

Optimierung des internen Aufbaus und der Ansteuerung von Leistungshalbleitermodulen

Mit der Verwendung des Halbleitermaterials Siliziumkarbid in Leistungshalbleitern für elektrische Traktionsantriebe wird deren optimale Ansteuerung durch neuartige Gate Units sowie ein ebensolches elektromagnetisches Design überaus wichtig. Ebenso lassen sich die durch die verlustarmen SiC-Halbleiter grundsätzlich möglichen Effizienzgewinne nur durch gutes thermisches Design erfolgreich umsetzen, das eine optimale Stromaufteilung innerhalb der Module ermöglicht, wie Hitachi ABB Power Grids und NXP schildern.



AUTOREN



Pierre Calmes

ist Global System & Application Manager, Powertrain and Electrification Drivers, NXP Semiconductors in Toulouse (Frankreich).



Tobias Keller

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



Dr. Daniel Schneider

ist Senior Principal Engineer BIMOS bei Hitachi ABB Power Grids in Lenzburg (Schweiz).

Die Stromaufteilung zwischen einzelnen Modulen kann mit der externen Ansteuerung, der sogenannten Gate Unit, beeinflusst werden. Häufig werden hierzu untereinander gekoppelte Gate Units verwendet, die gegenseitige Abgleiche untereinander unterstützen, sowohl bei drei unabhängigen Modulen im typischen Dreiphasen-Umrichter als auch bei Parallelschaltung von mehreren Modulen. Dies geschieht häufig über eine Selbstkalibration, bei der sich verbundene Gate Units selbsttätig über das Schaltverhalten der einzelnen angeschlossenen Leitungshalbleiter austauschen. Sie stellen sich so ein, dass eine synchrone Stromübernahme bei parallelgeschalteten Modulen oder eine optimierte Kommutierungsphase bei Dreiphasen-Umrichtern ermöglicht werden.

Siliziumkarbid (SiC) mit seinen schnellen Schaltfrequenzen und hohen di/dt und dU/dt benötigt eine schnelle Reaktion auf der Ansteuerungsseite. Kurzschlusserkennung oder auch bewusstes Kurzschließen (aktiver Kurzschluss) muss innerhalb von einigen wenigen Mikrosekunden erfolgen. Dies ist nur mit intelligenten Gate Units möglich, die

typischerweise durch einprogrammierte Logik gewisse Aufgaben autonom und dadurch schnell ausführen können.

SCHNELL SCHALTEN ALS SCHLÜSSEL

Die NXP-GD31xx-Familie geht diesbezüglich mit optimierten SiC Gate Units an den Start, die Gate-Treiber-Ströme bis 15 A treiben können und dU/dt von >25 V/ns unterstützen. Des Weiteren zeichnen sich diese Treiber durch eine robuste elektrische Trennung mit einer Gleichtakt-Transiente-Störfestigkeit von größer als 130 V/ns zwischen dem Niederspannungs- und dem Hochspannungspfad aus. Die integrierte Intelligenz erkennt und reagiert auf Kurzschlüsse innerhalb von weniger als $1,5 \mu\text{s}$ und schützt dadurch die SiC-Mosfets, auch wenn diese mit etwa $3 \mu\text{s}$ selbst eine viel kleinere Kurzschlussfestigkeit als vergleichbare Silizium(Si)-IGBTs mit rund $10 \mu\text{s}$ haben. Gleichzeitig wird die Überspannung durch den programmierbaren Soft-Shutdown-Strom auf weniger als 10 % begrenzt, was ein sanftes Aus-

