



# IALB

**Institut für elektrische Antriebe,  
Leistungselektronik und Bauelemente  
der Universität Bremen**

## **Jahrbuch 2011**

**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**

**BCM**  




**Universität Bremen**





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

## Themenübersicht

Vorwort	2
Mitarbeiter des IALB im Jahr 2011	3
Forschungsberichte 2011	4
Erweiterung eines RTAI-Linux basierten EtherCAT-Prüfstandes für ein mehrachsiges HIL-System	5
Hochauflösende DSP basierte Drehgeberauswertung mit EtherCAT-Feldbus Anbindung	6
Inselnetzregelung mit parallel speisenden Windenergieanlagen	7
Versuchsaufbau zur Nachbildung dezentral gespeister Inselnetze	8
Übertragung des Verhaltens von Dampfturbinenkraftwerken auf Windenergieanlagen zur aktiven Netzregelung	9
Erweiterung eines Bedienelemente-Simulators	10
Transversalfluss-Linearmotor mit passivem Stator	11
Inbetriebnahme des Transversalfluss-Linearmotors	12
Beobachter für die belastungsreduzierende Regelung von Antriebssträngen	13
Prüfstand zur Analyse und Regelung dynamischer Belastungen in Antriebssträngen von Windenergieanlagen	14
Magnetische Lagerung einer Schleifkugel	15
Stahlblechumschlag mit Permanentmagneten	16
Feuchtetest mit hoher Spannungsbelastung an Halbleitermodulen	18
Optimisation of RC-IGBTs for Soft Switching Applications	19
Grundlagen der Elektrotechnik III	20
Lehrveranstaltungen des Instituts	20
Grundlagenlaboratorium Regelungstechnik Teil 1	20
Praktikum Antriebs- und Stromrichtertechnik	21
Power Converter Technology	21
Antriebsregelung und Mechatronik I	21
Antriebsregelung und Mechatronik II	21
Werkstoffe der Elektrotechnik	22
Halbleiterbauelemente	22
und Schaltungen I und II	22
Halbleiterbauelemente	23
Modellbildung und Messverfahren für Leistungshalbleiterbauelemente	23
Qualitäts- und Verbesserungsmethoden	23
Leistungselektronik und Stromrichtertechnik I	23
Einführung in die Festkörperphysik	23
Konstruktion elektrischer Maschinen	24
Berechnung elektrischer Maschinen	24
Schülerakademie Regenerative Energie	25
AG Wind	26

## Vorwort

Mit diesem Jahrbuch möchten wir Ihnen einen Überblick über die Forschungs- und Lehraktivitäten des Instituts für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente im Jahr 2011 geben.

Ein herausragendes Ereignis im August 2011 war der Dienstantritt von Prof. Josef Binder, der vorher als Bereichsleiter bei der Festo AG & Co. KG tätig war. Prof. Binder verstärkt die Aktivitäten des Instituts in der Mechatronik.

Im Juli ist unser langjähriger Technischer Mitarbeiter Herr Gustav Matthies in den Ruhestand getreten. Herr Matthies hat mit seinem umfassenden Wissen über elektrische Antriebe sehr zum Aufbau und zum Betrieb des Labors beigetragen. Hervorzuheben ist auch sein stetes und vorbildliches Engagement bei der Betreuung von Schulpraktikanten, denen er oft die ersten Eindrücke in die Technik vermittelt hat. Allen Kollegen des Instituts hat er stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden. Wir wünschen Herrn Matthies für seinen Ruhestand alles Gute.

Die Aktivitäten am IALB im ganzen Jahr 2011 waren im starken Maße geprägt durch die Umstellung des Elektrotechnik-Studiengangs auf das Bachelor-Master-System. Damit verbunden ist die Erweiterung des Studienangebots durch den Aufbau eines neuen Studiengangs „Wirtschaftsingenieur Elektrotechnik“, der im Wintersemester 2012/2013 beginnen soll, und einer neuen Vertiefungsrichtung „Erneuerbare Energietechnik“ im Bachelor- und Masterstudiengang „Elektrotechnik und Informationstechnik“. An beiden Aktivitäten hat das IALB einen maßgeblichen Anteil.

Um bei Schülern das Interesse an Erneuerbarer Energietechnik zu wecken, ist am Institut die „Schülerakademie Regenerative Energie“ entwickelt und zweimal durchgeführt worden. Sie gibt Einblicke in die technischen Herausforderungen, die für eine „grüne“ Energieversorgung der Zukunft zu lösen sind. An realen Versuchsaufbauten können die Teilnehmerinnen und Teilnehmer selbst experimentieren und moderne Techniken zur regenerativen Energietechnik erfahren.

In mehreren Versuchen beschäftigen sie sich damit, wie eine Windenergieanlage aus „Wind Strom macht“, wie aus Sonnenlicht Elektrizität erzeugt wird, wie der Strom von der Nordsee nach Süddeutschland kommt und welche Rolle die Leistungselektronik dabei spielt. Wir möchten an dieser Stelle allen danken, die den Aufbau und die Durchführung der Schülerakademie durch Geld- und Sachmittel unterstützt haben.

Mit Hilfe unserer Lehrbeauftragten Herrn Dr. Götschmann (Konstruktion elektrischer Maschinen) und Herrn Prof. Dr. Völker (Berechnung elektrischer Maschinen) konnte auch 2011 wieder ein vielfältiges Angebot interessanter Lehrveranstaltungen gemacht werden. 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 unseren 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.

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- und Diplomarbeiten oder als studentische Hilfskräfte tätigen Studierenden möglich.

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

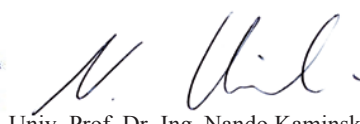
Bremen, im Mai 2012



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



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

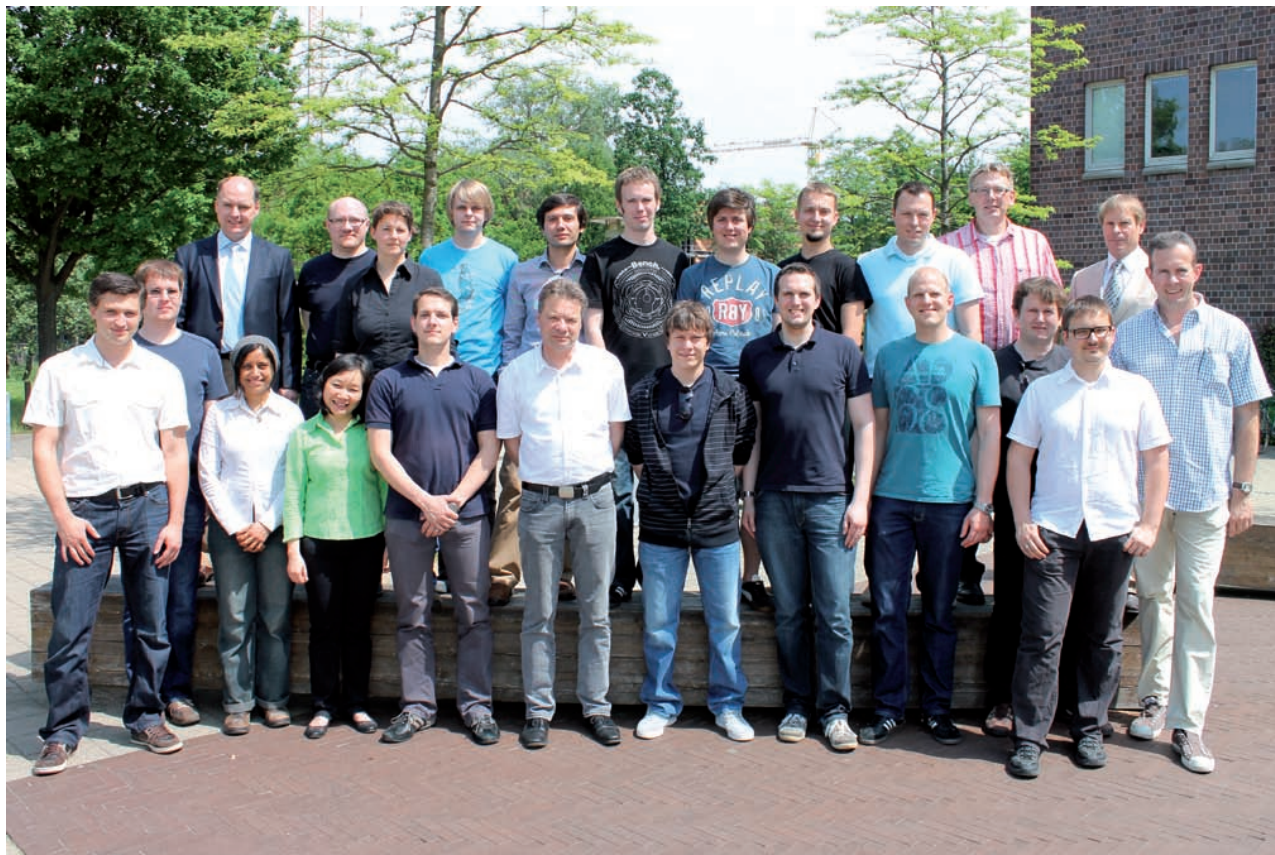


Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nando Kaminski



Univ.-Prof. rer. nat. Josef Binder

## Mitarbeiter des IALB im Jahr 2011



### Institutsleitung

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

**Oberingenieur:** Dipl.-Ing. Johannes Adler

### Forschungsgruppen

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

# **Forschungsberichte 2011**

## Erweiterung eines RTAI-Linux basierten EtherCAT-Prüfstandes für ein mehrachsiges HIL-System

Für einen „Hardware in the Loop“-Simulator (HIL) wurde am IALB bereits ein System bestehend aus einem PC zur Steuerung und einem PC zur Systemsimulation aufgebaut. Dieses System wurde nun um zwei weitere PCs zur Simulation erweitert. Der HIL-Simulator besteht jetzt aus einem Leitreechner und drei PCs für die Simulation einzelner Achsen. (Abb. 1).



Abb. 1: EtherCAT-System - 1 Master + 3 Slaves

Für die Kommunikation zwischen dem Leitreechner und den PCs zur Simulation wird der echtzeitfähige Feldbus „EtherCAT“ von der Firma Beckhoff eingesetzt. Um auch PCs an den EtherCAT-Feldbus anbinden zu können gibt es von verschiedenen Herstellern PCI-Karten. Bisher wurde die EtherCAT-Slave PCI-Karte der Firma

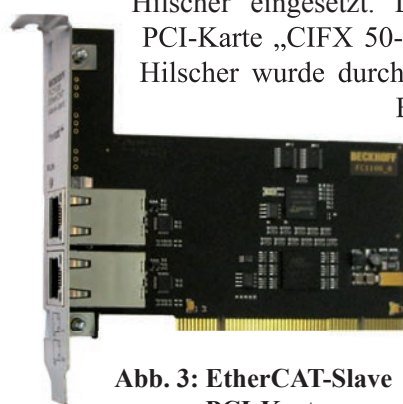


Abb. 3: EtherCAT-Slave PCI-Karte

Hilscher eingesetzt. Die EtherCAT-Slave PCI-Karte „CIFX 50-RE“ von der Firma Hilscher wurde durch die neu verfügbare EtherCAT-Slave PCI-Karte „FC1100“ von der Firma Beckhoff ersetzt (Abb. 3). Während auf der EtherCAT-Slave PCI-Karte von der Firma Hilscher ein eigener Mikrocontroller zur Verarbeitung der Prozessdaten integriert ist, ist der EtherCAT-Slave-Controller bei der „FC1100“ PCI-Karte direkt über den PCI-Bus an den PC angebunden. Dies hat den Vorteil einer kürzeren Bearbeitungszeit der Prozessdaten, wenn diese auf dem PC verarbeitet werden. Für die neue PCI-Karte „FC1100“ wurde ein eigener Treiber für RTAI-Linux entwickelt. Sollen auf jeder Achse aufwendige Visualisierungen realisiert werden, bietet sich die Möglichkeit an die EtherCAT-Slave PCI-Karte von Hilscher zu verwenden. Der zeitkritische Teil der Berechnungen kann im Mikrocontroller der Hilscher PCI-Karte abgearbeitet werden. Dies hätte den Vorteil, dass z.B. Interrupts der Grafikkarte die Interrupts zum Abholen und Bearbeiten der Berechnungen nicht zusätzlich stören. Bei dem Mikrocontroller handelt es sich um eine ARM basierte Lösung.

