

Spitzenreiter unter den EE war wiederum die seit Jahren boomende Windenergiebranche, die inzwischen fast 3,5 % des deutschen Strombedarfs deckt und 2001 die installierte Leistung um rund 60 % auf knapp 8750 MW erhöhte. Wenn auch in diesem Jahr einige der bedeutenden Hersteller auf der Messe fehlten: Im Bereich EE belegte die Branche die größte Ausstellungsfläche – an erster Stelle Deutschlands Marktführer Enercon mit 500 m². Ausstellungsgegenstand waren vor allem Windkraftanlagen der MW-Klasse. Dazu gehört nicht zuletzt die von der holländischen Lagerway entwickelte 2-MW-Turbine, die anstelle fremderregter Generatoren einen Permanent-Magnet-Generator nutzt und gleichzeitig die Klemmenspannung von 690 V auf 4 kV erhöht. Damit werden der Wirkungsgrad verbessert und die Verluste beim Energietransport reduziert. Die weitere Entwicklung ist in Europa nicht zuletzt auf Erschließung der Seeflächen (Offshore-Projekte) gerichtet. In naher Zukunft wird der Marktführer dafür die erste 4,5-MW-Windkraftanlage installieren. Ziel des Bundesumweltministeriums ist es, bis zum Jahr 2030 in Nord- und Ostsee eine Kraftwerksleistung von 25 GW zu installieren und damit 15 % des Strombedarfs zu decken.

■ Solarbranche weiterhin auf Wachstumskurs

Auch wenn die Zahl der PV-Aussteller sich in diesem Jahr verringerte, war das offensichtlich kein Anzeichen nachlassenden Interesses. Schließlich bieten die förderpolitischen Rahmenbedingungen des planmäßig im nächsten Jahr auslaufenden 100000-Dächer-Programms 2002 zinsgünstige Kredite für 80 MW_p. Trotz der planmäßigen Reduzierung der Vergütungssätze für eingesparten Strom aus neuinstallierten PV-Anlagen war das Interesse ungebrochen. Das zeigte u. a. die in Hannover vorgestellte Initiative des Landes Nordrhein-Westfalen, wo 82 Energieversorger und 28 Kommunen die Energieeffizienz in Unternehmen und Privathaushalten auch mit Haushaltsmitteln des Landes fördern. Damit und mit dem bereits vor Jahren gestarteten Programm von bis zu 50 Solarsiedlungen sollen am Jahresende insgesamt mehr als 8 000 PV-Anlagen mit über 40 MW netzgekoppelt Strom liefern.

Dass auch einige von insgesamt mehreren hundert Deponieflächen in Deutschland zur Stromgewinnung genutzt werden können, bewies die EnBW mit einer 90 m² großen PV-Anlage. Dabei wurde der Nachweis erbracht, dass ein universell einsetzbares Haltesystem nicht nur die PV-Module aufnimmt, sondern auch die vom Gesetzgeber vorgeschriebene Abdichtung der Oberfläche ohne aufwändige bautechnische Unterkonstruktionen möglich macht.

■ Biomasse und Stirlingmotor

Schließlich war wiederum die Gewinnung von Nutzwärme, Strom und Kraftstoffen aus fester und gasförmiger Biomasse ein Messe-Schwerpunkt. Unverkennbar war der Trend zu höheren Leistungen, installiert im stadtnahen Bereich. Gegenwärtig sind zwei Anlagen mit einer elektrischen Leistung von 20 kW im Bau. Die Planung weiterer Kraft-Wärme-gekoppelter Stromerzeuger wurde intensiviert, da die im EEG festgeschriebene Förderung im Jahre 2003 ausläuft.

Über die BZ-Technologie hinaus waren Blockheizkraftwerke (BHKW) geringer Leistung für den Einsatz in Gebäuden kein Thema. Eine Ausnahme war die Neuentwicklung von Solo, ein über Stirlingmotor angetriebenes BHKW. Im Gegensatz zu den bekannten Wärmekraftmaschinen vom Typ Verbrennungsmotor kann der Stirlingmotor prinzipbedingt beliebige Wärmequellen nutzen.

Das Ergebnis einer über ein Jahrzehnt laufenden Entwicklung ist ein erstmalig bis zur Serienfertigung realisiertes BHKW für Erdgas (Bild 7). Ein mit Holzpellets versorgter Biomasse-Stirlingmotor könnte evtl. im nächsten Jahr folgen. Wie andere BHKW ist das anschlussfertige Gerät Teil eines Wärmeversorgungskonzepts, das die Wärme-Grundlast und darüber hinaus Strom liefert. Haupteinsatzgebiete sind Wohnanlagen mit zentraler Nahwärmeversorgung, Schwimmbäder, Gewerbebetriebe und Hotels. Im Vergleich zu verbrennungsmotorisch angetriebenen BHKW sind Verschleiß, Wartungsaufwand sowie Schadstoff- und Geräuschemissionen niedriger.

