



Neues Berechnungsmodul zur Auslegung des Siedekühlungssystems für die Leistungselektronik

Strukturtechnik UG, Neuer Weg 22-23, D-06484 Quedlinburg,
cool tec Electronic GmbH, Ilmenauer Str. 4, D-98701 Großbreitenbach,
Author: Andreas Schulz, schulz@strukturtechnik.de, Tel.: 03946 6895980.

1. Einleitung

Auf dem Elektromechanik (EM) - Kongress 2012 wurde eine neuartige Siedekühlung und ihre industrielle Anwendungen vorgestellt, die zur effektiven Kühlung, bzw. zur Entwärmung, von Bauteilen der Leistungs- und Hochleistungselektronik eingesetzt werden kann (1). Im System zirkuliert ein elektrisch hoch isolierendes Niederdruckkältemittel, das durch intensives Sieden an Mikrostrukturoberflächen die Verlustwärme des Bauteils effizient aufnimmt und diese über einen Kondensator an die Umgebungsluft abgibt.

Als industrielle Anwendung wurde unter anderem die Entwärmung von Schaltschranksystemen präsentiert. Durch Einsatz der Siedekühlung können hohe Mengen an Bauteilwärme aus Schaltschränken herausgeführt werden. Somit kann das Schaltschranksystem hermetisch verschlossen und abdichtet werden, was die Realisierung hoher IP-Schutzgrade ermöglicht.

Auf dem EM-Kongress 2013 soll zum Siedekühlungssystem ein neues Berechnungsmodell vorgestellt werden, mit dessen Hilfe spezifische Problemlösungen zur Bauteilentwärmung bearbeitet werden können. Oftmals ist die Verlustleistung und die Flächenbelegung eines oder mehrerer Leistungsbauteile vorgegeben. Um das Siedekühlungssystem optimal auslegen zu können, werden mit dem Berechnungsmodell bei vorgegebenen Eingabegrößen die sich einstellenden Temperaturen am Bauteil, Siedemodul und des Fluids ermittelt. In das Berechnungsmodell gehen unter anderem auch gemessene Kennlinien zum Siede- und Kondensationsprozess ein, mit deren Hilfe die zugehörigen Übertemperaturen berechnet werden.

2. Die Siedekühlung

Die Siedekühlung ist ein Entwärmungssystem, das nach dem Thermosyphon-Prinzip arbeitet. Durch intensives Sieden, bzw. Verdampfen, des elektrisch, hoch isolierenden Spezialfluids SES36 wird die Bauteilwärme in Dampf umgewandelt und so aus Gerät und Schaltschrank herausgeführt.

SES36 (Solkatherm) ist ein Produkt des Solvay-Konzerns und gehört der Solkane-Reihe an. Es handelt sich um ein Niederdruckkältemittel dessen Siedepunkt $T = 35.6 \text{ °C}$ bei Atmosphärendruck ist.

In einem, optional für Luft- oder Wasserkühlung auslegbaren, Kondensator wird der Dampf verflüssigt, anschließend strömt das Kondensat über einen Rücklauf in die Kühlplatte zurück, die weiterhin als Siedemodul bezeichnet wird. Im Siedemodul sorgen mikrostrukturierte Innenwände für extrem hohe Siederaten, sodass Verlustwärmemengen im kW-Bereich bei stabiler Betriebstemperatur am Bauteil abgeführt werden können. Es können für die Siedekühlung zwei unterschiedliche Betriebsarten genannt werden:

1. Naturumlauf ohne Fluidpumpe,
2. Zwangsumlauf mit Pumpe.

Es soll hier der Naturumlauf näher vorgestellt werden. Der Kondensator wird oberhalb vom Siedemodul positioniert, damit das Kondensat unter Ausnutzung der Gravitation in das Siedemodul zurückfließen kann. Die Verflüssigung des Dampfes findet in einem luftgekühlten Kondensator mit aufmontierten Lüfter statt. Der Dampf wird über eine Rohrverbindung vom Siedemodul in den Kondensator geführt, wobei das verflüssigte Kondensat über eine zweite Rohrverbindung in das Siedemodul zurückfließen kann, auf diese Weise entsteht ein kontinuierlicher Kreislauf. Abb. 1 zeigt schematisch den Aufbau eines Naturumlaufs.

