

Stationäre thermodynamische Eigenschaften von Kühldosen

J. Schwarz *)

Die thermodynamischen Eigenschaften von Kühldosen für zweiseitig gekühlte Halbleiterbauelemente bei unsymmetrischer Wärmestromeinspeisung wurden bisher noch nicht untersucht. Es wird eine Meßeinrichtung zur Bestimmung der stationären Eigenschaften angegeben. Aus den durchgeführten Messungen ergibt sich, daß das stationäre Verhalten der wasserdurchflossenen Kühldosen mit einer einfachen linearen Matrixgleichung beschreibbar ist. Ein passives thermisches Ersatzschaltbild ist nicht aufstellbar. Die Abhängigkeit der mit der Gaußschen Methode der kleinsten Quadrate identifizierten Parameter vom Kühlmittel-Volumenstrom wird grafisch von den anderen signifikanten Parametern Kühlmittel-Zuflußtemperatur, umgesetzte Verlustleistung und Kühlmittelrichtung qualitativ gezeigt.

The thermodynamic properties of heat-sinks for bothsides cooled semiconductor components at unsymmetrical heat-flow-feeding have not been explored yet. It will be given a measuring equipment to determine the steady state properties. The measurings having been carried out have shown that the steady state behaviour of water cooled heat-sinks can be described by a linear matrix equation. However, a passive thermal circuit model can not be propounded. The dependence on the parameters of volume flow of the coolant, identified by the Gaussian method of least squares, are shown graphically; the dependence on the other significant parameters as intake temperature of the coolant, converted power losses and coolant direction are shown qualitatively.

1 Einleitung

Es ist Stand der Technik, Thyristorhochleistungsventile in Innenraumtechnik mit Flüssigkeitskühlung durch entionisiertes Wasser auszuführen. Dabei werden Stapel von Thyristoren in Scheibenzellenbauweise und Kühldosen, eingebettet in einen mechanischen Spannverband, gebildet [1]. Diese Säulen finden Anwendung in der HGÜ-Technik (HGÜ Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung), aber auch in Mittelspannungsanlagen zur Blindleistungskompensation [2], zur Stromversorgung in der chemischen Industrie und als Stellglied für elektrische Antriebe größter Leistung.

Bei bisher vorliegenden Betrachtungen über das Verhalten der Kühldosen [3] wurde der Einfluß von Unsymmetrien nicht berücksichtigt. Dies ist aber erforderlich und soll in dieser Arbeit behandelt werden.

2 Aufbau der Kühldosen

Die zwischen den Thyristoren angeordneten Kühldosen werden zur Wärmeabfuhr von Wasser durchflossen. Durch die Verwendung dieses Kühlmittels können die Kühldosen sehr klein gestaltet werden. Wasser hat die größte spezifische

Wärmekapazität und gewährleistet einen sehr großen Wärmeübergangskoeffizienten. Da der Wasserkreislauf dieselben Potentialdifferenzen wie das Ventil selbst zu tragen hat, muß die Leitfähigkeit des Kühlwassers durch hochgradige Entionisierung herabgesetzt werden.

Insgesamt wird der mit dem Wasser in Berührung kommende Werkstoff stark belastet. Zum einen können Leckströme eine elektrolytische Abtragung bewirken. Durch zweckmäßig angeordnete Schutz- und Steuerelektroden wird diese Erscheinung minimiert. Zum anderen wird das Material infolge der Kühlmittelgeschwindigkeit durch Kavitation beansprucht, auch Korrosionserscheinungen müssen sicher verhindert werden. Aus diesen Gründen darf das Wasser außer mit den Polyamid-Verteilungsrohren nur mit Edelstahl in Berührung gebracht werden.

Eine Möglichkeit zur konstruktiven Gestaltung der Kühlelemente besteht darin, eine Edelstahlschraube in einen Aluminiumkörper einzugießen (Bild 1). Der Kühlmitteldruckfall ist – bezogen auf die wirksame Rohrlänge und den Durchmesser des Kühlkanals – relativ klein, da das Kühlmittel beim Durchströmen der Kühldose keine großen Umlenkungen erfährt. Durch die gute Wärmeleitfähigkeit von Aluminium entstehen größere Temperaturfälle nur in der dünnwandigen Edelstahlschraube und in der laminaren Grenzschicht des Wärmeübergangs Rohrwand/Wasser. Das technologisch aufwendige Herstellungsverfahren muß durch geeignete Maßnahmen eine präzise Lage der Schraube in dem Gußstück und einen innigen, gut wärmeleitenden Übergang von Aluminium zum Edelstahl gewährleisten.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß das Kühlwasser vom Zufluß der Kühldose auf einer Seite von außen nach innen und dann auf die andere Seite fließt, um dort wieder von innen nach außen zu gelangen.

