

Stationäres thermisches Verhalten von Halbleiterbauelementen und Kühldosen im Säulenverband

J. Schwarz *)

Ausgehend von zwei Gleichungen, die das stationäre thermische Verhalten von Halbleiterbauelementen in Scheibenzellenbauweise und das von wasserdurchflossenen Kühlelementen beschreiben, werden in dieser Arbeit die thermischen Verhältnisse im Säulenverband untersucht. Es läßt sich ein tridiagonales Gleichungssystem für die Sperrschichttemperaturen ableiten, auf dessen Basis Temperaturberechnungen in endlich langen, beliebig unsymmetrischen Säulen möglich sind. Weiter können Fehlerfälle und Doppelsäulen mit gleichsinniger und gegensinniger Gestaltung des Kühlmittelkreislaufs untersucht werden. Als Sonderfall wird die unendlich lange, symmetrische Säule betrachtet, und es werden Vergleiche mit konventionellen Verfahren durchgeführt.

Based on the equations describing the steady state thermal behaviour of disc-type semiconductor components and water cooled heat-sinks in this paper the thermal relations within the stack configuration will be explored. It will be deduced a tridiagonal system of equations for the junction temperatures to give a basis for temperature calculation of any unsymmetrical stack configurations with finite length. Furthermore, cases of failing and twofold stack configuration with structures of coolant circulation acting in the same or counteracting direction will be taken under consideration. As a special case the symmetrical stack with infinite length will be discussed and comparisons with conventional methods will be carried out.

1 Einleitung

Da einzelne Thyristoren keine Sperr- und Blockierspannungsfestigkeit haben, die wesentlich über 5 kV hinausgeht, ist bei Thyristor-Hochleistungsventilen eine Reihenschaltung einer Vielzahl von Thyristoren erforderlich. Anwendung finden diese Ventile unter anderem in der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ), zur Blindleistungskompensation in Anlagen der Energieversorgung, zur Stromversorgung in der chemischen Industrie und als Stellglied von elektrischen Antrieben größter Leistung.

Es ist Stand der Technik, diese Ventile in Innenraumtechnik mit Flüssigkeitskühlung durch entionisiertes Wasser auszuführen. Diese Bauweise hat sich als die zur Zeit im Bau und Betrieb kostengünstigste herausgestellt.

Thyristor-Hochspannungsventile werden üblicherweise aus kleinen Teilabschnitten – sogenannten Modulen – zusammengesetzt (Bild 1). Das ermöglicht eine rationelle Fertigung und erleichtert sowohl die Prüfung als auch Transport, Montage „vor Ort“ und Reparatur. Die Module enthalten die Thyristoren und Dämpfungsglieder mit ihren Kühleinrichtungen sowie die zu jedem Thyristorabschnitt gehörende Hilfelektronik.

Die Thyristorsäule besteht aus einer Aneinanderreihung von z. Z. bis zu 15 Thyristoren und 16 Kühldosen, eingebettet in einen mechanischen Spannverband. Durch eine

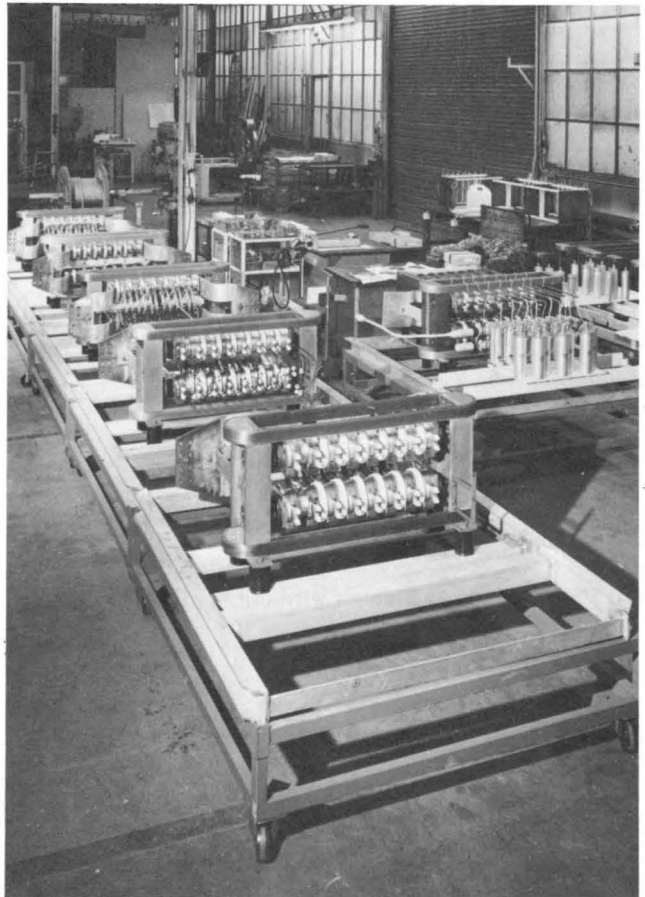


Bild 1. Wassergekühlte Thyristormodule für Blindstromkompensationsanlagen mit 100-mm-Thyristoren in verschiedenen Stadien der Fertigung (Foto: AEG)

definierte Anpreßkraft wird eine einwandfreie Kontaktgabe zwischen den Thyristoren und Kühldosen gewährleistet und ein sicherer Strom- und Wärmeübergang ermöglicht.

