



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

Jahrbuch 2007

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlik
Univ.-Prof. Dr. phil. nat. Dieter Silber**

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



Universität Bremen

Themenübersicht

Vorwort	2
Mitarbeiter des IALB im Jahr 2007	3
Forschungsberichte	4
Dreiphasiger Frequenzumrichter mit PFC für moderne Bordnetze in Flugzeugen	5
Hochdynamische Multi-Level Frequenzumrichter	6
Waveletbasierte Online-Überwachung von Prozess- und Maschinen-Zustandsänderungen	7
Fehlertolerante Umrichter-Generatorsysteme für Windenergieanlagen	8
Belastungsminimale Regelung von Windenergieanlagen	9
Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) für Offshore Windparks	10
Berechnung und Konstruktion eines 50 kW Transversalflussgenerator-Systems	11
Parameteridentifikation und schwingungsarme Regelung von Transversalflussantrieben	12
Sensorlose Drehzahlregelung von Asynchronmaschinen	13
High-Speed DSP Rechnerkarte mit TI TMS320-F2812 und PCI-Schnittstelle	14
Embedded System Development Using FPGA	15
Moderne Optimierungsverfahren für H_{∞} -optimale PI-Kaskadenregelung	16
Lehrveranstaltungen des Instituts	17
Grundlagen der Elektrotechnik III	17
Power Converter Technology	18
Antriebsregelung und Mechatronik I	18
Antriebsregelung und Mechatronik II	19
Grundlagenlaboratorium Regelungstechnik Teil 1	19
Praktikum Antriebs- und Stromrichtertechnik	19
Werkstoffe, Bauelemente, Schaltungen I	20
Werkstoffe, Bauelemente, Schaltungen II	20
Leistungselektronik und Stromrichtertechnik I	21
Halbleiterbauelemente	21
Semiconductor Devices	21
Einführung in die Festkörperphysik	21
Modellbildung und Messverfahren für Halbleiterbauelemente und Solarzellen	21
Konstruktion elektrischer Maschinen I	22
Konstruktion elektrischer Maschinen II	23



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



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

Vorwort

Wir freuen uns, dass wir auch für das Jahr 2007 wieder einen Jahresbericht auflegen konnten, mit dem wir die Freunde und Kooperationspartner des Instituts über unsere Aktivitäten in Forschung und Lehre im vergangenen Jahr informieren.

Die im Abschnitt „Forschung“ zusammengestellten Projektberichte zeigen die große Breite der Forschungsaktivitäten des Instituts. Erfreulich ist, dass das Drittmittelvolumen auf dem hohen Niveau der Vorjahre gehalten werden konnte. Die Einbettung des Instituts in das Bremer Centrum für Mechatronik (BCM) hat sich dabei als eine wichtige Größe erwiesen.

Die Forschungsarbeiten beschränken sich nicht nur auf die Entwicklung von elektrischen Maschinen, leistungselektronischen Bauelementen und Schaltungen, sondern erstrecken sich zunehmend auch auf die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den Komponenten. Eine Schlüsselkompetenz des Instituts liegt in der Entwicklung von Schaltungen der Mikroelektronik, die speziell für die digitale Echtzeit-Signalverarbeitung in hochdynamischen, elektromechanischen Systemen ausgelegt sind. Durch die Einrichtung eines Mikroprozessor-Labors, das für die hohen Anforderungen der elektrischen Antriebstechnik besonders ausgestattet ist, kann diese Schlüsselkompetenz direkt in die aktuellen Forschungsprojekte einfließen.

Im Jahr 2007 gab es im Institut einige personelle Veränderungen. Unsere Oberingenieurin Dr. Nejila Parspour hat eine Professur für „Elektrische Energiewandlung“ an der Universität Stuttgart angetreten. Außerdem hat Herr Dipl.-Ing. Uwe Werner, ebenfalls Oberingenieur am Institut, eine Stelle in der Wirtschaft angetreten. Für seine Nachfolge konnten wir Herrn Dipl.-Ing. Timo Christ gewinnen. Wir möchten an dieser Stelle Frau Professorin Parspour und Herrn Werner

für ihre im Institut geleistete Arbeit noch einmal danken und wünschen ihnen in ihren neuen Aufgabenbereichen viel Glück und Erfolg.

Die Wiederbesetzung des Lehrstuhls Leistungselektronik (Nachfolge Prof. Silber) konnte bedauerlicherweise im Jahr 2007 noch nicht realisiert werden. Der berufene Nachfolger, Herr Dr.-Ing. Nando Kaminski, wird die Stelle am 1. September 2008 antreten. Bis dahin nimmt Prof. Silber die Aufgaben in der Lehre in vollem Umfang wahr. Die hohe Qualität in Forschung und Lehre konnte trotz der knappen Grundausrüstungsmittel durch die Universität auch im Jahr 2007 aufrecht erhalten werden.

Das Lehrangebot konnte ebenfalls wieder im Umfang des Vorjahres angeboten werden. Für die Vorlesung „Konstruktion elektrischer Maschinen II“, die bisher von Frau Dr. Parspour gelesen wurde, konnten wir Herrn Dipl.-Ing. Thorsten Völker als Lehrbeauftragten gewinnen. Die Vorlesung wird in Zukunft unter dem Titel „Berechnung elektrischer Maschinen“ angeboten werden.

Insgesamt war 2007 ein sehr erfolgreiches Jahr. Dieses war nur möglich 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 hohem persönlichen 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 April 2008



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



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

Mitarbeiter des IALB im Jahr 2007



Institutsleitung

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

Oberingenieure: Dipl.-Ing. Thorsten Völker, Dipl.-Ing. Timo Christ

Forschungsgruppen

Sekretariat	Antriebe	Regenerative Energien	Mechatronik	Leistungsbauelemente	Technische Mitarbeiter
E. Krüger H. Janssen	T. Christ H. Groke M. Joost A. Norbach	Th. Völker Chr. Renz Chr. Mehler H. Langmack	S. Bassurah M. Siatkowski J. Schüttler G. Tisborn	S. Milady U. Vermulapati	G. Matthies B. Vahlenkamp G. Schwerdtfeger

Forschungsberichte

Dreiphasiger Frequenzumrichter mit PFC für moderne Bordnetze in Flugzeugen

Die Entwicklung der Bordnetze moderner Flugzeuge stellt neue Herausforderungen an die Leistungselektronik. In älteren Bordnetzen wird zwischen die Turbine und den Generator ein hydromechanischer Wandler geschaltet. Der Generator wird dadurch mit einer konstanten Drehzahl betrieben, wodurch das Bordnetz mit einer festen Frequenz von 400 Hz und einer effektiven Phasenspannung von 115 V_{AC} gespeist wird. Um das hohe Gewicht des hydromechanischen Wandlers einzusparen, werden in modernen Bordnetzen die Generatoren direkt mit den

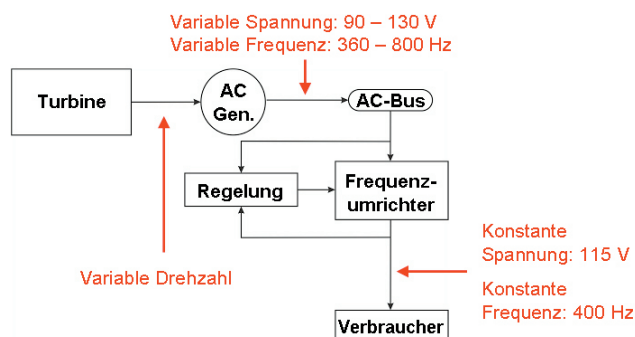


Abb. 1: Modernes Bordnetz

Turbinen gekoppelt. In Abhängigkeit der Drehzahl der Turbine ändert sich die Ausgangs- Frequenz und Amplitude des Generators und damit auch die Momentanfrequenz- und Amplitude des dreiphasigen Bordnetzes. Abb. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines modernen, in Netz- Frequenz und Amplitude variablen Bordnetzes. Da die bisher am Bordnetz betriebenen Geräte nicht ohne Änderungen angeschlossen werden können, ist das in Abb. 2 dargestellte Frequenzumrichter-Konzept in Kooperation zwischen der Firma AES Aircraft Elektro/Elektronik System GmbH und dem Bremer Centrum für Mechatronik entwickelt worden. Folgende Vorgaben waren bei der Umsetzung zu beachten:

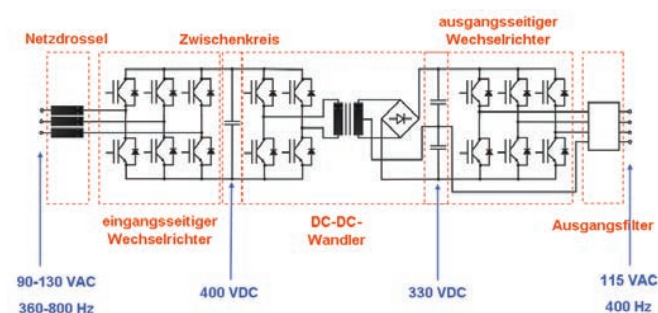


Abb. 2: Frequenzumrichterkonzept für Bordnetze in modernen Flugzeugen

- Variabler Eingangsspannungsbereich von: 360 – 800 Hz bei 90 – 130 V_{AC}
- Konstante Ausgangsspannung von: 400 Hz bei 115 V_{AC}
- Galvanische Trennung der Ausgangsseite / Eingangsseite
- Geringes Volumen und geringes Gewicht
- 3-phasige Power Factor Correction (PFC)
- Wirkungsgrad: min. 78% bei 2 kVA Ausgangsleistung
- Survival Temperature: -55° C - +85° C
- Schutzabschaltungen im Fehlerfall

Der eingangsseitige Wechselrichter ist als dreiphasiger Hochsetzsteller programmiert und liefert am Ausgang eine konstante Spannung von 400 V_{DC}. Der nachgeschaltete DC/DC-Wandler sorgt für die galvanische Trennung zwischen Bord- und Ausgangsnetz. Der ausgangsseitige Wechselrichter stellt ein dreiphasiges Konstant-Spannungssystem von 115 V_{AC} bei einer Frequenz von 400 Hz zur Verfügung. An ihn können nun auch die am ursprünglichen Bordnetz betriebenen Geräte ohne Änderung angeschlossen werden. Ein 3D-Modell der entwickelten Hardware ist in Abb. 3 dargestellt. Der aufgebaute Prototyp ist in Abb. 5 dargestellt.

