

# SiC für die Automobilelektronik

## Hocheffizient und leistungsstark

**Elektro-/Hybrid-Fahrzeuge** sind vollgepackt mit Leistungselektronik – bisher in der Regel auf Silizium-Basis. Dort wo Silizium an seine Grenzen kommt, bietet sich Siliziumkarbid (SiC) als leistungsfähige Alternative an. Einschränkungen bezüglich Zuverlässigkeit und Kosteneffizienz sind nun weitgehend überwunden: Die SiC-Technik ist reif für den Einsatz im Auto.

*Autor: Laurent Beaurenaut*

### KEYWORDS

**Leistungshalbleiter / Siliziumkarbid (SiC) / Onboard-Charger / Inverter**

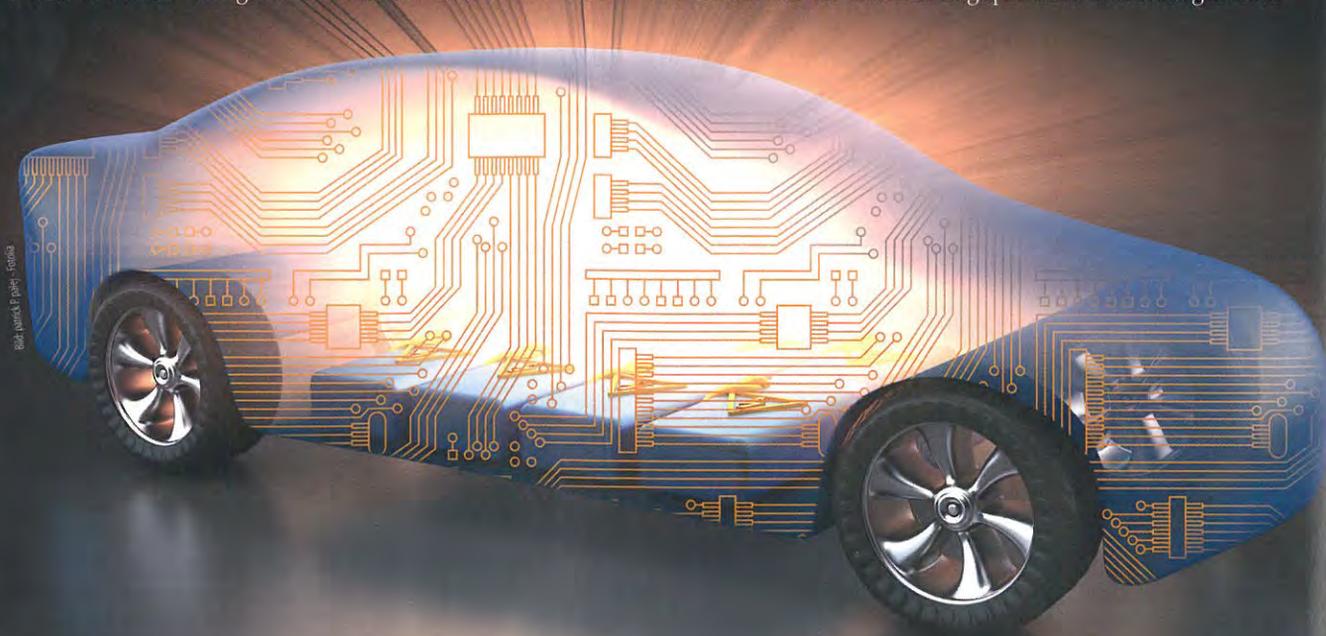
Die Elektrifizierung in Automobilen nimmt immer mehr an Fahrt auf. Damit einher geht der Bedarf an hoch effizienten Leistungshalbleitern für Elektro-/Hybrid-Fahrzeuge (xEVs). So ist es naheliegend, die Vorteile von SiC (Siliziumkarbid) gegenüber konventionellen Silizium-Chips nicht nur in industriellen Applikationen, sondern auch im Automobil zu nutzen. Die höhere Effizienz und Leistungsdichte von SiC ermöglicht höhere Reichweiten (beziehungsweise kleinere Batterien), reduzierte Systemabmessungen, schnellere Ladezeiten und letztendlich mehr Kundenzufriedenheit. Dank der Fortschritte in der SiC-Technologie werden entsprechende Halbleiter in den nächsten Jahren in immer mehr xEV-Subsystemen eingesetzt werden.

