

Elektronik

Fachzeitschrift für industrielle Anwender und Entwickler

IGBT-Leistungsmodule:

Ströme bis 3600 A zuverlässig schalten

>> Seite 28

Soft-Core-Prozessor für FPGAs

>> Seite 32

Überholspur für Industrie-Ethernet

>> Seite 39

Von der Aufgabe zum Pflichtenheft

>> Seite 48

Spezial: Hannover-Messe Industrie

>> ab Seite 52



INTERVIEW

„Wir glauben, dass wir Analog und Digital gleichermaßen skalieren können, so dass Moore's Gesetz auch für Analog gilt.“

>> Seite 24



Scott McGregor, President und CEO von Broadcom

**Elektronik- und
Mechanik-CAD
wachsen zusammen**

>> Seite 64

**Beruf + Karriere:
Das Team als
Hängematte**

>> Seite 77

Höchste Zuverlässigkeit bis 3600 A

IPM für Industrieanwendungen mit hoher Leistung

Über die letzten Jahre wurde der Ruf der Industrie nach zuverlässigen, kompakten, leistungsstarken und kosteneffizienten Leistungsmodulen immer stärker. Vor allem Anwendungen wie Wind und Solar, Trolley-Busse, Straßenbahnen und U-Bahnen, Aufzüge als auch andere Industrieantriebe mit hoher Leistung benötigen zuverlässige Module. Das „Intelligent Power Module“ (IPM) SKiiP4 setzt dabei auf eine konsequente Weiterentwicklung, basierend auf jahrelanger Applikationserfahrung und der Integration neuester Aufbau- und Verbindungs- sowie sicherer digitaler Signalübertragungstechnologien.

Von Ralf Herrmann



Das SKiiP4-Modul bleibt bei dem bekannten Konzept aus aufeinander abgestimmten Komponenten: Kühlkörper, Leistungselektronik, Gate-Treiber und diverse Schutzmechanismen. Es ist optimiert bis 3600 A Nennstrom bei einer maximalen Spannung U_{dc} von 1700 V, dazu können erstmals sechs Halbbrücken parallel auf einen Kühlkörper gepresst werden. Die Stromtragfähigkeit wird damit um 50 % nach oben verschoben, was einen noch kompakteren und leistungsdichteren Aufbau z.B. im Schaltschrank zulässt. Die Anforderungen nach immer höherer Leistungsdichte, ohne dabei die Zuverlässigkeit aus den

Augen zu verlieren, werden somit erfüllt. Temperatur- und Lastwechselfestigkeit sind die dazugehörigen Stichwörter. Im Traktionsbereich kühlen zum Beispiel Straßenbahnen über Nacht unter 0 °C ab, kurz nach Fahrtbeginn treten Temperaturen bis zu 100 °C auf. Die optimierte grundplattenlose Aufbau- und Verbindungstechnik garantiert diese Fähigkeit auch in extrem schwierigen äußeren Umgebungsbedingungen. Höchste Lastwechselfestigkeit wird durch die Eliminierung der letzten Lotschicht im Leistungsteil erreicht, namentlich durch die Sintertechnologie. Wie Bild 1 zeigt, werden die Vorteile des gesinterten Chips in Form eines geringeren Wärmewiderstands $R_{th(j-c)}$ der Silberschicht zwischen den Silizium-Chips und der Keramik des Bauteils mit zunehmender Anzahl von Lastwechseln immer größer.

Aufgrund der IGBT4- und CAL4-Technologie hat das IPM SKiiP4 eine hohe Leistungsdichte und ist somit ein sehr leistungsfähiges und gleichzeitig kompaktes Modul. Es ist das stärkste IPM auf dem Markt. In der Tabelle sind die Kenndaten für die verfügbaren Module zusammengefasst.

■ Leistungsteil

In der neuen IPM-Reihe wird die grundplattenlose SKiiP-Technologie eingesetzt. Dabei werden die Chips wie gehabt über ein mechanisches Drucksystem auf das Substrat und den Kühlkörper gedrückt. Das lötfreie Drucksystem und die integrierten laminierten Stromschienen sorgen für eine gleichmäßige Stromverteilung. Jeder IGBT- und Dioden-Chip ist separat mit dem Hauptanschluss verbunden. Dadurch minimieren sich die internen Leistungswiderstände und Verluste. Das neue Stromschienensystem erfüllt im Leistungsmodul mehrere Funktionen gleichzeitig. Einerseits drückt es die DCB (Direct Copper Bonding) auf den Kühlkörper, was durch die Vielzahl an Kontakten über die ganze DCB-Fläche sehr gleichmäßig ist, andererseits dienen diese Kontakte direkt als Stromflussmedium. Die laminierte Struktur erlaubt eine niederinduktive und geringe Widerstandsverbindung zwischen den Kontakten und den Silizium-Chips. Dies gewährleistet eine gute dynamische Stromauf-

