

# Entwicklung der Thyristor-Bauelemente bei Siemens/Infineon

Jörg Dorn, Warstein

erschienen in: ETG Journal 2019, H. 2, S. 66-69

## Inhalt

1. Firmenhistorie .....	1
2. Meilensteine der Thyristorentwicklung .....	3
2.1 Siliziumfläche und Sperrspannung .....	3
2.2 Direkte Lichtzündung von Thyristoren .....	4
2.3 Weitere Meilensteine der Thyristorentwicklung .....	7
3. Thyristoren in selbstgeführten Stromrichtertopologien .....	9
4. Zuverlässigkeit und Felderfahrung .....	10
5. Literatur.....	11

## 1. Firmenhistorie

Nach dem zweiten Weltkrieg starteten die beiden Firmen AEG und Siemens etwa zeitgleich ihre Aktivitäten auf dem Gebiet der Leistungshalbleiter. Während AEG 1945 in Warstein-Belecke ein Werk zur Herstellung von Selengleichrichtern gründete, begann Eberhard Spenke 1946 im kleinen fränkischen Ort Pretzfeld in einem ehemaligen Schloss mit dem Aufbau eines Laboratoriums der Siemens-Schuckert-Werke. Dort sollten die durch den Krieg in alle Himmelsrichtungen verstreuten Siemens-Forscher wieder zusammengeführt werden. Bahnbrechende Erfindungen zur Entwicklung von Leistungshalbleitern fanden dort dann auch ihren Ursprung, u.a. das sogenannte Siemens-Verfahren zur Herstellung von Reinstsilizium.



**Bild 1** Schloss im fränkischen Pretzfeld, in dem 1946 durch E. Spenke ein Laboratorium der Siemens-Schuckert-Werke gegründet wurde; Quelle: Infineon Bipolar

Über einige Jahrzehnte liefen die Aktivitäten auf dem Gebiet der Silizium-Leistungshalbleiter der beiden Firmen AEG und Siemens parallel. Bis in die 1980er Jahre gab es Kooperationen und gemeinsame Projekte im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft HGÜ.

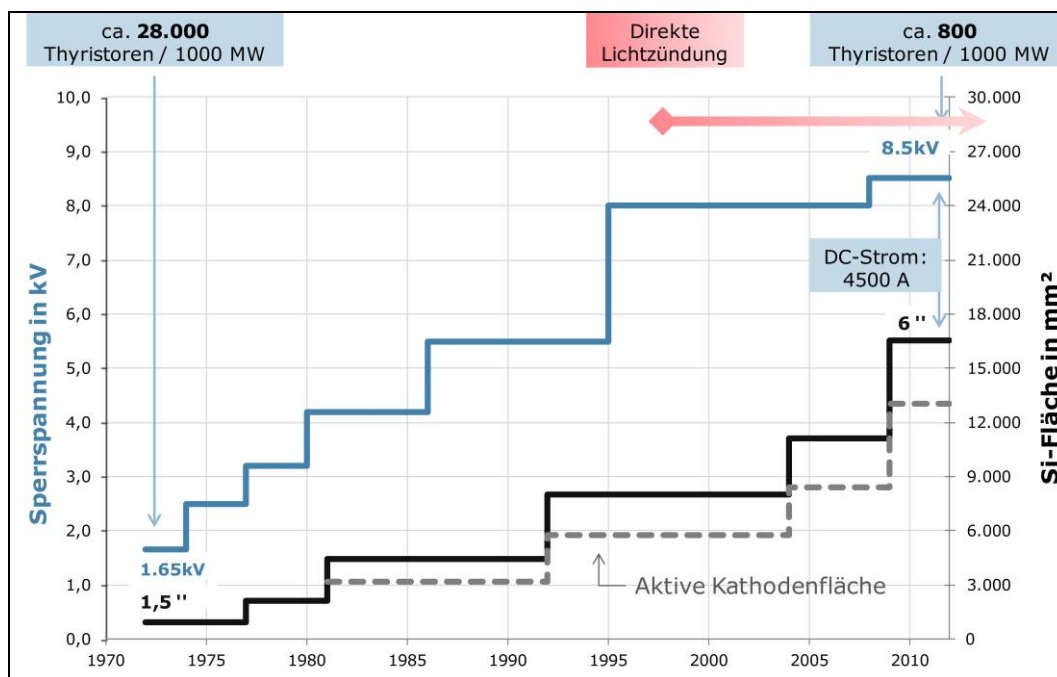
Im Jahr 1990 führten die beiden Firmen ihre Hochleistungshalbleiteraktivitäten in dem Joint Venture „eupec“ zusammen. Einige Jahre später wurde eupec eine 100-prozentige Tochter der Siemens AG. Als Siemens den Bereich Halbleiter 1999 ausgegliederte und als eigene Firma mit Namen „Infineon“ an die Börse brachte, wurde eupec schließlich eine Tochter von Infineon und 2005 in die Infineon AG integriert.