In Anlagen zur Blindleistungskompensation werden die Thyristoren jeweils antiparallel geschaltet, um einen Betrieb des Stromrichters als Wechselstromsteller bzw. Wechselstromschalter zu ermöglichen. Module für solche Anlagen enthalten dann zwei Thyristorsäulen mit gemeinsamen RC-Gliedern (Bild 1). Der Kühlmittelkreislauf kann hier parallel oder seriell gestaltet werden.

Aufbauend auf die Ergebnisse aus [1] werden in dieser Arbeit die thermischen Verhältnisse in den Modulen näher untersucht und Auswirkungen von Fehlerfällen berechnet. Dabei werden die Gegebenheiten, die unterschiedlichen thermischen Widerstände der Halbleiterbauelemente auf der Anoden- und Katodenseite und das Verhalten der Kühlelemente bei unsymmetrischer Speisung, vollständig berücksichtigt.

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

2 Grundgleichungen

2.1 Halbleiterbauelement

In guter Näherung gilt für ein Halbleiterbauelement in Scheibenzellenbauweise das thermische Ersatzschaltbild nach Bild 2. Daraus läßt sich mit

$$\begin{pmatrix} P_J \\ P_{G(A)} \\ P_{G(K)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/R_{(A)} + 1/R_{(K)} & -1/R_{(A)} & -1/R_{(K)} \\ 1/R_{(A)} & -1/R_{(A)} & 0 \\ 1/R_{(K)} & 0 & -1/R_{(K)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_J \\ T_{G(A)} \\ T_{G(K)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

eine einfache Matrixgleichung ableiten. Der konventionelle thermische Widerstand eines solchen Bauelementes wird nach [2] zweckmäßig aus der Parallelschaltung der beiden Widerstände $R_{(A)}$ und $R_{(K)}$ berechnet:

$$R_{thJG} = R_{(A)} R_{(K)} / (R_{(A)} + R_{(K)}) \quad (2)$$

Diese Gleichung ergibt sich auch aus der sinngemäß angewandten Definition für den stationären thermischen Widerstand in DIN 41 862, [5].

2.2 Kühlelement

Das Verhalten der Kühldosen wird mit der Gleichung

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_B \\ \dot{Q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & 1 \\ R_{21} & R_{22} & 1 \\ R_W & R_W & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ T_A \end{pmatrix} \quad (3)$$

vollständig beschrieben [1]. Dabei sind T_1 und T_2 die Temperaturen am Übergang Halbleiterbauelement – Kühlelement auf den Seiten 1 und 2 der Kühldose und P_1 und P_2 sind die dort eingespeisten Leistungen. T_A ist die Kühlmittelzulauf- und T_B die Kühlmittelablauftemperatur. Die thermischen Widerstände R_{XX} sind die Parameter der Kühldose in einem bestimmten Arbeitspunkt

$$R_{XX} = R_{XX}(\dot{M}, T_A, \dot{Q}, S) \quad (4)$$

(S Kühlmittelrichtung) und R_W drückt die Erwärmung des Kühlmittels durch die zugeführte Verlustleistung aus. \dot{Q} ist der mit dem Kühlmittelkreislauf abgeführte Wärmefluß.

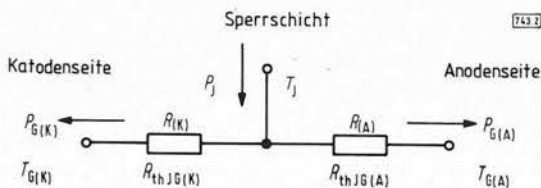


Bild 2. Thermisches Ersatzschaltbild eines zweiseitig gekühlten Halbleiterbauelements

Der konventionelle thermische Widerstand der Kühldosen ergab sich aus der Definition

$$R_{thGM}^* = \frac{\frac{1}{2} (T_{G(A)} + T_{G(K)}) - \frac{1}{2} (T_A + T_B)}{\dot{Q}} \Bigg|_{P_1=P_2=\frac{1}{2}\dot{Q}} \quad (5)$$

zu

$$R_{thGM}^* = 0,25 (R_{11} + R_{12} + R_{21} + R_{22}) - 0,5 R_W \quad (6)$$

3 Verhalten der unendlich langen, symmetrischen Säule

3.1 Konventionelles Berechnungsverfahren

Beim konventionellen Berechnungsverfahren wurde der thermische Gesamtwiderstand mit

$$R_{thJA}^* = R_{thJG} + R_{thGM}^* + 0,5 R_W \quad (7)$$

ermittelt. Dies macht deutlich, daß der Bezug der Kühldosenparameter auf die mittlere Kühlmitteltemperatur keinen Vorteil erbringt, da dann ein Anteil subtrahiert wird, der zur Berechnung des Endergebnisses mit Gl. (7) wieder addiert werden muß.

3.2 Berücksichtigung der gegenseitigen Abhängigkeiten

Am einfachsten ist das stationäre thermische Verhalten einer unendlichen langen Säule aus Halbleiterbauelementen und Kühldosen, die alle gleiche thermische Parameter haben, zu berechnen. Auch die Kühlmittelzulauftemperatur soll in allen Kühldosen gleich groß sein. Zwangsläufig sind alle Ersatz-Sperrschichttemperaturen ebenfalls gleich.