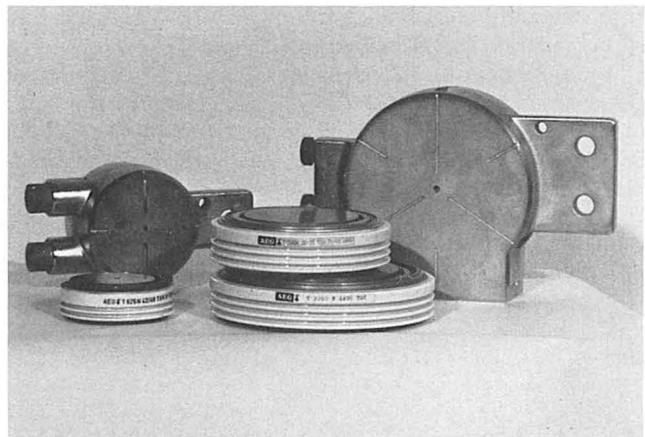


Bild 1. Kühldosen für Thyristoren mit 56 mm, 75 mm und mit 100 mm Kristalldurchmesser zur Kühlung mit entionisiertem Reinwasser (Foto: AEG)

*) Dipl.-Ing. Jürgen Schwarz, VDE, ist Mitarbeiter im Geschäftsbereich Komponenten, Fachbereich Leistungselektronik und Anlagenbau, der AEG Aktiengesellschaft, Berlin. Manuskripteingang: 12. 12. 1985

3 Verhalten der Kühlelemente

Werden die beiden Seiten eines Halbleiterbauelements in Scheibenzellenbauweise unabhängig gekühlt, d. h. beeinflusst ein Wärmestrom zur Anodenseite hin die Verhältnisse auf der Katodenseite nur über die Sperrschicht, dann genügt zur eindeutigen Beschreibung der Kühleinrichtung die Angabe eines Wärmewiderstands $R_{thGA} = f(\dot{M}, T_A, P_G)$. Dieser Wärmewiderstand ist im allgemeinen eine Funktion des Kühlmittel-Massenstroms \dot{M} , der Kühlmittel-Eintrittstemperatur T_A und der zugeführten Verlustleistung P_G . Außerdem ist dieser Wärmewiderstand vom Aufbau, vor allem vom dazugehörigen Halbleiterbauelement und auch von der anliegenden Seite des Halbleiterbauelements abhängig. Ist die Unabhängigkeit der Kühlung aber nicht gewährleistet, so müssen weitergehende Betrachtungen angestellt werden.

3.1 Verhalten des Kühlmittelkreislaufs

Der in das Kühlelement einströmende Kühlmittel-Massenstrom errechnet sich mit der Gleichung

$$\dot{M} = (\rho \dot{V})_{T_A} \quad (1)$$

Aus dem Massenerhaltungssatz ergibt sich, daß dieser Massenstrom im stationären Zustand für Ein- und Ausfluß gleich ist. Dies trifft für den Volumenstrom \dot{V} nicht zu, da die Druck- und die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Ausfluß eine Dichteveränderung des Kühlmittels bewirkt. Zwar ist die Dichteveränderung bei Wasser nicht groß (ca. 1,5 % bei einer Temperaturänderung von 20 °C auf 60 °C), aber dennoch ist die Verwendung des Massenstroms als Bezugsgröße befriedigender, weil auch theoretisch exakte Ergebnisse entstehen. Diese sind dann auch auf andere Kühlmittel (z. B. Luft) übertragbar.

Der 1. Hauptsatz der Wärmelehre, formuliert für offene Systeme, lautet [4]

$$\{(h_B + 0,5 w_B^2) - (h_A + 0,5 w_A^2)\} \dot{M} = \dot{Q} + L, \quad (2)$$

mit der Geschwindigkeit w , der zugeführten Wärme \dot{Q} und der Leistung von Volumen- und Oberflächenkräften L . Nun ist die Gesamtleistung L hier null und Zahlenwerte für die Enthalpie h_A beim Eintritt und h_B beim Austritt aus dem Kühlelement kann man entsprechende Tafeln (z. B. [5]) entnehmen. Das Zahlenbeispiel in Tabelle 1 soll die hier vorliegenden Verhältnisse verdeutlichen.