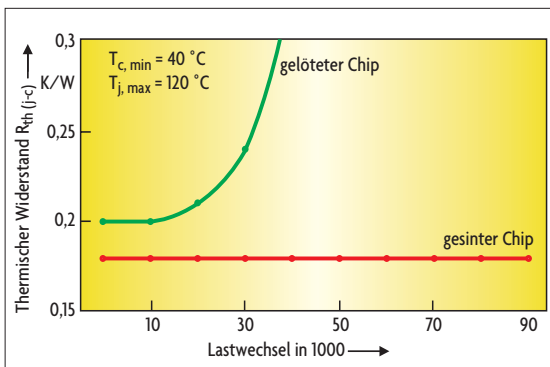


Bild 1. Degradation der Lotverbindung eines Chips im Vergleich zu einer gesinterten Chipverbindung mit Bondabdeckung.

teilung zwischen den parallelen IGBTs.

Das Drucksystem spielt seine Vorteile in der passiven Modulerwärmung aus, was im Vergleich mit herkömmlichen Leistungsmodulen mit Bodenplatte zu einer fünffach höheren Temperaturwechselfestigkeit führt (Bild 2). In Leistungsmodulen werden verschiedene Materialien wie Kupfer, Keramiken (z.B. Al_2O_3) und Silizium eingesetzt. Jedes dieser Materialien hat einen unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten. Bei passiven Temperaturwechseln kommt es zu unterschiedlich starker Ausdehnung der verschiedenen Materialien zueinander, was zu Ermüdungserscheinungen in der Lotschicht führt, welche z.B. Keramik und Bodenplatte miteinander verbindet. Es kommt zu einer Erhöhung des Wärmewiderstandes und letztendlich zum Ausfall des Moduls.

■ Zu 100 Prozent lötfrei

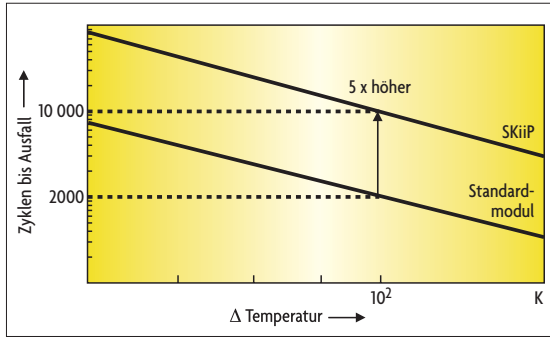
Die Lotschicht zwischen den Silizium-Chips und dem DCB-Substrat wird beim SKiiP4 vollständig durch die Sintertechnologie ersetzt. Bei dieser handelt es sich um ein Verbindungsverfahren, bei dem die Chips auf einer Silberpastenschicht positioniert werden und unter hohem Druck eine dauerhafte Verbindung zwischen DCB und Chip hergestellt wird. Die dünne Silberschicht, die einen geringeren thermischen Widerstand aufweist als eine Lotverbindung, hat einen hohen Schmelzpunkt (962 °C), dadurch wird eine frühzeitige Materialermüdung verhindert. Dies führt in Verbindung mit der neuen Chip-Technologie zu einer Steigerung der Lastwechselfestigkeit der Halbbrücken gegenüber Modulen mit gelöteten Chips.

Zum optimalen Aufbau- und Verbindungskonzept ist die Wahl der passenden IGBTs und Dioden wichtig. Um hohe maximale Sperrschichttemperaturen von $T_{j\text{max}} = 175\text{ °C}$ anbieten zu können, wird beim SKiiP4 auf die

IGBT4-Technologie von Infineon in der 1200-V- und 1700-V-Ausführung gesetzt. Die CAL4-Freilaufdioden wurden von Semikron selbst entwickelt und erlauben ebenfalls eine maximale Sperrschichttemperatur von 175 °C .

Modul	U_{dc}	$I_{c\text{nom}}$	I_{rms1} [A]	I_{rms2} [A]
SKiiP1814GB12E	1200 V	1800 A	1315 A	825 A
SKiiP2414GB12E	1200 V	2400 A	1750 A	1100 A
SKiiP3614GB12E	1200 V	3600 A	2625 A	1650 A
SKiiP1814GB17E	1700 V	1800 A	1315 A	825 A
SKiiP2414GB17E	1700 V	2400 A	1750 A	1100 A
SKiiP3614GB17E	1700 V	3600 A	2625 A	1650 A

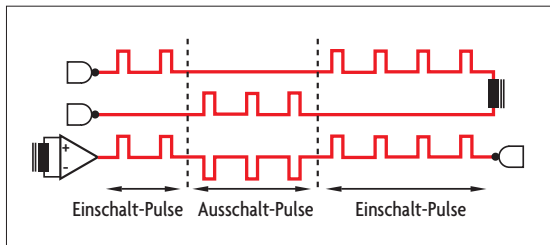
! Kenndaten für das IPM SKiiP4. I_{rms1} = Effektivwert des Ausgangstroms, I_{rms2} = Effektivwert des Ausgangstroms mit 150 % Überlast für 60 s und $f_{out} = 2 - 50\text{ Hz}$.