Mit den Bezeichnungen aus Bild 3 ergeben sich die Gleichungen

$$\begin{aligned} T_J &= R_1 P_1 + T_1 = R_2 P_2 + T_2, \\ T_1 &= R_{11} P_1 + R_{12} P_2 + T_A, \\ T_2 &= R_{21} P_1 + R_{22} P_2 + T_A, \\ P_J &= P_1 + P_2. \end{aligned} \quad (8)$$

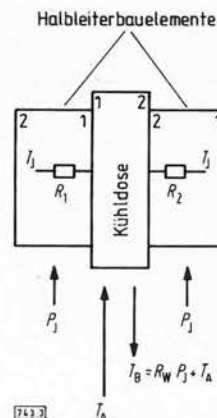


Bild 3. Ausschnitt aus einer unendlich langen, symmetrischen Säule aus zweiseitig gekühlten Halbleiterbauelementen und Kühldosen

Daraus erhält man für die Unbekannten

$$T_1 = \frac{R_{11}(R_2 + R_{22}) + R_{12}(R_1 - R_{21})}{R_1 + R_2 + R_{11} - R_{12} - R_{21} + R_{22}} P_J + T_A, \quad (9)$$

$$T_2 = \frac{R_{21}(R_2 - R_{12}) + R_{22}(R_1 + R_{11})}{R_1 + R_2 + R_{11} - R_{12} - R_{21} + R_{22}} P_J + T_A, \quad (10)$$

$$P_1 = \frac{R_2 + R_{22} - R_{12}}{R_1 + R_2 + R_{11} - R_{12} - R_{21} + R_{22}} P_J, \quad (11)$$

$$P_2 = \frac{R_1 + R_{11} - R_{21}}{R_1 + R_2 + R_{11} - R_{12} - R_{21} + R_{22}} P_J, \quad (12)$$

und letztlich für den thermischen Widerstand bei unendlich langer Säule

$$R_{thJA}|_{\infty} = (T_J - T_A)/P_J = \frac{(R_1 + R_{11})(R_2 + R_{22}) - R_{12} R_{21}}{R_1 + R_2 + R_{11} - R_{12} - R_{21} + R_{22}}. \quad (13)$$

Bild 4 zeigt die aus [1] ermittelten Verläufe des stationären thermischen Widerstands einer unendlich langen, symmetrischen Säule aus Thyristoren und Kühldosen als Funktion des Kühlmittelvolumenstroms. Dabei zeigte sich auch hier ein Einfluß der Kühlmittelrichtung. Im allgemeinen wurden mit einer Kühlmittelrichtung von der Anoden- zur Kathodenseite niedrigere Wärmewiderstände erreicht. Die Unterschiede liegen aber nur in der Größenordnung von etwa 1%, gehen also im Rahmen der hier vorliegenden Meßunsicherheiten verloren.

3.3 Vergleich beider Verfahren

Das Zahlenbeispiel in **Tabelle 1** soll zunächst dazu dienen, die Ergebnisse zu verdeutlichen.

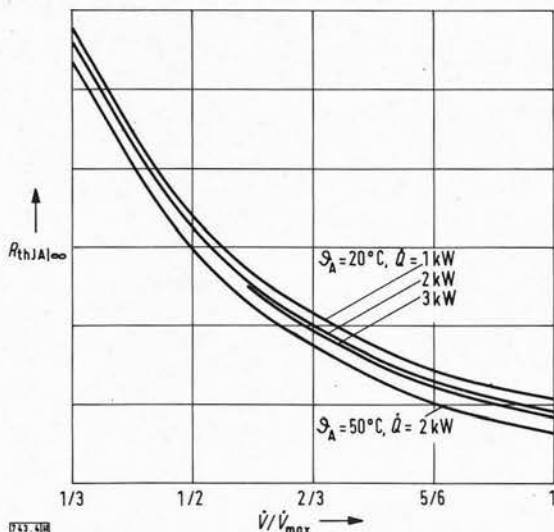


Bild 4. Verläufe des stationären thermischen Widerstandes $R_{thJA}|_{\infty}$ in unendlich langen, symmetrischen Säulen aus Kühldosen (100 mm Durchmesser) und Thyristoren vom Typ AEG T 2200 N 3600 ... 4400 (100 mm Durchmesser); Parameter: Kühlmittelzuflußtemperatur ϑ_A ; kalorimetrische Leistung \dot{Q} ; Arbeitsbedingungen: Katode – Seite 1, Anode – Seite 2; Kühlmittelrichtung von Seite 1 zur Seite 2

Gegeben

Thyristor: Anode – Seite 1; Katode – Seite 2

$$R_1 = 15 \text{ mK/W}; \quad R_2 = 20 \text{ mK/W}$$

Kühldose: Kühlmittelrichtung von Seite 2 zur Seite 1

$$\dot{V}_A = 60 \text{ l/h}; \quad \vartheta_A = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \vartheta_B = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_{11} = 25 \text{ mK/W}; \quad R_{12} = 15 \text{ mK/W}$$

$$R_{21} = 6 \text{ mK/W}; \quad R_{22} = 30 \text{ mK/W}$$

Gesucht

$$R_W, \dot{Q}, R_{thJA}^*, \vartheta_1, \vartheta_2, P_1, P_2, R_{thJA}|_{\infty}, \vartheta_J$$

