

5.2018 Mai

elektronik-automotive.de

# Elektronik *automotive*

Fachmedium für professionelle Automobilelektronik

*Neues Leistungsmodul mit niedriger Streuinduktivität für geringere Schaltverluste:*

## Weniger ist mehr



**Siliziumkarbid spielt in der Leistungselektronik mittlerweile eine wichtige Rolle. Dieser Artikel beschäftigt sich mit den Vorteilen eines neu entwickelten SiC-Leistungsmoduls und der Verwendung dieses Moduls in einem Antriebsstrangwechselrichter. Ein Vergleich der Leistungsdaten des SiC-basierten Wechselrichters mit einem Si-basierten Traktionsinverter wird ebenfalls aufgezeigt.**

Von Aly Mashaly und Masaharu Nakanishi

Der erste Siliziumkarbid-MOSFET (SiC-MOSFET) wurde im Jahr 2010 auf den Markt gebracht. Das führte zu einer Revolution auf dem Gebiet der Leistungselektronik. In zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten wurden die verfügbaren SiC-Produkte hinsichtlich unterschiedlicher Aspekte intensiver untersucht. Trotz der hohen Preisunterschiede zwischen SiC- und Si-Halbleiterbauteilen, sind die Kostenvorteile von SiC auf Systemebene mehrfach bewiesen worden. Zusätzlich hat Siliziumkarbid einen Reifegrad erreicht, der dazu geführt hat, dass SiC für Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit, wie sie zum Beispiel im Automotive-Sektor üblich sind, als potenzieller Kandidat für Leistungselektroniksysteme zum Einsatz kommt. Das Interesse an SiC wächst zurzeit deshalb sehr stark.

**Erwartungen an SiC für den Antriebsstrang**

Das vereinfachte Blockdiagramm eines Antriebsstrangs ist in Bild 1 dargestellt. Durch den Einsatz von SiC-Leistungsbau-elementen im Antriebsstrang kann eine Effizienzsteigerung des gesamten Antriebsstrangs erreicht werden. Demzufolge wird durch den Einsatz von SiC im Antriebsstrang bei gleicher Batteriekapazität eine größere Reichweite sowie eine erhebliche Reduzierung von Batterievolumen und damit Batteriegewicht für dieselbe Reichweite erwartet. Auf diese Weise können die Effizienz- und Gewichtsverbesserungen dem Endbenutzer einen wirtschaftlichen Vorteil bringen.

**Neues SiC Power Modul: Gtype**

Der Kommutierungskreis, also der Bereich zwischen Zwischenkreiskondensator und Leistungshalbleiter, ist einer

der kritischsten Schaltungskreise in einem Leistungselektroniksystem. Während der Umschaltung von Transistoren spielt die Streuinduktivität des Kommutierungskreises eine Hauptrolle für die Bestimmung der Schaltverluste sowie die Spannungsspitze, die während des Ausschaltens des Leistungstransistors auftreten. Die Streuinduktivität des Leistungsmoduls ist ein Teil der gesamten Streuinduktivität im Kommutierungskreis. Um die hohe Schaltgeschwindigkeit von SiC ausnutzen zu können, soll die interne Induktivität im Modul klein gehalten werden. Damit können geringere Schaltverluste erzielt werden.

In Bild 2 wird das neu entwickelte Hochstrom-Leistungsmodul Gtype ge-

zeigt. Der Unterschied zwischen dem neuen Gtype-Modul und dem Vorgängermodell Etype ist an der Anschlussstelle hervorgehoben. Obwohl beide Module dieselben Abmessungen haben, weist das Gtype-Modul eine Streuinduktivität von 10 nH auf. Diese ließ sich durch die Verwendung einer spezifischen internen Struktur erreichen. Die Streuinduktivität des Etype-Moduls beträgt 13 nH.

