

### **Liebe ehemalige und jetzige LEAner/innen, liebe Förderer des Fachgebiets LEA!**

Herzlich willkommen zur 15. Ausgabe unseres LEAiD-Newsletters. Einleitend möchte ich über ausgewählte Neuigkeiten des letzten Jahres bei LEA und dem Institut für Elektrotechnik berichten, ergänzt um wenige Neuigkeiten an der Universität Paderborn. Im letzten Berichtsjahr schieden die langjährigen Mitarbeiter T. Huber, M. Paradkar sowie A. Peters aus. Das Stellen neuer Forschungsanträge hat uns im Berichtsjahr massiv beschäftigt und erfreulicherweise sind auch eine Reihe genehmigt worden, welche die Einstellung neuer Mitarbeiter erlauben. Zunächst wurden Sören Hanke und Daniel Weber eingestellt; Weitere folgen im Laufe des Jahres 2016.

Bisher scheinen die vielfältigen Bauarbeiten der letzten Jahre an der Universität Paderborn erst mal abgeschlossen zu sein, aber der Abbau der Bahnstrecke des NBP Projekts wird 2016 begonnen. Offensichtlich hat die Stadt Paderborn das Gelände für die UPB vorreserviert, damit gegebenenfalls ein Gebäude für den Ausbau des Leichtbauschwerpunkts projektiert wird. Die UPB-Webseite zeigt neben der aktualisierten Luftaufnahme vom Campus ([groups.uni-paderborn.de/fotoarchiv/fotosluftaufnahmen.html](http://groups.uni-paderborn.de/fotoarchiv/fotosluftaufnahmen.html)) nun auch die erweiterten Sportanlagen.

Der zuletzt berufene Professor Daniel Quevedo arbeitet auf der Professur Regelungs- und Automatisierungstechnik auf dem Thema *model predictive control*, wodurch es Schnittmengen mit dem Fachgebiet LEA gibt.

### **Projekte bei LEA**

Was gibt es Neues von unserem Zusammenschluss der Hochschulen OWL im Rahmen des Spitzenclusters 'Intelligente Technische Systeme - it's OWL'? Denn dieses größte Projekt ruft weiter eine bemerkenswerte Öffentlichkeit in Wirtschaft und Wissenschaft hervor. Laut Presse war der Gemeinschaftsauftritt der Region OstWestfalenLippe auf der Hannover Messe 2016 wieder ein voller Erfolg. Bereits am Sonntag hatte der US Präsident Barack Obama und Bundeskanzlerin Angela Merkel Kontakt zu Harting. Während der Messe-Eröffnung war das Espelkamper Unternehmen für die Entwicklung eines Mini-Computers mit einem 100.000-Euro-Technologiepreis ausgezeichnet worden. Daneben hatten sich für den Industriepreis noch 3.000 Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Organisationen für den Industriepreis beworben. Daraus hat die Jury 14 Preisträger in verschiedenen Kategorien

ausgewählt. it's OWL wurde in der Kategorie 'Forschung und Entwicklung' für den erfolgreichen Technologietransfer in den Mittelstand ausgezeichnet. Auch NRW-Wirtschaftsminister Garrelt Duin überzeugte sich bei seinem Standrundgang von den Innovationen der Unternehmen aus OWL. „Die hohe Anzahl an Startups zeigt die Dynamik im Spitzencluster it's OWL. Gerade im Bereich der intelligenten Fertigung werden Geschäftspotenziale in erfolgreiche Unternehmensgründungen überführt. Hier liefert OWL eindrucksvolle Beispiele für die Innovationskraft Nordrhein-Westfalens“, sagte Duin.

Zudem haben 38 Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Organisationen anhand von Demonstratoren neue Lösungen für die 'Produktion von morgen' präsentiert und eindrucksvoll die Leistungsfähigkeit des Spitzenclusters auf einem gemeinsamen Messestand untermauert. Kontakte zu Partnernetzwerken wurden weiter vertieft.

LEA arbeitet im Clusterquerschnittsprojekt Energieeffizienz in intelligenten technischen Systemen an der Auswahl leistungselektronischer Schaltungen, Schalttechniken, der Erprobung von SiC und GaN Halbleiterbauelementen, Charakterisierung und Modellierung magnetischer Bauteile und dem Energiemanagement und der Betriebsführung für verschiedene Anwendungen. Prof. Böcker leitet dieses Projekt. Für die Innovationsprojekte der Industriepartner AEG-PS Architekturentwicklung eines KMU-Microgrid mit intelligenten Leistungstellern, Delta-ES Hochkompakte Lader zur intelligenten Netzintegration von E-Fahrzeugen, Hella Reichweitenerweiterung elektrisch angetriebener Fahrzeuge, Miele Energiemanagement im SmartGrid am Beispiel eines Waschtrockners steuert LEA einen großen Teil der Forschungsdienstleistung bei. Die Aktivitäten rund um die Betriebsführung und das Energiemanagement werden durch die Einwerbung von it's OWL Transferprojekten erweitert und fortgeführt.

Seit Sommer 2014 untersuchen wir mit unserem langjährigen Industriepartner LTi-Drives Hochgeschwindigkeitsantriebe, was vom BMBF im Rahmen des Förderprogramms LES 2 unterstützt wird. Die Ziele sind im vorigen Newsletter dargestellt. Neues im letzten Jahr: Durch Änderungen im Rotoraufbau wurden mehrere vielversprechende Verlustreduzierungsmöglichkeiten mit Hilfe der Co-Simulationsmethodik aufgezeigt. Parallel dazu wurden geeignete Pulsmusterformen für 2-Punkt- und 3-Punkt-Wechselrichter nach relevanten Kriterien, wie beispielsweise die Elimination von

Oberschwingungen mittels selektiver PWM oder die Minimierung des Verzerrungsfaktors optimiert und an einem Laststand beim Projektpartner integriert und erfolgreich getestet. Ergebnisse dazu wurden bereits in mehreren Publikationen dem Fachpublikum vorgestellt.

