



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

Jahrbuch 2008

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

Vorwort	2
Mitarbeiter des IALB im Jahr 2008	3
Forschungsberichte	4
Hochpräzise Regelung einer permanenterregten Synchronmaschine	5
Permanenterregter Windenergie-Generator mit NdFeB-Magneten	6
Berechnung und Konstruktion eines 50 kW Transversalflussgenerator-Systems	7
Vergleichsstudie verschiedener Strukturen der permanenterregten Transversalflussmaschinen (PMTFM) für Radnaben- Anwendungen	8
Neuer Entwurf für permanenterregte Transversalflussmaschinen (PMTFM) für Radnaben- Anwendungen	9
Fehlertolerante Umrichter-Generatorsysteme für Windenergieanlagen	10
Belastungsminimale Regelung von Windenergieanlagen	11
Drehzahlregelung von Asynchronmaschinen mit optimiertem Sättigungsmodell	12
Entwurf eines Diagnosesystems für umrichtergespeiste Linearantriebe	13
Single-Phase Resonant Converter with PFC for Aircraft	14
Hochdynamische Multi-Level Frequenzumrichter	15
EMI Simulation Modeling for Power Converters	16
Regelung unsymmetrisch belasteter Inselnetze durch unabhängige Wechselrichter im Parallelbetrieb	17
Beanspruchungsgerechte Regelung elastisch gekoppelter Mehrmassensysteme	18
Erweiterungssteckkarte zum Evaluation-Board mit TI TMS320-F2812 / F28335	19
Waveletbasierte Echtzeit-Signalverarbeitung zur Überwachung von Prozess- und Maschinenzustandsänderungen	20
Lehrveranstaltungen des Instituts	21
Grundlagen der Elektrotechnik III	21
Grundlagenlaboratorium Regelungstechnik Teil 1	21
Praktikum Antriebs- und Stromrichtertechnik	22
Power Converter Technology	22
Antriebsregelung und Mechatronik I	22
Antriebsregelung und Mechatronik II	22
Werkstoffe, Bauelemente, Schaltungen I	23
Werkstoffe, Bauelemente, Schaltungen II	23
Leistungselektronik und Stromrichtertechnik I	24
Halbleiterbauelemente	24
Einführung in die Festkörperphysik	24
Modellbildung und Messverfahren für Leistungshalbleiterbauelemente	24
Konstruktion elektrischer Maschinen	25
Berechnung elektrischer Maschinen	26
Mechatronische Antriebslösungen für Produktions- und Logistikaufgaben	27



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



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



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

Vorwort

Mit diesem Jahrbuch 2008 möchten wir unsere Freunde und Kooperationspartner wieder über die Aktivitäten des Instituts im vergangenen Jahr informieren.

Ein herausragendes Ereignis war der Dienstantritt von Prof. Dr.-Ing. Nando Kaminski, der am 01. September 2008 die Nachfolge von Prof. Dr. phil. nat. Dieter Silber angetreten hat. Damit ist der Generationswechsel im Arbeitsgebiet „Leistungselektronische Bauelemente“ vollzogen.

Wir freuen uns, dass Prof. Silber dem Institut weiterhin erhalten bleibt, Mitarbeitern und Studenten mit Rat und Tat zur Seite steht und auch noch einige Lehrveranstaltungen anbietet.

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.

Hervorzuheben ist, dass ein wesentlicher Anteil der Forschungsvorhaben des Instituts im Bereich der Windenergieforschung liegt. Hier werden insbesondere Themen aus dem Antriebsstrang von Windenergieanlagen, der Netzintegration und Anlagenregelung behandelt. In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass das Institut im letzten Jahr maßgeblich dazu beigetragen hat, die Windenergieforschung in der Region Nordwest zu bündeln. Diese Aktivitäten fanden ihren Niederschlag im Beitritt der Universität zu dem Forschungsverband ForWind Anfang 2009.

Das Lehrangebot konnte auch 2008 im vollen Umfang aufrechterhalten werden. Für ihren Beitrag dazu möchte ich an dieser Stelle den Lehrbeauftragten Herrn Dr.-Ing. Götschmann, Herrn Dr.-Ing. Kiel und Herrn Dr.-Ing. Völker danken.

Insgesamt war 2008 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 großem 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.

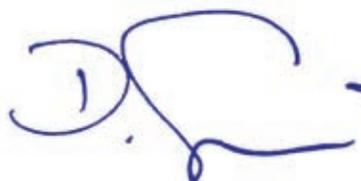
Bremen, im Mai 2009



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



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



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

Mitarbeiter des IALB im Jahr 2008



Institutsleitung

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

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

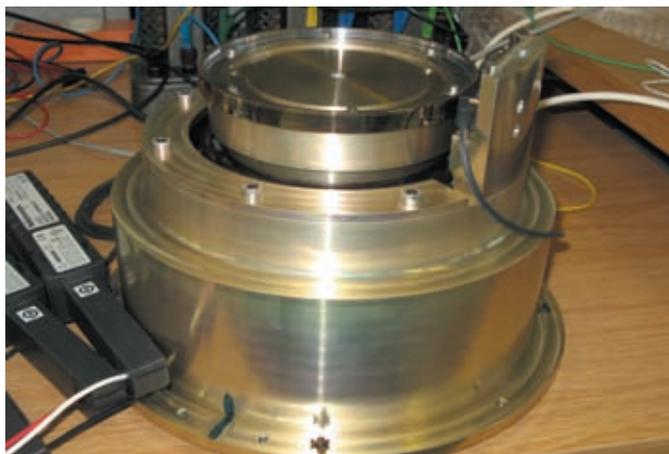
Forschungsgruppen

Sekretariat	Antriebe	Regenerative Energien	Mechatronik	Leistungsbauelemente	Technische Mitarbeiter
E. Krüger H. Janssen	T. Christ H. Groke M. Joost J. Adler	Th. Völker Chr. Renz Chr. Mehler H. Langmack G. R. Khokhar	S. Bassurah M. Siatkowski J. Schüttler G. Tisborn	I. Sheikhan U. Vemulapati	G. Matthies B. Vahlenkamp G. Schwerdtfeger A. Norbach F. Trocha

Forschungsberichte

Hochpräzise Regelung einer permanenterregten Synchronmaschine

Für das vom Alfred Wegener Institut in Bremerhaven betriebene Forschungsschiff „Polarstern“ wurde im vergangenen Jahr in enger Zusammenarbeit mit der Firma Rheinmetall Defence Elektronik (RDE) eine hochpräzise Regelung einer rotierenden Plattform für eine Infrarotkamera realisiert. Das Kamerasystem dient dem Aufspüren von Walen, die die Schiffsrouten kreuzen können. Darüber hinaus ist der Einsatz von Sonarsystemen, die mit einem sehr hohem Schalldruck arbeiten, in der Umgebung von Meeressäugern zu vermeiden.



Prototyp des Antriebssystems für eine Kameraplattform

Die größten technischen Herausforderungen sind zum einen die maximal zulässige Winkelabweichung des Antriebssystems des Kameraträgers und die daraus folgende hohe geforderte Bandbreite des Stromregelkreises. Der maximale Positions jitter des gesamten Antriebssystems soll nach Spezifikation einen maximalen Jitter von weniger als 100 μ rad aufweisen. Der Stromregelkreis soll eine Bandbreite von 1 kHz besitzen und mit einer Abtastfrequenz von 40 kHz implementiert werden. Die Zwischenkreisspannung ist für den Spannungsbereich von 18 V bis 36 V spezifiziert.

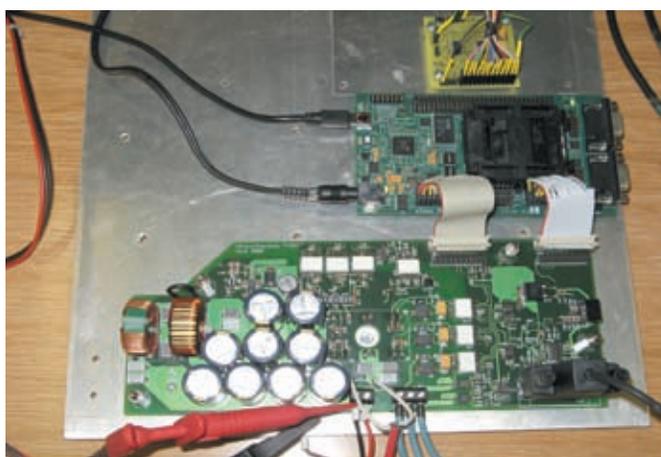
Auf Grund dieser hohen technischen Anforderungen wird die Regelung auf einem digitalen Signalprozessor (DSP) TMS320-F28335 der Firma Texas Instruments implementiert. Der DSP ist ein Chip neuester Generation und eine Weiterentwicklung des bereits zahlreich und mit Erfolg am IALB eingesetzten DSP TMS320-F2812. Er bietet neben zahlreichen Erweiterungen der DSP-internen Peripherieschaltungen zusätzlich zur Festkomma-CPU eine Floating Point Unit (FPU). Zur Positionsauswertung des Rotors, auf dem das Kamerasystem mit etwa fünf Umdrehungen pro Sekunde rotieren soll, wird ein Winkelgeber mit einer Strichzahl von 12.000 eingesetzt. Die dreiphasig ausgelegte permanenterregte Synchronmaschine mit einer Polpaarzahl von zwölf und einem Spitzendrehmoment von 39 Nm wird über ein kompaktes

MOSFET Leistungsmodul aus dem Zwischenkreis gespeist. Trotz des Einsatzes eines der modernsten DSPs für die Antriebstechnik, die zur Zeit auf dem Markt erhältlich sind, ist eine ausschließliche Implementierung der Regelung in der Hochsprache C oder C++ wegen der geforderten Abtastfrequenz von 40 kHz des Stromregelkreises nicht möglich.

Aus diesem Grund ist beim Entwurf der Regelungssoftware zunächst ein Rahmenprogramm erstellt worden, welches zur besseren Verständlichkeit in der Hochsprache C implementiert worden ist. Das Rahmenprogramm stellt die Initialisierung der gesamten DSP-internen und externen Schaltungskomponenten sicher und stellt die periodisch aufgerufenen Abtastzyklen jedes einzelnen Regelkreises einer drei Stufen umfassenden Kaskadenregelung zur Verfügung.

Im Gegensatz zu den nicht zeitkritischen Initialisierungen der Schaltungskomponenten steht die zeitkritische Ausführung der Reglerkaskade, die eine Einhaltung harter Echtzeitanforderungen bedingt. Die Implementierung der gesamten zeitkritischen Prozesse findet daher in Assembler statt. Die Assembler-routinen werden dabei direkt als Unterprogramme vom C-Rahmenprogramm aus aufgerufen und abgearbeitet. Die Regelung selbst findet in Feldkoordinaten statt.

Der in der Reglerkaskade außen liegende Positionsregelkreis bekommt ein Vorgabesignal (Synchronisations-signal) von der Bildverarbeitungseinheit des Kamerasystems, so dass beide getrennt von einander arbeitende



Prototypenplatine zur Motoransteuerung mit F28335-DSP

Systeme synchronisiert werden und positionstreu arbeiten. Die Positionsregelung, die mit einer Frequenz von 10 kHz aufgerufen wird, ist eine Drehzahlregelung unterlagert, die wiederum die Sollwerte für den inneren Stromregelkreis generiert.

