Antriebsstrangs, der Netzintegration und der Regelung von Windenergieanlagen.

Mit Hilfe unserer Lehrbeauftragten Herrn Dr. Götschmann (Konstruktion elektrischer Maschinen) und Herrn Prof. Dr. Völker (Berechnung elektrischer Maschinen) konnte auch 2012 wieder ein vielfältiges Angebot interessanter Lehrveranstaltungen erreicht werden. Erfreulich ist, dass es über unsere Aktivitäten in der Windenergie 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 unseren Lehrbeauftragten ganz herzlich danken.

Insgesamt war 2012 ein erfolgreiches Jahr. Zu verdanken war diese dem weit überdurchschnittlichen Engagement aller Institutsmitarbeiter sowie aller im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten oder als studentische Hilfskräfte tätigen Studierenden. Sie haben hoch motiviert und mit großem persönlichem Einsatz einen wesentlichen Beitrag zur Forschung und Lehre des Instituts geleistet.

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

Bremen, im Mai 2013

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

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

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

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



Mitarbeiter des IALB im Jahr 2012



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

Forschungsgruppen

Sekretariat	Antriebs- technik	Strom- richter	Elektrische Maschinen	Mecha- tronik	Leistungs- bauelemente	Technische Mitarbeiter
E. Krüger H. Janssen	G. Tisborn J. Borecki M. Schmidt C. Mehler	J. Adler F. Fein T. Y. Hoa Dinh W. Holzke H. Sauerland	M. Siatkowski S. Bassurah A. Norbach	M. Joost C. Renz	I. Sheikhan C. Bödeker C. Zorn H. Klaer A. Würfel	B. Vahlenkamp G. Schwerdtfeger F. Trocha



Forschungsberichte 2012



Magnetische Lagerung einer Schleifkugel

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, kleine modulare Bearbeitungseinheiten für die Mikrozerspanung zu entwickeln und innerhalb des SPP 1476 zur Verfügung zu stellen. 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 der Abbildung unten ist die Motivation dargestellt.

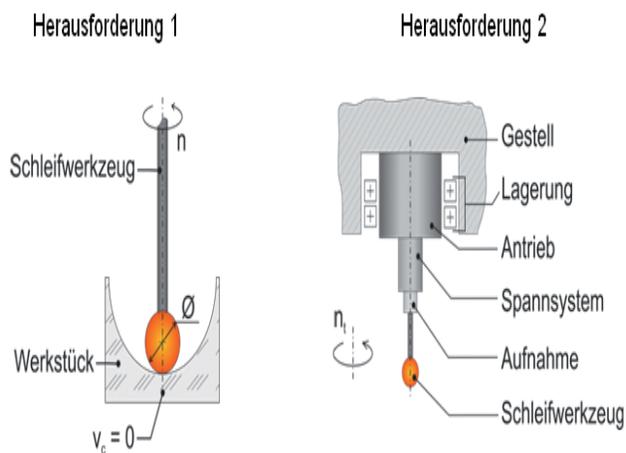


Abb. 1: Motivation

Hierbei sind ein elektromagnetisches Lagerungssystem und ein fluiddynamischer 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. Am Ende der ersten Förderphase steht die prototypische Umsetzung des entwickelten GrindBall-Konzeptes, das an kleinen Werkzeugmaschinen erprobt werden soll.

Es steht also bei weitaus geringerem Bauraum eine größere nutzbare Funktionsfläche zur Verfügung. Dieser Effekt ist insbesondere für spannende Bearbeitungswerkzeuge von großem Nutzen, da mit kleiner wer-

renden 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.

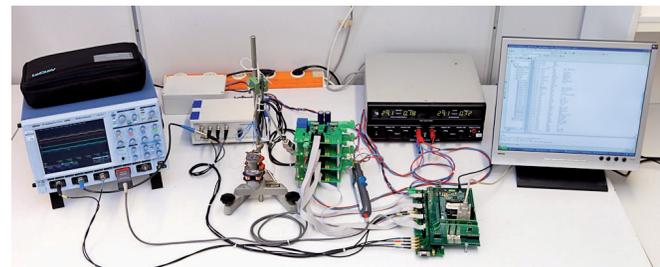


Abb. 2: Testaufbau im IALB-Labor

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

Für die Realisierung wurden insgesamt 4 Stromrichter für 4 Spulen entwickelt. Es wurde eine Adapterplatine für die Verbindung DSP-Board auf Basis TMS320C28x mit 4 Stromrichtern und Hallsensoren für die Erfassung der Position und der Regelung entwickelt. Im nächsten Schritt wurde ein Aufbau für die magnetische Lagerung realisiert und Programmierung und Anbindung der Sensorik für eine 8mm-Kugel durchgeführt.

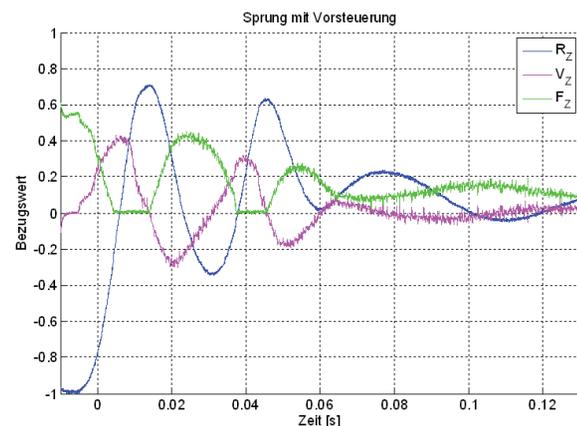


Abb. 3: Magnetische Lagerung



Übertragung des Verhaltens eines Dampfturbinenkraftwerks auf eine Windenergieanlage

Im Zuge der Energiewende werden regenerative Erzeuger wie Windenergieanlagen (WEA) immer weiter ausgebaut. Der Anteil der Bruttoerzeugungsleistung steigt gegenüber konventionellen Großkraftwerken. Problematisch ist dabei, dass sich WEAs bisher nicht oder nur unzureichend in das bestehende Energienetz einfügen.

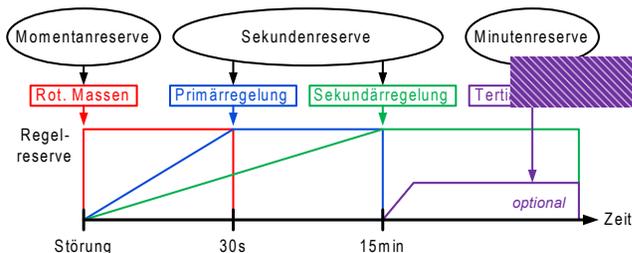


Abb. 1: Klassifikation von Regelenergie

Mehrere Arten von Regelenergie stehen zur Verfügung, um das Netz zu stützen (siehe Abb. 1). Die Momentanreserve wird aus den rotierenden Massen der Generatorsätze in den einzelnen Kraftwerken ausgekoppelt. Die Primärregelung greift danach als erstes ein und erhöht die Zufuhr der Primärleistung, um wieder ein Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch herzustellen. Die Sekundärregelung gleicht die Frequenz und Spannung im Netz wieder an und wird ggf. von der Tertiärregelung abgelöst. Die Bereitstellung der Leistungsreserve und Lastaufteilung geschieht dabei automatisch über eine Kraftwerksregelung mit Netzstatiken für Wirk- und Blindleistung.

Die Übertragung des Verhaltens eines Turbinengeneratorsatzes auf eine WEA bietet den Vorteil, dass die gleichen Regelstrukturen genutzt werden können, um die WEA an der Netzregelung zu be-

teiligen. Zusätzlich wird hier das Trägheitsmoment der Rotorblätter als Energiespeicher für die Momentanreserve verwendet. Für die Primärregelung muss eine gewisse Stellreserve vorgehalten werden analog zu Regelkraftwerken.

Die neue Regelung (siehe Abb. 3) basiert auf einer WEA mit Vollumrichter. Der linke Wechselrichter verhält sich durch ein Maschinenmodell wie eine elektrisch erregte Synchronmaschine. Wirk- und



Abb. 2: Prüfstand mit 30kW Synchrongenerator

Blindleistung werden extern vorgegeben und über Netzstatiken in der Kraftwerksregelung beeinflusst. Eine im Modell vorhandene Dämpferwicklung erlaubt es, Frequenzpendelungen zu mindern. Die Turbinenregelung hält die Zwischenkreisspannung durch Regelung des PMSG auf konstantem Niveau im Gegensatz zu konventionellen Regelungsstrukturen. Dieses stellt einen Paradigmenwechsel in der WEA-Regelung dar. Über eine Kennlinie kann die entnommene Leistung in Abhängigkeit von der Rotordrehzahl eingestellt werden. Zur Änderung einer extern vorgegebenen Einspeiseleistung wird der Blattverstellwinkel der Rotorblätter verändert. Ein Prüfstand mit einem 30kW permanentmagnet erregten Synchrongenerator zur Verifikation der Simulationsergebnisse befindet sich bereits im Aufbau (siehe Abb. 2).