Um vergleichbare Messungen zu erhalten wird ein externer Funktionsgenerator verwendet. Das Triggersignal sowie die Antwortsignale auf den einzelnen

Rechnern werden zusammen auf einem Oszilloskop dargestellt. Die Ein- und Ausgabe der Triggersignale wird weiterhin über die PCI-Karte von Meilhaus „ME4610“ realisiert. Der Funktionsgenerator triggert das System mit einem Rechtecksignal mit einer Frequenz von bis zu 16 KHz. Abb. 2 zeigt die Bearbeitungszeit des EtherCAT-Frames sowie das Eintreffen der Daten auf den drei Slave-Systemen. Auf Kanal 1 wird die Bearbeitungszeit des EtherCAT-Frames, inkl. der Ausgabe des Signals, angezeigt, welche bei ca. 6,6  $\mu$ s liegt. Die Bearbeitung beinhaltet das Abholen der Daten aus dem vorigen Frame, Verarbeiten der Prozessdaten und Absenden der neuen Prozessdaten, welche z.B. die Zeiten für die PWM-Erzeugung enthalten könnten. D.h., dass trotz des Triggersignals mit 16 KHz nur ein Abtasttakt von 8 KHz effektiv realisiert wird. Auf Kanal 2, 3 und 4 wird bei jedem Puls das Eintreffen der zuvor gesendeten Prozessdaten angezeigt. Zu sehen ist, dass die Daten nicht gleichzeitig an den Slaves eintreffen, dies liegt daran, dass die Daten sofort nach dem Eintreffen im Slave an den PC weiter gegeben werden. Das Eintreffen der Daten ist zum einen davon abhängig, an welcher Stelle die Prozessdaten im EtherCAT-Frame gespeichert sind, weiterhin kommt die Verzögerung bei der Interrupt-Abarbeitung hinzu. Die Software Komponenten (Gentoo Linux Version 2010, Kernel Version 2.6.32, RTAI Version 3.8.1) wurden beibehalten, um die Systeme vergleichen zu können.

Im nächsten Schritt müssen die Slave-PCs mit dem Master synchronisiert werden, d.h., dass die Bearbeitung der Daten zum gleichen Zeitpunkt erfolgt. Dies kann über die sogenannten „Distributed Clocks“ realisiert werden. Das Lesen und Schreiben der Prozessdaten in zwei Schritten umzusetzen, bietet die Möglichkeit, die effektive Frequenz des Systems über die 8 KHz zu erhöhen. Weiterhin muss das Matlab-Modell der Strecke auf den Slave-PCs implementiert werden. Als Abschluss muss auf dem Master-PC eine entsprechende Regelung umgesetzt werden.

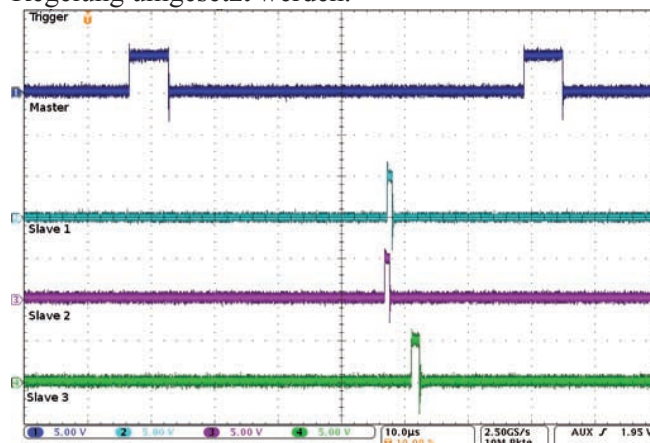


Abb. 2: Messung der Bearbeitungs- und Buslaufzeit

## Hochauflösende DSP basierte Drehgeberauswertung mit EtherCAT-Feldbus Anbindung

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

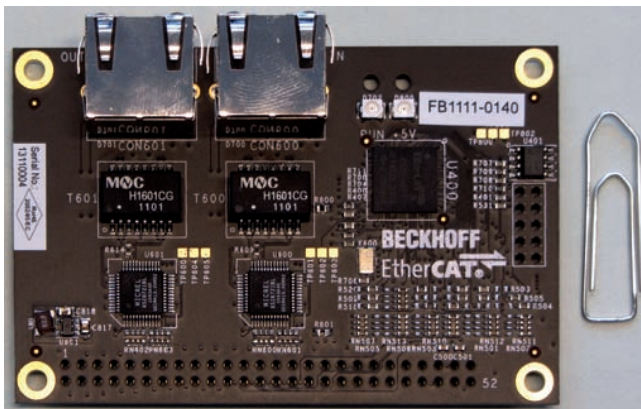


Abb. 1: EtherCAT-Briefmarke

Bei EtherCAT handelt es sich um einen echtzeitfähigen Feldbus basierend auf dem Ethernet-Standard. Während bei Standard Ethernet-Verbindungen jeder Teilnehmer zu jeder Zeit senden kann, wird dies beim EtherCAT-Feldbus nur dem Steuerrechner (Master) erlaubt. Der EtherCAT-Master startet den Transfer eines Datenpaketes, welches dann von den weiteren Busteilnehmern (Slaves) durch Entnehmen und Hinzufügen von Daten bearbeitet wird. Hat der letzte Teilnehmer die Bearbeitung abgeschlossen, wird das Datenpaket zurück zum Master gesendet. Die Echtzeitfähigkeit des EtherCAT-Bussystems wird dadurch erreicht, dass neben dem Master als einzigem Sender, spezielle Slave-Controller eine konstante Durchlauf- bzw. Bearbeitungszeit garantieren.

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



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

bereits fertig bestückte Module, sogenannte „EtherCAT-Briefmarken“ (Abb. 1). Auf einer EtherCAT-Briefmarke sind bereits ein ASIC, Netzwerkbusen sowie Status-LEDs integriert. Die Kommunikation mit dem DSP wird über ein Mikrocontroller-Interface (paralleler asynchroner 16 Bit breiter Bus) realisiert (Abb. 2). Für den Datenaustausch über den EtherCAT-Bus muss ein definiertes Protokoll eingehalten werden. Der EtherCAT-Slave wird dabei vom Master durch verschiedene Betriebsmodi geführt. Vom Grundzustand „INIT“ und gleichzeitig der Initialisierung der Slaves, über die Modi „PreOp“ und „Save-Op“ zur Einrichtung der Speicherbereiche für den Datenaustausch, bis hin zum Betrieb „OP“, in dem der Slave mit vollem Funktionsumfang arbeitet.

Um zu gewährleisten, dass EtherCAT-Geräte den Spezifikationen entsprechen, müssen die Geräte getestet werden. Ist der Test bestanden, darf ein Gerät mit einem EtherCAT-Logo (Abb. 3) versehen und somit als EtherCAT-Slave ausgewiesen werden.

Um Zugriff auf die EtherCAT-Spezifikationen und -Entwicklungswerkzeuge zu haben, ist das IALB Mitglied in der „EtherCAT Technologie Group“ (ETG) geworden und hat somit die Möglichkeit, den Spezifikationen entsprechende Geräte zu entwickeln und testen zu lassen.



Abb 3: EtherCAT-Logo

## Inselnetzregelung mit parallel speisenden Windenergieanlagen

Windenergieanlagen (WEA) nach dem aktuellen Stand der Technik sind in der Lage, sich auf ein vorhandenes Stromnetz aufzuschalten und Energie gemäß den vorherrschenden Windverhältnissen ins Netz einzuspeisen. Soll eine WEA die Stromerzeugung in vom Verbundnetz abgetrennten Inselnetzen unterstützen, so muss dennoch immer ein Diesel-Generator-Aggregat das Spannungssystem im Inselnetz in Amplitude und Frequenz vorgeben und die unvermeidlichen Schwankungen der Windleistung ausgleichen. Selbst wenn die Windleistung ausreichen würde, um die gesamte Last im Inselnetz zu decken, muss der Dieselgenerator zur Spannungshaltung „leer“ mitlaufen. Da auch in diesem Betriebszustand etwa 30 % des Nennkraftstoffverbrauchs anfallen, forscht das IALB derzeit daran, wie auch WEA die Aufgabe der Spannungshaltung übernehmen könnten. In einem solchen Szenario könnte dann der Dieselgenerator ganz abgeschaltet werden (Abb. 1), wodurch erhebliche Mengen an Kraftstoff eingespart werden könnten.

Hierfür wurde ein neues Gesamt-Regelungsmodell für WEA mit Synchrongenerator und einem „Vollumrichter“ (Abb. 2) entwickelt. Dieses hat eine herkömmliche Kraftwerksregelung mit Statikaufschaltung als Vorbild, um auch im Verbund mit anderen WEA ein stabiles Inselnetz aufbauen zu können. Der Block „Inselnetzregelung“ sorgt dafür, dass die ins Inselnetz eingespeiste und dort verbrauchte Leistung im Gleichgewicht ist. Dies gelingt durch Auswertung von Netzspannung und -Frequenz und entsprechende Regelung der eingespeisten Wirk- und Blindleistung. Die Aufgabe des generatorseitigen Teilumrichters ist es, die aus dem Zwischenkreis entnommene Einspeiseleistung

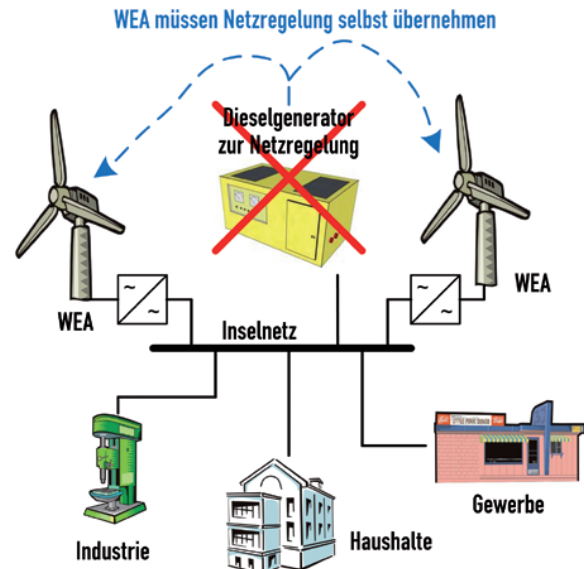


Abb. 1: Inselnetz ohne Dieselgenerator

nachzuführen, so dass die Zwischenkreisspannung konstant bleibt. Hierzu wurde eine neuartige Generatorstromregelung entwickelt.