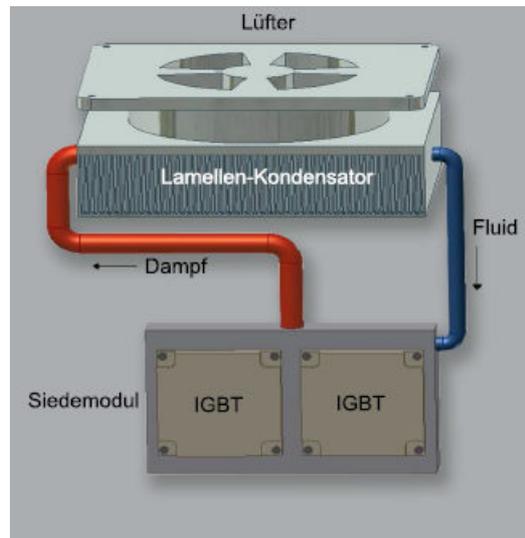


Abb. 1: Schematische Darstellung der Siedekühlung im Naturumlauf, im Siedemodul wird die Verlustwärme, z.B. von IGBT-Bauteilen, in Dampf umgewandelt. Der Dampf strömt in den Kondensator und wird dort verflüssigt, das Kondensat fließt auf Grund seiner Schwerkraft in das Siedemodul zurück.

3. Der Teststand

Um das Siedesystem berechnen und somit für Anwendungen auslegen zu können, müssen zunächst charakteristische Kennlinien aufgenommen werden. Dazu wurde ein Teststand eingerichtet, der aus folgenden Komponenten besteht:

Siedemodul, montiert auf einer Heizplatte, Kondensator, Verbindungstechnik, wie Rohre und Schläuche, Transformator zur Ansteuerung der Heizplatte, Sensorik zur Temperatur- und Dampfdruckmessung.

Das Siedemodul besitzt die Abmaße $190 \times 140 \text{ mm}^2$ und wird auf eine Heizplatte mit gleichen Kantenlängen montiert. Das Siedemodul wird über Verschraubungen auf die Heizplatte befestigt, um einen ausreichenden Anpressdruck zu erzeugen. Die Kontaktflächen des Siedemoduls und der Heizplatte wurden vor der Montage mit Wärmepaste 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.

Das Siedemodul ist über einen Dampfaustritt ($d: 22 \text{ mm}$) mit einem luftgekühlten Kondensator verbunden, hergestellt von der Fa. WÄTAS. Er besteht aus einem Rohregister mit 24 Cu-Kernrohren und einem Sammelrohr ($d: 22 \text{ mm}$) für den Dampfeintritt und einem zweiten Sammelrohr ($d: 16 \text{ mm}$) für den Flüssigkeitsaustritt. Die Kernrohre sind mit Aluminium-Lamellen bestückt, um dem Luftdurchsatz eine große Oberfläche (hier: $A_{\text{Lamellen}} = 4.3 \text{ m}^2$) zur Wärmeübertragung anzubieten. Innerhalb des Rohregisters findet die Verflüssigung statt, das Kondensat wird unter Ausnutzung der Gravitation über eine Schlauchverbindung in das Siedemodul zurückgeführt.

Das gesamte System wird mit einer Vakuumpumpe evakuiert und anschließend mit 800 ml SES36 befüllt. Die Frontseite des Siedemoduls besteht aus einer transparenten Abdeckung aus Polycarbonat, um den Siedeprozess optisch beobachten zu können.

Sensoren der Fa. Ahlborn messen die Temperaturen der Heizplatte, der Grundplatte des Siedemoduls, des Fluids SES36 und die Raumtemperatur. Abb. 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Siedeteststandes.