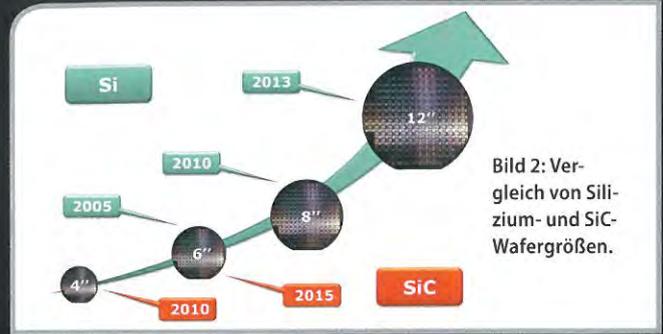
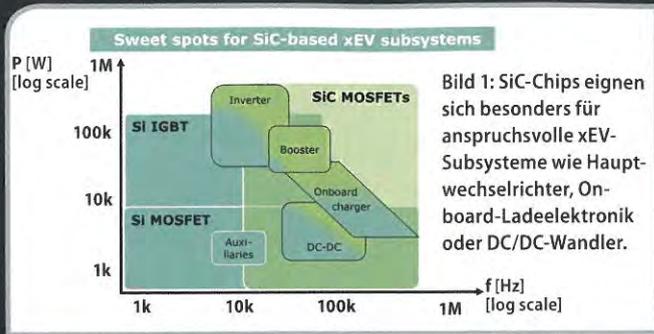
Die Nachfrage nach hybriden oder komplett elektrisch angetriebenen Fahrzeugen steigt, getrieben von strengeren Emissionsvorgaben. Diese Fahrzeuge sind vollgepackt mit Leistungselektronik – bisher in der Regel auf Silizium-Basis. Doch die neuesten Designs fordern weitere Verbesserungen im Hinblick auf Effizienz und Leistungsdichte. Dort wo Silizium an seine

Grenzen kommt, bietet sich SiC als leistungsfähige Alternative an. Bisher nutzten Leistungsmodul und diskrete Schaltungen typischerweise Dioden, MOSFETs und IGBTs auf Silizium-Basis. Im Vergleich dazu ermöglichen SiC-Schaltungen in xEV-Antriebssträngen kleinere Chip-Abmessungen bei gleichen Leistungsdaten. Darüber hinaus reduziert die SiC-Technik Schaltverluste und ermöglicht damit hohe Schaltfrequenzen. So werden effizientere, leichtere und kompaktere Anwendungen im Vergleich zu den bisherigen Systemen möglich. Typische Anwendungen, die von den SiC-Vorteilen profitieren, sind der Haupt-Wechselrichter, die Onboard-Ladeelektronik, Booster oder DC/DC-Umsetzer (Bild 1).

### SIGNIFIKANTE FORTSCHRITTE

SiC-Bauelemente werden seit mehr als zwei Jahrzehnten in verschiedensten Applikationen eingesetzt. Für den Einsatz in der Automobilelektronik gab es jedoch noch Hindernisse zu überwinden. Um die neue Technologie auch effizient im Fahrzeug nutzen zu können, müssen vor allem zwei wesentliche Aspekte erfüllt werden: hohe Zuverlässigkeit und Kosteneffizienz. Die Zuverlässigkeit der zur Gate-Isolation dienenden Oxidschicht wirkt sich direkt auf die Zuverlässigkeit des gesamten MOSFETs aus. Daher war die Entwicklung qualitativ hochwertiger Oxid-





schichten eine große Herausforderung, denn es gab hier in der Vergangenheit Einschränkungen. Optimierungen beim Design und im Prozess ermöglichen jedoch mittlerweile die Entwicklung sehr zuverlässiger SiC-Schalter.

SiC-Wafer sind bisher noch deutlich teurer als Silizium, da das „Aufwachsen“ des Basismaterials spezielle Verfahren erfordert. Denn im Gegensatz zu Silizium, wo die Kristalle mit hoher Reinheit „gezüchtet“ werden können, war die Defektdichte bei SiC-Wafern bisher ein Kriterium. Allerdings wurden in den letzten Jahren signifikante Fortschritte gemacht und die Defektdichte konnte deutlich reduziert werden. So erreicht die Defektdichte bei SiC mittlerweile akzeptable Werte, wodurch größere Chipflächen möglich werden.

