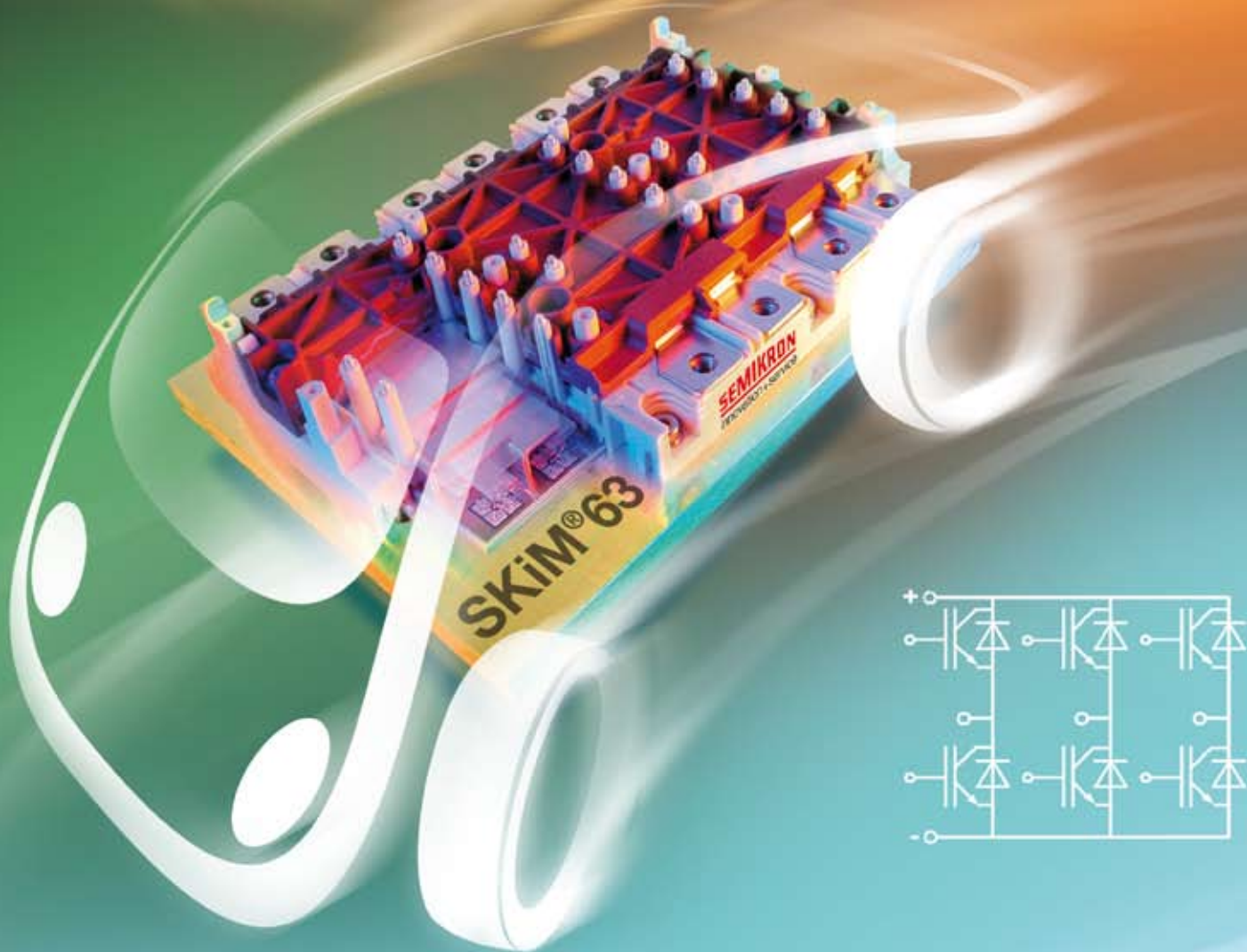


DESIGN & ELEKTRONIK

KNOW-HOW FÜR ENTWICKLER

POWER ELECTRONICS



Leistungselektronik
IGBT-Module für Elektrofahrzeuge

Stromversorgung
Datenblatt richtig lesen

Passive Bauelemente
Transienten mit MLVs ableiten

Messtechnik
Wechselspannungsquellen

Leistungshalbleiter
GaN ist endlich da

Wandlertopologien
Aus positiv mach negativ

LEISTUNGSHALBLEITER IN ELEKTROFAHRZEUGEN

Kühl bleiben

Im Antriebsstrang von Elektro- und Hybridfahrzeugen werden die Wechselrichter starken Temperaturschwankungen ausgesetzt. Ungleichmäßige Temperaturverteilungen begrenzen dabei die Ausgangsleistung und vermindern ihre Lebensdauer. So müssen besondere Maßnahmen für Leistungsmodule in Hybrid- und Elektrofahrzeugen ergriffen werden, um die typische Anforderung von mehr als drei Millionen aktiven Temperaturhüben von 40 K zu erfüllen. Die Frage nach der Zuverlässigkeit der Leistungshalbleiter steht dabei im Mittelpunkt.



DR. VOLKER DEMUTH

Derzeit beträgt der Anteil von Modulen im Automobil am Gesamtmarkt der Leistungsmodule gerade einmal 4%. Prognosen lassen erwarten, dass der Markt in den nächsten Jahren um 20% pro Jahr zunimmt. Die Anwendungen sind vielfältig, Wechselrichter für Elektro- und Hybridantriebe finden in Lkws, Bussen und landwirtschaftlichen Fahrzeugen ebenso Anwendung wie in Pkws oder Rennsportserien. So unterschiedlich die Anforderungen der verschiedenen Einsatzgebiete auch sein mögen, die Zuverlässigkeit der Aufbau- und Verbindungstechnik des Leistungsmoduls steht dabei immer im Mittelpunkt.