Lösung

$$\dot{M} = \rho_A \dot{V}_A = 998,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 60 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 16,64 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$R_W = \frac{1}{\dot{M} c_p} = \frac{1}{0,01664 \text{ kg/s} \cdot 4180 \text{ J/(kg K)}} = 14,38 \frac{\text{mK}}{\text{W}}$$

$$\dot{Q} = \frac{\vartheta_B - \vartheta_A}{R_W} = \frac{(50,0 - 20,0) \text{ K}}{14,38 \text{ mK/W}} = 2087 \text{ W}$$

$$R_{thJC} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{15 \cdot 20}{15 + 20} \frac{\text{mK}}{\text{W}} = 8,57 \frac{\text{mK}}{\text{W}}$$

$$R_{thCM}^* = 0,25 (R_{11} + R_{12} + R_{21} + R_{22}) - 0,5 R_W = 11,81 \frac{\text{mK}}{\text{W}}$$

$$R_{thJA}^* = (8,57 + 11,81 + 0,5 \cdot 14,38) \frac{\text{mK}}{\text{W}} = 27,57 \frac{\text{mK}}{\text{W}}$$

$$\vartheta_1 = \frac{25(20 + 30) + 15(15 - 6)}{15 + 20 + 25 - 15 - 6 + 30} \frac{\text{mK}}{\text{W}} \cdot 2087 \text{ W} + 20 \text{ }^\circ\text{C} = 61,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_2 = \frac{6(20 - 15) + 30(15 + 25)}{\dots} \frac{\text{mK}}{\text{W}} \cdot 2087 \text{ W} + 20 \text{ }^\circ\text{C} = 57,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_1 = \frac{20 + 30 - 15}{\dots} \cdot 2087 \text{ W} = 1058 \text{ W}$$

$$P_2 = \frac{15 + 25 - 6}{\dots} \cdot 2087 \text{ W} = 1028 \text{ W}$$

$$R_{thJA}|_{\infty} = \frac{(15 + 25)(20 + 30) - 15 \cdot 6}{\dots} \frac{\text{mK}}{\text{W}} = 27,68 \frac{\text{mK}}{\text{W}}$$

$$\vartheta_J = R_{thJA}|_{\infty} P_J + \vartheta_A = 27,68 \frac{\text{mK}}{\text{W}} \cdot 2087 \text{ W} + 20 \text{ }^\circ\text{C} = 77,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tabelle 1. Verhältnisse in einer unendlich langen, symmetrischen Säule aus Thyristoren und Kühldosen (Zahlenbeispiel)

Welchen Einfluß haben die „Durchgriffe“ der Kühldose auf das erzielte Ergebnis? Dieser Einfluß ist für das oben durchgerechnete Beispiel in **Bild 5** mit variierten Werten für die Durchgriffe R_{12} und R_{21} dargestellt. Das konkrete Beispiel ist in das Diagramm als Punkt eingetragen. Eine Verallgemeinerung ist nur schlecht möglich, allerdings besteht die Tendenz, daß die sich ergebenden Abweichungen mit wachsendem Volumenstrom immer kleiner werden. Beim Vergleich ist jedoch zu berücksichtigen, daß zu den in **Bild 5** dargestellten Abweichungen unter Umständen noch die bei den Messungen von R_{thJC} und R_{thCM}^* nach [1] auftretenden Abweichungen addiert werden müssen. Im Einzel-

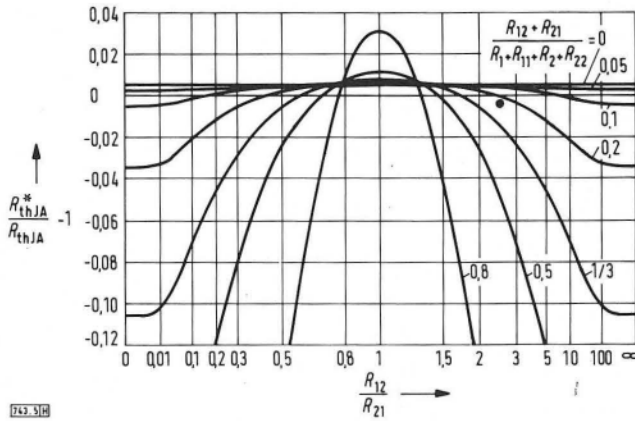


Bild 5. Einfluß der Durchgriffe der Kühldose auf das erzielte Ergebnis für den stationären Wärmewiderstand in der unendlich langen, symmetrischen Säule (Daten der Bauelemente aus Tabelle 1; ● konkretes Beispiel)

fall können sich diese Abweichungen auch aufheben, vor allem dann, wenn die Sperrschichttemperatur zusammen mit der später verwendeten Kühleinrichtung gemessen wird. Davon kann man aber nicht ausgehen.

4 Verhalten einer endlich langen Säule

Bild 6 zeigt eine endlich lange Säule aus n zweiseitig gekühlten Halbleiterbauelementen und $n+1$ Kühldosen bei beliebig unsymmetrischen Kühlbedingungen. Deren Verhalten soll im folgenden untersucht werden.

