

Grundzüge eines statistisch begründeten Dimensionierungsverfahrens zur Bestimmung der maximal zulässigen Belastung von Halbleiterstromrichtern

J. Schwarz *)

Die zulässige Dauerstrombelastung von Stromrichtern wird im allgemeinen auf der Basis der Extremwerte der Parameter der eingesetzten Bauelemente ermittelt. Die Streuung dieser Werte findet keine Widerspiegelung im Dimensionierungsverfahren. Diese unbefriedigende Vorgehensweise gestattet keine optimale Dimensionierung der Ventile. Es wird dabei zu sehr auf der sicheren Seite gearbeitet.

In der Arbeit wird auf der Basis der statistischen Verteilungen der Bauelementeparameter mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode die statistische Verteilung der Sperrschichttemperaturen in den Halbleiterbauelementen berechnet. Es sind nun Aussagen über das mit jeder Dimensionierung verbundene Risiko möglich, d.h., es können Aussagen darüber getroffen werden, wie groß der Anteil der Thyristoren ist, deren Sperrschichttemperatur bestimmte Grenzwerte überschreitet. Dadurch kann optimal dimensioniert werden.

Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens sind in allen Fällen abhängiger Kühlung gegeben, d.h. in den Fällen, bei denen sich mehrere Halbleiterbauelemente in ihrer Erwärmung gegenseitig beeinflussen.

Generally the permissible average on-state current of static converters will be determined based on the absolute maximum ratings of the parameter of the used semiconductor components shown in their data sheets. However, for calculation the dispersion of these parameter ratings are not taken into consideration. These unsatisfactory procedure doesn't allow an optimized design of the valves. With this method the safety margin is more than necessary.

It will be given a method of calculation for the statistical distribution of the junction temperature of the semiconductor components, based on the statistical distribution of the component parameters using the Monte-Carlo method. Now, the risk involved with every design procedure can be expressed, i.e. it is possible to determine the number of thyristors whose junction temperatures exceeds a given value. Therefore an optimized design procedure is given.

Applications of this method are given in all cases of dependent cooling, i.e. in all cases of mutual influence of several semiconductor components, due to their heating.

1 Vorbemerkungen

1.1 Allgemeine Betrachtungen (in Anlehnung an [1])

Die meisten Vorgänge in Wirtschaft, Natur und Technik sind mit zufälligen Schwankungen behaftet. Diese Zufälligkeiten werden häufig bei der Betrachtung solcher Vorgänge ignoriert. Man konzentriert sich auf mittlere Tendenzen, um zunächst das Wesen eines untersuchten Zusammenhangs interpretieren zu können. Oft genug bestimmt aber nicht der Mittelwert, sondern ein Extremwert das Verhalten eines Systems. In der Technik wird das in der Regel bis heute dadurch berücksichtigt, daß bekannte mittlere Werte mit „Sicherheitsfaktoren“ multipliziert werden. An die Stelle der deterministischen Beschreibung mittlerer Tendenzen sollte eine – bis zur konstruktiven Gestaltung technischer Gebilde – durchgehende statistische Behandlung der zufäl-

ligen Vorgänge treten, um eine optimale Ausnutzung von Rohstoffen und Energie zu erzielen.

Bevor zur statistischen Formulierung eines zufälligen (stochastischen) Prozesses geschritten werden kann, muß er phänomenologisch bekannt sein. Es ist daher grundsätzlich mit Experimenten zu beginnen, deren Resultate (Meßgrößen) innerhalb gewisser zufälliger Grenzen schwanken werden. Die Ursachen der Schwankungen experimenteller Ergebnisse können entweder dem Prozeß innewohnen, von seinen Randbedingungen herrühren oder in zufälligen Meßfehlern liegen. Letztere sind so klein wie möglich zu halten und werden in den folgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt.

Zwischen den beiden anderen Ursachen der Zufälligkeiten wird zweckmäßigerweise nicht unterschieden, da die Prozesse im allgemeinen von der Wirkung zufälliger Randbedingungen nicht unbeeinflusst bleiben können. Diese sind möglichst praxisnah einzustellen.

Zur Reduzierung des Aufwands für die experimentellen Untersuchungen, die mit wachsender Parameterzahl immer aufwendiger werden, können die interessierenden Vorgänge auf der Basis weniger Experimente modelliert und mit diesen Modellen – z.B. mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation – auf andere Parameterkombinationen extrapoliert werden.

1.2 Thermische Dimensionierung von Halbleiterstromrichtern

Die zulässige Dauerstrombelastbarkeit von Stromrichtern wird in erster Linie durch die im aktiven Teil der Halbleiter auftretenden Temperaturen bestimmt. Diese virtuellen Sperrschichttemperaturen können im allgemeinen nicht direkt gemessen werden, sondern werden aus den Betriebsbedingungen des Stromrichters heraus berechnet. Dabei wird auf die Zahlenangaben des Herstellers über das Verhalten der Halbleiterbauelemente zurückgegriffen. Außerdem werden Experimente durchgeführt, um spezielle Einsatzbedingungen (Einbauart, Kühlkörper, Lüfter usw.) zu berücksichtigen.

Die allen diesen Größen innewohnenden Zufälligkeiten finden dabei keine Widerspiegelung im Dimensionierungsverfahren. Es wird mit den Höchstwerten der Durchlaßspannung, der Q_{π} -Werte und der thermischen Widerstände (beim Einsatz von Thyristoren) gerechnet (andere Zahlen sind vom Hersteller auch nur selten zu erfahren), die dann mit den ermittelten Höchstwerten der äußeren thermischen Widerstände kombiniert werden, um daraus eine Sperrschichttemperatur zu errechnen.

