

VERGLEICH VERSCHIEDENER METHODEN DER FLÜSSIGKEITSKÜHLUNG

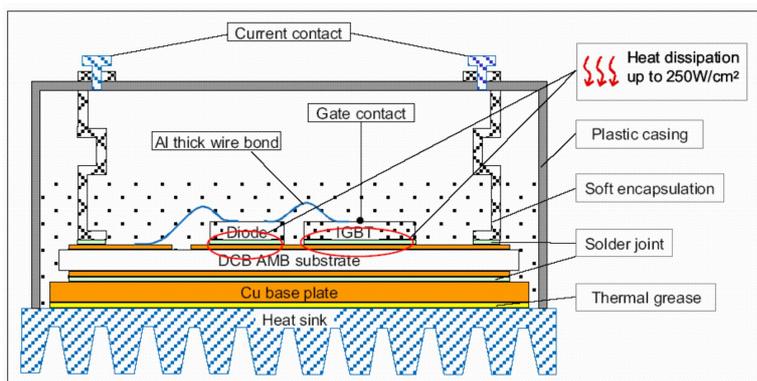
I. Koch, N. Lescow

1 EINLEITUNG

Bedingt durch die Forderung nach immer kompakteren und robusteren leistungselektronischen Systemen besteht eine permanente Nachfrage nach effizienteren Kühlmethoden. Gerade bei hohen Leistungsdichten haben sich verschiedene Varianten von Flüssigkeitskühlern etabliert. Im Folgenden werden die effektivsten Kühlmethoden beschrieben und verglichen, um neue innovative Kühltechnologien einordnen zu können.

2 WÄRMEÜBERGÄNGE BEI DER WASSERKÜHLUNG VON LEISTUNGSHALBLEITERN

Der herkömmliche Aufbau eines gekühlten Leistungshalbleitermoduls ist in **Bild 1** dargestellt. Der Si-Chip ist hierbei auf die Kupferoberfläche eines DCB-Substrates aufgelötet. Die kupferbeschichtete Unterseite des Substrates ist auf eine Kupferbodenplatte gelötet, die dann mit einer Wärmeleitpaste auf einem Al-Kühlkörper befestigt wird. Die thermischen Widerstände ergeben sich aus der Dicke und der thermischen Leitfähigkeit der entsprechenden Schichten.



Wärmeübergänge:

- Si-Chip
- Lot zwischen Chip und DCB
- Oberseitige Kupferschicht
- Substratplatte (Keramik)
- Unterseitige Kupferschicht
- Lot zwischen DCB und Bodenplatte
- Kupferbodenplatte
- Wärmeleitpaste
- Kühlkörper

Bild 1: Wärmeübergänge vom Si-Chip bis zum Kühlmedium (Quelle: Curamik Elektronik GmbH)

Die beiden folgenden Balkendiagramme zeigen die spezifischen Wärmeleitfähigkeiten dieser Materialien und die sich aus der Schichtdicke ergebenden thermischen Widerstände (Luftkühler).