In den letzten Jahren nun ist der Markt für HGÜ-Anlagen stark gewachsen. Hochsperrende Thyristoren sind für dieses Geschäft Schlüsselkomponenten, so dass 2007 ein Joint Venture unter 40-prozentiger Beteiligung von Siemens gegründet wurde. In diesem Joint Venture mit dem Namen „Infineon Technologies Bipolar GmbH & Co. KG“ und mit Sitz in Warstein werden Thyristoren und Dioden entwickelt und gefertigt.

## 2. Meilensteine der Thyristorentwicklung

### 2.1 Siliziumfläche und Sperrspannung

Die Entwicklung der Thyristortechnik für HGÜ-Anwendungen war bei AEG, Siemens und Infineon wie bei allen Herstellern im Wesentlichen durch Erhöhungen der Sperrspannungen und des Siliziumdurchmessers der Bauelemente bestimmt. Im ersten HGÜ-Projekt mit Thyristoren, Cabora Bassa/Mosambik, kamen noch Thyristoren mit einem Durchmesser von 1,5 Zoll und einer Sperrspannung von 1.650 V zum Einsatz. Im nachfolgenden Bild 2 ist die Entwicklung der Sperrspannungen und Siliziumflächen von Thyristoren in HGÜ-Anlagen dargestellt, d.h. die Jahreszahl zeigt die erstmalige Lieferung in eine HGÜ-Übertragung an. Die durchgezogene Linie stellt dabei die Siliziumgesamtfläche, die gestrichelte Linie die aktive Kathodenfläche dar, d.h. die Fläche der Gatestruktur und des Randbereiches ist von der Gesamtsiliziumfläche subtrahiert.



**Bild 2** Entwicklung von Sperrspannung und Siliziumfläche; Quelle: Infineon Bipolar

Die heute leistungsfähigsten Thyristoren haben einen Siliziumdurchmesser von 145 mm und eine Sperrspannung von 8.500 V. Damit werden HGÜ-Übertragungssysteme mit einem DC-Dauerübertragungsstrom von 4.500 A realisiert. Während bei Cabora Bassa noch 28.000 Thyristoren pro 1.000-MW-Übertragungsleistung benötigt wurden, reichen heute ca. 800 Thyristoren pro 1.000-MW-Übertragungsleistung (Thyristoranzahl jeweils für Gleich- und Wechselrichter zusammen). Dies entspricht einer Reduzierung um den Faktor 35.

Relevant für die Auslegung der Stromrichter und die damit einhergehenden Anforderungen an die eingesetzten Thyristoren ist u. a. der auftretende Ventilstrom bei bestimmten Fehlerereignissen.

Insbesondere ist folgende Belastung zu berücksichtigen: Aufgrund eines Fehlers, z.B. durch einen Überschlag auf der DC-Übertragungsleitung, wird der Thyristor zunächst mit einem Stoßstrom mit einer Stromflussdauer von bis zu etwa 18 ms belastet und anschließend mit Vorwärtsspannung beansprucht. Ein 6-Zoll-Thyristor, hergestellt auf Basis von Infineon-Fertigungstechnologien, kann in diesem Fehlerfall einen Stoßstrom von mehr als 60 kA führen und danach eine Spannung von mindestens 7.000 V blockieren.

