



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

# **Jahrbuch 2010**

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

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

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

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



**Universität Bremen**







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



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



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

## Themenübersicht

<b>Vorwort</b>	<b>2</b>
<b>Mitarbeiter des IALB im Jahr 2010</b>	<b>3</b>
<b>Forschungsberichte 2010</b>	<b>4</b>
<b>Verlustleistungsbewertung verschiedener Umrichtertopologien im Teillast- und Vollastbetrieb</b>	<b>5</b>
<b>Belastungsoptimale Regelung von Windenergieanlagen</b>	<b>6</b>
<b>Aufbau eines echtzeitfähigen EtherCAT-Prüfstands mit „RTAI“-Linux</b>	<b>7</b>
<b>Zuverlässigkeitstests für Leistungshalbleiterbauelemente</b>	<b>8</b>
<b>Positionsregelung einer magnetisch gelagerten Schleifkugel</b>	<b>9</b>
<b>Notstromversorgung eines Offshore-Windparks bei Netzabriss</b>	<b>10</b>
<b>Kraftwerksnachbildung für Windenergieanlagen</b>	<b>11</b>
<b>Windenergieanlagen mit intelligenter Leistungselektronik zur Steigerung der Energieeffizienz</b>	<b>12</b>
<b>Transversalflussgeneratoren für Windenergieanlagen</b>	<b>13</b>
<b>3D-transiente Finite-Elemente-Analyse einer segmentierten Transversalflussmaschine mit externem Ansteuerungskreis und elektrisch-mechanischer Verbindung in FLUX3D</b>	<b>14</b>
<b>Energieeffiziente Regelung von Asynchronmaschinen</b>	<b>15</b>
<b>Aufbau eines Kranmodells zur Demonstration eines neuartigen Magnetgreifsystems</b>	<b>16</b>
<b>Influence of Parasitic Circuit Elements on the Switching Behaviour of IGBTs</b>	<b>17</b>
<b>Lehrveranstaltungen des Instituts</b>	<b>18</b>
<b>Grundlagen der Elektrotechnik III</b>	<b>18</b>
<b>Grundlagenlaboratorium Regelungstechnik Teil 1</b>	<b>18</b>
<b>Praktikum Antriebs- und Stromrichtertechnik</b>	<b>19</b>
<b>Power Converter Technology</b>	<b>19</b>
<b>Antriebsregelung und Mechatronik I</b>	<b>19</b>
<b>Antriebsregelung und Mechatronik II</b>	<b>19</b>
<b>Werkstoffe, Bauelemente, Schaltungen I</b>	<b>20</b>
<b>Werkstoffe, Bauelemente, Schaltungen II</b>	<b>20</b>
<b>Leistungselektronik und Stromrichtertechnik I</b>	<b>21</b>
<b>Halbleiterbauelemente</b>	<b>21</b>
<b>Einführung in die Festkörperphysik</b>	<b>21</b>
<b>Modellbildung und Messverfahren für Leistungshalbleiterbauelemente</b>	<b>21</b>
<b>Qualitäts- und Verbesserungsmethoden</b>	<b>21</b>
<b>Berechnung elektrischer Maschinen</b>	<b>22</b>
<b>Konstruktion elektrischer Maschinen</b>	<b>22</b>
<b>Mechatronische Antriebslösungen für Produktions- und Logistikaufgaben</b>	<b>23</b>
<b>AG Wind</b>	<b>24</b>

## Vorwort

Mit diesem Jahrbuch möchten wir Ihnen eine Übersicht 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 Windenergietechnik behandeln insbesondere Themen des Antriebsstrangs, der Netzintegration und der Regelung von Windenergieanlagen.

Mit Hilfe unserer Lehrbeauftragten Herrn Dr. Götschmann (Konstruktion elektrischer Maschinen), Herrn Dr. Kiel (mechatronische Antriebslösungen für Produktions- und Logistikprobleme) und Herrn Prof. Dr. Völker (Berechnung elektrischer Maschinen) konnte auch 2010 wieder ein

vielfältiges Angebot interessanter Lehrveranstaltungen erreicht 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.

Trotz der Wirtschaftskrise, die sich auch auf unser Institut auswirkte, war 2010 insgesamt ein erfolgreiches Jahr.

Ermöglicht wurde dies durch das weit überdurchschnittliche 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 2011

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

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

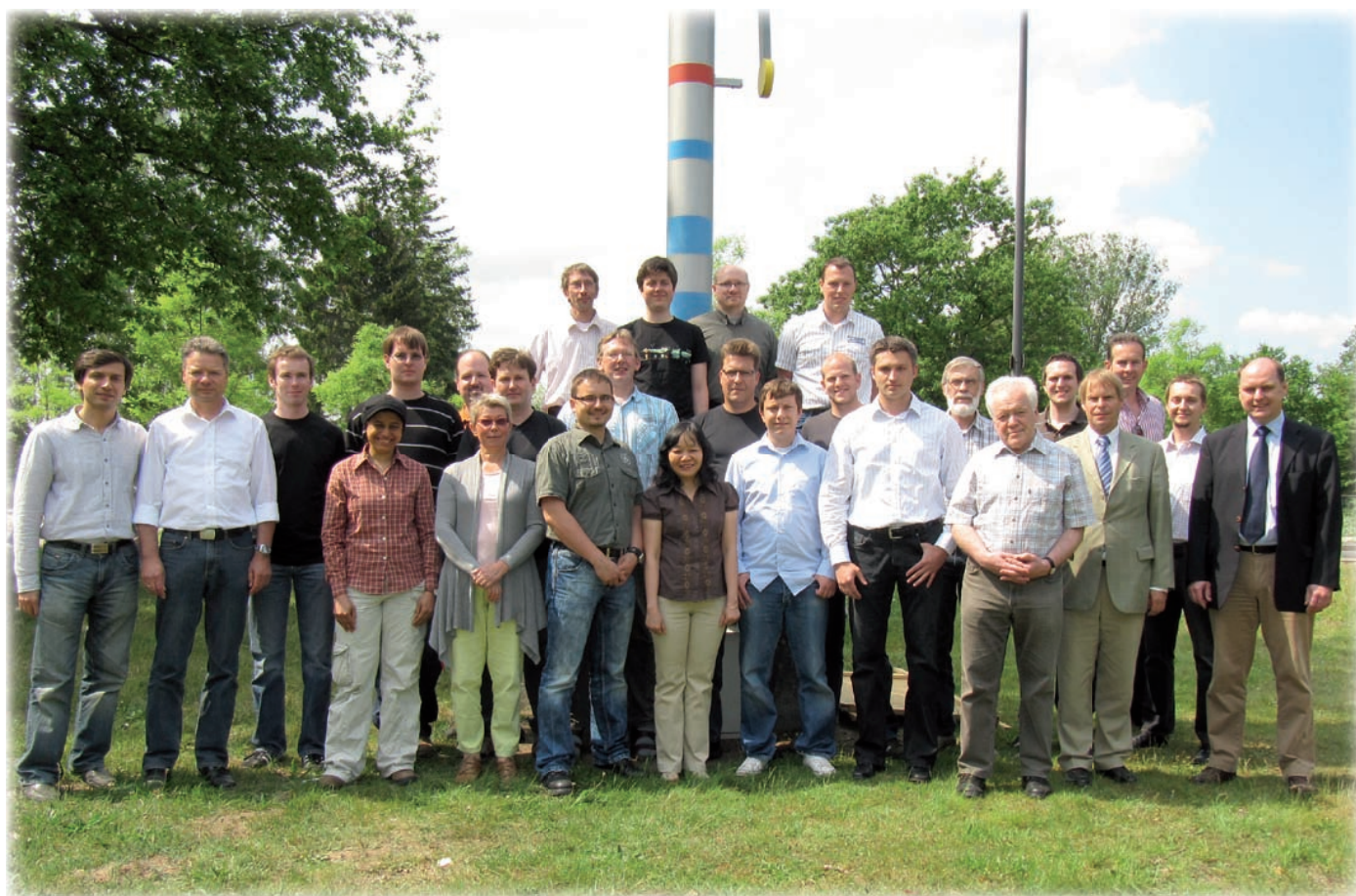
A handwritten signature in blue ink, appearing to read "N. Kaminski".

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

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

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

## Mitarbeiter des IALB im Jahr 2010



### 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	M. Siatkowski S. Bassurah J. Schröck A. Norbach	C. Renz M. Joost H. Langmack	I. Sheikhan C. Bödeker C. Zorn	G. Matthies B. Vahlenkamp G. Schwerdtfeger F. Trocha

# **Forschungsberichte 2010**



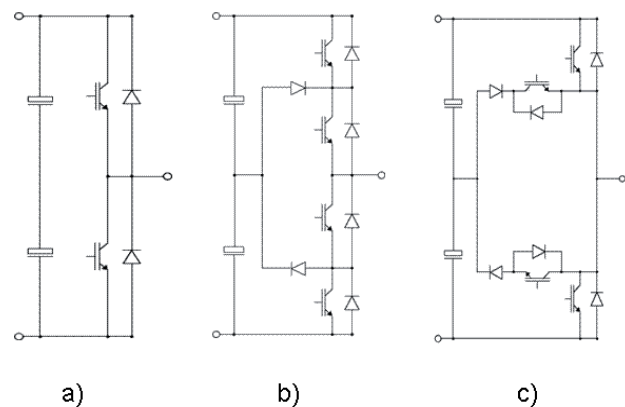
## Verlustleistungsbewertung verschiedener Umrichtertopologien im Teillast- und Volllastbetrieb

Windenergieanlagen werden selbst bei Offshore-Betrieb auf hoher See nur zu etwa 25 % der Betriebszeit mit voller Leistung betrieben. Zu 44 % wird eine Anlage mit Leistungen unterhalb der halben Nennleistung betrieben. Der Wirkungsgrad der eingesetzten Frequenzumrichter wird allerdings von den Herstellern gewöhnlich nur für den Nennbetrieb angegeben. Um bewerten zu können, wie sich die Verluste bei Teillast entwickeln, wurde ein Simulationsmodell, bestehend aus Generator und Frequenzumrichter sowie der Anlagenregelung, unter MATLAB Simulink entwickelt.