Das Projekt mit der Industrie 'Entwicklung der Ansteuerung für die frequenzvariable Umformung sehr großer Leistungen (>100 MW) mit Thyristorstromrichtern zur Effizienzsteigerung von Turbo-Generator-Sätzen' wurde formal abgeschlossen. Fortgesetzt wird es durch ein DFG gefördertes Projekt, in dem ein Ansatz einer direkten Modellprädiktiven Regelung für den Direktumrichter untersucht wird. Das entwickelte Regelungskonzept und einige Ergebnisse wurden bereits als Publikationen veröffentlicht.

Das von Herrn Paradkar bearbeitete Projekt VerfaS, in dem Verlustmodelle für Motor und Umrichter mittels Kombination von analytischen und numerischen (Finite-Elemente) Verfahren entwickelt wurden, ist ebenfalls abgeschlossen. Durch eine analytische Ermittlung der Wirbelstromverluste in den Magneten eines IPM Motors wurde eine verlustreduzierende Arbeitspunktsteuerung ermittelt. Weitere Ergebnisse wurden auf der PEMD 2016 vorgestellt.

In den letzten Jahren konnte das Fachgebiet zudem Kompetenzen in der echtzeitfähigen Schätzungen wichtiger Komponententemperaturen in permanenterregten Synchronmotoren festigen. Insbesondere durch die Anwendung neuartiger Identifikationsverfahren für linearparametervariante Systeme konnten hier Schätzgenauigkeiten von unter 5 °C für moderne Traktionsmotoren erzielt werden. Die echtzeitfähige Temperaturschätzung ist notwendig, um thermische Überlastkapazitäten gezielt zu nutzen (z.B. für Überholvorgänge) und die Antriebe somit auf eine geringere Dauerleistung auslegen zu können. Hierdurch wird Material, Gewicht und Bauraum einspart, was als wichtige Verbesserung im Rahmen von Elektromobilitätswendungen zu werten ist. Durch langjährige Industriekooperationen wird das erarbeitete Wissen zurzeit für Vorentwicklungsarbeiten bei Industriepartnern eingesetzt.

J. Solanki hat letztes Jahr seinen Promotionsvertrag über netzfreundliche, effiziente Hochleistungsgleichrichter mit variabler Ausgangsspannung gehalten. und den Stand der Technik sowie Vorarbeiten für einen Antrag an die DFG verfasst,

den wir dann mit dem Fokus auf MMC (modular multilevel converter) basierten Hochleistungsgleichrichtern weiterentwickelten. Und Anfang Mai 2016 erhielten wir dann eine Förderzusage. Ferner konnte T. Huber seine Dissertation zur thermischen Modellierung von Traktionsmotoren besonders erfolgreich verteidigen. Eine Dissertation von D. Krishna über Leistungssteller und Energiespeicher für Widerstandsschweißsysteme mit geregelterm Strom und von H. Figge über 'High Power LLC Resonant Converter Optimized for High Efficiency and Industrial Use' warten noch auf die Begutachtung bzw. Verteidigung. Weitere interne und externe Lastabwürfe bei unseren Doktoranden erwarten uns hoffentlich im kommenden Berichtszeitraum.

Als weitere, öffentliche Projekte eingeworben wurden:

- Modellprädiktive Direkte Drehmomentregelung permanent erregter Synchronmaschinen (DFG-Einzelförderung)
- Modulare Hochstrom-Gleichrichter mit variabler Ausgangsspannung (DFG-Einzelförderung)
- Hocheffiziente, langlebige und kompakte Leistungselektronik auf GaN-Basis für Elektromobilität der Zukunft (BMBF-Ausschreibung „Komrol“)
- SichEIA – Erhöhung der funktionalen Sicherheit sowie der Fehlertoleranz des elektrischen Antriebssystems (BMW-Ausschreibung „ATEM“)

Unserer Internetseite können, wie gewöhnlich, alle aktuellen Publikationen des Fachgebiets entnommen werden.

Über die langjährige Kooperation mit unserem Partner Prof. Cronje von der Witwatersrand University (Wits) in Johannesburg, Südafrika, gibt es ebenfalls Neues zu berichten: Nach der Förderungszusage eines Studentenaustauschs mit der Wits durch den DAAD fand der Austausch erstmals im Wintersemester 2015/16 statt und soll langfristig weiter ausgebaut werden.

Das nächste LEAiD Symposium findet am 17. Juni 2016 bei uns auf dem Campus der Universität statt. Zum 15-jährigen bestehen von LEAiD e.V. hoffen wir bzw. ich auf eine rege Beteiligung. Ich wünsche euch Kreativität, Schaffenskraft, Ausdauer neben einem guten  $\eta$ .

Mit freundlichen Grüßen  
Für den Vorstand

Norbert Fröhleke



Fig. 1: Aktuelles Luftbild der Uni Paderborn

## LEAiD 15. Symposium

Das diesjährige LEAiD-Symposium findet am 17.06.2016 ab 14:00 Uhr auf dem Campus der Universität Paderborn statt. Neben den sicher interessanten Vorträgen wird auch die jährliche Mitgliederversammlung unseres Vereins durchgeführt. Im Anschluss an den offiziellen Teil wollen wir selbstverständlich wieder die Möglichkeit des geselligen Beisammenseins nutzen und den Tag in der Osteria im Kachelöfchen ausklingen lassen.