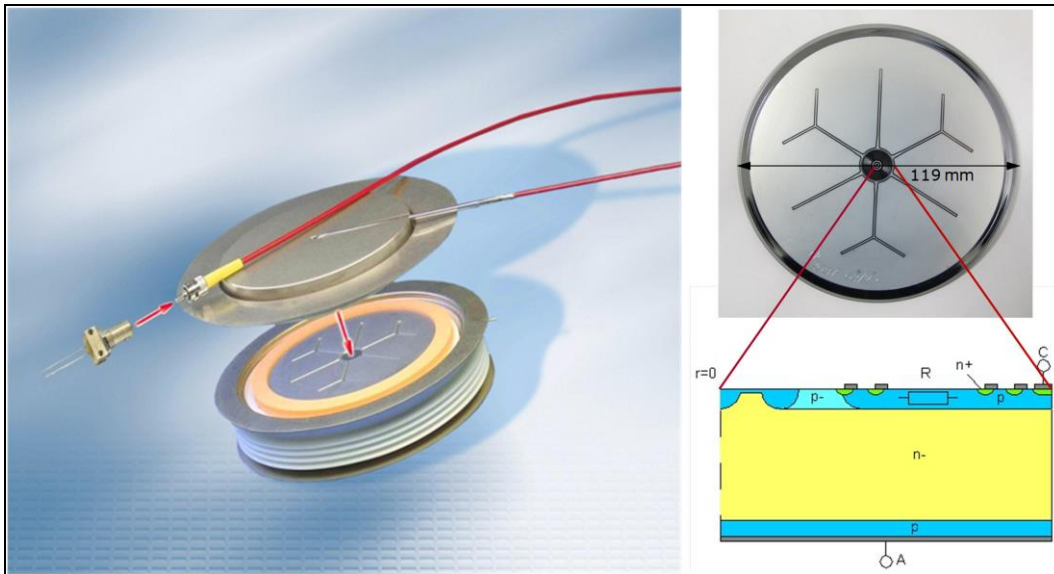
Solche 6-Zoll-Thyristoren kamen erstmals im Projekt Xiangjiaba – Shanghai zum Einsatz, in diesem Projekt wurde je eine Stromrichterstation von Siemens und ABB gebaut [1]. Die Anlage verbindet Xiangjiaba mit Shanghai über eine Strecke von über 2.000 km. Die Gleichspannung beträgt +/- 800 kV. Bei einem Dauergleichstrom von 4.000 A ergibt sich daraus eine Nennübertragungsleistung von 6.400 MW. Sowohl die Übertragungslänge als auch die Übertragungsleistung waren damit neue Superlative. Seit Mitte 2010 wird die Anlage kommerziell betrieben.

In der Zwischenzeit befindet sich eine weitere Anlage in China im Bau, bei der die gleichen Thyristoren zum Einsatz kommen. Bei einer identischen Übertragungsspannung von +/- 800 kV und einem Übertragungsstrom von 4.500 A ergibt sich somit eine Übertragungsnennleistung von 7.200 MW.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurden bei Infineon auch Thyristoren mit einer Sperrspannung von 13 kV gefertigt. Dabei stellte sich heraus, dass das Optimum der Verluste einer HGÜ-Anlage hinsichtlich Thyristorsperrspannung bei etwa 8 bis 8,5 kV liegt. Das heißt, dass beim Einsatz von Thyristoren mit höheren Sperrspannungen zwar die Anzahl der in Reihe zu schaltenden Bauelemente sinkt, die Gesamtverluste der Anlage aber dennoch steigen. Dies liegt an den mit der Siliziumdicke überproportional wachsenden Verlusten im Halbleiter.

## **2.2 Direkte Lichtzündung von Thyristoren**

Ein wichtiger Innovationsschritt in der Thyristortechnik bei Siemens/Infineon war die Einführung der direkten Lichtzündung mit integriertem Überspannungsschutz [2]. Bei dieser Technologie wird der Thyristor durch einen kurzen Lichtimpuls mit einer Wellenlänge im Bereich von 900 bis 950 nm und einer Lichtleistung in der Größenordnung von 10 mW, der auf die Siliziumoberfläche geleitet wird, direkt gezündet. Bereits in den 1980er Jahren haben sich verschiedene Hersteller intensiv mit der Lichtzündtechnik beschäftigt. Mit der Verfügbarkeit von leistungsstarken und zuverlässigen Laserdioden wurden 1997 die lichtzündbaren Thyristoren mit integriertem Überspannungsschutz zur Serienreife geführt. Mit einer Liefermenge von vielen 10.000 Stück haben sich diese Bauelemente in HGÜ-Anlagen sehr bewährt, so dass neben den elektrisch zündbaren Bauelementen die lichtzündbaren Thyristoren zu einem Standard in der HGÜ-Technik geworden sind.