H. Kabisch

4. Fachtagung Leistungselektronik

Bauelemente der Leistungselektronik und ihre Anwendungen

Am 23./24.04.02 fand in Bad Nauheim die nunmehr 4. Fachtagung unter oben genanntem Titel statt. Die Organisation erfolgte in bewährter Weise durch den Fachbereich 5 „Leistungselektronik“ der ETG (Energietechnische Gesellschaft im VDE). Den rund 120 Teilnehmern aus Lehre, Forschung und Industrie wurde in Vorträgen und Diskussionen der neueste Stand auf diesem Fachgebiet dargeboten.

■ Leistungselektronik als Schlüsseltechnologie

Die Leistungselektronik bildet eine strategisch wichtige Voraussetzung für Innovation und Wettbewerbsfähigkeit in der Verkehrstechnik, Industrie- und Consumerelektronik, Datenverarbeitung und Kommunikation. Der Zwang zum rationalen Umgang mit Energie, zur Miniaturisierung elektrischer Systeme sowie zum intelligenten Energiemanagement war der Motor für die revolutionäre Entwicklung der Leistungshalbleiter und leistungselektronischen Systeme der letzten 20 Jahre und wird es auch weiterhin bleiben.

Insbesondere auf den Gebieten der Heimelektronik und der Datenverarbeitung besteht noch ein großer Nachholbedarf. Es wird erwartet, dass durch vermehrte Anwendungen in der Consumerelektronik (z. B. bei Kühl- und Klimageräten, aber auch in den Informationstechnologien) ein jährlich wachsender Energieverbrauch von 20 % eintritt. Dieser soll durch die Schlüsseltechnologie Leistungselektronik jedoch wieder um etwa 30 % gesenkt werden.

■ Weiterentwicklung der Leistungselektronik

Die Weiterentwicklung der leistungselektronischen Systemtechnik wurde von fünf wesentlichen Erfindungen geprägt:

- Lichtzündbarer Thyristor im höchsten Leistungsbereich,
- GTO im hohen Leistungsbereich,
- IGBT im mittleren Leistungsbereich,
- Power MOSFET im unteren Leistungsbereich und
- SMART Power-IC für monolithische Systemintegration im unteren Leistungsbereich.

Mit dieser neuen Bauelementefamilie wurden elektrisches Leistungsniveau, Wirkungsgrad, Bau-

volumen und Preis auf dem Gebiet der Stromversorgungstechnik neu definiert.

Ziel der Konferenz war es, Halbleitertechnologien, Aufbau- und Verbindungstechniken vom Chip zum System sowie neue leistungselektronische Konzeptansätze für Motorsteuerungen und Stellglieder zum präzisieren und verlustleistungsarmen Steuern der elektrischen Energie in Fachbeiträgen zur Diskussion zu stellen. Die Tagungsbeiträge sind im ETG-Fachbericht [1] nachzulesen. Auf ausgewählte Beiträge wird nachstehend verwiesen.

■ Silizium-Bauelemente an den Materialgrenzen

Prof. Sittig wies in seinem Beitrag darauf hin, dass mit den neuesten technologischen Verfahren Herstellungsprozesse von Silizium-Bauelementen so weit ausgereift sind, dass auch nach etwa 100 Einzelschritten noch Ausbeuten an intakten Chips nahe 100 % erreicht werden. Die Simulationsmöglichkeiten durch moderne Rechentechnik führten zu einem besseren theoretischen Verständnis und teilweise überschaubaren Strukturen als bei experimentellen Versuchsreihen.