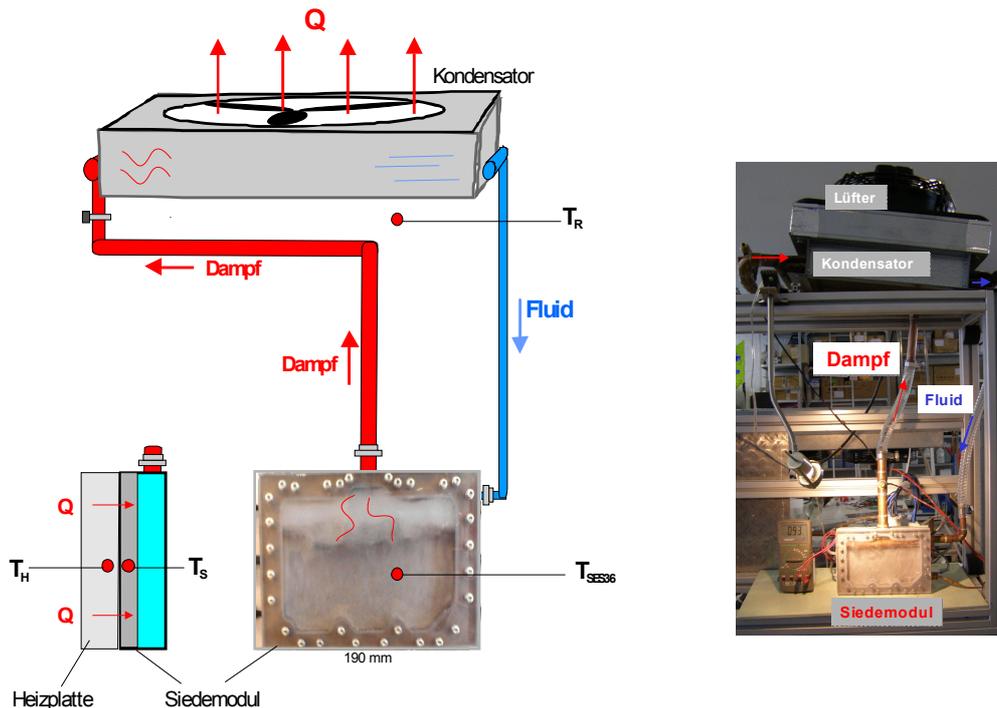


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau der Siedekühlung im Naturumlauf. Eine Heizplatte, montiert auf das Siedemodul, simuliert die Verlustwärme des Bauteils. Der Siedeprozess kann durch ein Sichtfenster beobachtet werden. Während des Betriebs werden die Temperaturen der Heizplatte T_H , des Siedemoduls T_S , des Fluids SES36 T_{SES36} und die Raumtemperatur T_R aufgenommen, siehe rote Punkte. Das Bild rechts zeigt eine Fotografie des Teststandes.

4. Die Übertemperaturen

In die Herleitung des Berechnungsmoduls zur Auslegung des Siedekühlsystems geht die charakteristische Übertemperatur ein, in der Literatur auch *treibende Temperaturdifferenz* genannt. Die Größe ist über das so genannte „ohmsche Gesetz des Wärmedurchgangs“ definiert:

$$Q = k A \Delta T, \quad (1)$$

wobei Q [W] die übertragende Wärmemenge, k [W/m²K] der Wärmedurchgangskoeffizient, A [m²] die Wärmeübertragungsfläche und ΔT [K] die Übertemperatur sind.

Im Siedesystem treten zwei charakteristische Übertemperaturen auf:

1. ΔT_S [K] = $T_S - T_{SES36}$, Übertemperatur beim Siedeprozess,
2. ΔT_K [K] = $T_{SES36} - T_R$, Übertemperatur beim Kondensationsprozess,

wobei T_S [°C] die Temperatur der Grundplatte des Siedemoduls, T_{SES36} [°C] die Temperatur des SES36 und T_R [°C] die Raumtemperatur sind.