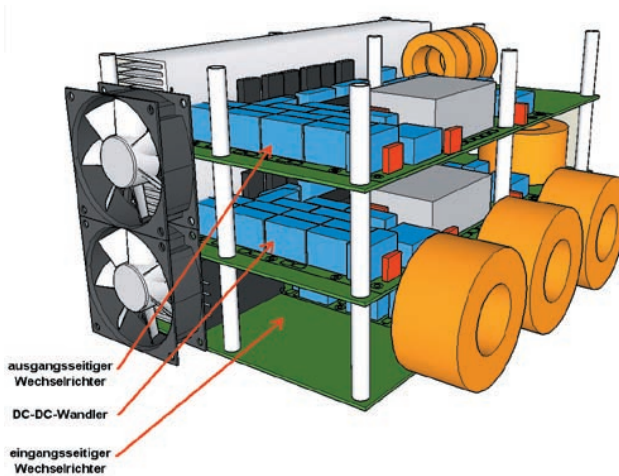


Abb. 3: 3D-Modell des Hardwarekonzeptes

Abb. 4 zeigt einen Vergleich von gemessener und mit Matlab-Simulink berechneter Zwischenkreisspannung bei einem Lastsprung von Null auf 1 kVA bei ohmscher Last. Die Last wird zum Zeitpunkt T=0,04 auf- und bei T=0,07 wieder abgeschaltet.

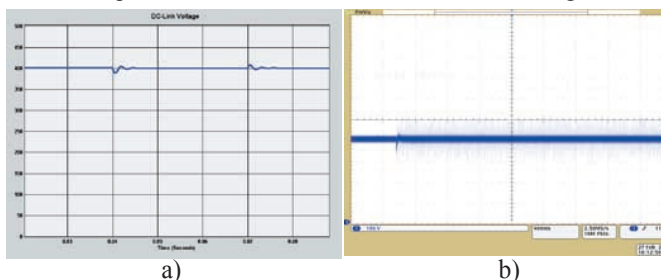


Abb. 4: a) Mit Matlab-Simulink berechnete Zwischenkreisspannung, b) Gemessene Zwischenkreisspannung bei Lastaufschaltung und Lastabwurf



Abb. 5: Wechselrichter-Prototypenaufbau mit DC/DC-Wandler

Hochdynamische Multi-Level Frequenzumrichter

Asymmetrische Multi-Level Frequenzumrichter, oft auch als Zellenumrichter bezeichnet, sind, wie in Abb. 1 dargestellt, aus kaskadierten H-Brücken aufgebaut. Symmetrische Zel-

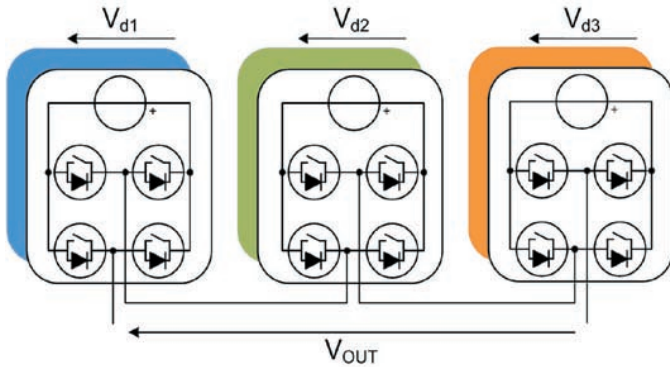


Abb. 1: Dreistufiger Zellenumrichter

lenumrichter erlangen derzeit im Mittelspannungsbereich stetig höhere Bedeutung, da sie im Vergleich zu Zwei- und Dreipunkt-Mittelspannungsumrichtern eine hohe Dynamik und eine niedrige Belastung der angeschlossenen Maschine erreichen, was die Nachrüstung erleichtert. Abb. 2 zeigt die Ausgangsspannung eines dreistufigen, asymmetrischen Umrichters in grün und die als Ziel vorgegebene Sinusspannung mit einer Amplitude von 750V in blau. Die Anzahl der möglichen Spannungs-kombinationen l einer solchen Anordnung kann mit der Anzahl der kaskadierten Zellen n durch den einfachen Ausdruck $l=3n$ berechnet werden, da jede Zelle drei Ausgangszustände einnehmen kann. Vereinfacht kann jeder

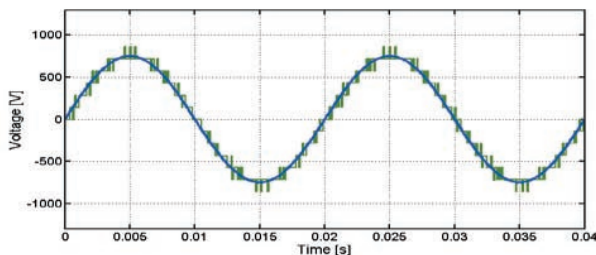


Abb. 2: Ausgangsspannung

Ausgangszustand als „Level“ bezeichnet werden, jedoch treten häufig redundante Level auf, deren Ausgangsspannungen sich nicht unterscheiden. Mit der dargestellten Anordnung sind also maximal 27 Ausgangsspannungen („Level“) möglich. Die niedrige Belastung der Last mit Spannungssprüngen (du/dt) und die geringe Verzerrung der Spannung sind offensichtlich. Dabei ist die Schaltfrequenz der einzelnen H-Brücken sehr niedrig. Abgesehen von redundanten und quasi-redundanten Leveln, bei denen die Ausgangsspannungen im wesentlichen identisch sind, weist diese Umrichtertopologie subtraktive Level auf. Als subtraktive Level werden alle Ausgangszustände bezeichnet, bei denen sich die Ausgangsspannung nicht nur aus Teilspannungen gleicher Polarität zu-

sammensetzt. Dabei kommt es zu Energieeinsparungen in einzelne Zellen, was die Regelung des Umrichters erschwert und Wirkungsgradeinbußen zur Folge haben kann. Abbildung 3 illustriert den Anteil der subtraktiven Level an der Gesamtanzahl für Konfigurationen mit einer Anzahl kaskadierter Zellen von 2 bis 5. Die Forschung in diesem Bereich wird unter dem Titel „Hochdynamische Modulationsverfahren für asymmetrische Multi-Level Frequenzumrichter“ von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt. Das Ziel ist, mit dem neuen Ansatz des „programmgesteuerten Modulators“ ein Modulationsverfahren für kaskadierte Multi-Level

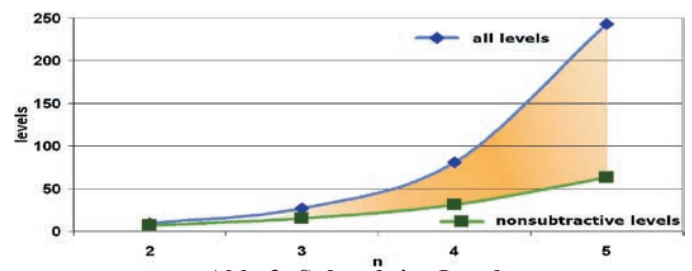


Abb. 3: Subtraktive Level

Frequenzumrichter zu finden und diese Schaltungstopologie für den Einsatz in hochdynamischen Anwendungen nutzbar zu machen. Die Simulationsergebnisse des entwickelten Modulators sind sehr vielversprechend. Ein Blockdiagramm des Modulationsalgorithmus ist in Abb. 4 dargestellt. Das Verfahren wurde vom IALB zum Patent angemeldet.