Dem Beispiel ist zu entnehmen, daß die Differenz der Geschwindigkeitsquadrate hier zu vernachlässigen ist. Da die Arbeit mit den umfangreichen Tafeln nicht sehr praktisch ist, weil viel interpoliert werden muß, kann man die Differenz $h_B - h_A$ näherungsweise durch eine Integration über c_p berechnen. Dabei handelt es sich um eine Näherung – wenn auch mit sehr großer Genauigkeit – weil der betrachtete Prozeß nicht isobar ist. Zusammenfassend ergibt sich

$$\dot{Q} = \dot{M} \int_{T_A}^{T_B} c_p(T) dT, \quad (3)$$

wobei die c_p -Werte bei einem mittleren Druck verwendet werden. Mit den Zahlenwerten des obigen Beispiels ergibt sich ein Wert von $\dot{Q} = 1722$ W. Berücksichtigt man die Genauigkeit der Temperaturmessungen mit Meßunsicher-

Gegeben

Kühlmittel: Wasser, $\dot{V}_A = 150,0$ l/h = $41,666 \cdot 10^{-6}$ m³/s
Rohr mit 4,5 mm Innendurchmesser, d. h. $A = 15,904$ mm²
 $\vartheta_A = 50$ °C; $p_A = 0,3$ MPa
 $\vartheta_B = 60$ °C; $p_B = 0,15$ MPa

Gesucht

\dot{M} , \dot{V}_B , w_A , w_B , \dot{Q}

Lösung

Aus Tafel [5]: $v_A = 0,0010120$ m³/kg
 $h_A = 209,5$ kJ/kg
 $v_B = 0,0010171$ m³/kg
 $h_B = 251,2$ kJ/kg

$\dot{M} = \rho \dot{V} = \dot{V}_A/v_A = 0,04117$ kg/s
 $\dot{V}_B = v_B \dot{M} = 41,877 \cdot 10^{-6}$ m³/s = 150,8 l/h
 $w_A = \dot{V}_A/A = 2,620$ m/s
 $w_B = \dot{V}_B/A = 2,633$ m/s
 $\dot{Q} = \dot{M} \{(h_B - h_A) + 0,5(w_B^2 - w_A^2)\}$
 $= 0,04117$ kg/s $\{41700$ J/kg + $0,0347$ m²/s² $\}$
 $\dot{Q} = 1717$ W

Tabelle 1. Verhältnisse im Kühlkreislauf (Zahlenbeispiel)

heiten, die über 0,2 K liegen, dann erfüllt Gl. (3) die Anforderungen mit ausreichender Genauigkeit.

Zum Abschluß dieses Abschnitts wird ein „formaler thermischer Widerstand des Kühlmittels“ mit

$$R_W = 1/(\dot{M} \bar{c}_p) \quad (4)$$

definiert. Dabei ist \bar{c}_p der arithmetische Mittelwert der spezifischen Wärmekapazität c_p des Kühlmittels über dem betrachteten Temperaturbereich:

$$\bar{c}_p = [1/(T_B - T_A)] \int_{T_A}^{T_B} c_p(T) dT. \quad (5)$$

Dieser thermische Widerstand R_W wird hier eingeführt, weil man eine Größe benötigt, die, mit \dot{Q} multipliziert, die Temperaturdifferenz zwischen ein- und austretendem Kühlmittel liefert.

3.2 Verhalten der Kühldosen bei unsymmetrischer Speisung

Zur Untersuchung des Verhaltens der Kühldosen bei unsymmetrischer Speisung wurde eine Meßeinrichtung (Bild 2) erstellt. Die Halbleiterbauelemente werden aus zwei getrennten Stromversorgungsgeräten gespeist, so daß sich beliebige Leistungsverhältnisse einstellen lassen. Zur Auswertung müssen sowohl die Temperaturen an den Übergängen Halbleiterbauelement/Kühldose sowie der Volumenstrom \dot{V} als auch die Temperaturen am Eintritt T_A und dem Austritt T_B des Kühlmittels bestimmt werden. Außerdem sind die elektrischen Leistungen in den Halbleiterbauelementen $P_{J(A)}$ und $P_{J(K)}$ zu messen. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, die Temperaturen des Gehäuses des Halbleiterbauelements $T_{C(A)}$ und $T_{C(K)}$ zur weiteren Verarbeitung zu verwenden.