Mithilfe des Simulationsmodells konnten unterschiedliche Umrichtertopologien (siehe Abb. 2) untersucht und die auftretenden Verluste anschließend verglichen werden. Die Verlustleistungen der betrachteten Topologien sind in Abb. 1 für eine Leistung von 13 % der Nennleistung dargestellt. Hierbei wurde zusätzlich für jede Topologie betrachtet, welchen Einfluss das Ersetzen eines IGBTs durch zwei parallele Schalter hat. Die zwei parallelen Schalter wurden zunächst synchron geschaltet, wodurch sich der Laststrom bei allen Lastzuständen gleichmäßig auf beide Strompfade aufteilt. Anschließend wurde untersucht, wie sich die Verluste bei einem intelligenten Schalten der parallelen Schalter entwickeln, wobei der Strom bis zur halben Nennleistung nur über jeweils einen der parallelen Schalter fließt. Bei höheren Leistungen fließt der Strom dann wiederum über beide Schalter.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz von Multi-Level Topologien die Verluste im unteren Teillastbereich um etwa 44 % reduziert werden können (vergleiche Abb. 1). Im Volllastbetrieb kommt es durch den Einsatz von 3-Level Topologien zu einer Reduktion der Verluste um mindestens 13 %.

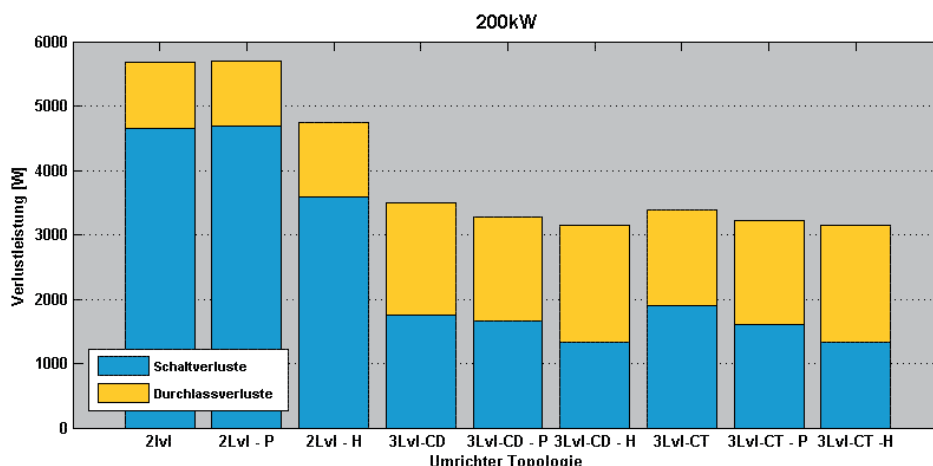
Der Einsatz der betrachteten Topologien kann nur dann wirtschaftlich erfolgen, wenn sich die Mehrkosten für den Aufbau innerhalb kurzer Zeit durch die mehr erzeugte Leistung amortisieren. Genauere Betrachtungen der Wirtschaftlichkeit zeigen, dass sich selbst die teuerste 3-Level Topologie bereits nach einer Laufzeit von 3 Jahren amortisiert. Die Betrachtungen erfolgten dabei mit den auf der Forschungsplattform Fino1 ermittelten Windverteilungen, gemittelt über die letzten drei Jahre.



**Abb. 2: Brückenarme unterschiedlicher Topologien**  
a) Zwei-Level b) 3-Level mit Clamping Diode  
c) 3-Level mit Clamping Transistor

Neben den Kosten ist für den Einsatz von alternativen Umrichtertopologien die Lebensdauer einer Anlage von entscheidender Bedeutung. Gerade im Offshore-Bereich sind Wartungs- und Reparatursätze aufgrund der Wetterbedingungen nicht immer möglich, wodurch es zu langen Ausfällen der gesamten Anlage kommen kann. Die Lebensdauer von Leistungshalbleitern wird hauptsächlich durch die Anzahl und Höhe der auftretenden Temperaturzyklen begrenzt. Bei den betrachteten intelligent geschalteten parallelen Zweigen kommt

es schätzungsweise zu einer um 39 % reduzierten Lebensdauer. Dieser Effekt kann jedoch durch ein abwechselndes Schalten der parallelen IGBTs vollständig kompensiert werden. Es kommt somit zu keiner Verringerung der Lebensdauer. Durch den Einsatz von 3-Level Topologien kommt es zu einer deutlichen Erhöhung der Lebensdauer, da sich hierbei die Verluste auf die doppelte Anzahl von IGBTs aufteilen können.



**Abb. 1: Verlustleistung unterschiedlicher Topologien bei Teillast**

2Lvl = Zwei-Level 3Lvl-CD = 3-Level mit Clamping Diode 3Lvl-CT = 3-Level mit Clamping Transistor  
-P = synchrones Schalten von zwei parallelen IGBTs -H = intelligentes Schalten von zwei parallelen IGBTs



## Belastungsoptimale Regelung von Windenergieanlagen

Der Triebstrang einer Windenergieanlage ist aus regelungstechnischer Sicht ein typisches Beispiel für ein elastisch gekoppeltes, schwingfähiges Mehrmassensystem. Dynamische Lastwechsel, verursacht z.B. durch Windböen, führen bei solchen elastisch gekoppelten Mehrmassensystemen zu Spitzen im Torsionsmoment des Antriebsstranges bzw. im Ruck. Diese wiederum können zu Schäden an Getriebe, Lagern und Wellen führen. Diese dynamischen Lastwechsel stellen eine besondere Herausforderung dar.

Am IALB werden daher neue Konzepte für die belastungsoptimale Regelung von Windenergieanlagen erforscht, die den Betrieb mit möglichst hoher Dynamik ermöglichen, dabei aber die Belastungen in den Koppellementen deutlich reduzieren, so dass eine Beeinträchtigung der Lebensdauer vermieden wird. Dazu ist eine Torsionsmomentregelung mit Ruckbegrenzung entwickelt worden (s. Abb. 2). Damit besteht die Möglichkeit, über die Form bzw. die Begrenzung des Torsionsmoment-Sollwertes eine Belastungsreduzierung zu erreichen. Diese Regelungs-

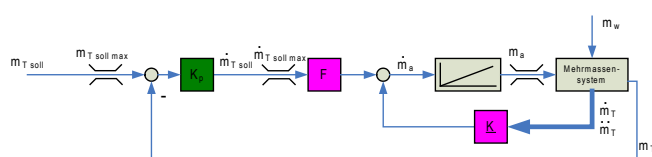


Abb. 2: Blockschaltbild der Torsionsmomentregelung

struktur kann auch durch bekannte, lineare, regelungstechnische Bausteine, wie PID-Regler und PT1-Filter dargestellt werden (s. Abb. 3). Das Regelungskonzept kann somit relativ einfach und mit geringem Aufwand implementiert werden.

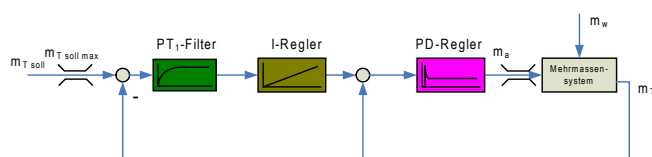


Abb. 3: Blockschaltbild mit PID-Reglern

Der Triebstrang einer Windenergieanlage besteht aus mehreren Massen und Wellenstücken an den einzelnen Getriebestufen (s. Abb. 1). Bei einem solchen System ist die Beschränkung auf einen bestimmten, für die jeweilige Anlage besonders kritischen Wellenabschnitt

durch Zusammenfassen der übrigen Massen und Wellenstücke zu einer Ersatzmasse und eine entsprechende Modellvereinfachung zweckmäßig. Dadurch wird es möglich, relativ einfache Zweimassenersatzsysteme für den Reglerentwurf zu Grunde zu legen (s. Abb. 4).

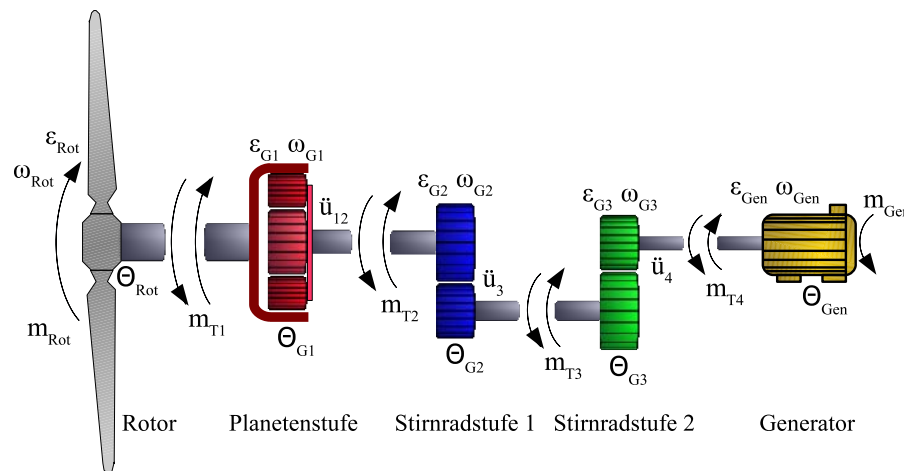


Abb. 1: Triebstrang einer Windenergieanlage als Mehrmassensystem

Weiterhin können im allgemeinen nicht alle für die Torsionsmomentregelung mit Ruckbegrenzung benötigten Werte in der Anlage direkt gemessen werden. Daher werden am IALB Beobachterstrukturen erforscht, die eine belastungsoptimale Regelung

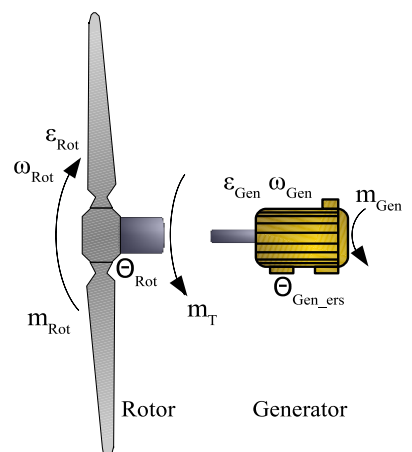


Abb. 4: Triebstrang als reduziertes Ersatzmodell

von Windenergieanlagen ohne erhöhten Messaufwand ermöglichen sollen.

Dabei werden sowohl vollständige Beobachter für das gesamte Mehrmassensystem als auch reduzierte Beobachter, sowie solche auf Basis reduzierter Ersatzsysteme, die sich auf die kritischen Wellenabschnitte beschränken, untersucht.