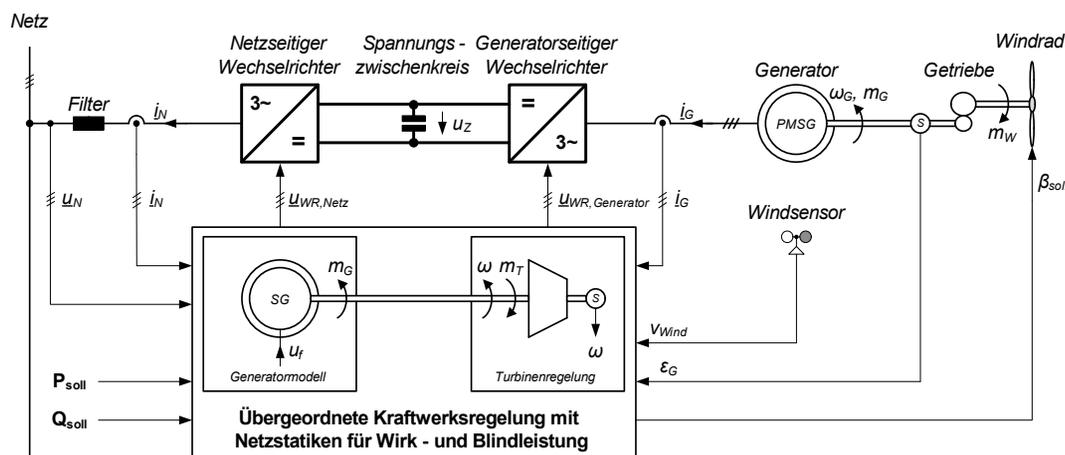


Abb. 3: Neues modellbasiertes Regelungskonzept für Windenergieanlagen



Digital geregelter Wechselrichter für frequenzvariable Flugzeugbordnetze

In Flugzeugen wird die Bordspannung durch Generatoren an den Turbinen erzeugt. Diese laufen nicht mit konstanter Drehzahl, weshalb hydromechanische Wandler zur Drehzahlanpassung verwendet werden. In modernen Maschinen soll auf diese Wandler verzichtet werden, um Kosten und Wartungsaufwand einzusparen. Dadurch ergibt sich eine variable Frequenz des Bordnetzes im Bereich von 360 – 800 Hz. Um den geänderten Betriebsbedingungen zu begegnen, sind Neuentwicklungen bei eingesetzten Netzteilen nötig.

Am IALB wird mit der AES GmbH und dem BCM zusammen an einem Netzteil für den Einsatz in modernen Passagiermaschinen geforscht. Dieses soll die Basis für Spannungsversorgungen im Passagierbereich bilden, welche dort direkt in Sitzen verbaut werden. Als Ausgang sind Wechselspannungen von 115 V / 60 Hz bzw. 230 V / 50 Hz bei einer Leistung von max. 1 kW zur Verfügung zu stellen, um z.B. das Laden von Laptops zu ermöglichen.

Aus dem Einsatzgebiet am Bordnetz in einem Flugzeug und die direkte Zugänglichkeit durch Passagiere ergibt sich eine Reihe von Anforderungen. Zum einen muss ein weiter Bereich von Eingangsspannung und frequenz, sowie unterschiedliche Lastfälle abgedeckt werden. Eine aktive Leistungsfaktorkorrektur (Power Factor Correction, PFC) am Eingang des Netzteils ist für diese Leistungsklasse vorgeschrieben. Ebenso sind Passagiere vor Stromunfällen zu schützen, was durch einen eingebauten Fehlerstromschalter und eine galvanische Trennung erreicht wird.

Aufgrund des breiten Anforderungsprofils und des Funktionsumfangs ist dies nur mit einer digitalen Regelung realisierbar. Dabei wird durch Parameteradaption sichergestellt, dass über den gesamten Last- und Frequenzbereich ein sehr guter Leistungsfaktor und Wirkungsgrad erreicht wird. Ebenso bietet sich die Möglichkeit, das Netzteil an den Datenbus des Flugzeugs anzubinden, um Status- und Fehlermeldungen zu übertragen.

Der Aufbau des Netzteils setzt sich aus drei Hauptkomponenten zusammen. Am Eingang die aktive PFC-Stufe, welche als „Interleaved“-Wandler mit zwei parallelen Leistungspfaden ausgeführt ist, die jeweils mit einer

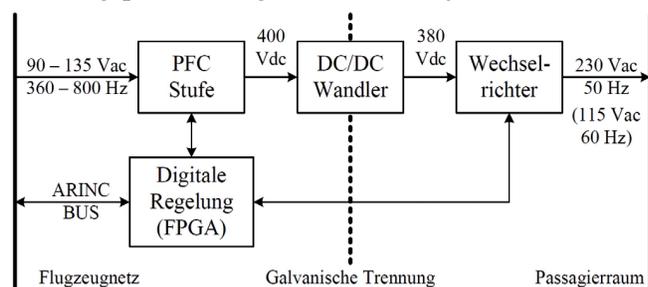


Abb. 1: Systemaufbau des Netzteils



Abb. 2: PFC Platine mit FPGA

Schaltfrequenz von 70 kHz arbeiten. Dies verringert die Stromwelligkeit am Eingang, wodurch ein nötiger EMV-Filter kleiner ausgelegt werden kann. Als zweites folgt die galvanische Trennung für den Personenschutz, welche durch einen Resonanz-DC/DC-Wandler realisiert wird. Durch die sehr geringen Schaltverluste bietet diese Topologie für die angestrebte Leistungsklasse den höchsten Wirkungsgrad. Die dritte Komponente ist der Wechselrichter am Ausgang.

Für digitale Regelungen wurden am IALB bisher Signalprozessoren eingesetzt, woraus sich in dieser Anwendung zwei Probleme ergeben. Zum einen muss in der Luftfahrt jede Software in einem Gerät nach DO-178B zertifiziert werden, um für den Einsatz zugelassen zu werden. Zum anderen ist aus Vorprojekten bekannt, dass die Rechenleistung des Signalprozessors für ein digitales Netzteil der limitierende Faktor für die erreichbare Schaltfrequenz ist.

Um diesen Problemen zu begegnen, wird hier ein Field Programmable Gate Array (FPGA) eingesetzt. Dabei handelt es sich um programmierbare Logikbausteine, in welchen die gesamte Rechen- und Reglerstruktur in digitaler Hardware umgesetzt wird. In diesem Fall ist eine Zertifizierung nach DO-254 nötig, welche im Umfang und Aufwand geringer ist, als dies bei der Verwendung eines Signalprozessors der Fall wäre.

Ebenso bieten FPGAs, durch die auf die Anwendung hin optimierten Berechnungsstrukturen, ein hohes Potential an Rechenleistung. Dies ermöglicht es eine höhere Schaltfrequenz, sowie geringere Totzeiten in der Regelschleife, zu erreichen. Ebenso können unterschiedliche Regler parallel und unabhängig zueinander realisiert werden. Dies kommt dem Einsatz in einem Flugzeug entgegen, da mit höherer Schaltfrequenz und weniger Bauteilen die Baugröße und das Gewicht verringert werden können. Die Steuerung, Regelung und Aufnahme der Messwerte des gesamten Systems wird von einem einzigen FPGA-Baustein übernommen.



Detallierte Modellbildung der Netzanbindung von Windenergieanlagen

Umfangreiche Analysen von Schadensfällen an Windenergieanlagen der vergangenen Jahre zeigen, dass mit zunehmender Anlagengröße immer häufiger das Versagen von mechanischen und elektrischen Komponenten des Antriebsstranges (Lager, Wellen, Getriebe, Kupplungen, Generator, Frequenzumrichter, Transformator) zu Ausfällen und längeren Stillstandzeiten führen. Die Beherrschung der Extremlasten des Gesamtsystems Windenergieanlage stellt eine interdisziplinäre Aufgabenstellung dar bei der die Bereiche Maschinenbau, Elektrotechnik und Regelungstechnik sy-

der mechanisch elektrischen Energiewandlung im Generator über den Frequenzumrichter mit Regelung, den Transformator bis zu den Übertragungseigenschaften der Kuppelleitung von der Windenergieanlage bis zur Kuppelleitung des Netzes. Das Modell des doppelt gespeisten Asynchrongenerators soll dabei die durch Eisensättigung und Stromverdrängung entstehenden Effekte berücksichtigen. Das Gesamtmodell kann sowohl an einem symmetrischen als auch an einem unsymmetrischen, ober-schwingungsbehafteten Drehspannungssystem betrieben werden.

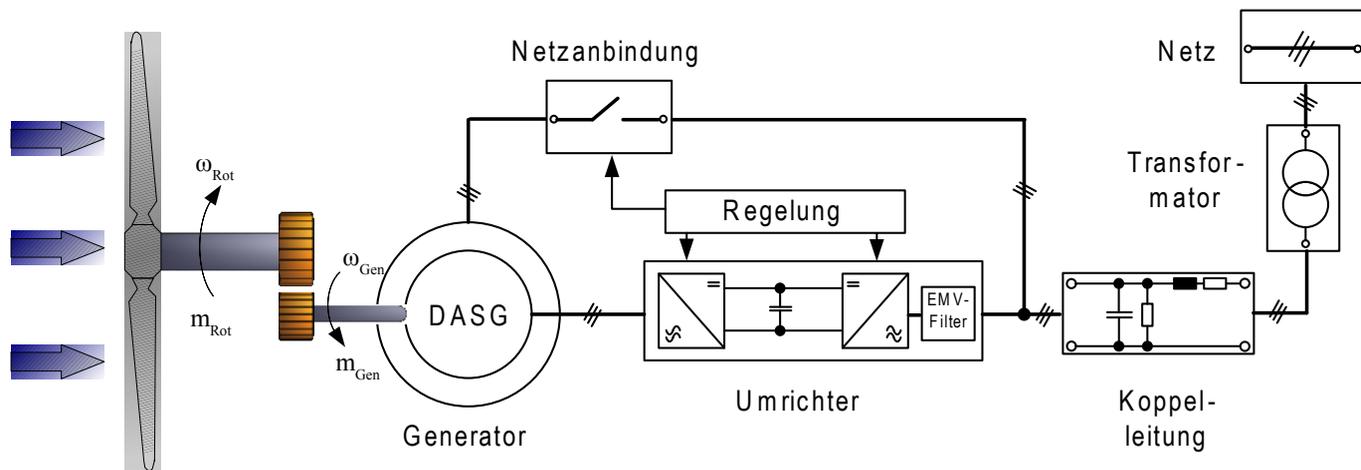


Abb. 1: Detaillierte Netzanbindung einer Windenergieanlage mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator

stemübergreifend verzahnt sind. Um die gewünschte Rentabilität der Anlagen zu erreichen, ist es notwendig, die in den mechanischen und elektrischen Komponenten der Windenergieanlage auftretenden dynamischen Belastungen bereits in der Konstruktionsphase bei der Dimensionierung berücksichtigen zu können, um so die erforderliche Lebensdauer der Anlagenkomponenten auch unter Extrembedingungen zu gewährleisten. Ziel der aktuellen Arbeiten ist die Entwicklung eines systemübergreifenden Simulationspaketes für die Simulation der elektrischen und elektromechanischen Komponenten von Windenergieanlagen auf der Basis von Matlab/Simulink im Zusammenwirken mit einem Mehrkörpersimulationssystem. Damit soll die Berechnung der dynamischen und stationären Belastungen in Windenergieanlagen deutlich verbessert werden. Das am IALB in der Entwicklung befindliche Matlab/Simulink-Modell soll den elektrischen Teil der Windenergieanlage vollständig umfassen, von