Folgende Aufbautechnologien haben sich etabliert: gelötete Grundplattenmodule, grundplattenlose Module mit Lotverbindungen und neuerdings grundplattenlose Module mit Sinterverbindungen. Diese Aufbautechnologien haben Vor- und Nachteile, eine Bewertung dieser Konzepte hinsichtlich der Anforderungen in Elektro- und Hybridfahrzeugen ist wichtig für die Lebensdauerlegung. Wechselnde Umgebungstemperaturen etwa des Kühlwasserkreislaufs sind für passive Temperaturwechsel verantwortlich. Die Verlustleistung der Leistungshalbleiter erzeugt zusätzlich 5 s bis 20 s lang andauernde

Temperaturhübe von 40 K bis 60 K. Dabei werden die Leistungshalbleiter von beispielsweise +70 °C warmem Kühlwasser auf über +110 °C bis +130 °C erhitzt und wieder auf Kühlwassertemperatur abgekühlt. Unterschiedliche thermische Ausdehnungen der beteiligten Materialien erzeugen bei jeder Temperaturänderung mechanische Spannungen. Materialermüdung von Lot- und Bondverbindungen und schließlich Bauteilversagen sind die Folge.

Lotverbindungen vermeiden

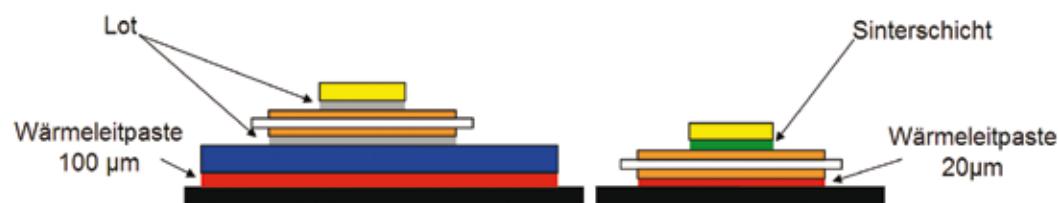
Druckkontaktierte, grundplattenlose Module verfolgen mehrere Wege, um die Zuverlässigkeit zu steigern: Durch konsequentes