Ziel ist es dabei, einen möglichst einfach strukturierten Beobachter zu entwerfen, der das kritische Torsionsmoment mit den vorhandenen Messgrößen mit hinreichender Genauigkeit schätzt.

## Aufbau eines echtzeitfähigen EtherCAT-Prüfstands mit „RTAI“-Linux

Für die Kommunikation zwischen Steuer- und Simulationsrechner eines Hardware-in-the-Loop-Simulators (HIL) wird ein echtzeitfähiger Feldbus benötigt. In diesem Artikel wird der Aufbau eines Systems basierend auf dem EtherCAT-Feldbus vorgestellt.

Hardware-in-the-Loop-Simulations-Systeme werden in der Industrie, speziell im Maschinen- und Anlagenbau, aber auch in der Automobilbranche, schon eingesetzt. Die HIL wird in eine Maschinensteuerung über einen Feldbus an ein Physikmodell (Simulation) einer Maschine angeschlossen; dieses enthält in der Regel eine Abbildung des Verhaltens sowie des Materialflusses. Zweck ist die Erstellung und Erprobung von Steuerprogrammen, bevor die Bauteile einer Maschine gefertigt und montiert sind.

Für den HIL einer Wickelmaschine ist es wichtig, sehr kurze Zykluszeiten von weniger als 60  $\mu\text{s}$  einzuhalten. Um die Zykluszeiten einhalten zu können, wird das Echtzeitbetriebssystem „RTAI“-Linux verwendet. Da das Betriebssystem im Quellcode vorliegt, kann es optimal an die Bedürfnisse angepasst werden. Weiterhin sind für RTAI-Linux bereits fertige Module für die EtherCAT-Übertragung verfügbar. Bei EtherCAT handelt es sich um einen von der Firma Beckhoff initiierten Ethernet basierten Feldbus, der um die Echtzeitfähigkeit erweitert wurde. Das Protokoll ist offengelegt und eignet sich gleichermaßen für weiche und harte Echtzeitanforderungen, da die Zykluszeiten unter 100  $\mu\text{s}$  liegen und einen geringen Jitter ( $\leq 1 \mu\text{s}$ ) haben.

Der Geschwindigkeitsvorteil beim EtherCAT-Protokoll - gegenüber dem Ethernet-Protokoll - entsteht dadurch, dass die vom Master gesendeten Datenpakete vom Slave bzw. von den Slaves im Durchlauf („on-the-fly“) gelesen und bearbeitet werden. Bei Ethernet würde der Slave das Datenpaket zunächst komplett empfangen, dann bearbeiten und anschließend weiterleiten. Die Echtzeitfähigkeit wird durch eine Konstante und damit eine berechenbare Bearbeitungszeit in den Slaves ermöglicht. Für die Master-Hardware kann ein IBM-kompatibler PC mit Standard-Netzwerkkarte verwendet werden. Die Slaves für diesen Prüfstand werden ebenfalls mit Standard-IBM-kompatiblen PCs realisiert, in die spezielle Slave-Netzwerkkarten (Abb. 1) eingebaut

sind. Diese verfügen im Gegensatz zu herkömmlichen Netzwerkkarten über zwei RJ45-Anschlüsse (Ein- und Ausgang) und einen auf das EtherCAT-Protokoll spezialisierten Mikrocontroller.

Beim Aufbau wurde zunächst der EtherCAT-Master mit der OpenSource-Software „EtherLab Master“ Version 1.5 von der „IGH Essen“ eingerichtet und unter RTAI-Linux konfiguriert; zum Einsatz kommt RTAI-3.8.1 mit dem Linux Kernel 2.6.32.11.

Um sowohl das Trigger- als auch das Antwortsignal auf einem Oszilloskop darstellen und messen zu können, wurde die Bearbeitungsroutine für den EtherCAT-Frame über einen externen Interrupt einer IO-Karte getriggert. Als Taktraten wurden jeweils 4 kHz, 8 kHz und 16 kHz verwendet und die jeweiligen Laufzeiten mit

einem Oszilloskop ermittelt. In Abbildung 2 ist eine Messung dargestellt. Als Triggersignal (Kanal 4) für den Master-PC wird ein Rechteck mit einer Taktfrequenz von 16 KHz verwendet. Die Bearbeitung des Ether-

CAT-Frames wird durch die steigende Flanke des zweiten Signals (Kanal 1) angezeigt, mit der fallenden Flanke wird signalisiert, dass die Daten komplett an die Netzwerkkarte übergeben wurden. Der Impuls des Drit-

ten Signals (Kanal 2) zeigt an, dass die Daten im Slave-PC eingetroffen

sind. Für diese Messung wurden jeweils 24 Byte gelesen und geschrieben; für die Übertragung benötigte das System ca. 46  $\mu\text{s}$ . Um den Einfluss auf die Laufzeit zu bestimmen, wurden beim Master-PC sowohl die Netzwerkkarte als auch die CPU gegen andere Modelle ausgetauscht. Der Einsatz einer Intel®-Karte mit

„Pro100“-Chipsatz brachte bisher die besten Ergebnisse. Als ein Quantensprung lässt sich die Laufzeitverbesserung durch den Wechsel der 2-Kern-CPU gegen eine 4-Kern-CPU mit höherem Takt bezeichnen, wobei allein die höhere Taktfrequenz entscheidend war. Die Verarbeitungszeit

der EtherLab-Software im EtherCAT-Master reduzierte sich dadurch um 40 %, nämlich von 10  $\mu\text{s}$  auf 6  $\mu\text{s}$ .

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Ziel, einen echtzeitfähigen EtherCAT-Prüfstand mit „RTAI“-Linux aufzubauen, erreicht wurde. Speziell der Austausch des Prozessors im Master-PC hat gezeigt, dass es bzgl. der Verarbeitungszeiten noch Spielraum nach oben gibt. Die Adaptierung bzw. Portierung des Matlab/Simulink Codes auf die Slave-Rechner sowie deren Optimierung ist Ziel der weiteren Forschung.



Abb. 1: PCI-Slave-EtherCat-Steckkarte

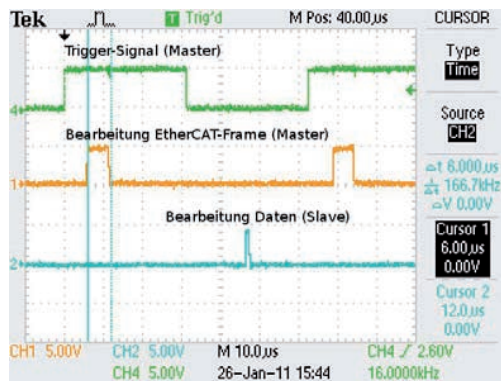


Abb. 2: Messung der Verarbeitungszeit

## Zuverlässigkeitstests für Leistungshalbleiterbauelemente

Der Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) ist mittlerweile zum wichtigsten Halbleiterbauelement der Leistungselektronik im Bereich von einigen 100 V bis zu wenigen 1000 V Sperrfähigkeit avanciert und hat den Thyristor in dieser Spannungsklasse weitestgehend abgelöst. Die Vorteile des IGBTs sind seine Stromabschaltfähigkeit und die nahezu leistungslose Ansteuerung. Heutzutage sind IGBT-Module mit einer Blockierfähigkeit von bis zu 6500 V und Stromtragfähigkeiten von bis zu 3600 A erhältlich.



**Abb. 1: Hochleistungs-IGBT-Module**

Der Vorstoß in höhere Leistungsklassen geht mit immer kompakteren Bauformen und höheren Packungsdichten einher, was hohe Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik stellt. Im Zuge dessen rückt das Thema Zuverlässigkeit immer mehr in den Fokus der Anstrengungen und erfordert beschleunigte Prüfverfahren, mit deren Hilfe man in kurzer Zeit Aussagen über die Zuverlässigkeit des Bauelements während seiner Lebensdauer gewinnt. Diesen Tests liegen Beschleunigungsmodelle zugrunde, die teilweise auf physikalischen Grundprinzipien, oft aber auch auf Erfahrungswerten früherer Tests beruhen. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass für Halbleiterbauelemente hoher Leistungen (Leistungsmodule) keine ausgewiesenen Zuverlässigkeitstestverfahren existieren. Stattdessen werden einfach Normen und Testverfahren von diskreten, kunststoffumpressten Bauelementen übernommen. Modulgehäuse sind im Gegensatz zu umpressten Bauelementen aber sehr schlecht gegen die Umgebung abgeschlossen. Insbesondere Feuchtigkeit kann eindringen und z.B. zu Korrosion führen.

Im Rahmen eines Kooperationsprojekts mit dem European Center for Power Electronics (ECPE) ist ein Langzeitteststand entstanden, in dem IGBT-Module

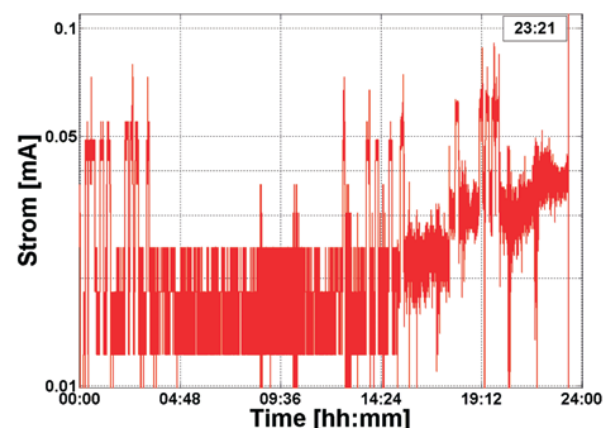


**Abb. 2: Testaufbau in der Klimakammer des Teststands**

erschweren Umweltbedingungen (85° C bei 85 % relativer Luftfeuchtigkeit) ausgesetzt werden.

Dieser „Sperrtest bei feuchter Wärme mit angelegter Sperrspannung“ ist ein wichtiger Baustein zur Beurteilung der Langzeitstabilität. Ziel ist es, die maximale Belastung der Leistungsmodule und damit eine maximale Beschleunigung des Tests zu erreichen.

Wichtigster Indikator für die Alterung des Bauelements ist der Leckstrom, der trotz gesperrtem Schalter fließt. Der in Betrieb genommene Teststand bietet 16 Kanäle zur kontinuierlichen Messung der Leckströme mittels galvanisch getrennter Fluxgate-Stromwandler. Die gewonnenen Daten geben Aufschluss über das Verhalten der Bauelemente bis zum endgültigen Ausfall und lassen so Rückschlüsse auf das spätere Verhalten im Feld zu.