## Tagesordnung

### 14:00-14:30 Mitgliederversammlung

1. Begrüßung und Eröffnung
2. Feststellen der Beschlussfähigkeit
3. Wahl der Versammlungsleitung
4. Wahl der Protokollführung
5. Bericht des Vorstandes
6. Bericht der Kassenprüfer
7. Neuwahl der Kassenprüfer
8. Verabschiedung der neuen Vereinssatzung
9. Verschiedenes

**14:30-15:15** Fachvortrag 1: Prof. Dr.-Ing. Markus Henke, TU Braunschweig, „Konstruktive Aspekte hochdrehender Elektromotoren für automotiv Anwendungen“

**15:15-15:45** Bekanntgabe und Präsentation des LEAiD Awards

**15:45-16:15** Kaffeepause

**16:15-17:00** Fachvortrag 2: Dr.-Ing. Josef Wiesing,

LTi Group, "Herausfordernde und außergewöhnliche Anwendungen in der elektrischen Antriebstechnik"

**17:00-17:45** Fachvortrag 3: Dr.-Ing. Basile Margaritis, Delta Energy Systems, "Stromversorgung in Datenzentren, IT-Geräten, EVs - Architekturen, Anforderungen, Topologien, offene Fragestellungen"

**im Anschluss** Gemeinsames Abendessen in der Osteria im Kachelöfchen (Kilianpl. 2, 33098 Paderborn - fußläufig vom Campus erreichbar)

## Neue Mitarbeiter



Herr **M. Sc. Sören Hanke** Hanke ist seit dem 01. Juni 2016 im Fachgebiet LEA als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Er beschäftigt sich vorwiegend mit der modellprädiktiven Regelung im Bereich der Leistungselektronik und der elektrischen Antriebstechnik. Herr

Hanke hat sein Bachelor- und Masterstudium der Elektrotechnik an der Universität Paderborn im März 2016 abgeschlossen. In seiner Masterarbeit befasste Herr Hanke sich mit der Untersuchung eines Verlustmanagements für ein elektrisches Antriebssystem.



Herr **M. Sc. Daniel Weber** ist seit dem 01. Juni 2016 im Fachgebiet LEA als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Arbeitsbereich Energiemanagement tätig. Herr Weber hat sowohl sein Bachelorstudium sowie sein Masterstudium der Elektrotechnik an der Universität Paderborn absolviert.

Im März 2016 schloss er mit einer Masterarbeit zur Prädiktion von Residualleistungsverläufen in industriellen Microgrids mittels künstlicher neuronaler Netze sein Masterstudium ab.



## Highlights 2015/16



Übergabe des LEAiD-Awards 2015 an Marc Hagemeyer



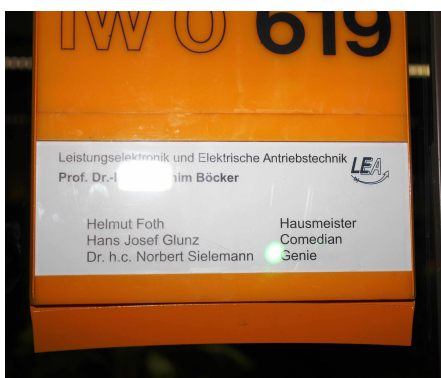
Die Chefetage unter sich



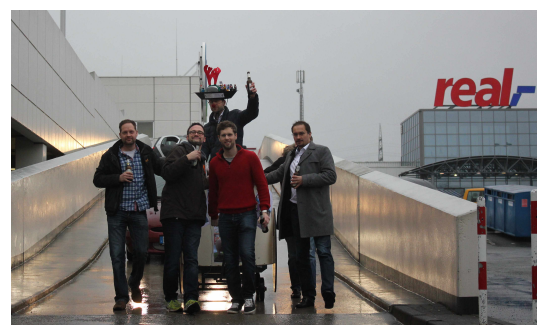
Herr Sielemann feiert sein 30-jähriges Dienstjubiläum



Promotion Tobias Huber



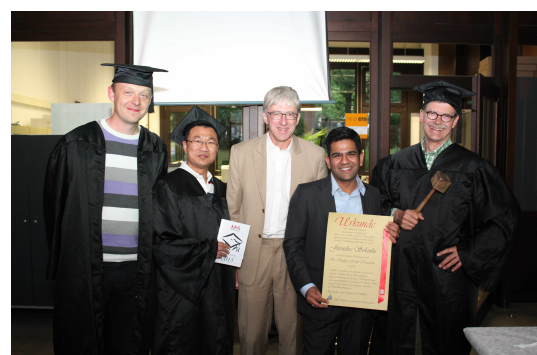
Arbeitsteilung in der IW-Halle



Ehrenrunde durch das Südring-Center



Sommerausflug: Wasserski am Lippesee



Promotion Jitendra Solanki

## SichEIAN – Erhöhung der funktionalen Sicherheit sowie der Fehlertoleranz des elektrischen Antriebssystems

**OLEG BUCHHOLZ**

In diesem Projekt arbeiten das Fachgebiet LEA und die ZF Friedrichshafen AG mit Firmensitz in Friedrichshafen am Bodensee zusammen. Das Projektvorhaben wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Kontext der Förderbekanntmachung „ATEM – Antriebstechnologien für die Elektromobilität“ gefördert.

### Problemstellung

Durch den Einsatz elektrischer Antriebssysteme im Straßenverkehr und den damit verbundenen hohen Anforderungen an Zuverlässigkeit, Sicherheit und Funktionsgarantie kommt der umfassenden Überwachung und Fehlerdiagnose eine immer größer werdende Bedeutung zu. Die Systemarchitektur elektrisch angetriebener Fahrzeuge ist komplex, was sich mit zunehmendem Entwicklungsgrad weiter steigern wird. Die stetig wachsende Komplexität fördert die Zunahme der Wahrscheinlichkeit von Fehlfunktionen innerhalb des Gesamtsystems und stellt sicherheitsbezogene Systemfunktionen vor große Herausforderungen hinsichtlich der Fehlererkennungs- und Fehlerreaktionstzeiten sowie der Zuverlässigkeit und der Robustheit bei der Analyse des gegenwärtigen Prozesszustands. Die Herausforderung besteht nicht einzig darin, einen Fehler zu erkennen und anzuzeigen, sondern insbesondere darin, unerwünschte oder unerlaubte Prozesszustände mit möglichst geringen Verzögerungstzeiten zu erkennen und schnellstmöglich geeignete Maßnahmen einzuleiten. Ziel ist dabei, das Risikopotential für Schäden bzw. Unfälle zu minimieren und ggf. den Weiterbetrieb des Systems zu ermöglichen. Die stetige Entwicklung moderner Rechenplattformen (kurze Rechenzeiten, paralleles Rechnen unabhängiger Programmteile, etc.) erlaubt eine kostengünstige Erweiterung technischer Systeme mit zusätzlichen Ressourcen zur Erhöhung der

