

# Cool down für IGBTs

## Flüssigkeitskühler: Wo liegen die Unterschiede?

Leistungsfähige Flüssigkeitskühler setzen sich zunehmend in Schaltungsstrukturen der Leistungselektronik durch. Nicht jede Bauart erfüllt die Forderungen moderner Applikationen hinsichtlich Sicherheit und dauerhafter Leistung. Elektronikpraxis zeigt ihnen wo die Unterschiede liegen und worauf sie achten müssen.

Thomas Jäntscht\*

Der Ausspruch, dass der Elektroniker Wasser in der Schaltung scheut, wie der Teufel das Weihwasser, ist obsolet geworden. Gründe sind die höhere Verlustleistungsdichte der Halbleiter und gestiegene Anforderungen an die Leistungsfähigkeit. Die verbesserte Sicherheit von Kühlsystemen und Komponenten führen dazu, dass Flüssigkeitskühler häufiger eingesetzt werden. Sie sind variabel und lassen sich in bestehende Kühlkreisläufe implementieren.

In vorhandenen Kühlkreisläufen sind die Korrosionsbedingungen klar definiert und erfordern spezifische Kühlerdesigns und Werkstoffe wie eingearbeitete Kanäle aus Kupfer oder Edelstählen. Ein so angepasster Kühler ist kostenseitig immer günstiger als ein separater Kühlkreislauf.

Im einfachsten Fall trifft man auf eine Kühlung, bei der Aluminiumkanäle zulässig sind. Hier können Strangpressprofile mit druckdicht eingepressten Kanälen zur Flüssigkeitsführung eingesetzt werden.

Schwieriger wird es, wenn aus Korrosionsschutzgründen kein Aluminium verwendet werden darf, was in vielen Anlagenbereichen üblich ist. Dort sind meist Kupfer oder spezielle Kupferlegierungen zugelassen. Auch Edelstahllegierungen können vorgeschrieben sein, z.B. wenn deionisiertes Wasser zum Kühlen verwendet wird.

Von der Kühlleistung wäre ein massiver Kupferkühler vorteilhaft (Kupfer hat die 1,7-fache Wärmeleitfähigkeit von Aluminium). Kupfer besitzt allerdings gut das dreifache Gewicht und mit rund 6 € ei-

nen höheren Kilopreis als Aluminium mit rund 3 €.

Bei Edelstahl ist der Massivaufbau nicht nur vom Preis und Gewicht nachteilig, auch die Wärmeleitfähigkeit ist gegenüber Aluminium um das Zehnfache schlechter.

Als praktikabelste Lösung hat sich das Einbinden von Rohren in Aluminium-Grundkörper herausgestellt. Um die Verbindung über Jahrzehnte dicht zu halten und einen guten Wärmekontakt herzustellen, existieren verschiedene Möglichkeiten. Dazu bringt man das Rohr entweder in einen geschlossenen Rohrkanaal oder in eine einseitig offene U-förmige Nut ein. Hier hat man mehrere Möglichkeiten, das Rohr mit dem Aluminium-Grundkörper zu verbinden.

Am einfachsten ist das Einpressen des Rohres in die U-Nut als Presspassung. Das Rohr liegt dann an der Nutwand an. Die Präzision der Verbindung ist abhängig von den Rohren und von den meist stranggepressten Aluminium-Kühlkörpern. Durch die Toleranzen entstehen unregelmäßige Spalten von wenigen µm bis zu 0,3 mm. Umgerechnet bedeutet dies einen Faktor von 300 im Spaltmaß. Entscheidend für die Qualität ist die Wärmeleitfähigkeit. Luft hat eine Wärmeleitfähigkeit von 0,025 W/mK. Die von Aluminium liegt bei ca. 200 W/mK. Umgerechnet bedeutet dies einen Spaltmaß-Faktor von 8000. Problematisch ist ebenfalls, dass sich aufgrund der Oberflächenmikrorauigkeit nur ein Bruchteil der makroskopisch sichtbaren Auflageflächen berühren.