Permanenterregter Windenergie-Generator mit NdFeB-Magneten

Neue Werkstoffe, wie Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB) finden zunehmend Anwendung in großen Synchronmaschinen. Für einen von den Lloyd Dynamowerken (LDW) geplanten 2 MW-Synchrongenerator wurde untersucht, welche Maßnahmen getroffen werden müssen, um einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen und eine Schädigung der Maschine durch Zerstörung der Magnete zu vermeiden. Dabei standen zwei Fragestellungen im Vordergrund: zum einen die Entmagnetisierung der Permanentmagnete durch Gegenfelder und zum anderen die Wirbelstromverluste in den NdFeB-Magneten.

Um sicherzustellen, dass die Permanentmagnete nicht entmagnetisiert werden (irreversible Verluste), wurden die Gegenfelder in der Maschine untersucht. Dabei wurden verschiedene Szenarien bewertet und zwei Fälle ausgesucht, die starke entmagnetisierende Felder erwarten lassen: der Betrieb der Maschine mit Nennstrom und einem Polradwinkel von 90 Grad zum einen, und der Kurzschlussfall bei Nenndrehzahl zum anderen. In Abb. 1 ist das entmagnetisierende Feld im Kurzschlussfall dargestellt. Das Maximum liegt bei 900 kA/m, dieser Wert ist für die Auswahl der Magnetwerkstoff-Graduierung ausschlaggebend.

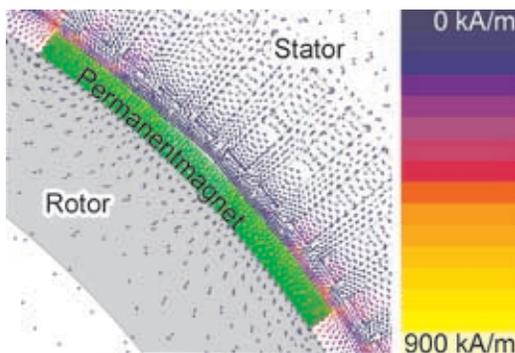


Abb.1: Der Ausschnitt zeigt einen Pol der PM-Maschine. Die farbigen Vektoren stehen für die magnetische Feldstärke im Kurzschlussfall.

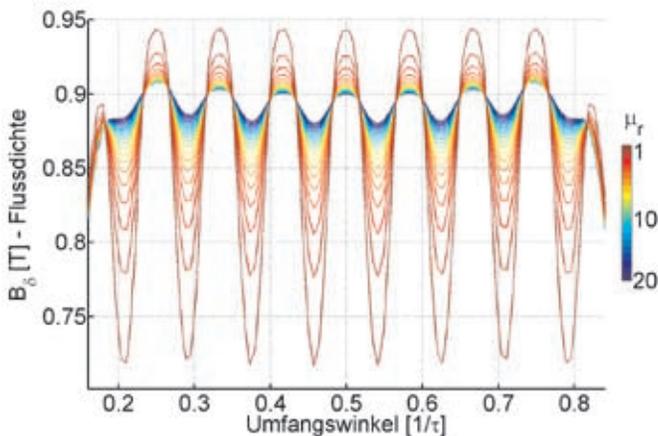


Abb.2: Die Pfeile zeigen den Verlauf der Wirbelströme innerhalb eines Magnetsegmentes.

Aufgrund der relativ hohen Leitfähigkeit der NdFeB-Magnete wurden auch mögliche Wirbelströme darin betrachtet. Durch die Statornuten ergibt sich im Luftspalt eine Feldwelligkeit, die sich in die Magneten hinein fortpflanzt, so dass hier Wirbelströme zu erwarten sind. Der Einfluss der Nuten auf das Feld in den Magneten kann durch weichmagnetische Nutkeile reduziert werden (Abb. 2), und die Wirbelströme können durch eine Unterteilung der Magneten verringert werden.

Abb. 3 zeigt den Verlauf der Wirbelströme innerhalb von einem Magnetsegment. Lokal werden dabei Stromdichten von bis zu 7 A/mm² erreicht.

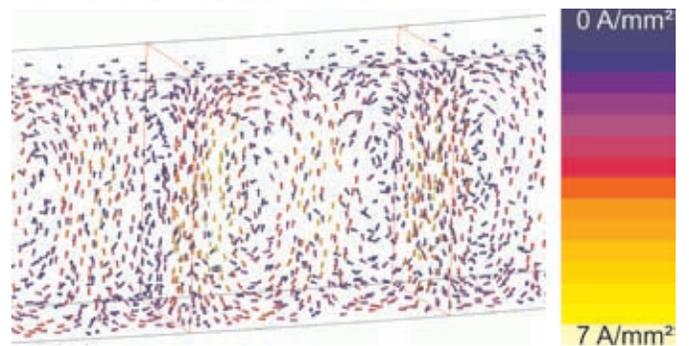


Abb.3: Die Pfeile zeigen den Verlauf der Wirbelströme innerhalb eines Magnetsegmentes.

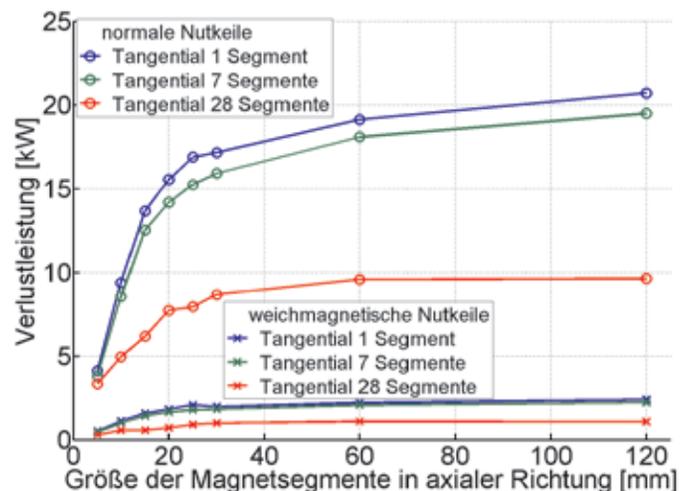


Abb.4: Eine Unterteilung der Magnete in kleinere Segmente verringert die Wirbelstromverluste, jedoch ist der Einsatz von weichmagnetischen Nutkeilen deutlich effektiver

Mit Hilfe von dreidimensionalen FEM-Simulationen konnte gezeigt werden, dass alleine durch die richtige Wahl der Nutkeile die Wirbelstrom-Verlustleistung in den Magneten von 15 kW auf unter 2 kW sinkt und die Unterleitung der Magnete in axialer und in Umfangsrichtung kaum eine Rolle spielt (Abb. 4), so dass hier Fertigungsaspekte besser berücksichtigt werden können. Insgesamt werden bei der Maschine Wirkungsgrade von 98% erreicht.

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 langsamlaufende Windrad mit dem schnelllaufenden 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 Transversalflusstechnologie bietet dazu einen viel versprechenden Lösungsansatz. Mit dem Maschinenkonzept der hochpoligen, permanentmagneterregten Transversalflussmaschine 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 Anforderungen 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 Koopera-

tion 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 Transversalflussgenerators 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.

Die technischen Daten des im TransKon-Projekt konstruierten Transversalflussgenerators 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 50 kW-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.

Vergleichsstudie verschiedener Strukturen der permanentenerregten Transversalflussmaschinen (PMTFM) für Radnaben- Anwendungen

Ein neuer Entwurf einer Transversalflussmaschine (TFM) erfordert eine Vergleichsstudie der vorhandenen Strukturen, die bereits untersucht und aufgebaut worden sind. Es sind Simulationen mit der Finite Element Methode (FEM) für verschiedene vorhandene Transversalflussmaschinen durchgeführt worden, um einen leichteren Vergleich zu ermöglichen. Die vorhandenen Maschinenstrukturen werden als Außenrotor mit gleichem Durchmesser, axialer Länge und Polezahl neu entworfen, damit die äußeren Vergleichskriterien übereinstimmen. Variiert werden die Aufbauten des Stators, des Rotors und es werden verschiedene weichmagnetische Materialien eingesetzt. Die simulierten TFM werden in Abb. 1 vorgestellt.

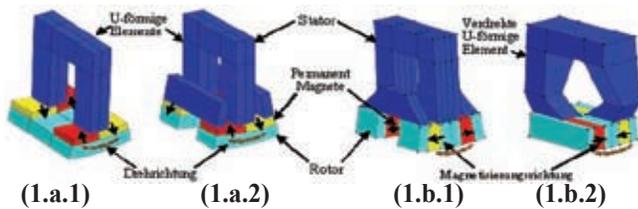


Abb.1: Einzelnes Segment der verschiedenen Strukturen der TFM (a) TFM in Flachmagnetanordnung (F-TFM) (b) TFM in Sammleranordnung (S-TFM)
 (1.a.1) F-TFM (U-förmige Elemente)
 (1.a.2) F-TFM (U- & I-förmige Elemente)
 (1.b.1) S-TFM (U- & I-abgeschrägte förmige Elemente)
 (1.b.2) S-TFM (Verdrehte U-förmige Element)

Die vier gezeigten und untersuchten TFM werden in zwei Kategorien unterteilt: TFM in Flachmagnetanordnung (F-TFM) und TFM in Sammlerbauweise (S-TFM). Bei der F-TFM werden die Permanentmagnete (PM) senkrecht zur Bewegungsrichtung magnetisiert. Für die S-TFM ist es so, dass die PM parallel zur Bewegungsrichtung magnetisiert werden. Jede Kategorie hat zwei verschiedene Entwurfsaufbauten.

In Abb. (1.a.1) wird eine F-TFM mit U-förmigen Statorelementen und Oberflächen-Rückschluss gezeigt. Abbildung (1.a.2) zeigt eine andere Struktur mit U- und I-förmigen Statorelementen, in der der Oberflächen-Rückschluss aufgeteilt ist. Die Topologie in Sammleranordnung mit U- und I-förmigen Statorelementen ist in Abb. (1.b.1) gezeigt. Die zweite Anordnung ist mit einem verdrehten U-förmigen Statorelement aufgebaut, wo die Permanentmagnete und die Flussverdichter (Pole) im Rotor der axialen Länge von einer Phase der Maschine gleichen.

Die elektromagnetischen Drehmomentsimulationen für die vier Aufbauten werden in Abb. 2 vorgestellt. Die Simulationen sind über einer Polteilung durchgeführt, mit linearem Material (Rot) und mit nichtlinearem Material M40050 (Schwarz). Anscheinend hat das Drehmoment des S-TFM einen größeren Wert als das der F-TFM bei gleichem Volumen der Maschine. Anhand des Drehmomentunterschieds bei linearem und nichtlinearem weichmagnetischen Material kann man erkennen, wann die Maschine in einen gesättigten Zustand kommt. Als Beispiel tritt in Abb. (2.a.2) die Sättigung bei ungefähr der Hälfte der Polteilung ein. Da ein großes Ausgangsdrehmoment Ziel des grundlegenden Entwurfs für einen Radnaben-Motor ist, sollte die TFM in Sammleranordnung vorgezogen werden, obwohl es vom Aufbaugesichtspunkt her schwierig ist.