Die Übertemperatur beim Sieden wird stark von der Oberflächenstrukturierung der Grundplatte beeinflusst, die Übertemperatur bei der Kondensation hängt von den Eigenschaften der Dampfströmung und somit von der Kondensatorgeometrie ab. Darüber hinaus hängen beide Übertemperaturen von den Stoffwerten des eingesetzten Wärmeübertragungsfluids ab und sollten daher messtechnisch ermittelt werden.

Während der Messung wurde über den Stelltrafo die Heizleistung schrittweise von 0 auf 3000 W gefahren. Nach jeder Zunahme der Heizleistung wurde abgewartet, bis sich das thermodynamische Gleichgewicht eingestellt hat, danach wurden die entsprechenden Temperaturen, siehe Abb. 2, aufgenommen. Aus den Messwerten können die Übertemperaturen berechnet werden. Abb. 3 zeigt die beiden charakteristischen Kennlinien.

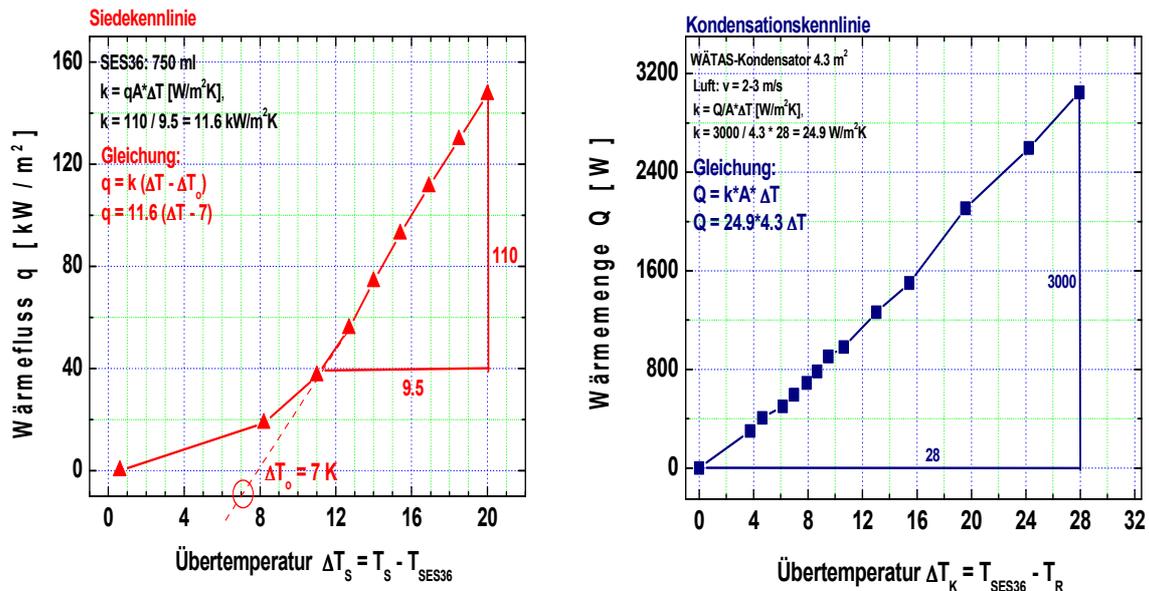


Abb. 3: Links: Die Grafik zeigt den Wärmefluss in Abhängigkeit von der Übertemperatur im Fall des Siedeprozesses. Rechts ist die gesamte Wärmemenge über die Übertemperatur des Kondensationsprozesses aufgetragen. Die lineare Luftgeschwindigkeit beträgt 2.5 m/s, der Luftdurchsatz 800 m³/h.

Zur mathematischen Beschreibung der Kennlinien aus Abb. 3 wird die Formel (1) um den Parameter ΔT_o erweitert:

$$Q = k A (\Delta T_s - \Delta T_o) \quad (2)$$

Dann gilt:

- Siedekennlinie: $q = Q/A = k (\Delta T_s - \Delta T_o)$
 $= 11.6 (\Delta T_s - 7)$,
 mit $k = 11.6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Delta T_o = 7 \text{ K}$, $A_{\text{Modul}} = 0.027 \text{ m}^2$,
- Kondensation: $Q = k A (\Delta T_s - \Delta T_o)$
 $= 24.9 \cdot 4.3 \Delta T_k$,
 mit $k = 24.9 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Delta T_o = 0 \text{ K}$, $A_{\text{Lamellen}} = 4.3 \text{ m}^2$.