Diese unbefriedigende Vorgehensweise gestattet keine optimale Dimensionierung der Ventile. Es wird dabei zu sehr auf der sicheren Seite gearbeitet. Durch Anwendung des im folgenden skizzierten und an einem Beispiel durchgerechneten Verfahrens kann das (immer) auftretende

*) Dr.-Ing. Jürgen Schwarz, VDE, ist Mitarbeiter im Geschäftsbereich Komponenten, Fachbereich Leistungselektronik und Anlagenbau, der AEG Aktiengesellschaft, Berlin.
Manuskripteingang: 21. 4. 1986

Dimensionierungsrisiko quantitativ eingeschätzt werden, d.h., es können Aussagen getroffen werden, welcher Anteil der Halbleiterbauelemente bei einer vorzugebenden statistischen Sicherheit die zulässige Sperrschichttemperatur von z.B. 90 °C nicht überschreitet.

Es muß hier aber darauf hingewiesen werden, daß sich Aussagen mit einer hundertprozentigen Sicherheit nicht machen lassen. Dies ist bei herkömmlichen Dimensionierungsverfahren auch nur dann möglich, wenn sämtliche die Temperatur beeinflussenden Parameter in einer Stückprüfung meßtechnisch ermittelt werden. Aus Aufwandsgründen werden aber im allgemeinen die thermischen Widerstände sowohl der Kühlelemente als auch der Thyristoren nur stichprobenhaft überprüft. So können bei einzelnen Thyristoren durchaus höhere Wärmewiderstände auftreten als im Datenblatt angegeben wurde. Die Kontaktwiderstände zwischen den Scheiben der Thyristoren hängen von vielen Parametern, unter anderem von der Zugfestigkeit der Materialien, der Oberflächengüte (der Spaltdicke) und eventuellen Verformungen durch innere Spannungen und Temperaturgradienten ab, d.h., sie sind starken Streuungen unterworfen [2]. So lassen sich 100%-Werte für die thermischen Widerstände nicht angeben. Trotzdem wird mit solchen Werten gearbeitet und gerechnet.

Der Vorteil des statistisch begründeten Verfahrens liegt nun darin, daß man von der Merkmalsverteilung einer Stichprobe Rückschlüsse auf das Verhalten der Grundgesamtheit ziehen kann. Außerdem ist die Berücksichtigung auftretender Korrelationen und gegenseitiger Beeinflussung möglich. So tritt bei einem Exemplar eines Thyristors z.B. nie die maximale Durchlaßspannung zusammen mit der maximalen Sperrverzugsladung und damit nie die maximale Durchlaßverlustleistung zusammen mit der maximalen Ausschaltverlustleistung auf (Beispiel für einen korrelativen Zusammenhang). Und auch in einer Säule aus Thyristoren und Kühldosen [3] ist die Wahrscheinlichkeit, daß gerade zwei Thyristoren mit maximaler Verlustleistung nebeneinander liegen, sehr gering, nämlich m^2 , wenn m die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Thyristors mit maximaler Durchlaßverlustleistung ist.

1.3 Anwendung zur stationären thermischen Dimensionierung von Hochspannungsventilen

Das oben skizzierte Verfahren ist besonders zur Dimensionierung von Hochspannungsventilen [4] geeignet. Zum einen treten hier überhaupt gegenseitige Abhängigkeiten auf, d.h., die Halbleiterbauelemente beeinflussen sich gegenseitig [3]. Zum anderen sind durch die erforderlichen genauen Dimensionierungsverfahren für diese Ventile viele Parameter der Thyristoren bekannt und liegen in statistisch auswertbaren Formen vor – eine Voraussetzung, welche die Anwendung des Verfahrens erst ermöglicht. Außerdem liegen auch genauere Kenntnisse über das Verhalten der Kühldosen und ihr Zusammenspiel mit den zweiseitig gekühlten Halbleiterbauelementen vor [5, 6]. Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt ist die Tatsache, daß die starke Konkurrenzsituation auf dem Gebiet der Hochspannungsstromrichter möglichst optimale und genaue Vorausberechnungen über das Verhalten und die Verluste der Stromrichter erfordern. Die Statistik ermöglicht hier Vorausberechnungen von Konfidenzintervallen der zu erwartenden Verluste.

Für die thermische Dimensionierung der Stromrichter sind in erster Linie die Thyristoren und Kühldosen entscheidend. Andere die Dimensionierung sogar gravierend

bestimmende Daten, wie die maximale Umgebungstemperatur der Anlage, der Einfluß der Rückkühlung usw., werden hier nicht weiter betrachtet, sondern als unbeeinflussbar vorgegeben angenommen. Eingangsgröße der Rechnung sei also ein bestimmter Volumenstrom des Kühlmittels für die gesamte Anlage bei einer festen (maximalen) Zuflußtemperatur. Außerdem wird ein fester Arbeitspunkt der maximalen Beanspruchung des Stromrichters, d.h. der Punkt der maximalen Thyristorverlustleistung (im allgemeinen maximaler Betriebsstrom bei maximaler Netzspannung), der Dimensionierung zugrunde gelegt. Von diesen Werten ausgehend berechnet man die Verteilung der Sperrschichttemperaturen in den Halbleiterbauelementen. Diese Verteilung, die auch Schlußfolgerungen auf die Toleranzgrenzen zuläßt, gestattet dann Aussagen über das Dimensionierungsrisiko, vor allem in Hinblick auf Fehlerfälle (Kurzschlüsse, Wechselrichterkippen). Ergeben sich hier noch Reserven, so könnten entweder die zulässigen Ströme heraufgesetzt, die Kühlanlage verkleinert oder das gesamte „Basic-Design“ verändert werden (kleinere Reihenschaltungsanzahl bei höherem Strom).

2 Statistisch aufbereitete Daten der eingesetzten Bauelemente

2.1 Daten der Thyristoren

2.1.1 Elektrische Eigenschaften

Durch Messungen wurden die für die Verluste maßgeblichen Eigenschaften von 180 Thyristoren des Typs AEG T 2200 N 3600 ... 4200 untersucht, d.h., es wurde eine Tabelle mit den Durchlaßspannungs- und Sperrverzugsladungsklassen aufgestellt.