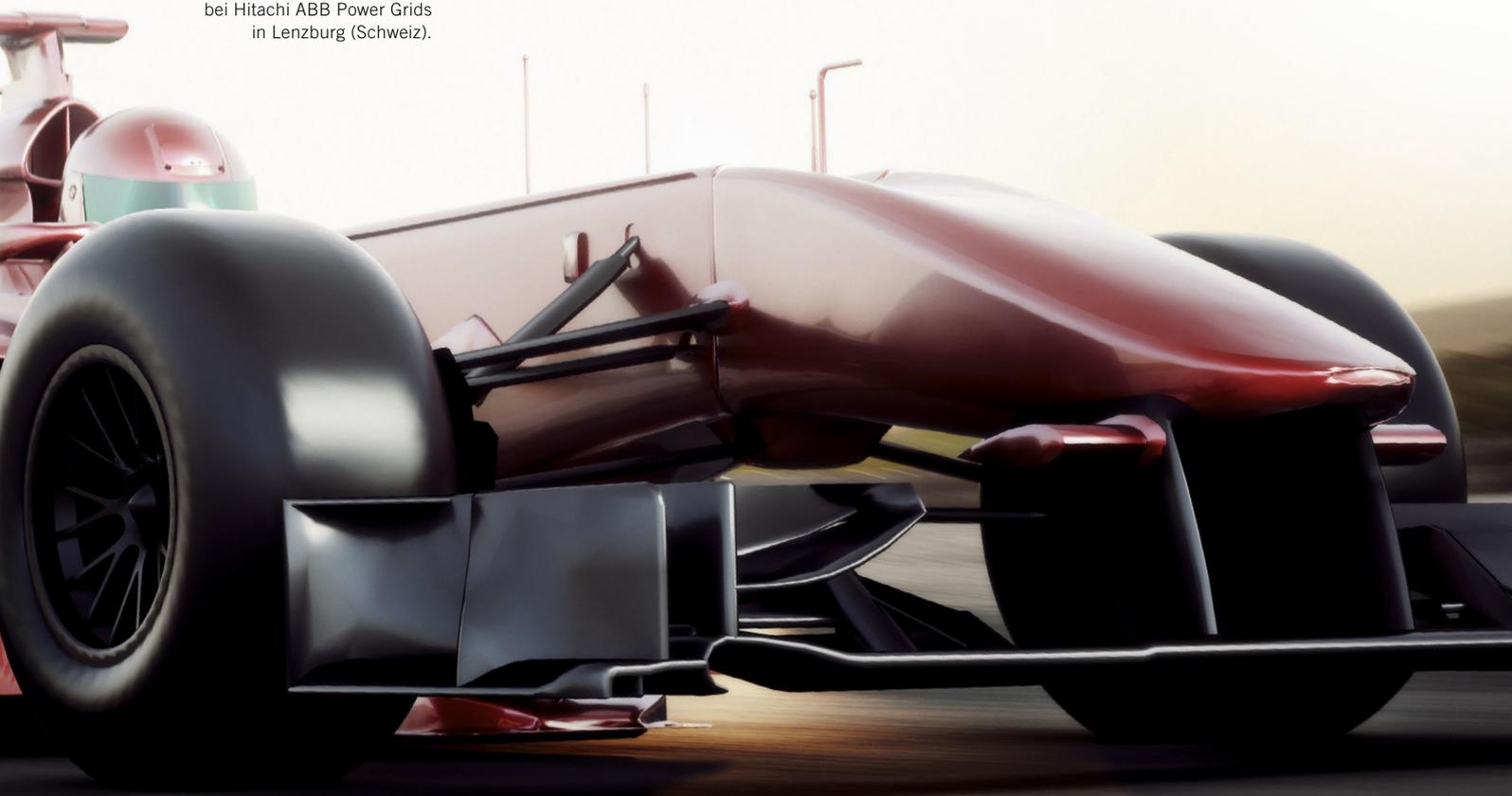




BILD 1 Evaluationsboard mit Gate Unit auf dem RoadPak montiert (© NXP)

schalten des Gates ermöglicht. Die Gate-Treiber sind nach ISO 26262 für die Funktionale Sicherheit in Kraftfahrzeugen konform und unterstützen die geforderten Sicherheitsfunktionen wie Built-in Self Test (BIST), System Performance Index (SPI) sowie Ausgangsspannungs(VGE)-Überwachung und vereinfachen so die Integration in ASIL-C/D-Steuern für den Nutzer erheblich. Beim BIST werden alle analogen und digitalen Schaltkreise auf der Gate Unit überwacht und allfällige Fehler so erkannt. Der Status kann über eine mit zyklischer Redundanzprüfung (Cyclic Redundancy Check, CRC) abgesicherte SPI-Schnittstelle ausgelesen werden. Ein Evaluations-Kit erlaubt die einfache und klare Konfiguration der Gate Units am Schreibtisch sowie die Realisierung von Demonstratoren und einfachen Aufbauten, **BILD 1**.

