Leistungshalbleiter für höchste Leistungen : Stand der Technik und Entwicklungstendenzen

Autor(en): **Rüegg, A. / Vitins, J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **77 (1986)**

Heft 19

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904274

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Leistungshalbleiter für höchste Leistungen

Stand der Technik und Entwicklungstendenzen

A. Rüegg und J. Vitins

Die Leistungselektronik erlebt eine Entwicklung, deren Geschwindigkeit derjenigen der Mikroelektronik nicht nachsteht. Dies hat zu einem reichhaltigen Sortiment an optimierten Halbleiter-Bauelementen geführt. Dazu gehören am obersten Ende der Leistungsskala Vertreter wie die grossen Netzthyristoren für den Einsatz bei Frequenzen von 50/60 Hz mit Schaltleistungen über 10 MW ebenso wie die neue Familie der abschaltbaren Thyristoren (GTO). Es wird gezeigt, welche hauptsächlichen elektrischen Grössen der Bauelemente optimiert werden müssen und wie sie zusammenhängen.

L'électronique de puissance suit un développement dont la rapidité n'a rien à envier à celle de la microélectronique. Ce développement a produit un riche assortiment de composants semi-conducteurs. Dans le haut de la gamme des puissances, on trouve les gros thyristors de réseau utilisés à des fréquences de 50/60 Hz et possédant des puissances de commutation supérieures à 10 MW, ainsi que la famille des thyristors désamorçables par la gâchette (GTO). Dans le présent article, on montrera quelles sont les principales grandeurs électriques des composants devant être optimisées et comment elles dépendent les unes des autres.

Adresse der Autoren
Dr. *A. Rüegg* und Dr. *J. Vitins*, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie, Abteilung EKS, 5600 Lenzburg.

1. Einleitung

Der Einsatz von elektrischer Energie nimmt weltweit ständig zu. Im heutigen Umfeld des gesteigerten Umweltbewusstseins wird sie als sauberer Energieträger auf der einen Seite immer wertvoller, auf der anderen Seite wird sie aber auch gerade dadurch immer teurer. Es besteht somit ein starker Druck, die Übertragung und Anwendung des Stromes stets noch rationeller und verlustarmer zu gestalten. Dabei kommen im grossen Stil Leistungshalbleiter zum Einsatz, die heute aus der Energietechnik nicht mehr wegzudenken sind. Um den ständig gesteigerten Anforderungen zu genügen, ist es unabdingbar, dass bei diesen eine Entwicklung stattfindet, die derjenigen bei der Mikroelektronik an Innovationsgeschwindigkeit nicht nachsteht. Während dort der Fortschritt in Richtung immer feinerer Strukturen geht, um die Rechengeschwindigkeit und den Integrationsgrad auf den Chips zur Informationsverarbeitung zu vergrössern, geht er bei den Halbleitern höchster Leistung in Richtung steigender Spannungen und Ströme. Seit der Erfindung des Thyristors im Jahre 1957 hat sich die Schaltleistung von grossen Netzthyristoren im Durchschnitt alle 3 Jahre verdoppelt. Heute sind diese in der Lage, z.B. den gesamten Strom eines grossen Kraftwerkes bis 2000 MW zur effizienten Übertragung in Gleichstrom umzuformen und anschliessend wieder in Wechselstrom umzuwandeln. Figur 1 zeigt das Prinzipschaltbild einer HGÜ-Umrichterstation.

Wie bei der Mikroelektronik bildet auch bei Halbleiterbauelementen höchster Leistung die abzuführende Verlustwärme eine obere Begrenzung bezüglich Schaltleistungsdichte. Innerhalb dieses Rahmens gilt es, den ständigen Kompromiss zwischen Sperrspannung, Spannungsabfall im leitenden Zustand und dynamischen Schalteigenschaften zu optimieren. Dabei ergeben sich je nach vorgesehener Anwendung unterschiedliche Kriterien, die zu verschiedenen Bauelementfamilien führen. Im folgenden soll auf die wesentlichsten Anwendungen, den heutigen Stand der dafür optimierten Leistungshalbleiter und die weiteren Entwicklungsaussichten eingegangen werden. Dabei wird eine Zweiteilung nach Einsatzfrequenz vorgenommen: Netzthyristoren für 50/60 Hz und schnelle sowie abschaltbare Thyristoren für höhere Frequenzen.

