



© Daimler

ELEKTRIFIZIERTE ANTRIEBSSTRÄNGE IN NUTZFAHRZEUGEN

Wave-Bodenplatten verbessern Leistungsdichte und Lebensdauer

Elektrifizierte Antriebsstränge in Nutzfahrzeugen sind eine große Herausforderung für Leistungshalbleiter. Vor allem die ständig wiederkehrenden Lastzyklen stellen hohe Anforderungen an die Lebensdauer der Leistungsmodule. Abhilfe schafft ein gutes Wärmemanagement, zum Beispiel indem Leistungsmodule mit einer Wave-Bodenplatte aufgerüstet werden.

Besonders im innerstädtischen Straßenverkehr kommt es zu häufigen Start-Stopp-Ereignissen, wodurch die Leistungsmodule elektrischer Fahrzeuge und hier speziell die Halbleiterchips starken Temperaturwechseln ausgesetzt sind. Diese sich ständig wiederholenden Lastzyklen gehen insbesondere auf Kosten der Lebensdauer der Module. Eine gute Wärmeabfuhr ist deshalb wichtig, um die

Temperaturen und auch die Temperaturhöhe am Chip möglichst zu verringern. Interessant ist dabei der Einsatz einer Wave-Bodenplatte: Bei diesem Upgrade befindet sich eine Ribbon-Bond-Struktur auf der Rückseite des Leistungsmoduls; bei einem offenen, flüssigkeitsgekühlten Kühlkörper verbessert sich die thermische Leistung dadurch erheblich, ohne dass die anderen Komponenten des Leistungsmoduls verändert werden

müssen. Je nach Kühlkörperauslegung ermöglicht die Struktur eine Steigerung des Ausgangsstroms um mehr als 20 Prozent oder aber eine deutliche Verbesserung der Lebensdauer.

Kühlkörperkonzepte im Vergleich

Flüssigkeitsgekühlte Kühlkörper sind eine übliche Lösung sowohl in elektrisch angetriebenen Pkw als auch in E-Bussen.

Dabei gibt es zwei verschiedene Konzepte (Bild 1): offene und geschlossene Kühlkörpersysteme. Beim geschlossenen wassergekühlten System wird das Leistungsmodul – mit Wärmeleitpaste zwischen Modul und Kühlkörper – auf den Kühlkörper aufgesetzt. Die klar definierte Schnittstelle zwischen Leistungsmodul und Kühlkörper ermöglicht eine unkomplizierte thermische Optimierung der einzelnen Teile, zusätzlich können standardisierte Kühlkörperkomponenten zum Einsatz kommen. Eine bessere Systemleistung lässt sich jedoch mit einem offenen Kühlkörper erreichen, bei dem die Rückseite des Leistungsmoduls in direktem Kontakt mit der Flüssigkeit steht. Der Wärmewiderstand ist hierbei durch das Zusammenspiel zwischen Leistungsmodulrückseite und Kühlkörpergeometrie gegeben und daher auch nur als gemeinsamer Systemparameter definiert.

Der untere Teil von Bild 1 zeigt die Wave-Bodenplatte, bei der auf der Rückseite des Moduls Ribbon-Bond-Strukturen angebracht sind, sowie ein Beispiel für einen dazu gehörenden offenen Kühlkörper. Das Wave-Konzept vergrößert die Kontaktfläche zur Flüssigkeit hin, gleichzeitig ermöglicht die Struktur eine verbesserte Turbulenz in der Flüssigkeit. Beide Effekte sorgen im Vergleich zu einem Standardmodul mit flacher Bodenplatte für einen reduzierten Wärmewiderstand und damit für geringere Temperaturen am Halbleiter [1]. Im Gegensatz dazu wird das Standard-Leistungsmodul mit einer dünnen Schicht aus Wärmeleitpaste auf einem geschlossenen Kühlkörper montiert, und die Kontaktfläche zur Flüssigkeit und Turbulenz sind allein durch den Kühlkörper festgelegt.

