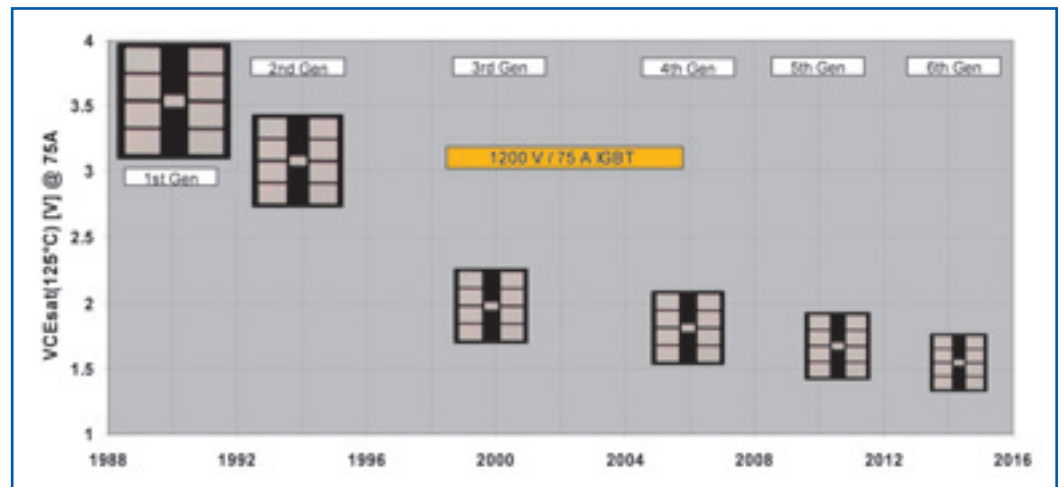


Leistungselektronik

EFFIZIENZ, EINSATZMÖGLICHKEITEN, POTENZIALE

Wie kommt der Strom aus der Steckdose in den Laptop-Akku? Was unterscheidet eine Glühbirne von der Energiesparlampe? Leistungselektronik findet sich in vielen Anwendungen unseres Alltags und stellt eine Schlüsseltechnologie der

modernen elektrischen Energieversorgung dar. Einbindungsmöglichkeiten finden sich im Bereich der regenerativen Energieeinspeisung ebenso wie im Aufbau eines weltumspannenden Gleichspannungsnetzes. Ein Wissenschaftler des Instituts für Antriebssysteme und Leistungselektronik präsentiert neueste Forschungsergebnisse und zukünftige Möglichkeiten aus dem Forschungsfeld der Leistungselektronik.



Leistungshalbleiter als Kernstück

Leistungshalbleiter sind elektronische Bauelemente, die für das Steuern und Schalten höherer elektrischer Ströme und Spannungen ausgelegt sind. Sie sind in der Lage, große Ströme und Spannungen zu verkraften. Damit die Verlustleistung in den Bauelementen nicht zu groß wird, können sie nur im Schaltbetrieb eingesetzt werden. Die Leistungshalbleiter führen somit entweder Strom (eingeschalteter Zustand) oder Spannung (ausgeschalteter Zustand mit geringem Reststrom). Nur während der Umschaltvorgänge treten gleichzeitig hohe Werte von Strom und Spannung auf, was für wenige Mikrosekunden zu enormer Verlustleistung führt. Dadurch fällt neben der Durchlassverlustleistung auch eine Schaltverlustleistung im

Bauelement an. Die so umgesetzte Wärme begrenzt die zulässige Schaltfrequenz. Damit die zulässige Chiptemperatur von 150 °C nicht überschritten wird, müssen die Leistungshalbleiter gekühlt werden. Dennoch sind die Verluste im Vergleich zur umgeformten Leistung gering. Heute werden Wirkungsgrade von etwa 95 Prozent bei wenigen 100 Watt erreicht und bis zu 99 Prozent bei einigen Megawatt. Der am häufigsten eingesetzte abschaltbare Leistungshalbleiter ist der IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