4.1 Gleichungssystem

Einen Ausschnitt aus der Säule um das i -te Halbleiterbauelement herum stellt Bild 7 dar. Hier gelten folgende Gleichungen:

$$\begin{aligned}
 T_{J,i} &= R_{1,i} P_{1,i} + T_{1,i}, \\
 T_{J,i} &= R_{2,i} P_{2,i} + T_{2,i}, \\
 P_{J,i} &= P_{1,i} + P_{2,i}, \\
 T_{1,i} &= R_{11,i} P_{1,i} + R_{12,i} P_{2,i+1} + T_{A,i}, \\
 T_{2,i} &= R_{21,i-1} P_{1,i-1} + R_{22,i-1} P_{2,i} + T_{A,i-1}, \\
 T_{J,i-1} &= R_{1,i-1} P_{1,i-1} + T_{1,i-1}, \\
 T_{J,i+1} &= R_{2,i+1} P_{2,i+1} + T_{2,i+1}, \\
 T_{1,i-1} &= R_{11,i-1} P_{1,i-1} + R_{12,i-1} P_{2,i} + T_{A,i-1}, \\
 T_{2,i+1} &= R_{21,i} P_{1,i} + R_{22,i} P_{2,i+1} + T_{A,i}.
 \end{aligned} \quad (14)$$

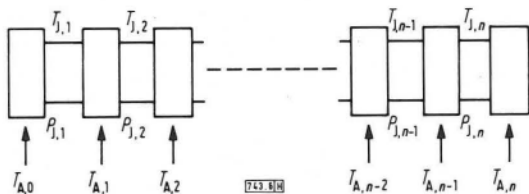


Bild 6. Endlich lange Säule aus n Halbleiterbauelementen und $n+1$ Kühldosen

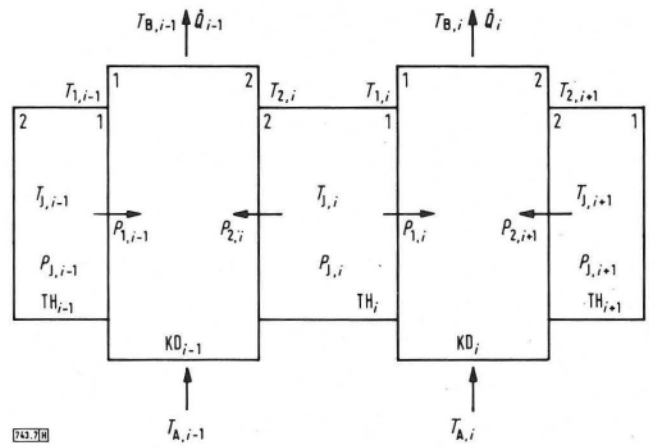


Bild 7. Ausschnitt aus einer Säule um das i -te Halbleiterbauelement (TH Thyristor; KD Kühldose)

Diese neun Gleichungen können durch längere Rechnung in die Form

$$\begin{aligned}
 & - \frac{R_{12,i}}{N_{i+1}} T_{J,i+1} + \left[\frac{R_{2,i+1} + R_{22,i}}{N_{i+1}} \right. \\
 & \left. + \frac{R_{1,i-1} + R_{11,i-1}}{N_i} \right] T_{J,i} - \frac{R_{21,i-1}}{N_i} T_{J,i-1} \\
 & = \frac{R_{1,i-1} + R_{11,i-1} - R_{21,i-1}}{N_i} T_{A,i-1} + P_{J,i} \\
 & + \frac{R_{2,i+1} + R_{22,i} - R_{12,i}}{N_{i+1}} T_{A,i}, \quad (15)
 \end{aligned}$$

mit

$$\begin{aligned}
 N_i &= (R_{1,i-1} + R_{11,i-1})(R_{2,i} + R_{22,i-1}) \\
 & - R_{12,i-1} R_{21,i-1}, \quad (16)
 \end{aligned}$$

überführt werden. Man hat ein tridiagonales Gleichungssystem zur Berechnung der Sperrschichttemperatur $T_{J,i}$ erhalten, das sehr produktiv durch LR -Zerlegung [3] lösbar ist. Eine gesonderte Behandlung erfordern allerdings noch die Halbleiterbauelemente an den Rändern (Gleichungen für $T_{J,1}$ und $T_{J,n}$). Für $i=1$ gilt:

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{R_{2,2} + R_{22,1}}{N_2} + \frac{1}{R_{2,1} + R_{22,0}} \right) T_{J,1} - \frac{R_{12,1}}{N_2} T_{J,2} \\
 & = \frac{T_{A,0}}{R_{2,1} + R_{22,0}} + P_{J,1} + \frac{R_{2,2} + R_{22,1} - R_{12,1}}{N_2} T_{A,1}. \quad (17)
 \end{aligned}$$

Analog erhält man für das Ende der Säule:

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{1}{R_{1,n} + R_{11,n}} + \frac{R_{1,n-1} + R_{11,n-1}}{N_n} \right) T_{J,n} \\
 & - \frac{R_{21,n-1}}{N_n} T_{J,n-1} \\
 & = \frac{R_{1,n-1} + R_{11,n-1} - R_{21,n-1}}{N_n} T_{A,i-1} \\
 & + P_{J,n} + \frac{T_{A,n}}{R_{1,n} + R_{11,n}}. \quad (18)
 \end{aligned}$$

Halbleiterbauelement

Thyristor: $R_{thJC(A)} = 11 \text{ mK/W}$
 $R_{thJC(K)} = 14 \text{ mK/W}$
 $R_{thJC} = 6,16 \text{ mK/W}$

Kühlelement

Kühldose mit dem Kühlmittel Wasser:
 $\dot{V} = 150 \text{ l/h}$, $\vartheta_A = 20^\circ\text{C}$, $\dot{Q} = 2000 \text{ W} \rightarrow R_W = 5,75 \text{ mK/W}$