Leistungsvergleich unter fairen Bedingungen

Ein Leistungsvergleich wird auf Basis des EconoDual-3-Gehäuses von Infineon [2] mit einer Halbbrücken-Konfiguration und einem Nennstrom von 900 A durchgeführt. Um einen neutralen Vergleich zu ermöglichen, wurden beide Ausführungen – mit flacher Bodenplatte und mit Wave-Bodenplatte – in einem Applikationstest bei einer Schaltfrequenz von 4 kHz mit variablem Ausgangsstrom I_{rms} betrieben [3]. Bei geöffneten

neten und schwarz lackierten Modulen wurden die IGBT- und Dioden-Temperaturen mit einer Wärmebildkamera gemessen. Bild 2 zeigt die thermischen Bilder der offenen Leistungsmodule für

Auch hier zeigt sich, dass bei der Ausführung mit offenem Kühlkörper und Ribbon-Bond-Struktur die Temperatur im Betrieb – und damit auch der Hub – deutlich niedriger ist und durch einen

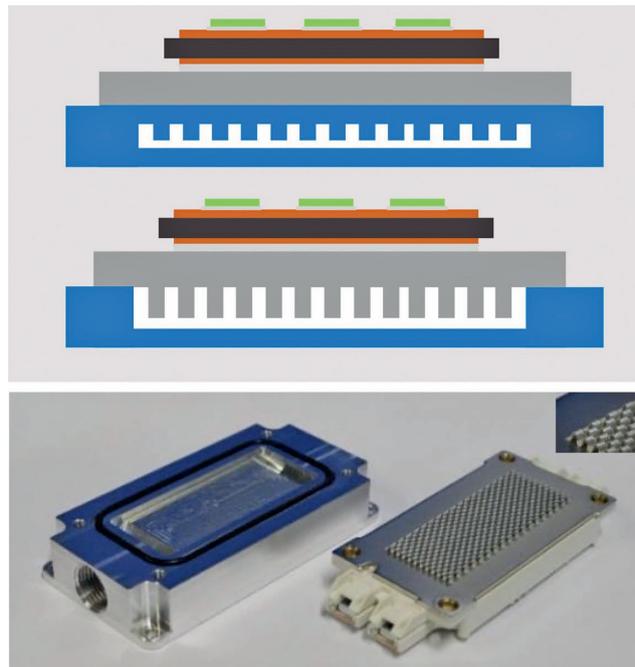


Bild 1: Der obere Teil zeigt eine schematische Darstellung von Leistungsmodulen auf geschlossenen (oben) und offenen (unten) Flüssigkeitskühlkörpern. Der fotografische Teil zeigt das Wave-Konzept auf der Bodenplatte des Leistungsmoduls zusammen mit einem offenen Kühlkörper.

© Infineon Technologies

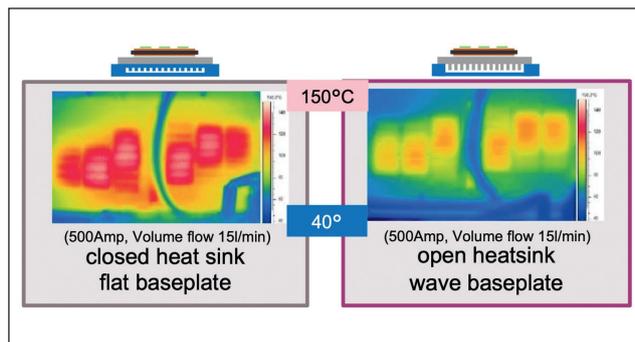


Bild 2: Temperaturmessung für die Ausführung mit geschlossenem (links) und offenem Kühlkörper mit Wave-Bodenplatte (rechts); beide betrieben mit 50 A I_{rms} und 1 l/min Volumenstrom.

© Infineon Technologies

beide Kühlkonzepte bei gleichen Betriebsbedingungen. Links ist ein Standardleistungsmodul mit flacher Bodenplatte auf einem geschlossenen Kühlkörper zu sehen, rechts befindet sich das gleiche Produkt, jedoch mit Wave-Bodenplatte, betrieben auf einem offenen Kühlkörper. Die Vorteile der Ribbon-Bond-Lösung werden sofort ersichtlich – die Temperaturen sind deutlich niedriger.