**Abb. 3: Leckstromverlauf bei einem Ausfall nach gut 23 Stunden mit vorherigem Anstieg des Leckstroms**



## Positionsregelung einer magnetisch gelagerten Schleifkugel

Ziel dieses Forschungsprojekts ist es, kleine modulare Bearbeitungseinheiten für die Mikrozerspanung zu entwickeln und innerhalb des Projekts 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. Hierbei sollen ein elektromagnetisches Lagerungssystem und ein fluiddynamischer bzw. aerodynamischer 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 Projektphase steht die prototypische Umsetzung des entwickelten GrindBall-Konzeptes, das an kleinen Werkzeugmaschinen erprobt werden soll. Hierbei wird zunächst die Lagerung mit einer größeren Schleifkugel getestet, damit die Regelungsmethoden des komplexen Systems betrachtet und getestet werden können.

In vielen Anwendungsbereichen, wie der Optik, der Medizintechnik oder der Mechatronik ist die Miniaturisierung seit jeher von hoher Bedeutung, um neue Funktionalitäten zu ermöglichen und die verwendeten Prozesse wirtschaftlicher zu gestalten. Während es durch die hohe Präzision heutiger Fertigungseinrichtungen und ihrer Werkzeuge möglich ist, immer kleinere Werkstücke herzustellen, sind die zur Bearbeitung erforderlichen Werkzeugmaschinen in ihrer Größe weitestgehend kons-

stant geblieben. Das dadurch entstehende ungünstige Verhältnis von Maschinengröße zu Werkstückgröße hat einen starken Einfluss auf die technische, ökonomische und ökologische Effizienz des jeweiligen Prozesses. Um dieses Verhältnis günstiger zu gestalten, hat man bislang versucht, bestehende Maschinenkonzepte zu miniaturisieren. Da dieses Vorgehen mittlerweile an der Grenze des technisch Machbaren und Sinnvollen angelangt ist, sollen durch die Verwendung neuartiger Technologien innovative Maschinenkonzepte entwickelt werden, die die Miniaturisierung weiter vorantreiben können.

Entsprechend den 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 als bei



**Abb. 1: Magnetisches Lager mit dem Schaft**

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

Zu diesem Zweck wird die Schleifkugel durch einen Fluidstrom oder einen

Luftstrom 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. Die für den Abtrag benötigte Energie wird durch den Fluidstrom aufgebracht. Kugeldurchmesser von 8 mm (Startphase) hinunter bis auf 1 mm (Vision) sind geplant. Durch die geringe Masse der Kugel und dem daraus resultierenden geringen Trägheitsmoment sind Drehzahlen von mehreren Zehntausend Umdrehungen pro Minute und eine hohe Regeldynamik realisierbar. Für das Testlabor wird zunächst sogar eine Kugel mit einem Durchmesser von 40 mm verwendet.



## Notstromversorgung eines Offshore-Windparks bei Netzausschlag

Die Netzanbindung eines Offshore-Windparks (Abb. 1) besitzt ein gewisses Ausfallrisiko, sei es durch Wartungsarbeiten, durch Schäden an den Unterwerken oder durch eine physikalische Beschädigung des Seekabels. Bei einem solchen Netzausschlag kann keine Energie mehr ans Festland abgeführt werden, die Windenergieanlagen schalten sich gewöhnlich ab.

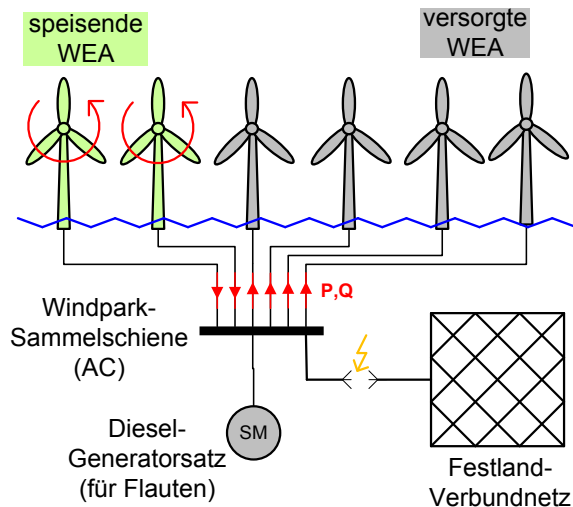


Abb. 1: Windpark-Inselnetz

Offshore-Windenergieanlagen (WEA) sind hochkomplexe mechatronische Systeme, die unter schwierigen Einsatzbedingungen auf hoher See betrieben werden. Die WEA muss jederzeit den äußeren klimatischen Verhältnissen standhalten können, wie extremen Temperaturen, starkem Wind und der salzhaltigen Meeresluft. Dies gelingt durch den Betrieb von Heizungen, Entfeuchtungen sowie von Stellantrieben, um die Anlagen aus dem Wind zu drehen. Diese Systeme müssen jederzeit, also auch im Falle eines Netzausschlages, verfügbar sein, um Schäden zu vermeiden.

Derzeit wird bei einem Netzausschlag eine Notstromver-

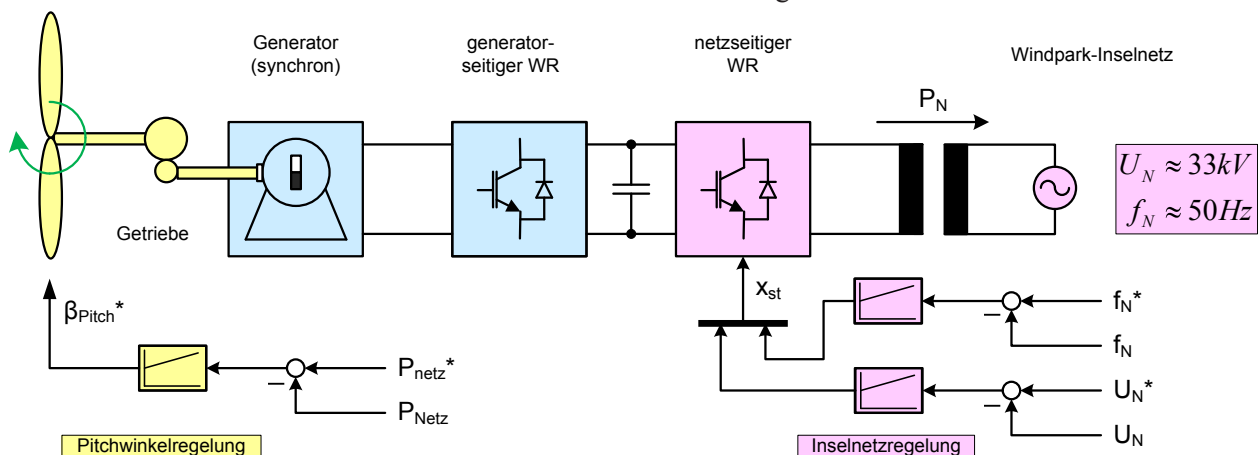


Abb. 2: Anlagen-Regelung

sorgung des Windparks durch Dieselgeneratoren vorgenommen. Diese Lösung ist nicht nur aus ökologischer Sicht bedenklich, sondern ist auch eine finanzielle Belastung für den Windparkbetreiber. Daher wird angestrebt, die (in der Regel) reichlich vorhandene Windenergie zur Deckung des Eigenbedarfs zu nutzen.



Abb. 3: Mikrocontroller-Board

Der Aufbau eines stabilen Inselnetzes mit einer einzelnen WEA ist bereits praktisch erprobt, jedoch ist ihre Abgabeleistung zur Versorgung großer Windparks nicht ausreichend. Dort sind folglich mehrere parallel speisende WEA notwendig, insbesondere bei schwachem Windangebot. Am IALB wurde eine Inselnetzregelung durch parallele unabhängige Wechselrichter entwickelt (Abb. 2), welche zur Notstromversorgung eines Offshore-Windparks angewendet werden kann. Diese Regelung versetzt parallele WEA mit Vollumrichter in die Lage, sowohl Spannung als auch Frequenz im Inselnetz stabil zu regeln. Ein Dieselgenerator muss für den Fall einer Flaute allerdings weiterhin vorgehalten werden.

Eine Demonstratorschaltung mit zwei mikrocontrollergeregelten Wechselrichtern (Abb. 3) wird derzeit aufgebaut und getestet.

## Kraftwerksnachbildung für Windenergieanlagen

Die Nutzung regenerativer Energieformen rückt immer weiter in den Mittelpunkt der Gesellschaft. Einen großen Stellenwert hierzulande hat die Nutzung der Windenergie.

Häufig produzieren Windenergieanlagen ein Maximum an Elektrizität bei entsprechendem Windangebot, was unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten angemessen erscheint. Im Zuge des weiteren Ausbaus der Windenergie wird es immer mehr notwendig werden, zukünftige Windenergieanlagen mit in die Netzregelung zu integrieren, weil sie ansonsten mit steigendem Ausbaugrad destabilisierenden Einfluss auf das Netz haben könnten.

Nach außen zum Netz sieht jede einzelne Windenergieanlage dadurch aus wie ein herkömmliches Regelkraftwerk. Eine entsprechende Regelreserve wird durch den Betrieb mit verminderter Leistung, abhängig vom Windangebot, vorgehalten.

Realisiert wird der Entwurf zu einem späteren Zeitpunkt mittels eines Frequenzumrichters mit einer permanentenregten Synchronmaschine als realem Generator. Er ist gekoppelt mit einer weiteren Maschine, die als Antrieb fungiert und das Verhalten des Windrads mit schwankendem Windangebot nachbilden soll.