Die Erfahrung aus vielen Versuchen und der Zusammenarbeit mit Anwendern zeigt, dass unbeabsichtigte Verhaltensweisen oder auch Fehler häufig auf Probleme im Design der Gate Units zurückzuführen sind. Ebenfalls verursachen Si Gate Units, die für eine Anwendung in SiC angepasst wurden, in vielen Fällen Probleme durch die komplett unterschiedliche Ansteuerung und die viel höheren dI/dt und dU/dt , die bei

SiC auftreten können. Eine Verwendung eines dafür optimierten Treibers ermöglicht dagegen eine problemlose Nutzung der SiC-Leistungshalbleiter und das Ausschöpfen des ganzen Potenzials dieser SiC-Leistungshalbleiter.

ELEKTROMAGNETISCHES DESIGN

Neben dem optimalen Design der Gate Unit ist es ebenso wichtig, dass die Ansteuersignale in der gewünschten Form innerhalb des Moduls verteilt werden. Die Stromaufteilung zwischen den Modulen und den einzelnen Chips wird dabei auch durch das geometrische Layout des Moduls bestimmt. Dabei sind grundsätzlich zwei Themenbereiche zu berücksichtigen: das elektromagnetische und das thermische Design. Das elektromagnetische Design befasst sich mit dem Ausrichten der elektrischen Leiter im Modul. Dies umfasst einerseits die Hauptstrompfade, die die hohen Ströme führen, andererseits die Hilfsstrompfade, welche die kleinen Ansteuerströme führen. Durch induktive Kopplung beeinflussen sich diese Leiter gegenseitig. Vor allem die enorm hohen Schaltgeschwindigkeiten von einigen Milliarden Ampere pro Sekunde im Hauptstrompfad erzeugen starke Magnetfelder, die wiederum Spannungen in die umliegenden Leiter der Ansteuerpfade induzieren; das ist besonders ausgeprägt, wenn diese Schleifen bilden. Durch diese induzierten Spannungen erfahren einzelne Chips unterschiedliche Ansteuerspannungen, was dazu führen kann, dass die Chips nicht zum gleichen Zeitpunkt einschalten und diese, wenn sie eingeschaltet