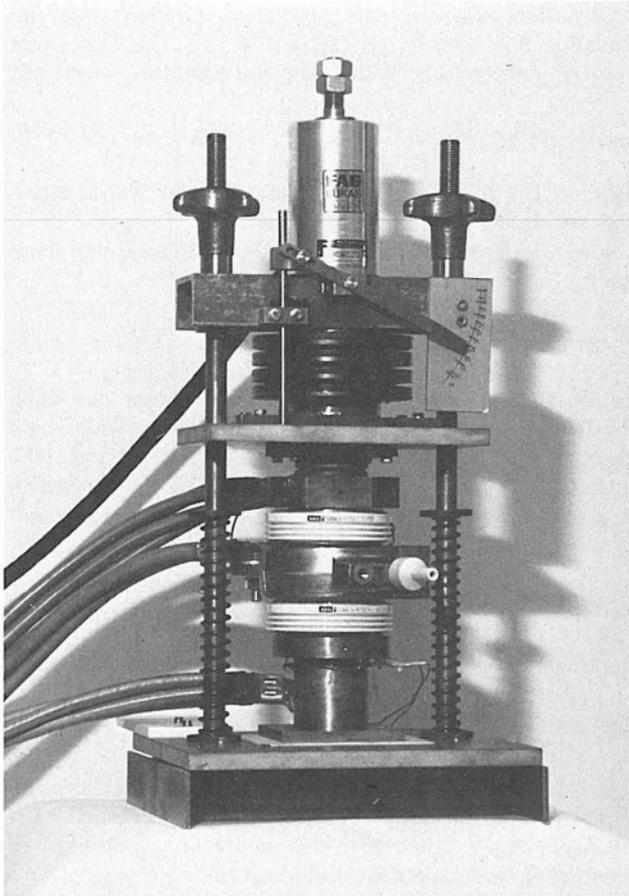


Bild 2. Meßaufbau zur Ermittlung des stationären Verhaltens der Kühl-dosen bei unsymmetrischer Speisung (Foto: AEG)

Einerseits sind dort die Temperaturgradienten kleiner als an der Oberfläche der Kühl-dose, und andererseits werden bei dieser Art der Messung die Eigenschaften der Oberflächenbearbeitung der Kühl-dose in Form der Übergangswiderstände R_{thCH} in das Ergebnis einbezogen. Dadurch geht der vom Halbleiterhersteller relativ pauschal angegebene Übergangswiderstand nicht in die folgende Rechnung ein. Ein weiterer sich aus der Wahl der Meßpunkte ergebender Vorteil ist darin zu sehen, daß der Zeitaufwand zur Durchführung der Messungen an mehreren Kühl-dosen kleiner bleibt.

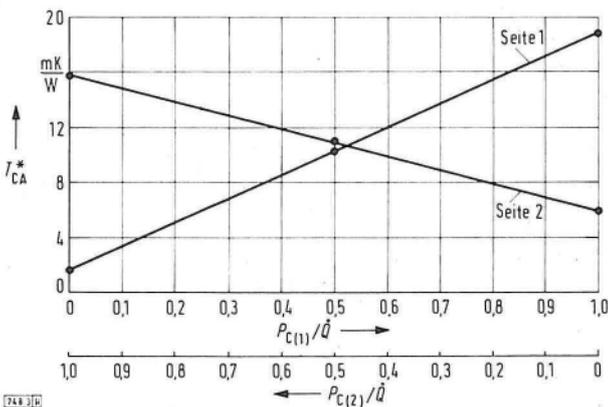


Bild 3. Darstellung eines Arbeitspunkts mit der Kühl-mittelrichtung 1 → 2; Meßbedingungen: $\dot{V} = 150$ l/h; $\vartheta_A = 20^\circ\text{C}$; $\dot{Q} = 2000$ W; Katode – Seite 1, Anode – Seite 2

Man kann das System mit zwei Thyristoren und einer Kühl-dose auf vier verschiedene Arten betreiben. Einmal kann die Kühl-dose gedreht werden (Seite 1 – Katode, Seite 1 – Anode), zum anderen können die Kühl-mittelrichtungen vertauscht werden (von Seite 1 zu Seite 2 bzw. von Seite 2 zu Seite 1).

Mehrere Messungen haben ergeben, daß eine Kühl-dosen-drehung keine signifikanten Änderungen des Wärmewiderstands bewirkt; die Kühl-dose ist schließlich streng symmetrisch aufgebaut. Sich dennoch ergebende Differenzen gehen in den übrigen Meßtoleranzen unter.

Die Messungen werden im folgenden so durchgeführt, daß zur Bestimmung der Eigenschaften eines Meßpunkts die gesamte umgesetzte Leistung \dot{Q} und die Kühl-mittelinlauf-temperatur T_A in etwa konstant bleiben. Ein Teil der Wärme – vor allem bei Messungen mit höheren Kühl-mittel-temperaturen – wird durch Konvektion und Strahlung an die Umgebung abgeführt. Deshalb ist \dot{Q} nicht identisch mit der Summe der elektrischen Leistungen, sondern \dot{Q} muß mit der Gleichung für die kalorimetrisch abgeführte Wärme (Gl. (3)) berechnet werden.

In Bild 3 und 4 ist das Verhalten einer Kühl-dose in einem ausgewählten Arbeitspunkt mit unterschiedlichen Kühl-mittelrichtungen dargestellt. Die Temperaturen werden nun auf die Kühl-mittel-Zulauf-temperatur und den kalorimetrisch ermittelten Wärmestrom \dot{Q}

$$T_{CA}^*(X) = (T_C(X) - T_A)/\dot{Q}, \quad (6)$$

die eingespeisten elektrischen Leistungen auf \dot{Q} bezogen:

$$P_C(X) \approx [P_{J(X)}/(P_{J(A)} + P_{J(K)})] \dot{Q}. \quad (7)$$

Man sieht, daß die Kühl-dose in unerwartet guter Weise lineares Verhalten zeigt. Man kann also für das stationäre thermische Verhalten der Kühl-dosen die Beziehung