Damit lassen sich durch die kombinierte Modellbildung mechanische Belastungen in den Komponenten des Antriebsstranges als Folge der Wechselwirkungen zwischen dem mechanischen und elektrischen Systemverhalten unter veränderlichen Netzeinflüssen simulieren. Für die kombinierten Mehrkörper-Matlab/Simulink - Systemsimulationen soll ein Gesamtmodell entstehen, mit dem das Verhalten des Umrichter-Generator-Systems und die elektromechanischen Wechselwirkungen unter realen Netzbedingungen untersucht wird. Die Ergebnisse sollen zu einer beanspruchungsgerechten Auslegung von Verzahnungen, Wellen, Lagern und Kupplungen unter Berücksichtigung der auftretenden dynamischen Lasten führen.



Verhalten von doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren in Windenergieanlagen bei Netzunsymmetrien und Netzfehlern

Doppelt gespeiste Asynchronmaschinen werden bereits seit vielen Jahren als drehzahlvariable Generatoren in Windenergieanlagen eingesetzt und sind zurzeit der mit Abstand bevorzugte Generatortyp. Sie müssen zur Drehzahl-Drehmoment-Anpassung durch ein Getriebe mit dem Windrad gekoppelt werden (Abbildung 1). 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 der bisher durchgeführten Arbeiten zur Generatorregelung wird vorausgesetzt, dass das genutzte Drehstromnetz völlig symmetrisch und starr ist.

In elektrischen Netzen kann es jedoch immer zu Netzunsymmetrien oder sogar zu gravierenden Störungen kommen, die nicht nur zu schlagartigen Änderungen im gesamten elektrischen System, bestehend aus Generator, Umrichter, Kuppelleitung und Netz, sondern über die elektromagnetische Drehmomentbildung des Generators auch zu extremen Beanspruchungen in den elektrischen und mechanischen Komponenten des Antriebsstranges führen.

Aufgrund des immer größer werdenden Anteils der Windenergie an der Energieversorgung besteht mittlerweile die Forderung, dass Windenergieanlagen bei einem Netzfehler für bis zu 3 Sekunden am Netz bleiben und dabei noch einen Beitrag zur Stabilisierung des Netzes leisten sollen. Seitdem sind bereits einige

Anstrengungen unternommen worden, um das Verhalten der Windenergieanlagen an die Anforderungen des Netzes anzupassen. Im Vordergrund dieser Arbeiten steht die Erfüllung der Netzanschlussbedingungen bei Kurzschlüssen. Bei all diesen Lösungsansätzen steht nur das Verhalten zum Netz im Vordergrund, Rückwirkungen der elektrischen Ausgleichsvorgänge auf die Mechanik sind nicht untersucht worden.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, eine Regelung für doppelt gespeiste Asynchrongeneratoren zu entwickeln, mit der sich die Belastungen des Antriebsstranges auf ein zulässiges Maß begrenzen lassen. Dadurch sollen belastungsbedingte Schäden im Antriebsstrang wesentlich reduziert werden. Im Fall von Netzstörungen sind gleichzeitig die Netzanschlussbedingungen zu erfüllen. Eine Schlüsselrolle kommt dabei dem Umrichter-Generatorsystem zu, da dort die elektrisch-mechanische Energiewandlung stattfindet. Leistungselektronik und Umrichterregelung sind die Stelle im Antriebsstrang, bei der der Energiefluss hochdynamisch beeinflusst werden kann.

Angestrebt wird, den Umrichter mit Regelung auch während einer Netzstörung ständig im Eingriff zu halten, damit der Generator regelbar bleibt und die mechanischen Belastungen über die Drehmomentbildung des Generators beeinflusst werden können. Dadurch soll es möglich sein, die dynamischen mechanischen Belastungen im Antriebsstrang zu begrenzen und gleichzeitig die Ströme und Spannungen in der Kuppelleitung gezielt zu beeinflussen.

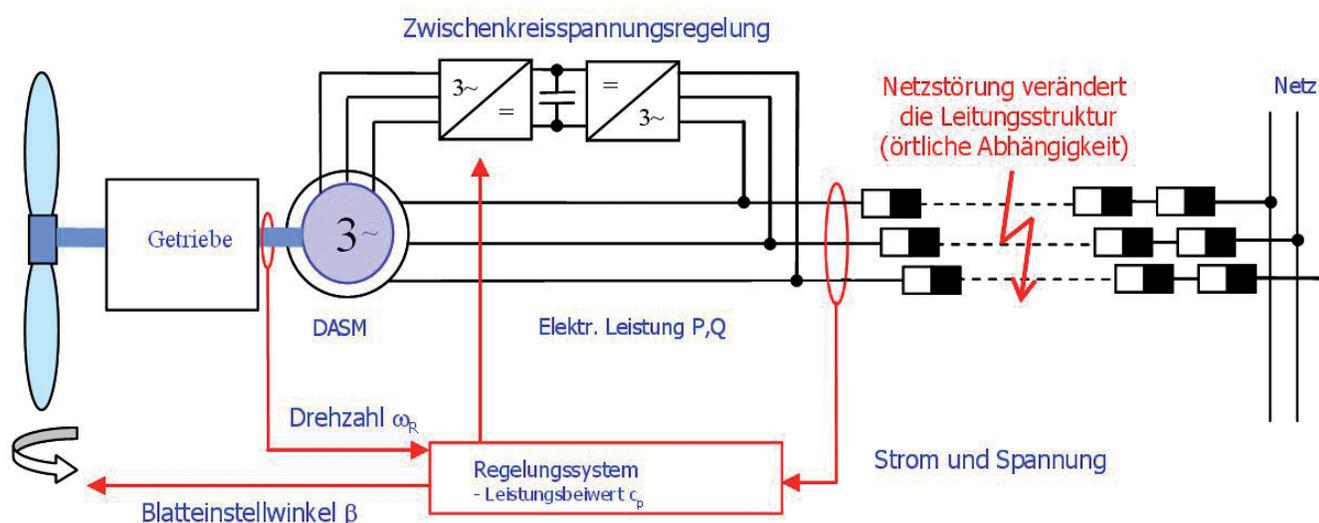


Abb. 1: Windenergieanlage mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator und Netzanbindung



Anbindung einer hochauflösenden DSP basierten Drehgeberauswertung an einen Umrichter über EtherCAT-Feldbus

Für die Regelung eines Transversalflussgenerators (TFG) für kleine Drehzahlen ist eine einfache Vierfachauswertung der Inkrementalsignale des Drehgebers ungenügend.

Am IALB existiert bereits eine Signalverarbeitung zur hochauflösenden Auswertung von herkömmlichen Sinusgebern. Es werden die Sinus- und Cosinus-Spuren mit einem AD-Wandler abgetastet und zusätzlich die Nulldurchgänge gezählt. Mit diesem Verfahren wird eine Quantisierung des Winkels von 23 Bit erreicht. Die Auswertung wurde in einem digitalen Signalprozessor (DSP) „TMS320-F28335“ von Texas Instruments umgesetzt.

Da die TFG-Regelung in einem Umrichter (Abb. 1) auf einem Industrie-PC implementiert wird, welcher über EtherCAT mit Sensoren und Stellgliedern kommuniziert, muss der Drehgeber ebenfalls über denselben Feldbus angebunden werden. Da für die Anwendung keine geeignete Drehgeberauswertung mit EtherCAT-Schnittstelle existierte, wurde das bereits am IALB entwickelte Drehgeber-Interface um die EtherCAT-Anbindung erweitert.



Abb. 1: Umrichter

Bei EtherCAT handelt es sich um einen echtzeitfähigen Feldbus basierend auf dem Ethernet-Standard. Im Gegensatz zu Standard Ethernet-Verbindungen darf beim EtherCAT-Feldbus nur der Steuerrechner (Master) Datentransfers starten. Die Busteilnehmer (Slaves) bearbeiten nur die vom Master gesendeten Datenpakete. Die Echtzeitfähigkeit des EtherCAT-Bussystems wird dadurch erreicht, dass neben dem Master als einzigem Sender, durch spezielle Slave-Controller eine konstante



Abb. 2: DSP-Board mit EtherCAT-Briefmarke und Spannungsversorgung

Durchlauf- bzw. Bearbeitungszeit garantiert wird. Um das Drehgeber-Interface an den EtherCAT-Feldbus anzubinden ist, die Implementierung eines EtherCAT-Slaves notwendig. Hierfür gibt es bereits fertige Lösungen in Form von ASIC's, IP-Cores für FPGA's oder bereits fertig bestückte Module, sogenannte „EtherCAT-Briefmarken“. Die Kommunikation mit dem DSP wird über ein Mikrocontroller-Interface (paralleler asynchroner 16 Bit breiter Bus) realisiert. Abbildung 2 zeigt das in ein Gehäuse eingebaute DSP-Board mit EtherCAT-Briefmarke. Ebenfalls integriert ist die Spannungsversorgung (links) für den DSP, die EtherCAT-Briefmarke und den Drehgeber. Die Anschlüsse für den EtherCAT-Feldbus und Drehgeber sind über entsprechende Buchsen herausgeführt (rechts).

