



© ABB

# Streuinduktivität bei Leistungs- halbleitern in der Elektromobilität

Die Leistungselektronik spielt für die Elektromobilität eine wichtige Rolle, da sie für die effiziente Leistungsübertragung von der Batterie zum Motor sorgt. Siliziumkarbid als neues Halbleitergrundmaterial ermöglicht unter anderem durch geringere Schaltverluste und höhere Schaltfrequenzen im Vergleich zu Silizium effizientere Lösungen: Für das Gesamtsystem ist es aber laut ABB wichtig, die Schnittstellen und den internen Aufbau der Leistungselektronik so zu verbessern, dass Streuinduktivitäten optimiert sind.

## AUTOREN



**Tobias Keller**

ist Vice President Globales Produkt Management bei ABB Power Grids Switzerland in Lenzburg (Schweiz).



**Dr. Daniel Schneider**

ist Senior Principal Engineer BiMOS bei ABB Power Grids Switzerland in Lenzburg (Schweiz).

## BESTIMMENDES LEISTUNGSMERKMAL FÜR ELEKTROMOBILITÄT

Mit der Elektromobilität scheint sich der Umrichter und der darin enthaltene Leistungshalbleiter als ein neues zentrales Unterscheidungsmerkmal zwischen den Automobilherstellern und zwischen den verschiedenen Leistungssegmenten herauszukristallisieren. Als bevorzugte Technologie für Halbleiter im Hochleistungsbereich haben sich in den letzten 20 Jahren Silizium(Si)-IGBT gepaart mit Freilaufdioden mehrheitlich durchgesetzt. Dies ist bei Traktionsantrieben in Lokomotiven und Triebwagen wie auch in industriellen Spannungsumrichtern und Anwendungen in der Stromübertragung der Fall.

Neben den siliziumbasierten Halbleitern wird seit Jahrzehnten auch die Verwendung von Siliziumkarbid (SiC) in Leistungshalbleitern erforscht. Diese zeichnen sich durch eine Reihe sehr vorteilhafter Materialeigenschaften aus. SiC gehört zu den sogenannten Wide-Bandgap(WBG)-Materialien und erlaubt dadurch im Vergleich zu Si eine um etwa Faktor 10 geringere Schichtdicke. Außerdem sind höhere Temperaturen möglich, und der elektrische Widerstand verhält sich linear, während die sehr geringen Schaltverluste sehr hohe Schaltfrequenzen zulassen. Trotz dieser hervorragenden Eigenschaften hat sich die Verwendung bis

heute lediglich auf einige wenige Anwendungen beschränkt, sodass das umgesetzte Volumen im Vergleich zu Siliziumhalbleitern sehr klein blieb. Hauptursache dafür ist der zu hohe Preis dieser Halbleiter, hervorgerufen durch die aufwendige Herstellung der Wafer.

Mit der aktuellen Ausrichtung auf das Marktsegment der Elektromobilität und den damit verbundenen großen Stückzahlen ergibt sich nun aber die Möglichkeit, auf welche die Hersteller in Hinblick auf den Einsatz von Siliziumkarbid so lange gewartet haben. Die Elektromobilität bietet die einzigartige Möglichkeit für SiC, aus der Ecke der kleinen Volumina mit daraus resultierendem hohem Preis herauszukommen und sich als Alternative zu Si zu positionieren.

