

# Elektronik

www.elektroniknet.de

Fachzeitschrift für industrielle Anwender und Entwickler

Leistungselektronik:

## Verlustarme Motoransteuerung bis 150 kW

>> Seite 34

## Taitronics 2008: Elektronik-Großmacht Taiwan

>> Seite 16

## Digitale Potentiometer mit pfiffigen Zusatzfunktionen

>> Seite 38

## Motoransteuerung per FPGA

>> Seite 42

## Industrie-PCs nach Maß

>> Seite 50



Besuchen Sie die **Elektronik** auf der SPS/IPC/Drives Nürnberg: Halle 7A, Stand 300

## VDE-KONGRESS 2008



"Wir haben zu wenig Kinder, und von diesen studieren zu wenige Ingenieurwissenschaften."

>> Seite 84

Prof. Dr. Josef Nossek, TU München, scheidender VDE-Präsident

## Spezial Medizinelektronik:

>> ab Seite 55

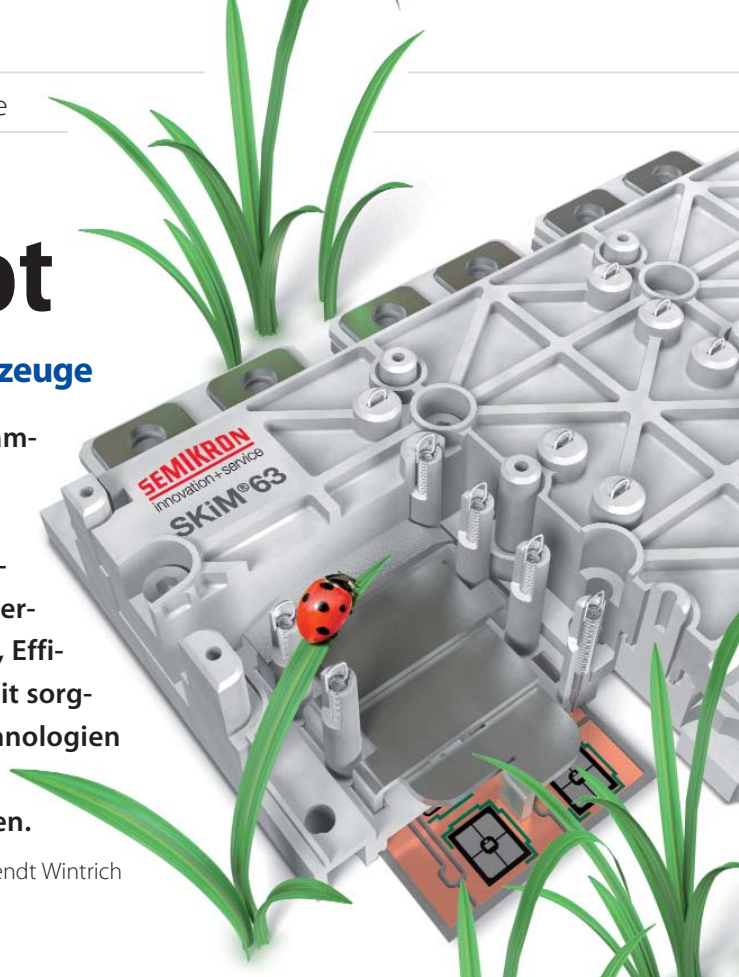
- Software-Entwicklung nach IEC 62304
- Nerven steuern Prothesen
- Elektrische Detektion von Bio-Molekülen

# Federn statt Lot

## Leistungsmodul für Elektro- und Hybridfahrzeuge

Um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren, entwickeln alle namhaften Kfz-Hersteller Lösungen für Elektro- oder Hybridfahrzeuge. Das Design eines Leistungshalbleitermoduls für diese Applikation erfordert neue Ansätze der Integration und in der Aufbau- und Verbindungstechnik. Widersprüchliche Anforderungen an höchste Leistungsdichte, Effizienz und Zuverlässigkeit bei niedrigen Kosten sind nur mit sorgfältiger Auswahl der Komponenten, innovativen Technologien sowie einer Optimierung der thermischen und elektrischen Eigenschaften zu erreichen.

Von Dr. Arendt Wintrich



Die Familie der SKiM-Leistungsmodul (Semikron Integrated Module) stellt die nächste Generation von kompakten, bodenplattenlosen Druckkontaktmodulen dar. Anstatt den zur Isolation notwendigen Keramikträger DCB (Direct Copper Bonded) auf die Kupferbodenplatte zu löten, wird dieser direkt auf den Kühlkörper gedrückt. Eine Vielzahl von Druckpunkten unmittelbar neben jedem Chip garantiert eine ebene Auflage des DCB. Die Eliminierung der Bodenplattenlötung garantiert eine hohe Temperaturwechselstabilität und einen niedrigen thermischen Widerstand. Bild 1 zeigt den Gehäuseaufbau mit einem Querschnitt durch das Gehäuse, das Druckkontakt-

system und die Federkontakte für die Steueranschlüsse.