Vermeiden der Lotverbindungen wird der Fehlermechanismus Lotermüdung komplett eliminiert. Eine hochstabile Sinterschicht ersetzt die Lotverbindung zwischen Chip und isolierendem DCB-Keramiksubstrat (Direct Copper Bonding), alle stromführenden Anschlüsse sind in Druckkontakttechnologie ausgeführt. Dass die Grundplatte entfällt, hat mehrere Vorteile: Zunächst kann die Dicke der Wärmeleitpaste zwischen Modul und Kühlkörper reduziert werden. Die Wärmeleitpaste hat einen wesentlichen Anteil am gesamten Wärmewiderstand, daher muss deren Dicke so gering wie möglich sein. Bei Grundplattenmodulen sind 75 µm bis 150 µm Pastendicke notwendig, um die Durchbiegung der Grund-

platte auszugleichen. Bei einem grundplattenlosen Modul muss im Wesentlichen nur die Rauigkeit von Kühlkörper- und DCB-Oberfläche ausgeglichen werden, sodass eine 20 µm bis 30 µm dicke Schicht aus Wärmeleitpaste ausreicht. Ohne Grundplatte entfällt zudem der größte Beitrag an den thermischen Spannungen (Bild 1).

Optimale Wärmeverteilung

Temperaturbedingte Dehnungen reduzieren sich, und die Zuverlässigkeit steigt deutlich, wie beschleunigte passive Temperaturschocktests (-40 °C/+125 °C) zeigen: Die Zahl der möglichen Temperaturschocks konnte mit grundplattenlosen, gesinterten Modulen um den Faktor



	Ausdehnungskoeffizient in 10 ⁻⁶ 1/K	Wärmeausdehnung
Silizium	3,5	
DCB - Isolationskeramik	8,3	
Grundplatte	17,5	

Bild 1: Schnittbild eines Grundplattenmoduls (links) und des grundplattenlosen, lotfreien »SKiM«-Moduls (rechts)



und Freilaufdiode eines dreiphasigen Wechselrichtermoduls mit 400 A/600 V betrachten (Bild 2). Um die DCB-Fläche zu minimieren, werden im Fall des Grundplattenmoduls pro Halbleiterschalter jeweils zwei IGBTs und Freilaufdioden à jeweils 200 A verwendet (Bild 2 links). Eine komplette Phase besteht dann aus vier IGBTs und vier Freilaufdioden. In der optimierten Anordnung für das grundplattenlose Modul (Bild 2 rechts) werden vier IGBTs à 100 A und zwei Freilaufdioden à 200 A pro Schalter verwendet (acht IGBTs und vier Freilaufdioden pro Phase). Die Grundfläche des dreiphasigen grundplattenlosen Moduls ist damit um etwa 10% größer als die Grundfläche des Grundplattenmoduls.

Im Betrieb des Wechselrichters entstehen Leit- und Schaltverluste und lassen die Leistungshalbleiter als lokale Wärmequellen auf der DCB wirken. Mithilfe von dreidimensionalen Finite-Element-Berechnungen lässt sich die Temperaturverteilung von Wechselrichtermodul und Kühlkörper für beliebige Betriebszustände ermitteln. So wird zum Beispiel beim Beschleunigen eines Elektro- oder Hybridfahrzeugs der größte Teil der Verlustleistung in den IGBTs erzeugt, während die Freilaufdioden weniger belastet werden.

In dem Temperaturbild (Bild 3) sind daher die IGBT-Positionen

als starke Wärmequellen sichtbar. Im Falle des Grundplattenmoduls (oben) konzentriert sich die Wärme in der Mitte des dreiphasigen Aufbaus. Wegen der engen Anordnung der Leistungshalbleiter und des geringen Abstands der Phasen sind die Temperaturen der IGBTs hier am höchsten. Obwohl die Freilaufdioden in diesem Betriebszustand nur mäßig belastet werden, erwär-

men die IGBTs die Dioden in der Modulmitte deutlich. Am Rand des Wechselrichtermoduls ist die Temperatur der Dioden dagegen um 15 K geringer. Trotz Grundplatte sind die Leistungshalbleiter im Randbereich des Wechselrichtermoduls deutlich weniger heiß als in der Modulmitte, was letztlich zu einer inhomogenen Wärmeverteilung der drei Phasen führt: Die

15 gesteigert werden. Der Verzicht auf Lotverbindungen und Grundplatte hat noch einen weiteren Vorteil: Um die Materialermüdung des Lots zu verringern, sind bei Grundplattenmodulen die gelöteten DCB-Flächen zu minimieren. Die hohe thermische Leitfähigkeit der Grundplatte sorgt für die notwendige Wärmespreizung. Bei dem Design eines grundplattenlosen Moduls kann die DCB-Fläche größer sein, die Wärmespreizung erfolgt über die größere DCB-Fläche. Im Folgenden wollen wir zwei verschiedene Anordnungen von IGBT