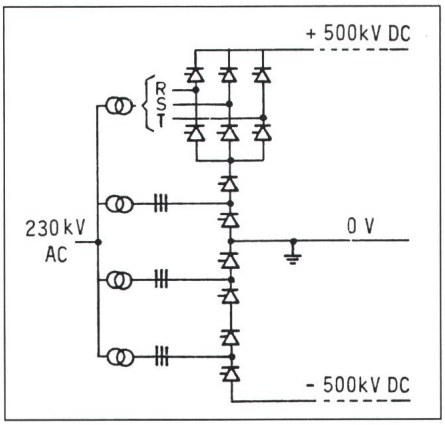

Fig. 1 Prinzipschaltbild einer HGÜ-Umrichterstation
Jedes Thyristorsymbol steht für die Serieschaltung von 120 Thyristoren.
HGÜ = Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung

2. Netzthyristoren

2.1 Haupteinsatzgebiete und Anforderungen

Diese Bauelemente sind für den Einsatz bei 50/60 Hz optimiert. Sie decken heute das oberste Ende der Leistungsskala für Halbleiterelemente ab. Die maximale Schaltleistung pro Einzelelement, definiert als Produkt von Sperrspannung V_{DRM} und Dauergrenzstrom I_{TAVM}, übersteigt bereits

10 MW. Diese Entwicklung wurde und wird weiterhin getrieben von den klassischen Einsatzgebieten für Netzthyristoren: Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) und Kurzkupplungen sowie statische Blindleistungskompensatoren für Industrie- und Hochspannungsnetze. Bei der Übertragung grosser Leistungen über Strecken grösser als etwa 500 km ergibt sich nämlich eine bessere Wirtschaftlichkeit, wenn der Strom beim Kraftwerk gleichgerichtet und am Verbraucherort wieder in Wechselstrom umgewandelt wird. Durch die Bestückung der Gleichrichter und Wechselrichter mit modernen Thyristoren können die Stromrichterverluste entsprechend klein gehalten werden. Solche HGÜ-Anlagen werden heute für Leitungsspannungen bis ±500 kV und Brükkenströme bis über 3000 A gebaut. Neben diesen klassischen Anwendungen werden grosse Netzthyristoren auch immer mehr in modernen Industrieanwendungen für sehr hohe Leistungen eingesetzt. Wesentliche Einsparungen können z.B. erzielt werden durch den Ersatz von ungeregelten Motoren durch Stromrichterantriebe, welche mit nur wenigen Halbleiterbauelementen Leistungen bis über 20 MVA erreichen. Zudem können durch kleine Schaltzeiten (Freiwerdezeiten) der Thyristoren hochtourige Antriebe mit $N \gtrsim 6000$ Umin^{-1} realisiert werden, die eine Minimierung des mechanischen und des Betriebsaufwandes ermöglichen. Auch in der Traktion finden grosse Netzthyristoren in Phasenanschnitt-Steuerungen ihre Anwendung.

In all den erwähnten Einsatzgebieten wird von den Thyristoren eine möglichst hohe Schaltleistung gefordert. Durch die hohe Stromtragfähigkeit der modernen Leistungsthyristoren von 3000 A und mehr kann bereits heute in den meisten Fällen, z.B. HGÜ, auf eine Parallelschaltung verzichtet werden. Trotz der hohen Sperrspannung heutiger Bauelemente von bis zu 5500 V stellt jedoch die Serieschaltung in Netzanwendungen den Normalfall dar, da die entsprechenden Netze meistens viel höhere Spannungen aufweisen. Für eine HGÜ-Anlage mit ±500 kV Übertragungsspannung werden pro Ventilzweig bis zu 120 Elemente direkt in Reihe geschaltet. Für statische Blindleistungskompensatoren gelten dieselben Anforderungen wie für HGÜ. Figur 2 zeigt ein Modul der Anlage von Châteauguay in Kanada, wo in jedem Stromzweig 19 4,4-kV-Thyristoren direkt in Reihe geschaltet sind. Je grösser die Sperrspannung pro Bauelement ist, desto kleiner wird deren Anzahl, was zu einer kompakteren Bauweise, zu Reduktion im Aufwand der Ansteuerung und zu grösserer Zuverlässigkeit führt.