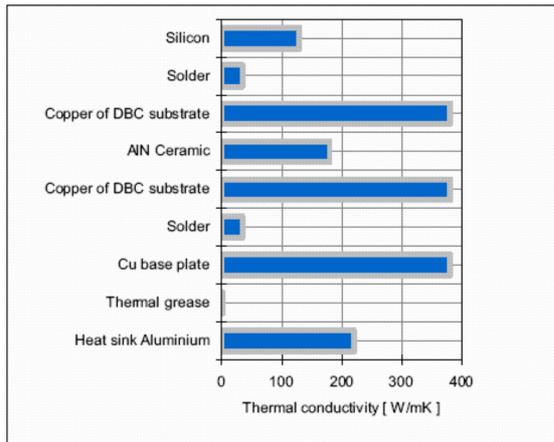


Bild 2: Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Materialien

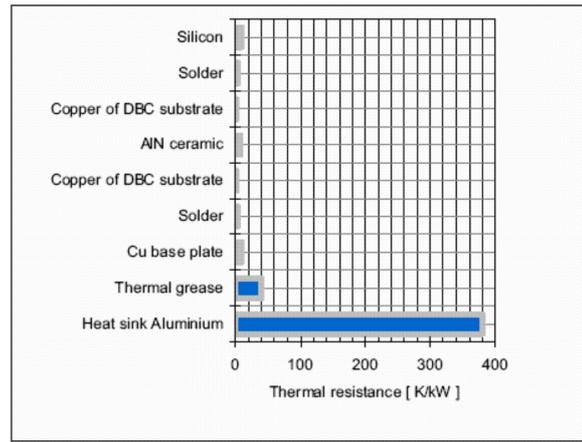


Bild 3: Wärmewiderstand der einzelnen Schichten

Hiernach liefern vor allem die Wärmeleitpaste und der Al-Kühlkörper den größten Anteil am thermischen Widerstand vom Chip zum Kühlmedium. Bei einem Wasserkühlkörper entscheiden vor allem Kühlfläche und Durchflussvolumen des Kühlmediums über den thermischen Widerstand dieses Wärmeüberganges. Weiter können herbeigeführte Turbulenzen in der Flüssigkeit die Entwärmung gegenüber dem laminaren Durchfluss erhöhen, was zu einem Absenken des thermischen Widerstandes führt. Um die thermischen Widerstände von Wärmeleitpaste und Al-Kühlkörper einzusparen, kann die Bodenplatte auch durch eine geometrisch identische Bodenplatte mit direkter Wasserkühlung ersetzt werden, wobei auch eine Vergrößerung der Kühlfläche durch verschiedenste Strukturen an der Kühlfläche maßgeblich zu einer effizienteren Entwärmung beitragen kann [1].

In **Bild 4** sind die typischen Dicken der in einem IGBT-Package befindlichen Schichten mit der Wärmeleitfähigkeit und in **Bild 5** die daraus resultierenden Temperaturdifferenzen zusammengetragen [2]:

| Econo Module | Thermal Conductivity [W/m.K] | Thickness |
|--------------------------------|------------------------------|-------------------|
| Silicium | 148 | 170 μm |
| Solder | 34 | 100 μm |
| Cu (DCB) | 395 | 0.3 mm |
| Al ₂ O ₃ | 22 | 0.38 mm |
| Cu (DCB) | 395 | 0.3 mm |
| Solder | 34 | 200 μm |
| Cu (Baseplate) | 395 | 3 mm |

Bild 4: Leitfähigkeit mit typischen Schichtdicken eines IGBTs (BSM 150 GT 120 DN2)

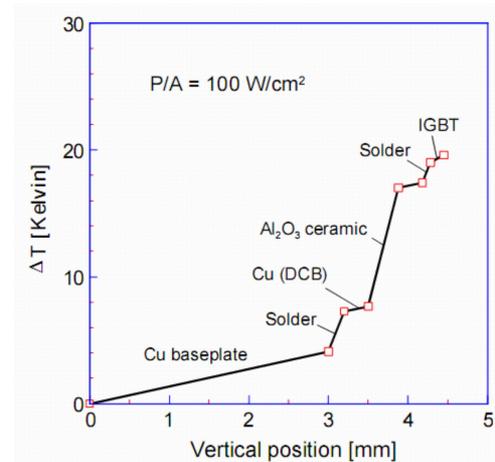


Bild 5: Typische Temperaturdifferenzen an den Schichten

3 KONVENTIONELLER WASSERDURCHSPÜLTER KÜHLKÖRPER

Mit herkömmlichen Luftkühlern können Wärmewiderstände von 21..23 K/kW erzielt werden. Eine wesentliche Verbesserung kann mit wasserdurchströmten Kühlkörpern (**Bild 6**) erreicht werden. Zwar sind Wasser und Elektronik generell schlecht vereinbar, besonders im Hinblick auf die in der Antriebstechnik auftretenden hohen Spannungen, jedoch übertreffen die Einsparung von ansonsten notwendigen Luftkühlern der Oberklasse und die Platzeinsparung die Kosten für den zusätzlichen Aufwand durch den Wasserkreislauf. Durch die hohe Effizienz gegenüber der Luftkühlung wird in vielen Anwendungen eine ausreichende Kühlung überhaupt erst möglich, da die Kühlfläche durch die Modulgröße vorgegeben ist und somit nicht nur ein geringer Wärmewiderstand, sondern auch ein hoher Wärmeübergangskoeffizient gefordert ist.