Zuerst wurde geprüft, ob die Durchlaßspannung U_T der Thyristoren mit der Sperrverzugsladung Q_{rr} korreliert (Bild 1, rechts unten). Die durchgeführten Tests zeigten, daß beide Größen – wie auch theoretisch zu erwarten –

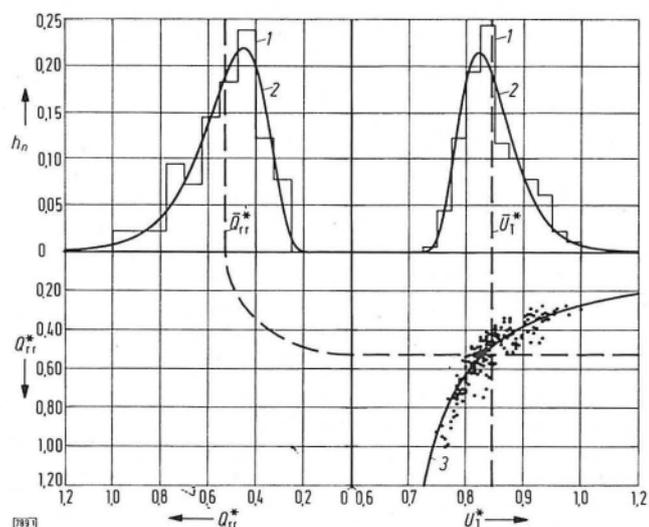


Bild 1. Korrelationsfeld von Durchlaßspannung und Sperrverzugsladung von 180 Thyristoren des Typs AEG T 2200 N 3600 ... 4200 (Anmerkung: In das Spektrum wurde eine empirische Regressionsfunktion 3 der Art $Q_{rr} = a_{regr} / (b_{regr} + U_T)$ eingezeichnet; die Koeffizienten wurden mit der Methode der kleinsten Quadrate errechnet)

- 1 empirische Verteilung
- 2 dreiparametrische logarithmische Normalverteilung
- 3 empirische Regressionsfunktion

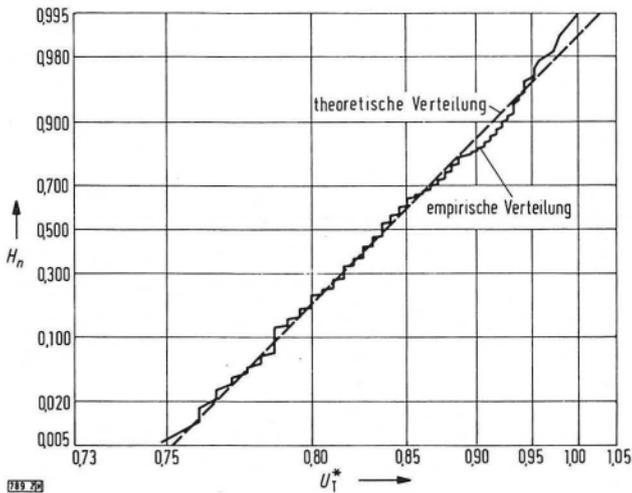


Bild 2. Durchlaßspannungsverteilung von 180 Thyristoren des Typs AEG T 2200 N 3600...4200 in einem definierten Arbeitspunkt (Wahrscheinlichkeitsnetz der dreiparametrischen logarithmischen Normalverteilung mit einem Lageparameter $U_0^* = U_0/U_{Tmax} = 0,680$)

hochgradig negativ korreliert sind. Thyristoren mit einer großen Durchlaßspannungsklasse weisen eine niedrige Sperrverzugsladungsklasse auf und umgekehrt (detaillierte Daten können [6] entnommen werden).

Außerdem wurde getestet, ob die beiden Randverteilungen an eine theoretische Verteilung anpaßbar sind. In beiden Fällen wurden der χ^2 -Anpassungstest und die Lilliefors-Modifikation des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests auf eine Normalverteilung [7] auf einem Signifikanzniveau von 1 % abgelehnt. Da beide Verteilungen linkssteil sind (Bild 1, oben), wurden Anpassungstests auf das Vorliegen einer dreiparametrischen logarithmischen Normalverteilung vorgenommen, die bei einem Signifikanzniveau von 2,5 % nicht abgelehnt wurden. Bild 2 und 3 zeigen die empirischen Verteilungen der Durchlaßspannungs- und der Sperrverzugsladungsklassen der 180 Thyristoren zusammen mit den theoretischen Verteilungen, deren Parameter mit der Maximum-Likelihood-Methode [8] ermittelt wurden.

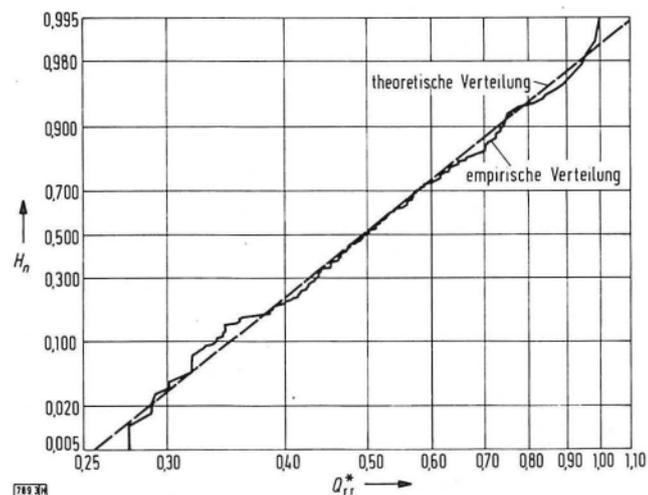


Bild 3. Verteilung der Sperrverzugsladung von 180 Thyristoren des Typs AEG T 2200 N 3600...4200 in einem definierten Arbeitspunkt (Wahrscheinlichkeitsnetz der dreiparametrischen logarithmischen Normalverteilung mit einem Lageparameter $Q_0^* = Q_0/Q_{rr,max} = 0,102$)

2.1.2 Thermische Eigenschaften

Die thermischen Widerstände der Thyristoren sind – wie bereits erwähnt – erheblichen statistischen Schwankungen unterworfen. Diese Problematik wurde in [2] näher untersucht und mit Beispielen belegt. Man kann davon ausgehen, daß die thermischen Widerstände der Anoden- und der Katodenseite der Thyristoren näherungsweise normalverteilt und unabhängig voneinander sind.