Der Rotor der WEA fungiert bei diesem Regelungskonzept als Energiespeicher, da er durch sein großes Trägheitsmoment die unvermeidlichen Schwankungen in Windleistung und Einspeiseleistung ausgleichen kann. Die Rotorblattwinkelregelung greift ein, sobald die Rotordrehzahl einen gewissen Schwankungsbereich verlässt. Mit diesem Konzept der Inselnetzregelung mit parallel speisenden WEA könnten Hochseeinseln oder Örtlichkeiten fernab jeglicher Energieversorgung komplett aus regenerativen Quellen im Verbundbetrieb versorgt werden. Ein weiteres interessantes Einsatzfeld ist die Eigenversorgung von Offshore-Windparks, welche vom Festland-Netz abgetrennt sind.

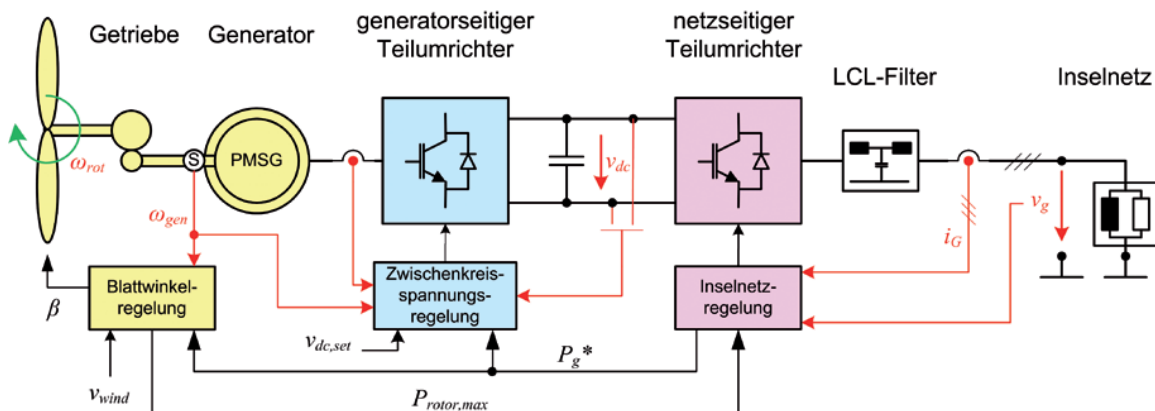


Abb. 2: Regelung der Windenergieanlage zur Inselnetzregelung im Verbund

## Versuchsaufbau zur Nachbildung dezentral gespeister Inselnetze

Im Rahmen der Forschungsaktivitäten im Bereich „Regenerative Energien“ wurde ein Versuchsstand zur Nachbildung dezentral gespeister Inselnetze in Betrieb genommen. Abb. 1 illustriert hierzu den schematischen Aufbau der Schaltung, Abb. 2 zeigt den realen Aufbau im Labor.

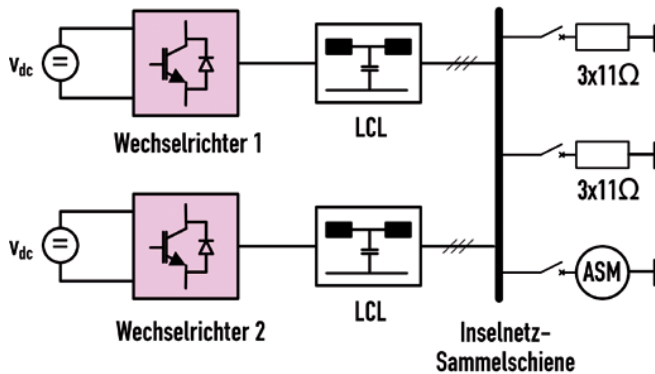


Abb. 1: Versuchsaufbau „dezentrales Inselnetz“

Die beiden Wechselrichter bilden die aktiven Netzstufen zweier eigenständiger, regenerativer Energiequellen (z.B. Windenergieanlage, Photovoltaik) nach, die ein Inselnetz im Verbund speisen. Die Belastung des Inselnetzes kann mit ohmschen und ohmsch-induktiven Verbrauchern erfolgen. Das Betriebsverhalten des Prüfstandes wird in Abb. 3 dokumentiert. Zu Beginn speist nur ein Wechselrichter (WR1) eine ohmsche Last. Zum Zeitpunkt  $t=0.3$  s wird der zweite Wechselrichter (WR2) zugeschaltet, ab dem Zeitpunkt  $t=0.6$  s ist der Anlauf einer Asynchronmaschine zu sehen. Schließ-

lich wird zum Zeitpunkt  $t=1$  s eine zweite ohmsche Last mit der Sammelschiene verbunden. Die in den Mikrokontrollern implementierte Inselnetzregelung ist in der Lage, zu allen Zeitpunkten für eine gleichmäßige Aufteilung der Wirkleistung und der Blindleistung zu sorgen sowie die Frequenz und Spannung im Inselnetz stabil zu regeln. Zwischen beiden Einspeiseeinheiten findet keine Kommunikation statt.

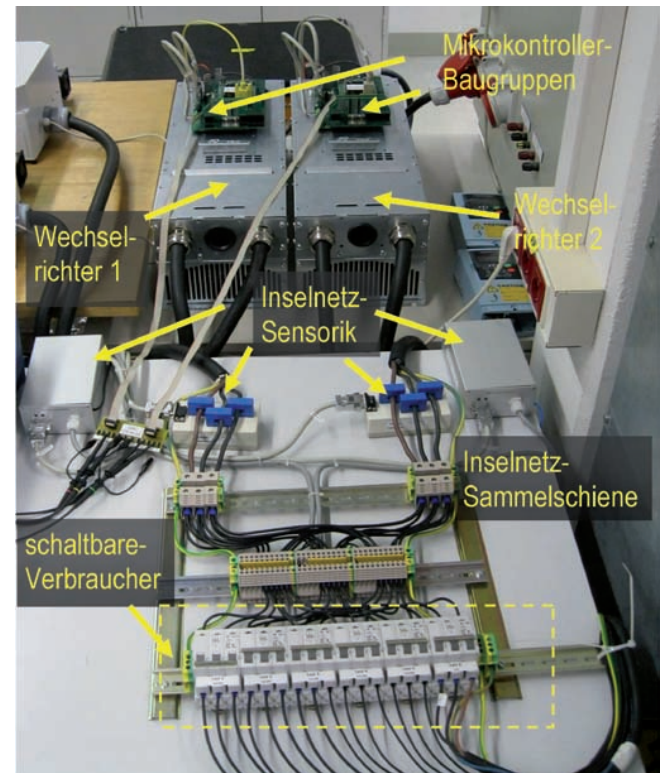


Abb. 2: Versuchsaufbau in der Maschinenhalle

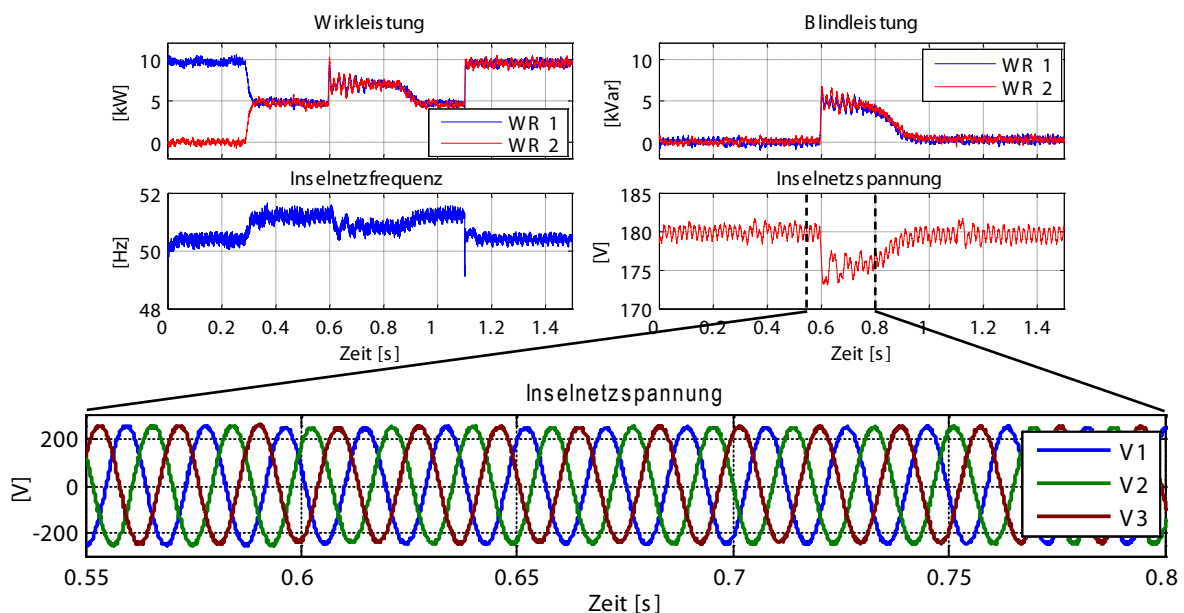


Abb. 3: Messungen am Inselnetz-Versuchsaufbau



## Erweiterung eines Bedienelemente-Simulators

Der Einsatz von Bedienelemente-Simulatoren findet überall dort Anwendung, wo Benutzer an technischen Systemen geschult werden müssen. Die Gründe hierfür können unterschiedlich sein, z.B. stehen nicht immer ausreichend reale Geräte zur Verfügung. Weiterhin ermöglicht der Aufbau eines Simulators, nur die für die Ausbildung wesentlichen Komponenten zu realisieren und kann somit Kosten einsparen. Aus Sicherheitsgründen kann es außerdem notwendig sein, den Benutzer zunächst an einem Simulator zu trainieren, wie z.B. bei der Ausbildung von Piloten.

In einer ersten Ausbaustufe wurde am IALB ein Simulator aufgebaut, der eine Dimension eines Bedienelementes nachbilden kann, z.B. einen Hebel für das Heben und Senken eines Bohrers an einer Werkzeugmaschine. Um Geräte mit zwei Dimensionen simulieren zu können, wie zum Beispiel den Bedienhebel für die Änderung der Quer- und Längsneigung bei einem

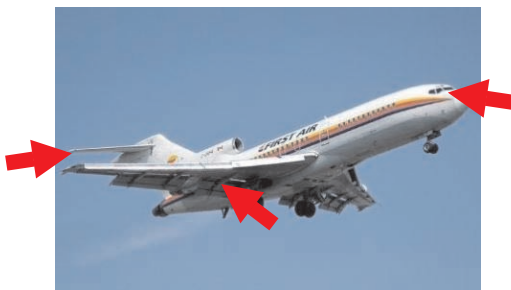


Abb. 1: Beispiel für den Einsatz von Bedienelementen

Flugzeug (Abb. 1), wurde der Simulator erweitert. Für die Nachbildung des realen Bedienverhaltens können für jede Dimension unabhängige Kennlinien hinterlegt werden. In Abbildung 2 ist beispielhaft eine Kennlinie eines federnd aufgehängten Bedienhebels mit einer Vorzugsstellung in der Mitte der Kennlinie und virtuellen Anschlägen an beiden Enden des Verfahrraums dargestellt. Die zur Nachbildung der Kennlinie auftretenden Kräfte werden von einem Servoantrieb generiert.