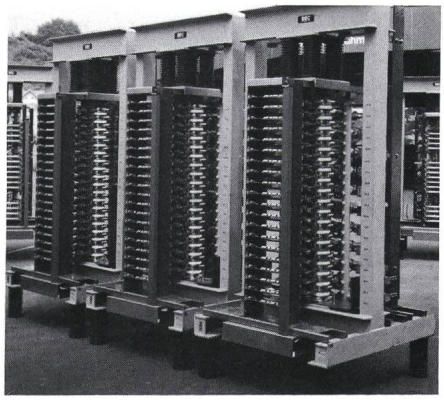

Fig. 2 Stapel mit 6″-Netzthyristoren in Serieschaltung für einen statischen Blindleistungskompensator

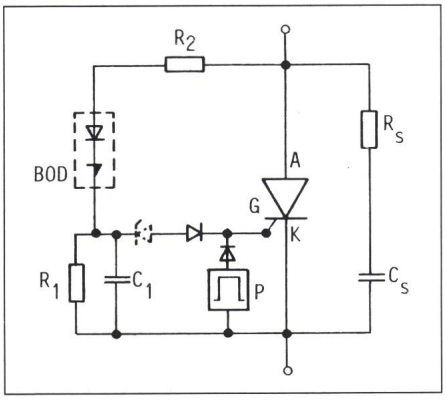

Fig. 3 Allgemeine Beschaltung eines Thyristors inkl. Ansteuerkreis (Gatekreis) und Überspannungsschutz mit BOD

R_S, C_S	Beschaltungskomponenten
R_1, C_1	Tiefpassfilter
R_2	Strombegrenzender Widerstand
P	Gatepuls-Generator
BOD	Break-over Diode
K, G, A	Thyristor-Kathode, -Gate und -Anode

Wie erwähnt, spielt bei Netzanwendungen die Verlustleistung eine zentrale Rolle. Die Hauptverlustquelle im Thyristor bildet der Durchlassspannungsabfall v_T, der möglichst klein gehalten werden muss. Energieverluste treten aber nicht nur im Thyristor selbst auf, sondern auch in der dazu parallelen RC-Beschaltung (Fig. 3). Auch hier werden sie durch die Bauelementparameter bestimmt [1]. Daher ist eine kleine Speicherladung Q_{rr} im Thyristor anzustreben, die dadurch entsteht, dass beim Übergang vom leitenden in den sperrenden Zustand die hohe Ladungsträger-Konzentration im Bauelement ausgeräumt werden muss. Ein kleines Q_{rr} reduziert nicht nur die Ausschaltverluste, es erlaubt auch, mit einer kleineren und verlustärmeren Beschaltung auszukommen. Ein weiterer wichtiger Faktor zur Reduktion der Beschaltung ist die Streuung von Q_{rr} von Thyristor zu Thyristor. Je kleiner diese Streuung ist, desto kleiner kann auch die zur gleichmässigen Spannungsaufteilung in der Serieschaltung benötigte *RC*-Beschaltung ausgelegt werden. Als letzter Verlustfaktor sollen noch die Verluste erwähnt werden, die beim Einschaltvorgang vom sperrenden zum leitenden Zustand entstehen. Hier geht es darum, den Thyristor sehr rasch auf der ganzen Siliziumfläche einzuschalten, um den ansteigenden Laststrom zu verteilen. Trotzdem soll die Ansteuerung einfach und mit kleiner Leistung erfolgen können.

Eine kurze und vor allem von Element zu Element reproduzierbare Einschaltzeit ist auch bei einer weiteren Gruppe von Anwendungen wichtig, nämlich bei solchen mit sehr hohen Strömen (bis über 25 kA) bei vergleichsweise niedriger Spannung von bis zu einigen kV. Dazu gehören Speisungen für Elektrolyseanlagen und Lichtbogenöfen ebenso wie Hochleistungs-Pulsgeneratoren für die Fusionsforschung (Fig. 4). Hier ist die Parallelschaltung nach wie vor nötig, woraus die Forderung nach einer in engen Grenzen gehaltenen Einschaltzeit entsteht.

