



Kombinierte Siede-Wasserkühlung für die Hochspannungselektronik

Autor: Andreas Schulz

Strukturtechnik UG, Neuer Weg 22-23, D-06484 Quedlinburg,
schulz@strukturtechnik.de, Telefon (+49) 0171 368 59 56,
Cool Tec Electronic GmbH, Ilmenauer Str. 7, D-98701 Großbreitenbach.

1. Einleitung

Auf den MMT 2009 wurde die Siedekühlung mit integrierten Mikrostrukturen vorgestellt, die zur effektiven Kühlung, bzw. zur Entwärmung, von Bauteilen der Leistungs- und Hochleistungselektronik eingesetzt werden kann (1). Auf den MMT 2011 wurde der Einsatz der Siedekühlung in Schaltschränken als industrielle Anwendung aufgezeigt (2) und auf den MMT 2013 wurde zum Siedesystem ein Berechnungsmodul als EXCEL-Version zur Auslegung von Bauteilkühlungen präsentiert (3). Auf den MMT 2019 soll eine kombinierte Siede-Wasserkühlung vorgestellt werden. Sie besteht aus einem Siedemodul, das die IGBT-Bauteilwärme durch Verdampfung aufnimmt und einem Plattenwärmeübertrager (kurz: PWÜ) zuführt, der durch Kondensation die Wärmeenergie an einen Wasserkreislauf überträgt. Im System zirkuliert das elektrisch hochisolierende Niederdruckkältemittel, SES36, das kontinuierlich im Naturumlauf die Phasenwechsel Verdampfung und Verflüssigung durchläuft.

Siedemodul und PWÜ sind kompakte Wärmetauscher, die raumsparend hohe Verlustwärmemengen übertragen können. Über ein spezielles Press-Verbundrohrsystem können durch den Einsatz der kombinierten Siede-Wasserkühlung notwendige Isolationstrecken für Mittel- und Hochspannungsbauteile realisiert werden, was neue Anwendungen in der High-Voltage- und EMV-Technik anbietet.

2. Die kombinierte Siede-Wasserkühlung

Die kombinierte Siede-Wasserkühlung ist ein Wärmeübertragungssystem, das nach dem Thermosyphon-Prinzip arbeitet. Durch intensives Sieden, bzw. Verdampfen, des elektrisch hochisolierenden Spezialfluids SES36 wird die Bauteilwärme in Dampf umgewandelt, der über eine Steigrohrleitung in einen wassergekühlten Plattenwärmeübertrager (PWÜ), hier in der Funktion des Kondensators, geleitet und dort wieder verflüssigt wird. SES36 ist ein Niederdruckkältemittel der Solkane-Reihe und besitzt bei Atmosphärendruck einen Siedepunkt bei $T = 36\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Im Siedemodul sorgen mikrostrukturierte Innenwände für extrem hohe Siederaten, sodass Verlustwärmemengen im kW-Bereich bei stabiler Betriebstemperatur am Bauteil abgeführt werden können. Die kombinierte Siede-Wasserkühlung arbeitet im Naturumlauf ohne Fluidpumpe. Der Dampf strömt selbständig über das Steigrohr in den Plattenkondensator, der oberhalb vom Siedemodul positioniert ist, somit kann das verflüssigte Kondensat unter Ausnutzung der Gravitation über einen Rückfluss in das Siedemodul zurückfließen. Auf diese Weise entsteht ein kontinuierlicher Kreislauf. Abb. 1 zeigt den Aufbau einer kombinierten Siede-Wasserkühlung.

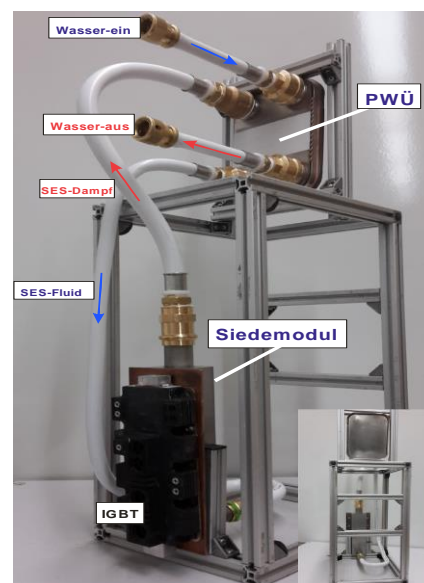


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau der kombinierten Siede-Wasserkühlung, bestehend aus einem Siedemodul, das die Bauteilwärme durch Verdampfung aufnimmt und einem Plattenwärmeübertrager (PWÜ), der die Bauteilwärme durch Kondensation an einen externen Wasserkreislauf überträgt.