2.1.3 Korrelation zwischen thermischen und elektrischen Eigenschaften

Es wurden statistische Tests auf Unabhängigkeit der thermischen Widerstände und der elektrischen Parameter von Thyristoren durchgeführt [6]. Dabei ließ sich kein signifikanter korrelativer Zusammenhang zwischen diesen Werten nachweisen. Auch theoretisch ist ein solcher Zusammenhang nicht zu erwarten.

2.2 Daten der Kühldosen

In [5] wurden die thermischen Eigenschaften der Kühldosen untersucht. Dabei zeigte sich, daß sich die Temperaturen auf den beiden Seiten der Kühldosen mit der Gleichung

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & 1 \\ R_{21} & R_{22} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ T_A \end{pmatrix} \quad (1)$$

bestimmen lassen. Die vier thermischen Parameter R_{11}, R_{12}, R_{21} und R_{22} , vor allem aber R_{11} und R_{22} , weisen größere Exemplarstreuungen auf. Die statistischen Untersuchungen in [6] ergaben, daß man aufgrund des Zahlenmaterials nicht der Hypothese widersprechen kann, daß die das Ergebnis

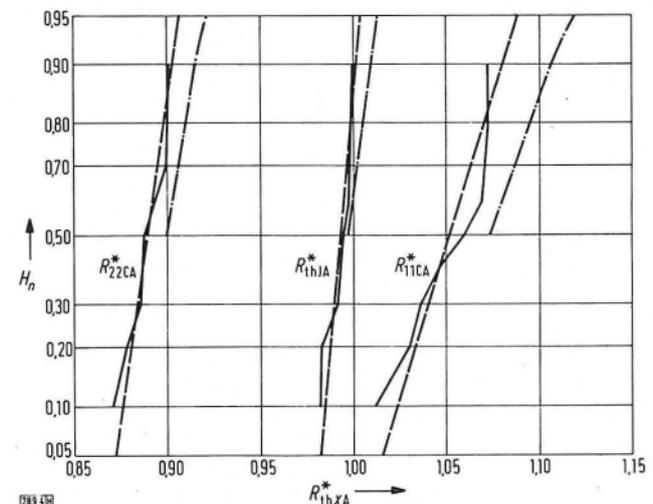


Bild 4. Verteilungen der thermischen Widerstände von neun Kühldosen, die bei konstantem Druckfall zusammen mit Thyristoren, vom Typ AEG T 2200 N 3600...4200 betrieben werden (Anmerkung: Wahrscheinlichkeitsnetz der Normalverteilung; zu der empirischen (—) und der theoretischen Verteilung (---) sind noch die einseitigen oberen Toleranzgrenzen (-.-.-) mit einer statistischen Sicherheit von $\beta = 0,95$ eingezeichnet; Voraussetzung zur Berechnung ist das Vorliegen einer normalverteilten Grundgesamtheit)

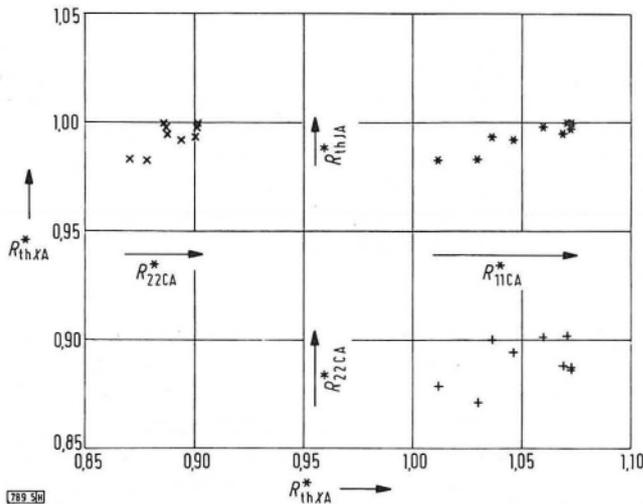


Bild 5. Streudiagramm der stationären thermischen Widerstände von neun Kühldosen, die bei konstantem Druckfall zusammen mit Thyristoren vom Typ AEG T 2200 N 3600 ... 4200 betrieben werden (* Wertepaar $R_{thJA}^* - R_{thXA}^*$; + Wertepaar $R_{11CA}^* - R_{22CA}^*$; x Wertepaar $R_{thJA}^* - R_{22CA}^*$)

dominierenden Kenngrößen R_{11} und R_{22} normalverteilt und unabhängig sind, wenn man berücksichtigt, daß zwischen diesen beiden Werten eine partielle Korrelation über den Druckfall der Kühldosen wahrscheinlich ist. Stellt man nun in Rechnung, daß die Kühldosen in Anlagen mit gleichem Druckfall betrieben werden – der Kühlmittelkreislauf in Hochspannungsventilen wird im allgemeinen parallel gestaltet [3, 4] –, so wird die obige Hypothese für den konkreten Anwendungsfall noch unterstützt, denn im Gegensatz zum praktischen Einsatz werden bei Labormessungen in der Regel definierte Kühlmittelvolumenströme und nicht definierte Druckfälle eingestellt.

Bild 4 zeigt die Verteilungen und Bild 5 das Spektrum der thermischen Parameter der Kühldosen bei einem Betrieb mit konstantem Druckfall. Die ebenfalls eingezeichneten R_{thJA}^* -Werte (thermische Widerstände zwischen Sperrschicht und Kühlmittelzufluß) sind mit als konstant angenommenen thermischen Widerständen des Halbleiterbauelements für die unendlich lange Säule aus Thyristoren und Kühldosen errechnet worden.