Bisher waren auch die Wafer-Abmessungen für SiC kleiner als bei Silizium (Bild 2). Mit der Verfügbarkeit von hochqualitativen 6-Zoll-SiC-Wafern können die Kosten für SiC-Chips jedoch gesenkt werden. In der Vergangenheit waren die meisten SiC-Anbieter kleinere, spezialisierte Halbleiterhersteller mit relativ geringem Volumen und wenig Erfahrung in der Automobilindustrie. Daher konnten diese spezialisierten Unternehmen auch oft nicht die Erfahrungen und Skalierungseffekte aus der Silizium-Fertigung in die SiC-Produktion einbringen.

Die Situation hat sich jedoch grundlegend geändert. Die Wachstumschancen, die der Automobilmarkt für SiC bietet, veranlasst führende Halbleiterunternehmen in diesen Markt ein-

zutreten. Aktuelle Marktmeldungen belegen diesen Trend. Diese Hersteller sind dabei, SiC-Bauelemente auf Standard-Equipment zu produzieren. Damit ergeben sich vielversprechende Kostensenkungen für SiC. Man kann davon ausgehen, dass bereits in Kürze der Einsatz von SiC-Bauelementen aus System-sicht sowohl funktional als auch kostenmäßig sinnvoll ist.

**VERLUSTE UM BIS ZU ZWEI DRITTEL SENKEN**

Im Vergleich zu herkömmlichen Silizium-basierten Hochvolt-IGBTs oder MOSFETs (> 600 V), bieten SiC-MOSFETs einige Vorteile: So weisen die 1200-V-SiC-MOSFETs von Infineon gegenüber IGBTs geringere Gate-Ladungen und Kapazitätswerte sowie keine Reverse-Recovery-Verluste der Body-Diode auf. Das resultiert in temperaturunabhängigen Schaltverlusten, die in Vergleich zu Silizium auch deutlich geringer sind (Bild 3a).

Außerdem zeigen MOSFETs eine Widerstands-ähnliche Ausgangs-Charakteristik, während diese bei IGBTs ähnlich einer Diode ist. Diese Schwellwert-freie Einschalt-Charakteristik (On-State) resultiert in kleineren Durchlassverlusten im Teillastbereich (Bild 3b). Die SiC-MOSFETs sind kompatibel zu den in IGBTs typischerweise genutzten +15 V/-5 V-Spannungen. Somit lassen sich die für IGBTs typischen Standard-Gate-Treiber-Konzepte verwenden.

Die grundlegenden Vorteile prädestinieren SiC-MOSFETs nicht nur für den Betrieb mit höheren Frequenzen wie in

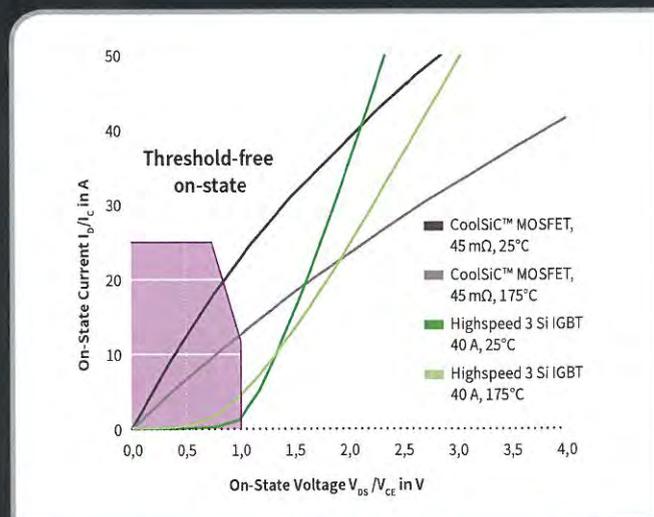


Bild 3: Im Vergleich zu konventionellen Silizium-IGBTs bieten die neuen CoolSiC-Trench-MOSFETs eine Schwellwert-freie On-State-Charakteristik (links) und deutlich geringere Schaltverluste (rechts).