Das Ausschaltverhalten beider Module (E-Typ und G-Typ) wurde messtechnisch untersucht. Beide Module haben zwar die gleichen Abmessungen, jedoch weisen sie unterschiedliche Stromstärken auf. Der Drain-Strom des Gtype-Moduls beträgt 600 A, während der Drain-Strom des Etype-Moduls nur 400 A beträgt. Der Schaltstrom wurde bei der Untersuchung deshalb aufgrund des Etype-Moduls auf 400 A beschränkt. Bei der Messung wurde darauf geachtet, dass die Testparameter für beide Module gleich bleiben. Bild 3 zeigt, dass das Gtype-Modul eine kleinere Spannungsspitze aufzeigt. Die Differenz beträgt 30 V. Es wird jedoch erwartet, dass die Differenz bei höheren Stromstärken aufgrund von höherem di/dt weiter zunimmt. Im Allgemeinen müs-

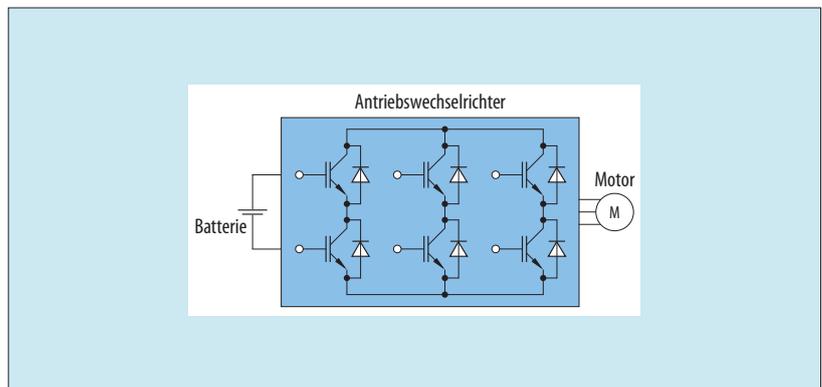


Bild 1. Das vereinfachte Blockdiagramm eines Antriebsstrangs.

(Quelle: Rohm Semiconductor)

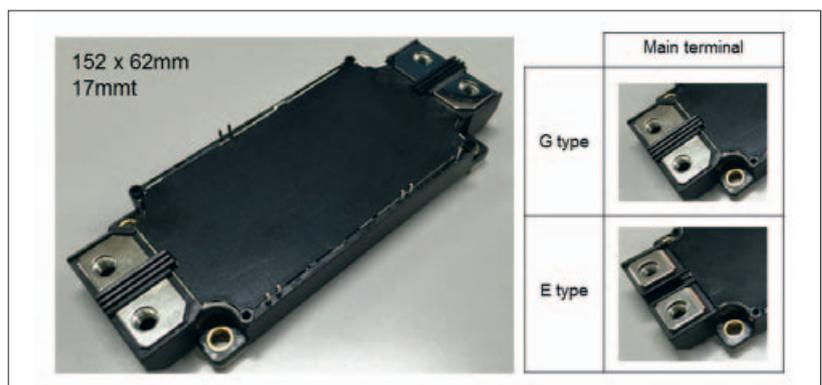


Bild 2. Das SiC-Modul Gtype.

(Bild: Rohm Semiconductor)

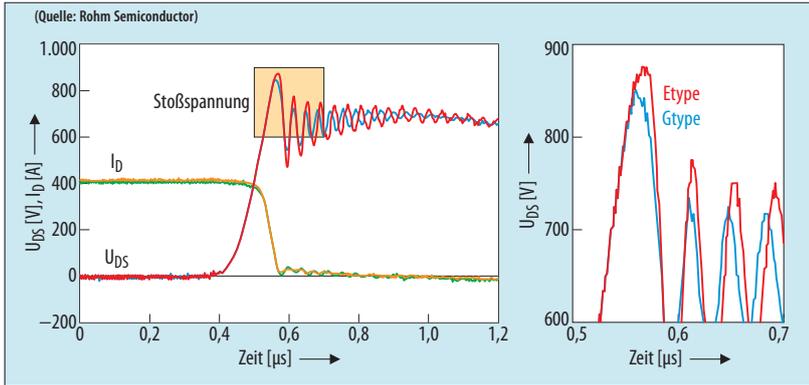


Bild 3. Unterschied der Spannungsspitzen bei 400A zwischen beiden Modulen (30 V).

sen die Modulbenutzer sicherstellen, dass die Spannungsspitze unter keinen Umständen die maximale vom Hersteller spezifizierte Sperrspannung des Moduls überschreitet.