Die Fortschritte der Leistungselektronik beruhen wesentlich auf der Weiterentwicklung der Leistungshalbleiter. Dabei steht einerseits die Verringerung der Durchlassspannung bei gleichzeitiger Verringerung der Chipfläche im Vorder-

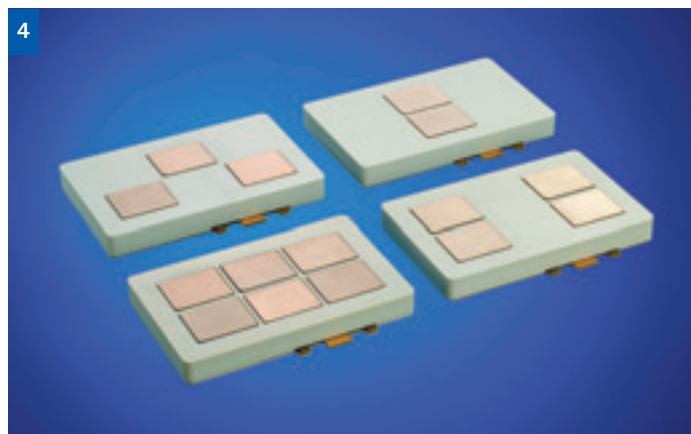
grund (Abbildung 1); andererseits sind moderne IGBTs für immer höhere Spannungen verfügbar (Abbildung 2). Dadurch ist es möglich, Schaltungen wie den Umrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis zunehmend auch bei hohen Spannungen und Strömen einzusetzen. Dabei wird zusätzlich von der Serienschaltung mehrerer Leistungshalbleiter Gebrauch gemacht, um noch höhere Spannungen zu erreichen. Ein Resultat dieser Entwicklung sind Mittelspannungsumrichter für einen Leistungsbereich bis zu etwa 50 Megawatt sowie Hochspannungsumrichter, die sogar einige 100 Megawatt umformen.

Leistungshalbleitermodule

Die Aufbau- und Verbindungstechnik wird bei solchen

Höchstleistungen immer bedeutender. Silizium-Chips von etwa 2 cm² Fläche, die maximal Ströme von etwa 200–300 Ampere je Chip zulassen, müssen mehrfach parallel geschaltet werden, um Module für hohe Ströme – heute bis zu 2400 Ampere – zu realisieren. Der direkte Zusammenhang der Chipfläche mit der Stromtragfähigkeit rührt von der vertikalen Stromflussrichtung her. Diese unterscheidet die Leistungshalbleiter von anderen mikroelektronischen Bauelementen, bei denen sich alles an der Oberfläche ab-

sen mit großem Querschnitt, sind auch Steueranschlüsse unterzubringen. Wesentliche Herausforderungen an den mechanischen Aufbau stellen thermische Wechsellasten, aufgrund der wechselnden elektrischen Belastung, dar. Sie führen zu einer Ermüdung der Verbindungen und Lötungen und senken die Lebensdauer mancher Anwendungen. Abhilfe schafft eine aufwändige Druckkontakt-Technologie, die ohne Bonds und Lötungen auskommt und eine zweiseitige Kühlung der Chips ermöglicht (Abbildung 4).



spielt. Die Modulbauform (Abbildung 3) hat sich für die Montage von ganzen Umrichtern sehr bewährt. Bei mittleren und kleinen Leistungen hat inzwischen der komplette Satz von Leistungshalbleitern Platz in einem Modul. Die Chips müssen miteinander verschaltet und verschiedene Bereiche voneinander und vom Gehäuse isoliert werden. Neben den Leistungsanschlüs-

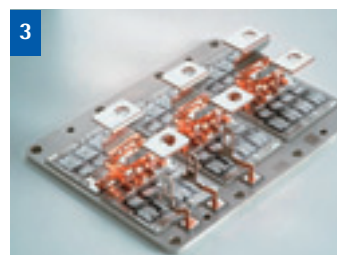
Steuerung durch Mikroelektronik

Eine wesentliche Rolle für die Leistungselektronik spielt auch die Mikroelektronik. Schließlich muss eine Vielzahl elektronischer Schalter auf die Mikrosekunde genau ein- und ausgeschaltet werden. Die Zeitpunkte dafür werden von einer elektronischen Regelung bestimmt, die hohe Anforderun-

gen an die Rechenleistung von Echtzeitsystemen stellt. Heute werden dafür schnelle Mikrocontroller und digitale Signalprozessoren eingesetzt. Fortschritte in der Rechengeschwindigkeit ermöglichen immer präzisere Steuer- und Regelverfahren, die einen noch effektiveren Einsatz eines jeden Schaltvorgangs ermöglichen.