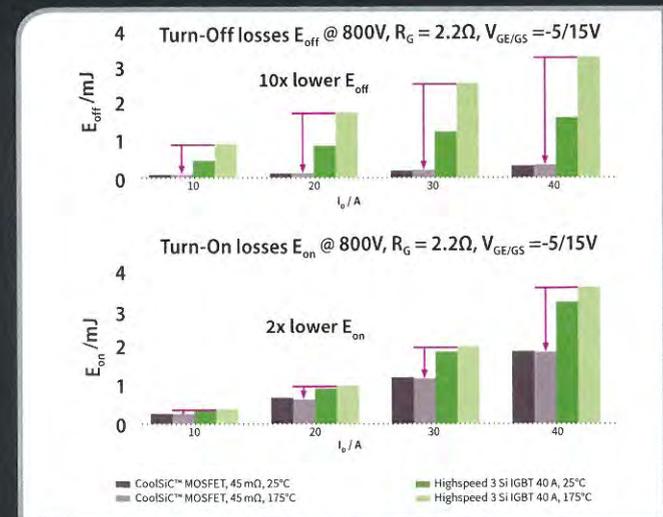


Bild: Infineon

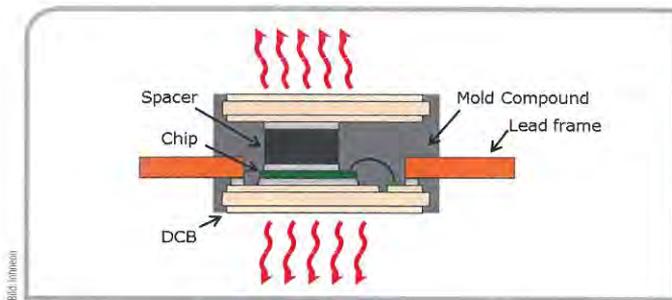


Bild 4: Innovative Gehäusekonzepte (hier Hybridpack DSC) mit doppelseitiger Kühlung ermöglichen effiziente und kompakte Leistungsmodule.

Onboard-Ladeschaltungen oder DC/DC-Wandlern, sondern auch für Inverter-Applikationen, wo Schaltfrequenzen von unter 20 kHz typisch sind. Hier wird der Wirkungsgrad ganz wesentlich vom Betrieb mit geringen Lasten bestimmt. Mit SiC-MOSFETs können beispielsweise die Verluste in Invertern bei geringer oder mittlerer Last um bis zu zwei Drittel gesenkt werden. In anderen xEV-Applikationen wie Onboard Charger (OBC) und DC/DC-Umsetzer ermöglicht SiC, dank der höheren Schaltfrequenzen die Verwendung von kleineren passiven Komponenten.

Der Vollständigkeit halber sind auch SiC-Schottky-Dioden zu erwähnen. Hohe Schaltgeschwindigkeiten beziehungsweise extrem geringe Sperrerrhol-Ladungen (Qrr) reduzieren die Schaltverluste und ermöglichen eine effiziente Miniaturisierung für das Endprodukt. SiC-Schottky-Dioden sind ideal für Leistungsfaktorkorrektur-Schaltungen (PFC) in Onboard-Ladesystemen.

#### OPTIMIERTE GEHÄUSETECHNOLOGIE

Um die Performance der SiC-Chips bestmöglich zu nutzen, ist auch eine entsprechend optimierte Packaging-Technologie für die Leistungsmodule erforderlich. Höhere Schaltfrequenzen ermöglichen eine bessere Energieeffizienz. Das erfordert jedoch nicht nur verbesserte Gehäusematerialien, sondern auch die Berücksichtigung der höheren thermischen Widerstände bei kleineren Chips. Kleinere Chips bedingen auch höhere Stromdichten und eine größere Gefahr für thermomechanische Verformungen.

Um die Performance der SiC-MOSFETs voll ausschöpfen zu können, sind außerdem Gehäuse mit möglichst geringer Streuinduktivität und geringem Gehäusewiderstand erforderlich. Daher sind neue Gehäusekonzepte für Leistungsmodule gefordert. Moderne Gehäusekonzepte mit doppelseitiger Kühlung bieten sich hier an, um den thermischen Widerstand bei kleinsten Chip-

flächen zu optimieren. Ein Beispiel sind die neuen Hybridpack-DSC-Module von Infineon. Sie verfügen über eine doppelseitige effiziente Wärmeabfuhr und können so den thermischen Widerstand  $R_{th}$  auf Systemebene deutlich senken (Bild 4). Damit lassen sich Inverter-Designs mit sehr hoher Leistungsdichte aufbauen.