Katode – Seite 1; Anode – Seite 2

Kühlmittelrichtung von Seite 1 zur Seite 2

$R_{11CA} = 18 \text{ mK/W}$; $R_{12CA} = 2,0 \text{ mK/W}$
 $R_{21CA} = 6,0 \text{ mK/W}$; $R_{22CA} = 15 \text{ mK/W}$
 $R_{DCC} = 80 \text{ mK/W}$; $R_{thCM}^* = 7,38 \text{ mK/W}$

Thermische Widerstände in einer unendlich langen, symmetrischen Säule

$R_{thJA}^* = 16,41 \text{ mK/W}$; $R_{thJA} = 16,40 \text{ mK/W}$

Thermische Widerstände in einer unendlich langen, symmetrischen Doppelsäule mit gleichsinniger thermischer Reihenschaltung

$R_{thJA}^{(1)} = 16,40 \text{ mK/W}$; $R_{thJA}^{(2)} = 22,15 \text{ mK/W}$

Tabelle 2. Parameter der Bauelemente bei den durchgeführten Rechnungen

n=4		15,27	29,18	* 32,03	17,57						
5		15,27	29,19	* 32,06	18,01	16,11					
6		14,83	16,69	29,41	* 32,11	18,02	16,11				
7		14,83	16,69	29,41	* 32,11	18,03	16,55	15,95			
8		14,82	16,25	16,83	29,44	* 32,12	18,03	16,55	15,95		
9		14,82	16,25	16,83	29,44	* 32,12	18,03	16,57	16,40	15,94	
10		14,82	16,24	16,40	16,85	29,44	* 32,12	18,03	16,57	16,40	15,94

Bild 10. Thermische Widerstände (in mK/W) in Säulen mit einer ausgefallenen Kühl-dose (mittlere Kühl-dose * ausgefallen; Daten der Bauelemente aus Tabelle 2)

Dabei ist R_D der thermische Durchlaßwiderstand der Kühl-dose. **Bild 10** zeigt die erzielten Ergebnisse. Sonderfälle, wie Ausfall der Kühl-dose am Rande oder mehrere ausgefallene Kühl-dosen, wurden nicht weiter betrachtet.

5 Thermische Reihenschaltung von zwei Säulen (Doppelsäulen)

Bei Stromrichtern zur Blindleistungskompensation, die keine zu großen umzusetzenden Verlustleistungen haben, bietet sich zur Kostenreduzierung die thermische Reihenschaltung des Kühlmittelkreislaufs von zwei Kühl-dosen an, da durch die Parallelschaltung der Thyristoren immer zwei Kühl-dosen auf gleichem elektrischen Potential liegen (**Bild 11**). Dabei besteht die Möglichkeit, die Kühlkreisläufe gleichsinnig (**Bild 11a**) oder gegensinnig (**Bild 11b**) zu betreiben.

5.1 Gleichsinnige thermische Reihenschaltung

Die gleichsinnige thermische Reihenschaltung nach **Bild 11a** hat den gravierenden Vorteil des einfacheren mechanischen Aufbaus. Dem steht der Nachteil entgegen, daß in Säule 2 prinzipiell höhere Ersatzsperrschichttemperaturen auftreten als in Säule 1.

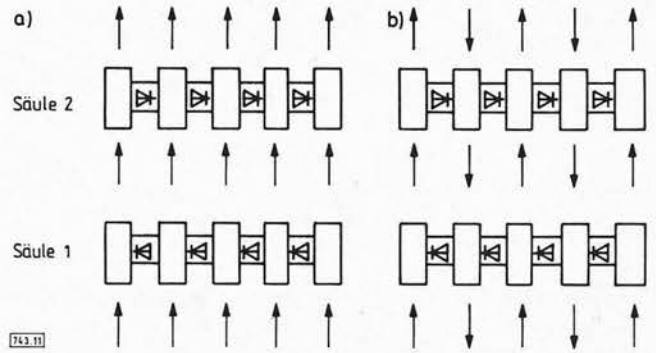


Bild 11. Thermische Reihenschaltung des Kühlkreislaufs von zwei Säulen

- a) gleichsinnige Reihenschaltung
- b) gegensinnige Reihenschaltung

Bei unendlich langen, symmetrischen Säulen gilt für die Säule 1 die Gleichung

$$R_{thJA}^{(1)} \Big|_{\infty} = \frac{(R_1 + R_{11})(R_2 + R_{22}) - R_{12} R_{21}}{R_1 + R_2 + R_{11} - R_{12} - R_{21} + R_{22}} \quad (1)$$

und für Säule 2 entsprechend

$$R_{thJA}^{(2)} \Big|_{\infty} = \frac{(R_1 + R_{11})(R_2 + R_{22}) - R_{12} R_{21}}{R_1 + R_2 + R_{11} - R_{12} - R_{21} + R_{22}} + R_W \quad (2)$$

Will man die Verhältnisse in einer endlichen Doppelsäule untersuchen, so muß man den Kühlkreislauf genauer betrachten, um die Zuordnung der Kühl-dosenparameter an die Strömungsverhältnisse festzulegen. Bei vernünftiger konstruktiver Gestaltung des Kühlmittelkreislaufs sind die „Durchgriffe“ der Kühl-dose, R_{12} und R_{21} , in beiden Säulen vertauscht, d.h. wenn in der ersten Säule das Wasser zuerst zur Katodenseite fließt, dann fließt es in der zweiten Säule zuerst zur Anodenseite und umgekehrt.