## STARKE VORTEILE FÜR DEN TEILLASTBETRIEB

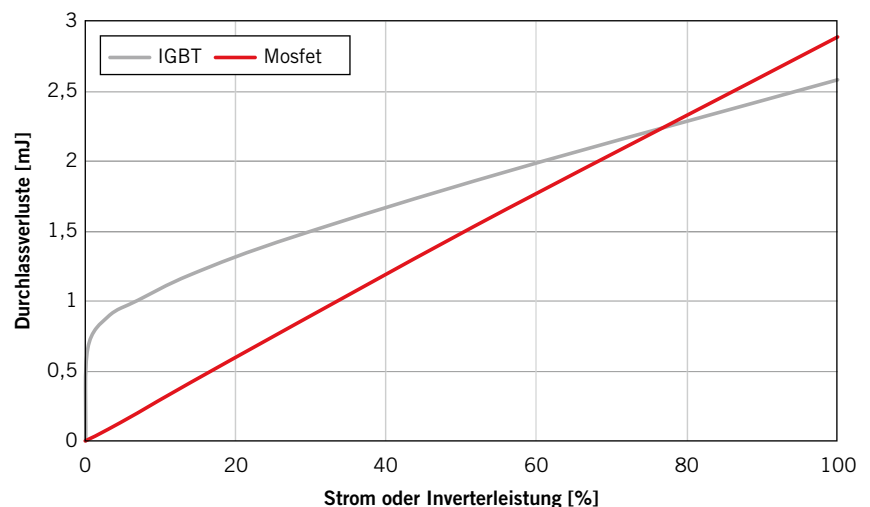
Woraus ergeben sich nun konkret die Vorteile des SiC bei der Anwendung in Fahrzeugen? Der Umrichterbau verlangt grundsätzlich nach der maximal erreichbaren Effizienz. Die Systeme werden daher in der Regel so ausgelegt, dass Motoren möglichst immer mit Volllast betrieben werden. Bei Pkw ist dies jedoch deutlich anders, da sie eher übermotorisiert sind für die relativ wenigen im Realbetrieb auftretenden Vollgas-Situationen. Das ist auch der Grund dafür, dass Verbrennungsmotoren chronisch ineffizient sind: Sie werden kaum je unter Volllast betrieben. Dies gilt umso mehr, je höher das

Leistungssegment ist. Es ist einer der Vorteile der Elektroautos, dass sie eine deutlich höhere Energieeffizienz aufweisen. Diese wird noch mehr gesteigert, wenn man SiC einsetzt.

Während die Vorteile bei hohen Schaltfrequenzen schon immer klar auf Seiten des SiC lagen, kommen nun auch die Vorteile bei den Durchlassverlusten zum Tragen. Die linearen Verluste sind ein großer Vorteil, wenn die Elektromotoren mit weniger als 50 % ihrer maximalen Leistung betrieben werden. In diesem Bereich sind die Durchlassverluste des Siliziumkarbids immer deutlich tiefer als die des Siliziumhalbleiters, der auch bei kleinster Leistung eher hohe Durchlassverluste verursacht, **BILD 1**.

## SIMULATION ZUR LEISTUNGS-AUFNAHME

Simuliert man die Leistungsaufnahme von Umrichtermodulen auf Siliziumbasis und auf Siliziumkarbidbasis rechnerisch durch, erhält man dementsprechend einen deutlichen Unterschied. Es ist auch bei einer relativ geringen Schaltfrequenz von 10 kHz mit einer dramatischen Reduktion der Halbleiterverluste auf ein Viertel zu rechnen. Setzt man diese Verluste in Relation zum gesamten Energieverbrauch während einer Fahrt im Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure (WLTP), so kann man die Einsparung in der Gesamtenergiebilanz erkennen. Wenn man einen Verbrauch von 20 kWh



**BILD 1** Vergleich der Durchlassverluste zwischen Si-IGBT und SiC-Mosfet (© ABB)

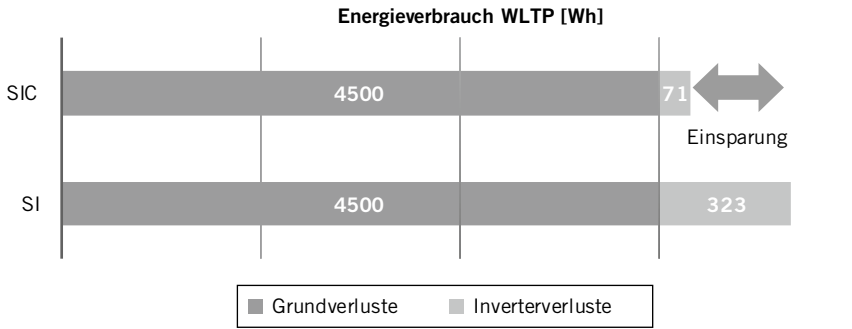


BILD 2 Einsparungspotenzial in der Gesamtenergiebilanz eines E-Fahrzeugs (© ABB)

pro 100 km annimmt, so würde sich eine Einsparung von circa 5 % ergeben. Daraus wiederum ergeben sich 5 % geringere Batteriekosten und -gewicht oder 5 % mehr Reichweite, BILD 2.