**Bild 3** Direkt lichtzündbare Thyristortechnologie; Quelle: Siemens

In Bild 3 wird die Realisierung der direkten Lichtzündtechnik gezeigt. Auf der linken Seite ist die mechanische Umsetzung dargestellt. Ein vorgeformter Lichtleiter wird in die Nut des Kathodenkontakts eingelegt, so dass ein Lichtpuls durch ein Saphirglas direkt auf das lichtempfindliche Zentrum des Siliziums strahlt. Das Gehäuse des Thyristors ist dabei, wie bei Scheibenzellenbauelementen üblich, hermetisch dicht verschlossen.

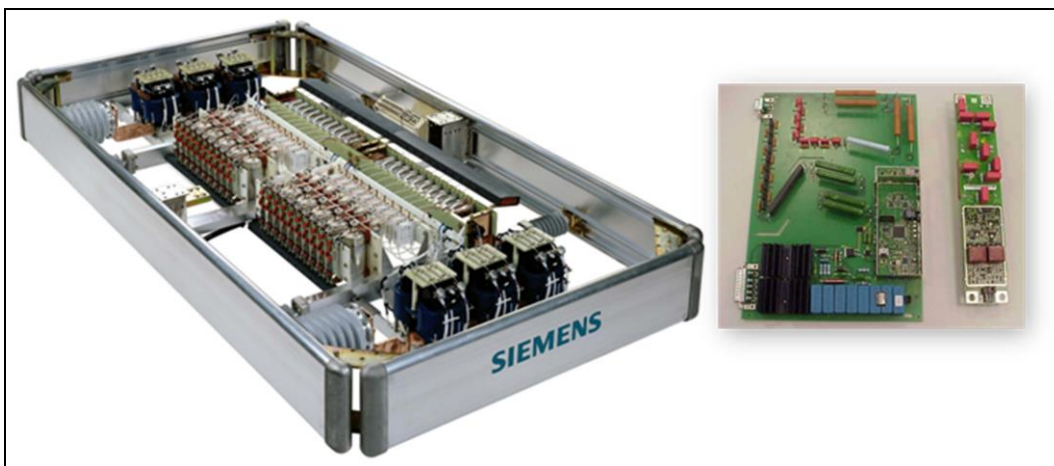
Rechts oben in Bild 3 ist ein Foto einer lichtzündbaren 5-Zoll-Thyristorscheibe zu sehen. Die silberfarbene große Fläche ist die Kathodenmetallisierung. Im Zentrum befindet sich die lichtempfindliche Zündstruktur von der aus sich über Verstärkerstufen, genannt auch Amplifying Gates, die Gatefingerstruktur verzweigt. Diese Verzweigung bewirkt, dass nach der Zündung schnell eine große Fläche des Bauelements zur Stromführung beiträgt. Die über diverse Diffusionsschritte hergestellte Zündstruktur mit dem integrierten Überspannungsschutz und den Verstärkerstufen sind in Bild 3 rechts unten im Schnitt dargestellt. Der dargestellte Bereich hat eine Abmessung von 8 mm. Dabei ist auf der Oberseite der Kathodenkontakt (C), auf der Unterseite der Anodenkontakt (A).

Durch das eingestrahelte Licht werden Ladungsträger im Zentrum des Thyristors erzeugt, die wie ein kleiner Gatestrom bei einem elektrisch zündbaren Thyristor wirken. Damit der Thyristor robust gegenüber einem schnellen Stromanstieg wird, ist ein monolithischer Widerstand zwischen dem zweiten und dritten Amplifying Gate integriert. Dieser begrenzt in den ersten wenigen Mikrosekunden den Strom in radialer Richtung des Thyristors. Bei geeigneter Dimensionierung dieses Widerstandes kann der Thyristor mit Stromanstiegsgeschwindigkeiten von einigen Kiloampere pro Mikrosekunde belastet werden.

Der integrierte Überspannungsschutz sorgt für ein kontrolliertes Einschalten des Thyristors bei Erreichen einer bestimmten Vorwärtsspannung. Diese Funktion ist im Zentrum durch die gekrümmten pn-Übergänge realisiert, siehe Bild 3 rechts unten. Diese führen zu einem

Zusammendrängen der Feldlinien in diesem Bereich, so dass bei Sperrspannungsbeanspruchung in Blockierichtung (auch Vorwärtsrichtung genannt) die Avalanche-feldstärke, bei der es zu einer Generierung von Ladungsträgern kommt, immer im Zentrum des Thyristors erreicht wird. Diese Ladungsträger wiederum wirken wie ein Gatestrom und führen zu einem sicheren und definierten Einschalten des Thyristors [3].