Um den Einfluss der Anlage auf das Netz zu belegen

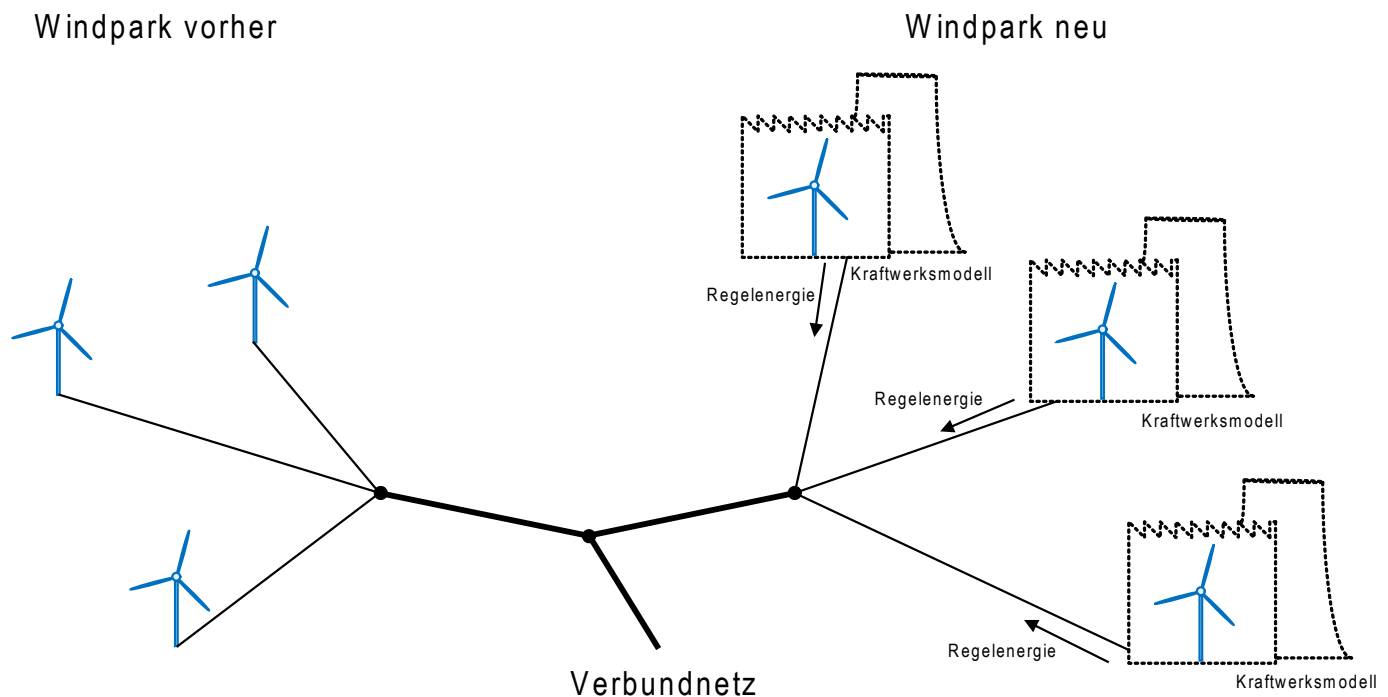


Abb. 1: Windenergieanlage als virtuelles Kraftwerk

Als Vorbild dienen große, zum Beispiel fossile Kraftwerksanlagen, die aktiv das Netz regeln und stützen. Ziel ist es, die bekannten Regelstrategien von Kraftwerken auf Windenergieanlagen zu übertragen und diese nach außen wirken zu lassen als wären sie einzelne kleine Regelkraftwerke. Als Resultat könnten sich Windenergieanlagen in Zukunft an der Netzstützung durch Bereitstellung einer Regelreserve für die Primärregelung beteiligen.

Untersucht wird dieses durch die modellhafte Nachbildung eines Kraftwerks innerhalb der Windenergieanlage. Ein fiktiver Turbinen-Generatorsatz bildet ein konventionelles Kraftwerk nach, unabhängig vom technischen Aufbau der Windenergieanlage.

und die implementierten Algorithmen überprüfen zu können, wird ein Netzemulator aufgebaut. Der Netzemulator erlaubt die Bereitstellung eines Netzes mit veränderlichen Parametern hinsichtlich Frequenz und Amplitude, um die bereitzustellende Regelreserve reproduzierbar messtechnisch erfassen zu können.

## Windenergieanlagen mit intelligenter Leistungselektronik zur Steigerung der Energieeffizienz

Mit der zunehmenden Bedeutung regenerativer Energien bei der Energieversorgung und der Errichtung von Windenergieanlagen auf hoher See steigen die Anforderungen bezüglich der Verfügbarkeit an die installierten Anlagen. Die Durchführung von Service-Einsätzen auf See kann bei ungünstigen Wetterbedingungen über längere Zeit unmöglich sein, so dass kleine Fehlerursachen zu langen Stillstandszeiten und großen Einbußen im Ertrag führen. Vor diesem Hintergrund ist es entscheidend, drohende Schäden in Komponenten so frühzeitig zu erkennen, dass ungeplante Stillstände der Windenergieanlagen vermieden werden und so eine hohe Energieeffizienz erreicht wird.

Die heutigen Windenergieanlagen verfügen über Diagnosesysteme mit einem Sensornetzwerk zur Überwachung und Betriebsführung. Mit dem steigenden Bedarf an Informationen steigt auch der Aufwand an Sensorik. Neben zusätzlichen Kosten steigt mit zunehmender Anzahl an Sensoren auch die Zahl möglicher Fehlerquellen. Unabhängig davon liegen auch Prozessdaten vor, die vielfach für die Anlagenüberwachung bzw. Betriebsführung nicht verwendet werden.

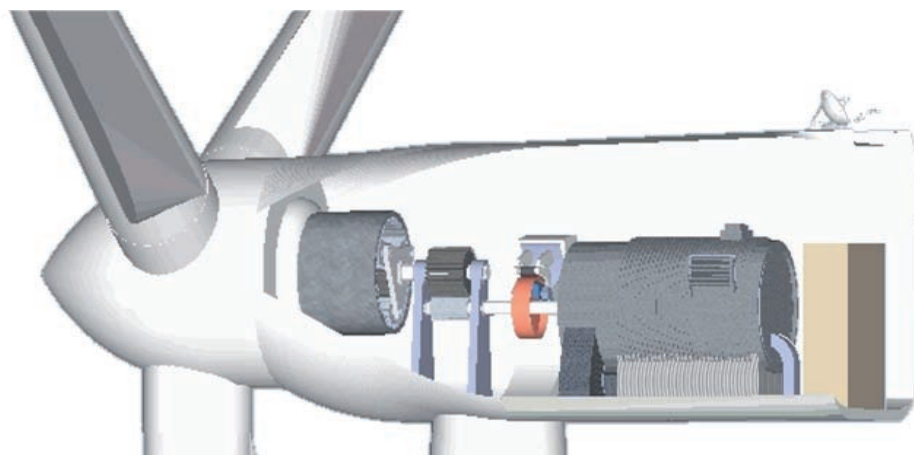
Die aktuelle Forschung am IALB hat eine deutliche Steigerung der Verfügbarkeit und einen damit verbundenen energieeffizienteren Betrieb von Windenergieanlagen zum Ziel. Hierzu sollen die während des Betriebes an kritischen Komponenten auftretenden statischen und dynamischen Belastungen durch Beobachtung oder direkte Messung laufend informationstechnisch erfasst und beurteilt werden. Der Zustand und die Verfügbarkeitsdauer der Anlagenkomponenten soll online durch entsprechende intelligente Leistungselektronik ermittelt werden. Auf dieser Basis können Wartungsempfehlungen ausgesprochen und prädiktive Wartungsintervalle so eingeplant werden, dass unerwartete Ausfälle reduziert werden.



**Abb. 2: Windenergie-Prüfstand am IALB**

Der leistungselektronische Wechselrichter, der die Netzeinspeisung übernimmt, soll an dieser Stelle so in den Energieerzeugungsprozess eingebunden werden, dass dies in Verbindung mit einer intelligenten informationstechnischen Verarbeitung der Prozessdaten zu einer Qualitäts- und Effizienzverbesserung beim Betrieb von Windenergieanlagen führt.

Mit der Erforschung und Entwicklung eines intelligenten Frequenzumrichters mit leistungsfähiger Mikroelektronik zur Ist-Datenerfassung und Online-Zustandsbewertung soll die Basis für einen belastungsoptimierten Betrieb einer Windenergieanlage gelegt werden. Durch den Einsatz eines übergeordneten Diagnoserechners werden die Ist- und Referenzdaten zusammengeführt, so dass aus aktuell gewonnenen Daten ohne den Bedarf an aufwendiger Sensorik die Erkennung möglicher Schäden von Komponenten bereits in der Entstehungsphase vorgenommen werden kann.

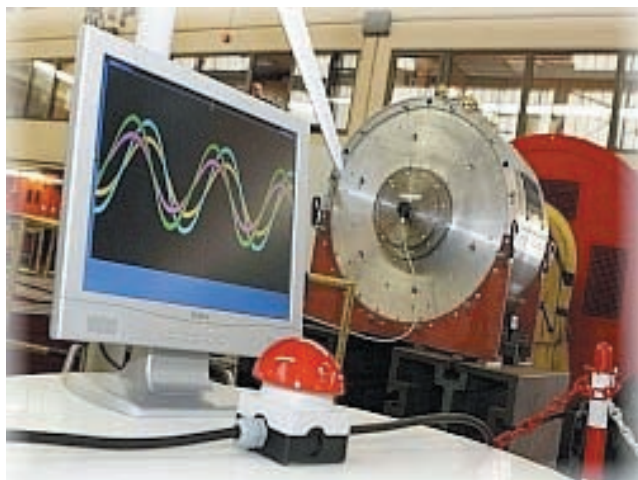


**Abb. 1: Gondel einer Windenergieanlage**



## Transversalflussgeneratoren für Windenergieanlagen

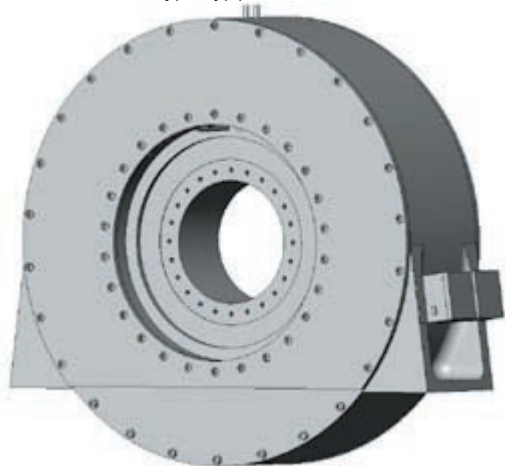
Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme eines 8,7 kNm permanentenregten Transversalflussgenerators (TFG) im Frühjahr 2010 entsteht nun durch das von der Europäischen Union geförderte Vorhaben „Wing-Pro“ ein Transversalflussgenerator für Windenergiean-



**Abb. 1:** Inbetriebnahme des 8,7 kNm TFG bei der Firma Llyod Dynamowerke GmbH & Co. KG

lagen (WEA) mit einer Nennleistung von 250 kW bei 46 U/min und 54 kNm Drehmoment. Der direktangetriebene, wassergekühlte Generator wird in eine WEA eingebaut und ersetzt das ursprünglich in der Gondel verbaute Getriebe mit Asynchrongenerator.