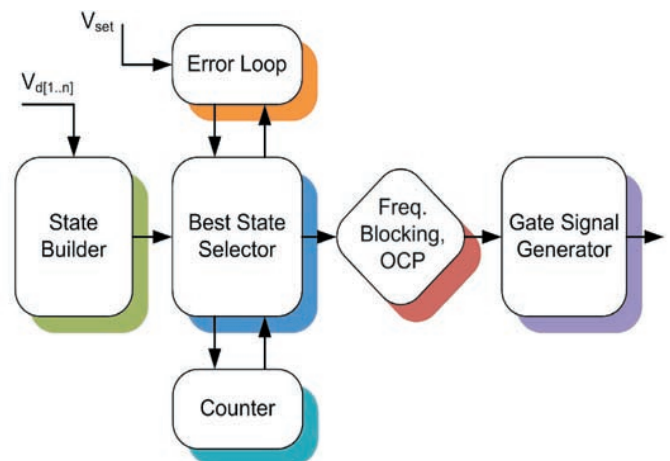
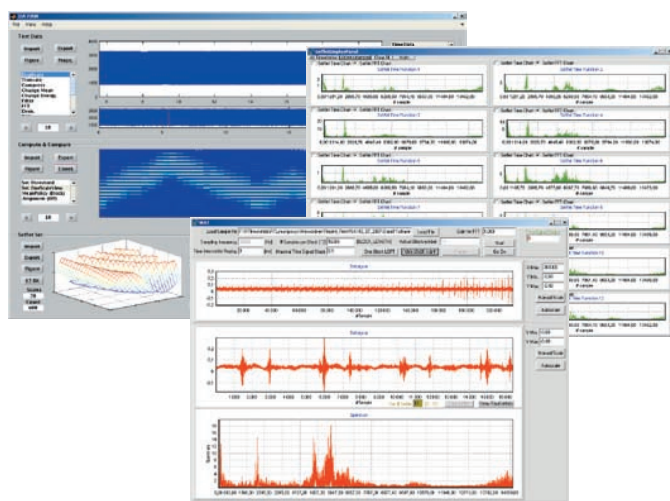


Abb. 4: Blockdiagramm

Waveletbasierte Online-Überwachung von Prozess- und Maschinen-Zustandsänderungen

Datenerfassung und Auswertung

Die von Sensoren erfassten prozessrelevanten Größen werden von einer Signalprozessorkarte mit einem TMS320-F2812 abgetastet und mit Hilfe einer Datenloggersoftware über den PCI-Bus mittels DMA-Transfer zum IPC übertragen und dort oder auf einem Netzlaufwerk gespeichert. Die so generierten Messdaten können zur Erstellung einer digitalen "Offline" Signalverarbeitung z.B. mit Matlab-Simulink oder LabView verwendet werden. Die Überwachungsstrategie ist individuell an die Anwendung bzw. den Prozess, den es zu überwachen gilt, anzupassen. Die Software soll dem Entwickler einen "Baukasten" zur Signal- Aufzeichnung- Analyse- und Verarbeitung bereitstellen.



Prozessangepasste Wavelets

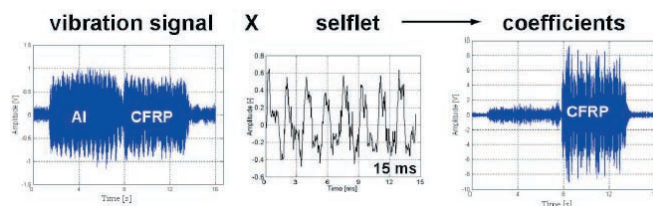
Ein neuer Ansatz bei der Wavelettransformation besteht darin, das einzusetzende Basis-Wavelet direkt aus einer für die jeweilige Überwachungsaufgabe relevanten Signaleinprägung zu generieren. Mit diesen sog. prozessangepassten Wavelets (Selflets) soll die Fähigkeit der Kreuzkorrelation zur Aufdeckung von Signalverwandtschaften verbunden werden mit einer Frequenzauflösung nach dem Vorbild der Wavelettransformation. Je stärker die zu erkennenden Signalformen von den Verläufen der konventionellen Zeit-Frequenztransformationen (STFT, CWT, DWT) abweichen, desto höher ist das Verbesserungspotential durch den Einsatz der Selflets:

- Zeit-Frequenzanalyse transienter, instationärer oder breitbandiger Signalvorgänge
- Konzentration der Signalmerkmale auf wenige Koeffizienten
- Nutzpegelerhöhung

Beispiel Online Prozessüberwachung

Bei der Bohrbearbeitung von Schichtverbundwerkstoffen führen die sehr unterschiedlichen Zerspanbedürfnisse der Einzelwerkstoffe zu einer verminderten Fertigungsqualität. Auf Grund der variierenden Schichtdicken erfolgt die Bear-

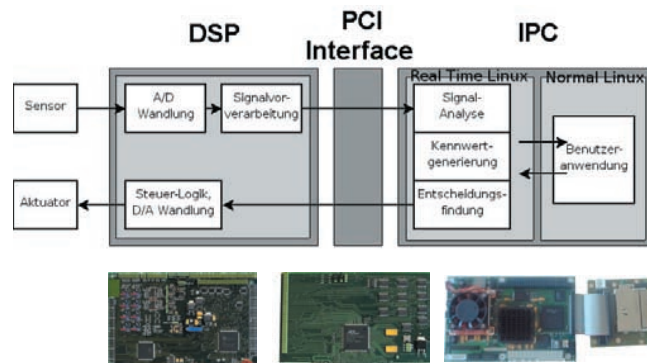
beitung derzeit mittels eines Parameter-Kompromisses. Mit der "Online" Schichterkennung wird angestrebt, die Schnittparameter während der Bearbeitung anzupassen, um so eine signifikante Verbesserung des Arbeitsergebnisses zu erzielen.



Im angeführten Beispiel wird durch den Einsatz der Selflets die Erkennungsgüte der CFK-Schicht ermöglicht. Die werkstoffspezifischen Unterschiede im Zahneingriffsspektrum werden gezielt hervorgehoben.

Digitale Echtzeit-Signalverarbeitung

Mit der am IALB entwickelten Signalprozessorkarte lassen sich hoch dynamische Antriebe wie auch Wechselrichtersysteme regeln und steuern. Die digitale Echtzeit-Regelung eines Antriebes wird von einem Signalprozessorboard übernommen, während ein Industrie-PC (IPC) die Aufgaben einer überlagerten Prozessüberwachung übernimmt. Der kompakte PC104plus IPC mit dem Echtzeitbetriebssystem RT-Linux 2.6.09 und einer TMS320-F2812 DSP-Rechnerkarte bewältigt komplexe "Online" Überwachungsaufgaben. Die Signalprozessorkarte mit Dual-Port-RAM zur Anbindung an den IPC über den PCI-Bus erlaubt den Einsatz kontinuierlicher Wavelettransformationen zur echtzeitfähigen Zustandsüberwachung mit zeitnaher Rückführung in die Prozessregelung



Fehlertolerante Umrichter-Generatorsysteme für Windenergieanlagen

Der Anteil der Energieerzeugung aus Windenergie an der gesamten Energieversorgung hat in den vergangenen Jahren mit jährlichen Wachstumsraten von bis zu 35 % kontinuierlich zugenommen.

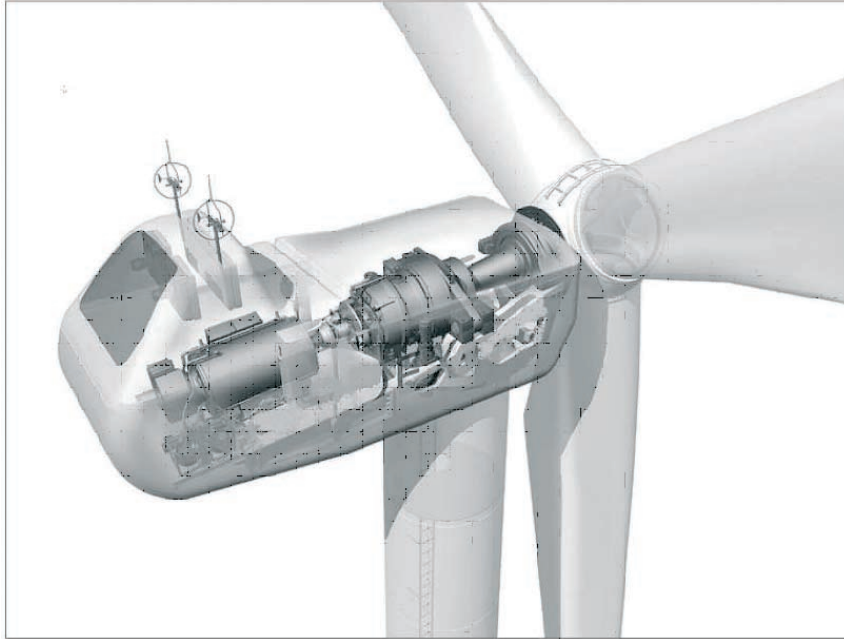


Abb. 1: Gondel einer Windenergieanlage

Hauptgründe hierfür sind die Umweltfreundlichkeit und eine ständige Weiterentwicklung der eingesetzten Technik und damit einhergehend der stetige Anstieg der Leistung der einzelnen Anlage. Lag die Leistung pro Anlage vor 10 Jahren noch unterhalb 500 kW, so verfügen die aktuellen „Standard“-Anlagen über 1 bis 2,5 MW Leistung. Einige Hersteller haben bereits Pilotanlagen der Größe 4,5 bis 6 MW Anlagen in Betrieb genommen und einzelne Hersteller konzipieren mittlerweile Anlagen bis zu 10 MW Leistung, die aufgrund ihrer Größe ausschließlich für den „Offshore“-Einsatz geplant werden.

Umfangreiche Analysen von Schadensfällen in den vergangenen Jahren zeigen, dass mit zunehmender Anlagengröße immer häufiger das Versagen von mechanischen und elektrischen Komponenten des Triebstranges (Lager, Wellen,

Anzahl der durch Schäden ausgefallenen Betriebsstunden an WEA in Deutschland

Gesamt	[h]	178,202	196,438	239,953	248,956
Getriebe	[%]	22,6 %	23,6 %	35,2 %	42,8 %
Rotorbremse	[%]	0,2 %	3,8 %	6,0 %	9,8 %
Generator	[%]	9,9 %	11,7 %	12,2 %	14,4 %

Getriebe, Kupplungen, Generator, Umrichter, Trafo) zu Ausfällen und längeren Stillstandzeiten führen.