Ähnliche Rechnungen wurden von diversen Herstellern auf allen Fertigungsebenen vom Chiphersteller bis zum Automobilbauer durchgeführt, und je nach Annahmen kommen Werte zwischen 3 und 11 % [1, 2] heraus. Setzt man nun die höheren Kosten des Umrichters in Relation zu den Einsparungen und weiteren Vorteilen ergibt sich das bevorzugte Halbleitermaterial. Obwohl SiC eine noch sehr junge Technologie in dieser Anwendung ist, scheint sie sich zumindest im mittleren bis oberen Leistungssegment und bei großen Batterien mit höheren Spannungen im Bereich von 800 V immer mehr durchzusetzen. Das bekannteste Beispiel ist Teslas Model 3. Weitere Vorteile können sich ergeben, wenn man die geringen Schaltverluste im SiC dafür benutzt, die Schaltfrequenz zu erhöhen.

**AUFBAU DER UMRICHTER ENTSCHEIDEND**

Dabei wird aber der grundlegende Aufbau der Umrichter zum wichtigen Thema. Typischerweise besteht der Umrichter aus einem 2-Level-Umrichter, der mit sechs SiC-Mosfets bestückt ist, BILD 3. Wie aus der Elektrotechnik bekannt, führen Übergangswiderstände, vorhandene Induktivitäten und aufbaubedingte Kapazitäten zu tiefpassähnlichen Anordnungen und schränken so zum Beispiel die Übertragung der schnellen Ansteuerimpulse für die Mosfets ein, da die Stromanstiegsgeschwindigkeit limitiert wird. Durch diese Effekte droht ein wichtiger Vorteil der SiC-Halbleiter ver-

loren zu gehen. Das gleiche Verhalten trifft auch auf parasitäre Induktivitäten zu, die im Hauptstrompfad bei Source und Drain zu einer Verzögerung der Stromanstiegsgeschwindigkeiten führen. Auch dies führt unmittelbar zu einer Leistungseinschränkung. Des Weiteren können durch die Induktivitäten Überspannungen entstehen, die beim Ausschalten die Umrichter belasten. Die Auslegung der Umrichter und umrichternaher Komponenten wird deshalb beeinflusst und erheblich verteuert.

**STROMPFADAUSLEGUNG MACHT DEN UNTERSCHIED**

Die Limitierung dieser Induktivitäten ist ein zentrales Ziel, das durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden kann. Eine gängige und bestens erprobte Möglichkeit ist die Parallelführung der Laststrompfade auf der Gleichstromseite. Durch eine enge räumliche parallele Führung der großflächigen und flachen Schienen entsteht eine starke magnetische Kopplung, die gleichbedeutend mit

einer niedrigen Streuinduktivität ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nahezu das gesamte Magnetfeld eines Laststrompfads auch den anderen Teil des Laststrompfads durchdringt. Dadurch muss bei einer entsprechenden Schaltung des Halbleiters, die gleichbedeutend mit einer Umschaltung von DC+ auf DC- ist, nur eine minimale Änderung am Magnetfeld erfolgen. Selbstverständlich müssen auch die Leistungshalbleitermodule dementsprechend so konstruiert und ausgelegt sein, dass eine enge räumliche parallele Führung als Anordnung überhaupt erst möglich ist, BILD 4.

Mit einem entsprechend ausgeführten Kupferschienenpaket können die DC-Anschlüsse sowie isoliert davon die DC+ Anschlüsse einfach verbunden werden. Da in der Automobiltechnik eher tiefe Zwischenkreis- beziehungsweise Batterie-Nennspannungen im Bereich bis zu 1200 V eingesetzt werden, ist eine möglichst dünne Isolation zwischen den beiden Laststrompfaden verhältnismäßig einfach möglich. Die Erfahrung aus aktuellen Aufbauten von Modulen mit dem Einsatzgebiet Automobiltechnik zeigt, dass sich dadurch Streuinduktivitäten von unter 10 nH realisieren lassen.