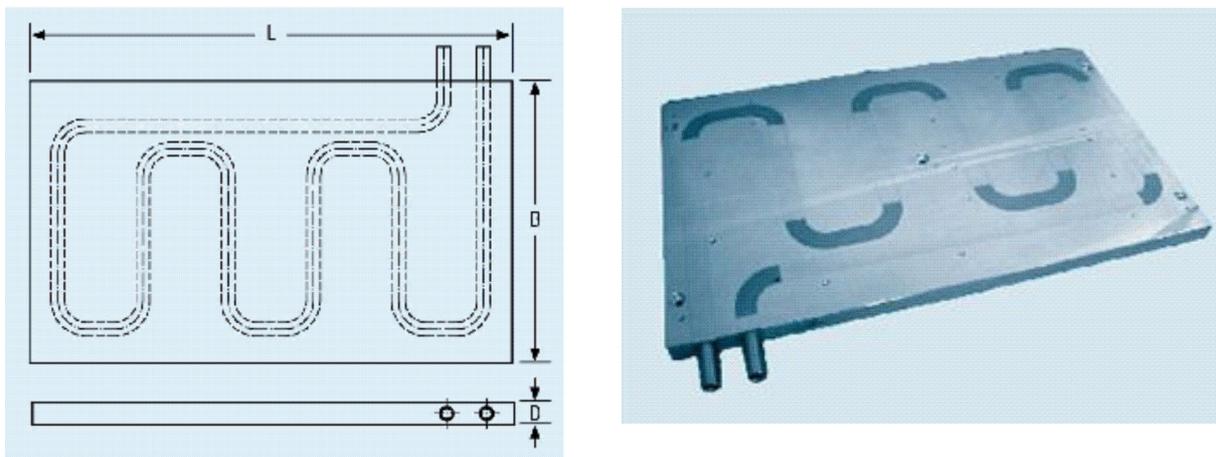


Bild 6: Liquid Cold Plate der Serie KLD, DAU

Aufgrund ihrer guten Wärmeleitfähigkeit werden als Plattenmaterial häufig Kupfer oder Al-Legierungen verwendet. Um den Wärmewiderstand weiter zu verringern, sollte die Platte möglichst dünn ausgeführt werden und von vielen Kanälen durchsetzt sein. Eine starke Durchmesserergrößerung der Kühlkanäle führt zwar zu einer erhöhten Oberfläche, senkt jedoch die Strömungsgeschwindigkeit und die Verwirbelungen. Dies führt zu einer erhöhten Temperatur des Kühlmittels an der Kanalwand. Dieser Temperaturgradient kann gebietsweise zu unzureichender Kühlung und unvollständiger Ausnutzung der Kapazität des Kühlmittels führen. Neben nicht zu groß ausgeführten Bohrungen können Turbulenzen durch zusätzlich eingefügte Schaufeln (Turbulatoren) erzwungen werden. Jedoch liegt hier eine Effektivitätsgrenze, da der Strömungswiderstand zunimmt. Daraus resultiert bei konstanter Pumpleistung eine verringerte Strömungsgeschwindigkeit und damit einhergehend eine erhöhte Kühlmitteltemperatur am Kühlmittelausgang. Die Verbindung der Kanäle kann parallel oder seriell erfolgen. Eine parallele Anordnung führt zwar zu einem geringen Druckabfall, der jedoch zu einer kleinen Fließgeschwindigkeit und somit einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung führt. Serielle, bzw. mäanderförmige Strukturen führen durch die erhöhte Fließgeschwindigkeit zu einer gleichmäßigeren Temperaturverteilung, jedoch auch zu einem erhöhten

Druckabfall. Auch die Art des Kühlmittels muss betrachtet werden. Wird dem Wasser beispielsweise Glykol beigemischt, nimmt die spezifische Wärmekapazität ab.

Für eine untere Abschätzung des minimalen Wärmewiderstands eines wasserdurchströmten Kühlsystems wird beispielsweise ein System der Firma DAU untersucht. Es handelt sich um den Kühlkörper *Cooling Plate KW 140 Style4*. Die Breite des Kühlkörpers beträgt 140 mm und die Länge 450 mm. Es wurde ein IGBT-Modul der Abmaße 130*140 mm² auf dem Kühlkörper befestigt. Die vom IGBT-Modul abgegebene Wärmeleistung beträgt 1 kW. Die Kühlmitteltemperatur beträgt 40°C.