Da der Umfang der Stichprobe mit neun relativ klein ist, sind die errechenbaren Konfidenzgrenzen für die Verteilungsparameter recht grob. Diese Ungenauigkeiten werden sich bis hin in das Ergebnis der zu berechnenden Sperrschichttemperaturverteilung bemerkbar machen. Diese Schwierigkeiten lassen sich umgehen, wenn bei der Simulation der Kühldoseneigenschaften an den Konfidenzgrenzen entlang gerechnet wird. Ist der simulierte Wert der standardisierten Normalverteilung größer als Null, wird mit den oberen Grenzen der Konfidenzintervalle für μ und σ , ist er kleiner als Null, wird ebenfalls mit der oberen Konfidenzgrenze für μ und der unteren Konfidenzgrenze für σ bewertet. Damit liegt man auf der sicheren Seite [1]; wie sich zeigen wird, ist die dadurch bedingte berechnete Temperaturerhöhung in dem ausgeführten Beispiel nur etwa 0,2 K bis 0,3 K.

3 Monte-Carlo-Simulation

Zur Berechnung der interessierenden Temperatur-Verteilung wird die Monte-Carlo-Simulation verwendet [9–14]. Prinzipiell bestehen bei der Simulation zwei Möglichkeiten.

Einmal kann man die Simulation mit den ausgemessenen Realisierungen aus der Grundgesamtheit vornehmen und diese zufällig auswählen. Die andere Möglichkeit besteht darin, die berechneten theoretischen Verteilungen zu simulieren. Beide Methoden haben Vor- und Nachteile. Der Theorie besser gerecht wird eine Simulation der theoretischen Verteilungen, bei der auch Zwischenwerte und sogar Werte außerhalb der gemessenen Realisierungen Anwendung finden können. Im anderen Fall findet eine exaktere Berücksichtigung der bestehenden Verteilungen statt, da die theoretischen Verteilungen bei großen ausgemessenen Stückzahlen nur selten die praktisch vorhandenen widerspiegeln.

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, die Berechnung der Leistungsverteilung von der Berechnung der Temperaturverteilung zu trennen und separat auszuführen.

3.1 Leistungsverteilung

Auf der Basis der in Bild 1 bis 3 angegebenen elektrischen Daten wurde die Verlustleistungsverteilung in den Thyristoren eines Stellers zur Blindleistungskompensation errechnet. Die Verlustleistung in einem Hochspannungsthyristor setzt sich aus der normalen Durchlaßverlustleistung und den hier nicht zu vernachlässigenden Ein- und Ausschaltverlusten zusammen. Während die Einschaltverluste mit steigender Durchlaßspannung auch größer werden, sinken die Ausschaltverluste entsprechend dem in Bild 1 gezeigten korrelativen Zusammenhang. Die sich ergebende Verlustleistungsverteilung, die in Bild 6 dargestellt ist, lehnt sich weitgehend an die Durchlaßspannungsverteilung von Bild 2 an, da die Durchlaßverluste weit überwiegen.

Hier wurde eine Berechnung mit den diskreten Werten der Thyristoren durchgeführt. Dafür gab es – neben dem bereits oben erwähnten – zwei Gründe: Erstens liegt eine relativ große Stichprobe vor, und zweitens kann mit der so durchgeführten Simulation dem korrelativen Zusammenhang zwischen Durchlaßspannung und Sperrverzugsladung am besten entsprochen werden.

Die hier berechneten Parameter der Verteilung werden als Eingangsgrößen für die Simulation der Temperaturverteilung verwendet. Dabei wird die Verteilung auch bei der Simulation abgeschnitten, und zwar genau bei dem Wert, der sich als Maximalwert bei der Leistungssimulation ergibt,

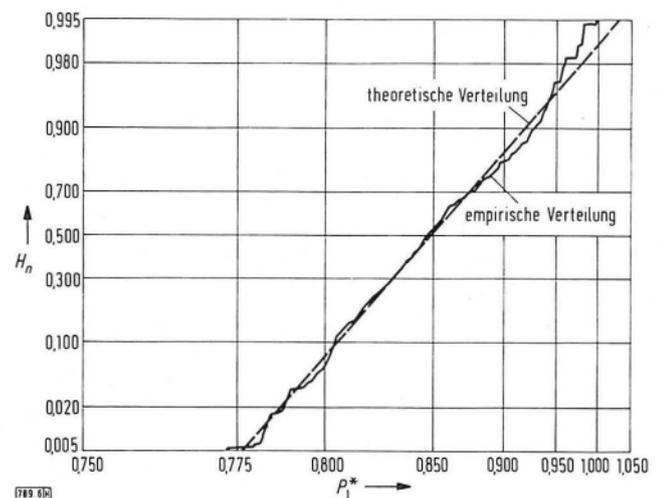


Bild 6. Verlustleistungsverteilung in den Thyristoren eines Stellers (Wahrscheinlichkeitsnetz der dreiparametrischen logarithmischen Normalverteilung mit einem Lageparameter $P_0^* = P_0/P_{Jmax} = 0,728$)

da bei der Stückprüfung der Thyristoren die Exemplare ausgesondert werden, deren Durchlaßspannung einen bestimmten, typabhängig festgelegten Grenzwert überschreitet.

Anmerkung

Diese Wahl ist nicht frei von einer gewissen Willkür. Es ist nicht auszuschließen, daß in der Grundgesamtheit noch weitere Thyristoren mit der maximal zulässigen Durchlaßspannungsklasse existieren, die aber eine höhere Sperrverzögerungsladung Q_{rr} aufweisen und damit eine höhere Ausschaltverlustleistung haben, als der eine vorhandene Thyristor mit dem Grenzwert der U_T -Klasse. So könnte man eine höhere maximale Verlustleistung P_{Jmax} festlegen; eine genauere Schätzung ist aber schwierig, der Wert dürfte nicht wesentlich über dem festgelegten liegen.