**PARASITÄRE EFFEKTE ELIMINIEREN**

Betrachtet man im nächsten Schritt den Aufbau der Halbleiter, ist festzustellen, das auch hier modulinterne parasitäre Induktivitäten zu einer ungleichen Aufteilung der Ströme führen können. Da gerade im mittleren und hohen Leistungsbereich Leistungshalbleitermodule aus mehreren, parallel geschalteten Mosfet-Chips bestehen, ist es durchaus möglich,

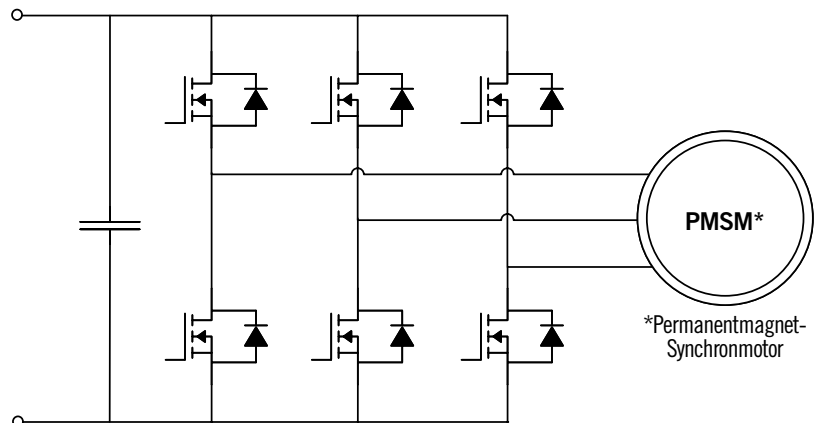
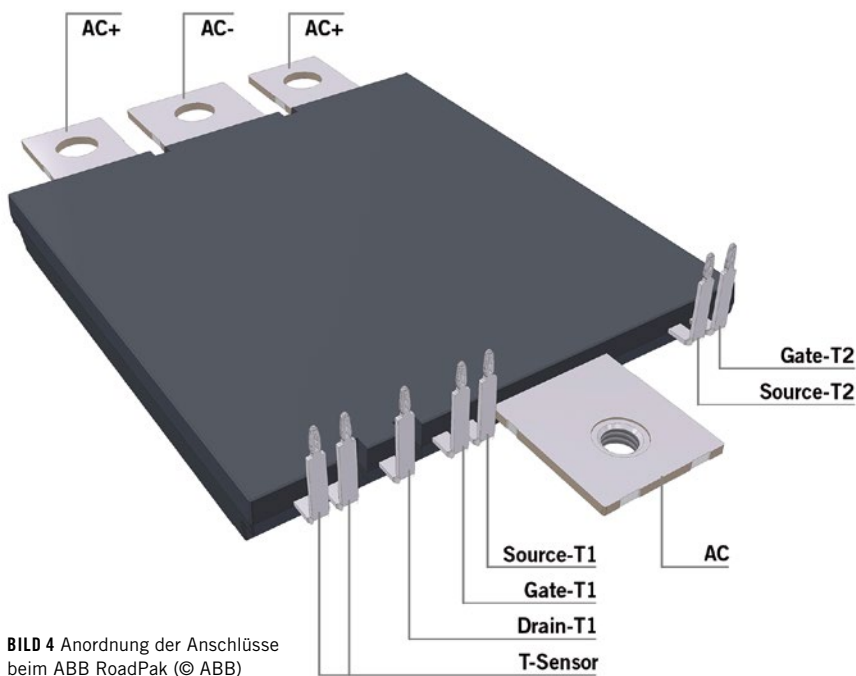


BILD 3 Schematischer Aufbau eines 2-Level-Umrichters (© ABB)



**BILD 4** Anordnung der Anschlüsse beim ABB RoadPak (© ABB)

dass parasitäre Induktivitäten oder Koppelinduktivitäten zu einer ungleichen Aufteilung der Chipströme und somit zu einer Einschränkung der Leistungsfähigkeit des ganzen Moduls führen. Verwendet man beim Aufbau der Mosfet-Chips ähnliche Grundsätze wie beim oben beschriebenen Umrichter Aufbau und führt die einzelnen Bond-Drähte möglichst über weite Strecken parallel und räumlich eng beieinander, so lassen sich auch hier Streuinduktivitäten von unter 6 nH realisieren.