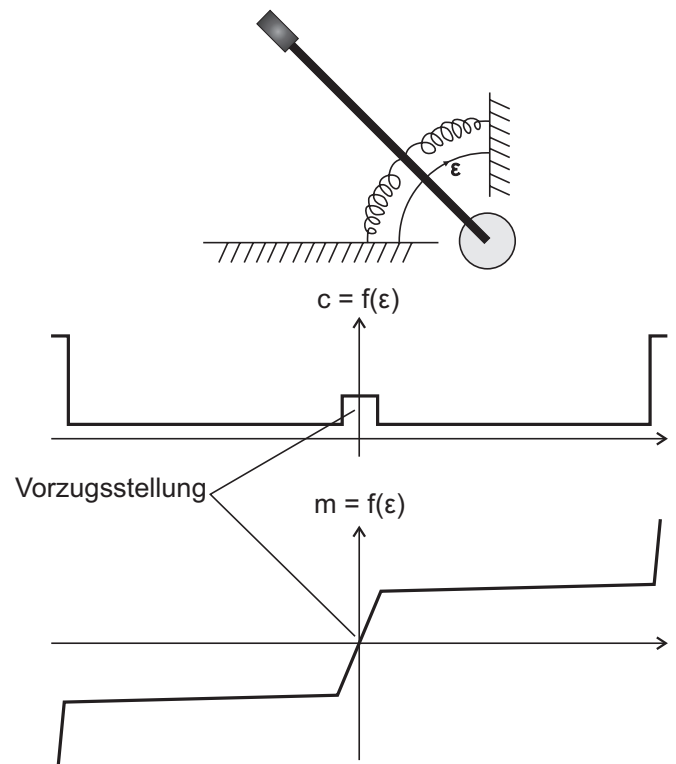


Abb. 2: Weg-Kraft-Kennlinie für einen federnd aufgehängten Hebel mit Vorzugsstellung und virtuellen Anschlägen

Der Servoantrieb wird dabei von einem Umrichter in Echtzeit über einen EtherCAT-Feldbus vom übergeordneten Leitreechner angesteuert (Abb. 3). Die im Leitreechner hinterlegte Bedienelement-Kennlinie ist, abhängig vom zu simulierenden System, beliebig einstellbar. Die Nachbildung der Kennlinie kann mit Hilfe von Matlab/Simulink (The MathWorks GmbH, Ismaning) und der Programmiersprache „C“ erfolgen. Aufgrund des modularen Aufbaus können weitere Umrichter leicht integriert und der Simulator so um weitere Bedienelemente erweitert werden.

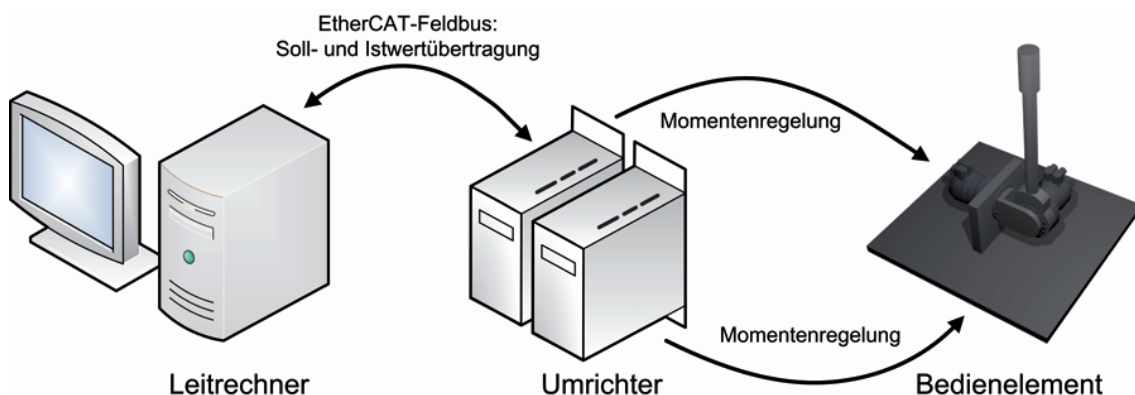


Abb. 3: Leitreechner, Umrichter und Bedienelement

## Transversalfloss-Linearmotor mit passivem Stator

Der am IALB entwickelte Transversalfloss-Linearmotor ist ein Direktantrieb mit einer hohen Kraftdichte und ohne Permanentmagneten oder elektrischen Spulen im Verfahrweg.

Auf dem Markt erhältliche Linear-Direktantriebe enthalten Permanentmagneten im Stator, womit die Kosten mit der Länge des Verfahrwegs wachsen. Aufgrund der aktuellen Liefersituation und des ständigen Preisanstiegs der hauptsächlich in China aus Selten-Erden-Metallen hergestellten Permanentmagnete

ist es unumgänglich, die Menge an permanentmagnetischem Material in industriellen Anwendungen so weit wie möglich zu reduzieren. Der neu entwickelte Linearmotor basiert auf dem bekannten Transversalfloss-Prinzip. Er wurde allerdings so umgestaltet, dass sich sowohl die Permanentmagneten als auch die elektrischen Spulen im Läufer befinden. Die Pole im (langen) Stator bestehen nur aus konventionellen Elektroblechen, so dass lange Verfahrwege sehr kostengünstig realisiert werden können und dabei trotzdem die gleiche Kraftdichte erreicht wird, wie bei modernen Linear-Direktantrieben mit Permanentmagneten im gesamten Stator. Genau wie bei rotierenden Transversalflossmaschinen treten auch bei dem Linearmotor Schubkraftschwankungen auf. Basierend auf den bisherigen Forschungsarbeiten an rotierenden Transversalflossmaschinen konnten die Verfahren zur Glättung der Vortriebskraft auch

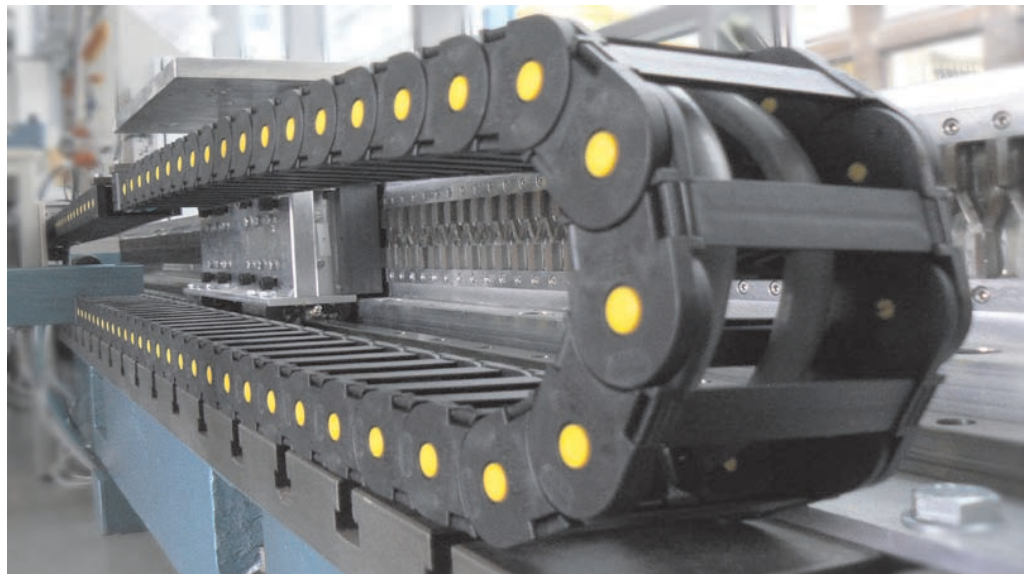


Abb. 1: Foto des Transversalfloss-Linearmotors

für den Linearmotor erfolgreich umgesetzt werden: Die Kurven in Abb. 2 zeigen die Vortriebskraft des Linearmotors. Es wurden jeweils konstante Kraftsollwerte in Schritten von 0,25 kN vorgegeben und die Kraft wurde bei unterschiedlichen Läuferpositionen gemessen. In Abb. 2a wurden sinusförmige Phasenströme verwendet. Man erkennt deutlich die Schwankungen von bis zu 25% bei maximaler Kraft und auch die Magnet-Rastkräfte bei einem Kraftsollwert von Null. In Abb. 2b wurden optimierte Stromformen eingesetzt, womit die Vortriebskraft stark geglättet werden konnte. Die verbleibende Restwelligkeit ist hier auf die unzureichend genaue, manuelle Fertigung des Motors zurückzuführen und kann bei einem industriell gefertigten Motor mit engeren Fertigungstoleranzen fast vollständig eliminiert werden.

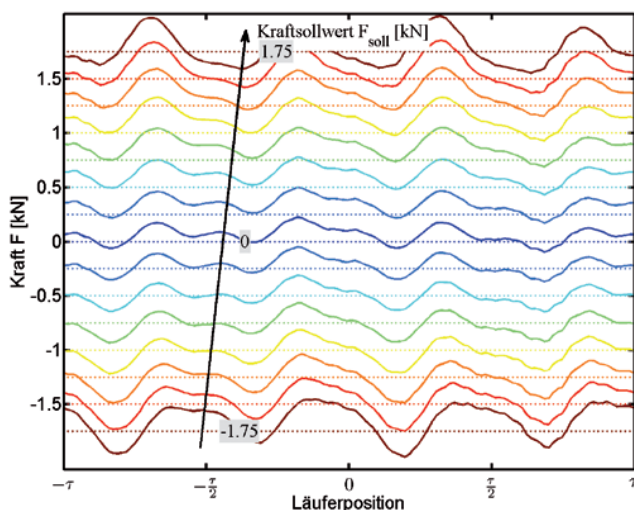
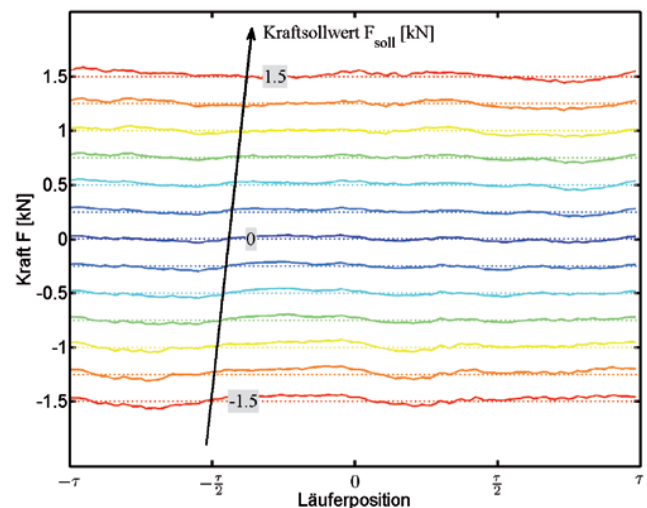


Abb. 2: Gemessene Vortriebskräfte des Linearmotors bei jeweils konstanten Kraftsollwerten  
a) mit sinusförmigen Phasenströmen



b) mit optimierten Stromformen

## Inbetriebnahme des Transversalfluss-Lineararmotors

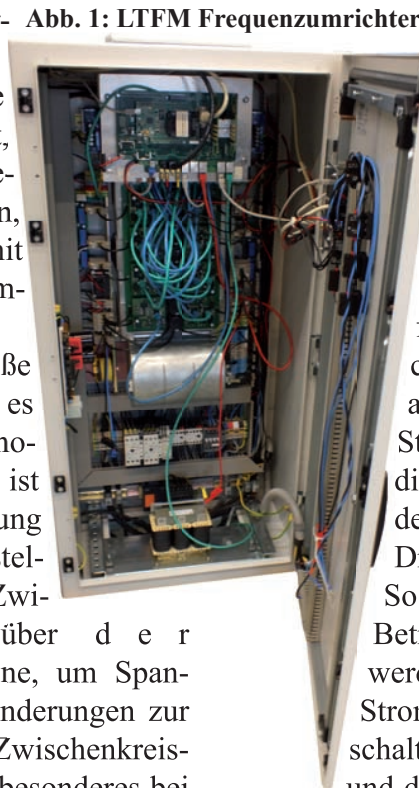
Ein unerlässliches Teil eines Linearantriebssystems ist der Frequenzumrichter. Der am IALB entworfene Dreipunkt-Umrichter ist so gestaltet, dass er sowohl den zweiphasigen Betrieb mit Einphasen-Wechselrichtern, als auch den dreiphasigen Betrieb mit einem Wechselrichter in Drehstrombrückenschaltung ermöglicht.