Die Idee des Entwurfs, der im IALB für Radnaben-Motor zur Untersuchung vorgeschlagen wird, wird in Abb. 3 dar-

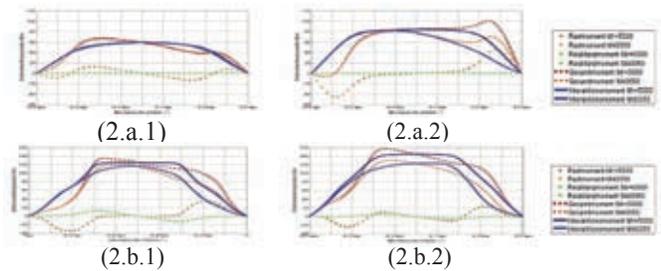


Abb.2: Statische elektromagnetische Phasen-Drehmomente der vier simulierten TFM
 (2.a.1) F-TFM (U-förmige Elemente) (2.a.2) F-TFM (U- & I-abgeschrägte förmige Elemente)
 (2.b.1) S-TFM (U- & I-förmige Elemente)
 (2.b.2) S-TFM (Verdrehte U-förmige Elemente)

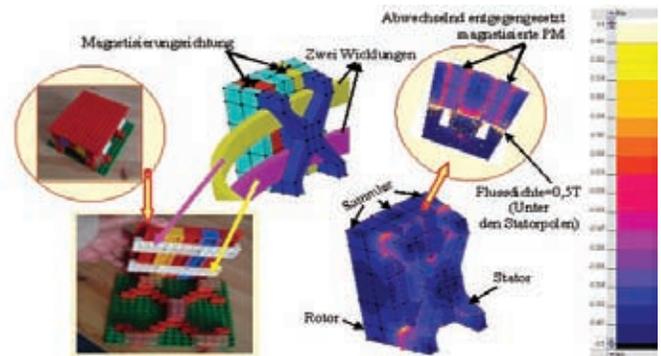


Abb.3: Kompaktbauweise der TFM

gestellt. Im Stator befinden sich zwei Wicklungen, deren Phasenströme um 180° zueinander verschoben sind. Die Flussdichteverteilung ist oben dargestellt, wo große Werte unter den Statorpolen auftreten. Statische Simulationen der Drehmomente für verschiedene weichmagnetische Materialien werden in Abb. 4 dargestellt. Es liegt auf der Hand, dass mit diesem Aufbau mehr Drehmomente produziert werden. Dieses ist so, weil zwei Wicklungen pro Phase einen doppelten Effekt auf das Drehmoment haben im Vergleich zu den vorhergehenden untersuchten Fällen, wo nur eine Wicklung pro Phase benutzt worden ist.

Nach diesen Vergleichen von den vier TFM weist die S-TFM die besten Eigenschaften bezüglich des Drehmoments auf, aber die Herstellungskosten sind jedoch höher und die Bauweise ist komplizierter als die der anderen drei, wenn

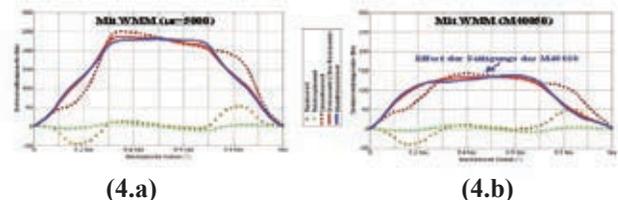


Abb.4: Material-Studie für den neuen Entwurf
 (4.a) Drehmomentkomponente für weichmagnetisches Material (WMM) mit linearer Kennlinie
 (4.b) Drehmomentkomponente für WMM mit nicht linearer Kennlinie

kein SMC Material für den Stator verwendet wird. Die F-TFM ist einfacher hinsichtlich des Rotors zu bauen, aber das Drehmoment fällt etwas niedriger aus als bei der S-TFM. Deswegen sollte für den Radnabenmotor die S-TFM verwendet werden, wie es in der Simulation für den neuen Entwurf nachgewiesen werden konnte.

Neuer Entwurf für permanenterregte Transversalflussmaschinen (PMTFM) für Radnaben- Anwendungen

Für diese Untersuchung wurden zwei verschiedene Varianten der TFM als Radnabenmotoren entworfen. Die Statorn dieser Art von Motoren sind in Abb.1 dargestellt. Die erste Konstruktionsart des Stators ist in Abb.(1.a) skizziert, wo die drei Phasen um den Stator Kern herum angeordnet wurden, wobei zu beachten ist, dass die mechanische Phase 120° beträgt. Die zweite Konstruktion ist in Abb.(1.b) gezeigt. Hier werden die drei Phasen in je zwei Hälften aufgeteilt und auf die je gegenüberliegenden Seiten platziert, um das Betriebsoptimum und die mechanische Stabilität des Stators sicherzustellen. Es sollte darauf hingewiesen werden, dass auf die mechanische Phasenverschiebung zwischen den Phasen geachtet werden muss.

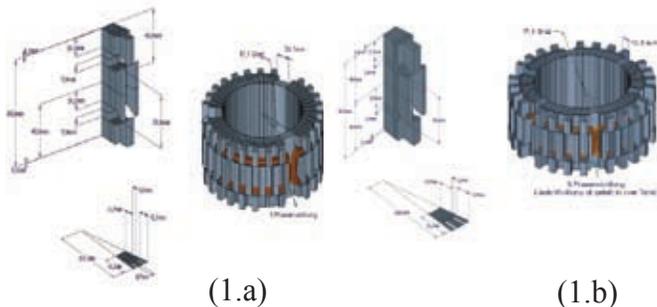


Abb.1: Verschiedene Konstruktionen des Stators
(1.a) Erste Variante der dreiphasigen TFM (3-Phasenwicklung, die um je 120° auf dem Stator verschoben angeordnet ist)
(1.b) Zweite Variante der dreiphasigen TFM (Je eine 3-Phasenwicklung ist in zwei Teile aufgeteilt. Je ein Teil ist um 120° in die nächste Phase verschoben)

Viele verschiedene Aspekte wurden untersucht und ihre Einflüsse auf das Drehmomentverhalten analysiert. Einige dieser Ergebnisse sind in Abb.2 dargestellt. Die Einflüsse des Materials auf das magnetische Moment, wie Permanentmagnete mit Trapez- bzw. Rechteckform haben, sind in Abb.(2.a) vorgestellt. Die trapezförmige Form der PM erzeugt mehr Drehmoment für jedes verwendete weichmagnetische Material als die der anderen untersuchten Formen. Aber der prozentuale Zuwachs des Durchschnittsdrehmoments fällt nicht so hoch aus und liegt bei etwa 7%. Daher ist es eine gute Wahl im Hinblick auf die Herstellungskosten, eher den rechteckförmigen PM zu nutzen.

Das prozentuale Verhältnis zwischen Stator kernschicht höhe zu Statorschicht höhe besitzt einen großen Effekt auf das durchschnittliche Drehmoment, wie es in Abb.(2.b) deutlich zu sehen ist. Ein Zuwachs von bis zu 70% der gesamten Statorschicht höhe schlägt sich im Zuwachs des Durchschnittsdrehmoments deutlich nieder. Ein weiterer prozentualer Zuwachs ist nicht so praktisch, weil dann der Platz für die Windungen erheblich kleiner wird und von daher der Strom begrenzt wird und eine Minderung des Drehmoments zur Folge hat.

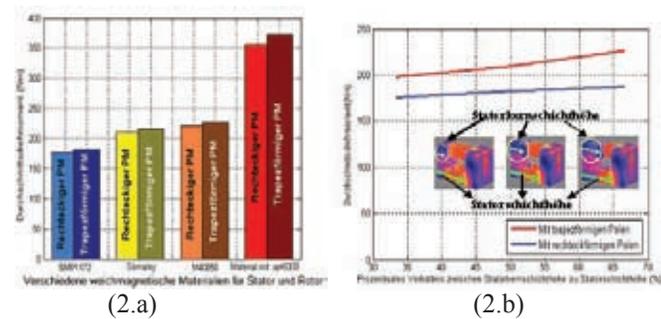


Abb.2: Einfluss des Materials, der Form des PM und der Stator kernlänge auf das Durchschnittsdrehmoment
(2.a) Effekt durch das Material und der Form des PM (2.b) Effekt durch Stator kernlänge

Es sollte darauf hingewiesen werden, dass eine Änderung der Konstruktionsmaße für die TFM gleichzeitig mehrere wesentliche Effekte hervorruft und viele Parameter deshalb geändert werden müssen. Deren Einflüsse müssen natürlich jedesmal neu analysiert werden, bis das optimale Design erreicht sein wird. Jedoch kann das optimale Design nur innerhalb der vorgegebenen Spezifikationen der Designer sein, wie z.B. hoher Wirkungsgrad mit einem kleinen Phasenwinkel und anders herum. Der Phasenwinkel der TFM wird bedingt durch den Gesamtstromwert des Ankers und der Größe des äquivalenten PM-Stroms. Er wird immer abnehmen mit dem Zuwachs der elektrischen Durchflutung und/oder des reduzierten äquivalenten PM-Stroms. Wird die elektrische Durchflutung erniedrigt bzw. erhöht, so verhält sich das elektromagnetische Drehmoment entsprechend. Dies gilt genauso, wenn der äquivalente Strom des PM ebenfalls erniedrigt bzw. erhöht wird, so folgt, dass das elektromagnetische Drehmoment ebenfalls reduziert bzw. erhöht wird. Das elektromagnetische Drehmoment ist direkt proportional zum Streuflusskoeffizienten, zum Fluss pro Pol, zum äquivalenten PM-Strom und zum Cosinus des Drehmomentwinkels. Daher haben das elektromagnetische Drehmoment und der Leistungsfaktor immer einen invers proportionalen Zusammenhang, wenn der Ankerstrom betrachtet wird. Bei dem äquivalenten PM-Strom ist das Drehmoment jedoch direkt proportional zum Leistungsfaktor. Um einen hohen Leistungsfaktor zu erreichen und eine gute Verbesserung des Drehmoments, muss der äquivalente PM-Strom möglichst hoch sein.

Die Wicklungen, angeordnet um den Stator herum, erbringen bei gleicher Durchflutung ein fast ebenso hohes Drehmoment, wie für die S-TFM bei vergleichbaren Ausmaßen. Weil bei dem neuen Entwurf mehr baulicher Platz für die Wicklungen vorhanden ist, kann die Durchflutung deutlich gesteigert und somit auch das Drehmoment erhöht werden. Der neue Entwurf stellt zur Zeit einen Forschungsgegenstand dar, der sich gut in der Praxis bewähren wird.

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.

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.