Für den Datentransfer über den EtherCAT-Bus muss ein definiertes Protokoll eingehalten werden. Dieses wird auf dem Steuerrechner, dem Industrie-PC im Umrichter (Abb. 1), in Form von Software (EtherCAT-Master) und in den Busteilnehmern (Slaves) als Hardware (ASIC, FPGA) umgesetzt. Um die Drehgeberinformationen in der Regelung auf dem Industrie-PC verwenden zu können, muss ein entsprechendes Software-Modul existieren, welches den Datenaustausch mit dem Drehgeber-Interface erlaubt. Dieses Software-Modul wurde ebenfalls am IALB realisiert.



Transversalfluss-Linearmotor mit passivem Stator

Am IALB wurde ein Transversalfluss-Linearmotor (Abbildung 1) entwickelt, dessen Permanentmagneten im Läufer (Primärteil) verbaut sind. Damit lässt sich ein magnetloser, also passiver Stator (Sekundärteil) realisieren, der dadurch insbesondere bei langen Verfahrwegen eine hohe Kostenersparnis bringt. Durch das Fehlen der sonst bei linearen Direktantrieben vorhandenen Magnetbahn können auch keine Werkzeuge und Späne am Stator haften.

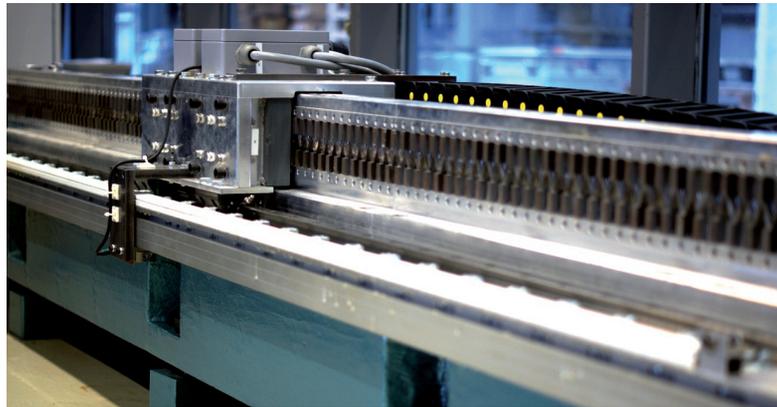


Abb. 1: Foto des Transversalfluss-Linearmotors. Die Magnete sind Läufer verbaut.

Für den Entwurf und die Dimensionierung solcher Antriebe werden zunehmend Simulationsprogramme verwendet. Die Berechnung von induzierter Spannung, Vortriebskraft oder Eisenverlusten kann damit durchgeführt werden. In der Realität ergeben sich jedoch häufig Abweichungen von den Berechneten Werten. Diese entstehen zum einen dadurch, dass in den Simulationsmodellen Vereinfachungen vorgenommen werden, und zum anderen durch Fertigungstoleranzen und Ungenauigkeiten in den physikalischen Materialparametern.

Hier wurde untersucht, wie weit sich ein Simulationsmodell ohne Verfälschung der Ergebnisse vereinfachen lässt. Zu diesem Zweck wurde neben den üblichen Messungen (z. B. Vortriebskraft, induzierte Spannung) auch die magnetische

Flussdichte im Luftspalt der Maschine gemessen. Es wurde eine Messsonde (Abbildung 2) mit Hall-Sensoren aufgebaut, die an definierte Stellen in den Luftspalt eingeführt werden kann. Außerdem wurde im Mikro-

rechner ein Messprogramm implementiert, das automatisch den Strangstrom variiert und gleichzeitig die Messwerte der Messsonde und der Läuferlage aufzeichnet. Mit Matlab können diese Werte dann auf unterschiedliche Weise mit den Simulationsergebnissen verglichen werden.

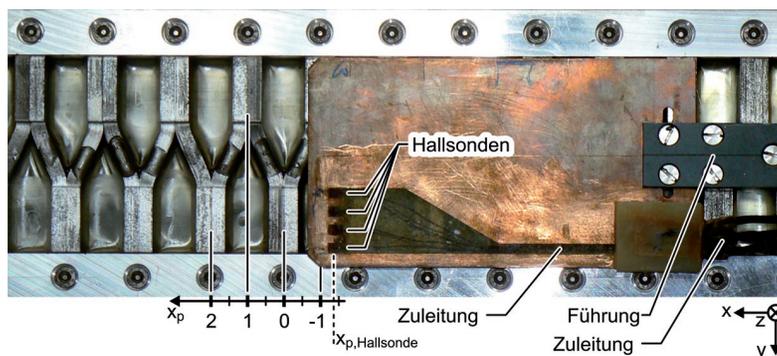


Abb. 2: Für die Flussdichtemessung verwendeter Messaufbau

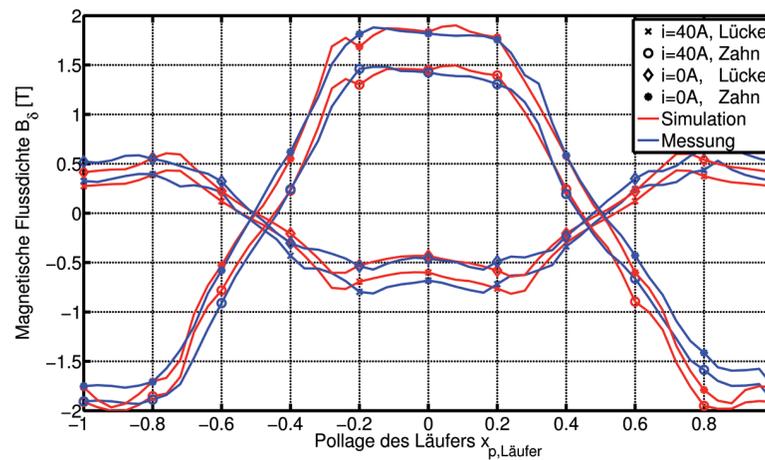


Abb. 3: Flussdichte im Luftspalt des Transversalfluss-Linearmotors: Vergleich von Simulationsergebnissen und Messungen

In Abbildung 3 werden einige Messungen und Simulationsergebnisse miteinander verglichen. Die Kurven zeigen die Luftspaltinduktion, jeweils mittig über einem Statorzahn bzw. mittig in der Lücke zwischen zwei Zähnen bei einem Strangstrom von 40A bzw. in stromlosen Zustand. Die x-Achse entspricht der Läuferlage. Die Übereinstimmung der Kurven ist insgesamt sehr gut. Die relativ großen Abweichungen an einigen Stellen sind mit Fertigungsungenauigkeiten zu begründen.

Mit Hilfe solcher Messungen konnte beispielsweise die Modellierung von Bereichen mit starken Streuflüssen wesentlich verbessert werden.

Kombinierte HGÜ mit netz- und selbstgeführten Stromrichtern zur Netzanbindung von Offshore-Windparks („Hybrid-HGÜ“)

Zur Netzanbindung großer Offshore-Windparks oder sog. Windpark-„Cluster“ untersucht das IALB derzeit im Rahmen eines DFG-Forschungsvorhabens das Konzept einer hybriden HGÜ-Struktur. Dieses besteht aus einer Kombination von selbst- und netzgeführten Konverterstationen, die an einer gemeinsamen DC-Leitung betrieben werden (Abb. 1).

Aus wirtschaftlichen und auch aus ökonomischen Gesichtspunkten wird angestrebt, die Anzahl der Kabeltrassen auf dem Meeresgrund gering zu halten. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass jedes einzelne HGÜ-System zur Übertragung der auf dem Meer erzeugten Windenergie eine möglichst hohe Übertragungskapazität besitzen muss. Im Bereich der sehr hohen Leistungen besitzt die auf Thyristortechnik basierende, netzgeführte HGÜ gegenüber der selbstgeführten HGÜ mit Transistoren im Allgemeinen Vorteile im Bereich der Kosten und beim Wirkungsgrad. Allerdings ist ein netzgeführter Umrichter nicht in der Lage, in einem Inselnetz, wobei es sich bei der Windparkinternen Verkabelung handelt, ein stabiles Drehspannungssystem einzuprägen. Außerdem muss der Windpark bei einer Flaute mit der Eigenbedarfsleistung versorgt werden, so dass die Funktion der Schutz- und Überwachungseinrichtungen aufrecht erhalten bleibt. Da Thyristorventile nur eine Stromflussrichtung erlauben, müsste für diesen Zweck erst umständlich die Gleichspannung umgepolt

werden. Außerdem besitzen netzgeführte HGÜ Strecken eine Mindestlast.