Derartige Thyristoren wurden erstmals mit einem Durchmesser von 4 Zoll in einem Prototypventil auf der HGÜ-Station in Celilo/USA eingesetzt. Zwei dieser Bausteine haben dabei ein Quecksilberdampfventil in einer bestehenden Anlage substituiert. Dabei waren diese unauffällig bis zum kompletten Ersatz der Quecksilberdampfventile der Stromrichterstation durch Ventile mit lichtzündbaren Thyristoren im Jahr 2004.



**Bild 4** Ventilbaustein mit lichtzündbaren Thyristoren (links) und Größenvergleich von Baugruppen für elektrisch und lichtzündbare Thyristoren (rechts); Quelle: Siemens

Durch den Einsatz von lichtzündbaren Thyristoren ergibt sich für den Anwender eine Reihe von Vorteilen. Mit einer sehr geringen Leistung ist eine einfache Ansteuerung der Thyristoren und ein robustes Verhalten bei Fehlerfällen realisierbar. Die Laserdioden befinden sich dabei auf Erdpotential, sind während des Betriebs zugänglich und bei Bedarf sogar austauschbar. Die Belastung der Laserdioden ist jedoch so gering, dass deren zu erwartende Lebensdauer mehr als 40 Jahre beträgt und diese somit keine regelmäßige Wartung erfordern.

Für den Überspannungsschutz wird keine Elektronik benötigt, da diese Schutzfunktion bereits im Thyristor integriert ist. Insgesamt führt dies zu weniger Komponenten in Elektronikbaugruppen auf Hochspannungspotential und damit letztendlich zu einer hohen Zuverlässigkeit des Gesamtsystems. Dies verdeutlicht auch der Vergleich von Elektronikbaugruppen für elektrisch- und lichtzündbare Thyristoren auf der rechten Seite in Bild 4.

Erstmals wurden lichtzündbare Thyristoren von Siemens/Infineon im Projekt Moyle kommerziell eingesetzt, einer Verbindung von Nordirland nach Schottland.



**Bild 5** Blick in die Ventilhalle der Station Ballycronan More der Anlage Moyle;  
Quelle: Infineon Bipolar

Die Übertragungsleistung dieser Anlage beträgt 500 MW bei +/- 250 kV und 1.000 A Übertragungsstrom. Insgesamt 1.872 lichtzündbare 4-Zoll-Thyristoren befinden sich hier im Einsatz.

Für höhere Übertragungsströme wurde 1999 ein lichtzündbarer Thyristor mit einem Siliziumdurchmesser von 5 Zoll eingeführt. Dieser Thyristortyp kam zunächst in SVC-Anlagen zum Einsatz, die Lieferung in ein kommerzielles HGÜ-Projekt erfolgte erstmals 2003.

Inzwischen wurden weit über 50.000 lichtzündbare Thyristoren für verschiedenste Anwendungen geliefert, u. a. auch an japanische Systemhersteller für die Erneuerung und den Neubau von HGÜ-Anlagen.

### **2.3 Weitere Meilensteine der Thyristorentwicklung**

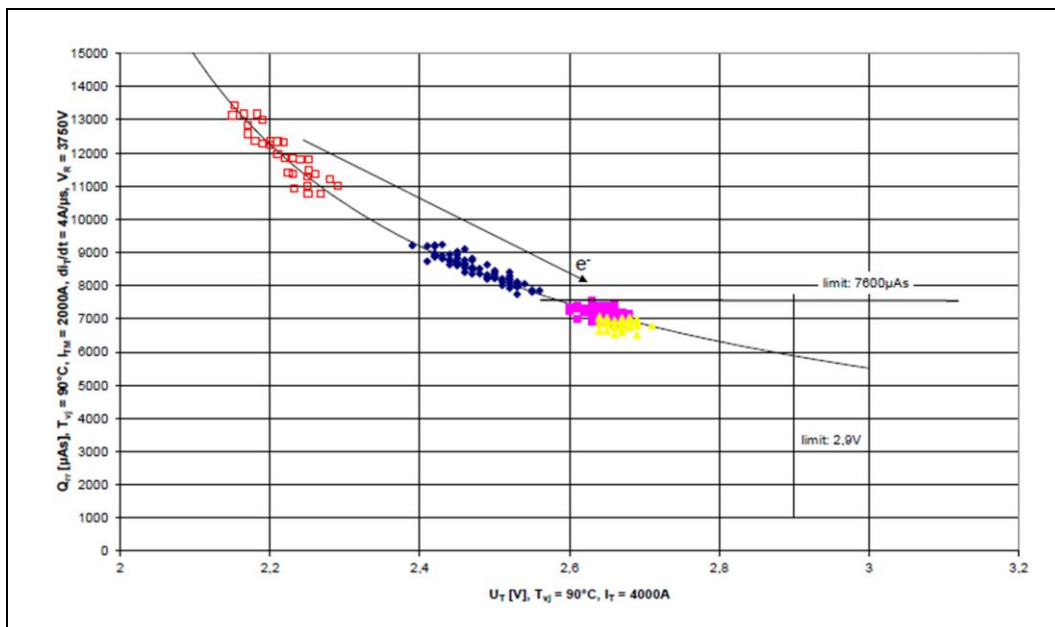
Weitere Meilensteine haben die Thyristortechnik geprägt und sind teilweise auch zum Standard für andere Bauelemente, wie z.B. für IGBTs, geworden [4].