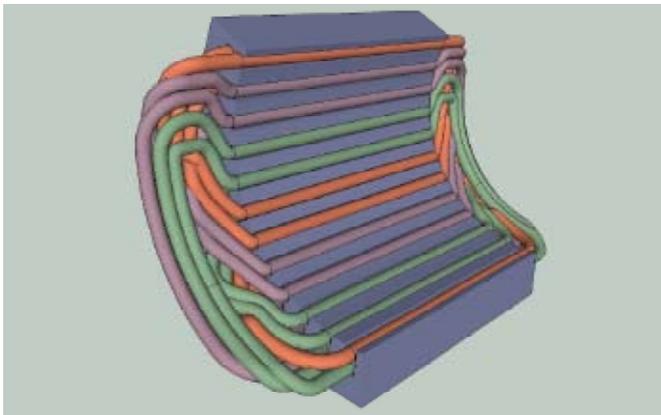


Abb.1: Segmentwicklung

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, Getriebe, Kupplungen, Generator, Umrichter, Transformator) 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 einem 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:

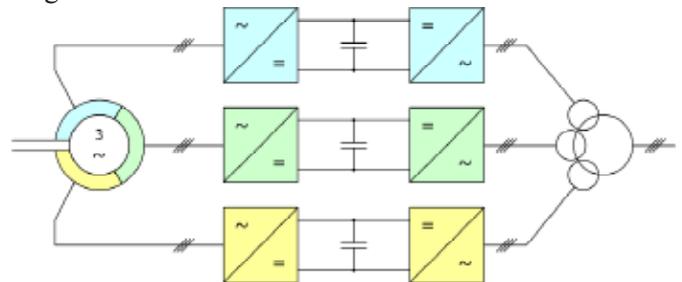


Abb.2: Gesamtsystem

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 das 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.

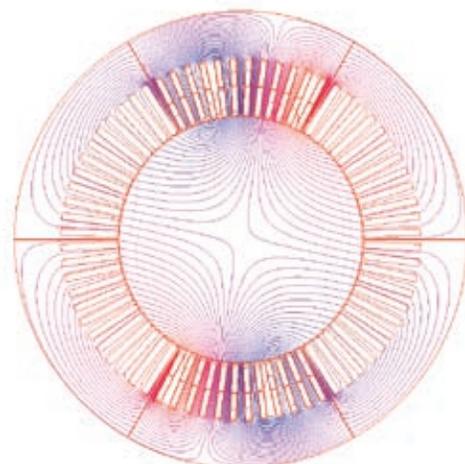


Abb.3: Feldlinienverlauf bei einem ausgefallenen Segment

Belastungsminimale Regelung von Windenergieanlagen

Die Struktur der Energieversorgung hat sich in den vergangenen Jahren stark geändert. Der Weg zu regenerativen Energiequellen wird deutlich intensiver verfolgt. In diesem Bereich spielt die Windenergie mit der Installation von neuen und leistungsstärkeren Anlagen eine große Rolle.

Aufgrund der erheblichen Leistungssteigerungen kommen die heutigen Anlagen in Auslegungsbereiche, in denen mechanische Belastungen auftreten, die mit herkömmlichen Industrieanlagen nicht mehr vergleichbar sind. Hierunter fallen hohe Spitzendrehmomente und dynamische Lastwechseleinflüsse, die sich auf den gesamten Triebstrang übertragen. Der Triebstrang unterliegt damit hohen dynamischen Belastungen, da er die direkte Verbindung zwischen dem Rotor und dem Generator-Umrichter-System darstellt. In dieser Funktion muss der Triebstrang sowohl die Dynamik der Windlasten über den Rotor als auch die Dynamik des elektrischen Netzes über den Generator aufnehmen. Der Triebstrang einer Windenergieanlage umfasst sämtliche Komponenten der gesamten Wirkungskette der elektromechanischen Energiewandlung vom Rotor bis zur Netzeinspeisung.

Mit der stark anwachsenden Anlagengröße und der anstehenden Verbreitung von Offshore-Anlagen sind detaillierte Untersuchungen zur stationären und dynamischen Beanspruchung des gesamten Triebstranges erforderlich. Eine Berücksichtigung der Wechselwirkung der mechanischen und elektrischen Komponenten ist dabei unerlässlich, um gesicherte Vorhersagen zur Lebensdauer einzelner Komponenten und damit zur Nutzungsdauer der gesamten Anlage machen zu können.

Im Rahmen der aktuellen Forschung am IALB, die unter anderem in Kooperation mit der Technischen Universität Dresden durchgeführt wird, sollen für die kleinen und mittelständischen Unternehmen der Windenergie-technik die Grundlagen für die Dimensionierung dynamisch optimal abgestimmter Triebstränge geschaffen werden. Die Erhöhung der Anlagenlaufzeit soll durch eine mechanisch schonende Betriebsweise ermöglicht werden. Ziel ist es zudem, die zu erwartenden Forschungsergebnisse sowohl auf Anlagen kleinerer als auch größerer Leistung zu übertragen.

Die Basis für die bisherigen Forschungsarbeiten war die Erstellung eines detaillierten Modells einer Windenergieanlage, das neben der Nachbildung verschiedener elektrischer Zusammenhänge eine Mehrkörpersimulation des Antriebsstranges (MKS) beinhaltet. Auf der Grundlage des Modells der Windenergieanlage wurde ein Online-Beobachtungssystem zur Erfassung nicht direkt messbarer Größen entwickelt, das u.a. die Bestimmung der Wellentorsionsmomente ermöglicht. Die Kenntnis der Wellentorsionsmomente ist ein entscheidendes Kriterium für die Entwicklung einer belastungsminimalen Regelung.

Zur direkten experimentellen Untersuchung ist am IALB in einem Versuchs- und Demonstrationsprüfstand der Antriebsstrang einer Windenergieanlage nachgebildet. Dieser soll die Verifizierung der aus Simulationen gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen und stellt die Basis zur Realisierung des Online-Beobachtungssystems und der belastungsminimalen Regelung dar.



Abb.1: Prüfstand zur Untersuchung der dynamischen Belastungen in Antriebssträngen

Drehzahlregelung von Asynchronmaschinen mit optimiertem Sättigungsmodell

In der heutigen Zeit wird der energiebewusste Betrieb unserer elektrischen Maschinen aus ökonomischen und ökologischen Gründen immer wichtiger. Für die Industrie ist der Rotorfluss-orientierte Ansatz zur hochdynamischen Regelung von Asynchronmaschinen (ASM) zum Standard geworden.

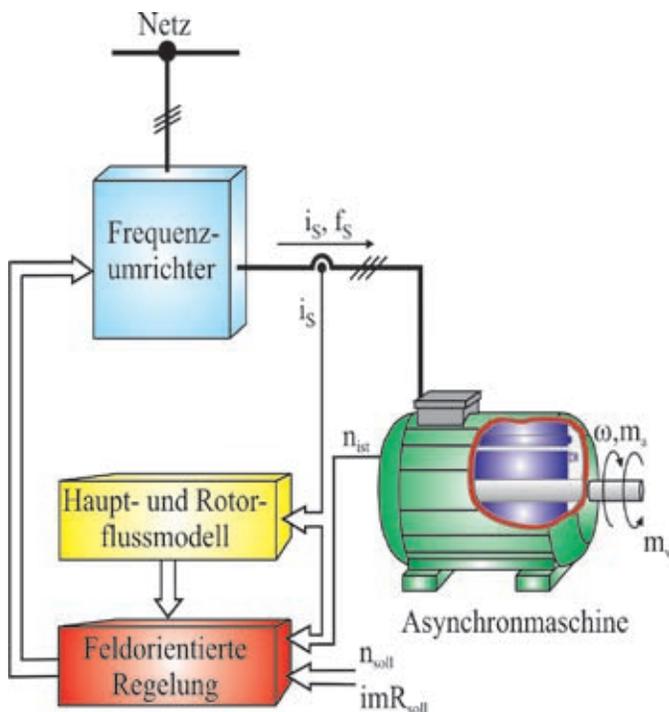


Abb.1: System der geregelten ASM

Dafür ist die Kenntnis der Flusswelle in der Maschine Grundvoraussetzung. Moderne, modellbasierte Regelverfahren bieten unterschiedliche Möglichkeiten, über sogenannte Flussmodelle diese Voraussetzung zu erfüllen. In typischen magnetisch gesättigten Asynchronmaschinen ist die Güte eines solchen Flussmodells ohne Berücksichtigung der Sättigung nicht optimal, wodurch die Ausnutzung sinkt und die Verluste steigen. Hier besteht Einsparungspotential.

Die Forschung hat diesen Bedarf erkannt und Modelle entwickelt, welche die Sättigung in Abhängigkeit von der am Rotor anliegenden magn. Flusswelle berücksichtigen. In der Realität ist jedoch eine stärkere Verbindung zum Hauptfeld beobachtbar, was sich mit bisherigen Sättigungsmodellen darin bemerkbar macht, dass die Effizienz zwar steigt, aber eine Abhängigkeit von der mechanischen Last bestehen bleibt.

Am IALB werden neben sensorlosen Flussmodellen auch solche zur effizienzoptimalen, feldorientierten Drehzahlregelung der ASM entwickelt, die eine hinreichend genaue Berechnung des Flussvektors und damit des

umlaufenden Drehfeldes in der Maschine ermöglichen. Dazu wurde sowohl eine mit dem Hauptfeld synchrone Berücksichtigung von Sättigungseinflüssen bei den Modellparameter geschaffen, als auch deren Verbindung mit einer klassischen rotorfeldorientierten Regelung realisiert: Nach Offline-Identifikation der Maschinenparameter in Abhängigkeit vom Hauptfeld werden diese über Tabellen der feldorientierten Regelung zur Verfügung gestellt. Dabei liefert das Flussmodell neben dem zur Regelung nötigen Rotorflussvektor gleichzeitig auch den zur Parameteradaption nötigen Hauptflussvektor.

In Abb. 2 sind Messergebnisse dazu sichtbar, wobei Kanal 1 (gelb) die Drehzahl, 2 den Phasenstrom und 3 das Lastmoment darstellen. Bei Umschaltung des verwendeten Flussmodells von Rotorfluss-abhängiger Sättigung auf die neue Struktur ergibt sich unter Nennlast eine Verminderung der Phasenstromamplitude um ca. 5%, bzw. der dadurch bedingten Kupferverluste um ca. 10%.

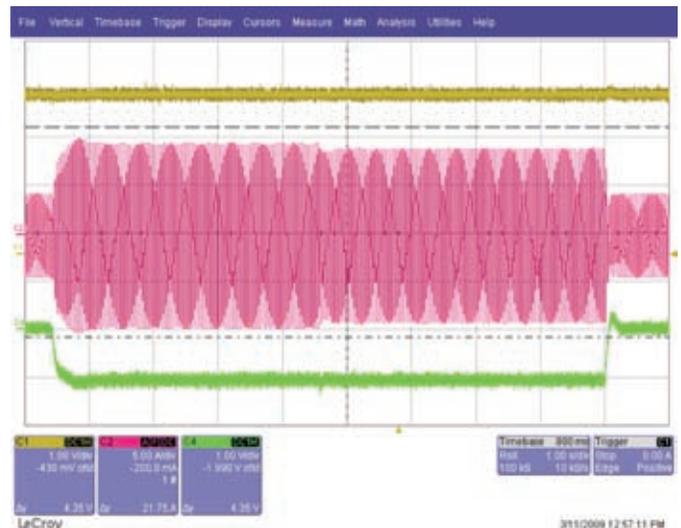


Abb.2: Messung zum Modellvergleich

Hochdynamisch bleibt die Drehzahlregelung völlig unverändert. Zusätzlich ist die Inbetriebnahme nach einmaliger Erfassung der Kennlinien (s.o.) deutlich einfacher, da der jeweilige Betriebspunkt sich automatisch einstellt.

Das gleiche Prinzip wird auch der drehgeberlosen Regelung dienen können, da die bessere Erfassung der Flussvektorlage dort das entscheidende Stabilitätskriterium darstellt. Damit werden herkömmliche Strukturen mit kleinen Änderungen signifikant verbessert und unterstützen ökologische und ökonomische Zielsetzungen.