All die genannten Nachteile der netzgeführten HGÜ werden bei der Hybrid-HGÜ durch zwei zusätzliche selbstgeführte Hilfswechselrichter an beiden Enden der DC-Leitung kompensiert. Das selbstgeführte System braucht dabei nur auf etwa 10% der Windparkleistung ausgelegt werden. Bei Versorgung des Windparks oder bei geringer Windenergieerzeugung ist nur das selbstgeführte System in Betrieb (Abb. 2). Bei Nennwindstärke sind die selbstgeführten Wechselrichter von der DC-Leitung abgeschlossen und die Gleichspannung wird auf den erhöhten Nennwert des netzgeführten Systems angehoben. Die gesamte Leistung des Windparks wird dann über das netzgeführte System übertragen (Abb. 3). Die selbstgeführten Wechselrichter arbeiten in diesem Fall als aktive Oberschwingungsfilter und statische Kompensatoren und versorgen die netzgeführten Umrichter mit Blindleistung. Da der Platz auf der Offshore-Plattform stark begrenzt ist, muss im Windpark auf passive Kompensationseinrichtungen vollständig verzichtet werden. Dies gelingt, wenn der offshore-seitige, selbstgeführte Wechselrichter und die Windenergieanlagen die Blindleistung gemeinschaftlich bereitstellen. Hier kann auf das umfangreiche Know-how des IALB im Bereich der dezentralen Netzregelung zurückgegriffen werden.

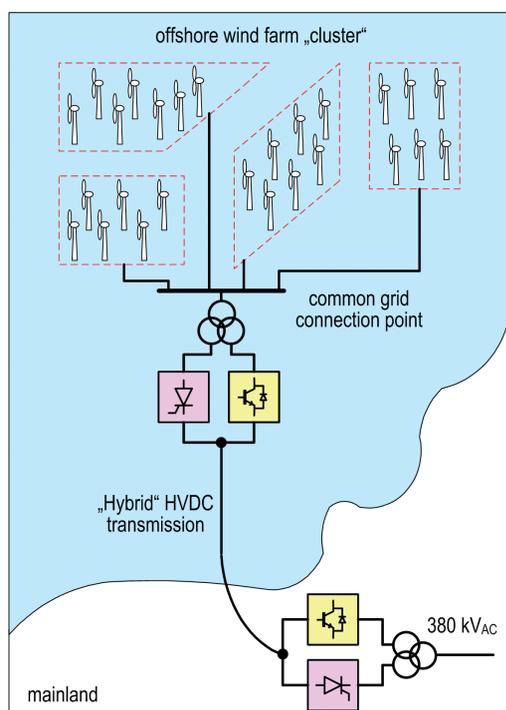


Abb. 1: Anbindung eines Windpark-Cluster durch hybride HGÜ-Struktur

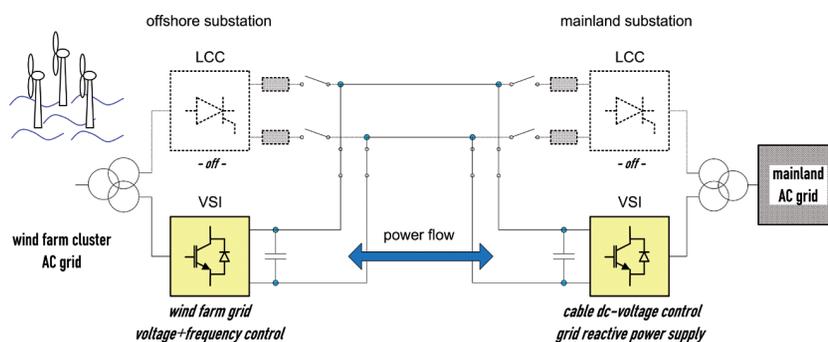


Abb. 2: Energieübertragung durch selbstgeführtes System

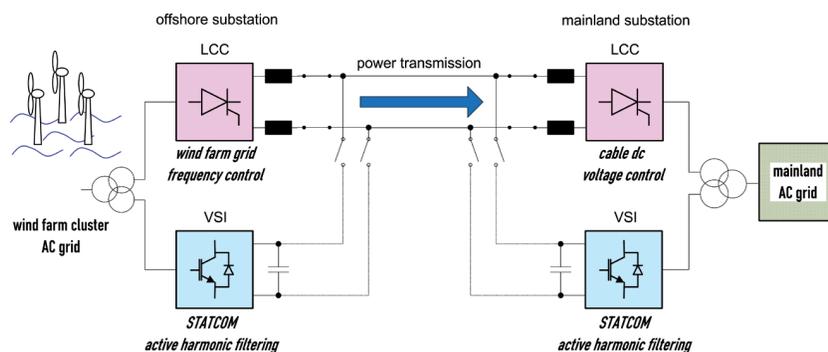


Abb. 3: Energieübertragung durch netzgeführtes System

Feuchtetest mit hoher Spannungsbelastung an Halbleitermodulen

Der Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) ist zum wichtigsten Halbleiterbauelement der Leistungselektronik in der Spannungsklasse von wenigen 100V bis zu wenigen 1000V geworden. Derzeit sind IGBT-Module für Spannungen von bis zu 6,5kV und Stromstärken von bis zu 3,6kA erhältlich.

Dabei haben neue Gehäusetechnologien zu einer erhöhten Packungsdichte und Funktionalität der Leistungsmodule geführt. Auch die Integration der Strom- und Temperaturmessung in das Leistungsmodul ist inzwischen weit verbreitet und bieten dem Anwender neue Möglichkeiten.

Gleichzeitig stellen die größeren Leistungs- und Integrationsdichten aber auch eine Herausforderung für die Zuverlässigkeit der Bauelemente dar. Bei nicht hermetisch dichten Gehäusen kommt die unweigerlich eindringende Feuchtigkeit hinzu. Vor allem in Verbindung mit hohen Feldstärken können Korrosionsprozesse angeregt werden, an deren Ende der katastrophale Ausfall des Bauelements stehen kann. In vielen Fällen deutet sich dies durch vermindertes Sperrvermögen und/oder durch einen Anstieg des Leckstroms an.

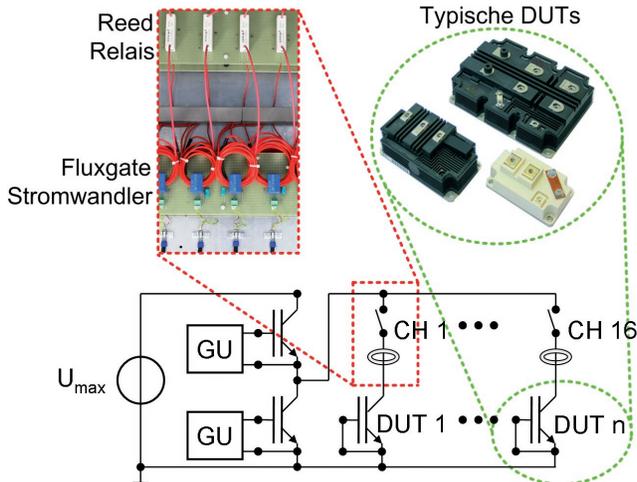


Abb. 1: Prinzip-Schaltbild Langzeitprüfstand

Um die Auswirkungen, die bei einer kombinierten Feuchte-Spannungsbelastung auftreten, detaillierter untersuchen zu können, existiert am IALB ein Langzeitprüfstand für beschleunigte Lebensdauerprüfungen (Abb. 1). Neben der Klimakammer (85°C, 85% rel. Feuchte) stellt das galvanisch getrennte Leckstrommesssystem den Kern der Testanlage dar. Mittels Fluxgate-Messwandlern wird ein kontinuierliches Aufzeichnen der Leckströme ermöglicht, die als wichtigster Indikator für den Alterungsprozess der Bauelemente gelten.

Abb. 2 zeigt die Leckströme von drei IGBT-Modulen während eines Langzeittests. Die Stromverläufe repräsentieren drei typische Kategorien;

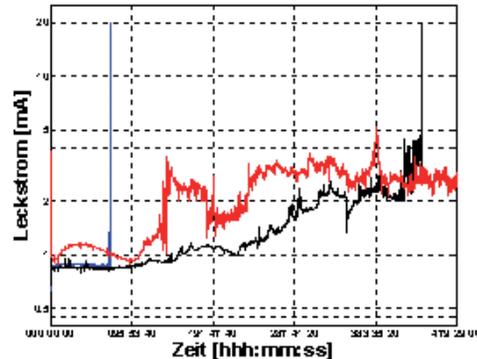


Abb. 2: Anstieg der Leckströme während des Tests

„plötzliche Ausfälle“ (blau), „deutlich erhöhte Leckströme“ (rot) und „angekündigte Ausfälle“ (schwarz).

Anschließende Ausfallanalysen ergaben übereinstimmend, dass elektrochemische Migrationsvorgänge im Bereich des Randabschlusses die Ursache für den Sperrfähigkeitsverlust sind. Die konkreten Ausfallmoden hängen dabei stark vom verwendeten Randabschlussdesign ab.

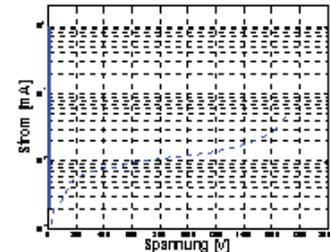


Abb. 3: Durchschlag zwischen zwei Feldplatten

Bei Rändern in Feldplattentechnik kommt es zu abrupten Durchschlägen zwischen einzelnen Feldplatten oder in die Tiefe des Chips (Abb. 3).

Bei Randabschlüssen mit dicken Passivierungen wachsen über lange Strecken entlang der Oberfläche bauartige Strukturen (Den-drite), die zu Feldverzerrungen und lokalen Feldüberhöhungen im Bauelement führen.

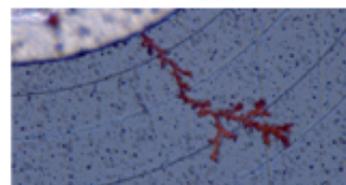
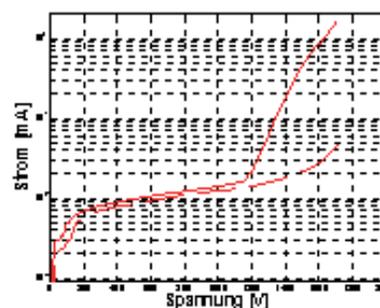


Abb. 4: Dendrit auf Glaspassivierung

Mittelfristig ist auch hier mit einem katastrophalen Ausfall zu rechnen.