Effiziente Energieanwendung durch Leistungselektronik

Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung ist gleichermaßen die Erzeuger- wie die Verbraucherseite zu betrachten. Jede eingesparte Kilowattstunde ist genauso wirksam zur Reduzierung der



CO₂-Emissionen wie ihre aufwändige Erzeugung durch regenerative Energien. Die Leistungselektronik ermöglicht in vielen Anwendungen elektrischer Energie eine wesentliche Effizienzsteigerung. Ein aktuelles Beispiel ist der Wechsel von der Glühlampe zur Energiesparlampe, die im Sockel eine kleine aber ausgefeilte Leistungselektronik enthält (Abbildung 5). Hierdurch können etwa 80 Prozent der für Glühlampen eingesetzten Energie eingespart werden. Zudem sind Zusatzfunktionen möglich, wie beispielsweise eine elektronische Dimmerfunktion, die von einem gewöhnlichen Lichtschalter aus bedient wird. Weitere Beispiele für Effizienzsteigerungen sind drehzahlveränderliche elektrische Antriebe für Pumpen, Lüfter und Kompressoren, aber auch Schaltnetzteile zur Speisung elektronischer Verbraucher.

Abbildung 1
Entwicklung der Leistungshalbleiter am Beispiel der Chipfläche von IGBTs für 75 Ampere und 1200 Volt
Quelle: Infineon

Abbildung 2
Entwicklung der Spannungsfestigkeit von IGBTs mit Bauformen und Eckdaten
Quelle: Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik, Leibniz Universität Hannover

Abbildung 3
Blick in das Innere eines IHM-B Moduls: Sichtbar sind die auf Kupfer-Keramik-Substrate aufgelöteten Siliziumchips mit Dickdraht-Bonds und Kontaktfahnen.
Quelle: Infineon

Abbildung 4
IGBT-Module mit Druckkontaktierung für 2500 Volt (StakPak) wie sie etwa in HGÜ-Anlagen mit Gleichspannungskreis eingesetzt werden. Unter jeder Metallfläche ist eine Mehrzahl von IGBT- und Dioden-Chips angeordnet.
Quelle: ABB

Abbildung 5
Energiesparlampe mit geöffnetem Sockel, der die Leistungselektronik enthält. Die ebenfalls enthaltene Steuerungselektronik ermöglicht eine elektronische Dimmung.
Quelle: Paulmann



Leistungselektronik für die Netzeinspeisung regenerativer Energien

Auf der Erzeugerseite ermöglicht die Leistungselektronik die Netzeinspeisung vieler regenerativer Energien. Für Photovoltaik-Anlagen (PV-Anlagen) sind Wechselrichter nötig, die die an der Photozelle anfallende Gleichspannung in eine netzkonforme Wechselspannung umwandeln (Abbildungen 6 und 7). Ähnlich verhält es sich bei der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit Brennstoffzellen, die im Bereich von circa 5 bis 10 Kilowatt elektrischer Leistung für Wohnhäuser interessant ist. Die niedrige Spannung, am Ausgang der Brennstoffzelle (etwa 50 Volt) wird auf eine Gleichspannung von 350 bis 600 Volt umgesetzt, bevor ein Wechselrichter die Netzeinspeisung übernimmt. Bei dieser mehrstufigen leistungselektronischen Energieumformung sind Wirkungsgrade von weit über 90 Prozent möglich. Leider liefert die Brennstoffzelle an sich nur etwa 30 bis 40 Prozent der eingesetzten Energie als Strom ab, der Rest fällt in Form von Wärme an – daher der Einsatz in der Kraft-Wärme-Kopplung.