3. Der Teststand

Zur Aufnahme von charakteristischen Kennlinien wurde ein Teststand eingerichtet, der aus folgenden Komponenten besteht: Siedemodul, montiert auf einer Heizplatte, PWÜ-Kondensator, Verbindungstechnik, Stelltransformator zur Ansteuerung der Heizplatte und Datenerfassung der Temperaturmessfühler. Die Grundplatte des Siedemoduls besteht aus Aluminium und besitzt die Abmaße $190 \times 140 \text{ mm}^2$. Sie wird auf eine Heizplatte, ebenfalls aus Aluminium, mit gleichen Kantenlängen montiert. Die Montage erfolgt über Verschraubungen der Grundplatte auf die Heizplatte, um einen ausreichenden Anpressdruck zu erzeugen. Die Kontaktflächen des Siedemoduls und der Heizplatte wurden vor der Montage mit Wärmepaste dünn eingestrichen. Die Heizplatte besitzt 6 Bohrungen für die Aufnahme der Heizstäbe, die Leistung pro Heizstab beträgt 800 W . Alle 6 Heizstäbe werden elektrisch parallel geschaltet und können über den Stelltrafo kontinuierlich geregelt werden. Der Dampfausgang des Siedemoduls ist über ein Steigrohr, $d_i = 16 \text{ mm}$, mit dem wassergekühlten Plattenkondensator verbunden, es handelt sich um einen PWÜ des Typs ZC4-20 (0.3 m^2) der Fa. TTZ. Innerhalb des PWÜ findet die Verflüssigung statt, das Kondensat wird unter Ausnutzung der Gravitation über eine Rohrverbindung, $d_i = 12 \text{ mm}$, in das Siedemodul zurückgeführt. Das gesamte System wird unter Atmosphärendruck, d.h. ohne Evakuierung, mit 700 ml SES36 befüllt. Die Frontseite des Siedemoduls besteht aus einer transparenten Abdeckung aus Polycarbonat, um den Siedeprozess optisch beobachten zu können. Temperaturfühler in Bohrungen der Heizplatte, der Grundplatte und Seitenwand des Siedemoduls, messen die Temperaturen T_H , T_S , T_{SES36} . Die Temperatur am Wassereintritt T_W wird über einen Temperaturfühler in der Schlauchzuführung aufgenommen.

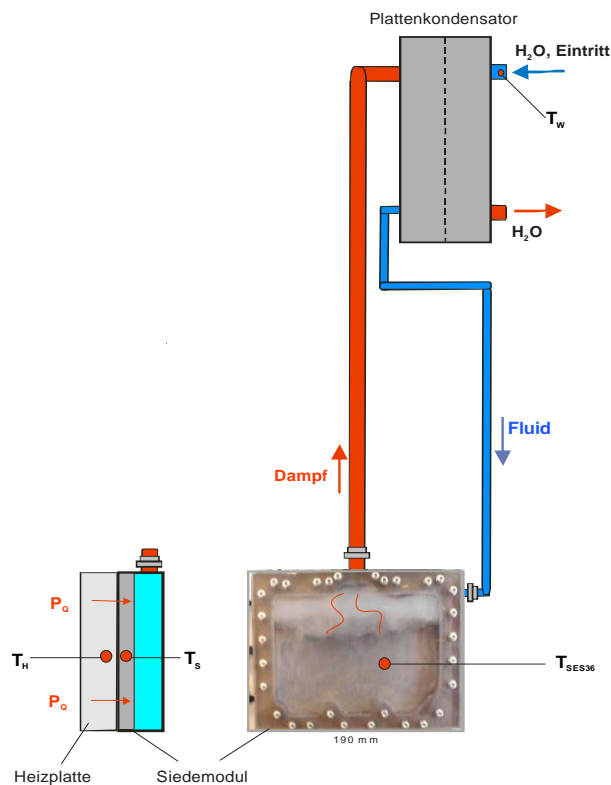


Abb. 2: Links ist der schematische Aufbau der kombinierten Siede-Wasserkühlung im Naturumlauf dargestellt. Eine Heizplatte, montiert auf das Siedemodul, erzeugt die Heizleistung entsprechend der Verlustwärme P_Q eines Bauteils. Der Siedeprozess kann durch ein Sichtfenster beobachtet werden. Während des Betriebs werden die Temperaturen der Heizplatte T_H , des Siedemoduls T_S , des Fluids SES36 T_{SES36} und die Wassereintrittstemperatur T_W aufgenommen, siehe rote Punkte. Das Bild rechts zeigt eine Fotografie des Teststandes.