Bei der Bestimmung der Schaltverluste muss die Spannungsspitze, die während des Ausschaltens auftritt, mitberücksichtigt werden. Bild 4 demonstriert den Zusammenhang zwischen Spannungsspitze und Schaltverlust beider Module bei unterschiedlichen Gate-Vorwiderständen ( $R_g$ ). Angenommen, in einer Anwendung wäre eine Spannungsspitze von bis zu 200 V zulässig – dann würden die Schaltverluste

des G-Typ-Moduls etwa 25 Prozent niedriger ausfallen als beim Etype-Modul. Das zeigt, dass eine geringe Streuinduktivität des Moduls ein Schlüsselfaktor ist, um nicht nur einen Sicherheitsabstand in Bezug auf die Drain-Source-Spannungsspitze zu erhalten, sondern auch die Schaltverluste zu verringern und damit den Wirkungsgrad zu erhöhen.

Das Gtype-Modul BSM600D12P3G001 ist ein Halbbrückenmodul, das die SiC-Trench-Gate-MOSFET-Technologie sowie die SiC-Schottky-Diode (SBD) nutzt. Pro Schalter kommen zehn Chips aus SiC-MOSFETs parallel zum Einsatz. Der DC-

Drain Bemessungsstrom beträgt 600 A bei  $T_c = 50^\circ\text{C}$ . In den nächsten Abbildungen werden Vergleiche zwischen dem Gtype-Modul und zwei marktgängigen IGBT-Modulen der neuesten Generation mit dem gleichen Bemessungsstrom gezeigt. In Bild 5 ist ein Vergleich der Ausgangseigenschaften bei einer Sperrschichttemperatur von  $150^\circ\text{C}$  zu sehen. Im Hinblick auf den Leitungsverlust kreuzen sich die Kurven für SiC-MOSFET- und IGBT-Module bei etwa der Hälfte des Bemessungsstroms.

Ein Vergleich der Schaltverluste auch bei einer Sperrschichttemperatur von  $150^\circ\text{C}$  ist in Bild 6 dargestellt. Das zeigt, dass die gesamten Schaltverluste des G-Typ-Moduls mit SiC-Bauelementen rund 65 Prozent niedriger als bei den IGBT-Modulen sind – bei einem Bemessungsstrom von 600 A. Aufgrund der geringeren Schaltverluste lässt sich das SiC-Modul für solche hohen Ströme mit einer wesentlich höheren Schaltfrequenz betreiben.

SiC-Antriebswechselrichter

Bild 7 zeigt zwei Antriebswechselrichter. Der linke Wechselrichter hat eine Bemessungsleistung von 200 kW und

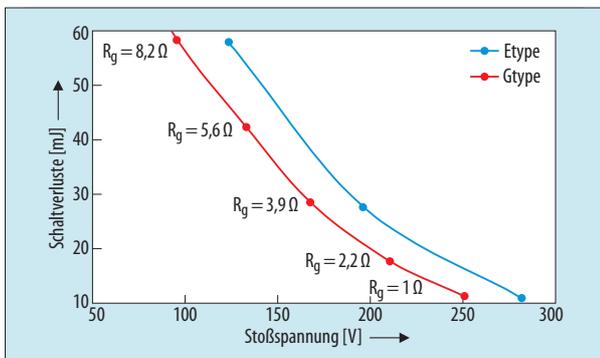


Bild 4. Zusammenhang zwischen Schaltverluste und Spannungsspitze bei unterschiedlichen  $R_g$ . (Quelle: Rohm Semiconductor)

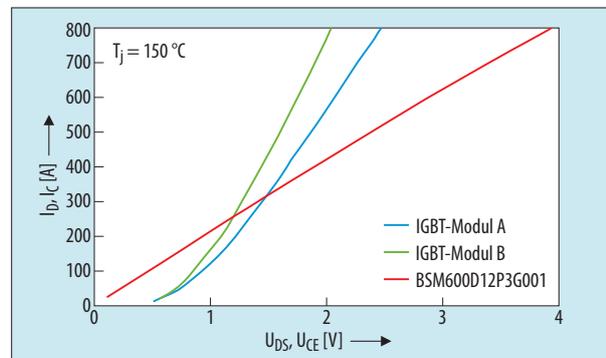


Bild 5. Vergleich der Ausgangskennlinie zwischen dem SiC-Modul und zwei IGBT-Modulen. (Quelle: Rohm Semiconductor)