Ausfall-, Funktions- und Betriebssicherheit durch softwarebasierte Redundanz. Die Grundlage zum Einsatz modellgestützter Methoden und Verfahren ist somit gegeben. Allerdings besteht für das elektrische Antriebssystem noch kein ganzheitliches Realisierungskonzept zur Umsetzung sicherheitsbezogener Überwachungs-, Fehlerdiagnose- und Fehlermanagementansätze, die alle Kriterien internationaler Normen für sicherheitsrelevante elektrische Systeme (z.B. ISO 26262 für in Serie produzierte Fahrzeuge bis 3,5 t) voll erfassen.

### Projektziele

Die wichtigsten Projektziele sind:

1. Primäre Zielsetzung (Fail-Safe): Erhöhung der Sicherheit gegenüber zufällig auftretenden, unvorhersehbaren Fehlern im Antriebssystem
2. Sekundäre Zielsetzung (Fault-Tolerance): Erhöhung der Verfügbarkeit (Weiterbetrieb trotz Fehler ggf. mit reduzierter Performanz, wenn kein Konflikt zur primären Zielsetzung besteht)
3. Gewinn fundierter Kenntnisse auf dem Gebiet der funktionalen Sicherheit

### Lösungsansatz

Im Rahmen des Projekts erfolgt die Untersuchung eines Lösungsansatzes, welcher im Wesentlichen aus dem Einsatz bekannter modellgestützter Verfahren und Methoden für die Überwachung, Fehlerdiagnose und fehlertolerante Regelung des elektrischen Antriebssystems besteht. Im betrachteten Anwendungsfall des elektrischen Traktionsantriebs werden insbesondere die spezifischen Eigenschaften der eingesetzten elektrischen Maschine (z. B. nichtlineares Magnetisierungsverhalten, kompakte Bauform bzw. hochintegrierte Antriebsstruktur, Temperaturabhängigkeit, etc.) und des Umrichters (nichtlineare Charakteristik, Temperaturabhängigkeit, etc.) in die Modellbildung einfließen.

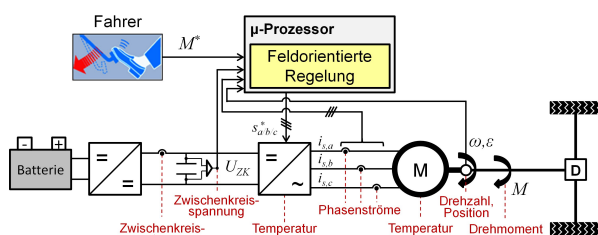


Abb. 1: Ausgangslage: Konfiguration des elektrischen Antriebssystems nach Stand der Technik

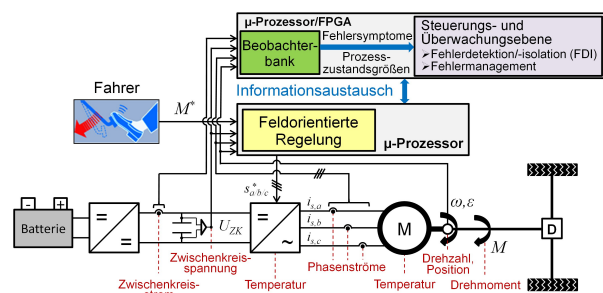


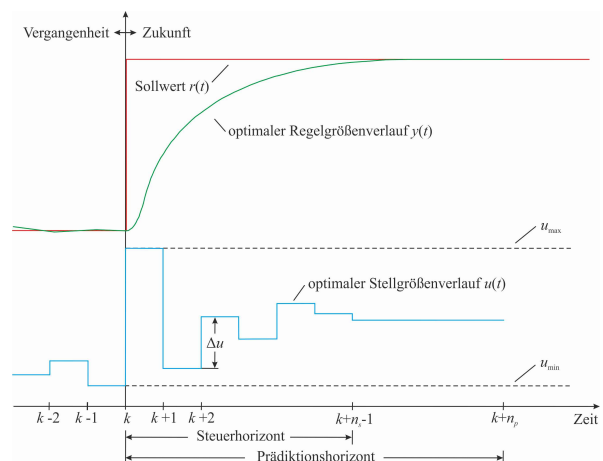
Abb. 2: Zielzustand: Modifizierte Systemkonfiguration zur Erfüllung der gesteckten Projektziele

Als Ergebnis der Untersuchungen soll ein ganzheitliches Konzept der überlagerten Steuerungs- und Überwachungsebene zur Erfüllung der gesteckten Ziele des Gesamtvorhabens entwickelt, hinsichtlich der Funktionalität validiert sowie der gestellten Anforderungen kritisch bewertet werden. Im laufenden geregelten Betrieb muss dazu der aktuelle Prozesszustand selbsttätig ermittelt, Funktionen der Fehlerdiagnose müssen durchgeführt und adäquate Maßnahmen bei erkannten Funktionsstörungen initiiert werden. Maßnahmen könnten z. B. die Umschaltung von einem fehlerhaften Sensor-signal auf das äquivalente Beobachtersignal, bei Bedarf die Rekonfiguration der Regelungsart, etc. darstellen. Die nachfolgende Abb. 1 stellt den derzeitigen Stand der Technik eines elektrischen Antriebssystems dar. In Abb. 2 ist die Zielstruktur skizziert, die in diesem Projekt realisiert werden soll.