Die gemittelten Werte der Chip-Temperaturen werden aus diesen Bildern entnommen und für weitere Analysen verwendet. Bild 3 zeigt die IGBT-Temperatur für verschiedene Ausgangsströme I_{rms} . Die Wassereintrittstemperatur von 50 °C ist als horizontale Linie dargestellt, um den maximalen Temperaturhub für jede Betriebsbedingung anzuzeigen.

höheren Volumenstrom des Kühlmediums weiter reduziert wird. Bei einem Ausgangsstrom von $I_{rms} = 500 A$ wird für einen Volumenstrom von 15 l/min eine Temperaturabsenkung von 25 K erreicht. In gleichem Maße sinkt auch der Temperaturhub während des Einsatzprofils. Diese Eigenschaften sind besonders interessant für Schwerlastfahrzeuge, bei denen die Auslegung des Leistungsmoduls oftmals so erfolgt, dass die maximal erlaubte Temperatur während des Betriebs begrenzt ist, um große Temperaturschwankungen und den damit verbundenen Lebensdauerverbrauch zu vermeiden. Alternativ lässt sich mit der Ribbon-Bond-Lösung der Ausgangsstrom mehr als 20 Prozent erhöhen im Vergleich zu einer Lösung mit

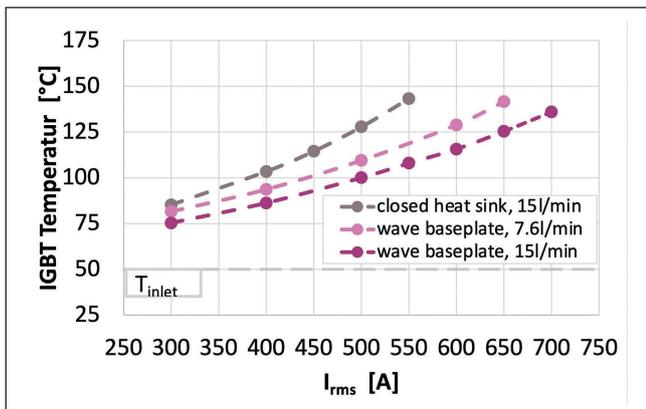


Bild 3: Mit der Wärmebildkamera gemessene Entwicklung der Chip-Temperatur, für den geschlossenen Kühlkörper mit 15l/min und für den offenen Kühlkörper mit Ribbon-Bonds bei zwei verschiedenen Durchflussraten.

© Infineon Technologies

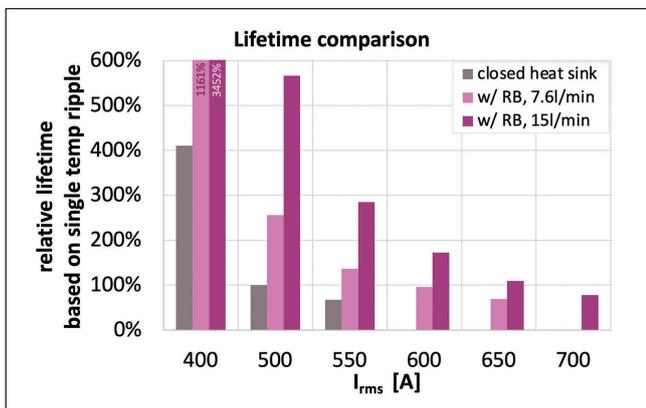


Bild 4: Relative Lebensdauer, unter der vereinfachenden Annahme, dass nur ein einziger Temperaturhub bei dem I_{rms} auftritt.

© Infineon Technologies

geschlossenem Kühlkörper. Das bedeutet zusätzlich auch eine Steigerung der Leistungsdichte.

Zudem geht aus dem Diagramm hervor, dass ein höherer Volumenstrom wünschenswert erscheint. Das geht jedoch gleichzeitig mit einem größeren Druckabfall am Kühlkörper einher und ist letztlich durch die Auslegung der Pumpe für das Kühlsystem gegeben [3]. Hier wird eine gründliche Analyse des individuellen Kühlmittelsystems dringend empfohlen, um ein gutes Gleichgewicht zwischen Volumenstrom, Druckabfall und thermischer Leistung des Systems zu finden.