Entwurf eines Diagnosesystems für umrichter- gespeiste Linearantriebe

Für die in Abb. 1 dargestellte Konfiguration des Linearachsen-Prüfstandes wurden unterschiedliche Methoden zur Erkennung von Fehler des Antriebes entwickelt. Der Prüfstand beinhaltet einen Diagnose-PC (Laptop), eine SPS mit verschiedenen Einschub-Modulen, zwei Frequenzumrichter zur Ansteuerung und Regelung der Antriebsmotoren, sowie zwei Linearachsen.

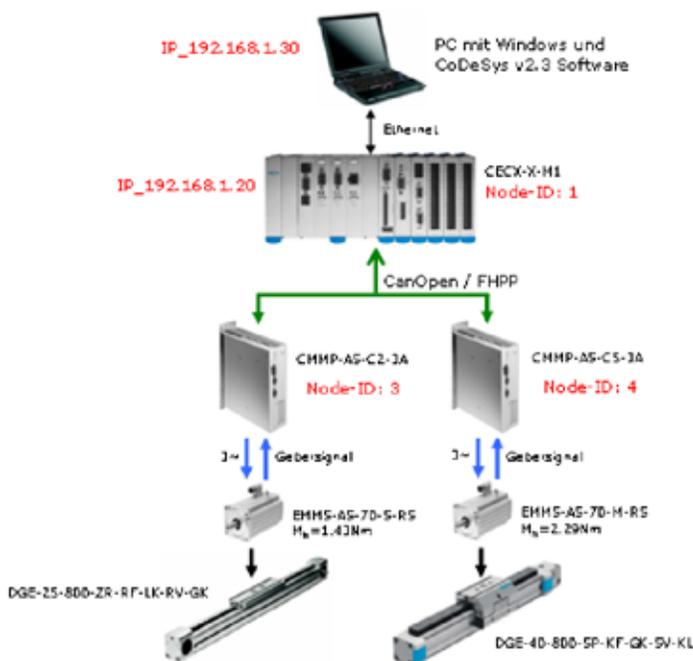


Abb.1: Übersicht der Hardwarekomponenten

Es kann sowohl eine Linearachse mit Riementrieb und zugehörigem Umrichter, als auch eine Achse mit Spindeltrieb und zugehörigem Umrichter am Prüfstand betrieben werden; beide Systeme sind am IALB aufgebaut und in Betrieb genommen worden. Mögliche Fehler, die mit diesem Diagnose-System erkannt werden sollen, sind:

- erhöhte Reibung in den Linearführungen
- Überspringen bzw. Dauerschwingen
- Bruch / Riss der mechanischen Kraftübertragung
- Vorspannungsverlust im Kraftübertragungsweg
- Blockade des Antriebs

Mit dem existierenden Systemaufbau wie in Abb.1 dargestellt, kann eine Diagnose für die zuvor beschriebenen Fehlerursachen angewendet werden, ohne zusätzliche Hardware oder andere Diagnoseprinzipien zu berücksichtigen. Durch Plausibilitätsabfragen und Vergleich mit einem bei Neuinstallation einer Linearführung hinterlegten Freigabeverlauf, lassen sich prinzipiell Änderungen des Antriebstranges erkennen.

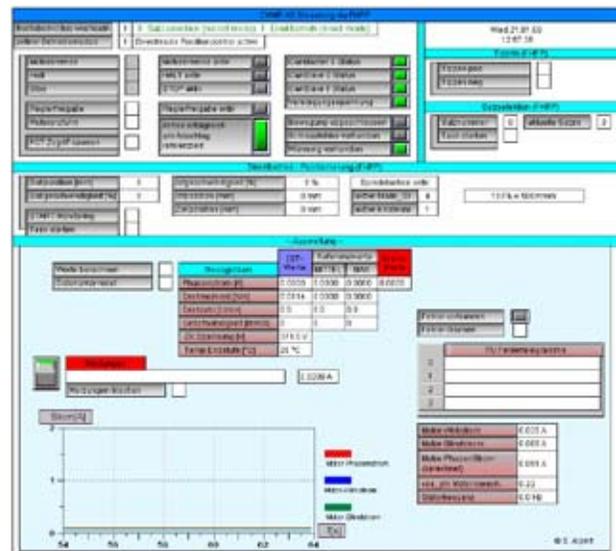


Abb.2: Visualisierung auf dem Prüfstand

In Abb.2 ist die gesamte Bedienoberfläche des Prüfstands dargestellt. Die Visualisierung greift auf die Steuerung über das FHPP Protokoll zurück und enthält die entworfenen Diagnosefunktionen.

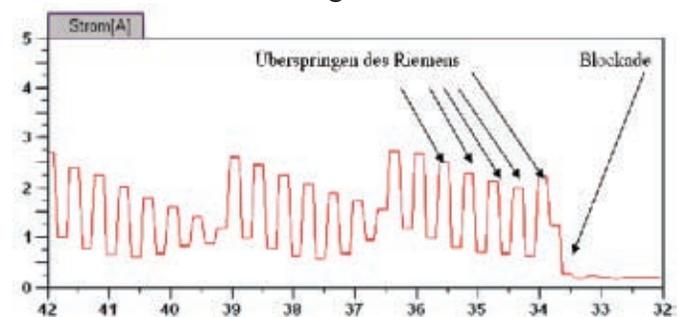


Abb.3: Messung beim Durchrutschen des Riementriebs

Bei der Messung in Abb. 3 ist das Durchrutschen des Riementriebs beim Linearantrieb zu sehen. Bei dieser Messung lässt sich jedes Überspringen des Riementriebs erkennen. Durch das vom IALB entwickelte Diagnosesystem lassen sich aus der Messung der zur Verfügung stehenden Größen unterschiedliche Arten von Fehlern erkennen und unterscheiden.

Single-Phase Resonant Converter with PFC for Aircraft

With the advent of modern entertainment equipment, burden on auxiliary power supply for aircraft gallery equipment has increased substantially. This requires increased output power at an improved efficiency. For above mentioned application a new power supply unit (PSU) has been developed and block diagram for the same is shown in Figure-1. PSU has been developed in cooperation bet-

- Variable input voltage range 90-130 VAC @ 360-800 Hz
- Output voltage 28 V

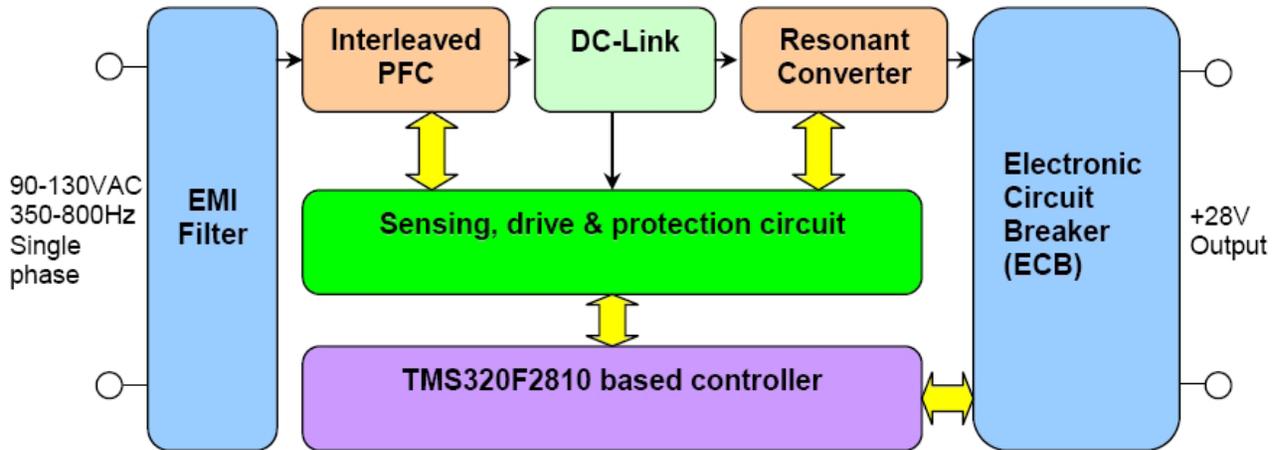


Figure-1 PSU system block diagram

ween AES Aircraft Elektro/Elektronik System GmbH and Bremer Centrum für Mechatronik (BCM).

- Output power 200 Watt
- Input/Output galvanic isolated
- Single phase interleaved PFC stage
- Efficiency > 90% @ full load

Power factor correction (PFC) stage implements state-of-the-art interleaved technology to reduce the input current



Figure-2 PSU system prototype

harmonics and has no external cooling requirements. It reduces also the burden on input EMI filter. Front end implements an LLC type half bridge resonant converter with integrated magnetics to reduce the component count.

- Survival temperature -55° C - +85° C
- Input UV, OV and over current protection
- Output implements Electronic Circuit Breaker (ECB)

PSU implements a complete digital control algorithm for both PFC and resonant converter. Software has been written using function block diagram (FBD) methodology to minimize error while integrity of the building blocks can be verified independent of the application software.

PSU specifications are as under,

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 Zellenumrichter erlangen derzeit im Mittelspan-

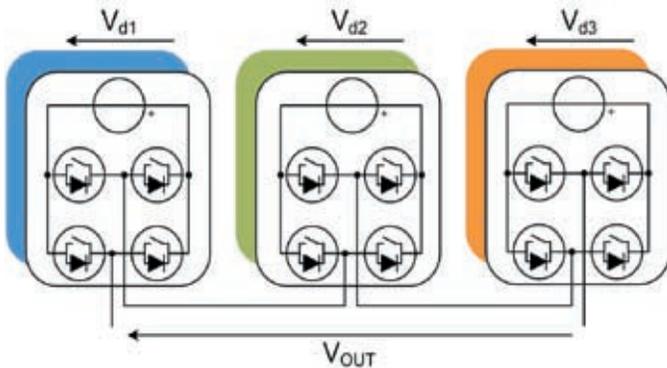


Abb.1: Dreistufiger Zellenumrichter

nungsbereich 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 750 V 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 Aus-

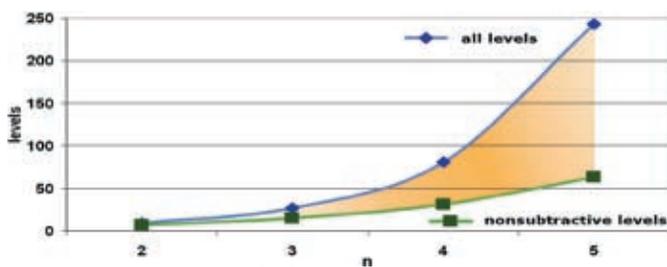


Abb.3: Subtraktive Level

gangszustände einnehmen kann. Vereinfacht kann jeder 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 zusammensetzt. Dabei kommt es zu Energieeinspeisungen 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 Fre-

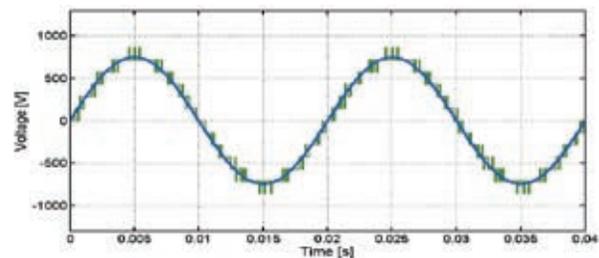


Abb.2: Ausgangsspannung

quenzumrichter“ von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt. Das Ziel ist, mit dem neuen Ansatz des „programmgesteuerten Modulators“ ein Modulationsverfahren für kaskadierte Multi-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.