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_B \\ \dot{Q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & 1 \\ R_{21} & R_{22} & 1 \\ R_W & R_W & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ T_A \end{pmatrix} \quad (8)$$

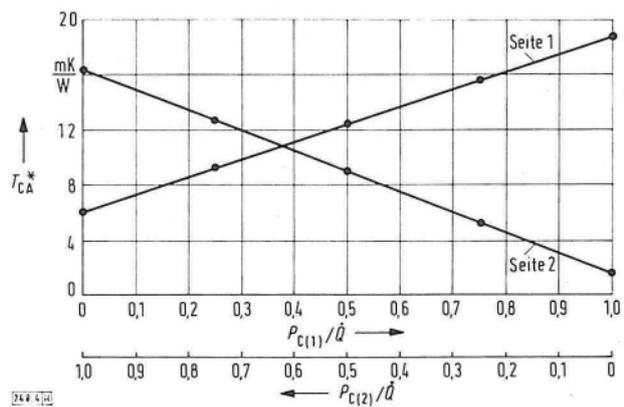


Bild 4. Darstellung eines Arbeitspunkts mit der Kühl-mittelrichtung 2 → 1; Meßbedingungen: $\dot{V} = 150$ l/h; $\vartheta_A = 20^\circ\text{C}$; $\dot{Q} = 2000$ W; Katode – Seite 1, Anode – Seite 2

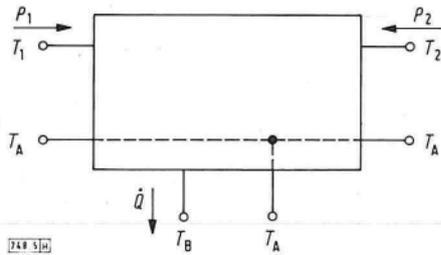


Bild 5. Kühl-dose als Dreitor

ansetzen. Die Parameter R_{XX} der Kühl-dose sind selbstverständlich vom Arbeitspunkt

$$R_{XX} = R_{XX}(\dot{M}, T_A, \dot{Q}, S) \quad (9)$$

(S Kühl-mittel-richtung) und auch vom gewählten Meßpunkt (C oder H) abhängig. Zur vollständigen Kennzeichnung werden sie mit den Bezugspunkten indiziert (CA bzw. HA). Die Zahlenwerte werden durch eine Ausgleichsrechnung mit der Gaußschen Methode der kleinsten Quadrate ermittelt.

Betrachtet man jetzt die Meßergebnisse Bild 3 und 4 näher und sieht sich speziell die beiden Extremfälle einseitiger Kühlung an, dann fällt auf, daß die Seite 2 grundsätzlich einen kleineren Wärmewiderstand als die Seite 1 hat. Dieser Effekt ist auf den Aufbau des Thyristors und nicht etwa auf Unsymmetrien in der Kühl-dose zurückzuführen. Den Datenblättern des Thyristors kann man entnehmen, daß der Wärmestrom auf der Anodenseite über größere Flächen abgeführt wird als auf der Katodenseite. Diese Wärmestrom-Einschnürung wirkt sich bis auf den Thyristorboden aus, so daß die mit der Anode verbundene Seite der Kühl-dose immer einen niedrigeren Wärmewiderstand aufweist.

Die Temperaturerhöhung auf der nicht beheizten Seite der Kühl-dose hängt stark davon ab, in welche Richtung das Kühl-mittel fließt. Die abfließende Seite hat dabei den höheren Wärmewiderstand, der in etwa R_W entspricht. Für die zufließende Seite gilt ein Wert von etwa $(0,2 \dots 0,5) R_W$, je nach Größe des Volumenstroms des Kühl-mittels.

Die Kühl-mittel-richtung wirkt sich aber auf die thermischen Widerstände der jeweils beheizten Seite (R_{11} und R_{22}) aus. Dabei gilt der Grundsatz, daß die zufließende Seite einen höheren und die abfließende Seite einen niedrigeren Wärmewiderstand hat. Diesem Effekt ist aber der schon oben erwähnte Einfluß der unterschiedlichen Wärmestrom-Einschnürung überlagert.

Spätestens hier wird klar, warum alle Versuche, das Verhalten der Kühl-dose durch ein Netz von Wärmewiderständen zu beschreiben, scheitern müssen. Aus systemtheoretischen Überlegungen gilt für ein passives Netz mit Zählpfeilrichtung nach Bild 5: $R_{12} = R_{21}$. Dies ist hier aber nicht erfüllt. Darum läßt sich für die Kühl-dose kein passives thermisches Ersatzschaltbild angeben.