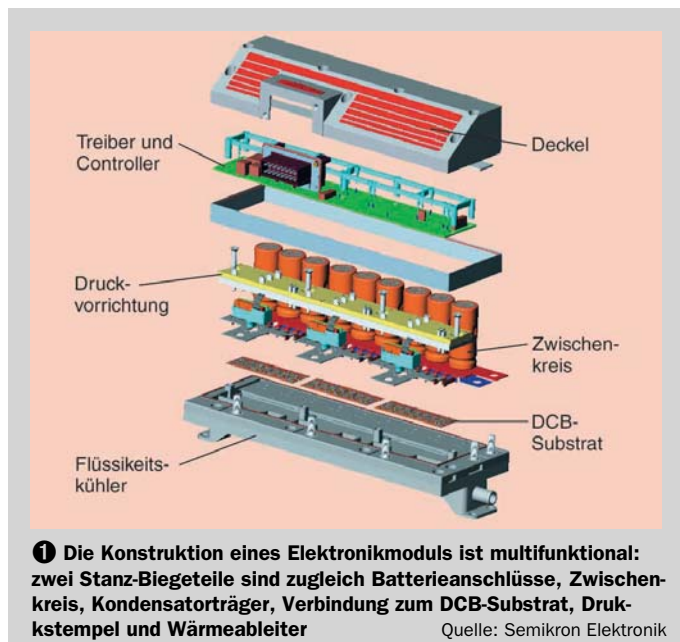
Die Dioden als „einfachste“ Bauelemente haben in der Vergangenheit auch Fragen der Zuverlässigkeit und der Zerstormechanismen aufgeworfen. Es konnte nachgewiesen werden, dass Leistungshalbleiter, die mit einer hohen Sperrspannung belastet sind, durch zusätzlich auftretende kosmische Strahlung zerstört werden können. Dieser Effekt kann mit hoher Wahrscheinlichkeit bei Sperrspannungen von etwa 30 bis 50 % der Durchbruchspannung ausgeschlossen werden. Dioden können aber auch bei steilem Abklimmen des Durchlassstromes zerstört werden. Ein bisher theoretisch noch nicht genau ermittelter Vorgang.

Es wurden Wege aufgezeigt, nach denen die heutige Grenze der Strombelastbarkeit noch auf ein Mehrfaches erhöht werden kann. Bei Einsatz von SiC-Schottkydioden sehen diese Werte aufgrund der besseren Materialeigenschaften wesentlich günstiger aus. SiC (Silizium-Karbid) steht aber in seiner technologischen „Reife“ noch sehr weit hinter Silizium zurück. GTOs als abschaltbare Thyristoren wurden zu IGBTs weiterentwickelt, die wegen ihrer kurzen Abschaltzeiten in Serie geschaltet werden können.

Power-MOSFETs haben sich im unteren Spannungsbereich seit vielen Jahren als am besten geeignete Schalter durchgesetzt. Durch den mit 2,6-facher Potenz proportional zur Sperrspannung ansteigenden R_{on} (Durchlasswiderstand in eingeschaltetem Zustand) war bisher der Einsatz auf Spannungen bis etwa 400 V begrenzt. Durch einen neuen Halbleiteraufbau gelang es, „CoolMOS“-Bauelemente herzustellen. Diese weisen bei 600 V Sperrspannung einen um den Faktor 5 bis 6 reduzierten spezifischen Widerstand im eingeschalteten Zustand auf. Bei konsequenter Weiterentwicklung zu „Super Junctions“ und „Multi-Resurf“ bezeichneten Strukturen werden theoretische Werte bis zu Durchbruchspannungen von 4500 V und R_{on} von 132 m Ω ·cm² erwartet.

IGBTs haben sich bei höheren Spannungen durchgesetzt und sind bereits dabei, GTOs aus den Anwendungen zu verdrängen. Nachteilig ist die höhere Schwellspannung und die gegenüber MOSFETs geringere Robustheit.

MBS („Monolithische Bidirektionale Schalter“) existieren gegenwärtig nur als Idee und sind bisher nur theoretisch untersucht. Sie erfordern bei der Herstellung komplexe Prozessschritte auf beiden Seiten des Siliziumwafers. MBS sind völlig symmetrisch aufgebaut und können Ströme in beiden Richtungen ein- und ausschalten. Sie sollen die gegenwärtig noch offenen Wünsche der Anwender erfüllen können. Prof. Hofmann zeigte in seinem Vortrag aufschlussreiche Diagramme, die das simulierte Verhalten darstellten. Es wird eingeschätzt, dass bis zur vollständigen Nutzung der Siliziumeigenschaften noch ein äußerst attraktives Potential besteht. Die ausgereifte Silizium-Technologie wird dieses Potential wahrscheinlich eher erschlossen haben, als Bauelemente aus SiC (mit den besseren Materialeigenschaften) zu konkurrenzfähigen



Bedingungen zur Verfügung gestellt werden können.

Kraftfahrzeugtechnik als Motor für Integration

Die Kraftfahrzeugtechnik bietet mit ihren Großserien ein attraktives Gebiet für die Anwendung neuer integrierter leistungselektronischer Baugruppen.

Immer mehr mechanische Komponenten werden durch elektrische ersetzt. Es wurden zwei Hauptgründe benannt:

- Um den Zusammenbau eines Automobils wirtschaftlicher zu gestalten, werden immer größere Module (mit Hilfe der eigenen integrierten Elektronik vorher getestet) gefertigt. Die räumliche Annäherung von Stellglied und Elektronik bedeutet in vielen Fällen die Platzierung der Elektronik an „heißen Stellen“ (z. B. am Motor oder in der Nähe von Scheibenbremsen).
- Um den ständig schärfer werdenden Umweltauflagen zu genügen, muss der Kraftstoffverbrauch immer weiter reduziert werden. Etwa 10 % lassen sich durch den Start-Stop-Betrieb und durch das regenerative Bremsen in Ballungsräumen einsparen.