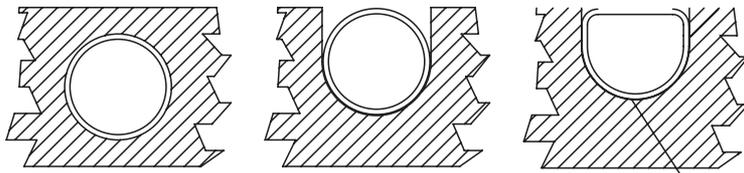
Ähnliche Verhältnisse sind gegeben, wenn das Rohr durch einen leichten Überstand in der Nut durch einen Planierhub in die Kanalform gedrückt wird. Hier entsteht eine Verformung, die sich je nach Rohrhärten und Wanddicken sehr unregelmäßig auswirkt. Bei beiden Verfahren können spaltfüllende Klebstoffe die Leitfähigkeit verbessern. Mit ungefüllten Klebstoffen (d.h. ohne Wärmeleitfüller) lassen sich zumindest partiell vorhandene direkte, metallische Auflagen realisieren. In den Luftspalten erhöhen sie bei guter Füllung die Wärmeleitfähigkeit auf 0,3 W/mK, was einer ca. 600-fach schlechteren Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Aluminium entspricht. Beim Auffüllen mit gefüllten Klebstoffen erreicht man eine Wärmeleitfähigkeit zwischen 1 und 4 W/mK. Die Füllstoffe bilden eine Eigenschichtdicke von typ. 10 bis 50 µm, in der sich die Wärmeleitfähigkeit um den Faktor 50 bis 200 ver-



schlechtert; die Werte in den Hohlräumen verbessern sich jedoch erheblich. Problematisch beim Einkleben der Rohre ist der unterschiedliche Ausdehnungskoeffizient der Werkstoffe: Kupfer liegt bei  $17 \cdot 10^{-6}$  1/K, Aluminium bei  $24 \cdot 10^{-6}$  1/K und die ungefüllten Klebstoffe bei typ. 40 bis  $60 \cdot 10^{-6}$  1/K. Dadurch ergibt sich eine enorme Scherwirkung, die sich besonders stark bei ungefüllten Systemen auswirkt und zu Haarrissen führt, die mit Luft als Wärmeleiter auskommen müssen.

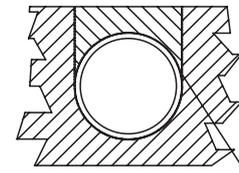
Alle Varianten zeigen einen erheblich schlechteren Wärmeübergang gegenüber einem umlaufend, metallisch schlüssig eingebauten Rohr. Solange es sich um kleine Bauelemente handelt, die mit der Rohrbreite als Wärmeabgabefläche auskommen, spielt dies kaum eine Rolle. Handelt es sich um großflächig aufliegende Halbleiter mit hohen Wärmestromdichten, kommt es zu ungleichmäßigen und oftmals auch unzureichenden Entwärmungen einzelner Chipreihen. Dies kann zu Unsymmetrien in der Schaltung und damit zu vorzeitigen Ausfällen führen.

\*Dipl.-Ing. Thomas Jäntscht ist Leiter Technik und Entwicklung bei der Austerlitz Electronic GmbH in Nürnberg.



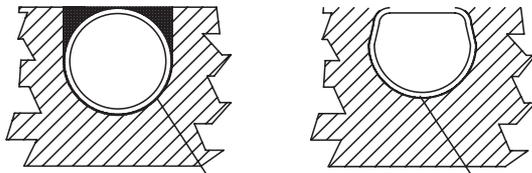
■ Bild 1:  
Die unterschiedlichen Möglichkeiten, um ein Kupferrohr in den Grundkörper einzubinden: geschlossener Rohrkanal (li.); einseitig offene Nut (Mitte); durch Planierhub in die Kanalform gedrückt (re.).

Spalt



Kleber

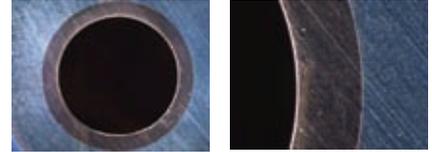
■ Bild 3:  
In die Nut eingearbeitetes Kupferrohr, das mit einem Formstück aus Aluminium wieder verschlossen worden ist



Kleber

Kleber

■ Bild 2:  
Spaltfüllende Klebstoffen verbessern die Parameter: Links ist ein Kupferrohr in einer mit Klebstoff gefüllten U-förmigen Nut zu sehen. Das Rohr kann durch Planierhub in die Kanalform gedrückt werden (re.).



■ Bild 4:  
Die Mikroskopaufnahme zeigt die gute Rohranbindung eines umlaufend, metallisch schlüssig in den Grundkörper eingearbeiteten Kupferrohrs. Vergrößerung li. 10-fach, re. 41-fach.

Auch bei den umlaufend eingebetteten Systemen gibt es verschiedene Verfahren, die mit unterschiedlichen Wärmeübergängen arbeiten. Die einfachste Möglichkeit wäre, in einer tief genug ausgearbeiteten U-Nut ein Rohr einzupressen oder einzukleben und diese dann wieder mit einem Alu-Formstück zu verschließen. Dieser Verschluss kann über Pressen, Kleben oder Schweißen erfolgen und dichtet den Kanal vollständig und sauber ab. Bei innen liegenden Rohrschlangen treten die gleichen Probleme mit Kontaktflächen und Ausdehnungskoeffizienten auf wie bei offenen Systemen.