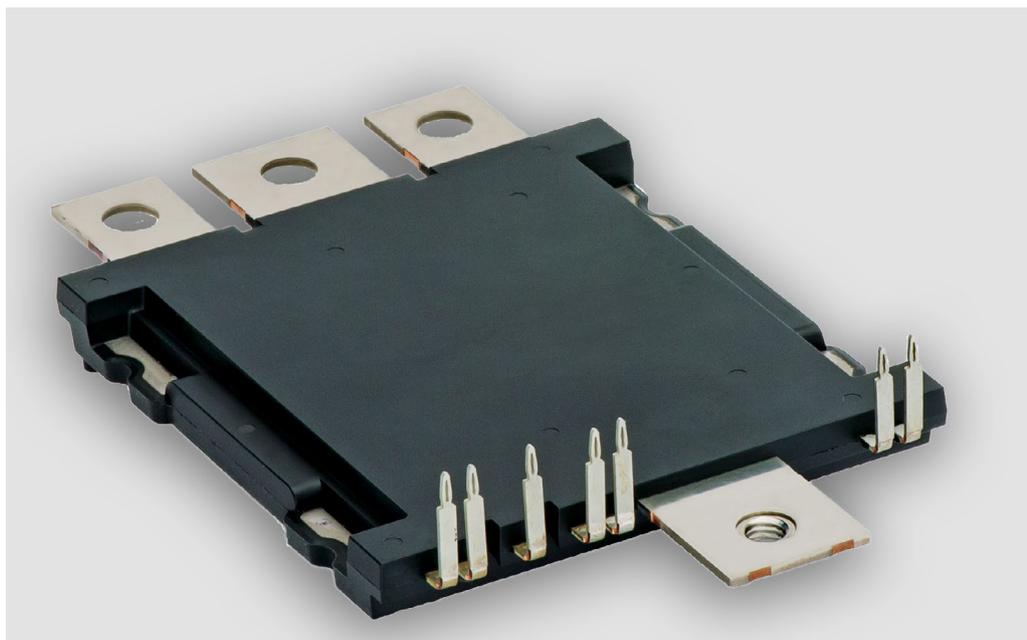


BILD 2 Das SiC-RoadPak-Modul für E-Mobilitätsanwendungen kombiniert hohe Ströme mit kleiner Streuinduktivität (© Hitachi ABB Power Grids)

sind, unterschiedliche Verluste aufweisen. Diese Einkopplungen in die Ansteuerpfade gilt es möglichst zu reduzieren. Dort, wo sie nicht vermieden werden können, müssen sie für parallel geführte Chips möglichst gleich sein.

SIMULATION FÜR OPTIMIERTE KOPPLUNGSKONSTANTE

Vorgehensweise: Man kann die zwei Spannungspole der Ansteuerung, also das eigentliche Gatesignal und den Hauptkontakt (die sogenannte Mosfet-Source), möglichst parallel und so nahe wie möglich bis zu den einzelnen Chips führen. Damit sorgt man dafür, dass beide Zuführungen dieselben Magnetfelder erfahren und in beide dieselben Spannungen induziert werden. So wird die Spannungsdifferenz (also das Signal) zwischen den zwei Polen nicht verändert. Um die einzelnen Chips zusätzlich weniger empfindlich gegenüber den Schwankungen zu machen, kann man als Dämpfungselemente auch individuelle Gatewiderstände für jeden einzelnen Chip einsetzen. Im ersten Fall braucht

man allerdings viel zusätzlichen Platz, weil separate Leiterbahnen zu allen Chips geführt werden müssen, bei Letzterem steigen sowohl die Verluste durch langsames Schalten als auch die Kosten durch die zusätzlichen Widerstände.

Diese beiden Nachteile können aber umgangen werden, indem man das Design mit Computersimulationen so genau umsetzt, dass man für jeden parallel geführten Chip dieselbe Kopplungskonstante erreicht. Im Idealfall kann die Kopplung auch eine leicht dämpfende Wirkung auf das Schalten bewirken. In diesem Fall können der Gatewiderstand als Bauelement und somit Kosten eingespart werden. Um das zu erreichen, muss allerdings jedes Designelement exakt in der richtigen Länge und Breite und am richtigen Ort gesetzt werden. Dies wurde beim Road-Pak-Modul bis zur Ebene des Bonddrahts erfolgreich umgesetzt, **BILD 2**.

THERMISCHES DESIGN

Beim thermischen Design bestimmt man mit der Materialauswahl und der Positio-

nierung der Chips, welcher Chip wie gut gekühlt wird. Bei Modulen mit SiC-Mosfets ist der Chip der kostenbestimmende Faktor. Deshalb ist es stets das Ziel, die Anzahl der Chips respektive deren Fläche zu minimieren. Das Packaging von SiC-Chips ist aus diesem Grund auf thermische Leistungsfähigkeit optimiert. So wird beim Material Kupfer anstelle von Aluminium verwendet, um eine höhere Wärmeleitfähigkeit zu erhalten und zugleich dank der besseren elektrischen Leitfähigkeit die resistive Erwärmung zu reduzieren. Bei den Herstellprozessen wird Silbersintern anstelle von Lötens eingesetzt, womit einerseits der Einsatz von Blei vermieden und andererseits eine viel höhere Leitfähigkeit mit besserer Zuverlässigkeit kombiniert wird. Die Grundplatte schließlich hat auf ihrer Unterseite eine sogenannte Pin-fin-Struktur, die direkt das Oberteil des Kühlkörpers bildet. So entfällt der Trockenkontakt zwischen der Grundplatte und dem Kühlkörper, der normalerweise mit thermisch leitfähiger Paste gefüllt wird und dennoch nur

EFFIZIENZ. ÖKONOMIE. MOBILITÄT.