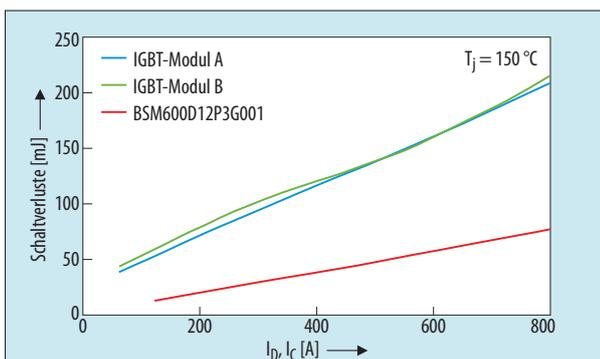


Bild 6. Vergleich der Schaltverluste zwischen dem SiC-Modul und zwei IGBT-Modulen. (Quelle: Rohm Semiconductor)

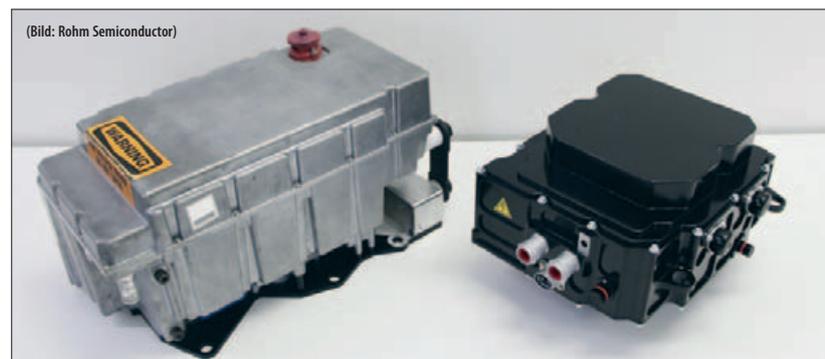


Bild 7. Zwei Antriebswechselrichter – links: 200 kW „IGBT basiert“, rechts: 220 kW „SiC basiert“. Ähnliche Leistung, Unterschiede bei Gewicht, Volumen und Leistungsdichte.

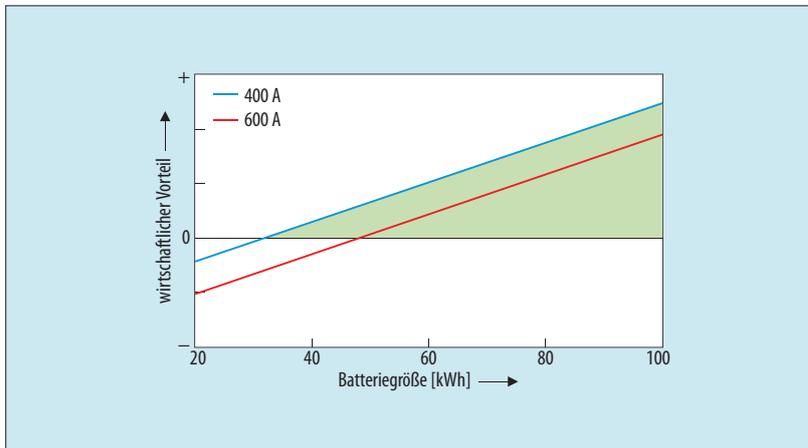


Bild 8. Wirtschaftliche Vorteile von SiC für den Antriebsstrang im Jahr 2025. (Quelle: Rohm Semiconductor)

Antriebswechselrichter	Si-IGBT basiert	SiC MOS basiert
Leistung	200 kW	220 kW
Wirkungsgrad bei maximaler Leistung	96,9 Prozent	98,2 kW
Maximale Schaltfrequenz	16 kHz	24 kHz
Gewicht	15 kg	9 kg
Volumen	14,3 Liter	10 Liter
Leistungsdichte	14 kW/L	22 kW/L