So wurde beispielsweise in den 1970er Jahren die Grunddotierung des Siliziums mittels Neutronenbeschuss eingeführt. Dabei werden Siliziumatome in Phosphoratome umgewandelt.

Man erreicht damit eine sehr gute Homogenität der n-Grunddotierung, wodurch eine Ausnutzung der Avalanche-fähigkeit ermöglicht wird, also der Fähigkeit, den Thyristor für kurze Zeit von wenigen 100  $\mu\text{s}$  mit einem Sperrstrom von einigen Ampere in Rückwärtsrichtung zu belasten.

Hieraus ergibt sich eine reduzierte Reihenschaltzahl von Bauelementen im Ventil und damit Einsparungen von Platz, Kosten und Verlusten.

Ein weiterer wichtiger Schritt war die Einführung der Elektronenbestrahlung der Bauelemente in den 1980er Jahren. Dabei werden mittels Elektronenbestrahlung gezielte Schädigungen des Siliziumkristallgitters vorgenommen, die Ladungsträgerlebensdauer dabei reduziert und somit statische und dynamische Kennwerte gezielt eingestellt. Konkret wird mittels Elektronenbestrahlung die Durchlassspannung erhöht und die Sperrverzögerungsladung und Freiwerdezeit reduziert (Bild 6): Bauelemente mit Durchlassspannungen von 2,1 V bis 2,3 V und einer Sperrverzögerungsladung von 10.500 bis 13.500  $\mu\text{As}$  wurden durch die Elektronenbestrahlung auf 2,6 bis 2,7 V und 6.500 bis 7.500  $\mu\text{As}$  eingestellt.



**Bild 6** Einstellung von statischen und dynamischen Kennwerten mittels Elektronenbestrahlung; Quelle: Siemens

Damit ist es möglich, sehr enge Fertigungsbänder der Sperrverzögerungsladung herzustellen. Dies wiederum führt zu einer Reduzierung der Reihenschaltzahl in einem Ventil und somit zu den bereits genannten Vorteilen.

Anfang der 1990er Jahre wurde die Niedertemperaturverbindung eingeführt [5]. Es handelt sich hierbei um einen Sinterprozess, bei dem eine feste Verbindung zwischen Silizium und Molybdän hergestellt wird. Durch die niedrige Prozesstemperatur von unter  $250^\circ\text{C}$  ist die resultierende



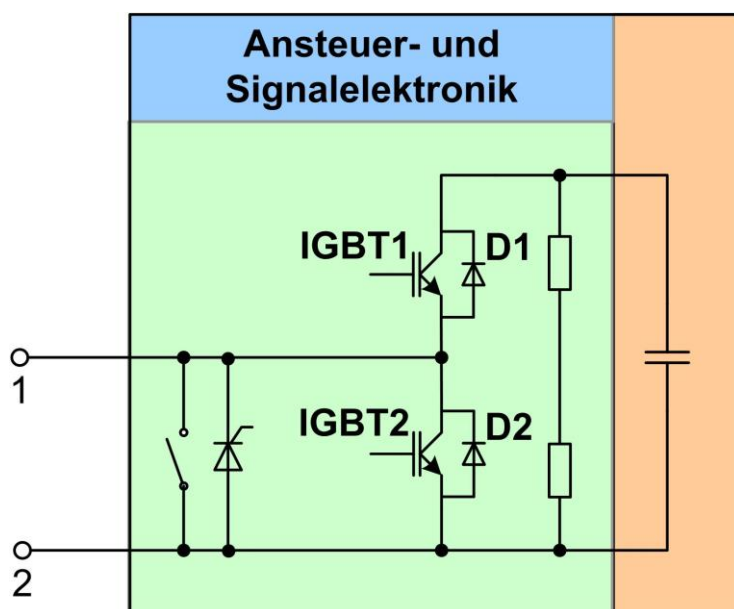
Durchbiegung des verbundenen Elements gering. Diese Durchbiegung ergibt sich aufgrund der leicht unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Silizium und Molybdän.