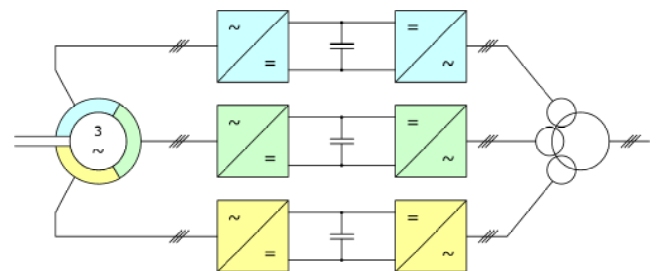
Zu beachten ist dabei, dass sich diese Daten ausschließlich auf „Onshore“-Anlagen beziehen, bei denen die Stillstandszeiten durch einen hochmobilen „Rund um die Uhr Service“

klein gehalten werden. Auf diese Weise wird noch eine akzeptable Rentabilität erzielt. Es ist jedoch sofort offensichtlich, dass diese Möglichkeit bei „Offshore“-Anlagen nicht mehr realistisch ist. Bei ungünstigen Wetterbedingungen ist ein Service-Einsatz dort nicht möglich und Ausfälle von Triebstrangkomponenten können zu großen Einbußen bei der Stromproduktion führen.

Der wirtschaftliche Betrieb von Offshore-Windenergieanlagen wird sich nur erreichen lassen, wenn die Windenergieanlagen während ihrer gesamten Laufzeit von 20 bis 30 Jahren möglichst ohne größere Stillstände arbeiten. Für das Umrichter-Generatorsystem bedeutet das, fehlertolerante Strukturen zu schaffen, die auch im Fehlerfall noch den Betrieb mit reduzierter Leistung ermöglichen und dadurch einen Anlagenstillstand mit völligem Ertragsausfall vermeiden können.

In dem Forschungsvorhaben sollen deshalb Konzepte für neuartige, fehlertolerante Umrichter-Generatorsysteme für Windenergieanlagen entwickelt und experimentell erprobt werden.

Eine der möglichen Ideen ist es, den Generator an das gesamte Umrichter-Generator-System anzupassen, so dass folgendes Schaltbild entsteht:



Der Vorteil eines solchen Systems liegt darin, dass im Falle eines ausgefallenen Umrichters trotzdem noch eine Leistung an den Verbraucher (Netz) geliefert werden kann.

So beschäftigt sich IALB in diesem Forschungsprojekt mit dem grundsätzlichen Aufbau des speziellen Generators sowie der Regelung sowohl im fehlerfreien Zustand als auch im fehlerbehafteten Zustand des gesamten Systems.

Die Unsymmetrien, welche im Generator im Falle eines Fehlers entstehen, dürfen nicht das gesamte System nachhaltig beschädigen, bis der Fehler behoben ist. Der Aufbau kann ebenfalls für ein Umrichter-Antriebssystem größerer Leistungen verwendet werden.

Mit Hilfe von FEM und feldtheoretischen Methoden wird gegenwärtig eine Analyse des möglichen Aufbaukonzepts und magnetischen Kreises bzgl. Drehmomentwelligkeit durchgeführt. Danach ist eine Analyse des dynamischen Verhaltens des Gesamtsystems möglich.

Belastungsminimale Regelung von Windenergieanlagen

In den vergangenen Jahren hat der Anteil der Windenergie an der gesamten Energieversorgung mit jährlichen Wachstumsraten von bis zu 35 % kontinuierlich zugenommen. Die mittlere Leistung pro Anlage betrug vor 10 Jahren noch weniger als 500 kW, aktuelle „Standard“-Anlagen verfügen über mehr als 2 MW Leistung. Für den „Offshore“-Einsatz haben einige Hersteller bereits erste 5 MW-Anlagen in Betrieb genommen.

Antriebsstranges entwickelt werden. In Verbindung mit einer laufenden Überwachung der Belastungen in kritischen Komponenten des Antriebsstrangs werden Regelungskonzepte erarbeitet, die zum Betrieb großer Windenergieanlagen mit minimaler mechanischer Belastung führen sollen.

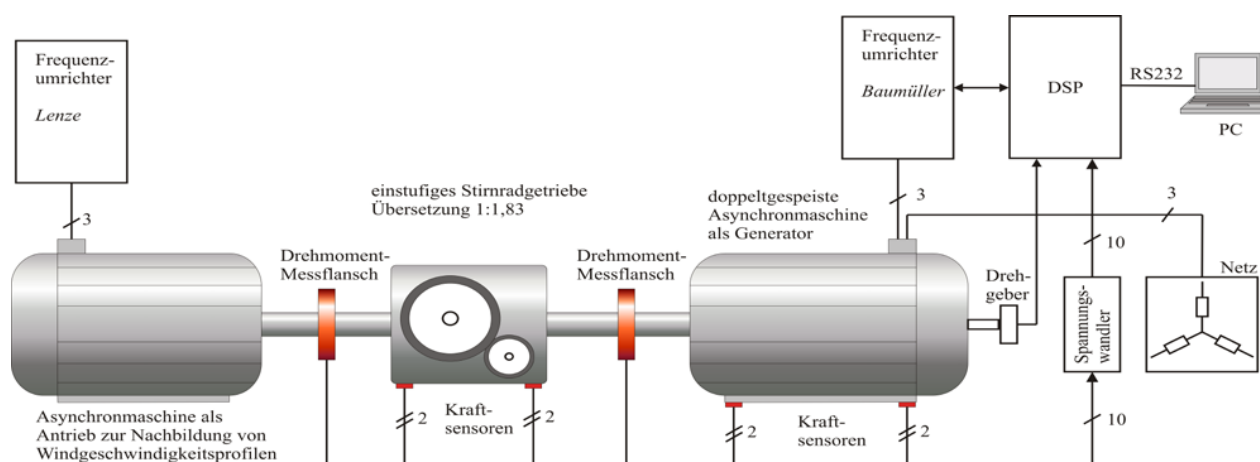


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Prüfstandes zur Untersuchung der dynamischen Belastungen in Antriebssträngen

Die auf Anlagenkomponenten wirkenden mechanischen Belastungen steigen mit der immensen Leistungssteigerung der Anlagen. Diese kommen dadurch mittlerweile in Auslegungsbereichen, in denen die Belastungen mit konventionellen stationären Industrieanlagen nicht mehr vergleichbar sind. Besondere hohe Spitzendrehmomente und dynamische Lastwechseleinflüsse übertragen sich auf den gesamten Antriebsstrang. Dieser unterliegt in jedem Fall hohen dynamischen Belastungen, da er die direkte Verbindung zwischen dem Rotor (Umwandlung der Windenergie in rotatorische Energie) und dem Generator mit Frequenzumrichter (Umwandlung der rotatorischen Energie in elektrische Energie) darstellt. Daher muß der Antriebsstrang sowohl die Dynamik der Windlasten über den Rotor als auch die Dynamik des elektrischen Netzes über den Generator aufnehmen.

Hinzu kommen elastische Verformungen aus der Turm- und Gondelkonstruktion, die sich ebenfalls auf den Antriebsstrang auswirken.

Im Rahmen der aktuellen Forschung am IALB, die unter anderem in Kooperation mit der Technischen Universität Dresden durchgeführt wird, sollen leistungsfähige Werkzeuge zur belastungsgerechten Auslegung des gesamten

Interessant sind diese Arbeiten insbesondere für die kleinen und mittelständischen Unternehmen der Windenergietechnik, die damit die Möglichkeit für die Dimensionierung dynamisch optimal abgestimmter Antriebsstränge erhalten, um durch eine mechanisch schonende Betriebsweise eine Vergrößerung der Anlagenlaufzeit zu erreichen.

Die Arbeit umfasst folgende Schwerpunkte:

- Erstellung einer Mehrkörpersimulation des Antriebsstranges (MKS)
- Entwicklung eines Online-Beobachtungssystems
- Entwicklung einer belastungsminimalen Regelung

Zur direkten experimentellen Untersuchung wird am IALB in einem Versuchs- und Demonstrationsprüfstand der Antriebsstrang einer Windenergieanlage nachgebildet. Dieser soll die Verifizierung der aus Simulationen gewonnen Erkenntnisse ermöglichen und die Basis zur Realisierung eines Online-Beobachtungssystems darstellen.

Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) für Offshore Windparks

Der Anteil der Windenergie an der Stromerzeugung ist in den letzten Jahren stark gestiegen. Bis heute findet die Energieerzeugung aus Wind fast ausschließlich an Land statt. Doch für die Zukunft sind bereits mehrere Offshore-Projekte auf See geplant und zum Teil auch genehmigt. Diese Offshore-Windparks haben eine Entfernung von bis zu 200 km vom Festland und dabei installierte Leistungen, die denen eines Großkraftwerks im Bereich 1 GW entsprechen.

Das IALB befasst sich in diesem Zusammenhang mit der Thematik der Energieübertragung von Offshore-Windparks zum Festland.

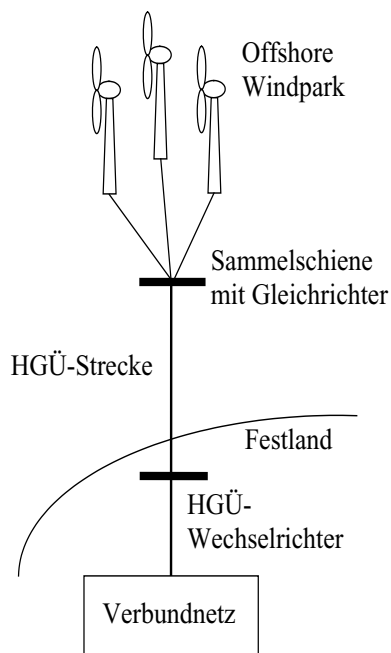


Abb. 1: Energieübertragung von Offshore-Windparks

Eine viel versprechende Möglichkeit, um die große Leistung der Windparks von der See zum Festland zu transportieren, ist die Hochspannungsgleichstrom-Übertragung (HGÜ), wie sie in Bild 1 skizziert ist. Im Vergleich zur Drehstromübertragung, wie sie auf dem Festland eingesetzt wird, gibt es hier zum einen keine Probleme mit Blindleistung und zum anderen müssen weniger Kabel im Meer verlegt werden.