## Modellprädiktive Direkte Drehmomentregelung permanent erregter Synchronmaschinen

**MICHAEL LEUER**

Derzeit werden für Elektro- und Hybridfahrzeuge hauptsächlich permanent erregte Synchronmotoren mit eingebetteten Magneten (IPMSM) eingesetzt, die sich durch eine hohe Leistungs- und Drehmomentdichte sowie einen guten Wirkungsgrad auszeichnen. Zur Ausschöpfung des vollen Leistungspotentials eines IPMSM ist eine adäquate Regelung unerlässlich. Konventionelle Regelungen für IPMSM basieren derzeit auf PI-Stromreglern. Damit verglichen, besitzen Modellprädiktive Regelungen (MPC) das Potenzial einer deutlich besseren Regelperformance: Bei einer MPC ist im Regler ein Prozessmodell der Regelstrecke hinterlegt, mit dem der Regler in jedem Zeitschritt die optimale zukünftige Stellgröße ermittelt. Hierdurch weist die MPC eine Vielzahl an Vorteilen gegenüber der PI-Regelungsstruktur auf. Die online-Optimierung stellt jedoch enorme Anforderungen an die Rechenleistung. Neuartige Ansätze und heutige leistungsstarke Rechenhardware ermöglichen mittlerweile zwar den Einsatz von MPC für IPMSM, diese Ansätze bringen jedoch weitere Probleme wie eine hohe Strom- bzw. Drehmomentschwankung mit sich.

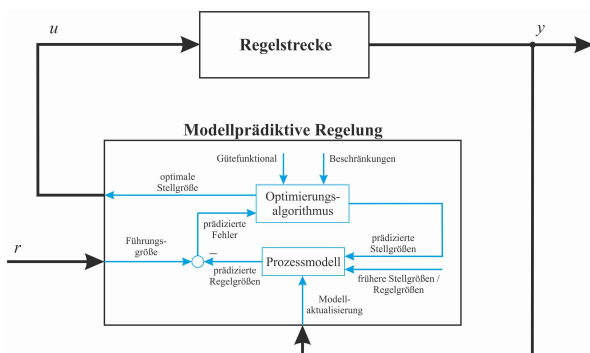


**Fig. 2:** Prinzipbild der Modellprädiktiven Regelung (MPC)

Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines MPC-Verfahrens, welches auf die Regelung von IPMSM im Antriebsstrang von Automobilen zugeschnitten ist. Unter den möglichen Varianten wird der Ansatz der Direkten MPC verfolgt. Im Gegensatz zur klassischen MPC werden hierbei während der online-Optimierung nur die direkt durch den Umrichter realisierbaren Stellgrößen (die sich aus den möglichen Schaltzuständen ergeben) berücksichtigt. Hierdurch wird die Optimierung sehr res-



sourcensparend ausgeführt, so dass sich echtzeitfähige Online-MPC-Verfahren auf kostengünstiger Hardware realisieren lassen. Da die Berechnungen einfach parallelisiert werden können, bietet sich die Implementierung auf einem FPGA oder einer Multikern-Prozessorarchitektur an. Die MPC wird hier als Direkte Modellprädiktive Drehmomentregelung umgesetzt, wobei die Arbeitspunktwahl durch den inhärenten Optimierungsalgorithmus ausgeführt wird. Diese Arbeitspunktoptimierung trägt unter anderem zur Verlustminimierung bei. Zur Reduzierung der Strom- bzw. Drehmomentschwankung wird die Pulssignalgenerierung neu entwickelt: Die Pulsmuster werden ähnlich wie bei der Vektormodulation in Abhängigkeit der Gütefunktionale optimiert. Dies führt zu einer Reduktion der Stromschwankung trotz relativ großer Reglerzykluszeit, so dass der Rechenaufwand hierdurch deutlich reduziert werden kann. Durch den Einsatz einer Selbstoptimierung zur Gewichtung des Gütefunktionals wird die Drehmomentdynamik für jeden Betriebspunkt online optimiert.



**Fig. 3:** Regelkreisstruktur der MPC

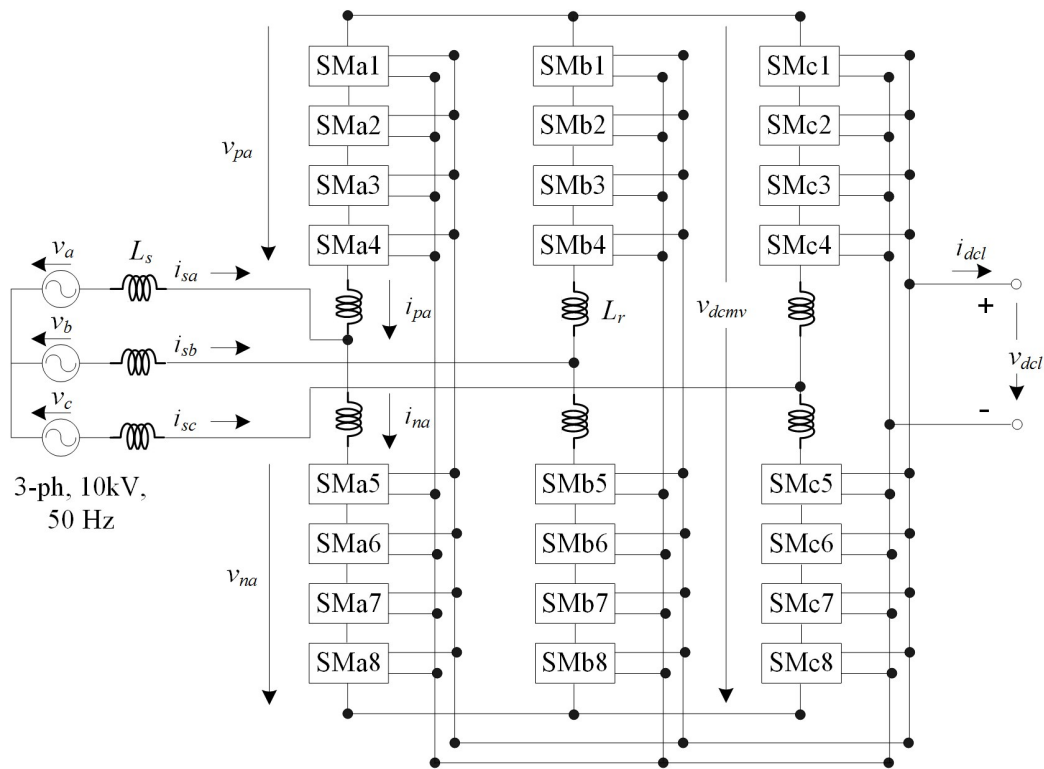
## Modular High-Current Variable-Voltage Rectifiers