Untersuchung der Robustheit von IGBTs gegenüber dynamischem Avalanche

In Halbleiterbauelementen für hohe Spannungen, wie dem IGBT (engl. insulated-gate bipolar transistor), bildet sich im eingeschalteten Zustand ein sogenanntes Elektron-Loch-Plasma, das die Leitfähigkeit des Bauelements um Größenordnungen reduziert. Ohne dieses Plasma wäre die Durchlassspannung des IGBTs viel zu hoch und sein Einsatz nicht sinnvoll.

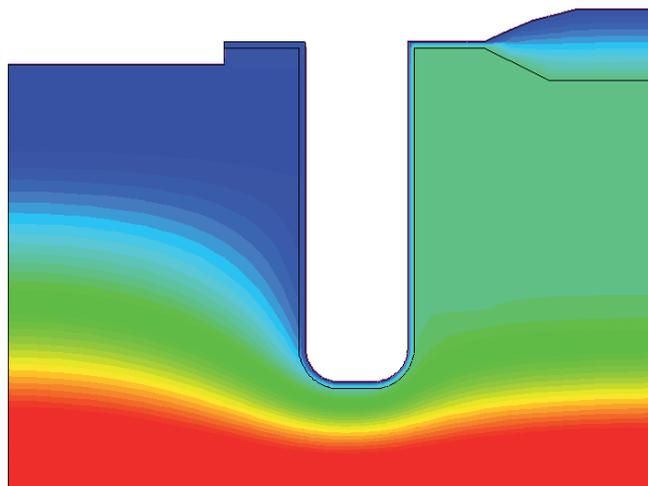


Abb. 1: 2D-Struktur eines Trench-IGBTs. Zu sehen ist nur die Emitterseite. Die Farben zeigen ein simuliertes elektrisches Potential (rot = hoch, blau = niedrig).

Problematisch ist das Plasma aber beim Ausschalten. Dabei nimmt der IGBT bereits Spannung auf bevor das Plasma ganz aus dem Bauelement abgebaut ist. Durch die Ladungsträger, die aus dem restlichen Plasma durch die entstehende Raumladungszone fließen, erhöht sich die effektive Dotierung, wodurch sich eine dynamische Überhöhung der elektrischen Feldstärke einstellt. Erreicht die Feldstärke die für Stoßionisation notwendige Höhe, so kommt es zum Lawinendurchbruch (engl. avalanche breakdown). Da es ohne die zusätzlichen Ladungsträger noch nicht zum Durchbruch kommen würde, spricht man vom dynamischen Avalanche. Durch die im Durchbruch generierten Ladungsträger stabilisiert sich der dynamische Avalanche eigentlich selbst und ist abgesehen von den zusätzlichen Schaltverlusten unkritisch. Es können jedoch Zustände auftreten, in denen die Selbststabilisierung nicht funktioniert, oder in denen eine lokale Überhitzung dennoch zur Zerstörung des IGBTs führt.

Im Rahmen eines Kooperationsprojekts des European Center for Power Electronics (ECPE) soll zusammen mit der Universität Rostock herausgefunden werden, ob sich die heute typischerweise noch vermiedenen Betriebszustände mit dynamischem Avalanche zukünftig vielleicht nutzen lassen und so zu einer besseren Ausnutzung der IGBT-Umrichter beitragen können, oder ob dies ein generelles Zuverlässigkeitsrisiko darstellt. Am IALB werden Simulationen des Ausschaltverhaltens

des IGBTs durchgeführt und kritische Zustände identifiziert, sowie kleinere Experimente an Bauelementen durchgeführt. Die Universität Rostock entwickelt parallel einen Aufbau für den Frequenztest von IGBT-Modulen im dynamischen Avalanche

Für die Simulation wird zuerst ein Modell der IGBT-Struktur (Dotierungen, Kontakte, Trench-Ätzung, etc.) in zweidimensionalen finiten Elementen erstellt (Bild 1). Dabei ist ein Kompromiss zwischen Detaillierung (viele Elemente) und Rechenzeit (durchaus einige Tage auf einem Standard PC) zu finden. Der IGBT mit seiner Schaltungsumgebung wird im „Mixed-Mode-Verfahren“ simuliert. Dabei wird die Schaltung wie in einem Schaltungssimulator (z. B. SPICE) simuliert und der IGBT in einem Bauelementsimulator (Finite Elemente und Halbleitergrundgleichungen).

Als Ergebnis erhält man einerseits die Ströme und Spannungen in der Schaltung (Bild 2) und andererseits die Zustände im IGBT, konkret in den einzelnen finiten Elementen. Bild 1 zeigt z. B. ein simuliertes elektrisches Potential. Mit der Information zu Temperaturen, Feldstärken, Elektronen- und Löcherströmen, Ladungsträgerverteilungen und diverse anderen Größen können dann kritische Situationen für den IGBT erkannt werden. Diese Erkenntnisse sollen anschließend mit dem Experiment abgeglichen werden bzw. Hinweise für die Optimierung des Frequenztests oder auf besonders heikle Betriebsbedingungen liefern.

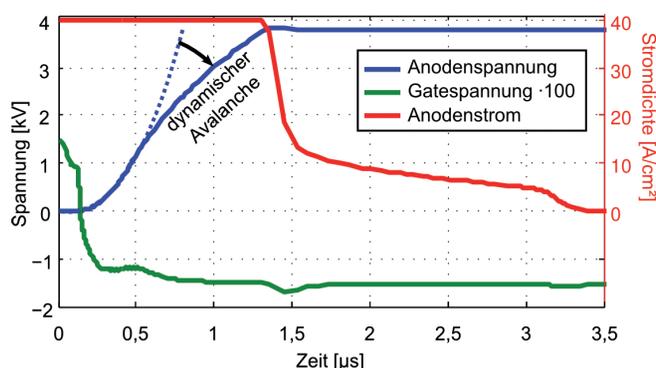


Abb. 2: Ausschaltkurven eines Trench-IGBTs. Ab ca. 0,5 µs befindet sich das Bauelement im dynamischen Avalanche.

Optimisation of Quasi-resonant Induction Cookers

Today, induction heating is a standard option in the design of domestic cooking appliances. High efficiency induction cookers need high performance semiconductor switches, a high quality heating coil, and a proper switching method. In this project, we investigate the optimisation possibilities of the quasi-resonant induction cooker, which consists of the RC-IGBT as the power switch.

The single-ended topology can be easily implemented due to its low number of components. It is widely used in commercial induction cookers and rice cookers. Fig. 1 shows the schematic circuit of our investigated induction cooker. The AC mains are rectified, but there is no dedicated smoothing filter. The inductor L_S and capacitor C_S are placed to help as an EMI filter. To have more accurate simulation, we have considered the parasitic components of the PCB layout, IGBT package, and of some passive components like C_{res} and C_S . The parasitic elements of the real capacitors are obtained by measurements. For the IGBT package and PCB layouts, the parasitic elements are simulated by using the Ansoft-3D tool from ANSYS Corp. The parasitic elements (at 1MHz) are marked with an asterisk in Fig. 1.

The resonant coil and cooking-pot are modeled by a simplified equivalent circuit which is shown in Fig. 1. R_1 and L_1 are the resistance and inductance of the coil. These parameters can be measured directly when there is no load. By applying the load and repeating the measurements, L_{2S} and R_{2S} can be obtained indirectly.

To have a more realistic simulation, a physical model of the RC-IGBT is needed. Based on technological data like diffusion profiles a finite-element semiconductor model was designed and simulated using the DES-SIS device simulator (from Synopsys Inc.). Then, the IGBT-model is calibrated using both static and dynamic measurement data.

To simulate the induction cooker circuit, the IGBT's semiconductor model (FEM) was simulated together with the other circuit components modeled as lumped elements (mixed-mode simulation). Based on simulation results, we have extracted the internal power losses of the system (losses of the electromagnetic field are not considered). Based on simulation results, the efficiency of the induction cooker is about 92.3%. Main losses occur in the heating coil (about 5%) and the IGBT (about 2%). Hence, the induction cooker can be improved mainly by optimising those components.

To have a high quality coil, it can be made using Litz wire (several parallel strands). The Litz wire can suppress effectively skin effect and reduce the coil-resistance. To improve the performance of the heating coil, we can increase the coupling between coil and pot or reduce the coil resistance (R_1). Higher coupling gives higher coil-pot efficiency. But, the optimisation of the coupling factor is difficult. The Litz-coil resistance (R_1) can be minimized by using optimal number of strands. Standard IGBTs are optimised for hard switching, which shows different switching properties compared to soft switching. Based on our simulation, the tail current of the IGBT during turn-off generates the major part of the losses in soft switching operation. Hence, minimising the tail is the key factor to optimise the IGBT for the quasi-resonant applications. However, improvements must not be cancelled by increased conduction losses! We have reduced the tail current by using lifetime engineering and reduction of the IGBT-thickness. The losses of the optimised IGBT are about 30% lower. As a result, the cooling system of the IGBT can be smaller and cheaper. The overall efficiency of the system could be improved by almost 1 percentage point.