Es gibt prinzipiell zwei unterschiedliche Techniken zur Realisierung einer HGÜ-Strecke.

Die klassische HGÜ ist mit Thyristoren als Halbleiterschalter aufgebaut. Diese Technik ist für sehr große Leistungen verfügbar, hat aber einen Blindleistungsbedarf und erzeugt Oberwellen im Netz.

Eine neuere Form von Hochspannungsgleichstromübertragung ist mit dem Einsatz von IGBT als Halbleiterschalter aufgebaut. Diese HGÜ hat Vorteile in der Qualität der eingespeisten Leistung und bietet außerdem die Möglichkeit des bidirektionalen Energieflusses zur Versorgung des Windparks mit Energie im Falle einer Störung oder in Zeiten von Windstille.

Um die Vorteile der beiden HGÜ-Konzepte zu vereinen, arbeitet das IALB an einem Parallelbetrieb von IGBT- und Thyristor-basierter HGÜ (Abb. 2).

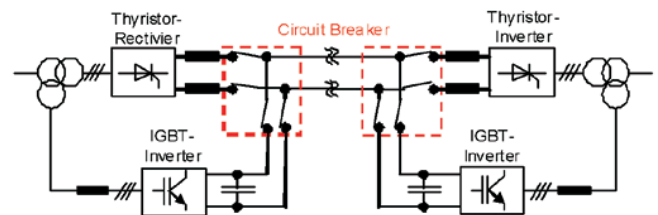


Abb. 2: Parallelbetrieb IGBT- und Thyristor-HGÜ

Die Energieübertragung läuft bei diesem Konzept über das gleiche Hochspannungskabel, so dass keine zusätzliche Leitung im Meer verlegt werden muss. Zur Versorgung des Windparks erfolgt die Energieübertragung mit Hilfe der IGBT-HGÜ (Abb. 3).



Abb. 3: Windparkversorgung über IGBT-HGÜ

Bei einer Leistungsübertragung vom Windpark zum Festland (Abb. 4) erfolgt die Energieübertragung über die Thyristor-HGÜ und die IGBT-Einheiten können dazu genutzt werden, um die Blindleistung zu kompensieren und die Oberwellen im Netz zu reduzieren.

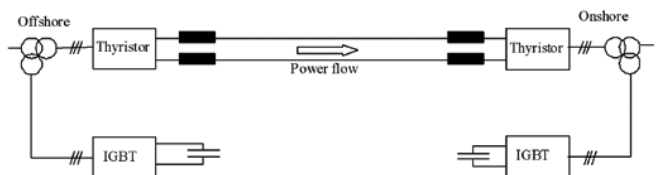


Abb. 4: Energieübertragung zum Festland

Berechnung und Konstruktion eines 50 kW Transversalflussgenerator-Systems

Der Anteil der Energieerzeugung aus Windenergie an der gesamten Energieversorgung hat in den vergangenen Jahren kontinuierlich zugenommen. Anfang 2008 sind 18685 Windenergieanlagen in Deutschland aufgestellt worden, die insgesamt eine Gesamtleistung von etwa 22.000 MW erbringen können. Hauptgründe für den positiven Trend sind die Umweltfreundlichkeit und eine ständige Weiterentwicklung der eingesetzten Technik und damit einhergehend der stetige Anstieg der Leistung der einzelnen Anlage. Einige Hersteller haben bereits 4,5 bis 6 MW Pilotanlagen in Betrieb genommen und einzelne Hersteller konzipieren mittlerweile Anlagen bis zu 10 MW Leistung, die aufgrund ihrer Größe ausschließlich für den „Offshore“-Einsatz geplant sind.

Mit steigender Leistung der Windkraftanlagen spielen Volumen und Gewicht des Generatorsystems in der Gondel eine immer größere Rolle; gleichzeitig wird es immer schwieriger, zuverlässige und langlebige Getriebe zu konstruieren, die das langsam laufende Windrad mit dem schnell laufenden Generator verbinden und den dynamischen Belastungen dauerhaft standhalten. Möglichst hohe Kraftdichten und Drehmomente, optimale Wirkungsgrade und eine regulierte Netzeinspeisung sind weitere erstrebenswerte Leistungsmerkmale moderner Windenergieanlagen. Die Transversalfloss-technologie bietet dazu einen viel versprechenden Lösungsansatz. Mit dem Maschinenkonzept der hochpoligen, permanentmagnet-erregten Transversalflossmaschine können sehr große Leistungen bei kleinem Bauvolumen erzielt werden. Bei gleichzeitig langsamlaufender Welle kann sie sogar getriebelos als Direktlösung eingesetzt werden. Allerdings müssen vor dem Einsatz in der Windenergieerzeugung die Nachteile dieses Konzeptes, wie Drehmomentwelligkeiten und Normalkraftschwankungen, die zu Geräuschen und Vibrationen führen, minimiert werden. Diese Probleme wurden am IALB erfolgreich gelöst. Mittels einer intelligenten Regelung der Strangströme lassen sich diese Schwankungen nahezu vollständig vermeiden. Schnellschaltende Leistungshalbleiter verformen dabei derart die Ströme, dass sie die Drehmomentschwankungen verhindern. In vorangegangenen Forschungsvorhaben konnte das Konzept der intelligenten Regelungen in praktischen Versuchen vom IALB nachgewiesen werden.

Das Vorhaben ‚TransKon‘ wurde von LDW in Kooperation mit dem IALB durchgeführt. Es handelt sich dabei um ein im Programm zur Förderung anwendungsnaher Umweltschutztechniken (PFAU) von der Bremer Investitionsgesellschaft gefördertes Vorhaben. Zum Projektabschluss wurde der 50 kW-Prototyp des Transversalflossgenerators im Prüffeld der

LDW praktisch erfolgreich getestet. Erste konkrete Nachfragen lassen bereits jetzt den Einsatz in einer Windenergieanlage zur Energieeinspeisung in das Verbundnetz absehen. Die industrielle Pilotumsetzung der erzielten Projektergebnisse wie auch die Entwicklung eines ersten 500 kW-Prototypen sind geplant.

Für die Zukunft wird die Konstruktion eines 5 MW-Generators angestrebt. Das Gewicht eines direkt angetriebenen Synchrongenerators in konventioneller Bauweise beträgt etwa 300 Tonnen. Die große Kraftdichte der TFM von 23 kN je Tonne Maschinengewicht, ermöglicht eine Gewichtsreduzierung auf 70 Tonnen bei ansonsten gleichen Bedingungen. Direktbetriebene Transversalflossgeneratoren, speziell im Offshore-Bereich, stellen damit eine interessante Alternative zu den konventionellen Generatortypen dar.

Die technischen Daten des im TransKon-Projekt konstruierten Transversalflossgenerators sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Nennleistung	50	kW
Nennzahl	55	U/min
Nennmoment	8681	Nm
Außendurchmesser	925	mm
Länge (ohne Welle)	518	mm
Gewicht	1200	kg
Kühlungsart	Wasserkühlung	

Die Abbildung zeigt den Prüfstand des 50kW-TFM-Generators. Im Hintergrund befindet sich die große Antriebsmaschine, die an den kleinen silberfarbigen TFM-Generator gekuppelt ist. Die Größenverhältnisse vermitteln einen Eindruck der extrem hohen Drehmomentdichte des Generators. Die auf engem Raum gebündelte Leistung erfordert ein effektives Kühlkonzept, man sieht die an den Generator angeschlossenen Wasserschläuche.



Parameteridentifikation und schwingungsarme Regelung von Transversalflussantrieben

Heutzutage werden Servoantriebe immer häufiger in Direktantriebsanwendungen in industriellen Produktionsanlagen eingesetzt. Dabei werden meistens spezielle Antriebe basierend auf konventionellen Konzepten, als High-Torque-Lösungen oder umfangreiche Getriebe-lösungen mit Normmotoren verwendet.

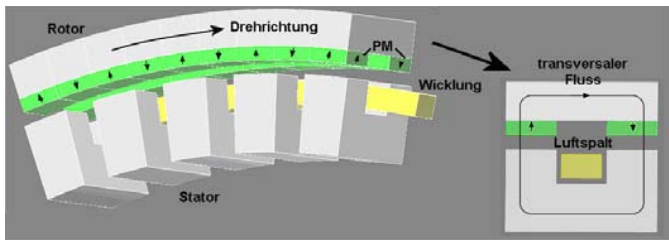


Abb. 1: Schema einer Transversalflussmaschine

Eine Alternative hierzu ist die Transversalflussmaschine, die gegenüber den herkömmlichen Drehfeld- und Gleichstromantrieben eine grundsätzlich andere Topologie aufweisen. Dieses Maschinenkonzept stellt prinzipbedingt hohe Drehmomente bei niedrigen Drehzahlen und kleiner Bauform mit entsprechend niedrigem Gewicht bereit. Die Hauptnachteile, die bislang einem Einsatz entgegenstehen, sind die hohe Drehmomentwelligkeit und die Normalkraftschwankungen, die zu Geräuschen und Vibrationen führen. Für den Einsatz als Direktantrieb ist aber ein schwankungsarmes Drehmoment an der Welle Voraussetzung und für Servomotoren kommt die Anforderung guter Positionierbarkeit hinzu.