Als elektrische Schaltung ist eine dreiphasige Wechselrichterschaltung realisiert. Jede Halbbrücke hat ihre eigenen DC-Anschlüsse und einen eigenen Temperatursensor. Die Ansteueranschlüsse für die IGBT sind als Federkontakte realisiert. Die Leiterplatte des Gate-Treibers wird nicht auf das Modul gelötet, sondern von oben auf das Modul geschraubt. Die Federkontakte garantieren einen zuverlässigen Kontakt auch bei starken Temperaturwechseln und Vibrationen.

Die Bauelemente sind je nach Arbeits- und Kühlbedingung für eine Umrichterleistung zwischen 30 kW und 150 kW ausgelegt. In der Tabelle sind Bauelementparameter und typische Wechselrichter-Ausgangsströme aufgelistet.

Eine für die Funktion des Moduls wichtige Lösung ist die interne Struktur der Lastanschlüsse (Bild 1). Diese erfüllen innerhalb des Moduls verschiedene Aufgaben und wurden entsprechend optimiert:

- ▶ lotfreie, niederinduktive Verbindung zwischen den Hauptanschlüssen und den Chips,
- ▶ hohe Stromtragfähigkeit und niedrige Verluste für hohe Wechselrichterströme,
- ▶ symmetrischer Strompfad für eine gute Stromaufteilung zwischen den parallelen Chips,
- ▶ Einprägen des Drucks in der Nähe der Chips für einen niedrigen thermischen Widerstand.

Die Sandwichstruktur mit parallelen Strompfaden zu jedem einzelnen Chip garantiert einen extrem niedrigen Wert für die interne Induktivität. Die Induktivität  $L_{CE}$  zwischen den Schraubkontakten der DC-Anschlüsse und des AC-Anschlusses ist niedriger als 10 nH, die Gesamtinduktivität von Plus- nach Minus-DC beträgt weniger als 20 nH. Eine FEM-Analyse (Finite Element Simulation) hat gezeigt, dass der Haupt-

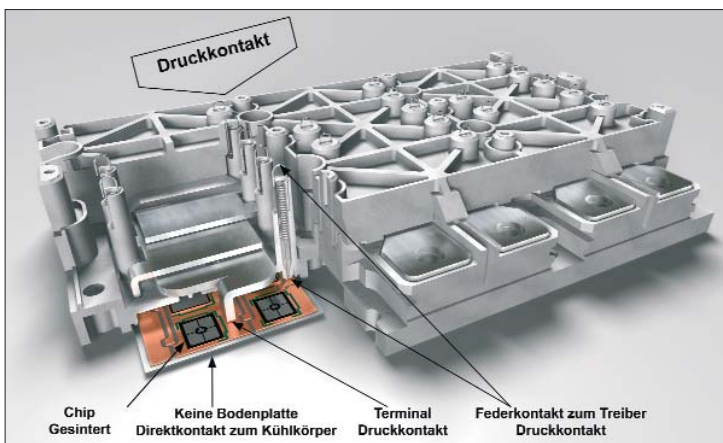


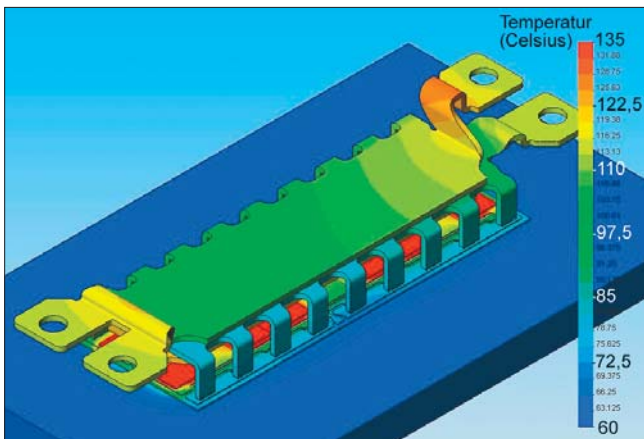
Bild 1. Hauptanschlüsse mit „Sandwich“ und einer Vielzahl von Kontaktfüßen.