#### DEUTLICHE KOSTENSENKUNG MÖGLICH

Mit SiC-MOSFETs lassen sich sehr kompakte und hocheffiziente Inverter realisieren. Zu diesem Ergebnis ist etwa das Fraunhofer IISB in der Studie „Evaluation of potentials for Infineon SiC-MOSFETs in automotive inverter applications“ gekommen. Unter vergleichbaren Bedingungen ließ sich mit den SiC-MOSFETs die Chipfläche im Vergleich zu IGBT-basierten Invertern deutlich verringern. Dank der reduzierten Chip-Verluste wurde die Effizienz für verschiedene Fahrscenarien um mehr als 3 Prozent verbessert, insbesondere im Stadtverkehr mit vielen Beschleunigungsphasen (Tabelle 1).

Bei der Betrachtung der Inverter-Effizienz ist zu beachten, dass die Energie grundsätzlich in zwei Richtungen fließt – von der Batterie zum Rad bei der Erzeugung des Drehmoments und zurück vom Rad zur Batterie bei der Energierückgewinnung (Rekuperation). Daher ist der Wirkungsgrad des Inverters wesentlich für Batterie-Elektrofahrzeuge, denn er hat einen direkten Einfluss auf die erzielbare Reichweite beziehungsweise auf die notwendige Batteriegröße, um eine bestimmte Reichweite sicherzustellen. Da die Batterie ein wichtiger Kostenfaktor ist, kann eine Reduzierung der Batteriezellen um 5 bis 10 Prozent zu einer deutlichen Kostensenkung im System bei Batterien von mehr als 40 kWh Leistung führen.

Silizium unterstützt keine so hohen Durchbruch-Feldstärken wie SiC. Daraus resultiert, dass ein gängiger 1200-V-IGBT deutlich mehr Verluste aufweist als sein Pendant in der 600-V-Klasse. Andererseits ermöglicht ein 1200-V-SiC-MOSFET einen sehr effizienten Betrieb bei höheren Batteriespannungen im Bereich von 850 V. Damit empfiehlt sich SiC insbesondere für Architekturen, die auch Schnelllade-Anwendungen ermöglichen. Mit der sich gerade in Entwicklung befindlichen Infrastruktur lässt sich dann eine 80-kWh-Batterie in nur 15 Minuten zu 80 Prozent laden. So wird eines der größten Hemmnisse für die Umsetzung der Elektromobilität und Sicherung der Kundenzufriedenheit beseitigt.

#### FAZIT

Immer mehr Tier 1 und OEMs setzen für künftige Entwicklungen auf SiC. Mit 1200-V-CoolSiC-MOSFETs hat Infineon neue Möglichkeiten bezüglich Effizienz und Leistungsdichte aufgezeigt. Das Unternehmen bietet ein breites Portfolio an Silizium-, und Widebandgap-Halbleitern für die Leistungselektronik, gepaart mit innovativer Gehäusetechnik und entsprechenden Gate-Treibern. Von der mehr als 25-jährigen Erfahrung in der SiC-Technologie profitierten bisher bereits Leistungswandler in Solar-, Windenergie- und Industrieanwendungen. In Zukunft werden auch xEV-Fahrzeuge die Vorteile von SiC nutzen können. (ku) //

|                 | Si based Inverter<br>(400V, 10kHz) | SiC Based Inverter<br>(800V, 10kHz) |
|-----------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Total Chip Area | 2700 mm <sup>2</sup>               | 987 mm <sup>2</sup>                 |
| Artemis Urban   | 94.6 %                             | 98.1 %                              |
| Artemis Road    | 97.2 %                             | 99.0 %                              |
| Artemis Highway | 98.2 %                             | 99.3 %                              |
| NEDC            | 96.3 %                             | 98.7 %                              |
| WLTP            | 96.8 %                             | 98.9 %                              |

Tabelle 1: Effizienzvergleich für verschiedene Inverter-Implementierungen und Fahrprofile für einen Umrichter mit 120 kW Leistung.

#### Autor

Laurent Beurenaut

Principal Engineer bei der Infineon Technologies AG.