**JOACHIM BÖCKER & NORBERT FRÖHLEKE**

Depending on the required DC voltage, rectifiers can be broadly divided into two categories: variable- and fixed-output-voltage types. Front-end rectifiers with fixed DC-bus voltage are required in the AC-AC conversion process for motor drives, uninterruptible power supplies, inverters, wind power converters, DC power supplies and high-voltage DC transmission system etc. Because of the vast number of applications, sufficient research and development efforts were put into the advancement of these rectifiers. Thus, rectifiers for these applications (mostly boost-type) stand at a fairly advanced stage with a good input power factor, low current THD, low DC-voltage ripple and good reliability. Conversely, variable DC-voltage rectifiers, falling into niche category, are still dominated by multi-pulse rectifiers using diode or thyristor technologies. High-current variable-voltage (HCVV) rectifiers are required for supplying power to DC arc furnaces, electrolyzers, water-purifiers, resistive heaters etc. Power requirement spans from a few hundreds of kW (small-size hydrogen electrolyser) to hundreds of MW (aluminium smelter). Most commonly, diode and thyristor-based rectifiers are used for high-power high-current applications because of their proven reliability, good efficiency and simplicity of the solutions. Depending on the power level, grid voltage and other application specific requirements, different types of configurations are used in the industry, such as:

1. Multi-pulse diode rectifier with on-load tap-changing (OLTC) transformer and saturable reactor
2. Multi-pulse thyristor rectifier with on-load tap-changing transformer
3. Multi-pulse thyristor rectifier
4. Chopper-rectifier (multi-pulse diode rectifier followed by multi-phase chopper)

Many electricity utilities put limits to allowed load power factor. There also exist requirements for current harmonics introduced by the equipment. Thyristor rectifier, connected to distribution-level or medium-voltage grid, working without tap-changing transformer, leads to significant amount of the reactive-power demand. This reactive-power is generally compensated for by passive filters. Even with OLTC at medium-voltage level, passive filters are used to improve the THD of input current. With the help of the OLTC, the power factor of thyristor



**Fig. 4:** Circuit diagram of the completely-modular power-converter

rectifier can be kept high by limiting the variation of the firing angle. However, the OLTC introduces mechanical wear and tear issues. Moreover, for rectifiers connected to the distribution-level grid, it is not feasible to use OLTC. In these kinds of systems, a single 12-pulse thyristor rectifier with passive filters is employed. As already discussed, a passive filter fails to keep the power factor high enough within the entire operating range because of said fixed nature of compensation. Moreover, passive filters increase losses, weight and volume. To deal with a variable reactive-power demand use of static VAR compensators or active filters are proposed.

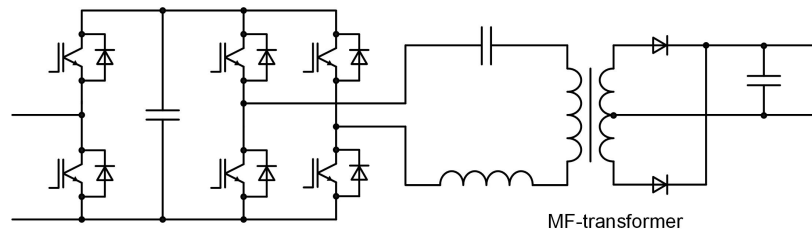
Line-frequency magnetics, DC inductors and AC/DC capacitors are the major contributors to weight and volume of discussed topologies. Multi-pulse rectifiers invariably need a bulky line-frequency transformer. Passive filters with considerable high reactive power rating need huge AC capacitors. Additionally, according to the current- and voltage-ripple specifications, also the DC-side needs bulky capacitors and inductors. The size of these components can be reduced by decreasing the rating of components and/or increasing the frequency of operation.

A proposed topology is shown in Fig. 4. Here, the MF inverters, MF transformers, and rectifiers are provided on module level to achieve maximum modularity. The outputs of these modules are parallel-

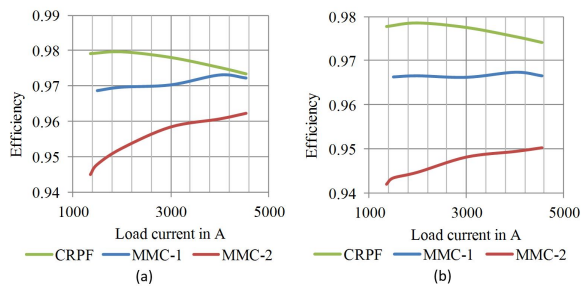
led to feed a low-voltage high-current load. This architecture provides unique advantages in terms of excellent input power quality (low current THD and unity power factor), removal of bulky line-frequency transformer and improved control over output voltage and current. Further, it suits the needs of blocking high voltage at input side and providing high current at output side by series and parallel operations at input and output sides, respectively. Moreover, the design is completely modular. Chopper cell configuration leads to higher number of sub-modules that is an added advantage for high-current applications. However, because of the multiple power conversion stages, the efficiency of this topology (MMC2) is below that of the chopper-rectifier CRPF (see Fig. 6).