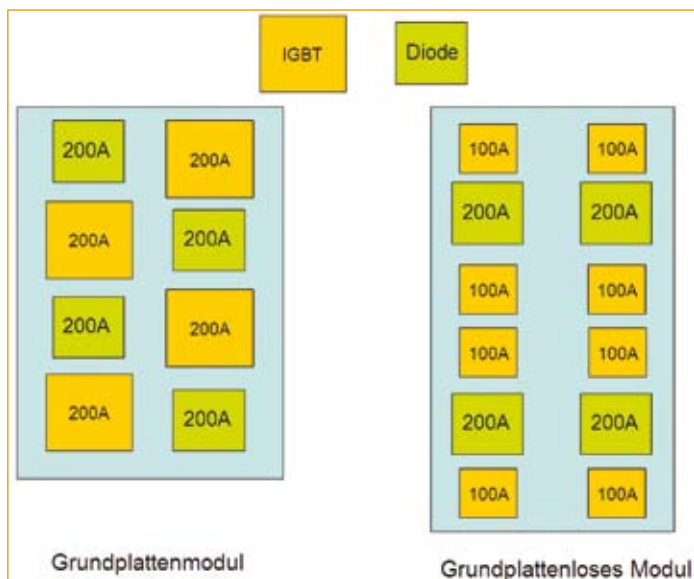


Bild 2: Links das Chiplayout für ein Grundplattenmodul mit IGBTs (4 x 200 A) und Freilaufdioden (2 x 200 A), rechts das Layout des grundplattenlosen SKiM-Moduls mit IGBTs (8 x 100 A) und Freilaufdioden (2 x 200 A)

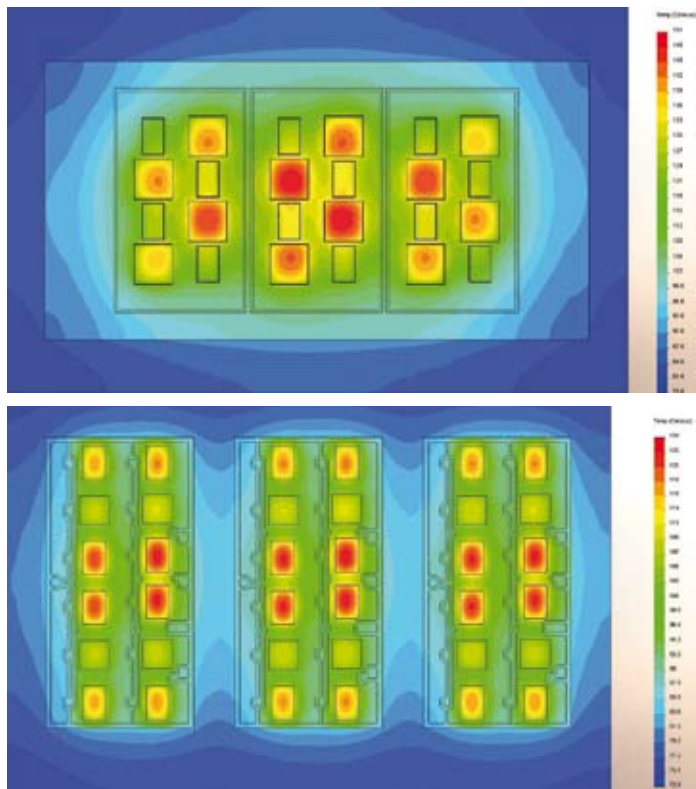


Bild 3: Temperaturverteilung im Grundplattenmodul (oben) und einem grundplattenlosen Modul (SKiM, unten) (Lastbedingung: Batteriespannung = 350 V, Ausgangstrom = 250 A, Ausgangsspannung = 220 V, Ausgangsfrequenz = 50 Hz, Schaltfrequenz = 12 kHz, Phasenwinkel $\cos \varphi = 0,85$, Kühlmitteltemperatur = +70 °C)