	SKiM 63	SKiM 93
$R_{thjs IGBT}$	0,14 K/W	0,095 K/W
$R_{thjs Diode}$	0,27 K/W	0,18 K/W
$I_{C nom, 600 V}$	600 A	900 A
$I_{C nom, 1200 V}$	300 A	450 A
$I_{RMS, 600 V}$	280 A	410 A
$I_{RMS, 1200 V}$	165 A	250 A

Wesentliche Modul-Parameter

anteil der Induktivität von dem Abstand zwischen den Endstücken der DC-Anschlüsse verursacht wird (Bild 2). Mit einer Optimierung an diesem Punkt konnte die Induktivität um 30 % (10 nH) reduziert werden. Eine weitere Verbesserung ist kaum mehr möglich, da zur Einhaltung der Luft- und Kriechstrecken die Sandwichstruktur hier nicht weiter aufrechterhalten werden kann. Eine weitere Reduktion ist nur noch mit mehrfach parallelen Verbindungen zum Zwischenkreis möglich. Der Vorteil für den Anwender ist u.a. die geringe interne Schaltüberspannung, die einen Betrieb mit relativ hohen Zwischenkreisspannungen und sicheres Abschalten auch bei Kurzschluss erlaubt. Saubere Schaltvorgänge ohne Oszillationen garantieren niedrige Schaltverluste und geringe Störabstrahlung.

Verbesserte Halbleiter erlauben immer höhere Leistungsdichten in kleineren Gehäusebauformen. Der Chip-Nennstrom des 600-V-SKiM 93 beträgt 900 A und ist damit fast doppelt so hoch wie für Standardmodule. Dieser Strom überschreitet auch die Grenze der Strombelastbarkeit der Hauptanschlüsse von existierenden IGBT-Modulen. Die im SKiM verwendeten breiten und dicken Kupferschienen haben einen Gesamtwiderstand  $r_{cc'-ee'}$  inklusive Kontaktwiderstand von nur ca. 300  $\mu\Omega$ , was etwa der Hälfte des Kontaktwiderstandes eines Standardmoduls entspricht. Hohe Kontaktkräfte garantieren einen niedrigen Kon-



**Bild 2.** FEM-Simulation der Anschlusstemperaturen bei 600 A Ausgangsstrom.

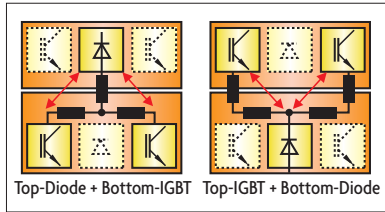
taktwiderstand. Die dennoch auftretenden Verluste werden von den vielen kurzen Anschlussfüßen schnell zur kühlenden DCB-Oberfläche und in den Kühlkörper abgeführt (Bild 2).

Der AC-Anschluss muss in einem Wechselrichter den höchsten Strom führen. Dieser Anforderung wurde man mit der untersten Position im Sandwich mit der besten Kühlung gerecht. Mit einer Kühlkörpertemperatur von 70 °C ist das Modul für 600 A(eff) am AC-Ausgang ausgelegt. Dieser Wert liegt deutlich über dem zu erwartenden Dauerstrom (s. Tabelle). Auch bei knapp 2000 W Verlustleistung kann die Temperatur unter 125 °C gehalten werden.

### DCB-Layout

Das Design der DCB und die Chip-Position haben einen entscheidenden Einfluss auf das Schaltverhalten und den Widerstand der Leistungshalbleiter. Eine unsymmetrische Bauelementekonstruktion kann leicht eine Ungleichverteilung im

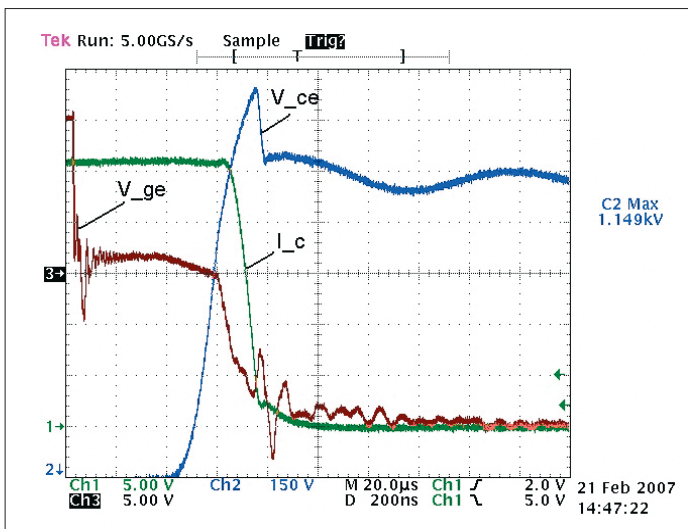
**Bild 3.** Pfad der Stromkommutierung zwischen IGBT und Freilaufdiode für den Top- und den Bottom-Schalter.