5. Das Berechnungsmodul

Das Berechnungsmodul verwendet folgende Eingabegrößen:

Siedemodul:

Verlustleistung Q_i [W], ist die Wärmeverlustleistung z.B. eines IGBT-Moduls, Wärmeübertragungsfläche pro Modul A_{Modul} [m²], Anzahl der Module i , Stärke der Grundplatte s [mm].

k-Wert Sieden k_S [W/m²K], ΔT_0 [K] siehe Siedekennlinie in Abb. 3.

Kondensator:

Lamellenvolumen $T \times B \times H$ [m³], d.h. Tiefe [mm], Höhe [mm], Breite [mm],

Lamellenstärke L_s [mm], Lamellenabstand L_a [mm],

Luft Eintritt T_e [°C], Volumenstrom Vol [m³/h], Wärmekapazität c [kJ/kgK], Dichte ρ [kg/m³].

k-Wert Kond. k_K [W/m²K] bei Luftgeschwindigkeit c [m/s], siehe Kondensationskennlinie aus Abb. 3.

Kontaktwiderstand, Wärmeleitfähigkeit λ_{Al} [W/Km], k-Wert k_{Kontakt} [W/m²K], r : Wärmespreizungsfaktor.

Zur Berechnung der Ausgabegrößen werden folgende Formeln verwendet:

Gesamte Wärmeübertragungsfläche A_{ges} [m²] = $A_{\text{Modul}} * i$,

Gesamte Verlustwärme Q_{ges} [W] = $Q_{\text{Modul}} * i$,

Wärmestromdichte q [kW/m²] = $Q_{\text{ges}}/A_{\text{ges}}$.

Querschnittsfläche Luft eintritt A_{Luft} [m²] = $B * H$,

Reduzierung der Fläche durch Lamellenquerschnitt $A_R = B * H/(L_a + L_s) * L_s$,

Effektive Querschnittsfläche: A_{eff} [m²] = $A_{\text{Luft}} - A_R$.

Gesamtlamellenfläche A_{Lamellen} [m²] = $T * B * H/(L_a + L_s) * 2$.

Luftaustritt T_a [°C] = $T_e + Q_{\text{ges}}/(Vol * c * \rho)$,

Lineare Luftgeschwindigkeit v_{Luft} [m/s] = Vol/A_{eff} ,

Anstiegswinkel $s = k_{K\text{-Messung}} / v_{\text{Messung}}$,

k-Wert Kondensator $k_K = s * v$.

Differenzdruck ΔP [Pa] = $wa * T * 0.5 * \rho * v^2$, $wa = 0.26$ (wa : Wätas-Faktor).

Übertemperatur Kondensation ΔT_K [K] = $T_{\text{SES36}} - T_R$,

Thermischer Widerstand Kondensator $R_{\text{th-K}}$ [K/W] = $\Delta T_K/Q_{\text{ges}}$,

Temperatur Kältemittel T_{SES36} [°C] = $T_R + \Delta T_K$.

Übertemperatur Sieden ΔT_s [K] = $T_s - T_{\text{SES36}}$,

Thermischer Widerstand Siedemodul $R_{\text{th-S}}$ [K/W] = $\Delta T_s/Q_{\text{ges}}$.

Temperaturdifferenz durch die Grundplatte ΔT_W [K] = $Q * s / (\lambda_{Al} * A_{\text{ges}}) * r$,

Temperatur Oberfläche des Siedemoduls $T_s = T_R + \Delta T_K + \Delta T_s + \Delta T_W$,

Temperaturdifferenz Kontaktfläche ΔT_K [K] = $Q_{\text{ges}} * k_{\text{Kontakt}} * A_{\text{ges}}$,

Temperatur an der Heizplatte/Modul T_{Modul} [°C] := $T_H = T_R + \Delta T_K + \Delta T_s + \Delta T_{\text{Kontakt}}$.