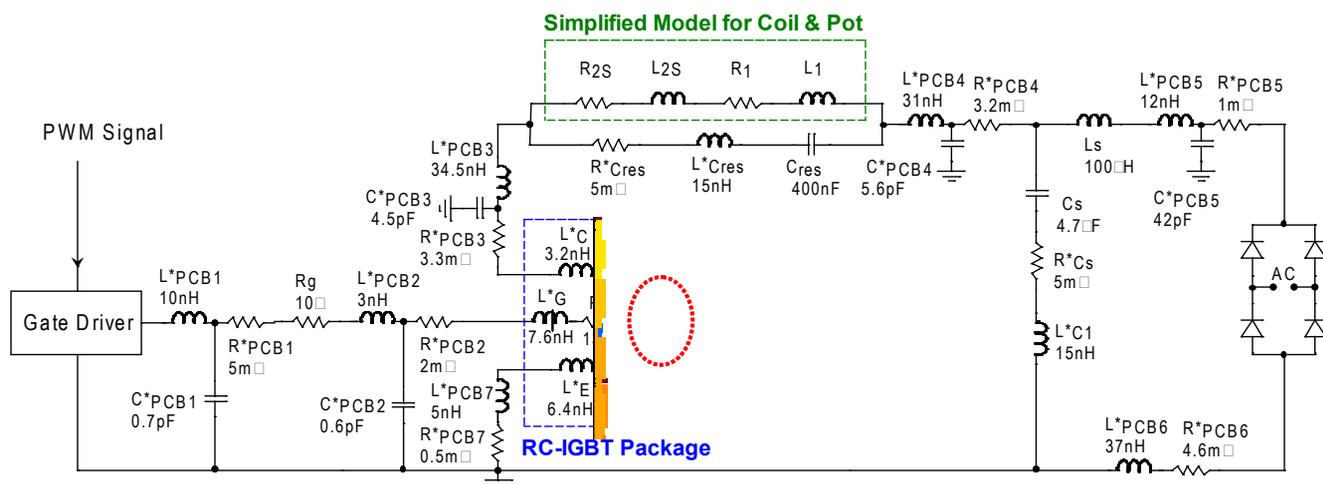


Fig. 1: Power section of the investigated induction cooker. The Parasitic elements are marked with an asterisk.



Lehrveranstaltungen des Instituts

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



Das Lehrveranstaltungsangebot des Instituts ist so konzipiert, dass in den Vorlesungen die allgemeinen und fachspezifischen Grundlagen der Antriebstechnik und Leistungselektronik vermittelt werden, die die Absolventen in die Lage versetzen, 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 wegen 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. Dabei wird großer Wert darauf gelegt, dass den Studierenden die Nutzung von Ingenieur-Freiräumen bei der Lösung anwendungsbezogener Aufgabenstellungen vermittelt wird.

Seit dem Jahr 2004 wird das Lehrangebot mit den beiden neuen Vorlesungen „Konstruktion elektrischer Maschinen I + II“ abgerundet, so dass die gesamte Breite der Antriebstechnik von der elektrischen Maschine über die Leistungselektronik und die Regelung bis hin zur Anwendung abgedeckt wird. Die Vorlesung „Berechnung elektrischer Maschinen“ wird erneut von Herrn Prof. Dr.-Ing. Thorsten Völker von der FH-Bremerhaven gehalten, der hierfür wieder einen Lehrauftrag erhielt.

Elektromagnetische Energiewandlung

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.

Zu der Vorlesung werden umfangreiche Manuskripte angeboten.

Grundlagenlabor Elektrische 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 10kW 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.



Power Converter Technology

Die Veranstaltung „Leistungselektronik und Stromrichter-technik II“ hat einen neuen Titel bekommen und wird in englischer Sprache abgehalten.

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 Hochsteller und einem DC/DC-Sperrwandler wird dieses Themengebiet abgerundet. Der folgende Abschnitt befasst sich mit Pulswechselrichtern. Ausgehend von der Wechselrichtertopologie werden die Sinus-Dreieck-Modulation und die Vektormodulation besprochen und die Wirkung der totzeitbedingten Spannungsfehler bei Drehstrom-Brückenschaltungen diskutiert. Im Anschluss daran werden mit einfachen Grundschaltungen 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.

Praktikum Antriebs- und Stromrichtertechnik

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

- Operationsverstärker
- Mikro-Controller in der Regelungstechnik
- Messungen am U-Umrichter
- Messungen am Stromrichter
- Drehzahlregelung einer GSM
Simulation & Inbetriebnahme
- Feldorientierte Regelung einer ASM
Simulation & Inbetriebnahme

Antriebsregelung und Mechatronik I

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.

Antriebsregelung und Mechatronik II

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



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



Prof. Silber ist seit dem 1. August 2006 im Ruhestand, wird aber einzelne Funktionen bis auf weiteres wahrnehmen.

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 I und II

Diese Vorlesung ist eine Pflichtveranstaltung im 3. und 4. 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.



Leistungselektronik und Stromrichtertechnik I

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 p-n-Diode über den Bipolartransistor zu den verschiedenen Arten von Thyristoren und andererseits von MOSFET bis zu den Varianten des IGBT.

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.

Halbleiterbauelemente

Diese Vorlesung ergänzt die Einführung in die Funktionsweise von Halbleiterbauelementen, die im Grundlagenkurs „Werkstoffe, Bauelemente und Schaltungen“ gegeben wurden. Sie enthält folgende Einzelabschnitte:

- Einführung in die Struktur der Energiebänder im Impulsraum, Gegenüberstellung von direkten und indirekten Halbleitern, Begriff der effektiven Masse, präzisere Darstellung der spontanen und induzierten optischen Übergänge
- Effekte bei hohen Feldstärken (Geschwindigkeitssättigung und Stoßionisation)
- Shockley-Read-Hall-Rekombination
- Hochdotierungs-Effekte (partielle Ionisierung, Störbandbildung, Auger-Rekombination, Band-Gap-Narrowing) und ihre wichtigsten Konsequenzen für die Bauelemente
- Herleitung der Gummel-Zahl
- Hetero-Übergänge und einige wichtige Heterostruktur-Bauelemente (Heterostruktur-Bipolar-Transistor, High-Electron-Mobility-Transistor, Doppel-Heterostruktur-Laser)
- Metallhalbleiterübergänge und MOS-Band-Struktur
- Bauelemente mit negativen Kennlinienabschnitten, Laufzeitdioden der Mikrowellentechnik

Ergänzend gibt es eine sehr knappe Darstellung der nanostrukturierten Halbleiterbauelemente.

Einführung in die Festkörperphysik

Diese Wahlpflichtvorlesung enthält festkörperphysikalische Grundlagen der Halbleiterkristalle, thermische Eigenschaften von Festkörpern, eine Einführung in Anwendungen der Supraleitung und die Grundlagen optoelektronischer Bauelemente einschließlich Flüssigkristallanwendungen. Das Ziel der Vorlesung ist, den inneren Zusammenhang zwischen verschiedenen Themen darzustellen (allgemeine Struktur von Elektronen- und Photonen-Bändern, Bedeutung der Symmetrie für das Auftreten optischer oder piezoelektrischer Effekte, Bragg-Reflektion in der Kristallstrukturanalyse und der Optoelektronik usw.).

Modellbildung und Messverfahren für Leistungshalbleiterbauelemente

In dieser Veranstaltung beschäftigen sich Studierende der Elektrotechnik (Diplom- und Master-Studiengänge) mit Messverfahren zur Charakterisierung von Halbleitermaterialien und Bauelementen. Dabei stehen die grundlegenden Eigenschaften genau so wie das dynamische Verhalten im Vordergrund. Außerdem werden verschiedene Simulationsverfahren benutzt, um die theoretischen Ansätze mit der Realität abzugleichen. Konkret kommen hier Halbleitersimulatoren, thermisch-mechanische Simulatoren und Simulatoren für induktiv-parasitäre Effekte zum Einsatz.

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 ET 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 mehreren Bauelementen.

Prof. Dr.-Ing. Michael Hartje

Hochschule Bremen



Grundlagen der Elektrischen Energietechnik

Die Veranstaltung „Grundlagen der elektrischen Energietechnik“ vermittelt mit dem Blick auf Erzeugung und Übertragung der elektrischen Energie sowie die grundlegenden Aspekte der Energiewirtschaft die in der heutigen Diskussion über die Energiewende von allen Studierenden der Elektrotechnik benötigten grundlegenden elektrotechnischen Zusammenhänge von Kraftwerken, Speichern und Netzen.





Dr.-Ing. Norbert Götschmann
Lloyd Dynamowerke GmbH & Co. KG,
Bremen



Prof. Dr.-Ing. Thorsten Völker
Hochschule Bremerhaven

Konstruktion elektrischer Maschinen

In elektrischen Maschinen bewegen sich von Strom durchflossene Leiter in Magnetfeldern. Dabei wirken Kräfte und Momente in den Maschinenteilen. Dynamische Kräfte verursachen Schwingungen und Maschinenerwärmungen verursachen Temperaturspannungen.

In der Vorlesung werden Methoden vermittelt, mit denen das elektromechanische System „elektrische Maschine“ so konstruiert werden kann, dass alle mechanischen Anforderungen an Festigkeit und Laufruhe erfüllt werden. Die Anforderungen, die dem Stand der Technik entsprechen und die in den Normen vorgegeben sind, werden themenbezogen dargestellt.

Damit Konstruktionszeichnungen gelesen oder Konstruktionszeichnungen angefertigt werden können, werden die wichtigsten Grundregeln für das technische Zeichnen vermittelt. Die vermittelten Konstruktions- und Berechnungsmethoden berühren mehrere Felder des Maschinenbaus - wie die Festigkeitslehre, die Lebensdauerberechnung von Lagern, die Berechnung kritischer Drehzahlen und die Verbindungstechnik. Deshalb werden die Methoden so vermittelt, dass sie konsequent auf die vorgenannte Anwendung zugeschnitten sind. Die Vorlesung ist ausgerichtet auf Studierende der Elektrotechnik, die Interesse an interdisziplinärem Fachwissen haben.

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, aufgrund dessen wurde die Vorlesung „Konstruktion elektrischer Maschinen II“ in „Berechnung elektrischer Maschinen“ umbenannt.