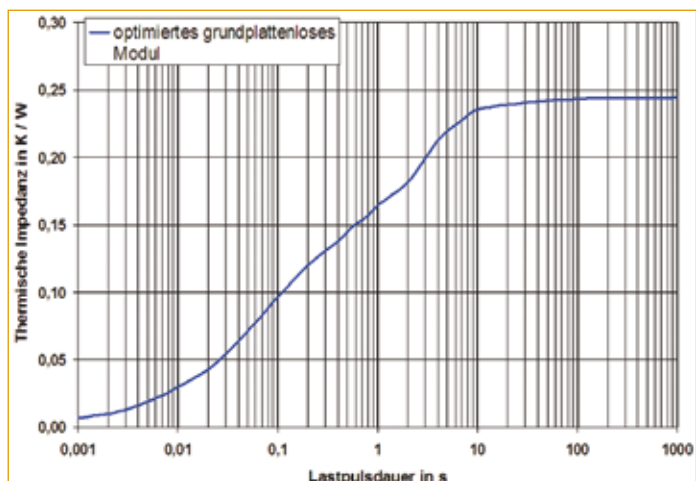


Bild 4: Thermische Impedanz zwischen IGBT und Kühlmedium in Abhängigkeit von der Zeit

Embedded goes medical

29.-30. September 2010, Ohm-Hochschule, Nürnberg

Call for Papers

Ärzte treffen Entwickler – Entwickler treffen Anbieter

Embedded-System-Entwicklung für biomedizinische Geräte

Mit dem deutschsprachigen Entwicklerforum »Embedded goes medical« traf die DESIGN&ELEKTRONIK im vergangenen Jahr genau den Nerv der Entwickler. Nun folgt die zweite Ausgabe dieser erfolgreichen Veranstaltung an einem neuen Standort, und Sie können als Referentin oder Referent dabei sein.

Nürnberg und vor allem die Nachbarstadt Erlangen gelten als Zentrum der Medizin und der Medizintechnik. Damit ergeben sich auch für 2010 wieder Möglichkeiten, die Teilnehmer des Entwicklerforums mit Medizinern – ihren Endanwendern – vor allem aus dem universitären Bereich in Kontakt zu bringen und im Dialog Verbesserungen an Systemkonzepten und Benutzer-schnittstellen zu beraten.

Das Entwicklerforum soll:

- Ärzte und Entwickler zusammenbringen, um Fortschritte im Bereich der biomedizinischen Gerätetechnik zu diskutieren
- Embedded-System-Entwickler biomedizinischer Geräte mit Hard- und Software-Anbietern zusammenbringen, um über neueste Entwicklungen im Bauelemente- und Modulbereich zu informieren
- Umfassend zur Entwicklung sicherheitsgerichteter Systeme informieren
- Neueinsteigern auf diesem Gebiet Wissen und Erfahrung zugänglich machen

Bitte reichen Sie zu folgenden Themenbereichen Vorschläge ein:

- Innovative Bauelemente, Module und Messprinzipien für biomedizinische Geräte
- Sensoren, Verstärker, Aktoren für Biomedizinanwendungen
- Embedded Systeme für Bioimpedanzspektroskopie
- Embedded Systeme für Vital-Monitoring-Systeme & ambient assisted living
- Biomedizin-kompatible Kommunikationskanäle, wired und wireless
- Offene Standards und Schnittstellenprotokolle und deren Nutzung
- Motorsteuerungen unter besonderer Beachtung im Medizingerätebereich
- Embedded Systeme in der Rehabilitation und im Leistungssport
- Visualisierungs- und Displaytechniken für medizinische Forschung und klinischen Alltag
- Softwareentwicklung und Debugging sicherheitsgerichteter Systeme
- Algorithmen zur Datenverarbeitung und -visualisierung
- Energieversorgung von stationären und mobilen Medizingeräten
- Design von sicherheitskritischen Systemen
- Datenschutz und Verschlüsselung in biomedizinischen Geräten
- Mensch-Maschine-Interaktion
- Verifizierung und Validierung
- DIN EN 61508: Entwicklung von Hard- und Software für sicherheitsgerichtete Anwendungen im Medizintechnik-Bereich
- Erfahrungsberichte zur Entwicklung & Zulassung biomedizinischer Geräte

Natürlich sind auch andere Themenvorschläge willkommen. Einsendeschluss für Vortragsvorschläge (Kurzfassung) ist der **17. Mai 2010**. Bitte reichen Sie Ihren Vortragsvorschlag über unsere Internetseite ein: www.embedded-goes-medical.de

Eine rein technische Abhandlung des Themas ist zwingend notwendig, marketingorientierte Vorträge werden nicht akzeptiert.