3.2 Temperaturverteilung

3.2.1 Gleichungssystem der endlich langen Säule

Ein Gleichungssystem für die endlich lange Säule wurde bereits in [3] abgeleitet. Das Ergebnis war ein tridiagonales Gleichungssystem zur Berechnung der Kristalltemperaturen in den Thyristoren.

3.2.2 Gleichungssystem der unendlich langen Säule

Stellt man sich eine unendlich lange Säule aus Thyristoren und Kühllosen mit jeweils unterschiedlichen Daten vor, so erhält man auch ein unendlich langes, tridiagonales Gleichungssystem. Dieses läßt sich nicht lösen und nicht einmal vollständig formulieren. Das Problem kann bewältigt werden, indem der n -te Thyristor über die n -te Kühllose an den ersten Thyristor gekoppelt wird; formal wird die Säule als geschlossener Kreis behandelt. Dann gelten folgende Gleichungen für den ersten und den n -ten Thyristor:

$$\begin{aligned}
 & - \frac{R_{21,n-1}}{N_n} T_{J,n-1} \\
 & + \left(\frac{R_{1,n-1} + R_{11,n-1}}{N_n} + \frac{R_{2,1} + R_{22,n}}{N_1} \right) T_{J,n} \\
 & - \frac{R_{12,n}}{N_1} T_{J,1} = \frac{R_{1,n-1} + R_{11,n-1} - R_{21,n-1}}{N_n} T_{A,n-1} \\
 & \quad + P_{J,n} + \frac{R_{2,1} + R_{22,n} - R_{12,n}}{N_1} T_{A,n} \quad (2)
 \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned}
 & - \frac{R_{21,n}}{N_1} T_{J,n} \\
 & + \left(\frac{R_{1,n} + R_{11,n}}{N_1} + \frac{R_{2,2} + R_{22,1}}{N_2} \right) T_{J,1} \\
 & - \frac{R_{12,1}}{N_2} T_{J,2} = \frac{R_{1,n} + R_{11,n} - R_{21,n}}{N_1} T_{A,n} \\
 & \quad + P_{J,1} + \frac{R_{2,2} + R_{22,1} - R_{12,1}}{N_2} T_{A,1}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

hier speziell mit

$$N_1 = (R_{1,n} + R_{11,n})(R_{2,1} + R_{22,n}) - R_{12,n} R_{21,n} \quad (4)$$

Zusammen mit den Gleichungen aus [3] ist ein zyklisch tridiagonales, lineares Gleichungssystem entstanden, das sich – ähnlich wie tridiagonale Gleichungssysteme – sehr effizient lösen läßt [15].

3.2.3 Simulation und Auswertung

Die im Abschnitt 2 berechneten theoretischen Verteilungen werden, wie z. B. in [10] und [11] beschrieben, auf dem Rechner simuliert. Mit den sich dann ergebenden Werten für die Parameter der Thyristoren und Kühllosen wird das entsprechende Gleichungssystem gelöst.

Die Anwendung varianzreduzierender Methoden [14] ist hier nur schwer möglich. Die Verwendung antithetischer Zufallsgrößen kommt nicht in Frage, weil nicht nur der Erwartungswert der Sperrschichttemperaturen, sondern vor allem deren Verteilung interessiert.

Antithetische Zufallsgrößen setzen die Streuungen herab, rufen hier also eine Verfälschung des Ergebnisses hervor. Auch die Anwendung der parallelen Doppelsimulation stößt auf Schwierigkeiten, wenn der Einfluß der Säulenlänge auf die Temperaturverteilungen untersucht werden soll. Zwar lassen sich dieselben Zufallszahlen für die einzelnen Variablen ohne Schwierigkeiten wieder erzeugen, aber sie treffen nicht „aneinander“, so daß sich gegenüber der konsekutiven Doppelsimulation keine Varianzreduktion ergibt.

Mit der Lösung der Gleichungssysteme erhält man eine große Anzahl von berechneten Sperrschichttemperaturen. Diese werden sortiert, und es werden einseitige Toleranzintervalle der Verteilung errechnet. Da keine Normalverteilung vorliegt, mußte mit nichtparametrischen Toleranzintervallen gerechnet werden [16]. Es wird das größte natürliche l bestimmt, welches die Ungleichung

$$(4k - 2l + 2)(1 - m)/(1 + m) \geq \chi^2_{2l;1-\alpha} \quad (5)$$

gerade noch erfüllt.

Die Quantile der χ^2 -Verteilung wurden mit den in [17] wiedergegebenen Unterprogrammen berechnet. Das gesuchte einseitige obere Toleranzintervall ist dann gerade

$$[-\infty; x_{(k-l+1)}] \quad (6)$$

4 Ergebnisse anhand eines Beispiels

Bild 7 bis 9 zeigen die Ergebnisse der Simulation des Rechenbeispiels. Dabei sind die Ventile bei jeder Simulation unterschiedlich gestaltet, um den Einfluß des Aufbaus auf die Temperaturverteilung zu zeigen.

Im Bild 7 ist der Einfluß der Säulenlänge (Anzahl n der Halbleiterbauelemente in der Säule) auf die Temperaturverteilung dargestellt. Bild 8 zeigt die Temperaturverteilung in einem Ventil mit sieben Thyristorplätzen und nur sechs eingesetzten Thyristoren. Der freie Thyristorplatz ist mit einem „Dummy“ aus Aluminium besetzt. Interessant ist besonders der Einfluß der Lage des Dummys. Die Anordnung des Dummys in der Mitte (Platz $d = 4$) der Säule verursacht eine Senkung der Sperrschichttemperaturen gegenüber einem Platz am Rande ($d = 1$) um etwa 0,8 K.