3.3 Konventionelle Behandlung der Kühl-dosen

Bisher wurden thermische Messungen an Kühl-dosen für Hochspannungs-Stromrichter mit einer einfachen Meßeinrichtung, die im Prinzip Bild 2 entspricht, durchgeführt. Dabei kamen zwei Halbleiterbauelemente mit etwa gleichem Durchlaßspannungsfall zum Einsatz und beide Bauelemente wurden mit dem gleichen Durchlaßgleichstrom beaufschlagt, d. h. von beiden Seiten wurden in etwa gleiche Leistungen in die Kühl-dose eingespeist.

Gemessen wurden die gleichen Größen wie im Abschnitt 3.2, also $T_{G(A)}$, $T_{G(K)}$, \dot{V} , T_A , T_B , $P_{J(A)}$ und $P_{J(K)}$. Der thermische Widerstand der Kühl-dose wurde mit

$$R_{thGM}^* := [0,5 (T_{G(A)} + T_{G(K)}) - 0,5 (T_A + T_B)] / \dot{Q} \quad (10)$$

definiert. Der so ermittelte „eindimensionale“ Wärmewiderstand wurde der Kühl-dose zugeordnet.

Wird Gl. (8) mit $P_1 = P_2$ in die Gl. (10) eingesetzt, dann erhält man mit

$$R_{thGM}^* = 0,25 (R_{11} + R_{12} + R_{21} + R_{22}) - 0,5 R_W \quad (11)$$

den Zusammenhang zu den Dreitorparametern der Kühl-dose. Hier mußte der halbe formale thermische Widerstand des Kühl-mittels subtrahiert werden, da der thermische Widerstand der Kühl-dose in Gl. (10) auf die mittlere Kühl-mitteltemperatur bezogen ist. Dieser Einfluß kann mit der Definition

$$R_{thGA}^* := [0,5 (T_{G(A)} + T_{G(K)}) - T_A] / \dot{Q} \quad (12)$$

„herausgerechnet“ werden. Aus Gl. (8) erhält man hier:

$$R_{thGA}^* = 0,25 (R_{11} + R_{12} + R_{21} + R_{22}) \quad (13)$$

Welchen Einfluß haben nun die unvermeidlichen Unsymmetrien bei der Messung auf das hier erzielte Ergebnis? Mit $m = P_{G(1)} / P_{G(2)}$ erhält man den meßtechnisch ermittelten thermischen Widerstand der Kühl-dose zu

$$R_{thGA}^+ = [R_{11} + R_{21} + m (R_{12} + R_{22})] / [2 (1 + m)] \quad (14)$$

Für zwei ausgemessene Arbeitspunkte ist dieser Einfluß in Bild 6 dargestellt. Kommen zur Messung zwei gut gepaarte Halbleiterbauelemente zum Einsatz, so lassen sich dennoch Unsymmetrien bis zu 10% nicht vermeiden, weil die Paarung im allgemeinen nur bei einem Arbeitspunkt der Zellen gilt. Die durch die Unsymmetrie verursachten Meßabweichungen liegen damit in der Größenordnung von bis zu 1%, sind also nicht sehr groß.

In [3] wurde den Kühl-dosen der Wärmewiderstand

$$R_{thGA} = (T_J - T_A - R_{thJG} P_J) / P_J \quad (15)$$

zugeordnet. Hier ergeben sich zwar durch Addition mit dem Wärmewiderstand des Halbleiterbauelements und

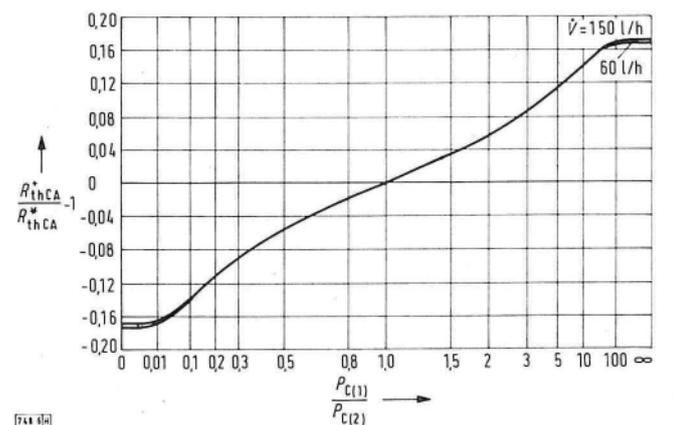


Bild 6. Einfluß der Unsymmetrie der Speisung auf den konventionell ermittelten thermischen Widerstand der Kühl-dosen an zwei Arbeitspunkten (Parameter: \dot{V})

anschließender Multiplikation mit der Verlustleistung richtige Werte für die Temperaturdifferenz zwischen Sperrschicht und Kühlmittelzulauf­temperatur, aber der Wärme­widerstand der Kühldose ist durch Temperaturmessungen an der Kühldose selbst nicht bestimmbar. Dies ist allerdings nicht sehr befriedigend.