Für Fragen oder Anregungen:
Caspar Grote, Chefredakteur DESIGN&ELEKTRONIK
cgrote@design-elektronik.de Tel. 08121/95-1340

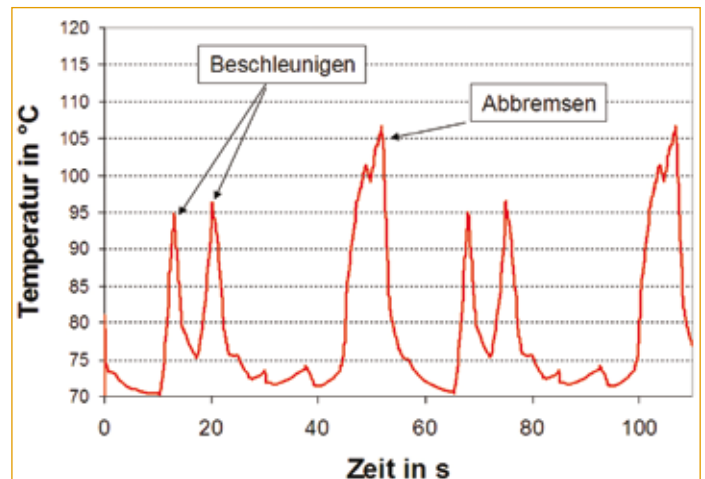


Bild 5: Temperaturverlauf eines IGBTs während des Betriebs eines Hybridfahrzeugs

mittlere Temperaturbelastung der IGBTs auf der mittleren Phase ist um fast 10 K höher als die mittlere Temperatur der IGBTs der äußeren Phasen. Die Differenz zwischen Maximal- und Minimaltemperatur der IGBTs beträgt mehr als 20 K. Die mittlere Phase begrenzt die nutzbare elektrische Leistung des gesamten Wechselrichters.

Dies hat zwei Konsequenzen: Zum einen müssen Last und Kühlbedingungen so gewählt werden, dass die Temperaturen auf der mittleren DCB nicht zu hoch werden, zum anderen werden temperaturbedingte Schädigungsmechanismen auf die mittlere Phase stärker wirken. Das heißt, der Designer sollte zur der Leistungsauslegung des Wechselrichters immer die Temperatur der mittleren Phase berücksichtigen. Bei den grundplattenlosen Modulen vom Typ »SKiM« von Semikron ist die Temperaturverteilung wesentlich homogener (Bild 3 unten).

Auch hier sind die IGBT-Positionen als stärkste Wärmequellen zu erkennen. Da jedoch die thermischen Verluste auf mehr Positionen verteilt sind und die DCBs einen größeren Abstand untereinander haben, ist die für den Wärmeabfluss zur Verfügung stehende Fläche vergrößert. Die erzeugte Verlustleistung kann effizient abfließen und verringert die gegenseitige Erwärmung zwischen IGBT und Diode. Weiterhin sorgt der optimierte Wärmeabfluss für eine gleichmäßige Belastung der verschiedenen Phasen. Die Temperaturen von IGBTs und Dioden zwischen den drei Phasen des Wechselrichters sind wesentlich homogener, die mittlere Temperatur der IGBTs auf allen drei Phasen ist nahezu gleich. Die maximale Temperaturdifferenz der IGBTs untereinander beträgt nicht mehr als 10 K. Die Last wird gleichmäßig verteilt und nutzt die zur Verfügung stehende Kühlleistung besser, sodass