Strom von 10 % oder mehr verursachen. Die Ausgangsleitung muss dann auf das Bauelement mit der größten Verlustleistung beschränkt werden.

Spannungsabfälle über parasitären Induktivitäten können für unterschiedlich schnelles Schalten und für Oszillationen zwischen parallelen Chips verantwortlich sein. Für ein sauberes und synchrones Schalten sollten die Induktivitäten so klein wie möglich sein und vor allem auf alle Halbleiter den gleichen Einfluss haben. Der Aufbau aus Basisbausteinen mit zwei IGBTs links und rechts und einer Freilaufdiode in der Mittelposition garantiert dies (Bild 3). Der Pfad für die Stromkommutierung zwischen IGBT und Diode ist so kurz wie möglich und gleich lang für den Top- und den Bottom-Schalter einer Umrichterhalbbrücke.

Bild 4 zeigt Schaltvorgänge eines SKiM-63-Moduls bei 600 A und 900 V(DC). Schaltverluste, Überspannung und di/dt sind für den Top- und den Bottom-IGBT nahezu identisch. Dies ist nicht selbstverständlich, meist gibt es hier, bedingt durch unterschiedliche parasitäre Induktivitäten im Aufbau, deutliche Unterschiede.



**Bild 4.** Ausschalten des unteren IGBT bei doppeltem Nennstrom  $I_c = 600$  A (grün),  $U_{CE}$  (blau),  $U_{GE}$  (braun) bei 900 V(DC), 125 °C.

Auch zwischen den parallelen Chips muss für eine maximale Auslastung der Bauelemente eine gute Stromaufteilung gewährleistet werden. Die Impedanz des Strompfades von Plus nach Minus und der Einfluss des Hauptstroms auf den Ansteuerkreis müssen für alle Chips gleich sein. Die erste Bedingung wird durch das Sandwich-Busbar-System gelöst. Das Magnetfeld im Busbar-System ändert sich kaum bei einer Stromkommutierung von Plus zu Minus. Die Induktivitäten der Hauptanschlüsse sind gekoppelt und können daher vernachlässigt werden. Die Impedanz ist für alle parallelen Chips gleich. Auch die zweite Anforderung wird vom gewählten Design berücksichtigt. Alle IGBTs haben auch unter dynamischen Bedingungen die gleiche Gate-Emitter-Spannung. Im SKiM-Modul heben sich die von di/dt induzierten Spannungsabfälle so auf, dass alle Transistoren in gleicher Weise vom Spannungsabfall über den Bonddrähten beeinflusst werden. Eine gute Stromaufteilung auch unter Kurzschlussbedingungen ist das Ergebnis.

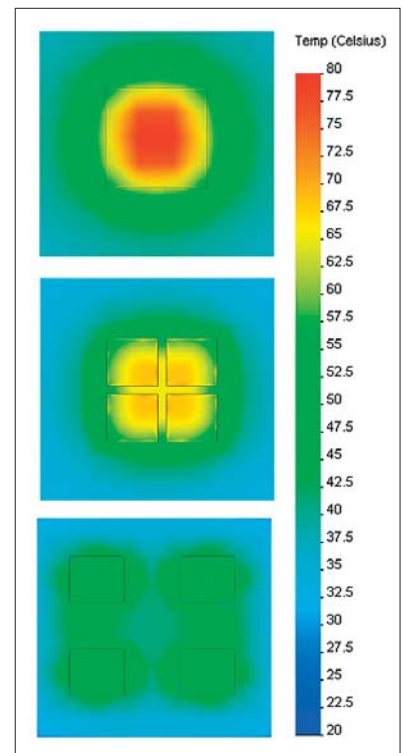
**Thermischer Widerstand  $R_{th}$**

Niedrige Durchlassspannungen und max. Sperrschichttemperaturen von 175 °C erlauben sehr hohe Nennströme. Die nominale Stromdichte kann größer als 2 A/mm<sup>2</sup> sein. Mit der Wahl der richtigen Chipgröße wird das optimale Verhältnis zwischen Nominalstrom, Kühlungsanforderung und Kosten entscheidend beeinflusst.