Durch diese Verbindung zwischen Silizium und Molybdän erreicht man eine sehr gute thermische Ankopplung der thermischen Kapazität des Molybdäns an das Silizium, damit hohe Stoßstromfähigkeiten und eine exzellente Stabilität des Sperrverhaltens der Bauelemente.

### 3. Thyristoren in selbstgeführten Stromrichtertopologien

In HGÜ-Anlagen mit Stromrichtertopologien auf Basis der Spannungszwischenkreistechnik (auch VSC, **V**oltage **S**ourced **C**onverter) kommen heutzutage IGBTs (**I**nsulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor) als Leistungshalbleiter mit Abschaltmöglichkeit und zugehörige Freilaufdioden zum Einsatz [6]. Thyristoren ohne Abschaltfähigkeit spielen in dieser Topologie deshalb nicht die dominierende Rolle. Allerdings werden sie in bestimmten Ausführungen von Multileveltopologien als Schutzelemente eingesetzt.

Der Stromrichter besteht in diesem Fall aus einzelnen so genannten Submodulen (Bild 7). Die einzelnen Submodule eines Stromrichterzweigs werden über die Anschlussklemmen (1) und (2) in Reihe geschaltet. Tritt an den DC-Klemmen des gesamten Stromrichters ein Kurzschluss auf, werden die IGBTs schnell abgeschaltet, so dass diese nicht gefährdet sind. Allerdings werden danach die Freilaufdioden D2 mit hohen Strombeanspruchungen belastet, bis der mechanische Leistungsschalter der Anlage öffnet. Da häufig industrieübliche IGBT-Module mit integrierten Freilaufdioden verwendet werden und die Freilaufdioden durch die beschriebene Beanspruchung überlastet würden, kommt ein Schutzthyristor parallel zur Diode D2 zum Einsatz.



**Bild 7** Submodul eines Multilevel-Stromrichters in VSC Technik – Thyristor als Schutzelemente für die Freilaufdiode D2; Quelle: Infineon Bipolar

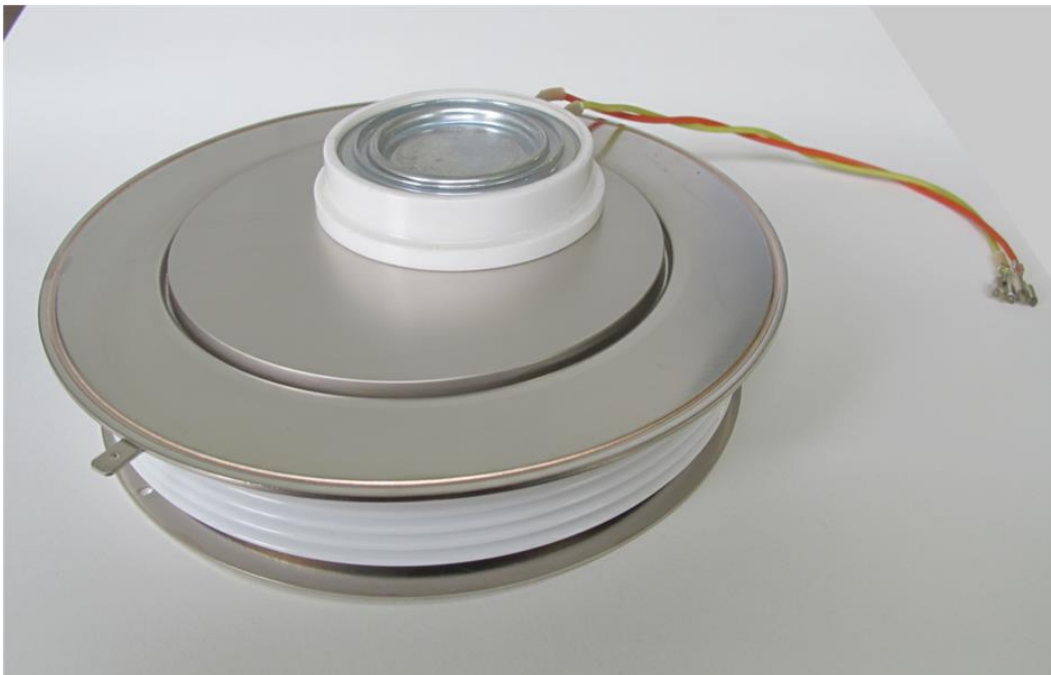
Im angesprochenen Fehlerfall werden also nach Abschalten aller IGBTs die Thyristoren parallel zu D2 gezündet und der Großteil des Stroms kommutiert von der Diode D2 in den Thyristor. Entscheidend ist dabei natürlich, dass der Thyristor eine kleinere Durchlassspannung als die Diode hat und auch bei einer kleinen Anoden-Kathoden-Spannung, d. h. im Bereich der Durchlassspannung der Diode D2, bei etwa 3 V sicher einschaltet.