Da Transversalflussmaschinen große Phaseninduktivitäten haben, und es eine allgemeine Forderung nach hoher Dynamik der Schubkraft gibt, ist eine erhöhte Zwischenkreisspannung notwendig. Ein aktiver Hochsetzsteller sorgt für die Überhöhung der Zwischenkreisspannung. Sie liegt weit über der induzierten Spannung der Maschine, um Spannungsreserven für schnelle Stromänderungen zur Verfügung zu stellen. Die hohe Zwischenkreisspannung hat aber auch Nachteile: besonderes bei Zweipunktumrichtern führen steile Schaltflanken

zu starken Stromüberschwingungen, die sowohl Maschine als auch Halbleiter belasten. Die Dreipunkttopologie kann diese Nachteile vermeiden, und gleichzeitig eine hohe Qualität des Ausgangstroms, auch bei kleiner Last und Geschwindigkeit, erreichen. Abb. 3 zeigt den Vergleich einer Halbbrücke eines Dreipunktumrichters mit Klemmdioden und der Halbbrücke eines Zweipunktumrichters. Der Frequenzumrichter wurde mit zusätzlichen Hardware-Sicherheitsfunktionen ausgerüstet, die softwareunabhängig sind. Zum Schutz des

**Abb. 3: Halbbrücke im Zwei- und Dreipunkttopologie**

Frequenzumrichters wurde ein Brems-Chopper und ein Mittelpunkttregler eingebaut. Zum Schutz des Motors hingegen wurde ein Not-Stopp System eingebaut. Es besteht aus zwei Induktionsschaltern an den beiden Enden der Verfahrstrecke, einem Schütz und Leistungswiderständen und kann den Wechselrichter softwareunabhängig ausschalten. So ist sichergestellt, dass im Falle von Softwarefehlern der Translator nicht unkontrolliert gegen die Endanschläge fährt. Die Maschine sowie der Frequenzumrichter sind über



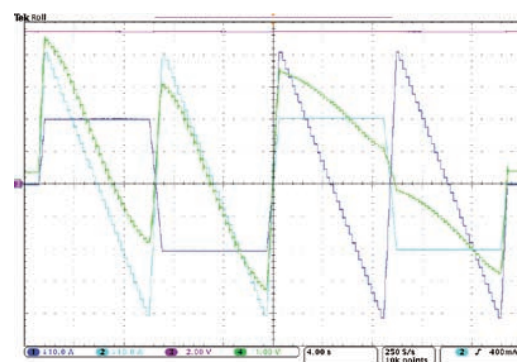
weitere Sensoren und Software-Sicherheitsfunktionen geschützt. Abb. 1 zeigt die Leistungselektronik mit zugehörigem Kühlaggregat und alle externen Komponenten des Umrichters in einem Schaltschrank.

Die Basis für die Regelung stellen bereits am IALB entwickelte Regelungen für rotierende Transversalflussmaschinen. Die Antriebsregelung besteht aus mehreren ineinander kaskadierten Strukturen. Die innere Struktur ist für die Modulation zuständig, und kann in der Software zwischen einem Zwei- und Dreipunkt-Betrieb umgeschaltet werden.

So können Messungen einfach in beiden Betriebsarten durchgeführt und verglichen werden. Alle zeitkritischen Kaskaden, wie Stromregelung und die Störgrößenaus-

schaltung, sowie die Positionsauswertung und die Geschwindigkeitsberechnung sind in

Assembler programmiert, um hier bei hohen Frequenzen regeln zu können. Da die Regelungsstruktur beliebig umgestellt werden kann, gibt es neue Möglichkeiten, komplizierte Messungen durchzuführen. Ein Beispiel dafür könnte eine halbautomatische Kraftmessung mit 256 verschiedenen Kombinationen der Phasenströme abhängig von der Translatorlage sein. In Abb. 2 ist ein Teil einer Messung dargestellt. Aus diesen Messungen werden optimierte Stromformen be-



**Abb. 2: Halbautomatische Kraftmessung**

rechnet. Mit den angepassten Stromkurven wurde die Kompensation der Rastmomente eingeführt, um den negativen Einfluss auf den Gleichlauf des Translators zu minimieren.

## Beobachter für die belastungsreduzierende Regelung von Antriebssträngen

Aus regelungstechnischer Sicht ist der Triebstrang einer Windenergieanlage ein typisches Beispiel für ein elastisch gekoppeltes Mehrmassensystem.

Lastwechsel, wie sie z.B. durch Windböen verursacht werden können, führen bei solchen Systemen zu Spitzen im Torsionsmoment bzw. im Ruck des Antriebsstranges. Diese wiederum können zu Schäden an Getriebe, Lagern und Wellen führen.

Am IALB wurden daher neue Konzepte für die belastungsoptimale Regelung von Triebsträngen in Windenergieanlagen erforscht, die die Belastungen in den Koppelementen deutlich reduzieren, so dass eine Beeinträchtigung der Lebensdauer vermieden wird. Dazu ist eine PID Regelungsstruktur zur Torsionsmomentenregelung mit Ruckbegrenzung entwickelt worden. Diese benötigte jedoch bisher das Torsionsmoment der Antriebswelle bzw. dessen Ableitungen als

Messgrößen. Da diese im allgemeinen messtechnisch nicht zur Verfügung stehen, sind am IALB Beobachterstrukturen erforscht worden, die eine belastungsoptimale Regelung von Windenergieanlagen ohne erhöhten Messaufwand ermöglichen.

Zur Verifikation des Beobachter- und Regelungskonzeptes wurden Untersuchungen an einem Mehrmassensystem mit einer überlagerten Drehzahlregelung durchgeführt. Das prinzipielle Blockschaltbild einer solchen Torsionsmomentenregelung mit überlagelter Drehzahlregelung ist in Abb. 2 dargestellt.

Abb. 3a zeigt die Sprungantwort eines Führungsgrößen-sprungs der Drehzahlregelung. Abb. 3b zeigt

die zugehörigen Drehmomente. Der Beobachter schätzt das Torsionsmoment sehr gut und ermöglicht somit eine Begrenzung des im Antriebsstrang auftretenden Torsionsmomentes ohne zusätzlichen Messaufwand.

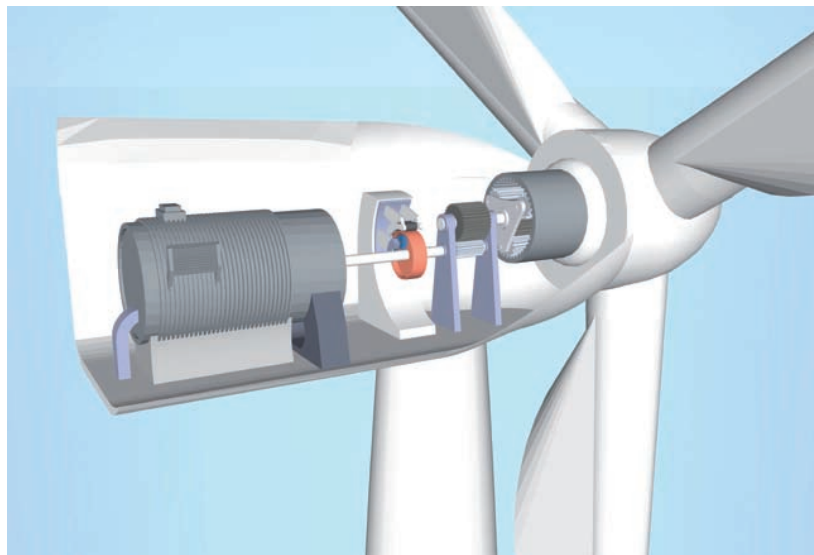


Abb. 1: Antriebsstrang einer Windenergieanlage

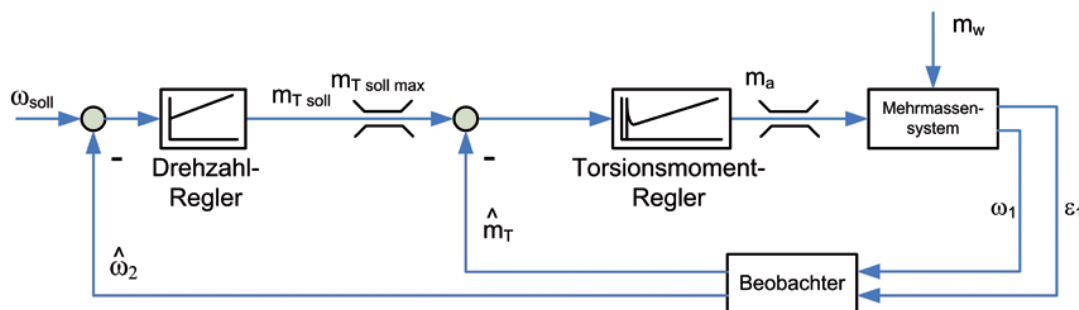


Abb. 2: Regelung mit Beobachter

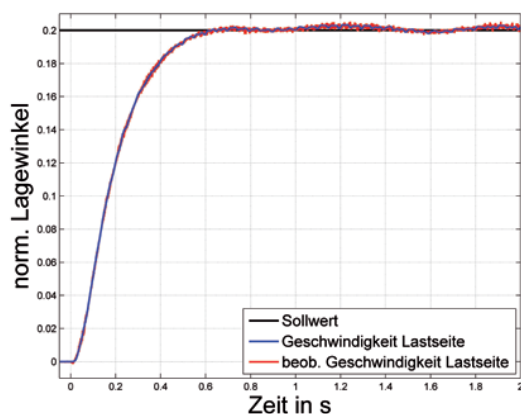


Abb. 3a: Messung: Drehzahlprung

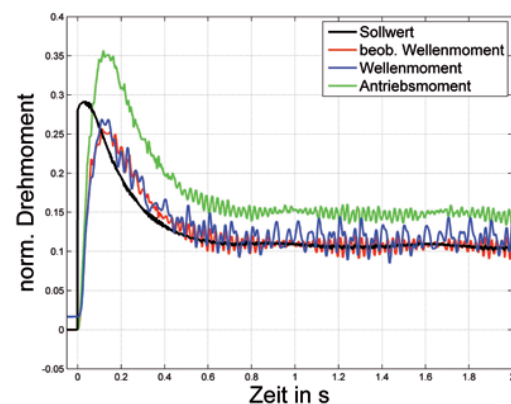


Abb. 3b: Messung: zugehörige Drehmomente

## Prüfstand zur Analyse und Regelung dynamischer Belastungen in Antriebssträngen von Windenergieanlagen

Der Prüfstand in der Maschinenhalle des IALB ermöglicht es, das prinzipielle dynamische Verhalten einer Windenergieanlage zu untersuchen. Eine über einen Frequenzumrichter angesteuerte Asynchronmaschine liefert das antreibende Drehmoment und bildet damit die Funktion des windumströmten Rotorblattes nach. Die mechanisch-elektrische Energiewandlung wird über einen doppeltgespeisten Asynchrongenerator (DASG) vorgenommen. Zusätzlich ist der Antriebsstrang mit einem einstufigen Stirnradgetriebe ausgerüstet.