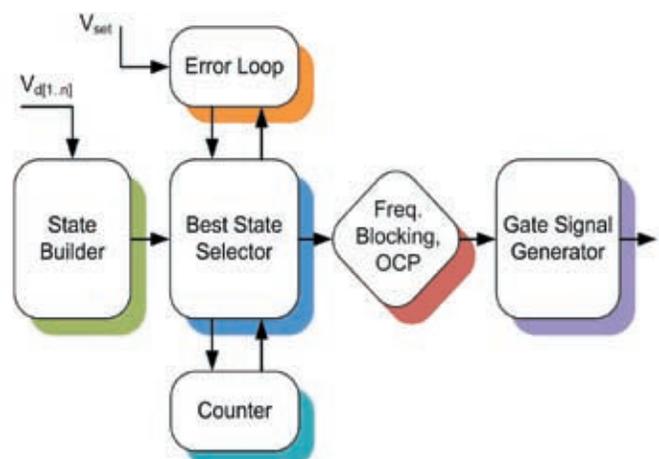


Abb.4: Blockdiagramm

EMI Simulation Modeling for Power Converters

System integration has seen an enormous growth as never before. This trend has been forcing its way not only in the handheld devices but also in the industrial applications of the power converters. Reduced space in the later case compels the packaging of intelligent microcontroller based systems along with high voltage and current switching elements. Problem has far reaching effects beyond the mechanical domain and causes Electromagnetic Interference (EMI) within the subsystems, results in the conducted EMI to the grid or interference to the nearby equipment.

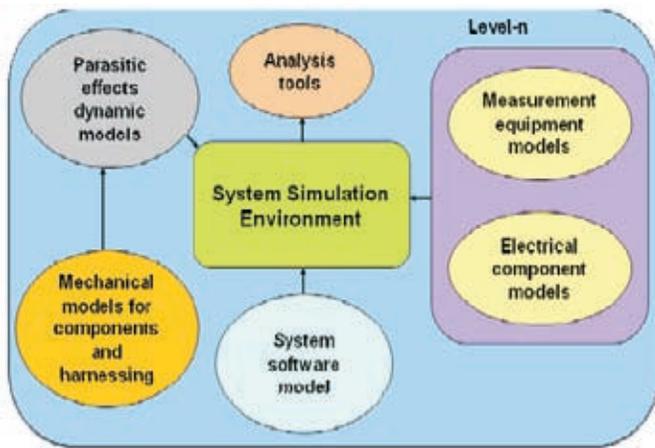


Figure-1 Software frame work

In the wake of above problems, regulatory authorities such as IEC, CISPR, FCC and EU require electromagnetic compatibility (EMC) compliance for any equipment intended for commercial or household markets.

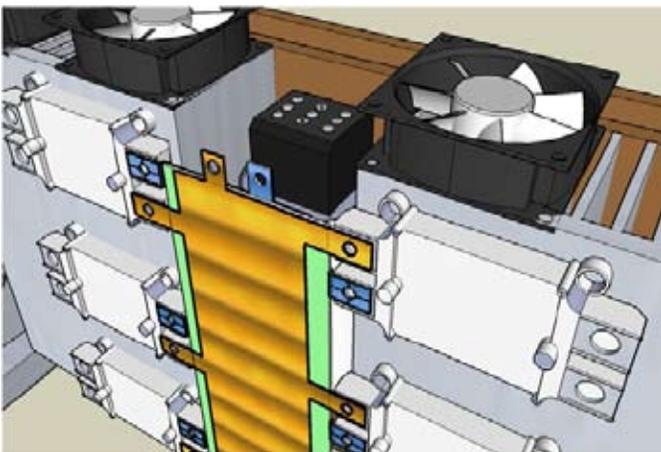


Figure-2 Mechanical structure

Standard development cycle requires EMC compliance testing at the end of the product development cycle. This can result from minor changes to complete overhaul of the product depending on the acuteness of the problem. If insight into the EMI problems can be acquired at the

development stage or even earlier at simulation stage, it becomes easier to integrate solution at the development stage. Major hurdle in the prediction of the EMI problems is its diverse nature. Electrical simulation models are insufficient and require integration of parasitic effects dependent on the mechanical layout. Hence a software frame work is needed to produce any viable solution.

Figure-1 shows the software frame work structure which uses multiple software to generate integrated simulation model both for electrical as well as parasitic effects.

Detailed mechanical layout of system components is utmost necessary for any reliable prediction. Unnecessary model detail can slow the simulation hence a compromise for model detail and simulation time has to be reached.

Also at the simulation stage it is possible to predict the geometry dependent DC current distribution in the bus bar. This helps to select better form factor for bus bar. Figure-3 shows the current distribution in plane bus bar.

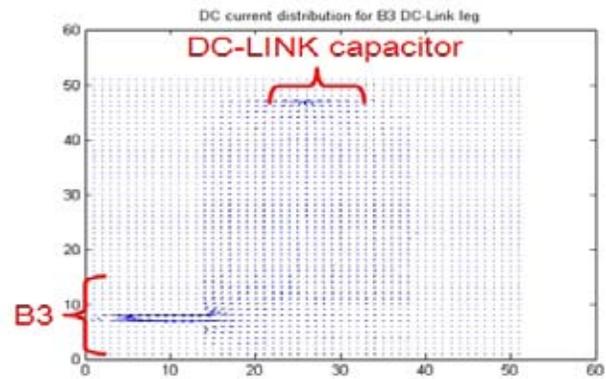


Figure-3 DC current distribution in bus bar

A simulation model for 30 KVA Frequency converter as shown in Figure-2 has been developed and measured vs simulated conducted EMI noise levels as shown in Figure-4.

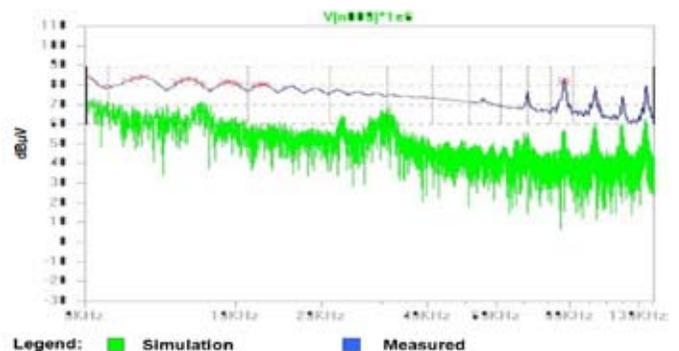


Figure-4 Conducted EMI

Regelung unsymmetrisch belasteter Inselnetze durch unabhängige Wechselrichter im Parallelbetrieb

Eine sichere wirtschaftliche und umweltverträgliche Energieversorgung ist das Rückrat jeder modernen Volkswirtschaft. In den Entwicklungsländern ist dies jedoch größtenteils nicht gegeben. Da es dort kein flächendeckendes Verbundnetz gibt, ist eine Energieversorgung nur über so genannte dezentrale Inselnetze möglich. Das IALB beschäftigt sich mit der Regelung solcher Inselnetze, die von mehreren Einspeiseeinheiten aus vorwiegend regenerativen Quellen gespeist werden.

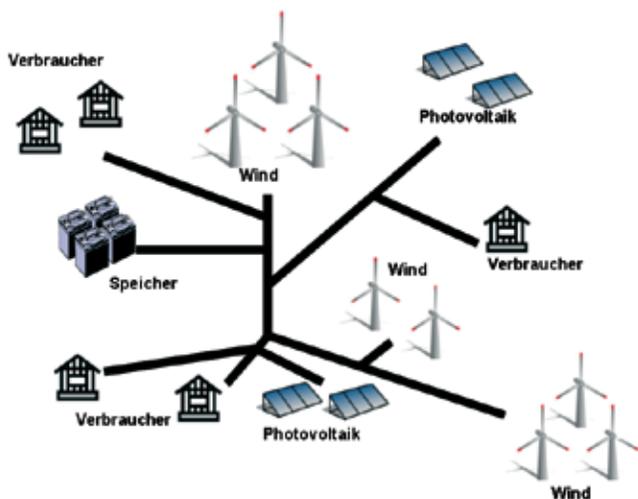


Abb.1: Beispielhafte Struktur eines Inselnetzes

In Bild 1 ist beispielhaft der Aufbau eines solchen Inselnetzes zu sehen. Die Einspeiseeinheiten versorgen das Netz z. B. aus der Sonnen- oder der Windenergie über Frequenzumrichter. Es entsteht also eine Parallelschaltung mehrerer Wechselrichter, die aufgrund der geringen Zeitkonstanten dieser Systeme eine schnelle Regelung erfordern.

Die Energieversorgung des Inselnetzes über die unterschiedlichen Einspeiseeinheiten sollte eine möglichst große Modularität und Redundanz aufweisen. Es konnte schließlich ein System entwickelt werden, das gänzlich auf Kommunikationsverbindungen der einzelnen Einspeiseeinheiten untereinander verzichtet, so dass weitere Einspeiseeinheiten jederzeit dem Netz zugeschaltet werden können. Damit ist die Realisierung eines Inselnetzes nach dem „Plug & Generate“ Prinzip möglich (siehe Abb. 2).

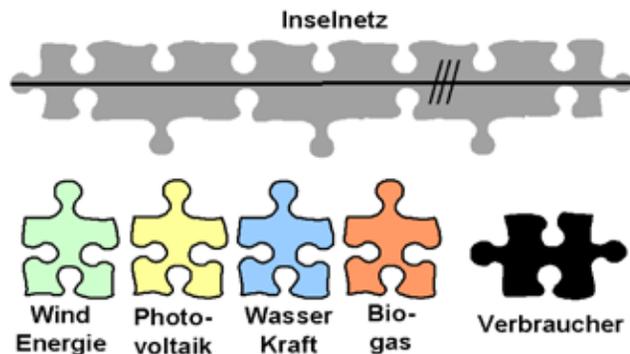


Abb.2: Inselnetz als „Plug & Generate“ System

In Bild 3 ist die Messung der Lastaufteilung beim Zuschalten einer zweiten Einspeiseeinheit zu sehen. Nachdem anfangs die Einspeiseeinheit 1 die gesamte Leistung übernimmt (P_{WR1}) wird die Leistung nach dem Zuschalten der zweiten Einheit zu gleichen Teilen zwischen den beiden Einspeiseeinheiten aufgeteilt (P_{WR1} und P_{WR2}). Darunter sind der Strom der zweiten Einspeiseeinheit und die Netzspannung zu sehen.