2.2 Stand der Technik

Wie weit die genannten Anforderungen an Netzthyristoren derzeit ver-

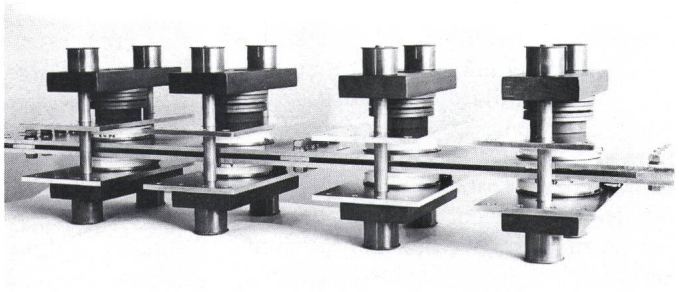

Fig. 4 6″-Netzthyristoren in Parallelschaltung für eine Tokamak-Speisung

Datenblattwerte von hochsperrenden Netzthyristoren in 5″- und 6″-Gehäusen Tabelle I

Typ	Blockierspannung V_{DRM} Sperrspannung V_{RRM} (V)	Durchlassspannungsabfall bei 3000 A v_T (V)	Freiwerdezeit t_q (typ.) (µs)	Speicherladung Q_{rr} max. (mC)	Kritische Spannungssteilheit dV/dt (V/µs)	Dauergrenzstrom I_{TAVM} (A)	max. Stossstrom I_{TSM} (kA)	Gehäusedurchmesser (Zoll)
CS 1702	4400	1,60	700	14,0	1000	1830	44	5
CS 1302	4400	2,00	450	7,5	2000	1565	37	5
CS 1104	5500	2,50	600	9,0	2000	1300	32	5
CS 2402	4400	1,40	500	14,0	1000	2570	60	6
CS 2102	4400	1,80	400	9,0	2000	2200	50	6

Bemerkungen: t_q bei $di/dt = -4$ A/µs, $dV/dt = 100$ V/µs, 120 °C
Q_{rr} bei $di/dt = -5$ A/µs, 120 °C
dV/dt bis zu 0,67 V_{DRM}, 120 °C
I_{TAVM} bei Gehäusetemperatur $T_C = 85$ °C
I_{TSM}: 10-ms-Puls
V_{RRM} ≙ Reverse Repetitive Maximum

wirklicht sind, zeigt die Zusammenstellung der heute leistungsstärksten Elemente in Tabelle I. Es kann gezeigt werden [2], dass deren Datenkombinationen unter den heute gegebenen Randbedingungen ein Optimum für Netzfrequenz und hohe Ströme darstellen.

Ausgangsmaterial zur Herstellung aller Leistungshalbleiterbauelemente ist Silizium, das in einem aufwendigen Prozess gereinigt, zu einem Einkristall hoher Perfektion verarbeitet und mit der notwendigen Grunddotierung versehen worden ist. Es gibt keine auch nur annähernd vergleichbare Alternative organischer oder anorganischer Materialien [3]. Germanium oder Galliumarsenid z.B. erfüllen die Anforderungen bei weitem nicht und werden auch in ferner Zukunft Silizium bei Hochleistungshalbleitern nicht ersetzen. Nicht nur ist Silizium in der Erdkruste stark verbreitet, es hat auch eine ideale Bandlücke $E_G = 1{,}10$ V, welche den Einsatz im interessanten Temperaturbereich erlaubt. Typischerweise liegt die zugelassene Temperatur zwischen -40 und +120 °C. Zudem kann die Leitfähigkeit von Silizium durch entsprechende Dotierung mit Fremdatomen um viele Grössenordnungen variiert werden. Dabei wird die erreichbare Sperrspannung um so höher, je niedriger die Dotierung ist. Für einen Netzthyristor mit $V_{DRM} = 5{,}5$ kV kommt nur gerade noch 1 Dotieratom auf etwa 3 Milliarden Siliziumatome. Um eine gezielte Einstellung der Leitfähigkeit zu erreichen, muss vor der eigentlichen Dotierung sogar eine mindestens 10fach grössere Reinheit vorliegen. Dazu werden die Siliziumeinkristalle für Hochleistungsbauelemente mit dem sogenannten Float-Zone-Verfahren ohne Berührung der Schmelze hergestellt. Da eine gleichmässige Verteilung der geringsten Dotierstoffmengen in der Schmelze nicht möglich ist, wird nachher durch Bestrahlung mit Neutronen ein kleiner Teil des Isotopes ^{30}Si in Phosphor umgewandelt. Diese Prozesse werden heute bis zu Durchmessern der Kristalle von 125 mm beherrscht. Nach der Verarbeitung zu Scheiben wird durch die bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen üblichen Prozesse wie Diffusion und Photolithographie die Thyristorstruktur eingebracht, wobei höchste Sorgfalt der Erhaltung der Reinheit und Perfektion der Scheibe gelten muss. Figur 5 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein fertiges Aktivteil.