Zur Lösung des Gleichungssystems stellt man für jede Säule das Gleichungssystem nach den Gln. (15) bis (18) auf, berechnet bei Säule 1 die kalorimetrischen Leistungen mit den Gln. (20) bis (22) und kann dann mit Gl. (23) die Zuflußtemperaturen der Säule 2 ermitteln. **Bild 12** zeigt die so berechneten Ergebnisse für die Anzahl der in Reihe geschalteten Thyristoren von $n = 2$ bis 10.

n=2		14,80	15,77								
3		14,82	16,22	15,92							
4		14,82	16,23	16,37	15,93						
5		14,82	16,24	16,38	16,38	15,94					
6		14,82	16,24	16,38	16,40	16,38	15,94				
7		14,82	16,24	16,38	16,40	16,40	16,38	15,94			
8		14,82	16,24	16,38	16,40	16,40	16,40	16,38	15,94		
9		14,82	16,24	16,38	16,40	16,40	16,40	16,40	16,38	15,94	
10		14,82	16,24	16,38	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40	16,38	15,94

Bild 12. Thermische Widerstände (in mK/W) in einer Doppelsäule mit gleichsinniger Reihenschaltung (Daten der Bauelemente aus Tabelle 2; Anmerkung: Das thermische Verhalten der zweiten Säule wurde als identisch mit der ersten Säule angenommen. Die unterschiedlichen Kühlmittelrichtungen in den beiden Säulen wurden lediglich durch Vertauschung von R_{12} mit R_{21} berücksichtigt.)

5.2 Gegensinnige thermische Reihenschaltung

Vorteil der gegensinnigen thermischen Reihenschaltung zweier Säulen ist die gleichmäßigere Temperaturverteilung. Trotz dieses Vorteils wird man diese Variante nur bei kritischen Auslegungen anwenden, da der konstruktive Aufwand erheblich höher ist. Um den sich ergebenden Vorteil abzuschätzen, wurde die folgende Rechnung durchgeführt.

Es sind acht Varianten der Gestaltung des Kühlmittelkreislaufs – bei Annahme gleicher Kühldosen und gleicher Thyristoren – denkbar. Man erhält für den Fall der unendlich langen, symmetrischen Doppelsäule ein lineares Gleichungssystem mit den vier unbekanntem Sperrschichttemperaturen, das hier aber nicht einzeln dargestellt werden soll, zumal die Ergebnisse sehr lang und unübersichtlich sind. Die beiden eigentlich interessanten Sonderfälle sind im Bild 13 dargestellt. Hier sind die in einem Strang liegenden Sperrschichttemperaturen gleich; das zu lösende Gleichungssystem hat nur noch zwei Unbekannte, ist aber auch noch sehr unübersichtlich.

Einfacher erzielt man eine Lösung durch Verwendung des tridiagonalen Gleichungssystems für die einfache Säule aus Abschnitt 4.1 mit Hilfe der Fixpunktiteration [4], hier angewandt auf ein lineares Gleichungssystem. Zu diesem Zweck gibt man die Kühlmittelzulauftemperaturen der Säule 1 abwechselnd mit 0 und mit $R_W P_J$ vor. Die 0te Kühldose beginnt mit 0; hat die Säule eine gerade Anzahl von Kühldosen, dann wird bei der letzten Kühldose die Kühlmittelzulauftemperatur mit $0,5 R_W P_J$ vorgegeben. Dann berechnet man die Sperrschichttemperaturen der 1. Säule und nimmt jede zweite Auslauftemperatur als Eingangsgröße zur Berechnung der Verhältnisse in der 2. Säule. Deren Ausflusstemperaturen werden wiederum zur wiederholten Berechnung der Verhältnisse der 1. Säule benutzt. Dieses Verfahren wird so lange fortgesetzt, bis die Abweichungen der umgesetzten Leistungen ein bestimmtes Maß nicht überschreiten.

Bild 14 zeigt die hierbei erzielten Ergebnisse. Die günstigsten Verhältnisse ergeben sich bei einem Kühlmittelzufluß auf der Katodenseite.

Würde man direkt ein Gleichungssystem für eine Doppelsäule mit gegensinniger thermischer Reihenschaltung endlicher Länge aufstellen, so ginge der Vorteil der Tridiagonalität des Gleichungssystems nach Gl. (15) verloren. Bestenfalls könnte man durch geschicktes Sortieren der unbekanntem Temperaturen eine fünfzeilige Bandmatrix erhalten. Mit Hilfe der oben erwähnten Fixpunktiteration kommt man aber schneller zu einem Ergebnis.

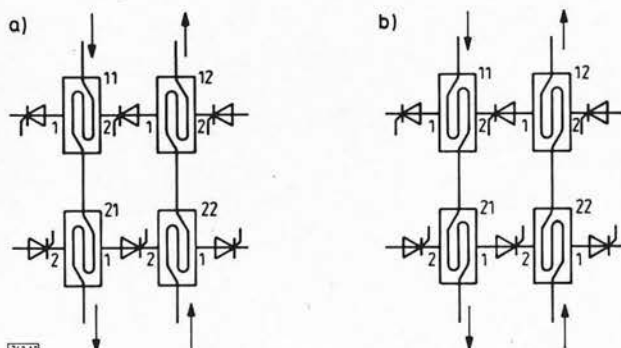


Bild 13. Sonderfälle aus den acht möglichen Varianten zur Gestaltung des Kühlmittelkreislaufs mit gleichen Strangtemperaturen
a) Kühlmittelzufluß auf der Katodenseite
b) Kühlmittelzufluß auf der Anodenseite