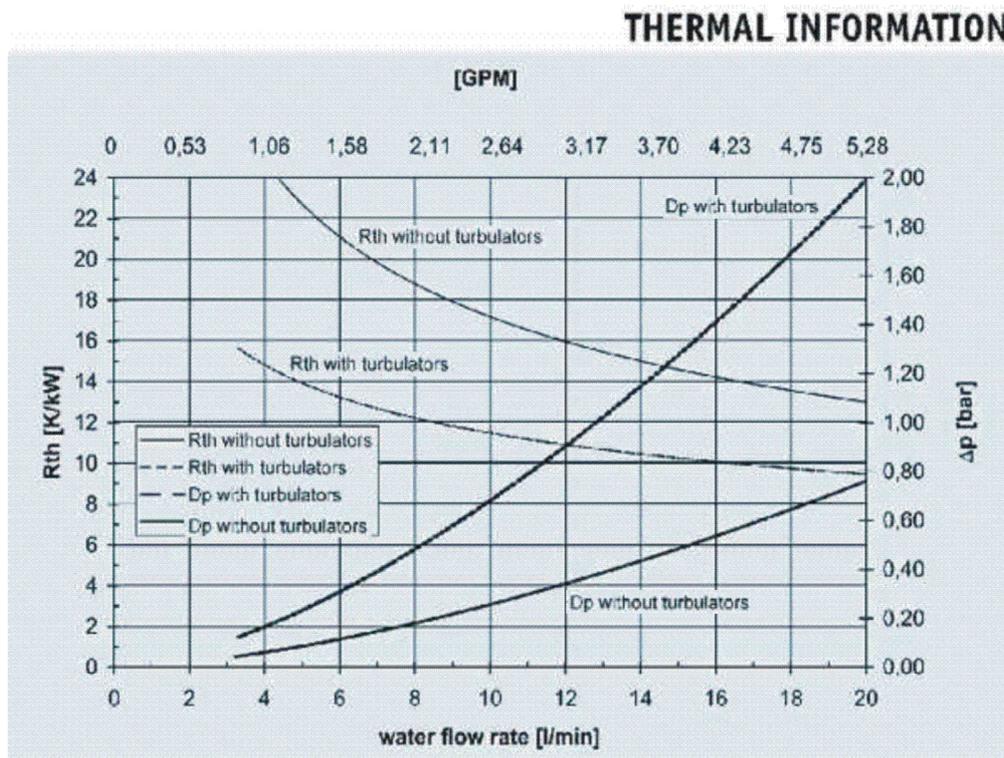


Bild 7: Zusammenhang zwischen Wärmewiderstand und Kühlmittelgeschwindigkeit mit und ohne Turbulatoren

Der Kurve *Rth with turbulators* (**Bild 7**) ist zu entnehmen, dass der Wärmewiderstand bei maximalem Durchfluss von 20 l/min etwa 10 K/kW beträgt. Unter der Annahme einer Kühlmitteltemperatur von 120°C und einer maximalen Kühlkörpertemperatur von 150°C führt dies zu einer maximal zulässigen Wärmeleistungsabgabe von 3 kW bei einer Fläche von 6,3 dm². Als weiteres Beispiel kann an dieser Stelle der von der Firma Semikron angegebene Wärmewiderstand von 14,5 K/kW für 2-fach IGBT-Module auf wassergekühlten Systemen bei einem Volumenstrom von 14 l/min genannt werden. Bei 4-fach IGBT-Modulen verbessert sich der Wärmewiderstand auf 9,5 K/kW bei ebenfalls 14,5 l/min. Bezogen auf die Fläche ergibt sich hier ein Wärmeübergangskoeffizient von 1670 W/(Km²) [3], [4].

4 DIREKTE WASSERKÜHLUNG

Zur Verbesserung des Wärmeübergangs kann die Unterseite des Leistungshalbleiters direkt in den Kühlkanal eingebracht werden, so dass seine Kühlfläche vom Kühlmittel unmittelbar gekühlt wird. Zusätzlich wird eine effektivere Kühlung durch Vergrößerung der Oberfläche angestrebt. Diese erfolgt beispielsweise durch sogenannte PinFins oder andere Strukturen, wie z. B. eine Rautenstruktur. Dabei bleibt bei dieser Maßnahme bei konstantem hydrostatischen Druck die auf die Flanschverbindung wirkende Kraft konstant.

4.1 PinFins (Eupec)

Eine Lösung zur Vergrößerung der Kühloberfläche ist die von der Firma Eupec entwickelte PinFin-Struktur (**Bild 8**). Allerdings sind hierzu derzeit keine Daten wie beispielsweise Wärmeübergangskoeffizienten bekannt.



Bild 8: Eupec-IGBT-Modul mit PinFins zur direkten Wasserkühlung

4.2 Rautenstruktur (Fraunhofer)

Eine weitere Möglichkeit zur Vergrößerung der Kühloberfläche ist die Rautenstruktur, wie sie am Fraunhofer-Institut in einem IGBT-Wechselrichter für einen am Institut entwickelten Traktionsantrieb realisiert wurde. Die IGBTs sind hier auf einer zusätzlichen Platte, die die Rautenstruktur enthält, angeordnet (**Bild 9**). Der zur Verfügung stehende Raum ist äußerst gering.