Sicher in die Zukunft – die Herausforderung bei der Entwicklung von Mobilien Maschinen und Straßennutzfahrzeugen ist das Wissen von morgen mit Blick auf Technologien von übermorgen. Moderne Nutzfahrzeuge langfristig robust und kostengünstig bei einem hohen Wirkungsgrad zu betreiben, gewährleistet einen optimalen Investitionsschutz. ATZheavyduty bietet neuestes Wissen aus Forschung und Entwicklung und berichtet einzigartig über das gesamte Spektrum der Nutzfahrzeugtechnik auf und abseits der Straße. Nutzen Sie zusätzlich zu den Printausgaben das **interaktive E-Magazin** und profitieren Sie von der einzigartigen **Wissensdatenbank des Onlinearchivs mit pdf-Download**.

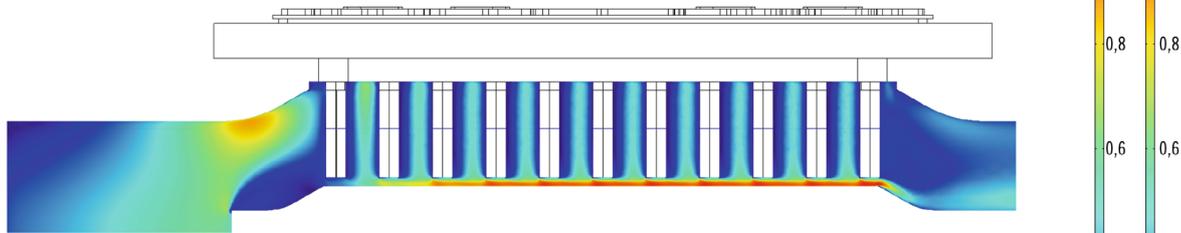
ATZ heavyduty
ON- UND OFFHIGHWAY-NUTZFAHRZEUGE



www.mein-fachwissen.de/ATZheavyduty



BILD 3 Geschwindigkeitsprofil des Kühlmediums mit Hilfe von CFD [m/s] (© Hitachi ABB Power Grids)



eine sehr schwache Wärmeübertragung erlaubt. Die Pin-fin-Struktur wird direkt vom Kühlmittel umströmt, sodass die Grundplatte direkt gekühlt wird.

PARALLELSCHALTUNG ZWINGT ZU SORGFÄLTIGEM DESIGN

Im Vergleich zu den heute meistens verwendeten Halbleitern aus Silizium weist die auf einem Substrat epitaktisch aufgewachsene Siliziumkarbidschicht noch eine relative große Anzahl an kristallografischen Versetzungen und Stapelfehlern auf, die einen Chip unbrauchbar machen und die Ausbeute verringern. Würde man dann Quadratzentimeter große Chips wie beim Silizium herstellen, wäre die Ausbeute zu klein. Aus diesem Grund sind SiC-Chips in der Regel nur einige Quadratmillimeter klein. Dementsprechend müssen dann auch sehr viele Chips parallelgeschaltet werden, was das oben erwähnte elektromagnetische Design sehr anspruchsvoll macht. Auf der anderen Seite ergeben sich daraus mehr Variationsmöglichkeiten für das thermische Design. Die Kunst des Parallelisierens von IGBTs und Mosfets besteht darin, dass alle Bauteile gleichmäßig belastet werden [1]. Dafür müssen sie einerseits alle möglichst gleichzeitig und gleich schnell einschalten (dynamische Belastung), sie müssen andererseits aber auch gleiche Verluste aufweisen (statische Belastung). Die Temperatur vom Chip im Betrieb wird durch verschiedene Faktoren bestimmt:

- Die Chippositionen sind unterschiedlich gut gekühlt. Chips an Randpositionen werden eher besser gekühlt als solche in der Mitte, weil sie auf der einen Seite keine Nachbarn haben. Chips beim Kühleinlass sind besser gekühlt, weil das Kühlmedium noch nicht erwärmt wurde.