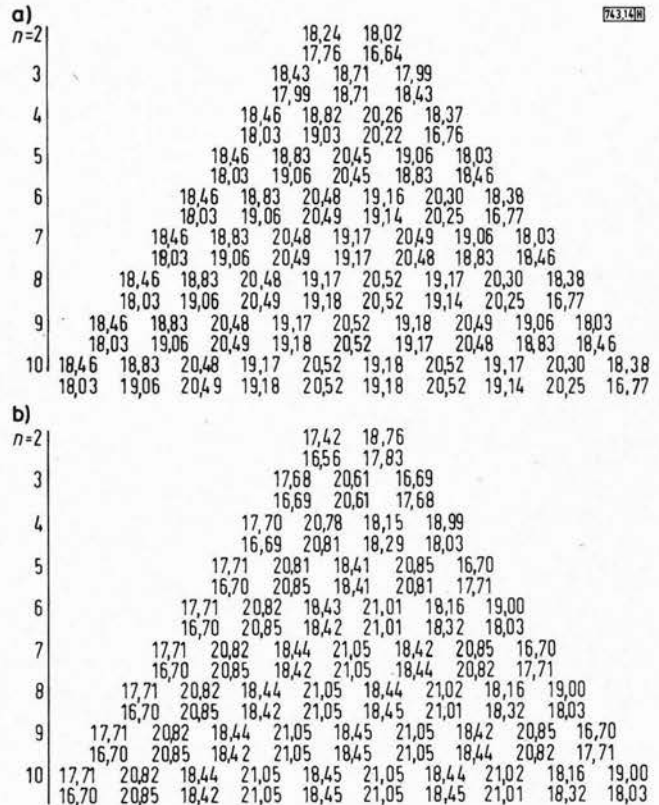


Bild 14. Thermische Widerstände (in mK/W) in einer Doppelsäule mit gegensinniger Reihenschaltung (Daten der Bauelemente aus Tabelle 2; Anmerkung: Das thermische Verhalten der Kühldosen mit verdrehter Kühlmittelrichtung wurde nur durch die vertauschten Durchgriffe R_{12} und R_{21} berücksichtigt. R_{11} und R_{22} wurden unverändert übernommen.)

- Kühlmittelzufluß auf der Katodenseite beider Säulen (Wärmewiderstand im Strang 1 der unendlich langen Säule: $R_{thJA|1} = 19,18$ mK/W; Wärmewiderstand im Strang 2 der unendlich langen Säule: $R_{thJA|2} = 20,52$ mK/W)
- Kühlmittelzufluß auf der Anodenseite beider Säulen (Wärmewiderstand im Strang 1 der unendlich langen Säule: $R_{thJA|1} = 21,05$ mK/W; Wärmewiderstand im Strang 2 der unendlich langen Säule: $R_{thJA|2} = 18,45$ mK/W)

6 Zusammenfassung

Ausgehend von einer genaueren Betrachtung des stationären Verhaltens von Kühldosen in [1] werden in dieser Arbeit die Verhältnisse in Säulen aus Halbleiterbauelementen und Kühldosen näher untersucht. Mit dem abgeleiteten tridiagonalen Gleichungssystem für die Sperrschichttemperaturen in den einzelnen Halbleiterbauelementen können nicht nur die Einzeltemperaturen im Normalbetrieb, sondern auch Fehlerfälle, wie verstopfte Kühldosen, behandelt werden. Auch werden Vorausberechnungen der Verhältnisse in Doppelsäulen sowohl mit gleichsinniger als auch mit gegensinniger thermischer Reihenschaltung ermöglicht.

7 Bedeutung der Formelzeichen und Indizes

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

7.1 Formelzeichen

\bar{c}_p über einen Temperaturbereich gemittelte spezifische Wärmekapazität des Kühlmittels (Wasser) bei konstantem Druck

\dot{M}	Massenstrom
n	Anzahl der Halbleiterbauelemente in der Säule
N	Nenner in einer Gleichung
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)
\dot{V}	Volumenstrom
ϑ	Celsius-Temperatur
ρ	Dichte

7.2 Indizes

A	Kühlmittelzufluß (ambient)
(A)	Anodenseite
B	Kühlmittelabfluß
C	Gehäuse des Halbleiterbauelements (case)
D	Durchgang
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] Schwarz, J.: Stationäre thermodynamische Eigenschaften von Kühldosen. etzArchiv 8 (1986) H. 6, S. 207–212
- [2] Glöckel, R.: Wärmewiderstandsbestimmung an Siliziumgleichrichtern und Siliziumthyristoren in Scheibenzellenbauweise. Diss. Tech. Univ. Hannover, 1968
- [3] Engeln-Müllges, G.; Reutter, F.: Formelsammlung zur Numerischen Mathematik mit BASIC-Programmen. 1. Aufl., Mannheim: Bibliographisches Inst., 1983
- [4] Jeggle, H.: Numerische Mathematik I für Ingenieure. Vorlesungsscr. Tech. Univ. Berlin, 1983
- [5] DIN 41 862/12.71: Halbleiterbauelemente und integrierte Mikroschaltungen. Mit der Temperatur zusammenhängende Begriffe, Benennungen und Erklärungen. Berlin: Beuth, 1971

Der Autor



Dr.-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), wurde 1986 an der Technischen Universität Berlin promoviert und nahm vor fünf Jahren seine jetzige Tätigkeit auf.