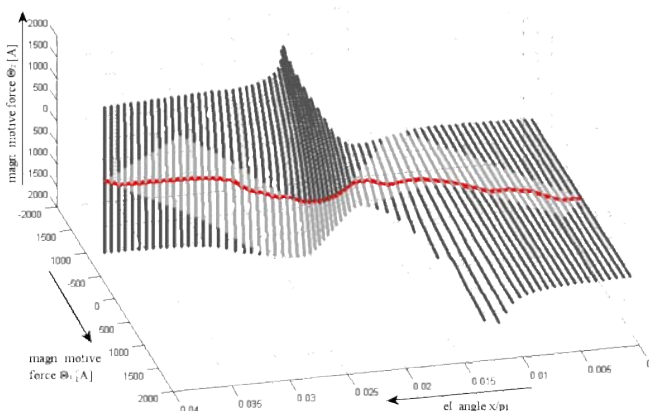


Abb. 2: Findung einer optimalen Momentsteuerung aus Simulationsdaten

Deshalb ist eine besondere Regelung der Transversalflussmaschine, mit der Momentschwankungen und Normalkraftschwankungen minimiert werden, eine notwendige Weiterentwicklung zur Anwendbarkeit dieses Maschinentyps.

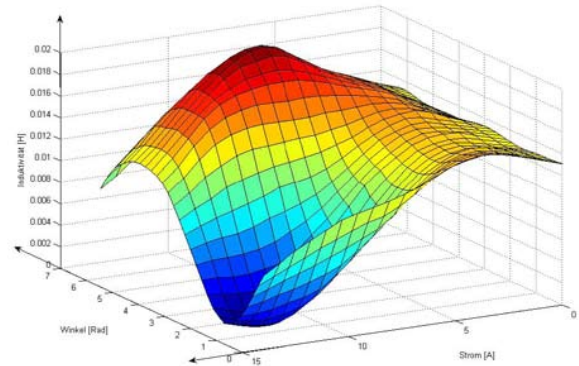


Abb. 3: Identifizierte Induktivität

Dieses Regelungskonzept soll basierend auf einer Identifikation der Maschinenparameter auch unbekannte Transversalflussmaschinen betreiben können. Dazu ist ein übergreifendes analytisches Modell der verschiedenen Bauformen entworfen und mit einem FE-Simulationstool verifiziert worden. Die Regelung selbst basiert auf einer Vorsteuerung mit optimierten Stromformen.

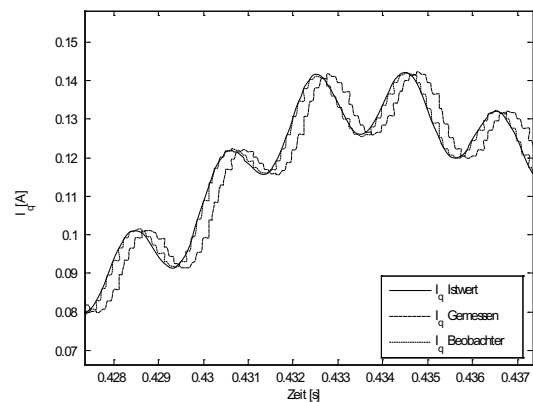


Abb. 4: Prädizierte Stromwerte

Für die praktische Verifikation existiert ein Prüfstand, dessen für eine genaue Stromformung ungünstiges Übertragungsverhalten durch einen als Prädiktor verwendeten Beobachter ausgeblendet werden konnte.

Sensorlose Drehzahlregelung von Asynchronmaschinen

Durch den Einsatz moderner Mikrorechner ist es möglich, eine Asynchronmaschine (ASM) unter vertretbarem Aufwand drehgeberlos zu regeln. Neben der Kostenreduzierung für Material, Wartung und Inbetriebnahme erhöht sich durch die Einsparung eines Drehgebers die Flexibilität der Einsatzmöglichkeiten für diesen robusten und einfachen Maschinentyp.

Für eine hochdynamische Regelung einer ASM ist die Kenntnis der Feld-Drehwelle in der Maschine eine Grundvoraussetzung. Moderne, modellbasierte Regelverfahren bieten unterschiedliche Möglichkeiten über sogenannte Flussmodelle, diese Voraussetzung zu erfüllen.

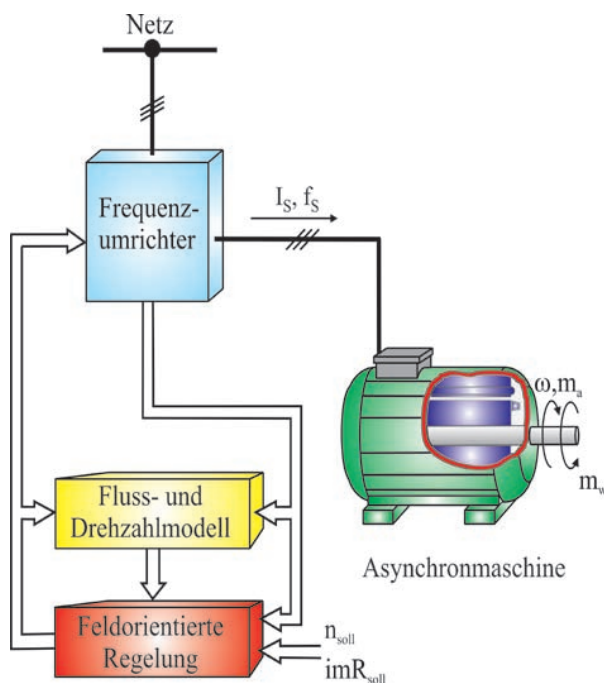


Abb. 1: System, sensorlos geregelte ASM

Am IALB sind Flussmodelle zur sensorlosen feldorientierten Drehzahlregelung der ASM entwickelt worden, die eine hinreichend genaue Berechnung des Flussvektors und damit des umlaufenden Drehfeldes in der Maschine ermöglichen, ohne Informationen über die Drehzahl der Maschine zu besitzen. Mit der Identifikation des nichtlinearen Übertragungsverhaltens des verwendeten Frequenzumrichters minimiert sich der sensorische Aufwand auf die einfache Messung der Phasenströme. Eine kostenintensive Messung der Phasenspannungen entfällt.

Der verwendete Ansatz zur feldorientierten sensorlosen Drehzahlregelung beruht auf der Bestimmung eines Differenzwinkels zwischen dem, mittels Flussmodell berechneten Modellflussvektor und der tatsächlichen Flussvektorlage in der ASM. Um die drehmoment- bzw. leistungsoptimale feldorientierte Regelung einer ASM zu ermöglichen, werden sämtliche Parameter des zugrundegelegten Maschinen-

modells und das Sättigungsverhalten bestimmt. Zusätzlich werden die umrichter- oder maschinenbedingten Strom- bzw. Spannungsbegrenzungen im Vorfeld identifiziert und ebenfalls in den Bestimmungsalgorithmus des Differenzwinkels integriert. Auftretende Abweichungen werden dabei im hoch-dynamischen Differenzwinkelregelkreis ausgeregelt. Die nötigen Informationen für die Berechnung des Orientierungsfehlers werden aus den induzierten Spannungen gewonnen. Hierbei wird im physikalisch kritischen Ständerfrequenzbereich um null Hertz die Maschine mit Testsignalen angeregt.

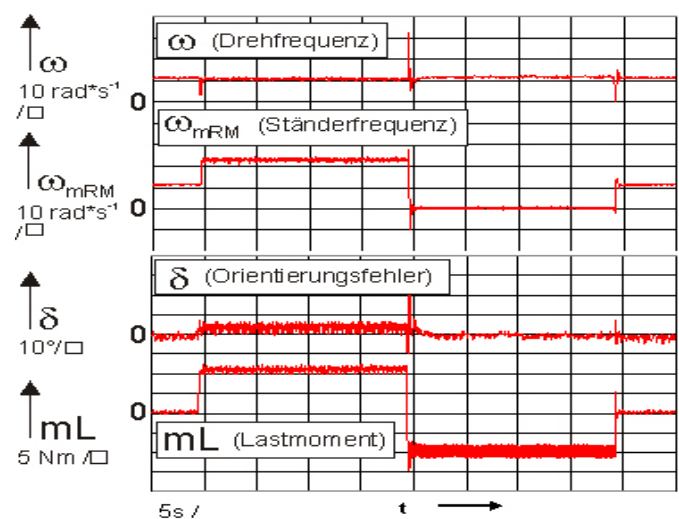


Abb. 2: Messung im kritischen Frequenzbereich

Mit der Optimierung der Flussmodelle durch genauere Identifikation der Maschinenparameter ist es am IALB gelungen, nicht nur den gesamten Grunddrehzahlbereich, sondern auch im Feldschwächbetrieb eine ASM sensorlos zu regeln. Dabei konnte ein stabiler Betrieb an unterschiedlichen Asynchronmaschinentypen (2- und 4-polig) unter Nennlast sowohl motorisch als auch generatorisch nachgewiesen werden.

Die aktuelle Forschung am IALB befasst sich mit der Entwicklung neuartiger sensorloser Flussmodelle. Diese sollen größere Abweichungen der identifizierten Maschinenparameter tolerieren, um so den Identifikationsaufwand zu verringern.