Zusammengefasst ergeben sich somit pro aktivem Schaltpfad Streuinduktivitäten, die unterhalb von 20 nH liegen und die negativen Effekte, wie die erwähnten Überspannungen und Begrenzung der Stromanstiegsgeschwindigkeiten, sehr stark limitieren. Damit kommen die erwähnten Vorteile von SiC voll zur Geltung. Die gestartete Untersuchung kann nun noch weitergeführt werden und auch auf die Motorenseite (AC-Seite) ausgedehnt werden. Auch hier sind die entsprechenden Streuinduktivitäten so weit als möglich zu reduzieren und die Kabelwege kurz zu halten.

## HOHE SCHALTFREQUENZEN NUTZEN

Die durch SiC-Bausteine nutzbaren höheren Schaltfrequenzen erlauben es, Induktivitäten zu reduzieren, die in den Schaltungen für Filteranwendungen oder aber im eigentlichen Traktionsmotor verwendet werden. Dies erlaubt es, einerseits kostengünstigere, sowie andererseits auch kleinere und leichtere Fahrzeuge zu rea-

lisieren. Auch die Stromkreise auf der Ausgangsseite sind entsprechend zu berücksichtigen und natürlich bereits während der Designphase entsprechend zu optimieren. Der Vollständigkeit halber sei hier auch auf die Koppelkapazitäten hingewiesen, die ebenfalls ungewohnte Strompfade gerade für hochfrequente Ströme ermöglichen und je nach Aufbau der Schaltung einen Erdstrom hervorrufen, der möglicherweise zu Lagerschäden oder zum Ansprechen von Überwachungseinrichtungen führen kann.

## FAZIT

Als Zusammenfassung lassen sich also dank einer optimierten Auslegung und Führung der Laststrompfade wirkungsvoll die Leistungsfähigkeit einer entsprechenden Schaltung beziehungsweise von Umrichtern für xEV-Fahrzeuge erhöhen. Somit können die Vorteile von SiC voll für eine höhere Effizienz sowie entweder für eine größere Reichweite oder kompaktere Bauform des elektrischen Antriebsstrangs genutzt werden.

## LITERATURHINWEISE

- [1] Hain, S.; Meiler, M.; Denk, M.: Evaluation of 800 V Traction Inverter with SiC-Mosfet versus Si-IGBT Power Semiconductor Technology In: PCIM Europe 2019, Nuremberg, Germany.  
 [2] Casady, J.; et al.: Ultra-low (1.25 mOhm) On-Resistance 900 V SiC 62 mm Half-Bridge Power Modules Using New 10 mOhm SiC Mosfets. In: PCIM Europe 2016, Nuremberg, Germany



## READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:  
[www.ATZelectronics-worldwide.com](http://www.ATZelectronics-worldwide.com)

# VISIONEN. ENTWICKLUNG. MOBILITÄT.

Die Welt der Mobilität verändert sich – die Herausforderung der Automobilentwicklung ist das Wissen von morgen mit Blick auf Technologien von übermorgen. Die Komplexität des Mobilitätswandels erfordert wegweisende Lösungen für den Transformationsprozess. ATZelektronik bietet hochaktuelle Informationen aus dem gesamten Spektrum der Automobil-elektronik. Nutzen Sie zusätzlich zu den Printausgaben das **interaktive E-Magazin** und profitieren Sie von der einzigartigen **Wissensdatenbank des Onlinearchivs mit pdf-Download**.

**ATZ elektronik**



[www.mein-fachwissen.de/ATZelektronik](http://www.mein-fachwissen.de/ATZelektronik)