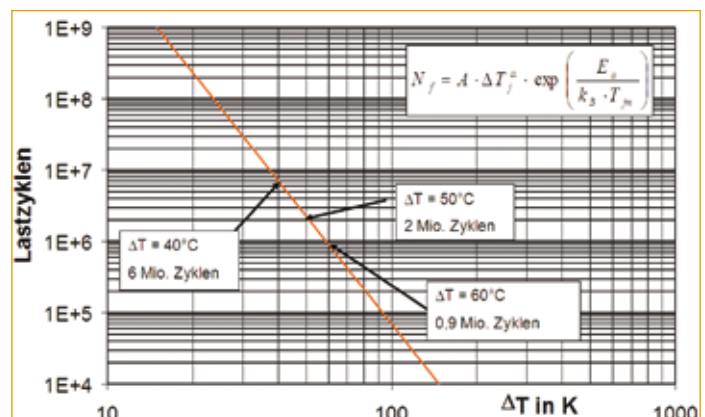


Bild 6: Lebensdauerkurve für Lastzyklen in Leistungsmodulen als Funktion der Temperaturwechselbelastung

sich das Gesamtsystem wesentlich leichter auslegen lässt. Durch Temperatursensoren auf jeder DCB-Isolationskeramik lassen sich die einzelnen Phasen getrennt auswerten, was eine zusätzliche Kontrollmöglichkeit der Betriebstemperaturen sicherstellt.

Temperatur und Lebensdauer

Für die tatsächliche Temperaturbelastung eines Wechselrichters im Betrieb sind zeitabhängige Belastungen zu berücksichtigen. Im Betrieb in einem Hybrid- oder Elektrofahrzeug treten verschiedene Lastzustände auf: Beim Beschleunigen des Fahrzeugs werden besonders die IGBTs belastet, beim Abbremsen zum Rückspeisen von Energie in die Batterie vor allem die Freilaufdioden. Um die zeitabhängige Erwärmung des Wechselrichters zu beschreiben, muss das Verhalten des Leistungsmoduls auch für Lastzyklen im Bereich von 0,1 s bis 30 s Dauer ermittelt werden. Der zeitabhängige thermische Widerstand der IGBTs steigt für beide Konfigurationen mit der Dauer der Lastpulse an (Bild 4). Die Wärme beginnt ausgehend vom Leistungshalbleiter in Richtung Kühlkörper zu fließen, und der gesamte Aufbau erwärmt sich. Sind die Lastpulse länger als 30 s, ist der Aufbau komplett erwärmt, der Wärmewiderstand erhöht sich nicht weiter.

Mit den zeitabhängigen Wärmewiderständen kann nun die Temperaturbelastung der Halbleiterschalter und -ventile während des Betriebs berechnet werden. Dazu kommen anwendungsnahe Lastzyklen zum Einsatz, welche die typischen Zustände und Pulsdauern der Last beschreiben. Als Beispiel diene der Fahrzyklus eines Hybridfahrzeugs (Bild 5). Beim Anfahren und in den Beschleunigungsphasen wird Energie aus der Batterie entnommen und in den Elektromotor eingespeist. In diesen Beschleunigungsphasen erreicht die Leistungsabgabe bis zu 60 kW. Mit der Leistungsabgabe des Wechselrichters steigt auch die Temperatur der IGBTs auf +95 °C an. In Phasen gleichbleibender Geschwindigkeit wird wenig Wechselrichterleistung

benötigt, die Temperatur der Leistungshalbleiter sinkt wieder. Beim Abbremsen soll in kurzer Zeit möglichst viel Energie in die Batterie zurück gespeist werden. Hier ist die Verlustleistung von IGBT und Dioden in etwa gleich hoch, die abzuführende Wärmeleistung ist am höchsten, der Wechselrichter und die IGBTs erreichen knapp +110 °C.

Der maximale Temperaturhub der IGBTs beträgt 40 K. Auf die Le-

bensdauer des Moduls bezogen, entspricht das 6 Millionen Lastzyklen (Bild 6). Wie wichtig die homogene Temperaturverteilung für die Lebensdauer und die Auslegung des Wechselrichters ist, zeigt der Vergleich mit einem nur 10 K höheren Temperaturhub von 50 K: Die Anzahl der möglichen Lastzyklen sinkt um einen Faktor 3 auf 2 Millionen. Für die LebensdauerAuslegung und optimale Ausnutzung der eingesetzten Leistungshalblei-

DR. VOLKER DEMUTH



ist Produktmanager
bei Semikron

ter ist die gleichmäßige Verteilung der Verlustleistung essenziell. (rh)

Semikron International
Telefon: 09 11/65 59 23 4
www.semikron.com