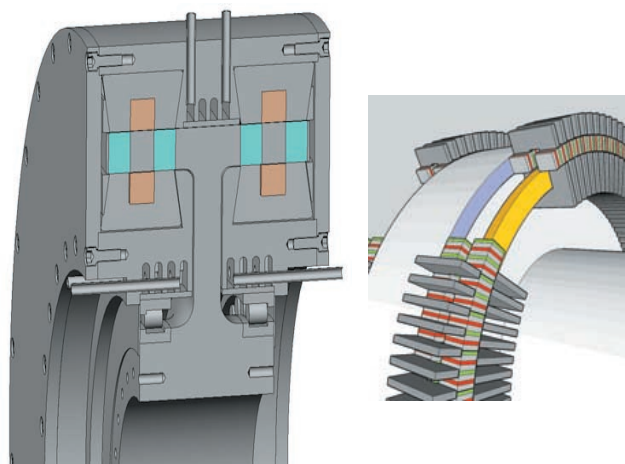
Derzeit befindet sich die Maschine in der Fertigung beim Projektpartner Lloyd Dynamowerke GmbH & Co. KG (LDW) in Bremen. Der kompakte Generator mit einem Gesamtgewicht von drei Tonnen ist mechanisch so ausgelegt, dass bis zu zwei TFG eine



**Abb. 2:** 54 kNm Wingy-Pro Transversalflussgenerator

Welle antreiben können, um die Gesamtleistungsabgabe zu verdoppeln. Beide Generatoren werden einzeln und gekoppelt im Maschinenprüffeld der LDW getestet, bevor einer der Generatoren in der Gondel installiert wird. Der TFG ist als Glockenläufer mit

einer Vier-Delta Anordnung mit 92 Polpaaren je Strang ausgelegt, wie in Abb. 3 schematisch dargestellt. Die Auslegung des Magnetkreises wird durch Finite-Elemente-Simulationen des IALB in Zusammenarbeit mit der Firma Centiv GmbH verifiziert. Eine Optimierung der Magnete und Auswahl der Magnetmaterialien wird unterstützt durch den Projektpartner Atlas Magnetics Europe (AME).



**Abb. 3:** Magnetkreisaufbau des Wingy-Pro TFG

Das speziell für den zweisträngigen Generator angepasste Umrichtersystem stammt aus dem Hause der Converteam GmbH Berlin, die ebenfalls Projektpartner ist. Die Leistungselektronik besteht aus einer Netzeinspeiseeinheit und zwei Wechselrichtern zur Regelung des TFG. Die Generatorregelung wird in enger Zusammenarbeit zwischen der Converteam GmbH und dem IALB erstellt. Geleitet wird das Wingy-Pro Vorhaben vom Bremer Centrum für Mechatronik (BCM) der Universität Bremen. Die dazugehörige Homepage [www.WingyPro.com](http://www.WingyPro.com) wird von der Firma Tritecc organisiert.

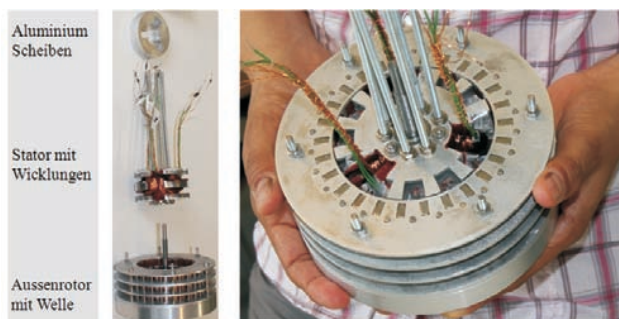


**Abb. 4:** Generatorumrichter und Netzeinspeiseeinheit



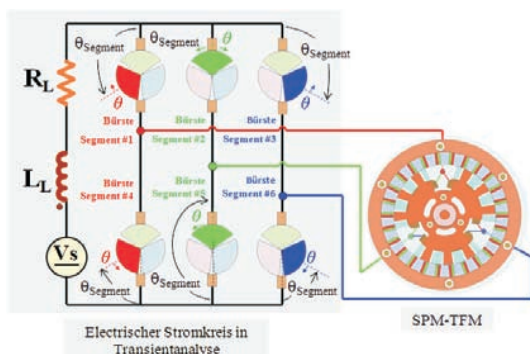
## 3D-transiente Finite-Elemente-Analyse einer segmentierten Transversalflussmaschine mit externem Ansteuerungskreis und elektrisch-mechanischer Verbindung in FLUX3D

Die Methode der Finiten Elemente (FEM) kann einfach und ökonomisch Fragen der magnetodynamischen Formulierungen lösen, unter der Bedingung, dass die Spannungsversorgung sinusförmig bleibt und die laufende Maschine im Gleichgewicht ist. Unter diesen Voraussetzungen liefert die FEM gute Ergebnisse in kurzer Rechenzeit. Allerdings versagt die FEM für magnetodynamische Formulierungen, wenn die Probleme mit den Oberwellen nicht vernachlässigt werden können, da die Rotation des Läufers beachtet werden muss.

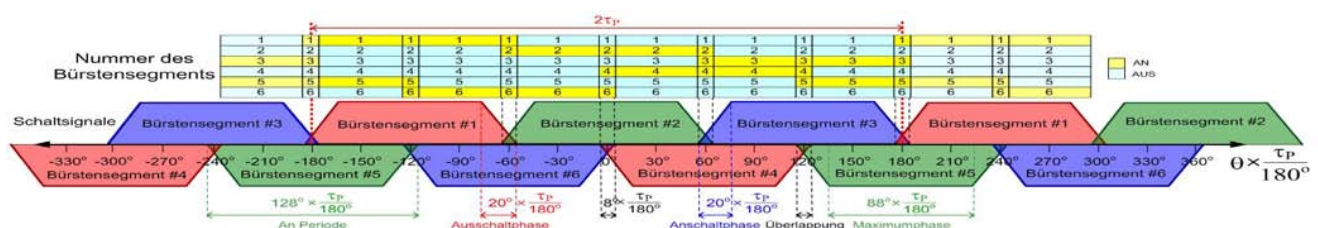


**Abb. 1: Prototyp der Transversalflussmaschine (TFM)**

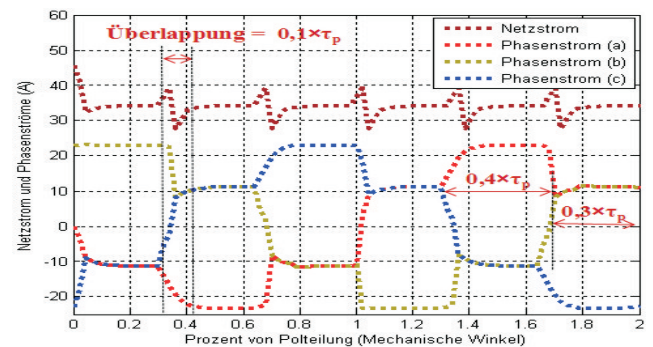
Elektromechanische kurzzeitige Übergänge kommen beim Start der Maschine zum Vorschein, oder wenn die Spannung nicht mehr sinusförmig ist. Solche Fragen erfordern eine schrittweise Rotation, um die Lösung zeitlich berechnen zu können. FEM-Matrizen und elektrischer Stromkreis sowie die elektromechanischen Gleichungen werden gleichzeitig mit jedem zeitlichen Schritt gelöst. Diese Formulierungen stehen in FLUX3D zur Verfügung und erlauben dem Nutzer die Simulation und Analyse des Übergangsverhalten der elektrischen Maschinen unter allen Bedingungen, wie z.B. Starts und Laständerungen.



**Abb. 2: Schaltillustration des Stromkreises**

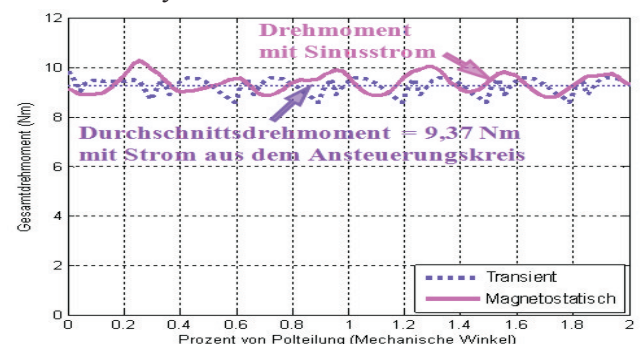


**Abb. 3: Schaltsignale des Stromkreises**



**Abb. 4: Netzstrom und Phasenströme**

Die transiente Berechnung einer Transversalflussmaschine mit am Rotor in Umfangsrichtung angeordneten Permanentmagneten in Sammleranordnung SPM-TFM mit verteilten Wicklungen durch die magnetodynamischen Formulierungen wird mit Hilfe von FLUX3D untersucht, um die Leistung der Maschine zu berechnen. Der Prototyp eines Außenläufers einer SPM-TFM wird in Abb. 1 gezeigt. Dieser Typ einer PM-Synchronmaschine besitzt ein dreidimensionales Flussbild und die Maschine muss daher räumlich simuliert werden. Zusätzlich werden die gegenseitigen Wechselwirkungen der Phasen ebenfalls mitkalkuliert, besonders weil die Struktur bezogen auf die Rotationsachse unsymmetrisch ist.



**Abb. 5: Drehmomentvergleich**

Der elektrische Stromkreis, der vollständig in der Übergangssimulation genutzt wird, ist abgebildet in Abb. 2, wobei der Betrieb des Stromkreises durch die Schaltsignale nach Abb. 3 erfolgten. In Abb. 4 ist der Stromverlauf der Phasen dargestellt. Das Drehmoment ist in Abb. 5 zu sehen und wird mit der magnetostatischen Analyse verglichen, wobei die Geschwindigkeit konstant gehalten wurde.