4. Die Temperaturkennlinien

Es werden die aufgenommenen Temperaturkennlinien der kombinierten Siede-Wasserkühlung vorgestellt, folgende Größen sind gemessen worden:

P_Q [W]: Heizplattenleistung,
 T_H [°C]: Temperatur der Heizplatte,
 T_S [°C]: Temperatur des Siedemoduls,
 T_{SES36} [°C]: Temperatur des Kältemittels SES36,
 T_W [°C]: Wassereintrittstemperatur.

Daraus können die 3 relevanten Temperaturdifferenzen gebildet werden:

$\Delta T_{\text{Kontakt}}$ [K] = $T_H - T_S$: Temperaturdifferenz des Kontaktwiderstands zwischen Heizplatte und der Grundplatte des Siedemoduls,

ΔT_S [K] = $T_S - T_{SES36}$: treibende Temperaturdifferenz im Siedemodul am Übergang der Grundplatte zum SES36-Kältemittel,

ΔT_{Kond} [K] = $T_{SES36} - T_W$: treibende Temperaturdifferenz im Kondensator zwischen SES36 und der Wassereintrittstemperatur.

Die Grafik in Abb. 3 zeigt den Temperaturverlauf der Heizplatte T_H , des Siedemoduls T_S und des Kältemittels T_{SES36} in Abhängigkeit der Heizleistung P_Q , die auch die Verlustleistung eines Bauteils repräsentiert. Die Wassereintrittstemperatur ist konstant 20 °C. Weiterhin sind bei 3000 W die Temperaturdifferenzen $\Delta T_{\text{Kontakt}}$, ΔT_S [K] und ΔT_{Kond} eingetragen, auch Übertemperaturen genannt:

- $\Delta T_{\text{Kontakt}}$ [K] = $T_H - T_S = 94 \text{ K} - 79 \text{ K} = 15 \text{ K}$,
- ΔT_S [K] = $T_S - T_{SES36} = 79 \text{ K} - 64 \text{ K} = 15 \text{ K}$,
- ΔT_{Kond} [K] = $T_{SES36} - T_W = 64 \text{ K} - 20 \text{ K} = 44 \text{ K}$.

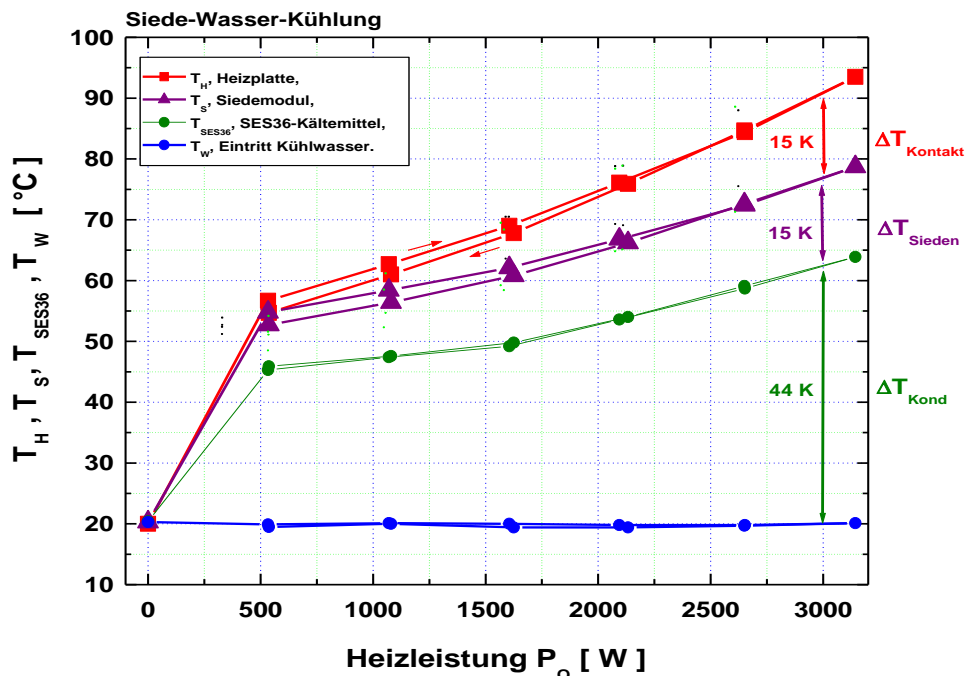


Abb. 3: Die Grafik zeigt die Temperaturen der Heizplatte T_H , des Siedemoduls T_S und des Kältemittels T_{SES36} aufgetragen über die Heizleistung von 0 bis 3200 W. Bei 3000 W sind die drei wichtigen Temperaturdifferenzen $\Delta T_{\text{kontakt}}$, ΔT_S und ΔT_{Kond} eingetragen, wobei der Übergang $\Delta T_{\text{Kond}} = 44 \text{ K}$ die größte treibende Differenz darstellt, da der Übergang 2 Prozesse einschließt: 1. Kondensation auf der Kältemittelseite und 2. Konvektion auf der Kühlwasserseite.