Mehr elektrische Funktionen, heiße Einbauplätze („Kühlung“ mit bis zu 125 °C heißem Motor-kühlwasser), längere Lebensdaueranforderungen bis zu 10 000 h, Einbeziehung von sicherheitsrelevanten Funktionen (Bremsen, Lenkung) bedeuten immense Anforderungen an die Zuverlässigkeit der elektri-

schen Schaltungen und um Größenordnungen höhere Anforderungen an die eingesetzten Bauelemente. Gleichzeitig bietet aber die Kraftfahrzeugtechnik die hohen Abnahmemengen, die für preisgünstige Serienbauelemente und -baugruppen erforderlich sind. Dr. Tursky stellte am Beispiel eines Lüfterantriebes die Komplexität der Thematik dar.

Die Integration des Zwischenkreises führt zu einer kompakteren Lösung, die wiederum parasitäre Induktivitäten reduziert und zu kleineren Schaltüberspannungen und reduzierten Verlustleistungen führt. Allerdings erfordert der Einbau der Zwischenkreiskondensatoren auch deren Kühlung über ein elastisches wärmeleitendes Kissen. Dieses wiederum ermöglicht gleichzeitig eine mechanische Fixierung. Das metallische Gehäuse übernimmt den mechanischen Schutz, die EMV-Abschirmung, die mechanische Befestigung und die Kühlung von Komponenten. Bild 1 zeigt eine realisierte komplexe Einrichtung.

Die Integration lässt durch die hohe Zahl an eingebauten und mit Störern (Controller, getaktete Stromversorgungen) verbundenen Bauelementen zunächst eine Verringerung der Zuverlässigkeit erwarten. Im Gegenteil ergibt sich aber in der Summe ein deutlicher Gewinn an Stabilität und Zuverlässigkeit gegenüber diskret aufgebauten Lösungen. Erreicht wird dies durch das Entfallen vieler Kabel und Steckverbindungen. Kurze Signalwege erhöhen die Störsicherheit und somit den Schutz gegenüber Umwelteinflüssen.

Damit spielt die Kraftfahrzeugtechnik wegen ihrer besonderen Bedingungen eine Vorreiterrolle beim Einsatz hocheffektiver, komplexer Lösungen. Es ist zu erwarten, dass die Consumerlektronik gleichartige Lösungen schnellstens zur Anwendung bringt. Der Einzelanwender wird erst dann Nutzer, wenn ihm Komponenten aus diesen Innovationen kostengünstig angeboten werden.

Weitere Anwendungen

Aus der Vielzahl der wissenschaftlichen und praktischen Darstellungen wird besonders auf folgende Beiträge hingewiesen:

Anforderungen an Leistungshalbleiter zum Einsatz in Photovoltaik-Wechselrichtern. Eingesetzt werden derzeit für Spannungen bis 250 V Power-MOSFET, für höhere Spannungen IGBTs. Durch Parallelschaltung der Bauelemente und (im kleinen Leistungsbereich bis etwa 2 kW) transformatorlose Schaltungen werden die erforderlichen Wirkungsgrade erreicht. Neue Bauelemente mit noch höheren Taktfrequenzen (CoolMOS, SiC) führen zu Aufwandsreduzierung, insbesondere bei der EMV-Behandlung.

Stromrichter für Windkraftwerke.

Es wurden Konzepte von Windkraftanlagen mit drehzahlvariablen Generatoren verglichen. Dabei wurden Bauelemente-Belastungen ausgewiesen und Kühlkörper für die forcierte Kühlung empfohlen.

Applikation von CoolMOS/SiC-SBD-Bauelemente-Sätze in Schaltnetzteilen. Es wurden erste Mustereinsätze dieser zukunfts-trächtigen Bauelemente beschrieben. Bei dem erläuterten zielgerichteten Einsatz wurden trotz teurer Bauelemente die Gesamtkosten auf 92 % der konventionellen Lösung reduziert.

Fazit

Die Fachtagung gab den Teilnehmern wertvolle Anregungen für ihre weitere Tätigkeit. Der Tagungsband steht den interessierten Anwendern zur Verfügung. Wir freuen uns in den nächsten Jahren auf die fünfte „Bad Nauheimer Tagung“.

Literatur

- [1] Bauelemente der Leistungselektronik und ihre Anwendungen. Vorträge der ETG-Fachtagung. ETG Fachbericht. Berlin: VDE Verlag 2002. W.-D. Sieberth