## Energieeffiziente Regelung von Asynchronmaschinen

In der Vergangenheit lag das Bestreben für die Regelung von elektrischen Maschinen in erster Linie auf hoher Dynamik, hoher Genauigkeit und kostenminimaler Realisierung. Unter Berücksichtigung der steigenden Energiekosten wird es aktuell für die Industrie immer lukrativer, nicht nur neuartige Spezialantriebe einzusetzen, sondern auch für die in großer Stückzahl eingesetzte Asynchronmaschine (ASM) eine energieeffizientere Regelung zu verwenden.

Für den industriellen Einsatz zählt der feldorientierte Ansatz auf den Rotorfluss zur Regelung von ASM zum Standard. Für diese Art der Regelung ist die Kenntnis der Flusswelle in der Maschine Grundvoraussetzung, die in modellbasierten Regelverfahren über sogenannte Flussmodelle erfüllt wird.

Bei der Regelung von Standard-ASM (Abb. 1) werden hauptsächlich Flussmodelle ohne Berücksichtigung des Sättigungsgrades der Maschine eingesetzt, wodurch die Momentenausnutzung sinkt und die Verluste steigen. Selbst mit einer Sättigungsberücksichtigung sind diese Modelle bezüglich der Energieausnutzung nicht optimal, da die Sättigung in Abhängigkeit von der am Rotor anliegenden magnetischen Flusswelle berücksichtigt wird.

In der Realität ist jedoch eine stärkere Affinität zum Hauptfeld beobachtbar, was sich mit bisherigen Sättigungsmodellen darin bemerkbar macht, dass die Effizienz zwar steigt, aber eine Abhängigkeit von der mecha-

nischen Last bestehen bleibt.

Am IALB werden effizienzoptimale, feldorientierte Flussmodelle zur Regelung von ASM entwickelt. Dabei wird sowohl eine mit dem Hauptfeld synchrone Berücksichtigung von Sättigungseinflüssen geschaffen, als auch deren Verbindung mit einer klassischen rotorfeldorientierten Regelung realisiert. In

Abb. 2 werden die Messergebnisse einer schnellen Reversion der ASM mit unterschiedlichen Flussmodellen dargestellt. Die blaue Kurve zeigt das Verhalten der Maschine mit Berücksichtigung der Sättigung in Abhängigkeit vom Rotorfluss, die grüne Kurve das Verhalten unter Berücksichtigung der Sättigung in Abhängigkeit vom Hauptfluss. Hierbei ist in Abb. 2 oben die

Drehzahl und unten das aufgebrachte Antriebsmoment dargestellt. Der zusätzliche Momentengewinn durch die Berücksichtigung der Sättigung in Abhängigkeit vom Hauptfluss bei gleicher Stromamplitude (Abb. 3) ist deutlich zu erkennen, womit der Antrieb bei gleichem Energieeinsatz leistungsfähiger ist.

In den meisten Anwendungsfällen kann auf bestehende Hardware zurückgegriffen werden, sodass mit der Implementierung der effizienteren Flussmodelle keine weiteren Investitionskosten entstehen.

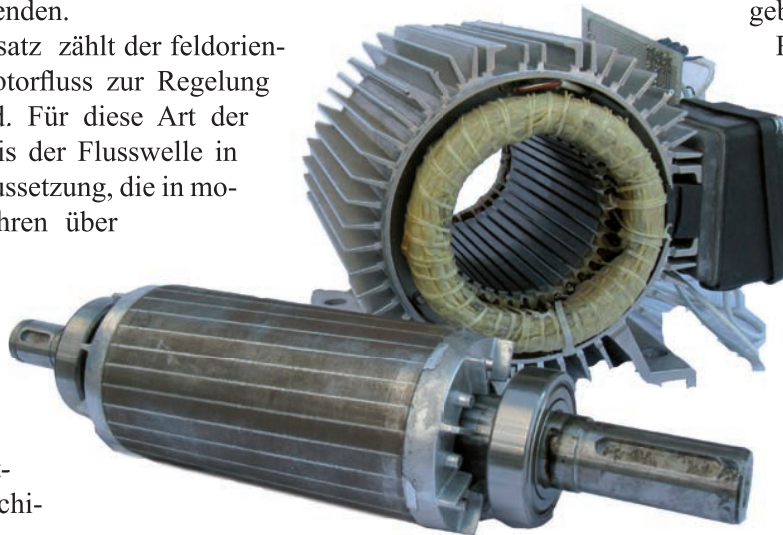


Abb. 1: Käfigläufer u. Ständer einer Standard-Asynchronmaschine

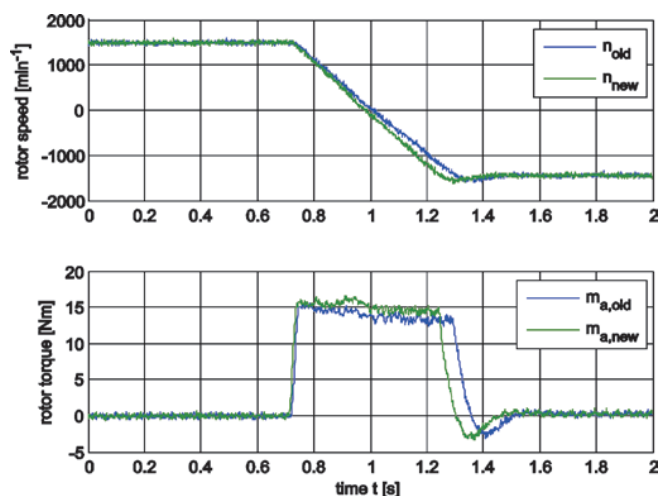


Abb. 2: Vergleich unterschiedlicher Flussmodelle durch eine schnelle Reversion im Leerlauf

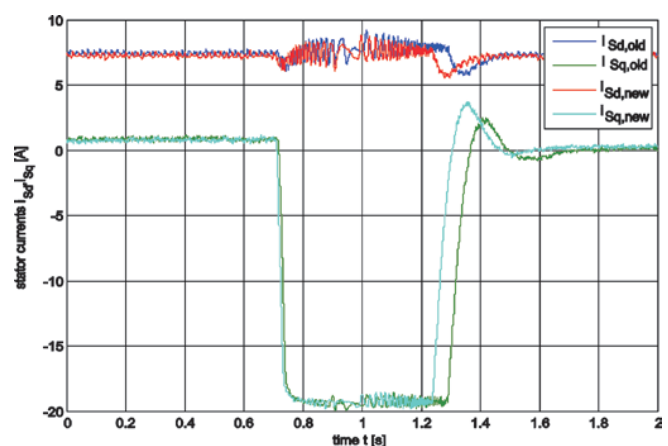
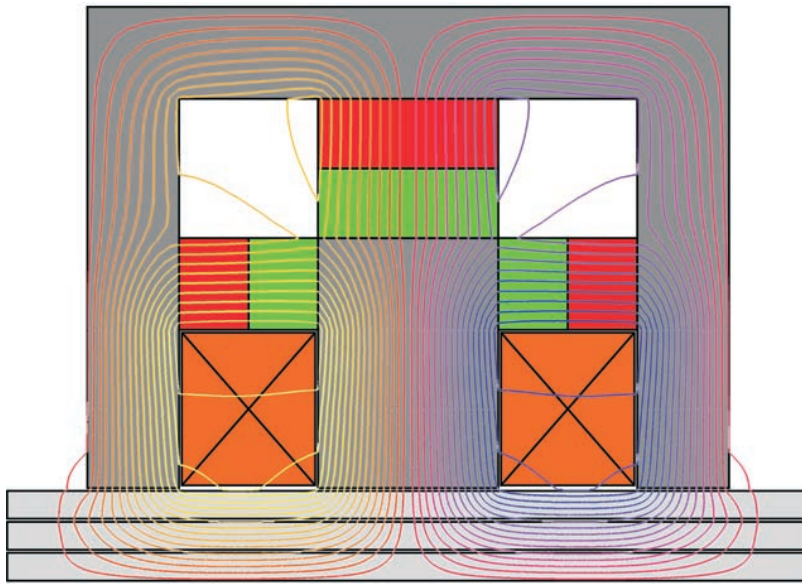


Abb. 3: Vergleich des Ständerstromvektors in feld- (oben) und momentbildende (unten) Komponenten aufgeteilt



## Aufbau eines Kranmodells zur Demonstration eines neuartigen Magnetgreifsystems



**Abb. 1: Skizze des Magnetsystems mit Spulen (kupferfarben), Permanentmagneten (rot/grün) und Eisenkern (grau) und dem Feldlinienverlauf**

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.

Im Rahmen des Projekts ist ein Kranmodell mit einer Demonstrator-Traverse entstanden, die ein funktionsfähiges Magnetsystem auf Basis der im Projekt entwickelten Technologie beinhaltet. Die Bediener können an dem Modell interaktiv Modellbleche mittels der neuartigen magnetbasierten Handhabungstechnologie in eine Schiffs Luke laden. Hierbei werden die innovative Nutzung eines Verdrängungsmagnetsystems und dessen Potenziale erfahrbar gemacht.

Die Steuerung des Kranmodells wird von einem Mikrocontroller übernommen, der alle Messgrößen einliest, verarbeitet und die Aktoren ansteuert. Dazu gehören sowohl die Erfassung der einzelnen Bedienelemente und Endschalter, als auch die Motoren für die horizontale und vertikale Bewegung der Laufkatze. Bedient wird das Magnetsystem, dass an der Laufkatze eingehängt ist, über ein berührungsempfindliches Touch-Display, was die aktuelle Anzahl an angehobenen Blechen darstellt und gleichzeitig dessen Veränderung zulässt. Der Vorteil in der Kombination beider Magnetsysteme liegt im Sicherheitsaspekt, so können auch am Kranmodell bei einem simulierten Stromausfall keine Bleche herunterfallen, weil sie von den Permanentmagneten weiter angezogen werden.



**Abb. 2: Foto des Kranmodells - mit Hilfe des Joysticks können Bleche mit Hilfe des Magnethebesystems in den Schiffsrumpf geladen werden.**

## Influence of Parasitic Circuit Elements on the Switching Behaviour of IGBTs

Together with Infineon Technologies AG in Neubiberg and E.G.O. Elektro-Gerätebau GmbH in Oberderdingen, a BMBF project has been started to improve the power efficiency of induction cookers.

In induction cookers fast switching IGBTs trigger a resonant circuit. The resulting high-frequency current is fed into an induction coil and finally generates the heat in the cooking vessels. Unfortunately, the fast switching increases the interaction of the IGBTs with parasitic circuit elements like stray or mutual inductances, capacitances, and, due to the skin effect, even resistances. The understanding of this interaction is an important prerequisite to optimise the induction cooker systems.