Tabelle 1. Spezifikationsvergleich der beiden Antriebswechselrichter.

nutzt Leistungsmodule, die auf Si-IGBTs und Si-Fast-Recovery-Dioden (FRDs) basieren. Dieser Wechselrichter ist bereits serienmäßig im Einsatz. Der rechte Wechselrichter wurde mit den neu entwickelten SiC-Modulen (Gtype) aufgebaut und weist eine Bemessungsleistung von 220 kW auf. Dank der SiC-MOSFETs und SiC-SBDs konnten ein besseres Konzept der Motorsteuerstrategie, ein effizientes Kühlsystem, eine niederinduktive Stromschienenkonstruktion und ein kompakter Zwischenkreiskondensator erfolgreich implementiert werden. Beide Wechselrichter sind wassergekühlt und beide Ausführungen können mit Batteriesystemen bis zu 800 V eingesetzt werden.

Wie in **Tabelle 1** dargestellt ist, weist der auf SiC basierende Wechselrichter einen hohen Wirkungsgrad sowie eine hohe Leistungsdichte auf. Darüber hinaus wird eine Leistungsdifferenz von etwa 20 kW im Vergleich zu dem IGBT-basierten Antriebswechselrichter erzielt, was mehr Traktion für das Fahrzeug während des Fahrens bedeutet.

### Wirtschaftliche Vorteile von SiC im Antriebsstrang

Zurzeit ist zunehmend ein Trend hin zu einer erhöhten Batteriekapazität bei den unterschiedlichen Fahrzeugherstel-

lern zu verzeichnen. Das ist ein Versuch, die Problematik der Batteriereichweite von Elektrofahrzeugen zu lösen.

Die Antriebstechnik – Antriebswechselrichter und Antriebsmotor – verbrauchen im Einsatz einen wesentlichen Teil der in der Batterie gespeicherten Energie. Jede Erhöhung des Wirkungsgrads im Antriebsstrang würde demnach Vorteile bringen. **Bild 8** zeigt die wirtschaftlichen Vorteile von SiC in Abhängigkeit von der Batteriekapazität im Jahr 2025.

Basierend auf der zuvor erwähnten Wechselrichtereffizienz und dem Standardfahrzyklus von Personenkraftwagen WLTP, beträgt das mögliche Kapazitätsverbesserungsverhältnis drei bis fünf Prozent. Eine Chipgröße von 25 mm<sup>2</sup> bei einem 1200-V-SiC-MOSFET wurde als Basis für die Berechnung angenommen. Der 400-A-Wechselrichter bietet erst bei Batteriegrößen von mehr als 32 kWh einen wirtschaftlichen Nutzen. Weil der Markt für Siliziumkarbid im Moment rasant wächst, erwartet man, dass sich die Preise der SiC-MOSFETs den Preisen für Si-IGBTs in naher Zukunft annähern und damit auch mehr wirtschaftliche Vorteile bringen. Es ist sehr stark davon auszugehen, dass die SiC-Technologie die IGBT-Technologie zwar nicht in allen, aber in vielen Anwendungen verdrängen wird. eck



### Aly Mashaly

studierte Elektrotechnik an der Universität in Kairo. Das Masterstudium absolvierte er an der Leibniz Universität Hannover. Seine Berufslaufbahn begann er als Entwicklungsingenieur Leistungselektronik bei Liebherr Elektronik. Anschließend übernahm er die Leitung des E-Mobility-Bereiches bei KEB. Seit Juli 2015 ist er bei Rohm Semiconductor tätig und verantwortet die Power Systems Abteilung für den europäischen Markt.



### Masaharu Nakanishi

hat einen Hochschulabschluss in Physik von der Universität Kobe in Japan. Seit seinem Eintritt in das Unternehmen war er im Bereich Simulationstechnik von Leistungsbau-elementen sowie im Produktmarketing von Leistungsbau-elementen bei Rohm in Japan beziehungsweise Rohm Semiconductor in Deutschland tätig. Derzeit verantwortet er die Entwicklung neuer SiC-Leistungsbau-elemente.