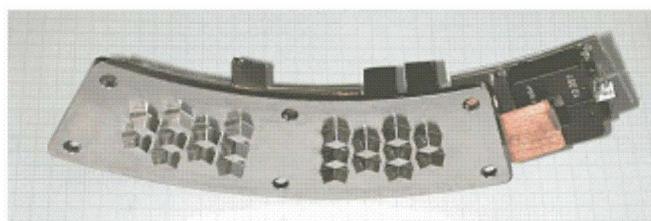


Bild 9: Rautenstruktur der Kühlfläche einer Halbbrücke

Auf einer Kühlplatte der Abmaße $42,56 \text{ mm} * 125,71 \text{ mm} = 5,35 * 10^{-3} \text{ m}^2$ ist eine Halbbrücke des Spannungszwischenkreiswechselrichters angeordnet. Pro Schalter sind nur 10 Rauten vorhanden. Bei einem Kühlmitteldurchsatz von 8 l/min ist ein Wärmeübergangskoeffizient von $2076 \text{ W/(Km}^2)$ angegeben.

Im Vergleich dazu liegt der Wärmeübergangskoeffizient bei der herkömmlichen Wasserkühlung für 20 l/min bei $1670 \text{ W/(Km}^2)$ [3].

4.3 ShowerPower™ (Danfoss)

In der herkömmlichen direkten Wasserkühlung entstehen durch das Entlangströmen des Kühlmediums an der Bodenplatte Temperaturgradienten in Strömungsrichtung. Der konzeptionelle Ansatz von ShowerPower™ ist das Erreichen einer gleichmäßig gekühlten Bodenplatte (**Bild 10**). Hierzu wird die Bodenplatte senkrecht gespült. Weiter werden hierbei entgegen dem laminaren Flüssigkeitsstrom durch Mäander-Kanäle zwischen jeder Ein- und Auslassdüse Turbulenzen erzeugt, die zu einer effektiveren Entwärmung führen.

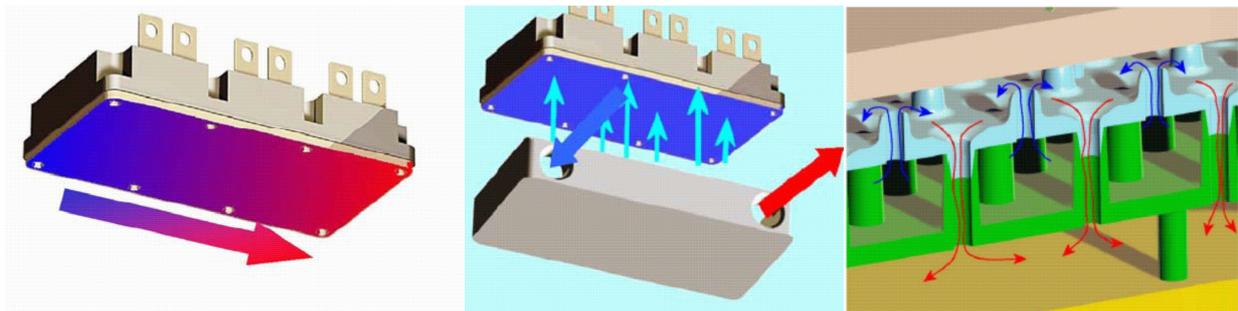


Bild 10: Wasserkühlung mit Wärmegradienten (links); Gradientenfreie Wasserkühlung (mittig); ShowerPower™ Struktur (rechts)

Die Flussführung und die Verzweigung von Kaltwasser-Zulauf und Warmwasser-Ablauf erfolgt durch ein Kunststoff-Spritzgussteil (**Bild 11**), das in den Kühler eingebracht wird.