Bild 9 zeigt den Einfluß der Rechnung an den Konfidenzgrenzen der Kühllosenparameter gegenüber einer Rechnung

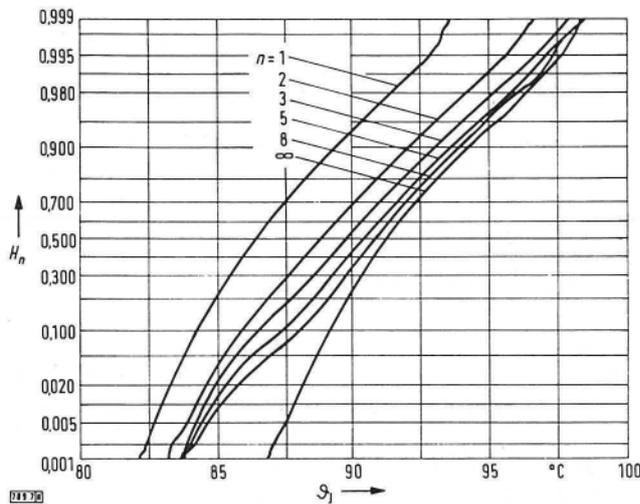


Bild 7. Einfluß der Länge der Säule (Parameter: Anzahl n der Thyristorplätze) auf die sich einstellende Verteilung der Sperrschichttemperaturen in den Thyristoren (vollbestückte Säulen; Rechnung mit den empirisch ermittelten Kühl Dosenparametern; Wahrscheinlichkeitsnetz der Normalverteilung)

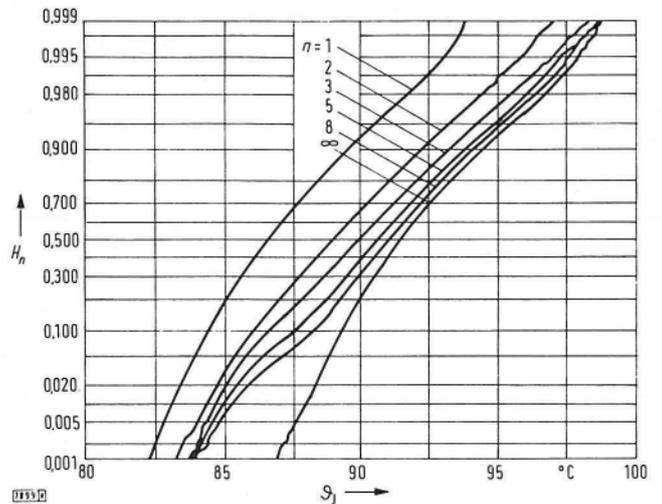


Bild 9. Einfluß der Länge der Säule (Parameter: Anzahl n der Thyristorplätze) auf die sich einstellende Verteilung der Sperrschichttemperaturen in den Thyristoren (vollbestückte Säulen; Rechnung an der oberen Konfidenzgrenze der empirisch ermittelten Kühl Dosenparameter; Wahrscheinlichkeitsnetz der Normalverteilung)

mit den direkt ermittelten Werten für den Erwartungswert und die Standardabweichung in Bild 7 und 8.

Mit Hilfe der mit Gl. (5) berechneten Toleranzintervalle kann man ermitteln, daß die „sichere“ Rechnung an den Konfidenzgrenzen der Kühl Dosenparameter keine größeren Temperaturdifferenzen als 0,3 K hervorrufen.

Die berechneten Verteilungen sind an den Grenzen recht „unruhig“. Dies ist auf die auch der Simulation zugrunde liegenden Zufälligkeiten zurückzuführen und prinzipbedingt. Diese Zufälligkeiten werden durch die Berechnung der Toleranzintervalle nach den Gln. (5) und (6) „herausgerechnet“.

Die herkömmliche Dimensionierung hätte Sperrschichttemperaturen von

$$\vartheta_J = R_{thJA} P_{Jmax} + \vartheta_A = 101,5 \text{ °C} \quad (7)$$

für die Dimensionierung mit P_{Jmax} und von

$$\vartheta_J = R_{thJA} P_{J90} + \vartheta_A = 99,7 \text{ °C} \quad (8)$$

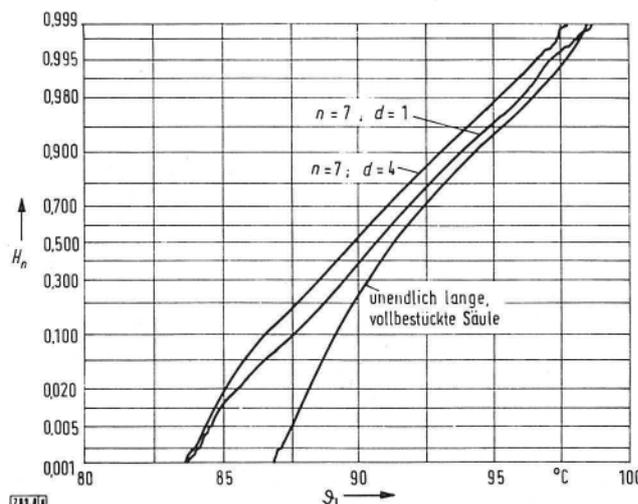


Bild 8. Einfluß der Lage d eines Dummies in der Säule (n Anzahl der Thyristorplätze) auf die sich einstellende Verteilung der Sperrschichttemperaturen in den Thyristoren (teilbestückte Säulen; Rechnung mit den empirisch ermittelten Kühl Dosenparametern; Wahrscheinlichkeitsnetz der Normalverteilung)

für die Dimensionierung mit dem 90%-Wert der Durchlaßspannung erbracht.

Dazu ist noch zu bemerken, daß der Wert R_{thJA} der unendlich langen Säule auf der Basis des 80%-Toleranzintervalls der Kühl Dose errechnet wurde. Bei Verwendung einer höheren statistischen Sicherheit für die Kühl Dosenparameter wären die konventionell ermittelten Sperrschichttemperaturen noch höher.