Über den zur Asynchronmaschine (ASM) gehörenden Frequenzumrichter können definierte Drehzahl-/Drehmomentänderungen oder realistische Windgeschwindigkeitsverläufe vorgegeben werden. Der Frequenzumrichter kann dabei so konfiguriert werden, dass der Antriebsstrang nicht aktiv über negative Drehmomente abgebremst wird. Drehzahlreduzierungen werden dann der Realität entsprechend durch ein Auslaufen des Antriebsstranges erreicht.

Der als Lastmaschine eingesetzte DASG ermöglicht einen drehzahlvariablen Betrieb im Bereich der maschinenspezifischen Synchrodrehzahl des Generators. Die statorseitige Wicklung des Generators ist direkt an

während des Betriebs auftretenden dynamischen Belastungen erfassen und bewerten zu können. An- und abtriebsseitig des Getriebes sind Drehmomentmessflansche zur Messung der auftretenden Torsionsmomente montiert. Über insgesamt acht Kraftsensoren unter dem Getriebe und dem Generator können die auf das Fundament übertragenen Kräfte an den jeweiligen Eckpunkten erfasst werden. Das Getriebe besitzt ein Übersetzungsverhältnis von 1,96 und überführt das Antriebsmoment bzw. die Antriebsdrehzahl in für den Betrieb des doppeltgespeisten Asynchrongenerators passende Dimensionen.

Der zur Regelung des doppeltgespeisten Generators eingesetzte Frequenzumrichter ist eine Eigenentwicklung und besitzt als Kernstücke zwei IGBT Leistungshalbleitermodule der Firma SEMIKRON® vom Typ SKiP313GD122-DUL. Beide Leistungshalbleitermodule werden über einen digitalen Signalprozessor (DSP) vom Typ TMS320F28335 von Texas Instruments angesteuert. Der Signalprozessor ist durch seine freie Programmierbarkeit eine entscheidende Voraussetzung, um den Umrichter zur Realisierung und Erprobung neuartiger Regelungskonzepte an dem Prüfstand zu nutzen.

Die Ausgabe einzelner Prozessgrößen erfolgt über einen vom Signalprozessor angesteuerten vierkanaligen 16 Bit Digital-/ Analog-Wandler mit einem Ausgangsspiegel von  $\pm 10$  V. Berechnete Prozessgrößen können dann beispielweise direkt mit Messwerten des Drehmomentmessflansches oder der Kraftsensoren verglichen werden.

Mit dem leistungsfähigen Frequenzumrichter und der umfangreichen Sensorik des Prüfstandes bestehen am IALB beste Voraussetzungen, Beobachter- und Reglerstrukturen zur Analyse und Re-

gelung dynamischer Belastungen in Antriebssträngen anwendungsnah bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit zu untersuchen.

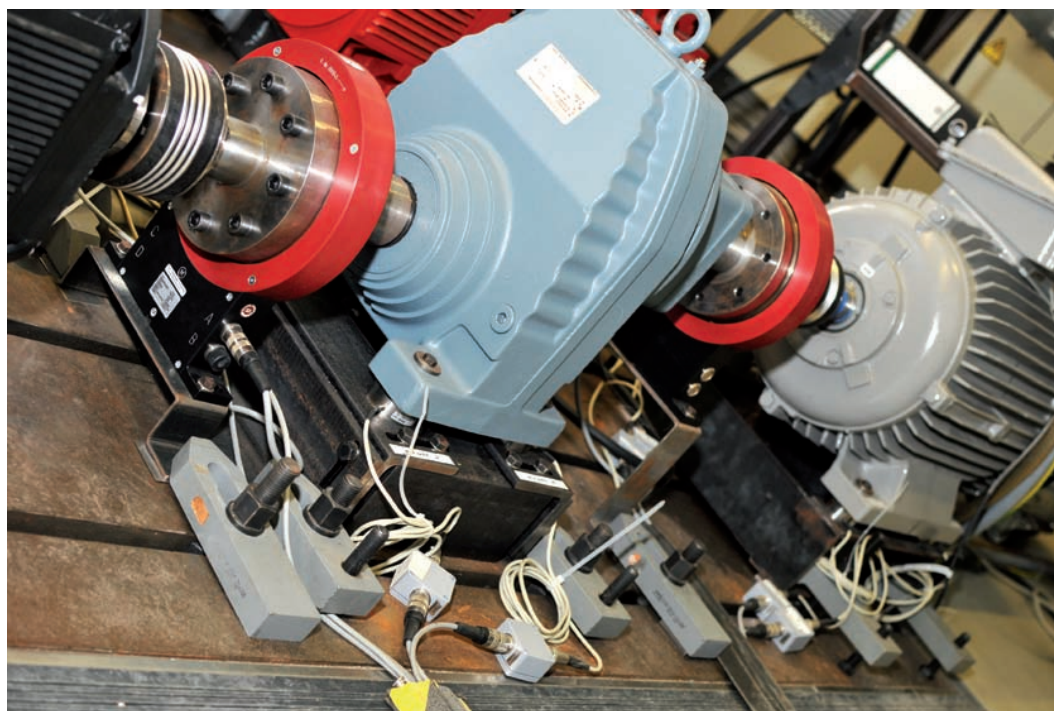


Abb. 1: Prüfstand "Windenergie"

das Netz gekoppelt, während die Rotorwicklungen über Schleifringe zugänglich sind und über einen am Institut aufgebauten rückspeisefähigen Frequenzumrichter gespeist werden. Zur Untersuchung unterschiedlicher Regelungskonzepte ist der Prüfstand zusätzlich mit umfangreicher Sensorik ausgerüstet (Abb. 1), um die

## 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.

### Motivation der Technologie

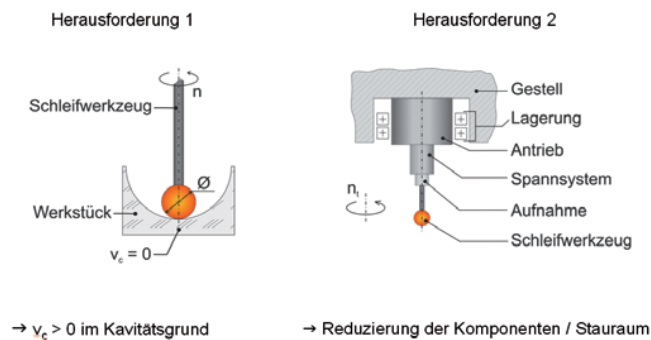


Abb. 1: Motivation

Hierbei sollen ein elektromagnetisches Lagerungssystem und ein fluiddynamischer Antrieb verknüpft werden, um einen kugelförmigen Schleifkörper von wenigen Millimetern Größe anzutreiben und mit diesem einen Abtrag zu erzielen. Durch den kugelförmigen Aufbau kann die Rotationsachse nahezu beliebig zum aktuellen Kontaktpunkt der Bearbeitung ausgerichtet und so eine möglichst hohe Schnittgeschwindigkeit erzielt werden. 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.

Entsprechend der Überlegungen von Byrne und Ahearne (Advanced Manufacturing Research Center, Uni Dublin) steigt mit zunehmender Miniaturisierung das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen stark an. Es steht also 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 Regeldyna-

mik erreicht wird 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 soll durch die regelbare Gegenkraft (Prinzip des aktiven Magnetlagers) so kompensiert werden, dass die Schleifkugel in einem definierten Abstand zum Schaft gehalten und eine Abdrängung der Kugel zur Seite verhindert wird. Durch ein quasi hydrodynamisches Magnetlager wird eine Führung des Werkzeugs realisiert, die eine Bewegung in allen translatorischen Freiheitsgraden unterbindet, während eine Rotation um eine beliebige Achse weiterhin möglich ist.

Das Ziel des IALB ist es ein Konzept zum magnetischen Lager zu entwickeln. Ferner soll eine Regelung realisiert werden, die es ermöglicht, die Schleifkugel magnetisch in einem stabilen Punkt zu positionieren und unbekannte Störgrößen in 3D auszuregulieren. Dabei ist zu beachten, dass der geplante Durchmesser mehrere Millimeter betragen soll. Bei diesen Abmessungen ist es schwierig, einen passenden Sensor zu finden.

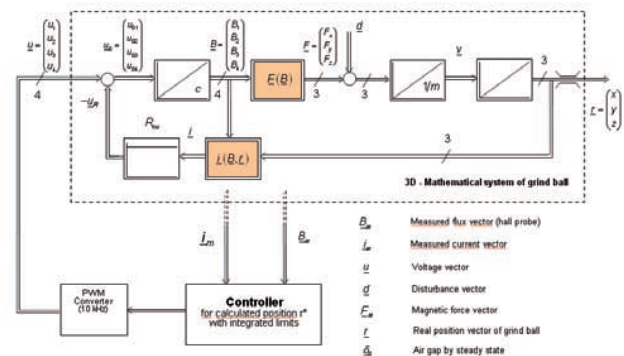


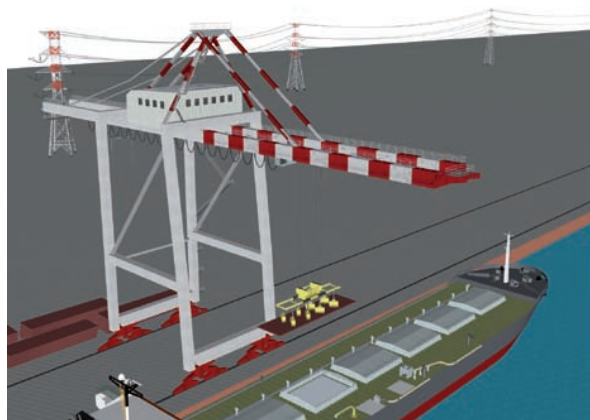
Abb. 2: Systembeschreibung

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

Für die Lagerung einer Schleifkugel mit 40 mm Durchmesser und der notwendigen Realisierung der Stromversorgung, wurden vier Stromrichter für vier Spulen entwickelt, welche die magnetischen Felder und somit Kräfte im definierten Luftspalt erzeugen. Außerdem war die Entwicklung und der Aufbau einer Adapterplatine zum Anschluss an das DSP-Board mit dem TMS320C28x von Texas Instruments erforderlich. Jede Adapterplatine hat vier Strom- und vier Hallsensoren. Dies ist für die Erfassung der Position und die Regelung notwendig. Im nächsten Forschungsschritt wird die magnetische Lagerung für eine 8 mm-Kugel entwickelt.