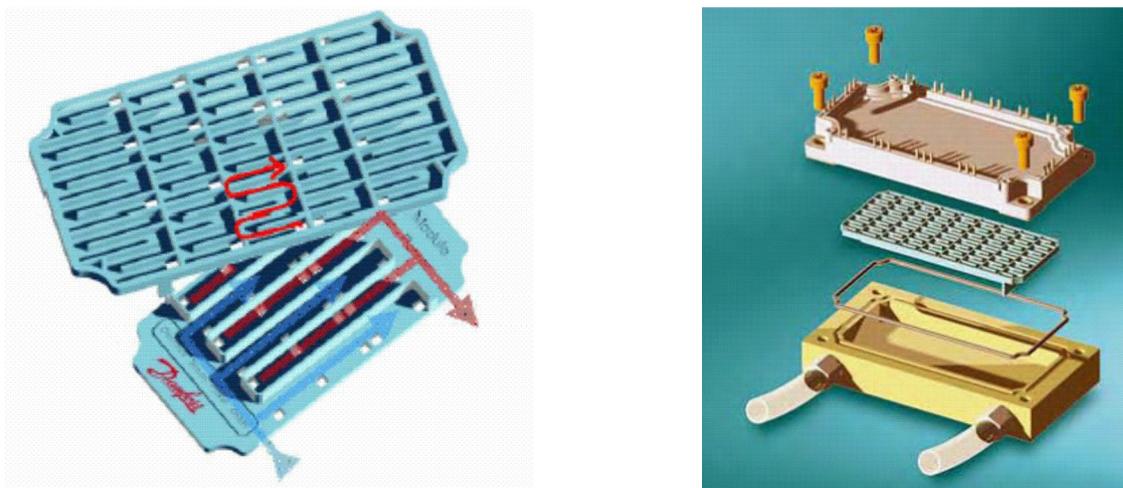


Bild 11: ShowerPower™ Spritzguss-Einsatz

Laut Hersteller ergeben sich dadurch folgende Vorteile [5]:

- homogene Kühlung des Powermoduls (gleichmäßige Temperaturverteilung)
- direkte Kühlung unter Vermeidung von Wärmeleitpaste
- sehr kostengünstige Herstellung des Kühlers

4.4 Siedebadkühlung (Siemens AG)

Bei der Siedebad-Technologie findet die Entwärmung über das Verdampfen einer Flüssigkeit statt. Hierbei wird die zu kühlende Fläche mit einem elektrisch hoch isolierenden Fluid besprüht oder gespült, so dass nicht nur die isolierte Bodenplatte eines Halbleiterpackages, sondern auch direkt die chipseite Modulfläche gekühlt werden kann. Die verdampfte Kühlflüssigkeit kondensiert in einem Wärmetauscher (Kondensator) und gelangt im flüssigen Zustand wieder zur Wärmequelle zurück. Somit entsteht ein geschlossener Kühlkreislauf, in dem die Zustandsänderung nahezu isotherm stattfindet und die Temperatur der Kühloberfläche nahe an der Fluid- bzw. Gas-Temperatur liegt. Hierdurch werden im Halbleiter die Temperaturgradienten reduziert, so dass auch die mechanischen Belastungen durch Temperaturschwankungen reduziert werden können.

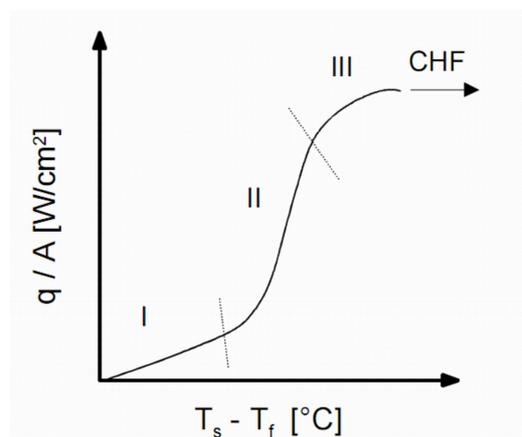


Bild 12: Typische Kurve einer Phasenübergangskühlung

Bild 12 zeigt das prinzipielle Verhältnis zwischen Wärmefluss und Temperaturdifferenz von Oberflächen- zu Fluidtemperatur einer Phasenübergangskühlung. Die Kurve unterteilt sich in drei Bereiche. Im Bereich I liefert der Temperaturunterschied noch nicht ausreichend Energie, um den Phasenübergang des Fluids einzuleiten. Die Kühlung findet ausschließlich durch Konvektion statt. Sobald die Verdampfung des Fluids einsetzt (Bereich II), steigt der Wärmetransport bei fast konstanter Temperatur stark an und die Kühlung wird effizienter. Die Wärmeabfuhr ist gewährleistet, bis im Bereich III das Gas nicht schnell genug abgeführt werden kann. Hier wirkt dann das entstehende Gaskissen thermisch isolierend, so dass es zu lokalen Übertemperaturen an der Wärmequelle kommen kann.

Bild 13 und **Bild 14** zeigen ein schematisches Schnittbild und einen von der Siemens AG konstruierten Aufbau einer Siedebadkühlung. Die veröffentlichten Messwerte sind den darauf folgenden **Tabellen 1** und **2** mit einem Vergleich zu der direkten Wasserkühlung zu entnehmen [2].