5. Die elektrische Isolation

Als Verbindungstechnik zwischen Siedemodul und Plattenkondensator werden Press-Verbundrohre eingesetzt. Es handelt sich um biegsame Rohre, deren Wandungen aus einem Mehrschichtsystem besteht, das sich aus einer Kunststoffinnenwand, einer Metallkernschicht und einer Kunststoffaußenwand zusammensetzt. Das ermöglicht den Aufbau einer elektrisch nicht leitenden Verbindung zwischen dem Siedemodul und dem Plattenkondensator. Das eingesetzte Kältemittel SES36 durchströmt die Verbundrohre und ist selbst elektrisch hochisolierend. Somit kann eine vollständige elektrische Isolation zwischen dem Hochspannungsbau teil IGBT, montiert auf dem Siedemodul, und dem Wasserdurchsatz am Plattenkondensator erzielt werden. Abb. 4 veranschaulicht schematisch die Isolationsstrecke durch das Schaltersymbol 'offen', das Ohmmeter im Foto misst einen unendlich hohen Widerstand ('1': overflow).

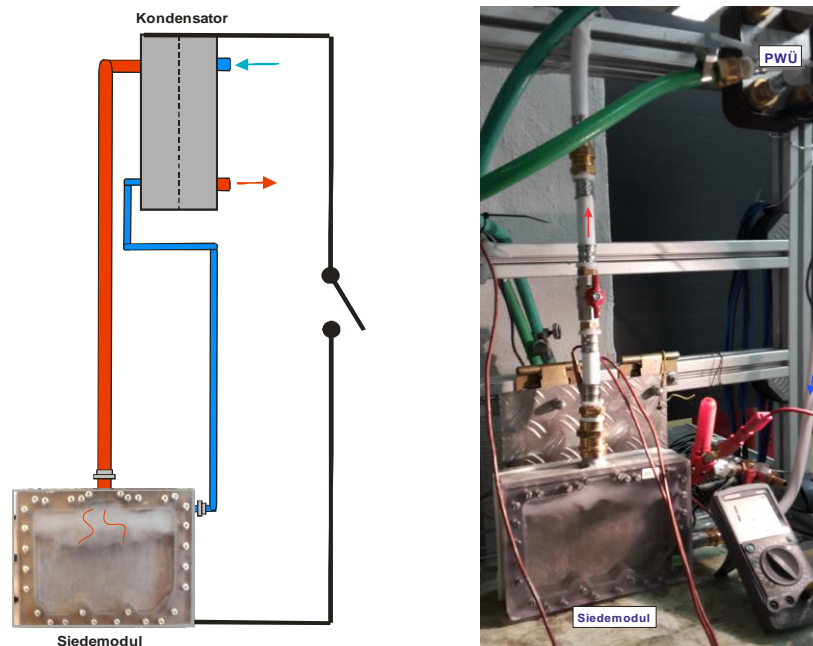


Abb. 4: Der Einsatz des hochisolierenden Kältemittels SES36 und der Press-Verbundrohre als Verbindungstechnik realisiert eine elektrische Isolationsstrecke zwischen dem Siedemodul und des Plattenkondensators. Die Anzeige des Ohmmeters '1' ('overflow') bedeutet: Widerstand $R = \infty$. Somit besteht für Bauteile der Mittel- und Hochspannungstechnik ein Sicherheitsabstand zur externen Wasserkühlung.

6. Zusammenfassung

Die kombinierte Siede-Wasserkühlung besteht aus einem Siedemodul und einem wassergekühltem Plattenkondensator (PWÜ) und kann hohe Verlustleistungen im kW-Bereich von IGBT-Bauteilen abführen. Der Einsatz des elektrisch hochisolierenden Kältemittels SES36 sowie die Verwendung von Press-Verbundrohren ermöglicht die Realisierung einer nicht leitenden Isolationsstrecke zwischen dem Bauteil am Siedemodul, z.B. IGBT, und der externen Wasserkühlungsstrecke am Plattenkondensator. Die kombinierte Siede-Wasserkühlung ist somit sehr geeignet für Anwendungen in der Mittel- und Hochspannungstechnik.

Referenz:

- (1) Siedekühlung mit integrierten Mikrostrukturen, A. Schulz, Magdeburger Maschinenbau-Tage 2009,
- (2) Neuartige Siedekühlung und ihre industriellen Anwendungen, A. Schulz, MMT 2011,
- (3) Neues Berechnungsmodell zur Auslegung des Siedekühlungssystems für die Leistungselektronik, A.Schulz, MMT 2013.