## Ideale Lösung für die Praxis

Der ideale Zustand wäre ein Rohr oder eine Rohrschlange, die über ihre gesamte Länge umlaufend metallisch schlüssig in den Alu-Grundkörper eingearbeitet ist und die Längendifferenzen der unterschiedlichen Metalle ausgleicht. Diese Herausforderung ist kaum umzusetzen, aber es gibt auf dieser Basis einen Ansatz, der praktikabel und anwenderfreundlich ist: Bei einer Systemgruppe von Flüssigkeitskühlern wer-

den die Rohre in einem mehrstufigen Verfahren aus thermischen und mechanischen Prozessen umlaufend, metallisch schlüssig mit dem Aluminiumgrundkörper verbunden. D.h., es berühren sich nicht nur die Mikroauigkeiten (Oberflächengebirge) wie bei offenen Systemen, sondern diese werden so verpresst und in Rohrlängsrichtung extrem gegeneinander verdrückt, dass es zu einer sehr hohen Auflagedichte in der Übergangsfläche kommt. Luftspalten werden eliminiert. Gleichzeitig ermöglicht dieses Verfahren einen guten Ausgleich der Längendehnungsdifferenzen. Die radialen Dehnungen werden durch eine entsprechend hohe Vorspannung aufgefangen.

Es können Kupferrohre und hochflexible Edelstahlrohre eingearbeitet werden. Über die Rohranbindung lassen sich die Wärmewiderstände über die gesamte Montagefläche der Halbleiter angleichen. Die Bausteine werden gleichmäßig entwärmt.

Da man nur gerade Rohrstücke einarbeiten kann, verbindet man die Rohre nachträglich untereinander. Die Verbindungen werden verschraubt, verlötet oder verschweißt. Damit lässt sich das großindustrielle Verfahren auch für mitt-

lere und kleinere Serien wirtschaftlich einsetzen.

Aus vorgearbeiteten Alu-Profilen mit eingearbeiteten Rohren als Stangenware in Standardlängen von 3 m wird der individuelle Kühler nach Kundenwunsch herausgearbeitet. Durch Profile mit unterschiedlichen Breiten, Längen und Materialpaarungen kann der Kühler optimal an die Schaltungsentwürfe angepasst werden. Gleichzeitig lassen sich Korrosionsanforderungen, Durchflussmenge, Druckabfall und Kühlleistung berücksichtigen. Ein nachträgliches Umsteigen auf andere Rohrarten bei gleichem Layout ist möglich.

Die effiziente Kühlung wird zunehmend ein Schlüsselproblem der Halbleiterhersteller. Feinstkanäle und Vielkammersysteme werden das Szenario in Zukunft beherrschen. Die Anforderungen an die Kühlleistung stehen hier den Gegebenheiten der Kühlkreisläufe hinsichtlich der Verschmutzungsgrade gegenüber. Einerseits wird es Vereinfachungen der kühlrelevanten Strukturen zu Lasten der abführbaren Leistung geben müssen, um Ablagerungen und Verunreinigungen zu vermeiden. Andererseits werden allzu großzügig ausgelegte Reinheitsdefinitionen der Kreisläufe weiter eingeschränkt werden müssen. (kr)

Austerlitz Electronic

Bezeichnung	Bauraum/ Volumen	Gewicht kg	Wärme- widerstand $R_{th}$ in K/W	ca. Preis in €
Kühlprofil mit Querstromlüfter 200 mm Breite/300 mm Länge Windgeschwindigkeit 5 m/s	l = ca. 400 mm b = ca. 270 mm h = ca. 95 mm  V = 10 dm <sup>3</sup>	ca. 6,5	ca. 38	195
Flüssigkeitskühler 200 mm Breite/300 mm Länge serieller Durchfluss druckgeprüft mit Anschlüssen Durchfluss 3,5 l/min	l = 300 mm b = 200 mm h = 18 mm  V = ca. 1 dm <sup>3</sup>	ca. 2,4	5,5	160

Tabellle: Vergleich Kühlprofil mit Lüfter bzw. Flüssigkeitskühler

TRANSMETRA haltec GmbH  
Postfach 230, Rundbuckstr. 2  
CH-8212 Neuhausen  
Tel. +41 (0)52 - 624 8626  
Fax +41 (0)52 - 624 8611  
<http://www.transmetra.ch>  
Email: [info@transmetra.ch](mailto:info@transmetra.ch)