Wie erwähnt, wird eine höhere Sperrspannung durch niedrigere Dotierung erreicht. Da sich dabei die im sperrenden Zustand am p-n-Übergang auftretende Raumladungszone immer weiter ausdehnt, muss die Dicke der Siliziumscheibe ansteigen. Sie erreicht bei $V_{DRM} = 5000$ V etwa 1 mm. Mit zunehmender Dicke steigt aber auch der Spannungsabfall v_T am Bauelement im Durchlasszustand, so dass Dotierung und Dicke sorgfältig optimiert werden müssen. Wird die Dicke zu gross gewählt, resultiert ein unnötig hohes v_T. Ist die Dicke aber zu klein, so kommt die Raumladungszone dem gegenüberliegenden p-n-Übergang zu nahe oder erreicht ihn sogar, was zu einer Abnahme der Sperrfähigkeit führt.

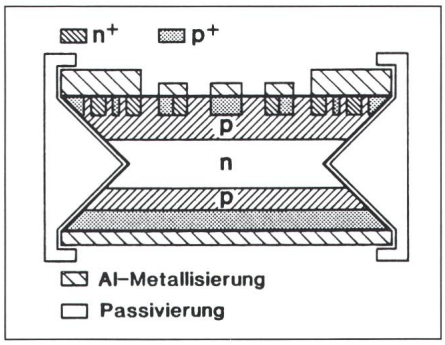

Fig. 5 Schematischer Querschnitt durch ein Thyristor-Aktivteil

p und *n* bezeichnen den Leitfähigkeitstyp der entsprechenden Gebiete. p^+ und n^+ sind die hochdotierten Randzonen. Die untere Fläche bildet die Anode.

Fig. 6 Herstellung der doppeltpositiven Randkontur an Hochspannungsthyristoren durch Sandstrahlen

Das Entstehen der Kontur kann am Monitor oben rechts kontrolliert werden.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Optimierung des Verhältnisses von V_{DRM} und v_T hat die Randkontur des Aktivteiles. Am Rand tritt im sperrenden Zustand das elektrische Feld an die Siliziumoberfläche, und es muss durch die Kontur sichergestellt werden, dass kein unerwünschter Oberflächendurchbruch auftreten kann. Hier hat sich die sogenannte Hohlkehle als vorteilhaft erwiesen, wie sie schematisch in Figur 5 und bei der Herstellung in Figur 6 sichtbar ist. Mit dieser Randkontur lässt sich immer die durch die maximale Durchbruchfeldstärke vom Silizium (etwa $2 \cdot 10^5$ V/cm) gegebene theoretische Spannung erreichen. Mit der üblichen sehr flachen Anschrägung im umgekehrten Sinne (konvex statt konkav) ergibt sich mit zunehmender Spannung bei gleichbleibendem Dotierprofil eine immer stärkere Reduktion der erreichbaren Spannung um bis zu 15% oder mehr.

Im eingeschalteten Zustand ist das Siliziumaktivteil des Thyristors von Ladungsträgern überschwemmt. Beim

Übergang in den Sperrzustand müssen diese Ladungsträger zuerst abgebaut werden, bevor die Spannung am Bauelement ansteigen darf, da der Thyristor sonst sofort wieder einschalten würde. Die Zeit zwischen Stromnulldurchgang und Wiederanstieg der Blockierspannung, die Freiwerdezeit t_q, darf für die meisten Anwendungen bei Netzfrequenz 700 µs nicht übersteigen; kleinere Werte sind erwünscht. In einem unter sauberen Bedingungen hergestellten Bauelement erreicht t_q aber ohne weiteres Werte > 1000 µs. Deshalb ist es notwendig, die Trägerlebensdauer durch gezielte Massnahmen einzustellen.