#### 4. Zuverlässigkeit und Felderfahrung

Von Siemens, eupec und Infineon befinden sich bereits mehr als 100.000 Thyristoren der Spannungsklassen 8.000 V und 8.500 V in verschiedenen Anwendungen im Feld. In HGÜ-Anwendungen wurden ebenfalls weit mehr als 100.000 Thyristoren mit verschiedenen Spannungsklassen geliefert. Die Ausfallrate beträgt dabei deutlich weniger als 10 fit (1 fit = 1 Failure in time = 1 Ausfall in  $10^9$  Bauelementbetriebsstunden  $\approx$  1 Ausfall in 114.000 Bauelementbetriebsjahren).

Bereits seit mehr als 40 Jahren werden Thyristoren in unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt. In Anlagen, die seit mehr als 25 Jahren in Betrieb sind, wurden bis heute keine lebensdauerrelevanten Alterungserscheinungen dieser Halbleiter erkennbar.

Thyristoren in Druckkontakttechnik haben damit den Beweis erbracht, dass diese Technologie extrem robust und zuverlässig ist und sehr hohe Lebensdauieranforderungen erfüllen kann.



**Bild 8** Thyristor des Typs, der in Cabora Bassa eingesetzt wurde, auf einem 6-Zoll-Thyristor

## 5. Literatur

- [1] Huang, H.; Uder, M.; Barthelmeß, R.; Dorn, J.: Application of High Power Thyristors in HVDC and FACTS Systems. 17th Conference on Electric Power Supply Industry (CEPSI 2008), Macau, October, 27-31, 2008
- [2] Niedernostheide, F.-J.; Schulze, H.-J.; Dorn, J.; Kellner-Werdehausen, U.; Westerholt, D.: Light-triggered thyristors with integrated protection functions. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Power Devices (ISPSD 2000), Toulouse, France, May 22-25, 2000, pp. 267-270
- [3] Przybilla, J.; Dorn, J.; Barthelmeß, R.; Kellner-Werdehausen, U.; Schulze, H.-J.; Niedernostheide, F.-J.: Diodes and Thyristors – Past, Presence and Future. European Power Electronics and Applications Conference (EPE 2009), Barcelona, Spain, September 8-10, 2009
- [4] Barthelmeß, R.; Beuermann, M.; Metzner, D.; Schmidt, G.; Westerholt, D.; Winter, N.; Gerstenmaier, Y. C.; Reznik, D.; Ruff, M.; Schulze, H.-J.; Willmeroth, A.: Electroactive Passivation of High Power Semiconductor Devices with Punch Through Design by Hydrogenated Amorphous Carbon Layers (a C:H). In: Proceedings of the 10th International Symposium on Power Devices (ISPSD 1998), Kyoto, Japan, June 3-6, 1998, pp. 181-184
- [5] Schwarzbauer, H.; Kuhnert, R.: Novel large area joining technique for improved power device performance. In: IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 1, 1991, pp. 93-95
- [6] Dorn, J.; Huang, H.; Retzmann, D.: Novel Voltage-Sourced Converters for HVDC and FACTS Applications. CIGRE Symposium on System Development and Asset Management under Restructuring, Osaka, Japan, November 1-4, 2007