! Bild 2. Die SKiiP-Druckkontakttechnologie ermöglicht eine fünfmal höhere Temperaturwechselfestigkeit im Vergleich zu Standard-Modulen.

Gate-Treiber-Konzept

Die Digitaltechnik ist in der heutigen Zeit nicht mehr wegzudenken, auch in der Leistungselektronik findet die Technologie zunehmend Anklang und Einsatz. Bisher wurden Signale flankengesteuert übertragen, d.h., die Signale wurden über einen Serien-Resonanzkreis auf die Sekundärseite übertragen, auf der sie mittels eines Flankenspeichers gespeichert wurden. Beim digitalen Übertragungssystem nutzt man dagegen einen permanenten,



! Bild 4. Primärseitige Pulsenergie und dazugehörige Formung der Signale auf der Sekundärseite.

aus „Nullen“ und „Einsen“ bestehenden Datenfluss. Aus elektronischer Sicht sind das eindeutige Signale. Im Vergleich zur Analogtechnik ist damit eine erhöhte Signalintegrität zu erreichen. Analogtypische Temperaturabhängigkeiten, Parameterschwankungen oder fehlende Langzeitstabilität von Schaltkreisen können ausgeschlossen werden. Mit Hilfe einer digitalisierten Signalübertragung zur Ansteuerung der IGBTs lassen sich alle Signaltypen – selbst langsame Sensor-signale – störungsfest, temperatur-unabhängig und langlebig übertragen, was den zweiten Pluspunkt der digitalen Übertragungstechnologie darstellt.

Dabei werden sie miteinander verglichen und voneinander subtrahiert. Das Ergebnis ist ein eindeutiges Signal. Normalerweise werden beide Ausgänge des Impulsübertragers durch auftretende Störsignale gleichermaßen beeinträchtigt. Durch die Subtraktion der beiden unterschiedlichen Ausgangsspannungen lässt sich das Störsignal eliminieren.

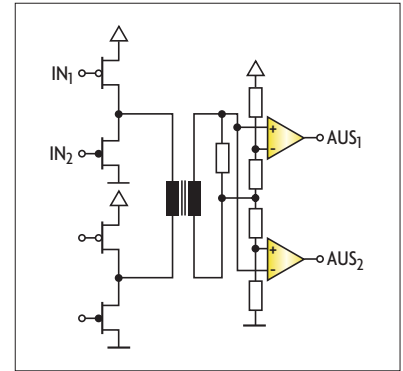
Pulse werden durch die interne digitale Logik (FPGA) erzeugt, haben definierte Länge und Form und werden differenziell ausgewertet. Eine Brücke auf der Primärseite generiert Spannungssignale, welche galvanisch isoliert durch Trafos auf die Sekundärseite übertragen werden (Bild 4). Auf der Sekundärseite werden die Signale durch einen differenziellen Komparator empfan-

gen und an sekundärseitige FPGAs für eine weitere Signalverarbeitung weitergereicht.

Die Hauptfunktion eines jeden Gate-Treibers ist es, die Schaltsignale in ein leistungsstarkes Schaltsignal zu konvertieren. Die IGBTs erfordern ein sicheres Schalten während eines Kurzschlusses, einer anderen Überlastbedingung sowie im Normalbetrieb. Ein kontrolliertes An- und Ausschalten der IGBTs zur Optimierung des Schaltens und gleichzeitig zur Reduzierung der Schaltverluste ist wichtig. Bild 5 zeigt die „Soft-Turn-Off“-Schaltung des SKiiP4.

Jedes SKiiP4-IPM enthält zwei unabhängige Treiberboards, bestehend

Der integrierte Gate-Treiber ist ein weiteres Schlüsselement der neuen IPM-Reihe. Das PCB-Board übernimmt die controllergesteuerten Eingangssignale, überträgt diese galvanisch getrennt auf die Hochspannungs-Seite und steuert damit die IGBTs. Die Signale werden differenziell übertragen (Bild 3).

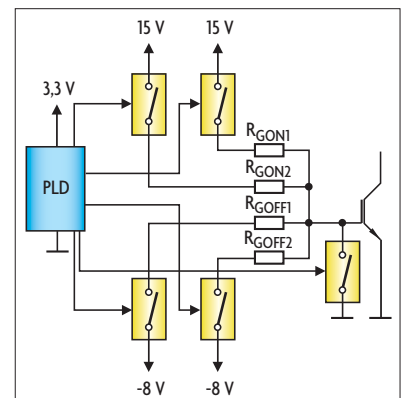


! Bild 3. Prinzipielles Schaltbild der digitalen Signalübertragung.