## Stahlblechumschlag mit Permanentmagneten

In einem Verbundprojekt mit der BLG CARGO LOGISTICS GmbH & Co. KG, ThyssenKrupp MillServices & Systems GmbH, ThyssenKrupp Magnettechnik und dem Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH wird im Projekt ISUS ein innovatives Magnethebesystem für den Umschlag von Stahlblechen im Seehafen entwickelt, das auf die spezifischen Anforderungen des Stahlumschlags ins Seeschiff ausgelegt wird und einen schnellen, ladungsschonenden, energiesparenden und sicheren Umschlag ermöglicht. Im Vordergrund steht dabei die Anforderung, von einem Blechstapel gezielt eine bestimmte Anzahl von Blechen magnetisch zu heben. Gleichzeitig müssen die gehobenen Bleche sicher am System haften, auch im Fall eines Stromausfalls, eines Kabelbruchs oder anderer Störungen.



Aufgrund der sehr hohen Sicherheitsanforderungen wurde ein System auf Basis des Kompensationsprinzips entwickelt. Dieses System beinhaltet Hochenergie-Permanentmagnete, die eine ständige Verfügbarkeit der Haltekraft sicherstellen. Mit Hilfe einer elektrischen Spule können die Magnete kompensiert werden, um die Stahlbleche abzulegen. Das System wurde so ausgelegt, dass über eine Regelung des Kompensationsstroms eine Beeinflussung der Eindringtiefe der magnetischen Felder möglich ist, um von einem Blechstapel beispielsweise nur die ersten zwei Bleche aufzunehmen.

Auf Grund der Sicherheitsanforderungen wurde eine Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, kurz FMEA, durchgeführt. In einer FMEA wird ein System systematisch betrachtet und gezielt auf Schwachstellen hin untersucht und bewertet. Dadurch ist es auch möglich, gravierende Fehlerzustände von kleinen Schönheitsfehlern zu unterscheiden. Nach Identifizierung und Bewertung wird dann die „Rangliste“ der möglichen Fehlerzustände auf Möglichkeiten zur Verhinderung oder zum Abfangen der fehlerhaften Zustände untersucht. Nach erfolgreicher Auswertung wird die FMEA erneut durchgeführt und das verbesserte System erneut untersucht. So wird nachgewiesen, dass die zuvor betrachteten Fehlerzustände verhindert werden können.

Im Rahmen des ISUS-Projektes wurde das komplette Transportsystem, vom Aufheben der Bleche bis zum Abladen der Bleche, sowie das System von der Energieversorgung bis zum Verladen des Transportgutes in einer FMEA betrachtet. Das System wurde auf Schwachstellen im Transportzyklus, in der Konstruktion und



in der Steuerung untersucht. Am Zyklus konnten keine gravierenden Schwachstellen identifiziert werden. Dies konnte durch Verwendung von sicherheitsrobuster Elektronik sichergestellt werden. So wurden zum Beispiel fast alle Sensoren redundant ausgeführt und die Tragstruktur nach dem Fail-Safe-Prinzip ausgeführt. Bei Betrachtung des Bedieners konnten noch Schwachstellen im System identifiziert werden. Diese wurden durch geschickte Unterstützung des Bedieners durch geeignete elektronische Hilfsmittel, wie zum Beispiel eine vereinfachte Bedienung und eine exakte Zustandsüberwachung gemindert.

Das Lasthebesystem befindet sich zurzeit in Fertigung. Voraussichtlich wird es im Sommer 2012 fertiggestellt und kann anschließend im Neustädter Hafen mit Feldtests überprüft werden. In diesen sollen die Funktionalität und die Wirtschaftlichkeit des Systems nachgewiesen werden.



## Steuerverfahren für Multilevel Umrichter zur Minimierung der Gleichtaktspannung

Die Entwicklung der Umrichter-Technologie bringt neben vielen Vorteilen auch typische Eigenheiten mit sich, so dass das Problem der Lagerschäden aufgrund kapazitiver eingekoppelter Spannungen und Ströme entsteht. Mit der zunehmenden Anwendung des Umrichters zur Drehzahlregelung von Drehstrommotoren für industrielle Antriebe steigt die Anzahl dieser Probleme deutlich. Deshalb sind Ursache und Wirkung der Lagerschäden zur Problemlösung untersucht worden.

Die bei dem Steuerverfahren eines Pulswechselrichters mit schnellen Halbleiterschaltern inhärente Gleichtaktspannung am Umrichterausgang ist häufig Ursache der Lagerausfälle. Die maßgebenden Stromanteile werden durch den elektrostatischen Entladestrom (EDM-Strom) des motorinternen kapazitiven Spannungsteilers und durch hohes  $du/dt$  der Spannungsflanken hervorgerufen. Der Lagerstrom, der durch einen parasitären Kondensator zwischen Statorkern und Statorwicklung fließt, kann die Lebensdauer der Wicklungsisolation reduzieren, die Motorisolation brechen und elektromagnetische Störungen bewirken.

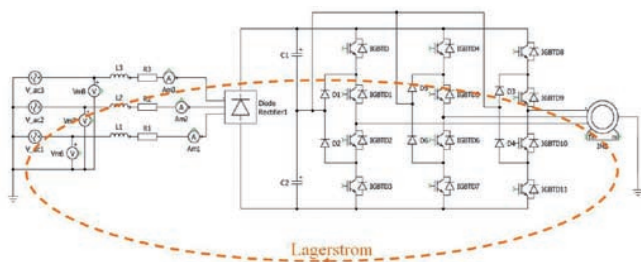


Abb. 1: Weg des Lagerstroms in den Umrichter

Ziel in diesem Projekt ist es daher, die Vermeidung der Gleichtaktspannung in die bestehenden Verfahren einzusetzen, ohne deren wesentlichen Vorteile zu mindern. In dieser Hinsicht ist ein Steueralgorithmus PWM aus dem Größenzusammenhang zwischen Raumzeigermodulation (SVPWM) und dreiphasige Dreieck Modulation (CPWM) entwickelt worden. Es handelt sich um eine Kombination aus SVPWM-CPWM und geregelter Offset-Wert (kurz. SVC-Offset), die es erlaubt, die Gleichtaktspannung auf ein Minimum zu senken. Gleichzeitig bleiben die bekannten Vorteile weitgehend erhalten.

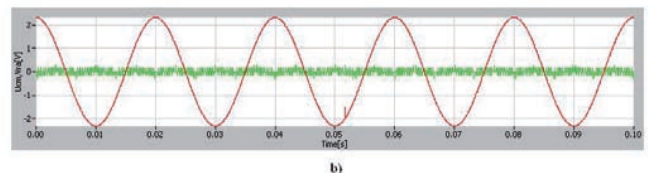
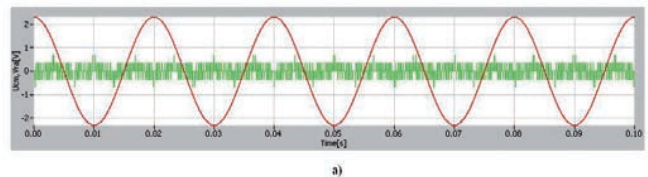


Abb. 2: Zeitverläufe der Gleichtaktspannung ( $U_{cm}$ ) und Spannungsphase ( $V_{ra}$ )

a) bei klassischem SPWM  
b) bei SVC-Offset

Der SVC-Offset wird mit dem Asynchronmotor und Multilevel Umrichter durchgeführt und bzgl. weiterer Kriterien, wie Modulationsgrad, Schaltfrequenz, Oberschwingungsgehalt auf Matlab/Simulink-Plecs Software analysiert und mit den Ergebnissen anderer Maßnahme gegen Gleichtaktspannung verglichen.

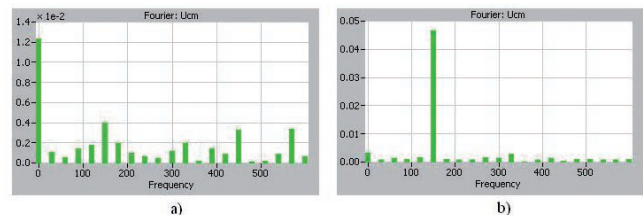


Abb. 3: Fourier Spektrum der Gleichtaktspannung  $U_{cm}$

a) bei klassischem SPWM  
b) bei SVC-Offset

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird ein Versuchsmodell des Multilevel Umrichters aufgebaut, um die Realisierung des vorgeschlagenen Steueralgorithmus zu untersuchen.

## Feuchtetest mit hoher Spannungsbelastung an Halbleitermodulen

Seine vorteilhaften Eigenschaften, vor allem die Laststrombegrenzung und die nahezu leistungslose Ansteuerung, haben den Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) zum wichtigsten Halbleiterbauelement der Leistungselektronik in der Spannungsklasse von wenigen 100 V bis zu wenigen 1000 V gemacht. Derzeit sind IGBT-Module für Spannungen von bis zu 6,5 kV und Stromstärken von bis zu 3,6 kA erhältlich.

In den letzten Jahren 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.

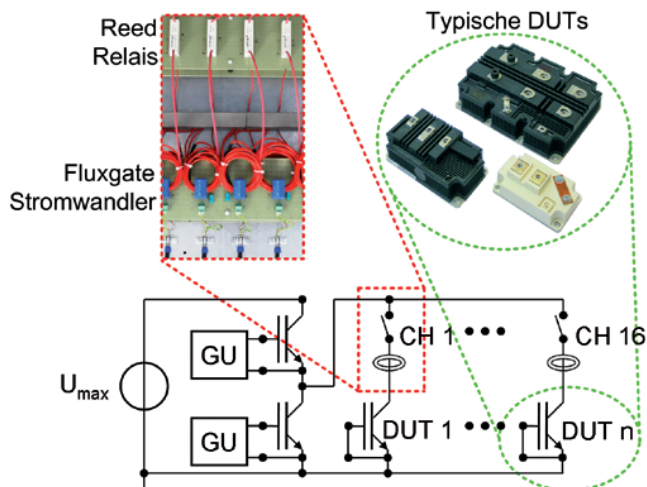


Abb. 1: Prinzip-Schaltbild Langzeitprüfstand

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.

Um die Auswirkungen, die bei einer kombinierten Feuchte-Spannungsbelastung auftreten, detaillierter untersuchen zu können, wird im Rahmen eines Kooperationsprojektes mit dem European Center for Power Electronics (ECPE) ein Langzeitprüfstand für beschleunigte Lebensdauerprüfungen betrieben (Abb. 1). Neben der Klimakammer (85° C, 85% rel. Feuchte) stellt das galvanisch getrennte Strommesssystem 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.

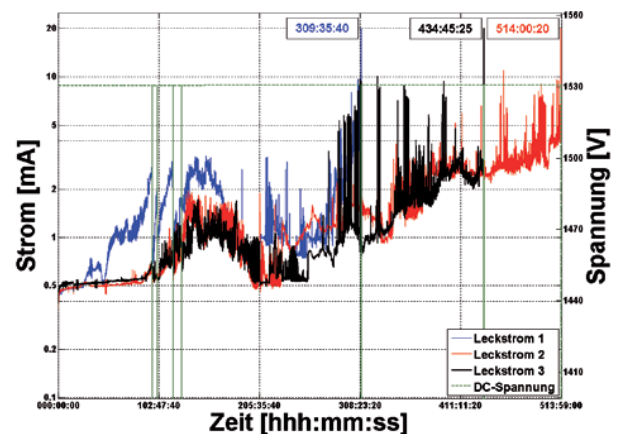


Abb. 2: Anstieg des Leckstroms während des Tests

In Abb. 2 ist das langsame, oft nicht stetige Ansteigen der Leckströme von drei IGBT-Modulen während eines Langzeittests dargestellt. Die angegebenen Zeitpunkte entsprechen der Prüfdauer bis zum Ausfall des jeweiligen Bauelements.