4 Erzielte Meßergebnisse

4.1 Auswahl einer Kühldose

Zur Auswahl einer repräsentativen Kühldose, an der weitere Messungen an verschiedene Arbeitspunkten durchzuführen sind, wurden im Laufe der Zeit insgesamt elf Kühldosen untersucht. Es wurde nur ein Meßpunkt angefahren, und die in erster Linie interessierenden Parameter R_{11CA} und R_{22CA} wurden bei Annahme fester Werte für die „Durchgriffe“ R_{12CA} und R_{21CA} errechnet. Die dabei erzielten Ergebnisse sind in [6] wiedergegeben. Ein Meßergebnis wurde als „Ausreißer“ verworfen.

Die repräsentative Kühldose soll am oberen Toleranzniveau liegen, da bei den Untersuchungen in erster Linie Höchstwerte interessieren. Nun liegt es nahe, die Meßergebnisse der Kühldose mit den höchsten thermischen Widerständen als repräsentativ für den Höchstwert anzusehen. Man muß nun bestimmen, welches Toleranzintervall die Meßwerte dieser Kühldose repräsentieren. Da bei großen zu untersuchenden Stückzahlen theoretische Verteilungen nur selten die praktisch vorhandenen widerspiegeln, ist es sicherer, ein verteilungsfreies Verfahren anzuwenden. Nach [7] gilt für die Trefferwahrscheinlichkeit

$$p \approx \frac{2 [2n + 1 - r - m] - \chi^2_{(r+m); 1-\alpha}}{2 [2n + 1 - r - m] + \chi^2_{(r+m); 1-\alpha}} \quad (16)$$

mit dem Stichprobenumfang n und den laufenden Nummern r und m der als repräsentativ anzusehenden Meßwerte. Da hier r ein einseitiges, oberes Toleranzintervall interessiert, ist $r = 0$. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,1$ erhält man mit dem Quantil der χ^2 -Verteilung $\chi^2_{2; 0,9} = 4,61$ eine Trefferwahrscheinlichkeit $p \approx 0,79$. Man kann also die Kühldose mit den höchsten thermischen Widerständen als repräsentativ für den 80%-Wert der Verteilung annehmen, muß dabei aber eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 10% in Kauf nehmen.

4.2 Stationäre thermische Parameter der Kühldosen

Die thermischen Parameter der repräsentativen Kühldose wurden im Zusammenwirken mit dem Thyristor T 2200 N 3600 ... 4400 weiter untersucht. Bild 7 zeigt die dabei erzielten Ergebnisse.

Es wurden auch Messungen mit umgekehrter Wasser­richtung und mit vertauschten Anoden- bzw. Katodenseiten durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß die Vertauschung der Anoden- mit der Katodenseite keinen signifikanten Einfluß auf die Ergebnisse hatte, wenn gleichzeitig die Wasserrichtung vertauscht wurde. Dagegen wirkte sich die alleinige Vertauschung der Wasserrichtung auf die erzielten Ergebnisse aus. Auf der jeweils abfließenden (wärmeren) Seite wurden die thermischen Widerstände niedriger, auf der zufließenden (kälteren) Seite höher. Ursache ist die mit steigender Temperatur abnehmende Viskosität des Kühlmittels (das Wasser wird „flüssiger“) und die damit abnehmende Grenzschichtstärke.

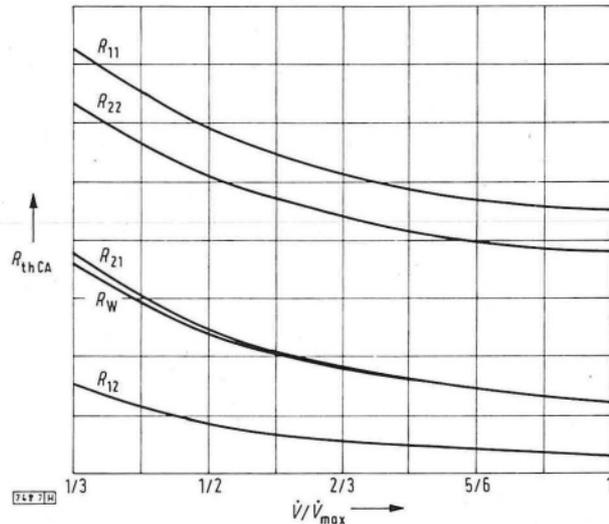


Bild 7. Verlauf der stationären thermischen Parameter der Kühldosen (100 mm Durchmesser) im Zusammenwirken mit Thyristoren vom Typ AEG T 2200 N 3600 ... 4400 (100 mm Durchmesser); Arbeitspunkt: Katode – Seite 1, Anode – Seite 2; Kühlmittelrichtung von Seite 1 zur Seite 2; Meßstellen am Gehäuse (case) des Thyristors

5 Zusammenfassung

Es wurde ein Verfahren zur meßtechnischen Ermittlung der thermodynamischen Eigenschaften von Kühldosen für zweiseitig kühlbare Halbleiterbauelemente auch bei unsymmetrischer Wärmestromeinspeisung angegeben.