High-Speed DSP Rechnerkarte mit TI TMS320-F2812 und PCI-Schnittstelle

Die Nachfrage nach leistungsfähigen Rechnerkarten für die Antriebstechnik ist in den vergangenen Jahren stark gestiegen, deshalb führt das IALB die Entwicklung seiner High-Speed DSP-Rechnerkarte kontinuierlich fort. Diese wurde im Jahr 2007 weiter ergänzt und um den fehlenden PCI-Stecker-Anschluss erweitert und steht nun als fertiges Layout zur Verfügung; ein Aufbau und eine Inbetriebnahme fanden bislang nicht statt. Diese Vervollständigung war erforderlich, da eine Anbindung an einen (I)PC bislang nur über eine steckbare

Hierzu gehörten im einzelnen:

1. Eine Schaltung zur Wandlung des DSP-SCI¹-Signals in das beim PC weit verbreitete RS232-Signal, so dass hierüber Daten empfangen (RX-Signal) und gesendet (TX-Signal) werden können.
2. Eine Schaltung zur Konvertierung des SPI²-Signals zum RS485-Schnittstellenstandard.

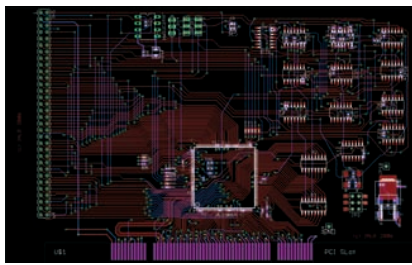


Abb. 1 : Layout PCI-Controller-Karte

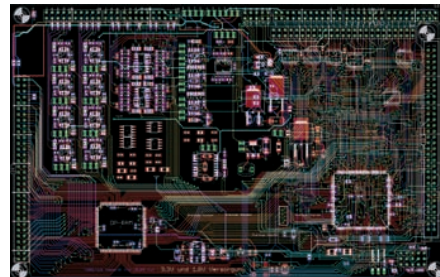


Abb. 2: Layout DSP-Rechnerkarte

Zusatzkarte mit PCI-Controller möglich war. Dies hatte jedoch den Nachteil, dass zum einen zwei PCI-Steckplätze belegt wurden, was in einem IPC-Gehäuse schnell zu Platzproblemen führen kann, zum anderen stellte die Steckverbindung der beiden Karten eine potenzielle Gefahrenstelle für Störungseinstrahlungen dar.

Um aus den beiden Platinen eine einzelne Platine zu entwerfen, war es zunächst erforderlich, die Schaltung der PCI-Controller-Karte in die Schaltung der High-Speed-DSP-Karte zu integrieren. Dabei musste besonders darauf geachtet werden, dass es zu keinen identischen Netzen bzw. deren Überschneidung oder Kopplung kam. Nach Fertigstellung der Schaltung musste das Layout einem kompletten Redesign unterzogen werden, denn einige Schnittstellenstecker wurden entfernt oder an anderer Stelle neu angeordnet, außerdem musste auch dem PCI-Controller-Chip „PLX 9054“ ein zentraler Platz nahe dem PCI-Stecker gegeben werden, wobei das Dualport-RAM „CY7C057V“ die Verbindung zwischen dem PCI-IC und dem DSP darstellt. Dieser Speicherchip ermöglicht das gleichzeitige Lesen von beiden Seiten des Bausteins, wobei auch das Schreiben von beiden Seiten möglich ist, aber nicht zur selben Zeit.

Bereits in den vergangenen Jahren hatte der Praxiseinsatz der vorherigen Revisionen gezeigt, dass verschiedene Schnittstellen eine feste Größe auf der DSP-Karte werden müssten.

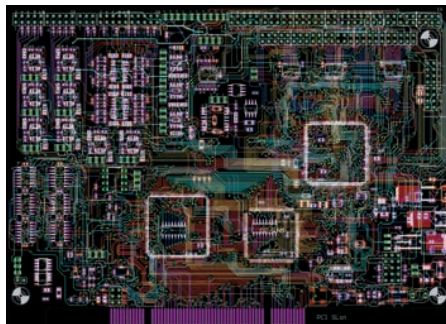


Abb. 3: Layout DSP-PCI-Steckkarte

3. Eine „Winkel-Geber-Schaltung“, die es unter Einbeziehung des Quadraturencoders (QEP-Einheit) des DSPs ermöglicht, die Sinus- und Cosinus-Spuren von bis zu zwei angeschlossenen Motoren auszulesen und zu verarbeiten. Die verwendete Filterbeschaltung kann außerdem auch zur Erfassung von analogen Messwerten, wie z.B. Strömen und Spannungen verwendet werden, die dann vom internen 12 Bit-AD-Wandler des DSP in ein Digitalsignal umgewandelt werden.

4. Eine analoge Tiefpass-Filtervorbeschaltung für ein bis acht Messsignale. Zusätzlich können die Eingänge des Filters per Jumper auf Differentialeingangsmodus konfiguriert werden, um Signale erfassen zu können, deren Pegel im Bereich -1,5 V bis +1,5 V liegt.

Mit Hilfe einer externen Zusatzsteckkarte ist auch weiterhin die 16 Bit Digital-Analog-Wandlung möglich, diese wird auf den External-Interface-Anschluss gesteckt und verfügt über vier analoge Ausgänge.

Zusätzlich kann die vorliegende DSP Rechnerkarte auch als „Stand-Alone“-Lösung zur Regelung von elektrischen Antrieben genutzt werden. Sollte es in der Zukunft notwendig sein, zusätzliche Hardware zu implementieren, so wurde diesem in Form von „Leergehäusen“ Rechnung getragen

Zurzeit wird an der Entwicklung eines neuen Highspeed-DSP-Boards gearbeitet, bei der bislang verwendete TMS320F2812 durch einen neuen DSP mit 32 Bit Floating Point Unit und Enhanced Control Peripherals ersetzt wird.

1 SCI = Serial Common Interface

2 SPI = Serial Peripheral Interface

Embedded System Development Using FPGA

Embedded intelligence is the dream which has been propelling innovative design engine for some time in the technology world. Designers are forced to reduce the system spread along with power consumption with no compromise on reliability. Also complexity of the intelligent algorithms requires more processing power along with reduced sample times. Moore's law has been driving force for processor industry over past 30 years and merely increasing processor speed seems viable solution no more. This has been the reason why processor industry shifted towards dual and multi-core processor architectures.

Digital Signal Processor (DSP) relatively being new inline for the processor technology has been able to reduce power consumption along with enhanced signal processing capability but still program execution remains sequential. Assembly language is preferred over C when higher speed performance is desired by the application because C code does not render an optimized solution.

Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) have been in industry for some time and are rapidly replacing traditional processor based applications. FPGAs provide raw gate power (in millions) in the hands of designer who can tailor them as required by the application. Most of the embedded designs start with block diagram which renders itself easily to FPGA design. FPGAs nowadays have multiple hardware multipliers at their disposal hence high end DSP applications can easily be implemented. Major difference between DSP and FPGA implementation is that in latter case multiple sub units (blocks) in an

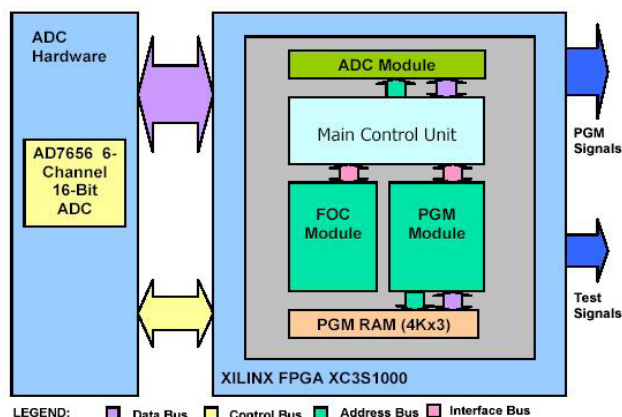


Figure 1: Simplified system block diagram

application can run in parallel. A large library of IP cores is available from multiple vendors which can easily be integrated into the application. If one needs a processor at all then IP cores for the same along with RAM and ROM are also available.

Development for FPGA can be carried out at multiple levels of abstraction, depending on the complexity of the design. Normally application development is done in Very high speed integrated circuit Hardware Description Language (VHDL) or Verilog. But software like Altium Designer and Xilinx ISE

WebPACK can also be used for system level designs with already available component libraries.

State of the art Program Generated Modulation (PGM) algorithm along with Field Oriented Control (FOC) was imple-

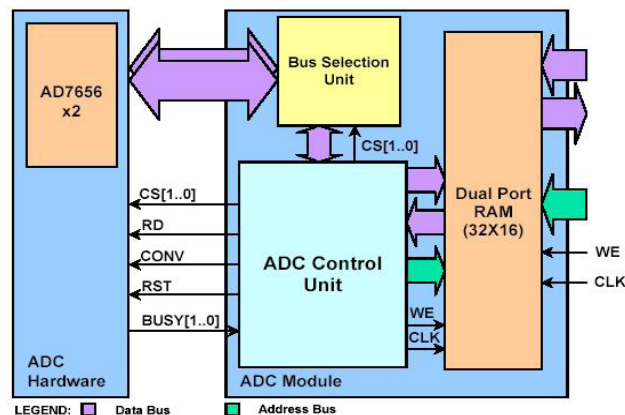


Figure 2: ADC module hierarchical design

mented on a Spartan-3 device as shown in Figure 1. Hierarchical design approach was used to render a simple system level abstraction layer. Figure 2 depicts this idea which is used throughout the design to reduce the complexity. Register Transfer methodology was used for the implementation of complex algorithms and modules. PGM in itself is a complex

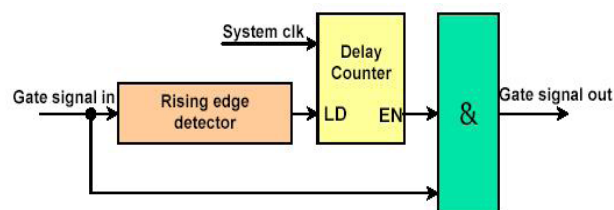


Figure 3: Dead time generation block

modulation algorithm for cascaded multilevel converters hence requires parallel processing for each phase to achieve reasonable modulation frequency.