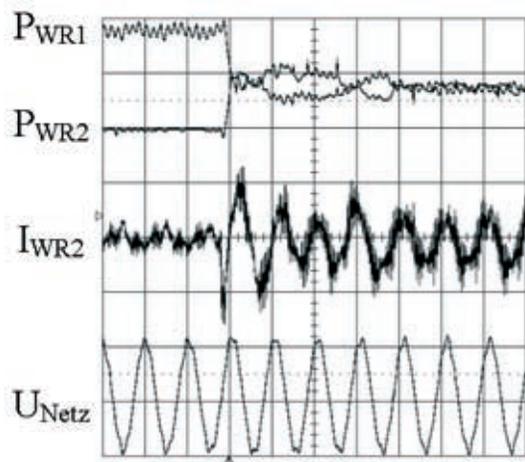


Abb.3: Lastaufteilung beim Zuschalten einer zweiten Einspeiseeinheit

Mit der am IALB entwickelten Inselnetzregelung ist die dreiphasige Versorgung von abgelegenen Regionen mit elektrischer Energie möglich. Auch bei einer unsymmetrischen Belastung des Netzes wird eine symmetrische Spannung von hoher Qualität bereit gestellt.

Beanspruchungsgerechte Regelung elastisch gekoppelter Mehrmassensysteme

Viele technische Systeme, wie z.B. Produktionsanlagen, Fertigungsstraßen oder Windenergieanlagen enthalten Antriebsstränge mit mehreren bewegten Einzelmassen, die über mechanische Koppellemente, wie Kupplungen und Getrieben, etc., elastisch miteinander gekoppelt sind. Um diese mechanischen Koppellemente nicht zu großen dynamischen Beanspruchungen auszusetzen und Schäden zu vermeiden, werden die Antriebsstränge in der Praxis nur mit niedriger Dynamik betrieben.

Zur Erzeugung der Bewegung in langsam laufenden Arbeitsmaschinen werden gegenwärtig überwiegend Getriebemotoren eingesetzt. Um die geforderten Kräfte bei einem akzeptablen Gesamtgewicht der Antriebe realisieren zu können, werden dabei schnell laufende Elektromotoren mit stark untersetzenden Getrieben kombiniert. Allerdings weisen Getriebe signifikante Elastizitäten auf, die die Steifigkeit des Antriebsstrangs beschränken und ihn zu einem elastisch gekoppelten Mehrmassensystem machen.

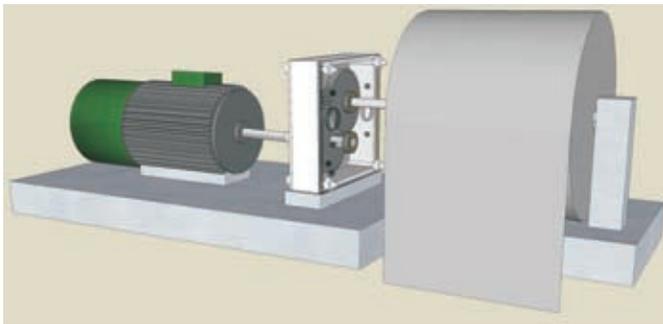


Abb.1: Beispiel eines Mehrmassensystems

Ziel des Forschungsvorhabens am IALB ist es, neue Regelungskonzepte für elastisch gekoppelte Mehrmassensysteme zu erforschen, die den Betrieb mit möglichst hoher Dynamik ermöglichen, dabei aber die Belastungsgrenzwerte in den Koppellementen einhalten, so dass eine Beeinträchtigung der Lebensdauer vermieden wird.

Dazu wird das Torsionsmoment nicht nur zur aktiven Schwingungsdämpfung zurückgeführt, sondern es wird zur Regelgröße einer unterlagerten Torsionsmomentregelung gemacht. Damit eröffnet sich eine Möglichkeit, über die Form, bzw. Begrenzung des Torsionsmoment-Sollwertes eine Begrenzung der Belastungen im Getriebe bei maximaler Dynamik des Antriebsstrangs zu erreichen.

Für ein elastisch gekoppelte Zweimassensystems ohne Lose als einfachsten Fall ist eine Torsionsmoment-Regelung entworfen und simuliert worden.

Der Sollwert für den inneren Regelkreis ist der geforderte Ruck an der Welle. Der Sollwert wird zunächst auf den Maximalwert begrenzt und dann über ein Vorfilter auf eine Zustandsrückführung aufgeschaltet. Diesem inneren Regelkreis kann nun der Regler für das tatsächliche Torsionsmoment der Welle überlagert werden. Der Sollwert des Torsionsmomentes wird dabei ebenfalls auf einen Maximalwert begrenzt.

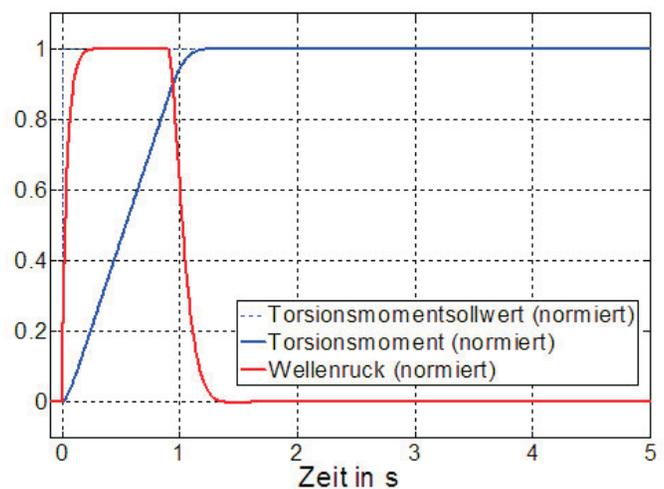


Abb.2: Simulierte Sprungantwort

Wie zu erkennen ist, können mit diesem Konzept sowohl das Wellenmoment, als auch dessen Ableitung gezielt geregelt und begrenzt werden. Damit eröffnet sich eine Perspektive zur Verbesserung der dynamischen Eigenschaften von Antrieben mit Getrieben unter Einhaltung mechanischer Belastungsgrenzen.

Ein großer Vorteil dieses Ansatzes gegenüber einer Führungsgrößen-Formung liegt darin, dass die Regelung des Torsionsmomentes nicht nur bei Änderungen der Führungsgröße greift, sondern auch bei Belastungsänderungen. Die Torsionsmoment-Regelung wirkt also so auf das Antriebsmoment, dass auch bei Laständerungen die maximal zulässigen Werte des Torsionsmoments und seiner zeitlichen Ableitung eingehalten werden.

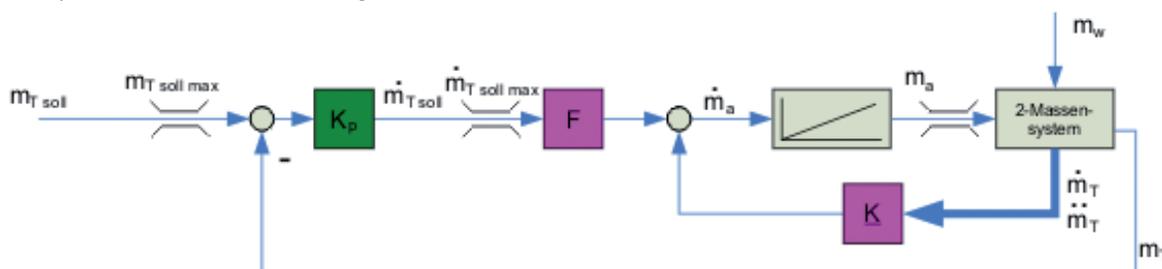


Abb.3: Prinzip der Torsionsmoment-Regelung

Erweiterungssteckkarte zum Evaluation-Board mit TI TMS320-F2812 / F28335

In der Antriebstechnik ist die Nachfrage nach leistungsfähigen Controller- und Mikrorechnerkarten in den letzten Jahren ständig gestiegen. In den früheren Jahrbüchern wurde kontinuierlich über die Entwicklung der am IALB entwickelten und aufgebauten Rechnerkarte mit dem Texas Instruments DSP TMS320-F2812 berichtet. Im Jahr 2008 wurde entschieden, von diesem Weg abzuweichen und zukünftig nur noch Ergänzungssteckkarten für das Evaluation-Board der Firma Spectrum Digital zu entwickeln. Hierdurch entfällt die oft sehr zeitaufwendige Inbetriebnahme des DSPs, und der DSP-Austausch wird stark vereinfacht, weil am Institut nur noch die gesockelten Versionen des Evaluation-Boards zum Einsatz kommen. Ein zeitaufwendiges Aus- und Wiedereinlöten entfällt somit.

Die Hauptaufgabe bei der Entwicklung der Erweiterungskarte bestand darin eine Schaltung bzw. Schaltungsteile zu entwerfen, die einen Basisbetrieb an fast allen Prüfständen des IALB ermöglichen. Aus dieser Auflage resultierte eine Schaltung, die folgenden Komponenten enthält:

1. 16 Bit Analog/Digital-Wandlung für 12 analoge Messsignale, wie Ströme und Spannungen mit Pegeln von ± 10 Volt. Zum Einsatz kommen zwei A/D-Wandler mit jeweils sechs Kanälen, deren Eingänge zum Schutz gegen hochfrequente Störungen, Überspannungen und zur Einstellung der Verstärkung mit einer komplexen analogen Tiefpassfilterung 1. Ordnung versehen sind. Durch die Platzierung von Leergehäusen wird der Möglichkeit Rechnung getragen, die Filterung an veränderte Eingangsbedingungen anzupassen. Um auch größere Lasten treiben zu können, wurde zusätzlich ein Impedanzwandler integriert.

2. 16 Bit D/A-Wandler mit vier analogen Ausgängen und Pegeln von ± 10 Volt. Eine D/A-Wandlung ist für Debugging und Inbetriebnahmen unerlässlich; die notwendigen digitalen Spannungspegel werden über Bustransceiver auf das notwendige Niveau angehoben, außerdem ist hierdurch eine Abkopplung vom Datenbus möglich.

3. Die „Winkel-Geber-Schaltung“, die es unter Einbeziehung des Quadraturencoders (QEP-Einheit) des DSP ermöglicht, die Sinus- und Cosinus-Spur eines angeschlossenen Motors 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 Schaltung zur Wandlung des DSP-SCI-Signals in das weit verbreitete RS232-Signal, so dass hierüber Daten empfangen (RX-Signal) und gesendet (TX-Signal) werden können.

5. Die PWM-Verriegelung, die dafür sorgt, dass die IGBT der oberen und unteren Halbbrücke nicht gleichzeitig anschalten können.

In der Abbildung 1 sind die zusammengesteckten Leiterplatten zu sehen. Oben befindet sich das Evaluation-Board darunter die am IALB entwickelte und auch bestückte Erweiterungssteckkarte, welche sowohl mit dem Evaluation-Board mit TMS320F-2812 als auch mit dem 320F-28335 (enthält zusätzlich eine Floating-Point-Einheit) verwendet werden kann. Es handelt sich um die bereits erweiterte Basisversion der Steckkarte, welche um 4 x 4 Lichtwellenleiterkanäle (12x TX und 4x RX) sowie die Anschlussmöglichkeit an einen weit verbreiten Umrichtertyp ergänzt wurde. Die Lichtwellenleiteranschlüsse sind jeweils rechts und links zu sehen (graue und schwarze Bauteile). Außerdem sieht man die mit Kühlkörpern versehenen Festspannungsregler (oben links) sowie den Sub-D-Anschluss für den Winkelgeber (unten rechts).

Ausblick: In den kommenden Monaten wird die Erweiterungskarte für die verschiedenen Anwendungsgebiete und Umrichtertypen angepasst werden, sodass sich auch ihre physikalische Größe, je nach Reglerkassette, ändern wird.