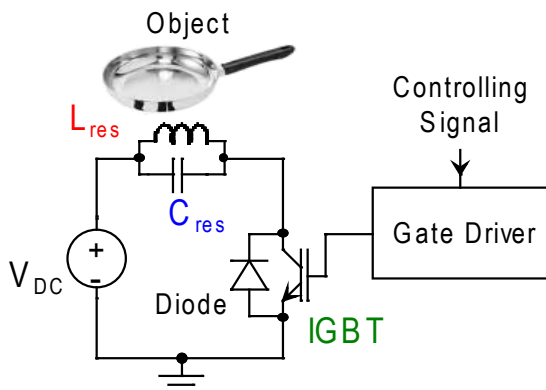


Fig. 1: Circuit topology of an induction cooker.

Fig. 1 shows a simplified circuit topology of an induction cooker. To investigate this circuit, an exact simulation model for the IGBT was required. Based on technological data like diffusion profiles, a 2D-finite-element model was designed in MDRAW, a CAD-tool from Synopsys Inc. Then DESSIS also from Synopsys Inc. was used to solve the basic semiconductor equations within the finite-element-structure. Finally, the IGBT's semiconductor model was simulated together with the other circuit elements modelled as lumped elements. This method is called mixed-mode and reveals all terminal currents and voltages as transient curves, i.e. time-dependent waveforms. Fig. 2 shows the simulation results of one resonant cycle – without considering the parasitic elements.

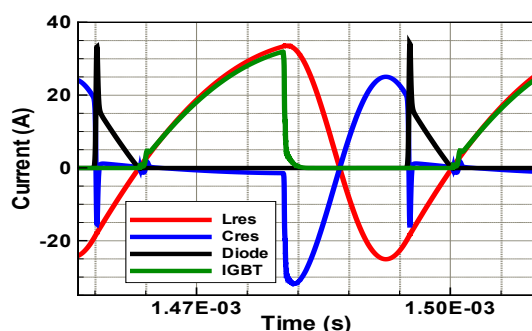


Fig. 2: Simulation of one resonant cycle without parasitic elements.

In the next step, the parasitic elements of the PCB were extracted from its layout using the ANSYS-Q3D tool from Ansoft Corp. It turned out that already the power part of the PCB layout has more than 40 relevant parasitic elements. On top, the IGBT-package, a standard TO247, introduces additional parasitic elements, which were extracted by Q3D from geometrical information (Fig. 3). Furthermore, parasitic elements of some passive components like  $C_{res}$  had to be considered and even a shunt-resistor contributed not just resistance but also significant inductance.

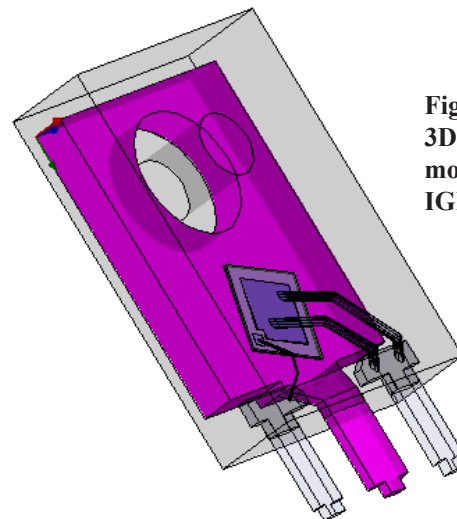


Fig. 3:  
3D geometrical  
model of the  
IGBT package.

Fig. 4 shows the simulation results of a particular critical switching event, the turn-on of the anti-parallel diode. Without the parasitic elements there is a current peak and a smooth decay. However, in reality there is a strong oscillation triggered by this event. Introducing the parasitic elements into the simulation indeed yields the observed oscillations at a frequency of 1.11 MHz. This is a good match to the measured frequency of 1.18 MHz and indicates, which (parasitic) elements have to be optimised in order to improve the overall performance of the induction cooker.

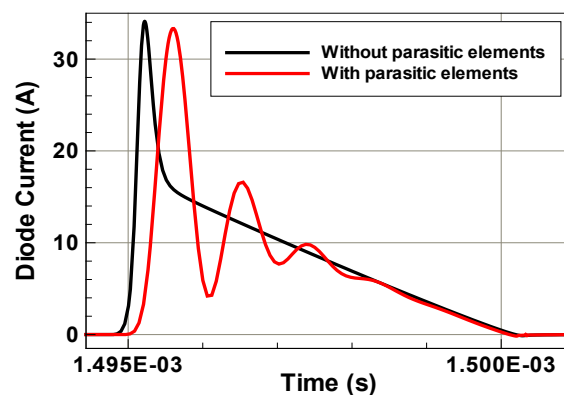


Fig. 4: Simulated currents of the anti-parallel diode.



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



### Lehrveranstaltungen des Instituts

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 Stromrichtertechnik 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 Grundsaltungen die netzgeführten Stromrichter eingeführt. An der dreipulsigen Mittelpunktschaltung werden die Kommutierung und der Lückbetrieb erläutert. Abschließend werden die Ergebnisse auf die sechspulsige Brückenschaltung übertragen.

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

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

## 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 01.08.06 im Ruhestand, wird aber seine Funktionen bis auf weiteres wahrnehmen.

## **Werkstoffe, Bauelemente, Schaltungen I**

Dieser Vorlesungsteil enthält vier Teilabschnitte.

### **1. Grundlagen zum Aufbau der Materie**

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der chemischen Bindung und der Kristallstrukturen behandelt, soweit sie für das Verständnis der elektrotechnischen Werkstoffe von Bedeutung sind. Zusätzlich gibt es eine einfache Einführung in die wichtigsten Phasen-Diagramme binärer Systeme. Die Grundlagen der Elastizitätstheorie werden im Zusammenhang mit Teil 2 (Piezomaterialien) dargestellt.

### **2. Dielektrische Werkstoffe**

Hier werden die Grundlagen der dielektrischen Polarisierung (Polarisationsmechanismen) und die wichtigsten Kondensator-Dielektrika behandelt. Außerdem enthält dieser Teil eine Einführung in piezoelektrische Werkstoffe (Ferroelektrika und Schwingquarz) sowie eine elementare Darstellung der Lichtwellenleiter.

### **3. Werkstoffe mit magnetischen Ordnungszuständen**

Der Abschnitt enthält die wichtigsten Grundlagen der ferro- und ferrimagnetischen Ordnungszustände sowie der Verluste in Werkstoffen für Transformatoren und Induktivitäten.

### **4. Einführung in die mikroskopische Theorie der elektrischen Leitfähigkeit sowie der Energie-Bandstruktur von Metallen und Halbleitern.**

In der Näherung des klassischen Elektronengases werden die Bedingungen für Ohm'sches Verhalten abgeleitet, außerdem werden die Diffusionsströme eingeführt. Die wichtigsten Begriffe im Zusammenhang mit der Bandstruktur von Halbleitern und der Ausbildung von Halbleiterübergängen werden in elementarer Näherung behandelt. Den Abschluss bilden die Herleitung und Veranschaulichung der Fermi-Verteilung.

## **Werkstoffe, Bauelemente, Schaltungen II**

Dieser Vorlesungsteil enthält zwei Hauptabschnitte.

### **1. Einführung in die Grundlagen und die wichtigsten Grundkonzepte von Halbleiterbauelementen:**

- Dioden, Bipolartransistoren und deren wichtigste Kennlinien und Ersatzschaltbilder
- Sperrschicht-Feldeffekttransistoren und MOSFETs
- Sende- und Empfängerbauelemente der Optoelektronik

In diesem Kurs war eine Darstellung von Heterostrukturbauelementen aus Zeitgründen bisher leider nicht möglich. In zukünftigen Kursen wird durch eine Verlegung der Schwerpunkte dieses Thema aufgenommen werden.

### **2. Grundsaltungen der Transistoren und einfache Grundsaltungen der analogen Schaltungstechnik:**

- Transistorgrundsaltungen
- Einfache Verstärkerschaltungen
- Kombinationsschaltungen aus mehreren Bauelementen (Darlington, Kaskode, Stromspiegel, Differenzverstärker, komplementäre Emitterfolger).

## 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 pin-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 z.B. anhand von Würfelexperimenten behandelt.



## Konstruktion elektrischer Maschinen



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

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.

## Berechnung elektrischer Maschinen



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

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.

## Mechatronische Antriebslösungen für Produktions- und Logistikaufgaben



**Dr.-Ing. Edwin Kiel**  
Lenze SE, Aerzen

Elektronisch geregelte Antriebe verrichten umfangreiche Aufgaben in allen Produktions- und Logistiksystemen. Sie verbinden die softwaregesteuerte Informationsverarbeitung der Automatisierungstechnik mit den physikalischen Prozessen und sind dadurch mechatronische Systeme. In dieser Vorlesung werden diese mechatronischen Antriebslösungen umfassend analysiert und vorgestellt:

- ihr Einsatzumfeld in der Produktion und Logistik: Fertigungsstrukturen und Abläufe, der Aufbau der Automatisierung
- die Komponenten und deren grundlegende Funktionsprinzipien, aus denen eine mechatronische Antriebslösung aufgebaut ist: Motoren, Umrichter, Getriebe einschließlich Aspekte zur Auslegung, Gesamtoptimierung und Zuverlässigkeit
- die Gesamtheit der Anwendungsfälle, eingeteilt in zwölf Klassen von Antriebslösungen. Für jede dieser Klassen wird der physikalische Prozess, der mechanische Aufbau sowie die Zusammenstellung der Antriebslösung aus den Komponenten mit den jeweils spezifischen Softwarefunktionen erarbeitet
- der Engineeringprozess, mit dem diese Lösungen an konkrete Anwendungsfälle angepasst werden
- die Energieeffizienz mechatronischer Antriebslösungen

Durch diese Vorlesung wird für das Anwendungsgebiet der Produktionstechnik und Logistik der Zusammenhang vom Gesamtsystem bis zum Aufbau der einzelnen Antriebe hergestellt, die dieses System maßgeblich gestalten. Damit ist diese Vorlesung auch eine gute Gelegenheit, Gesamtzusammenhänge eines Systems und ihre Wechselwirkung an konkreten Beispielen nachzuvollziehen und damit das Denken in solchen Systemzusammenhängen zu schulen.

## 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.