Above diagram depicts the deadtime generation circuit for single gate signal. The circuit generates dead time with resolution of $1/f_{\text{system}}$ sec. This control over hardware is not possible in DSP applications. Also for multilevel cascaded converter we need 12 gate signals (3-Cell converter) and 16 gate signals (4-Cell converter) for single phase. In FPGA design it is just matter of replicating the block shown in Figure 3 and all the circuit will run parallel without any compromise on dead-time resolution. This design ease and increased latency is only possible in FPGA environment. Special care must be taken to reach a compromise between system latency and resource usage. Above application uses BIT/Q as number format.

VHDL test benches can either be written for MATLAB or behavioral model (written in C) generated data. Another trend which is gaining popularity is system level behavioral simulation using systemC which are class libraries written in C++.

Moderne Optimierungsverfahren für H_∞ -optimale PI-Kaskadenregelung

Eine wichtige und häufig auftretende regelungstechnische Aufgabe ist die Regelung eines Mehrmassen-Systems. Solche Systeme sind z. B. in Walzwerken, in der Robotik oder in Werkzeugmaschinen zu finden. Mehrmassen-Systeme in der Antriebstechnik bestehen z. B. aus einer Lastmasse, einem Getriebe, einem Antriebsmotor, Kupplungen, Wellen, Spindeln usw. Die Wellen können als elastische Torsionsfedern aufgefasst werden, die das Gesamtsystem schwingfähig machen. Abb. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Systems.

In vielen Fällen sind die Parameter des Systems nicht genau bekannt. Diese Parameterunsicherheiten machen die Regelung solcher Systeme zusätzlich schwierig. Eine robuste Regelung ist daher wünschenswert. Ein leistungsfähiges Werkzeug, um dieses Problem zu lösen, ist eine robuste H_∞ -Regelung, da sowohl Parameter- als auch Strukturunsicherheiten berücksichtigt werden können. Jedoch gestaltet sich die Umsetzung dieser mathematisch komplizierten Methode für praktische, industrielle Anwendungen als ziemlich aufwen-

dig. PI-Kaskadenregelungen sind dagegen in der Praxis weit verbreitet und häufig auch schon in den Antriebssystemen integriert. Es liegt daher nahe, die bekannte Struktur der PI-Kaskadenregelung beizubehalten, die Reglerparameter aber so anzupassen, dass sich dennoch eine robuste Regelung ergibt. Die Anforderungen an die Robustheit und die Dynamik des geregelten Systems werden dazu wie bei der konventionellen H_∞ -Regelung durch frequenzabhängige Gewichtungsfunktionen gestellt. Die H_∞ -Norm des um diese Gewichtungsfunktionen erweiterten, geregelten Systems ist dann ein Maß für die Güte der Regelung. Aufgabe war es nun, die Parameter einer PI-Kaskadenregelung so zu bestimmen, daß das Gütemaß minimal wird. Hierzu wurden verschiedene, moderne Optimierungsalgorithmen verwendet.

Dabei wurde für eine zufällig gewählte Menge (Population)

von Reglerparametersätzen (Individuen) die jeweilige Güte (Fitness) berechnet. Aus diesen Individuen werden abhängig vom gewählten Optimierungsalgorithmus bestimmte Individuen ausgewählt, aus denen neue Parametersätze berechnet werden. Neben den schon im letzten Jahr untersuchten Ge-

netischen Algorithmen (GA) wurden nun auch die relativ neuen Verfahren der differentiellen Evolution (DE) und der Partikel-Schwarm-Optimierung (PSO) angewendet.

Bei DE ist im Gegensatz zu den klassischen

GA keine binäre Kodierung der Parameter notwendig, wodurch sich der Optimierungsaufwand deutlich verringert. Einen völlig anderen Ansatz verfolgt dagegen PSO. Dieses Verfahren setzt nicht auf eine „Survival of the Fittest“ Strategie,

sondern auf Kooperation der Individuen untereinander. Dabei „beobachten“ die Individuen sowohl ihre eigene Entwicklung, als auch die Ihrer Nachbarn und passen sich entsprechend an, um die bestmögliche Position im Suchraum zu finden.

Für die messtechnische Überprüfung

des so entworfenen Reglers wird ein Dreimassen-Prüfstand, wie er in Abb. 2 zu sehen ist, verwendet. Die optimierte Regelung wurde an diesem Dreimassenprüfstand getestet und zeigte gute und robuste Ergebnisse.

Damit stehen nun mehrere, moderne Verfahren zur Verfügung, die bekannte Struktur einer PI-Kaskadenregelung mit der Robustheit einer H_∞ -optimalen Regelung zu verbinden.

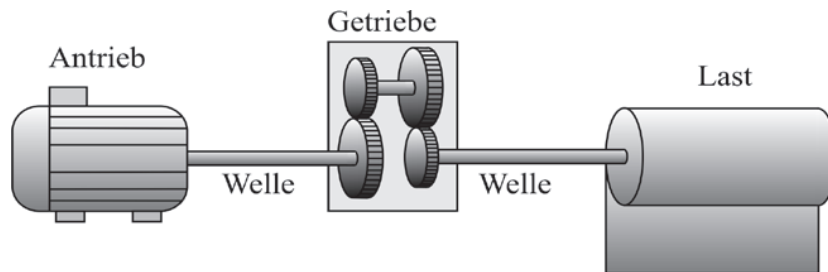


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau eines Mehrmassensystems

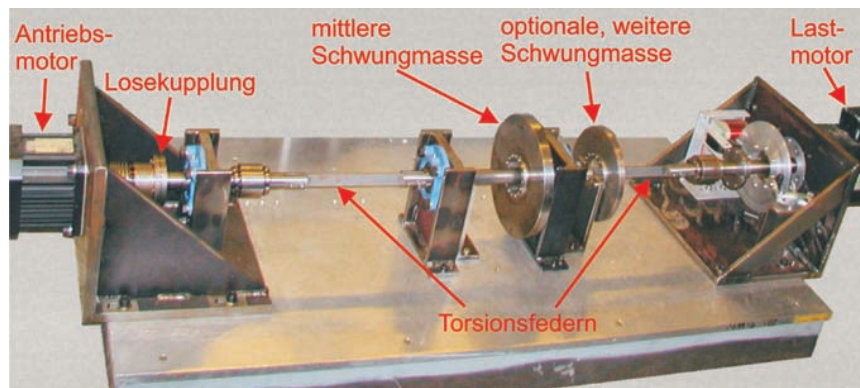


Abb. 2: Dreimassenprüfstand

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



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 „Konstruktion elektrischer Maschinen II“ wird in diesem Jahr erstmalig von Herrn Dipl.-Ing. Thorsten Völker gehalten, der hierfür 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 wird das Funktionsprinzip des Transformators erläutert und die darauf basierenden Betriebseigenschaften werden 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 wird der Aufbau von Gleichstrommaschinen behandelt und es werden die stationären Betriebseigenschaften der Reihenschluss-, Nebenschluss- und der fremderregten Gleichstrommaschine abgeleitet und diskutiert. Die Erzeugung von drehenden Magnetfeldern mit räumlich verteilten, feststehenden Wicklungen und 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.

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 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.

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 Zweimasensysteme 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 Hamiltonfunktion 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.

Grundlagenlaboratorium Regelungstechnik Teil 1

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

- Die Gleichstrommaschine:
Parameterbestimmung
Untersuchung der Dynamik
Erstellung einer Antriebsregelung
- PID-Drehzahlregelung einer
Asynchronmaschine:
Asynchronmaschine und Frequenzumrichter
- PID-Regler
Lageregelung:
Aufbau eines Kaskadenregelkreises

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

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



Univ.-Prof. 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 Polarisation (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 bildet 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 ist eine Darstellung von Heterostrukturbauelementen aus Zeitgründen leider nicht möglich.

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. 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.

Semiconductor Devices (Pflichtfach für den Masterstudiengang „Communication and Information Technology“)

Diese englischsprachige Lehrveranstaltung ist eine Einführung in die Halbleiterbauelemente mit dem Schwerpunkt „Hochfrequenz-Bauelemente und optoelektronische Bauelemente“. Sie setzt sich aus den entsprechenden Abschnitten aus den Vorlesungen „Werkstoffe, Bauelemente und Schaltungen II“ sowie „Halbleiterbauelemente“ zusammen.

Einführung in die Festkörperphysik

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

Modellbildung und Messverfahren für Halbleiterbauelemente und Solarzellen

In dieser Veranstaltung beschäftigen sich Studierende der Elektrotechnik (Diplom- und Master-Studiengänge) mit Messverfahren zur Ermittlung von Trägerlebensdauern, mit Untersuchungen zu Transporteigenschaften bei tieferen Temperaturen und mit Einzelaspekten des dynamischen Verhaltens von Bauelementen. Zusätzliche Themen sind: Grundlagen der Bauelementesimulation, der thermischen-mechanischen Simulation und der Simulation von induktiven parasitären Effekten in der Leistungselektronik.

Konstruktion elektrischer Maschinen I



Dr. Norbert Götschmann

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 Maschinen, bei dem der Dozent, Dr. Norbert Götschmann, Leiter der Konstruktion ist.

Konstruktion elektrischer Maschinen II



Thorsten Völker

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 wird 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 im konkreten Fall 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 wird die Vorlesung in Zukunft „Berechnung elektrischer Maschinen“ genannt.