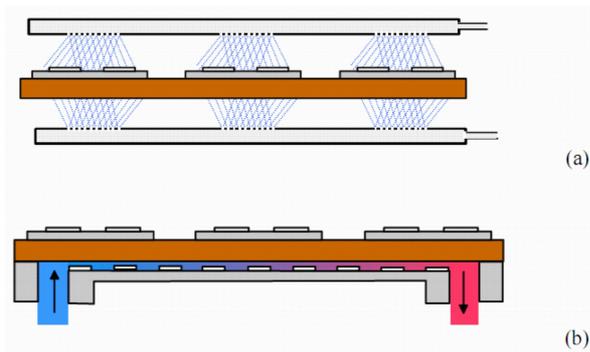


Bild 13: Schematisches Schnittbild

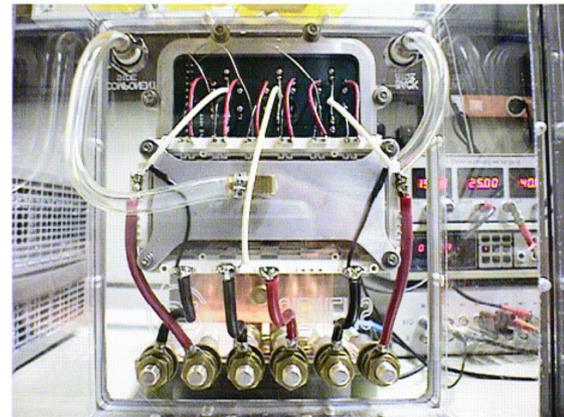


Bild 14: Aufbau einer Siedebadkühlung

Tabelle 1: Gemessene Werte

| Type of cooling | Spray Cooling | Spray cooling without polyimide on chips | Direct liquid base-plate flow convection |
|---------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| Pressure [psi] | 25 | 25 | 0.3 |
| Power consumption [W] | 108 | 108 | |
| Flow rate Fluorinert / H ₂ O [l/min] | 1.70 | 1.70 | 1.76 |
| P _v power dissipation [W] | 1371 | 1393 | 1198 |
| T _c baseplate (thermocouple 1) [°C] | 92.8 | 82.8 | 73.3 |
| T _c baseplate (thermocouple 2) [°C] | 94.0 | 82.2 | 70.8 |
| T _a Fluorinert/H ₂ O (inlet) [°C] | 38.8 | 40.2 | 16.4 |
| T _j junction [°C] | 127 | 111 | 106 |
| R _{th(j-c)} [K/W] | 0.025 | 0.020 | 0.028 |
| R _{th(j-a)} [K/W] | 0.064 | 0.051 | 0.075 |

Tabelle 2: Gemessene Werte

| Type of cooling | Direct liquid base-plate flow convection | Direct liquid base-plate flow convection |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| | <i>low flow rate</i> | <i>high flow rate</i> |
| Pressure [psid] | 0.3 | 36 |
| Flow rate Fluorinert / H ₂ O [l/min] | 1.8 | 20 |
| P _v power dissipation [W] | 1200 | 1300 |
| T _c baseplate (middle) [°C] | 73 | 37 |
| T _a Fluorinert/H ₂ O (inlet) [°C] | 16 | 16 |
| T _j Junction [°C] | 106 | 73 |
| R _{th(j-a)} [K/W] | 0.075 | 0.043 |

Zu der Siedebadkühlung finden sich im Internet bereits Anbieter, die sie für Serveranwendungen unter dem Namen SprayCool kommerziell vertreiben. Weiter sind bereits Forschungsvorhaben vom Airforce Research Laboratory bekannt, die sich mit dem Verhalten der Kühltechnologie in der Schwerelosigkeit beschäftigen.

5 TECHNISCHE ASPEKTE UND BEWERTUNG

Die für die Darstellung in **Bild 15** verwendeten Daten sind aus verschiedenen Veröffentlichungen zusammengetragen und zeigen, dass bei den Kühlmethode ohne Phasenübergang die ShowerPower™ Technologie die höchste Effektivität aufweist. Nachteilig ist bei der Kühlung durch Konvektion, dass die Grenztemperatur des Kühlmediums unter Normalbedingungen bei 100°C liegt. Auch steigt bei zunehmender Verlustwärme des Halbleiters die sich ergebende Temperaturdifferenz.

Die beiden aufgeführten Probleme können unter Verwendung der Kühlung mit Phasenübergang umgangen werden. Die Kühlmitteltemperatur lässt sich durch die Wahl des Kühlmittels einstellen, wobei die Kühlung durch den Phasenübergang nahezu isotherm stattfindet. Allerdings entsteht ab einer bestimmten Wärmestromdichte ein thermisch isolierendes Gaskissen, so dass der Prozess zusammenbricht.