Der thermische Widerstand  $R_{th}$  ist eine Funktion der Chipgröße aber auch des Abstandes zwischen den Chips (Bild 5). Zu große Chips haben ein großes Temperaturgefälle über die Fläche und eine schlechte Wärmespreizung innerhalb des Moduls. Mehrere kleine Chips mit gleicher Gesamtfläche, aber etwas Abstand haben einen niedrigeren  $R_{th}$ . Bei geringen Abständen heizen sich die Chips gegenseitig auf, für größere

Abstände verringert sich der Wärme-widerstand zunehmend. Der Kompromiss zwischen möglichst viel aktiver Chipfläche bei maximaler thermischer Leitfähigkeit wurde für die SKiM-Familie mit einer Chipgröße zwischen 60 und 80 mm<sup>2</sup> und einem Abstand von 3 mm zwischen den Chips gefunden.

Der Druckkontakt an jeder Seite der Chips verhindert ein Durchbiegen der DCB. Dadurch kann die schlecht leitende Wärmeleitpastenschicht auf



**Bild 5.** Einfluss der Wärmespreizung auf die Chiptemperatur bei gleicher Chipfläche und Verlustleistung.

20 bis 30 µm reduziert werden, üblich sind für Module mit Bodenplatte 80 bis 100 µm. Die sehr dünne Sinterschicht aus thermisch gut leitendem Silber reduziert im Vergleich zur konventionellen Lötsticht  $R_{th}$  zusätzlich.

Wegen der extremen Temperaturwechselanforderungen im Automobilbereich scheiden klassische Modul-lösungen mit Kupferbodenplatten aus. Die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten stressen die Verbindungen zwischen den Materialien. Bodenplatten mit einer Aluminium-Siliziumkarbid-Legierung (Al-SiC) sind eine zuverlässige Alternative, aber relativ teuer. Ein Druckkontaktmodul ohne Bodenplatte ist die Al-

ternative. Der niedrige thermische Widerstand und eine homogene Wärmeverteilung auf dem Kühlkörper führen im Vergleich zu klassischen Modulaufbauten auch bei aktiven Lastwech-



**Dr.-Ing. Arendt Wintrich**

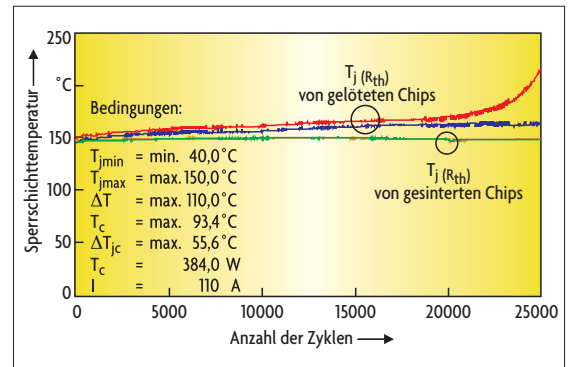
studierte an der TU in Chemnitz Elektrotechnik und promovierte dort auf dem Gebiet der Leistungselektronik mit einem Thema über die Modellierung von Leistungshalbleitern. Seit 1999 ist er bei Semikron als Applikationsmanager mit den Schwerpunkten Kundenberatung und Kundenbetreuung sowie Systemauslegung tätig.

[arendt.wintrich@semikron.com](mailto:arendt.wintrich@semikron.com)

seln zu niedrigeren Temperaturdifferenzen. Dies erhöht ebenfalls die Lebensdauer des Moduls.

Zur Verbesserung der Lastwechselbarkeit auch bei sehr hohen Sperrschichttemperaturen wird in der SKiM-Familie für die Verbindung der Chips mit der DCB die Niedertemperatur-Sinter-Technologie eingesetzt. Eine Lotverbindung ermüdet durch die Lastwechsel, was zu einem erhöhten Wärmewiderstand und schließlich zum Ausfall führt. Die Sinterverbindung wird durch eine dünne Silberschicht mit ausgezeichneter Wärmeleitfähigkeit erzielt. Der Schmelzpunkt von Silber liegt bei 900 °C und damit weit weg von der maximalen Chiptemperatur von 175 °C. In den Lebensdauertests konnte keine Ermüdung der Verbindung beobachtet werden (Bild 6). Die Eliminierung dieses Ausfallmechanismus führt zu einer Erhöhung der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems.

Mit dem Einsatz von Druck- und Federkontakten für die Anschlüsse



**! Bild 6. Vergleich von gelöteten und gesinterten Chips in einem Temperaturwechselfest.**

und dem Wegfall der Lötverbindungen ist SKiM ein vollkommen lotfreies Leistungshalbleitermodul. Es wurde in Bezug auf optimale Chipauslastung und hohe Ausgangsströme optimiert. Dies erlaubt zusammen mit der maximalen Chiptemperatur von 175 °C ein kompaktes Umrichterdesign mit einer bisher nicht erreichten Leistungsdichte und Temperaturwechselfestigkeit. *fr*