Abbildung 6
Photovoltaik-Anlage in Südeuropa. Durch den steileren Einfall des Sonnenlichts steigt die Energieausbeute gegenüber unseren Breitengraden etwa um den Faktor 2 an.
Quelle: SMA



Abbildung 7
Innenansicht eines 8 Kilowatt Photovoltaik-Wechselrichters. Zu sehen sind verschiedene elektronische Bauelemente des Leistungsteils.
Quelle: SMA

Bei Windenergieanlagen wird die Leistungselektronik benötigt, um die Drehzahl den Windverhältnissen anzupassen und damit eine optimale Leistungsausbeute zu ermöglichen. Verschiedene Generator-Umrichter-Konzepte sind dabei im Einsatz. In der häufigsten Variante, der doppelt gespeisten Asynchronmaschine, wird nur etwa ein Drittel der Leistung über einen Umrichter geführt. Damit wird ein Drehzahlbereich von 1:2 ab-

gedeckt, entsprechend einem Leistungsbereich von etwa 1:8. Bei Synchrongeneratoren, die mit höherer Polzahl ausgeführt werden können und daher mit weniger Getriebe-stufen oder ganz ohne Getriebe auskommen, sind dagegen Umrichter für die volle Leistung erforderlich. Ab einer Leistung von etwa 3 Megawatt können Mittelspannungsumrichter – für zum Beispiel 3000 Volt Generatorspannung – vorteilhaft eingesetzt werden. Neue Anforderungen an die Steuerung und Regelung der Umrichter ergeben sich durch die geänderten Netzanschlussbedingungen: Beispielsweise verhindert die Lieferung von Kurzschlussstrom eine Abschaltung bei Überstrom. Gleichzeitig sind die Anforderungen an die Spannungsqualität im stationären Betrieb einzuhalten.

Energieübertragung mit Gleichstrom

Im Zusammenhang mit den großen Offshore-Windenergieanlagen stellt sich die Frage, wie die großen Leistungen an Land gebracht und ins Landesinnere übertragen werden. Die Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) hat eindeutige Vorteile, weil sie weniger Kabel für dieselbe Leistung benötigt als bei Verwendung von Drehstrom. Außerdem ist sie an Land für einen Transfer über weitere Strecken einsetzbar. Während die klassischen HGÜ-Anlagen mit Gleichstromkreis lediglich Punkt-zu-Punkt-Verbindungen ermöglichen, können die seit wenigen Jahren auf Basis von Hochvolt-IGBTs realisierbaren HGÜ mit Gleichspannungskreis (engl. Voltage Source HVDC) nicht nur kurz-



fristig die Übertragungsrichtung ändern, sondern haben auch das Potenzial, zu ganzen Gleichspannungsnetzen zusammenschaltet zu werden. Die ersten Konzepte dieser Art fußen auf denselben Schaltungen wie Wechselrichter für kleine Drehstromantriebe, nur dass die elektronischen Schaltelemente für vielfach höhere Spannungen und Ströme ausgelegt sein müssen (Abbildung 8 oben). Dazu werden Hochvolt-IGBTs in Stückzahlen von 20 oder mehr in Serie geschaltet. Druckkontaktierte Module können in Spannungsverbänden zusammengefasst werden, wobei jeweils zwischen zwei Modulen ein Kühlkörper eingespannt wird (Abbildung 9). Auf der Drehstromseite sind bei diesem Konzept elektrische Filter aus Kondensatoren und Induktivitäten erforderlich, um die Oberschwingungen zu reduzieren. Ein neues Konzept ver-

wendet eine Reihenschaltung ganz anderer Art. Eingesetzt werden Module, die als eine schaltbare Spannungsquelle aufgefasst werden (Abbildung 8 unten). Die Spannung auf der Drehstromseite kann damit nach Art eines Digital-Analog-Wandlers feinstufig eingestellt werden (Multi-Level Inverter). Auch ohne Ausgangsfilter ergibt sich so eine fast reine Sinusform.