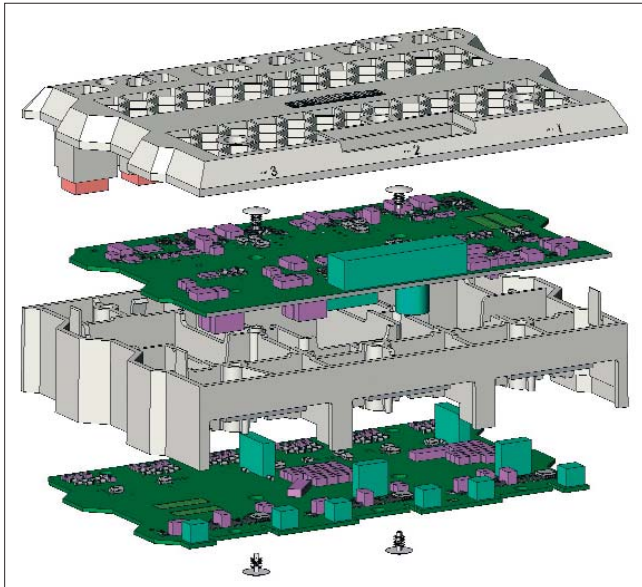
aus dem Treiberkern und einer Kontaktierungsplatine. Durch die Aufteilung auf zwei Platinen werden optimale Wärmeverteilung und Variabilität gewährleistet (Bild 6). Interne Schutzfunktionen, wie z.B. Unterspannungsüberwachung (primär und sekundär), Kurzimpulsunterdrückung und Kurzschlussüberwachung sind ebenso implementiert wie die Überwachung und Ausgabe weiterer Analogsignale wie Strom, Temperatur oder auch die Zwischenkreisspannung. So schützt sich das System einerseits selbst, gibt aber gleichzeitig wichtige Applikationsparameter an den Anwender weiter. Diesem steht in der neuen SKiiP-Version ein Diagnosekanal mit einer CAN-Open-Charakteristik zur Verfügung.

Zusätzliche Sicherheit durch optionalen Burn-In-Test

Um möglichst zuverlässige IPMs zur Verfügung zu stellen, wird neben dem



! Bild 5. Für den SKiiP4 wurde eine zweistufige „Soft-Turn-Off“-Schaltung zur optimalen Ansteuerung der IGBTs entwickelt. Im spannungsfreien Zustand werden alle Gates auf ein definiertes Potential „gezogen“.



I Bild 6. Darstellung der Treiberboards SKiiP4.

standardisierten Funktionstest, welchen jedes ausgelieferte Modul durchlaufen muss, ein optionaler Burn-In-Test angeboten. In diesem Test werden die intelligenten Module in applikationsnahen Umrichtertests auf Herz und Nieren zwischen 60 und 90 Minuten geprüft. Ziel dieser Tests ist es z.B., statistische Frühausfälle einzelner IGBT-Zellen zu entdecken und herauszufiltern. In 2008 durchliefen etwa 80 % aller verkauften SKiiP-Module diesen Test. Dabei steht dem Kunden die Wahl zwischen einem 1Q- oder 4Q-Betrieb offen, es können sowohl luft- wie auch wassergekühlte Systeme getestet werden.

Mit dem Leistungsbereich von 130 kW bis 1,8 MW sind die Hauptanwendungen, in denen SKiiP4-IPMs Anwendung finden, Standard-Industriefrequenzumrichter mit hoher Leistung in hauptsächlich folgenden Industriegebieten: Wind- und Solarindustrie, Traktion (Trolley-Busse, Straßenbahnen, U-Bahnen), Aufzüge oder Industrieantriebe. *fr*



**Dipl.-Ing. MBA
Ralf Herrmann**

studierte an der Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule in Nürnberg Elektrotechnik. Nach Abschluss des Studiums arbeitete er als Hardware-Entwickler für analoge Schaltungen im Bereich der Messtechnik. 2005 wechselte er als Produktmanager für Bipolar-Module zu Semikron. Seit 2006 ist er als Produktmanager und Projektleiter für die IGBT-IPM-Module SKiiP verantwortlich. 2009 erlangte er nebenberuflich den akademischen Grad MBA.
ralf.herrmann@semikron.com

Literatur

- [1] Webseite des Herstellers:
www.semikron.com
- [2] SEMIKRON International: Application-Manual Power-Modules.
- [3] Demuth, V.; Häupl, K.; König, B.; Nichtl-Pecher, W.: CAL4: The next generation 1200V Freewheeling Diode. Vortrag auf der PCIM 2007.