The task of this project is to develop a high-current variable-voltage rectifier of the 1 MW class based on the concept of modular multi-level converter (MMC) concept. Each MMC module, equipped with SiC devices, will be supplemented by a resonant tank and medium frequency transformer, see Fig. 5. Soft switching of SiC devices will tremendously reduce losses and allow higher switching frequency so that the passive components shrink in size (see Fig. 6 with efficiency graphs at hard switching. MMC-1 topology uses a transformer and rectifier as central components, while MMC-2 is completely modular as shown in Fig. (Fig. 5). As final goal,





**Fig. 5:** Sketch of possible module structure with full-bridge LLC converter



**Fig. 6:** Variation of efficiency for chopper-rectifier and MMC topologies with the load current over (a) top load line and (b) bottom load line

the converter's efficiency is expected to reach 98 % efficiency with very low input THD and about 50 % size of state-of-the-art rectifiers. Cost, time and efforts required to replace the huge components are significant. Therefore, modularity is a desired feature in high-power systems. Modularity leads to easy and cost-effective replacement of damaged components. Besides, it also reduces capital cost of manufacturing due to ease of assembling and transportation. This is one of the features missing in existing topologies and need to be considered for advanced solutions.

## **Entwicklung eines Schwungmassenspeichers zur Erhöhung der Energieeffizienz beim Widerstandsschweißen in automatisierten Fertigungen**

**MARC HAGEMeyer**

Das Widerstandsschweißen ist in blechverarbeitenden Fertigungen wie beispielsweise der Automobilindustrie oder dem Schaltschrankbau ein weitverbreitetes Fügeverfahren. Auch zukünftige Konstruktionen mit höchstfesten Stählen und Leichtbaumaterialien werden mit Widerstandsschweißverfahren ffügbar sein. Es ist aber abzu-sehen, dass für die neuen Materialien kürzere Schweißzeiten bei gleichzeitig höheren Schweißströmen erforderlich werden. Beim jetzigen Mittelfrequenzschweißen, dem am weitest verbreiteten Widerstandsschweißverfahren, ist die Stoßbelastung des Energieversorgungsnetzes bereits jetzt sehr hoch. Da die Fügmaterialien zur Gewichtseinsparung der Fahrzeuge immer dünner ausgeführt und mit komplexen Beschichtungen versehen werden, verschlechtern sich die Schweißei-genschaften deutlich, so dass es außerdem not-wendig wird, den Schweißstrom durch eine dy-namische Regelung genau zu kontrollieren. Ein zunehmend wichtiger Aspekt ist die Einsparung von Energie im Fügeprozess, um die Energiever-brauchskosten automatisierter Fertigungen zu re-duzieren. Neben der direkten Energieeinsparung beim Fügen werden durch den reduzierten Wärme-eintrag auch die Folgekosten, z.B. für das Kühlsys-tem und den Elektrodenverschleiß, reduziert. Ziel der Neuentwicklung ist ein kompaktes Sys-tem, das mit Hilfe eines hochdynamischen Ener-giespeichers eine möglichst konstante Leistungs-aufnahme aus dem Versorgungsnetz erlaubt. Vor-herige Untersuchungen haben gezeigt, dass die al-leinige Verwendung von Kondensatoren hinsicht-lich des Volumens, der angestrebten Zyklenfes-tigkeit und des Wirkungsgrades nicht optimal ist. Aus diesem Grund wird ein Hybridspeicher, be-stehend aus Kondensatoren und einem auf eine hohe Leistungsabgabe optimierten Schwung-massenspeicher verwendet (siehe Abb. 7). Dank des Speichers ist die Spitzenleistungsaufnahme