Zukünftige Potenziale der Leistungselektronik

Mit diesen Ansätzen werden ganz neue Konzepte für die Energieversorgung der Zukunft möglich. Weit voraus greifende Visionen zeichnen ein weltumspannendes Gleichspannungsnetz, mit Hochtemperatur-Supraleiterkabeln zur Verteilung der elektrischen Energie, die in Wüstenregionen aus PV-Anlagen

und thermischen Solarkraftwerken gewonnen wird. Die Leistungselektronik stellt für diese Entwicklungen eine der Schlüsseltechnologien dar (Abbildung 10).

Solche Szenarien werden noch attraktiver, wenn man die Fortschritte einbezieht, die von neuen Halbleitermaterialien wie Siliziumkarbid oder Galliumnitrid für die Leistungselektronik erwartet werden. Durch den größeren Bandabstand der Werkstoffe werden noch bessere Eigenschaften der elektronischen Schalter möglich, wie eine höhere Spannungsfestigkeit bei gleichbleibenden Durchlassverlusten, erheblich geringere Schaltverluste und gleichzeitig höhere Betriebstemperaturen. Damit könnten wesentlich kompaktere Umrichter mit noch besseren Wirkungsgraden realisiert werden als heute. Erste Bauelemente aus diesen Materialien sind schon verfügbar, allerdings noch für Ströme von nur wenigen Ampere. Bei Photovoltaik-Wechselrichtern wurden mit Hilfe solcher Bauelemente kürzlich Rekord-Wirkungsgrade von 99 Prozent erreicht. Bis ganz große Leistungen mit den neuen Bauelementen realisiert werden können, bleibt allerdings noch viel zu tun.



Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens
 Jahrgang 1962, arbeitet seit 2004 am Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik an der Leibniz Universität Hannover. Seine Schwerpunktforschung bewegt sich im Bereich der Leistungselektronik und Antriebsregelung für Großantriebe, regenerative Energien und Automobilanwendungen. Kontakt: mertens@ial.uni-hannover.de

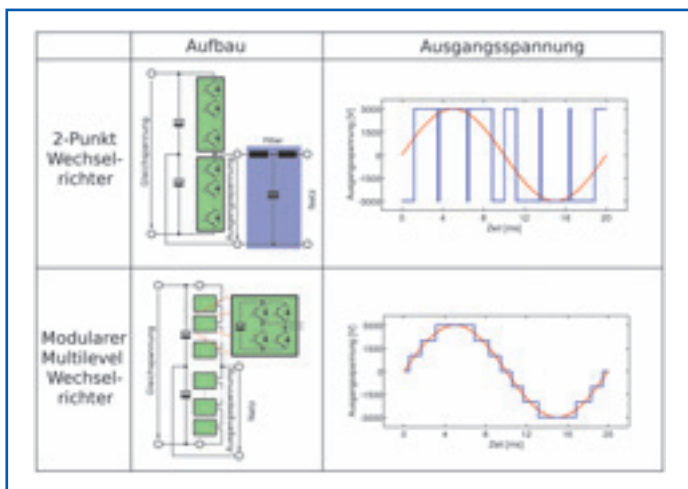


Abbildung 8
 Prinzipdarstellung der beiden Konzepte für eine HGÜ mit Gleichspannungskreis. Dargestellt ist jeweils eine Kopfstation mit dem Anschluss für das Gleichspannungskabel links und für das Drehstromnetz rechts. Quelle: Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik, Leibniz Universität Hannover



Abbildung 9
 IGBT-Säulen der Troll A HGÜ mit Gleichspannungskreis. Die HGÜ verbindet die Gasplattform Troll vor der norwegischen Küste mit dem Festland und liefert 84 Megawatt über einen Gleichspannungskreis von 2 x 60 Kilovolt. Quelle: ABB

Abbildung 10
 Teilaufbau einer Multilevel-HGÜ im Hochspannungstest. Zu sehen ist ein Teil eines Brückenzeigs. In jeder Etage sind mehrere Module nebeneinander angeordnet, in einer Anlage bilden mehrere dieser Aufbauten einen Brückenzeig. Quelle: Siemens