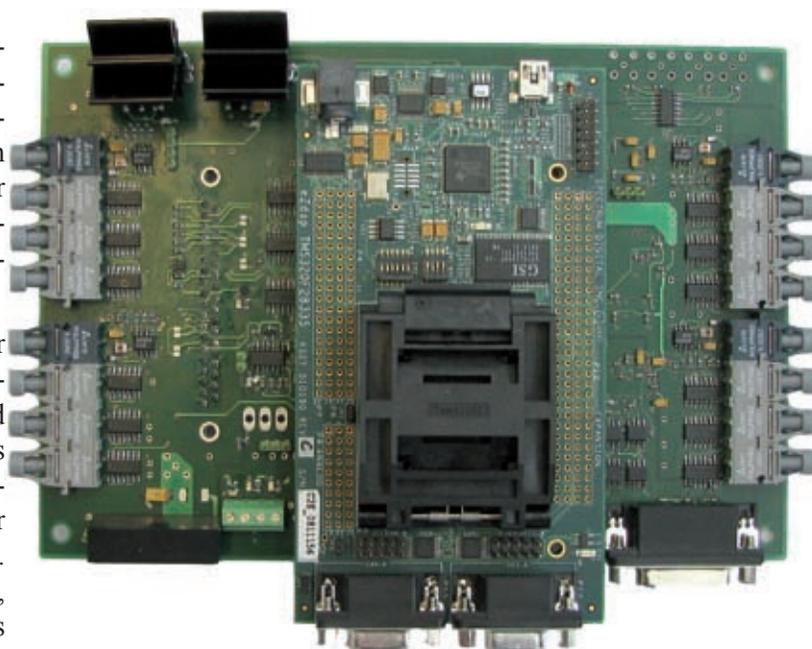


Abb.1: Erweiterungskarte mit aufgestecktem Evaluation-Board

Waveletbasierte Echtzeit-Signalverarbeitung zur Überwachung von Prozess- und Maschinenzustandsänderungen

Bei höherwertigen Aufgaben wie der Erkennung von Werkzeugzuständen oder der Lager- und Getriebeüberwachung ergeben sich häufig überlagerte Zustandsänderungen oder geringe Nutzpegel der relevanten Signalerscheinungen, sodass sich die Bestimmung einfacher Grenzwerte als schwierig erweist. Die ständig weiter entwickelten Zeit-Frequenztransformationen erweisen sich als ein wertvolles Werkzeug, um transiente, instationäre, nichtperiodische oder stochastische Signalvorgänge anhand der zeitlich aufgelösten Spektren zu erkennen. Als populärer Vertreter moderner Zeit-Frequenzanalysen bietet die Wavelettransformation gegenüber der gefensternten Fouriertransformation (STFT) den Vorteil, kurzweilige Ereignisse zeitlich höher aufzulösen als langweilige. Der hier vorgestellte Ansatz zur Zustandsüberwachung besteht darin, die Wavelets direkt aus den überwachungsrelevanten Signalvorgängen zu generieren.

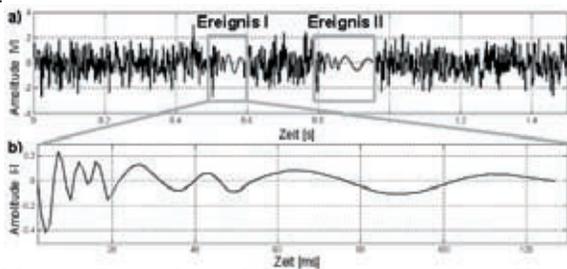


Abb.1: a) Beispielsignal, b) prozessangepasstes Wavelet
Zur Demonstration des Verfahrens wird in Bild 1a ein Beispielsignal angeführt. Die zu erkennenden Signalereignisse in den markierten Intervallen beinhalten mehrere Frequenzkomponenten und liegen in zwei unterschiedlichen Periodenlängen vor. Mit einem aus dem Ereignis I generierten Wavelet in Bild 1b wird eine kontinuierliche Selflettransformation (CST) des Beispielsignals durchgeführt.

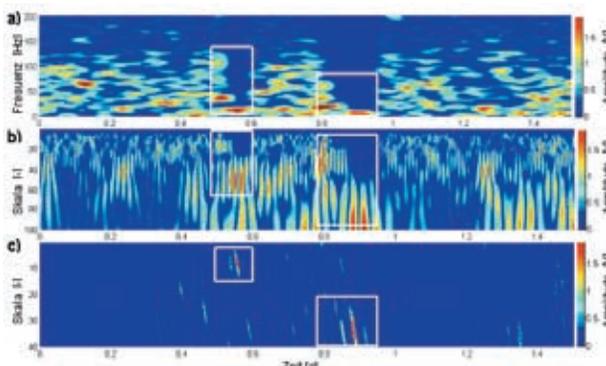


Abb.2: Koeffizientenvergleich: a) STFT, b) CWT, c) CST
Bei den drei verglichenen Transformatoren in Bild 2 wird die Zeit über die X-Achse und die Amplitude über die Farbskala dargestellt. Die spektrale Zerlegung erfolgt entlang der Y-Achse vom langwelligen (unten) in den kurzwelligen Bereich (oben). Dabei ist die Art der spektralen Zerlegung für das jeweilige Verfahren unterschiedlich.

Zu den bedeutendsten Überwachungsanwendungen zählt neben der Wellen-, Lager- oder Getriebeüberwachung die Pumpenüberwachung. Neben der Überwachung von Stöorzuständen der mechanischen Komponenten ist das Erkennen von Prozessstörungen wie z. B. Überdruck-

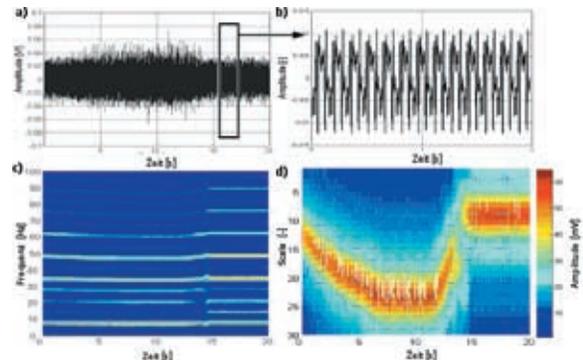
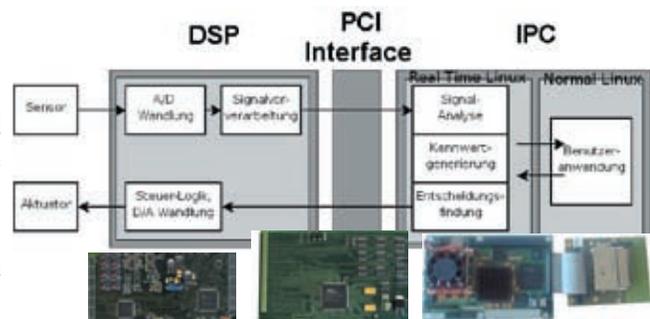


Abb.3: Überdruckeinfluss im Körperschall:
a) Zeitsignal, b) Selflet, c) STFT, d) CST

Trockenlauf und Kavitationssituationen von besonderem Interesse. Für das in Bild 3a exemplarisch dargestellte Körperschallsignal wurde der Pumpendruck kontinuierlich bis in den kritischen Überdruckbereich erhöht und wieder auf das Ausgangsniveau gedrosselt. Der geringe Amplitudenanstieg infolge der Druckerhöhung erweist sich für eine zuverlässige Überdruckererkennung als ungeeignet. Aufgrund des unregelmäßigen Antriebs resultieren aus dem Druckanstieg Rückwirkungen auf die Drehzahl, die im Körperschall detektiert werden können. Der verzerrte Signalcharakter der Drehperiode wird durch die STFT in Bild 3c durch ein Linienpektrum mit vielen höheren Harmonischen dargestellt. Die Drehfrequenz ändert sich lediglich von 6,7 auf 6,5 Hz. Das Linienpektrum aus der STFT wird in den Selfletkoeffizienten in Bild 3d auf eine Skala komprimiert dargestellt.

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



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd 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 erneut von Herrn Dr.-Ing. Thorsten Völker 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 Grundschaltungen die netzgeführten Stromrichter eingeführt. An der dreipulsigen Mittelpunktschaltung werden die Kommutierung und der Lückbetrieb erläutert. Abschließend werden die Ergebnisse auf die sechspulsige Brückenschaltung übertragen.

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

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

Praktikum Antriebs- und Stromrichtertechnik

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

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

Antriebsregelung und Mechatronik I

Die Veranstaltung beginnt mit einigen mechanischen Grundlagen. Daran schließt sich ein kurzes Kapitel über die Erwärmung elektrischer Maschinen an. Danach werden die dynamischen Eigenschaften und die Regelung von Gleichstrommaschinen behandelt. Einen Schwerpunkt bildet dabei die Ableitung und Diskussion der Regelstrategie für fremderregte Gleichstrommaschinen, die als allgemeines Grundregelverfahren angesehen werden kann.

Die Regelung von Drehfeldmaschinen beginnt mit der Einführung der Vektordarstellung (Raumzeiger), an die die Ableitung des dynamischen Verhaltens anschließt. Das Prinzip der Feldorientierung wird ausführlich erläutert und die Theorie zur feldorientierten Regelung bis hin zur Umsetzung aufgearbeitet. Den Abschluss der Vorlesung bildet ein kurzes Kapitel über die Regelung permanenterregter Synchronmaschinen.

Für die Vorlesung steht ein Manuskript zur Verfügung.

Antriebsregelung und Mechatronik II

Gegenstand dieser Vorlesung sind Anwendungen elektrischer Antriebe in mechatronischen Systemen des Maschinen- und Anlagenbaus. Zuerst wird der Begriff „Mechatronik“ am Beispiel einer Farbmischanlage 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 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.



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.



Prof. Silber ist seit dem 01.08.06 im Ruhestand, wird aber seine Funktionen bis auf weiteres wahrnehmen.

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-Reflektion in der Kristallstrukturanalyse und der Optoelektronik usw.).

Modellbildung und Messverfahren für Leistungshalbleiterbauelemente

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

Konstruktion elektrischer Maschinen



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

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



Dr.-Ing. 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 werden die Theorie elektrischer Maschinen anhand der Themen Strombelags- und Induktionswellen, Berechnung der Induktivitäten der Maschine und Stromverdrängungseffekte behandelt.

Die Erwärmung und Kühlung ist für die Konstruktion elektrischer Maschinen von großer Bedeutung und bildet einen weiteren Schwerpunkt der Vorlesung.

Basierend auf diesen Kenntnissen werden die maschinencharakteristischen Parameter Drehmoment, Drehzahl, Leistung und Wirkungsgrad sowie deren Zusammenhänge in Abhängigkeit von konstruktiven Daten ermittelt. Dies erfolgt konkret für die Asynchronmaschine und die Synchronmaschine. Im letzten Teil der Vorlesung werden noch diverse Sondermaschinen für spezielle Einsatzgebiete betrachtet.

Ziel der Vorlesung ist die Vermittlung sowohl der theoretischen als auch der in der Praxis gängigen Methoden zur Maschinenberechnung, aufgrunddessen wird die Vorlesung in Zukunft „Berechnung elektrischer Maschinen“ genannt.

Mechatronische Antriebslösungen für Produktions- und Logistikaufgaben



Dr.-Ing. Edwin Kiel

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.