5 Anwendung des Verfahrens

Die Anwendungsmöglichkeiten dieses Verfahrens sind nicht auf Hochspannungsstromrichter beschränkt. Vorteile sind vor allem für Fälle abhängiger Kühlung zu erwarten, d.h., wenn sich mehrere Bauelemente in ihrer Erwärmung gegenseitig beeinflussen. Dies ist z. B. bei der Montage mehrerer Halbleiterbauelemente, z. B. in Modulbauweise, auf einem Kühlkörper der Fall. Auch tritt dieser Effekt bei der Siedekühlung – hier allerdings nur beschränkt – auf. Ein weiterer Anwendungsfall ist bei Luftkühlung gegeben, wenn mehrere Wärmequellen seriell angeordnet sind.

Hauptschwierigkeit bei der Anwendung dürfte die Beschaffung ausreichend gesicherter Daten sein. Vor allem sind Messungen an Kühleinrichtungen relativ aufwendig, da neben dem konstruktiven Aufwand auch lange Meßzeiten, bedingt durch die großen thermischen Zeitkonstanten, erforderlich sind. Angaben über die Verteilung von Durchlaßverlusten und thermischen Widerständen müßten von den Halbleiterherstellern geliefert werden.

6 Bedeutung der Formelzeichen und Indizes

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

6.1 Formelzeichen

d	Platz des Dummies in der Säule
h_n	relative Häufigkeit
H_n	relative Summenhäufigkeit
k	Umfang der Stichprobe
m	minimale Trefferwahrscheinlichkeit
n	Anzahl der Halbleiterbauelemente in der Säule

N	Nenner in einer Gleichung
P	(Verlust-) Leistung
P^*	auf die maximale Verlustleistung P_{Jmax} bezogene Leistung P
Q_{rr}	Sperrverzögerungsladung der Thyristoren in einem bestimmten Arbeitspunkt (Sperrverzögerungsladungsklasse)
Q_{rr}^*	auf die maximale Sperrverzögerungsladung $Q_{rr,max}$ bezogene Sperrverzögerungsladung Q_{rr}
\bar{Q}_{rr}^*	Mittelwert von Q_{rr}^* (der Stichprobe)
R	thermischer Widerstand
R^*	auf den maximalen thermischen Widerstand $R_{thJA,max}$ bezogener thermischer Widerstand R
T	thermodynamische Temperatur
U_T	Durchlaßspannung der Thyristoren in einem bestimmten Arbeitspunkt (Durchlaßspannungsklasse)
U_T^*	auf einen festgelegten Maximalwert $U_{T,max}$ bezogene Durchlaßspannung U_T
\bar{U}_T^*	Mittelwert von U_T^* (der Stichprobe)
$x_{(i)}$	i -te Realisierung in der sortierten Stichprobe
α	Irrtumswahrscheinlichkeit (Signifikanzniveau)
ϑ	Celsius-Temperatur
μ	Parameter der Normalverteilung (Erwartungswert)
σ	Parameter der Normalverteilung (Standardabweichung)

6.2 Indizes

A	Kühlmittelzufluß (ambient)
C	Gehäuse des Halbleiterbauelements (case)
J	Sperrschicht (junction)
th	thermisch
X	„Platzhalter“ für die verschiedenen Bezugspunkte der thermischen Parameter und Widerstände
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] Hauschild, W.; Mosch, W.: Statistik für Elektrotechniker. Berlin: Verl. Technik, 1984
- [2] Schwarz, J.: Stationäre thermische Widerstände von Halbleiterbauelementen in Scheibenzellenbauweise – Messung und Auswertung. Arch. f. Elektrotech. 70 (1987) (Veröff. in Vorbereitung)

- [3] Schwarz, J.: Stationäres thermisches Verhalten von Halbleiterbauelementen und Kühldosen im Säulenverband. etzArchiv 8 (1986) H. 7, S. 223–230
- [4] Beringer, C.; Hengsberger, J.; Thiele, G.: HGÜ-Ventilentwicklung. etz Elektrotech. Z. 102 (1981) H. 25, S. 1338–1342
- [5] Schwarz, J.: Stationäre thermodynamische Eigenschaften von Kühldosen. etzArchiv 8 (1986) H. 6, S. 207–212
- [6] Schwarz, J.: Correlation coefficients by Bravais-Person, Spearman and Kendall. Instrum. a. Comput. 5 (1987) (Veröff. in Vorbereitung)
- [7] Sachs, L.: Angewandte Statistik. Berlin: Springer, 1984
- [8] Schwarz, J.: Estimation of parameters and fitness tests in the lognormal distribution. Instrum. a. Comput. 4 (1986) (Veröff. in Vorbereitung)
- [9] Buslenko, N. S.; Schreider, J. A.: Die Monte-Carlo-Methode und ihre Verwirklichung mit elektronischen Digitalrechnern. Leipzig: Teubner, 1964
- [10] Hengartner, W.; Theodorescu, R.: Einführung in die Monte-Carlo-Methode. München: Hanser, 1978
- [11] Ermakow, S. M.: Die Monte-Carlo-Methode und verwandte Fragen. München: Oldenbourg, 1975
- [12] Bauknecht, K.; Kohlas, J.; Zehnder, C. A.: Simulationstechnik. Berlin: Springer, 1976
- [13] Niemeyer, G.: Systemsimulation. Frankfurt/M.: Akad. Verl.-ges., 1973
- [14] Köcher, R.; Matt, G.; Oertel, C.; Schneeweiß, H.: Einführung in die Simulationstechnik. Frankfurt/M.: DGOR (Dt. Ges. f. Oper. Res.), 1972
- [15] Engeln-Müllges, G.; Reutter, F.: Formelsammlung zur Numerischen Mathematik mit Pascal-Programmen. Mannheim: Bibliographisches Inst., 1985
- [16] Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K.-H.: Statistik. 1. Aufl., München: Oldenbourg, 1982
- [17] Mardia, K. V.; Zemroch, P. J.: Tables of the F- and related distributions with algorithmus. London: Academic Press, 1978

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 und wurde 1986 an der Technischen Universität Berlin promoviert. Dazwischen arbeitete er längere Zeit im VEB Elektroprojekt und Anlagenbau in Berlin (Ost), und vor fünf Jahren nahm er seine jetzige Tätigkeit auf.