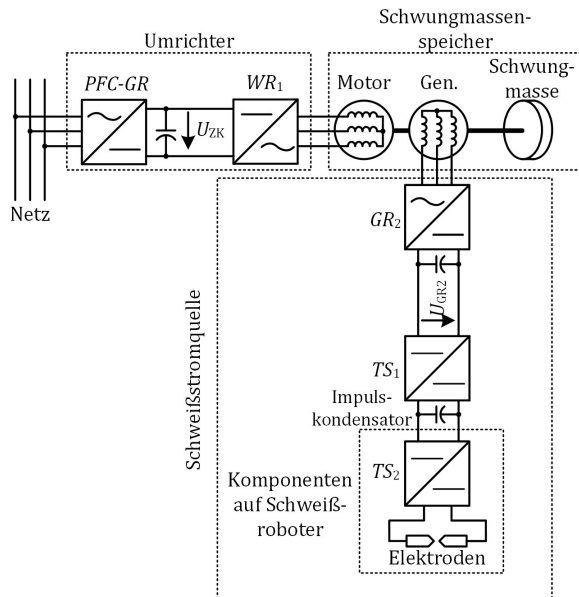
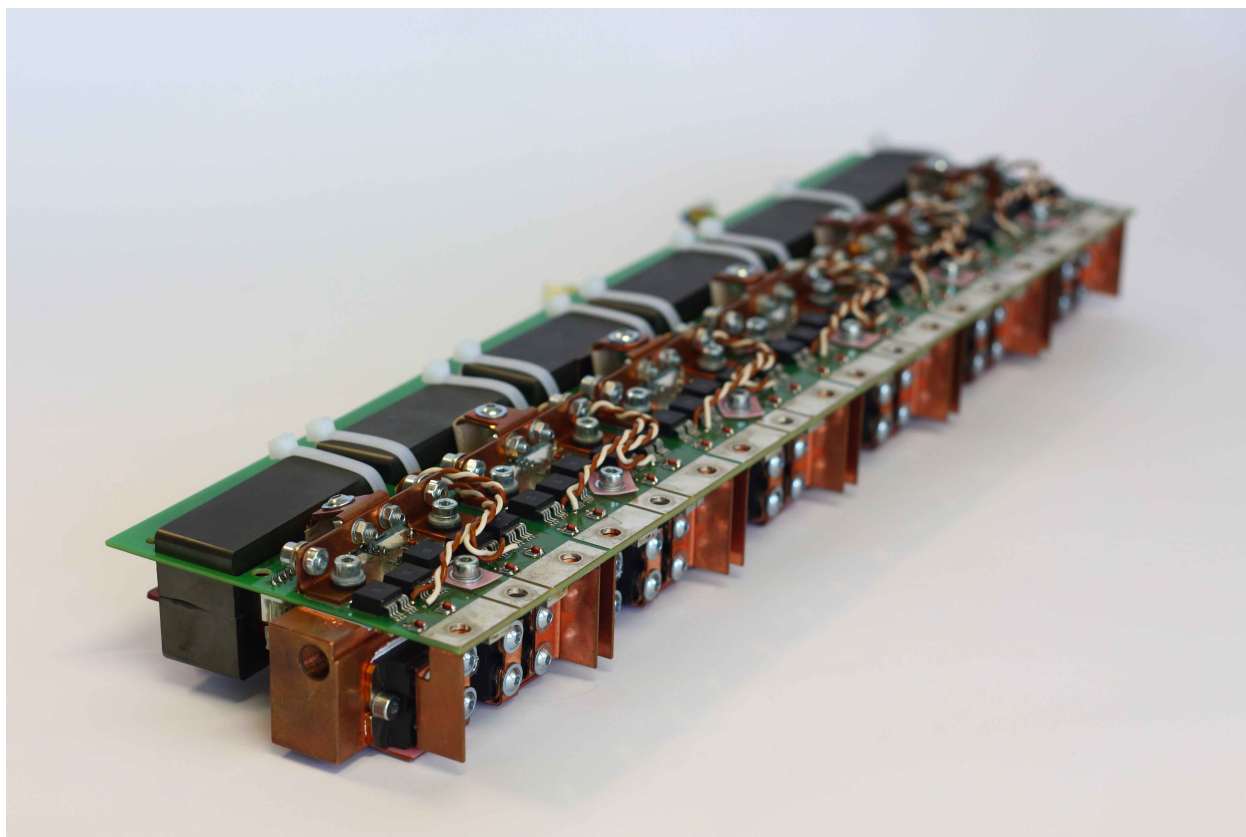


Fig. 7: Prinzipschaltbild

aus dem Versorgungsnetz deutlich geringer und es kann eine aktive Leistungsfaktorkorrekturschaltung verwendet werden, die die Blindleistungsaufnahme signifikant reduziert (auf ca. 15 % des bisherigen Wertes). Zudem soll der Schweißstrom während des Schweißvorgangs hochdynamisch regelbar sein, um den Anforderungen moderner Materialien gerecht zu werden (siehe Abb. 8). Zur Realisierung sind mehrere Umrichter, eine elektrische Maschine (Antriebs- und Generatorelement) und die Schwingmasse notwendig. Der Schwingmassenspeicher wird langsam geladen, indem die Schwingmasse über 4 s mit 4 kW Leistung motorisch beschleunigt wird und sehr schnell entladen (0,2 s mit 100 kW Leistung generatorisch abgebremst), indem die hohe Leistung für den Schweißvorgang entnommen wird. Die am Markt erhältlichen Speichersysteme sind nicht für eine derart dynamische und asymmetrische Belastung ausgelegt, weshalb ein spezielles Speichersystem erforderlich ist. Dazu ist es zweckmäßig, zwei separate elektrische Maschinen auf derselben Welle vorzusehen. Umrichter und Motor können auf eine Nennleistung von unter 5 kW ausgelegt werden. Der Generator wird auf eine Leistung von bis zu 100 kW und eine geringere Ausgangsspannung ( $< 100$  V) als auf der Umrichterseite ( $> 400$  V) ausgelegt. Dies führt zwar zu einem erhöhten Aufwand bei den elektrischen Maschinen, doch ist durch die bereits vorhandene galvanische Trennung und die unterschiedliche Wicklungskonfiguration kein Transformator erforderlich. Neben der Auswahl der optimalen elektrischen Maschinen und der Schwingmasse muss eine geeigne-

te Topologie der einzelnen Leistungssteller gefunden werden, denn die Höhe der Speicherspannung hat großen Einfluss auf die Leistungssteller. Aus diesem Grund müssen neue Leistungssteller entwickelt werden. Durch die enorm hohen Ströme und die geringe Schweißspannung von 1 V bis 3 V ist der direkt an den Elektroden befindliche Gleichspannungswandler von größter Bedeutung für den Gesamtwirkungsgrad der Schaltung. Dazu ist allerdings eine massive Parallelschaltung der Steller und Halbleiter erforderlich. Zur Verringerung des magnetischen Bauraums werden gekoppelte Induktivitäten (Intercell Transformer) eingesetzt, wodurch der magnetische Fluss innerhalb der Spulenkerns reduziert wird. Aufgrund der hohen resultierenden Systemkomplexität werden verschiedene Entwicklungsmethoden angewandt, wie z.B. analytische Berechnungen, Simulation des elektrischen Verhaltens auf Halbleiterebene mittels SPICE-Modellen, Finite-Elemente-Methode zur Modellierung der magnetischen Komponenten und Modellierung der Regelung auf Systemebene mittels Simplerer/PLECS. Insgesamt wird erwartet, dass die Neuentwicklung die Spitzenleistungsbelastung des Netzes und die Baugröße der Wandler verringert. Gleichzeitig soll der Energieaufwand pro Schweißung sinken und das System somit effizienter machen. Außerdem soll die größtmögliche Systemdynamik und Robustheit erzielt werden.



**Fig. 8:** Prototyp-Schaltung: Tiefsetzsteller für 2500 A aus dem vorigen Projekt