Verbesserung der Lebensdauer

Die Lebensdauer des Leistungsmoduls ist bei E-Bus-Applikationen ein weiterer entscheidender Parameter. Besonders im innerstädtischen Verkehr kommt es regelmäßig zu Start-Stopp-Ereignissen, die hohe Lastwechsel (Power Cycling) zur Folge haben. Die Lastwechselkurve eines Leistungsmoduls wird vom Hersteller angegeben. Jedoch sollte dabei die angewandte Testmethode überprüft werden, weil diese einen erheblichen Einfluss auf das Testergebnis haben

kann [4]. Da die Ribbon-Bond-Struktur nur auf der Unterseite des Moduls angebracht wird, ist die allgemeine Lastwechselkurve die gleiche wie die der Standardmodule. In dieser Situation führt der oben beschriebene reduzierte thermische Widerstand zu geringeren Temperaturhüben und damit für ein gegebenes Einsatzprofil zu einer verbesserten Lebensdauer [5].

Um einen ersten Einblick in die Vorteile des neuen Konzepts zu erhalten, wird ein einfacher Vergleich angestellt: Der maximale Temperaturhub am Chip liegt zwischen der Eintrittstemperatur und der IGBT-Temperatur bei einem gegebenen I_{rms}. Unter der Annahme, dass das der einzige Temperaturhub ist, der in einem einzelnen Lastzyklus vorhanden ist, kann die Anzahl der möglichen Zyklen direkt durch die Lastwechselkurve bestimmt werden. Bild 4 zeigt die resultierende relative Lebensdauer für die verschiedenen Szenarien: In dieser einfachen Betrachtung erkennt man bei einem Ausgangsstrom von 500 A eine Erhöhung der Lebensdauer um den Faktor zwei bis fünf. Alternativ lässt sich der Ausgangsstrom bei gleichem Gehäuse je nach Volumenstrom um 20 bis über 30 Prozent erhöhen, ohne dass die Le-

bensdauer darunter leidet. Das sind sehr vielversprechende Abschätzungen, insbesondere, wenn man bedenkt, dass das Leistungsmodul selbst mit elektrischem Aufbau und Gate-Treiber-Board überhaupt nicht verändert wird. Der einzige Unterschied ist ein Wechsel von einer geschlossenen zu einer offenen Kühlkörperlösung.

Vorteile auf einen Blick

Die Wave-Bodenplatte bietet einen offensichtlichen Vorteil: zusätzliche Ribbon-Bond-Strukturen auf der Rückseite des Leistungsmoduls bei sonst gleichem Aufbau ermöglichen ein deutlich besseres thermisches Verhalten. Dadurch kann der Ausgangsstrom sehr einfach um mehr als 20 Prozent erhöht oder aber die Lebensdauer des Leistungsmoduls bei gegebenen Betriebsbedingungen deutlich verbessert werden. Das ist besonders attraktiv für Anwendungen wie E-Busse oder Lieferfahrzeuge, bei denen der häufige Start-Stopp-Betrieb hohe Anforderungen an die Lebensdauer des Leistungsmoduls stellt. ■ (eck)

www.infineon.com

Quellenverzeichnis

- [1] A. Uhlemann and E. Hyman, Directly cooled Hybrid-PACK power modules with ribbon bonded cooling structures, PCIM Europe, Nuremberg, Germany, 2018
- [2] K. Vogel et. al., New, best-in-class 900-A 1200-V EconoDUAL 3 with IGBT 7: highest power density and performance PCIM Europe, Nuremberg, Germany, 2019
- [3] S. Buschhorn et al., Smart Package Upgrade to Improve Power Density and Lifetime in Heavy-Duty Vehicles, PCIM Europe, Nuremberg, Germany, 2021
- [4] S. Schuler and U. Scheuermann, Impact of test control strategy on power cycling lifetime, PCIM, Nuremberg, Germany, 2010
- [5] S. Buschhorn et. al., Impact of load profiles on power module design – a detailed analysis based on 7th generation of IGBT and diode technology, PCIM Europe, Nuremberg, Germany, 2018



Dr. Stefan Buschhorn ist Entwicklungsingenieur bei Infineon Technologies.



Klaus Vogel ist Manager Technical Marketing Power Modules bei Infineon Technologies.