Die Degradation der Bauelemente zeigt sich auch bei immer wieder durchgeführten Sperrkennlinien-Messungen (Abb. 3). Dabei sind deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Chip-Technologien erkennbar.

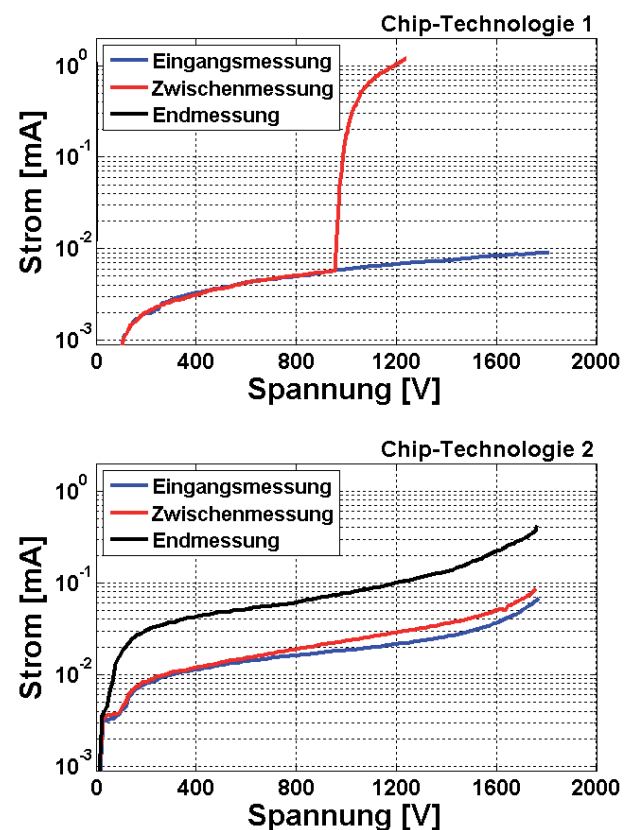


Abb. 3: Sperrkennlinien-Messungen

## Optimisation of RC-IGBTs for Soft Switching Applications

The reverse conducting IGBT (RC-IGBT) offers more and more applications and one particularly suited application is soft switching, i.e. zero voltage switching (ZVS). IALB runs a BMBF project in cooperation with Infineon Technologies AG in Neubiberg and E.G.O. Elektro-Gerätebau GmbH in Oberderdingen. In this project, we are optimising the RC-IGBT for soft switching applications like induction cookers.

Based on technological data like diffusion profiles a 2D-finite-element model of the standard IGBT was designed in MDRAW, a CAD-tool from Synopsys Inc. Then DESSIS also from Synopsys Inc. is used to solve the basic semiconductor equations within the finite-element-structure to obtain the static and dynamic characteristics.

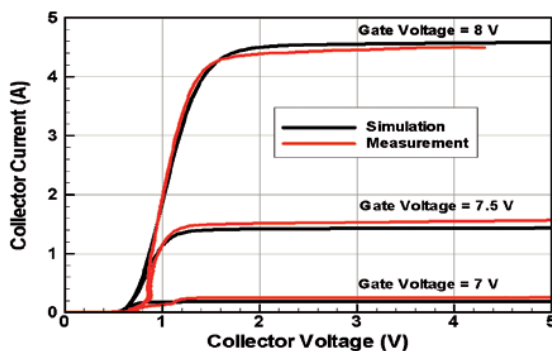


Fig. 1: Static curves: simulated vs. measured data.

Fig. 1 illustrates the simulated static characteristics in comparison with data measured on a curve tracer at IALB (Fig. 2). Fig. 3 shows the turn-off waveforms of our simulation in comparison with measured data provided by Infineon.



Standard IGBTs are optimised for hard switching, which shows different switching transients compared to soft switching. Fig. 4 illustrates the turn-off waveforms of the RC-IGBT in both switching modes. During hard switching, the overlap of high voltage and high current causes high losses. This overlap is avoided in soft switching mode, because the voltage rises very slowly and

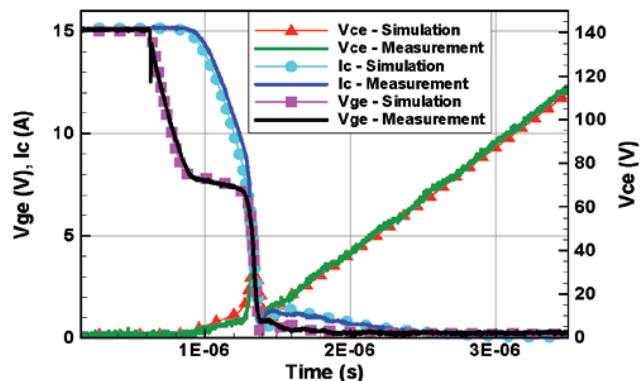


Fig. 3: Turn-off curves: simulated & measured data.

reaches only about 10% of its maximum value when the tail current is over. Nevertheless, the majority of switching losses is created in the tail phase, so minimising the tail is the key factor to reduce the soft switching losses. However, improvements must not be cancelled by increased conduction losses!

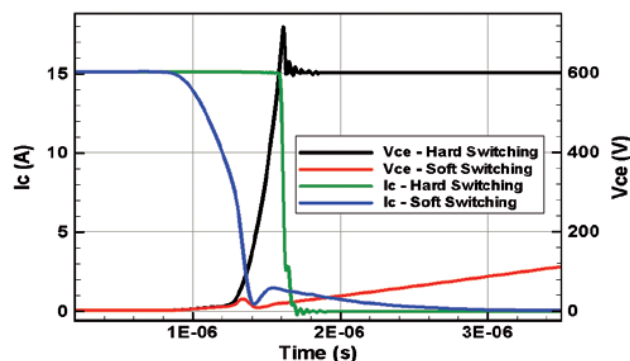
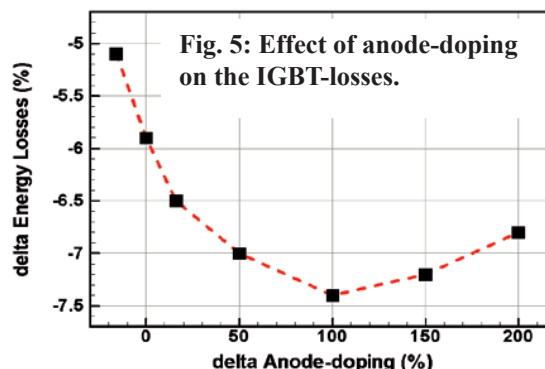


Fig. 4: Soft switching vs. hard switching.

The RC-IGBT can be optimised by changing parameters such as background doping, diffusion profiles, thickness, etc. For example, by changing the anode doping, the IGBT-losses can be decreased substantially (Fig. 5). To find the best combination of parameters, we have run more than 2500 simulations. Simulation results show that Infineon's standard RC-IGBT can be improved for the investigated application by more than 30% in term of losses.



## 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.

### Grundlagen der Elektrotechnik III

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.

### Grundlagenlaboratorium Regelungstechnik Teil 1

An dem Praktikum beteiligt sich das IALB mit den folgenden Versuchen:

- Temperaturregelung mit Zweipunktregler: Aufbau eines Temperaturregelkreises und Messung der erzielten Schalteigenschaften
- Verhalten von PID Reglern: Aufnahme der Sprungantworten und Frequenzgänge unterschiedlicher Regler und Strecken
- Spannungsregelung mit PWM: Erprobung der Auswirkungen von unterschiedlichen Reglertypen auf die Ausgangsgrößen beim Einsatz in Schaltnetzteilen

## 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 Hochsetzsteller 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 Transistorgrundsaltungen, 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

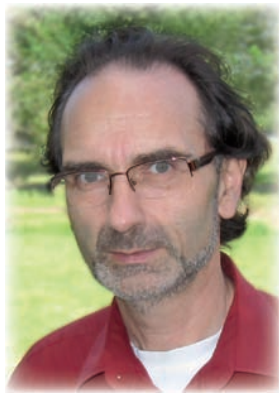
Diese Wahlpflichtvorlesung enthält festkörperphysikalische Grundlagen der Halbleiterkristalle, thermische Eigenschaften von Festkörpern, eine Einführung in Anwendungen der Supraleitung und die Grundlagen optoelektronischer Bauelemente einschließlich Flüssigkristallanwendungen. Das Ziel der Vorlesung 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-Reflexion 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.



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

## 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 Konstruktionsskizzen 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.

Begleitend zur Vorlesung wird eine Exkursion zur Firma LDW (Lloyd Dynamowerke GmbH & Co. KG) angeboten. LDW ist der Hersteller elektrischer Sondermaschinen, bei dem der Dozent, Dr.-Ing. Norbert Götschmann, Leiter der Konstruktion ist.



**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, aufgrunddessen 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 im Mai 2011 erstmals veranstalteten 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.

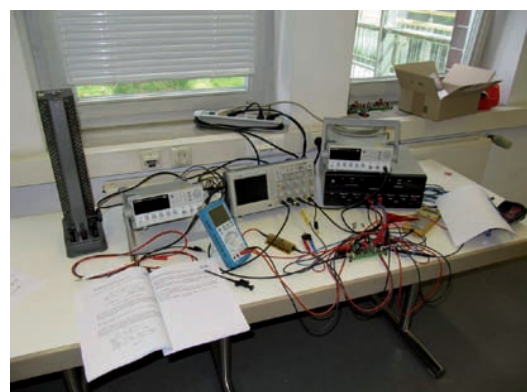
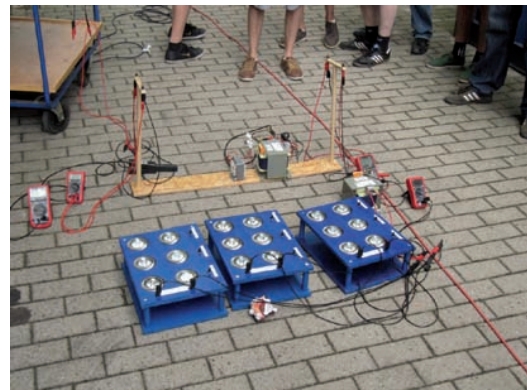
Im Rahmen der fünftägigen Schülerakademie konnten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer Versuche aus den vier Themenbereichen:

- 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 Erfolgs im Mai 2011 wurde die Schülerakademie bereits im Oktober 2011 wiederholt. Von nun an findet die Schülerakademie jährlich in der ersten Woche der Herbstferien für bis zu 48 Teilnehmerinnen und Teilnehmer statt.



## AG Wind

In der Windenergiebranche herrscht ein immenser Bedarf an Qualifikation, 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.

Bereits heute ist die moderne Windenergieanlage ein komplexes, mechatronisches High-Tech-System: Elektrotechnik, Mechanik und Informationsverarbeitung wirken hier eng zusammen. 2009 gründete das IALB eine offene AG „Wind“, die bereits von Unternehmen aus der Branche unterstützt wird. In selbstständiger Organisation eignet sich die studentische Arbeitsgemeinschaft das Wissen um das Zusammenspiel von Windrad, Getriebe, Generator, Leistungs- und Signalelektronik in den Windenergieanlagen an.









NW1