6. Anwendungsbeispiel

Die Verlustwärme von zwei IGBT-Modulen soll über das Siedesystem mit einem Kondensator auf dem Schaltschrankdach in die Umgebung abgeführt werden.

Die Verlustwärme per IGBT beträgt maximal 1000 W, die Außentemperatur kann bis 35 °C ansteigen, der Kondensator sollte sein Bauvolumen von 3.2 l (8 x 20 x 20 cm³) nicht überschreiten.

Das Berechnungsmodul aus Kap. 5 ermittelt, welche Temperaturen am IGBT-Modul zu erwarten sind:

Eingabegrößen		Ausgabegrößen	
<u>Siedemodul</u>		<u>Nebenwerte</u>	
Verlustleistung Q_i [W]	1000	Ges. Wärmeübertragungsfläche A_{ges} [m ²]	0.029
Wärmeübertragungsfläche A_{Modul} [m ²]	0.0145	Gesamte Verlustwärme Q_{ges} [W]	2000
Anzahl der Module i	2	Wärmestromdichte q [kW/m ²]	69
Stärke der Grundplatte s [mm]	5	Querschnittsfläche Lufteintritt A_{Luft} [m ²]	0.04
k-Wert k_s [W/m ² K]	12	Gesamtlamellenfläche $A_{Lamellen}$ [m ²]	3
Nullwatt-Übertemperatur ΔT_0 [K]	7	Luftaustritt T_a [°C]	50
<u>Kondensator</u>		Lineare Luftgeschwindigkeit v_{Luft} [m/s]	2.8
Lamellenvolumen $T \times B \times H$ [m ³]		k-Wert Kondensator	27.9
Tiefe [mm]	80	Differenzdruck ΔP [Pa]	98
Höhe [mm]	200	Übertemperatur Kondensation ΔT_K [K]	24
Breite [mm]	200	Thermischer Widerstand R_{th-K} [K/W]	0.012
Lamellenstärke [mm]	0.2	Temperatur SES36 T_{SES36} [°C]	59
Lamellenabstand [mm]	2	Übertemperatur Sieden ΔT_S [K]	13
Luft Eintritt T_e [°C]	35	Thermischer Widerstand R_{th-S} [K/W]	0.0045
Volumenstrom [m ³ /h]	400	<u>Hauptwerte</u>	
Wärmekapazität c [kJ/kgK]	1	Temp.differenz Grundplatte ΔT_W [K]	1.6
Dichte ρ [kg/m ³]	1.2	Temperatur Oberfl. Siedemoduls T_o [°C]	69.6
k-Wert k_k [W/m ² K]	25	Temp.differenz Kontaktfläche $\Delta T_{Kontakt}$ [K]	9.9
bei Luftgeschwindigkeit c [m/s]	2.5	Temperatur am Modul T_{Modul} [°C]	79.4
<u>Kontaktwiderstand/ Material</u>			
Wärmeleitfähigkeit λ_{Al} [W/Km]	150		
k-Wert $k_{Kontakt}$ [W/m ² K]	7000		
r Wärmespreizungsfaktor	0.7		

7. Zusammenfassung

Es wurde zum Siedesystem ein Berechnungsmodul vorgestellt, mit dessen Hilfe praktische Anwendungsfälle bearbeitet werden können. Neben den Stoffwerten verwenden die Formeln auch gemessene Größen, um die zu erwartenden Temperaturen am Bauteil zu ermitteln. Das Berechnungsmodul liegt als EXCEL-Datei vor und kann kontinuierlich weiterentwickelt werden.

Referenz:

- (1) Neuartige Siedekühlung und die industrielle Anwendung als Schaltschrankentwärmung, A. Schulz, Fullpaper Elektromechnik-Kongress 2012.