- Der Chip selber variiert sehr stark durch seine unterschiedlichen internen Eigenschaften wie seinem internen Widerstand $R_{DS(on)}$ oder seinem Einschaltpunkt V_{th}
- Prozessschwankungen beim Packaging führen dazu, dass Chips unterschiedlich gut thermisch angebunden sind.

Aufgabe des thermischen Designs ist es an dieser Stelle, die systematischen Abweichungen möglichst auszugleichen, sodass am Ende alle Chippositionen ähnlich gut gekühlt sind. Um nicht allein auf schwer zu kontrollierende Experimente angewiesen zu sein, die Ressourcen wie Zeit und Material kosten, wird für die Analyse vor allem auf Simulationen gesetzt. Mithilfe von numerischer Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics, CFD) wird der ideale Fluss des Kühlmittels, die richtige Größe und Verteilung der Pins sowie die geeignete Positionierung der Chips bestimmt, **BILD 3**.

FAZIT

Da viele der Einflussfaktoren nicht vorhersehbar oder nicht messbar sind, sind selbstregulierende Mechanismen sehr wichtig, die auf den Chipeigenschaften beruhen und die zu berücksichtigen sind. Das heißt, ein Chip, dessen interne Eigenschaften zu überdurchschnittlich hohen Verlusten führen, wird schneller warm, was wiederum seinen inneren Widerstand erhöht, weshalb er weniger Strom führen wird als benachbarte Chips, die kleinere Verluste haben. Andererseits wird ein Chip, der wegen Prozessschwankungen im Packaging schlechter gekühlt ist, wärmer und sollte dann ebenfalls weniger Strom aufnehmen. Absolut zu vermeiden sind sogenannte Runaway-Effekte, bei denen die Erwärmung dazu führt,

dass noch mehr Strom aufgenommen wird, was wiederum zur Folge hat, dass die Erwärmung noch weiter zunimmt.

Vermeiden lassen sich diese Effekte, wenn man die Streuinduktivitäten außerhalb des Moduls optimiert [2], optimierte Gate Units verwendet und beim Design der Halbleitermodule die Aspekte Stromaufteilung und Kühlung berücksichtigt. Auf diese Weise bekommt man ein leistungsfähiges und platzsparendes Leistungshalbleitermodul, das die Vorteile der Siliziumkarbid-Technologie optimal in sich vereinigt. Dadurch können zahlreiche Anwendungen in der Elektromobilität von der stark verbesserten Effizienz des Gesamtsystems profitieren.

LITERATURHINWEISE

- [1] Mesemanolis, A.; Maleki, M.; Hartmann, S.; Ruiz, A.; Weiss, D.; Pâques, G.; Keller, T.: Fast and reliable switching of parallel SiC MOSFET chips in a Halfbridge module. In: PCIM Europe digital days 2020, S.828-835. Berlin, Offenbach: VDE Verlag
- [2] Keller, T.; Schneider, D. Streuinduktivität als wichtiger Faktor in der Anwendung von Leistungshalbleitern in der Elektromobilität. In: ATZelextronik 15 (2020), Nr. 4, S. 16-19



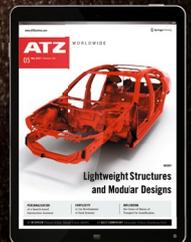
READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
Test now for 30 days free of charge:
www.ATZelextronics-worldwide.com

DISCOVER THE WORLD'S LEADING SPECIALIST MAGAZINE FOR THE AUTOMOTIVE SECTOR!

TAKE A FREE TEST DRIVE
ATZ-MAGAZINE.COM



For 120 years, ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift has been presenting cutting-edge solution concepts in automotive development and the very latest information for the everyday work of engineers relating to every aspect of the complete vehicle – whether it is the chassis or body, lighting technology or NVH, packaging or thermal management. atz-magazine.com



ATZ WORLDWIDE