Schülerakademie 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 Schülerinnen und Schüler im Rahmen der seit 2011 jährlich stattfindenden Schülerakademie selbst erarbeiten. Hierbei stand vor allem das Experimentieren und selbständige Bearbeiten der Fragestellungen im Vordergrund.

Das Angebot richtete sich als Orientierung und Vorstellung des Arbeitens an einer Universität an junge Menschen, die gerade vor der Wahl eines Studienfaches stehen.

Im Rahmen der fünftägigen Schülerakademie konnten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer Versuche aus den vier Themenbereichen:

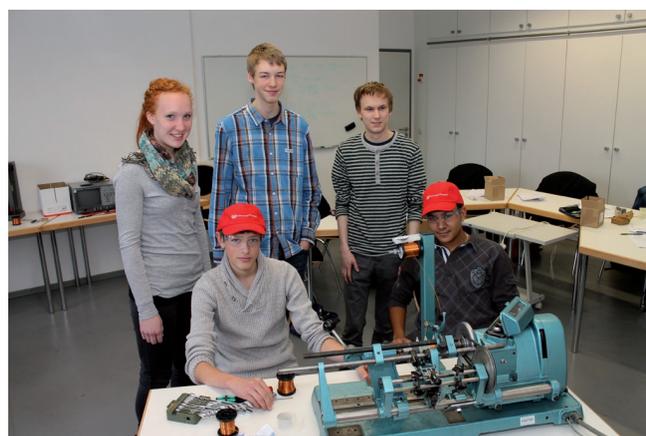
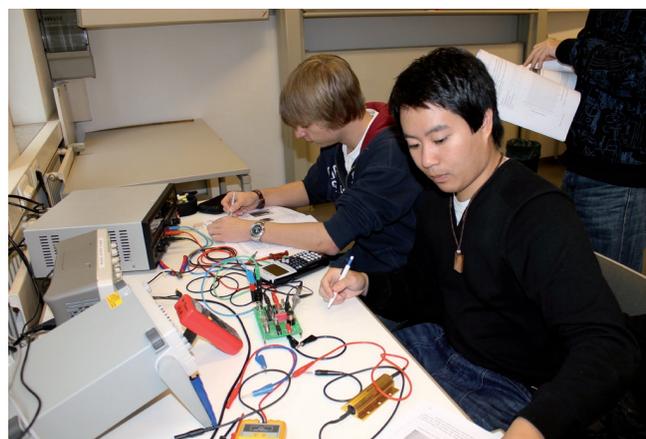
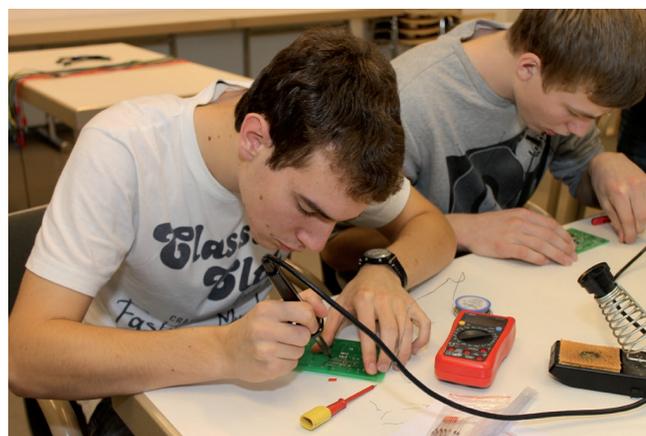
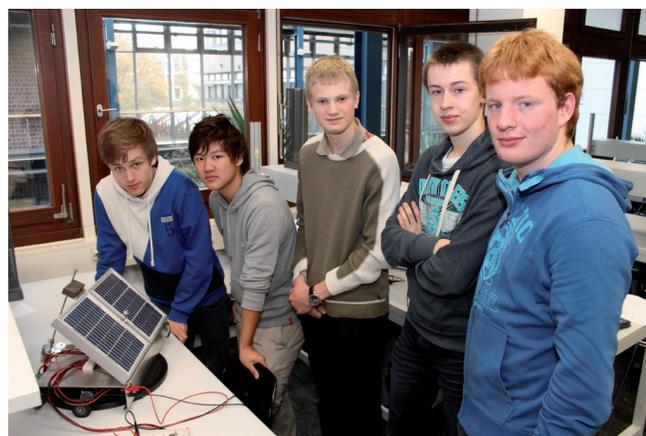
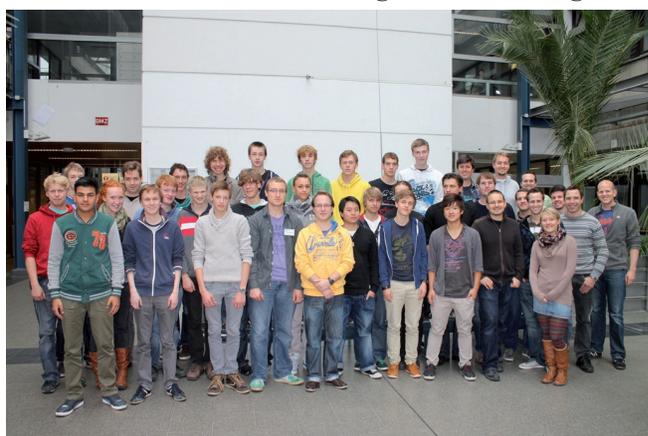
- Windenergieanlagen
- Photovoltaiksysteme
- Energieübertragung und Transformatoren
- Leistungselektronik

bearbeiten.

Hierbei hatten alle Teilnehmenden intensiven Kontakt mit Forschenden und Studierenden der Universität. Zusätzlich fanden täglich spannende Laborführungen am Fachbereich Elektrotechnik statt.

Aufgrund des großen Interesses findet die Schülerakademie jährlich, jeweils in der ersten Woche der Herbstferien statt. Aktuelle Informationen sind auf der Webseite der Schülerakademie zu finden:

www.fb1.uni-bremen.de/regenerative-energie



AG Wind

In der Windenergiebranche 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 Studenten 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 500W bis 1000W zur Verfügung.

Im vergangenen Jahr konnte die erste Anlage mit einem hochpräzisen Drehgeber zur Lage- und Drehzahlfassung nachgerüstet werden. Zusätzlich wurde ein modular aufgebauter, rückspeisefähiger Frequenzumrichter aufgebaut und in Betrieb genommen. Hiermit können in Zukunft beliebige Regelverfahren mit der Labor Windenergieanlage erprobt werden.

Die Aufstellung einer 500W Windenergieanlage auf einer Freifläche hinter dem Institutsgebäude ist für das nächste Jahr geplant. Die Planungen für Fundament und Mast werden derzeit von der Arbeitsgemeinschaft durchgeführt.



Abb. 2: Mobile Miniatur-Windenergieanlage

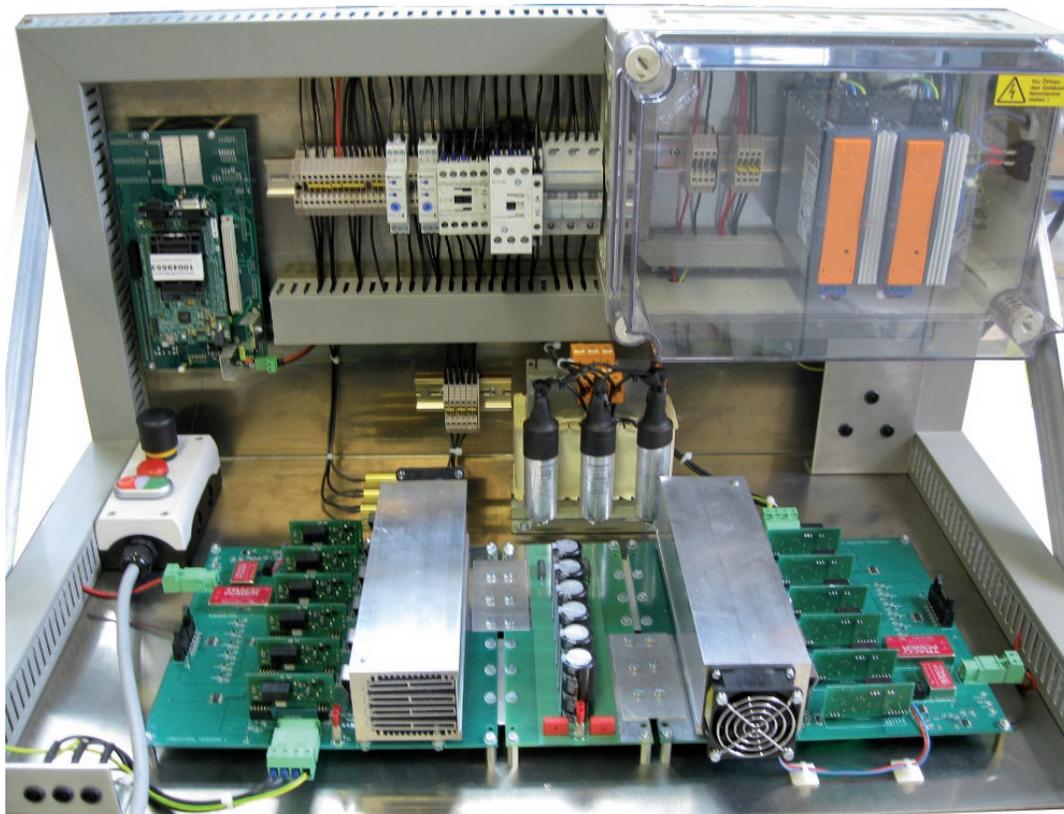


Abb. 1: Rückspeisefähiger Frequenzumrichter



Satz und Layout: Christian Renz für das IALB im April 2013
Titel- und Rückseitenfoto, Gruppenfoto und diverse andere Fotos : C. Renz

www.ialb.uni-bremen.de