Die Meßergebnisse zeigen, daß sich das Verhalten der Kühlelemente mit einer einfachen linearen Matrixgleichung beschreiben läßt. Diese Gleichung bildet eine wichtige Grundlage zur genauen, ökonomischen Dimensionierung von Thyristor-Hochleistungsventilen. Die Parameteridentifikation wird mit der Gaußschen Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt.

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen ist, daß kein passives thermisches Ersatzschaltbild der Kühldosen angebar ist.

6 Bedeutung der Formelzeichen und Indizes

Hier werden nur die oft wiederkehrenden und an der verwendeten Stelle nicht erklärten Symbole aufgeführt.

6.1 Formelzeichen

c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
h	spezifische Enthalpie
\dot{M}	Massenstrom
p	Druck
P	(Verlust-) Leistung
\dot{Q}	Wärme­fluß
R	thermischer Widerstand
R^*	konventionell ermittelter thermischer Widerstand
S	Kühlmittelrichtung (Strömung von Seite 1 zur Seite 2 bzw. von Seite 2 zur Seite 1)
T	thermodynamische Temperatur (in K)
T^*	nach Gl. (6) bezogene Temperatur
v	spezifisches Volumen
\dot{V}	Volumenstrom

w	Geschwindigkeit
α	Signifikanzniveau
ϑ	Celsius-Temperatur
ρ	Dichte

6.2 Indizes

A	Kühlmittelzufluß (ambient)
(A)	Anodenseite
B	Kühlmittelabfluß
C	Gehäuse des Halbleiterbauelements (case)
G	Übergang Halbleitergehäuse – Kühlelement (allgemeingültige Bezeichnung, kann je nach Anwendungsfall durch C oder H ersetzt werden)
H	Kühlelementoberfläche (heat-sink)
J	Sperrschicht (junction)
(K)	Katodenseite
M	Mittelwert von Kühlmittelzufluß und -abfluß
th	thermisch
W	Kühlmittel (Wasser)
X	„Platzhalter“ für 1, 2, A oder K (Seite 1, Seite 2, Anoden- oder Katodenseite)
1	Seite 1
2	Seite 2
11	Wirkung auf Seite 1, herrührend von Seite 1
12	Wirkung auf Seite 1, herrührend von Seite 2
21	Wirkung auf Seite 2, herrührend von Seite 1
22	Wirkung auf Seite 2, herrührend von Seite 2

Schrifttum

- [1] *Beringer, C.; Hengsberger, J.; Thiele, G.*: HGÜ-Ventilentwicklung. *etz Elektrotech. Z.* 102 (1981) H. 25, S. 1338–1342

- [2] *Pesch, H.; Ranade, S.; Schubert, M.; Sieber, P.; Goosen, P. V.; MacFarlane, R. D.*: Static Var-compensators for stabilizing traction and transmission systems in South Africa. *Int. Conf. on Power Electron. a. Variable-Speed Drives (Power Div. of the Instit. of Electr. Eng.)*, London 1984, Konf.-bd. S. 140–144
- [3] *Salanki, T.*: Bemessung von Kühllosen für Thyristoren und ihre Anwendung in Hochspannungs-Stromrichteranalgen. *Siemens-Z.* 52 (1978) H. 1, S. 43–46
- [4] *Müller, I.*: Thermodynamik I. Ms. Vorlesung „Grundzüge der Thermodynamik“. Berlin: Tech. Univ., 1983
- [5] *Elsner, N.; Fischer, S.; Klinger, J.*: Thermophysikalische Stoffeigenschaften von Wasser. 1. Aufl., Leipzig: Dt. Verl. Grundstoffind., 1982
- [6] *Schwarz, J.*: Correlation coefficients by Bravais-Pearson, Spearman and Kendall. *Instrum. a. Comput.* 4 (1986), Veröff. in Vorbereitung
- [7] *Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K.-H.*: Statistik. 1. Aufl., München: R. Oldenbourg, 1982

Der Autor



Dipl.-Ing. Jürgen Schwarz (39), VDE, beschäftigt sich mit der Dimensionierung von Stromrichter-Leistungsteilen für Hoch- und Niederspannung und ist Mitarbeiter im Geschäftsbereich Komponenten, Fachbereich Leistungselektronik und Anlagenbau, der AEG Aktiengesellschaft in Berlin. Er studierte Elektrotechnik an der Technischen Universität Dresden, arbeitete längere Zeit im VEB Elektroprojekt und Anlagenbau in Berlin (Ost) und nahm vor fünf Jahren seine jetzige Tätigkeit auf.