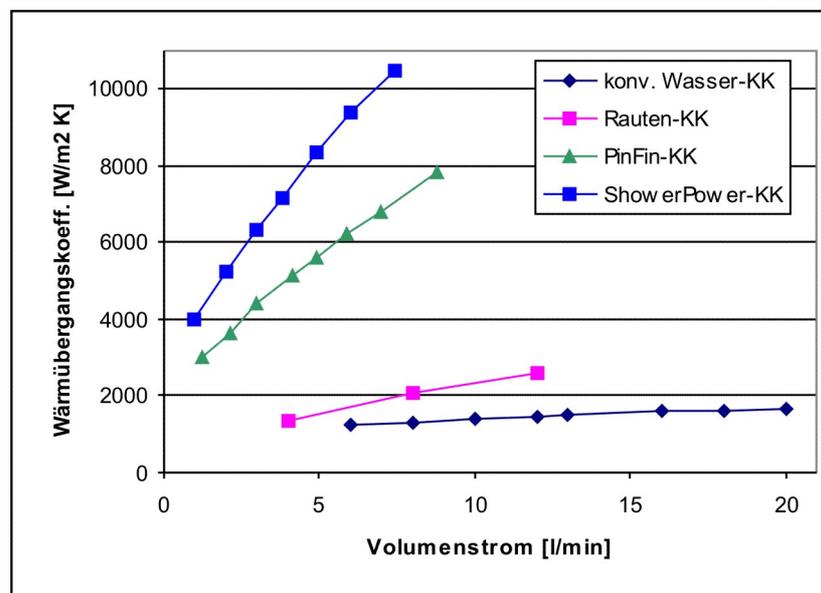


Bild 15: Vergleich verschiedener Kühltechnologien

Für einen Vergleich zwischen der effizientesten Kühlmethode ohne Phasenübergang und der Kühlung mit Phasenübergang wird beispielsweise eine Junction-Temperatur von 100°C und eine Temperatur des Kühlmediums von 20°C angenommen. Daraus resultiert eine Temperaturdifferenz von 80 K. Unter der Annahme des größten Volumenstromes der ShowerPower™-Kühlung resultiert aus der genannten Temperaturdifferenz eine maximale Wärmestromdichte von 83,8 W/cm². Nach Untersuchungen der Siemens AG sind bei einer beidseitigen Kühlung mit Phasenübergang Werte von 20 W/cm² erreicht worden. Jedoch ist hierbei zu beachten, dass bei der beidseitigen Kühlung die effektive Kühlfläche durch Nutzung der chipseitigen Fläche fast verdoppelt wird.

Um die Vergleiche durchführen zu können, mussten teilweise empirische Werte angenommen oder die Versuchsbedingungen der durchgeführten Experimente verwendet werden. Ein exakter Vergleich der einzelnen Kühltechnologien ist aufgrund der unterschiedlichen

Voraussetzungen (Temperaturgrenzbereiche, Kühloberfläche, Volumenströme, iso- und nichtisothermische Prozesse, Einfluss der Temperaturgradienten im Kreislauf, Turbulenzen, etc.) nur tendenziell möglich.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Aus den zusammengetragenen Ergebnissen geht hervor, dass die ShowerPower™ Technologie als Kühlmethode ohne Phasenübergang die effektivste ist. Allerdings bleibt anzumerken, dass sie unter Berücksichtigung der Einsatztemperatur nur bis etwa 100°C ohne weitere Maßnahmen einsetzbar ist. Eine weitere interessante Methode liefert die Nutzung der Verdampfungswärme eines Kühlmediums. Bei Einsatz eines elektrisch hoch isolierenden Kühlmediums kann sogar zusätzlich die chipseitige Fläche eines Halbleitermoduls gekühlt werden. Die Technologie wurde bereits untersucht und wird kommerziell vermarktet.

LITERATUR

- [1] J. Schulz-Harder: *Efficient Cooling of Power Electronics*, PCIM 2006, China
- [2] G. Mittic, W. Kiffe, G. Lefranc, S. Ramming: *Comparison of spray cooling with direct liquid base-plate flow convection of IGBT power modules*, EPE-PEMC 2002, Cavtat & Dubrovnik
- [3] www.dau-at.com, Stand 27.11.2008
- [4] Semikron: *Applikationshandbuch IGBT- und MOSFET-Leistungsmodule*, http://www.semikron.com/internet/webcms/objects/applica_help/d/3_3_3-3_3_6_1.pdf, Stand 27.11.08
- [5] R. Eisele: *Innovative Kühltechnologie für Leistungsmodule*, ETG Tagung, Okt. 2006, Bad Nauheim