Traditionell wird für Thyristoren zu diesem Zweck eine Golddiffusion verwendet, da sie ein günstiges Verhältnis von Durchlassspannungsabfall v_T zu Speicherladung Q_{rr} liefert. Nachteilig dabei ist aber, dass das Goldatom einen hohen Sperrstrom bewirkt und dass sein Einbau im Silizium schwierig zu kontrollieren ist. Dies führt zu einer grossen Streuung in Q_{rr}, was den beschriebenen Anforderungen zuwiderläuft. Viel besser kann die Kontrolle der dynamischen Daten durch Bestrahlen der fertigen Bauelemente mit hochenergetischen Elektronen erfolgen. Die dabei entstehenden Schäden im Kristallgitter bewirken eine sehr exakt kontrollierbare Reduktion der Trägerlebensdauer. Vorteilhaft ist dabei der kleine Sperrstrom und die erreichbare kleine Streuung in Q_{rr} von besser als ±20%. Wie Figur 7 zeigt, steigt jedoch mit kleinerem Q_{rr} der Durchlassspannungsabfall v_T an. Gewünscht sind aber kleine Werte bei beiden Grössen. Mit Hilfe der Elektronenbestrahlung ist es heute möglich, je

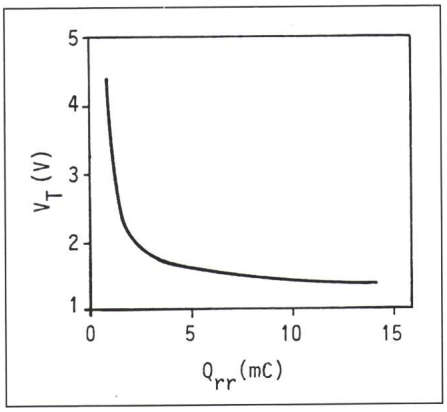

Fig. 7 Abhängigkeit des Durchlassspannungsabfalls v_T von der Speicherladung Q_{rr} für einen Netzthyristor

Sperrspannung V_{DRM} = 4400 V, mittlerer Strom I_{TAVM} = 1565 A

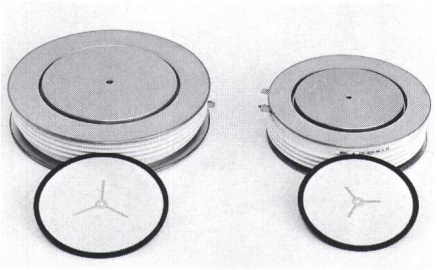

Fig. 8 Aktivteile von Hochleistungsthyristoren mit Durchmessern von 92 und 82 mm mit den dazugehörigen 6″- und 5″-Gehäusen

Schaltleistung 11,3 MW bzw. 7,2 MW. Im Zentrum befindet sich der Hilfsthyristor mit dem fingerförmigen Gate des Hauptthyristors.

nach Anwendung exakt die optimale Kombination einzustellen.

Die Forderung nach einfacher, d.h. leistungsarmer Ansteuerung wird gelöst durch die Integration eines kleinen Hilfsthyristors (amplifying gate). Die Zündelektronik muss nur noch diesen kleinen Thyristor ansteuern, wozu 2...3 A während einigen µs genügen. Dieser liefert den nötigen Strom (10...20 A) zum Einschalten des Hauptthyristors. Um eine kurze Einschaltzeit zu erreichen, wird der Strom des Hilfsthyristors durch eine fingerförmige Struktur über den Hauptthyristor verteilt. Figur 8 zeigt fertige Thyristoraktivteile mit den heute grössten Siliziumdurchmessern von 82 bzw. 92 mm und lässt die eben beschriebenen Strukturen deutlich erkennen. Es wird auch ersichtlich, dass die Aktivteile nicht auf eine Molybdänscheibe legiert sind, sondern allein durch Druck elektrisch und thermisch kontaktiert werden. Für grosse Elemente bringt dies thermische, elektrische und herstellungstechnische Vorteile.

2.3 Weitere Entwicklung

Die bisherigen Ausführungen zeigen, dass dem Anwender heute ein Sortiment an Netzthyristoren zur Verfügung steht, welche den gestellten Anforderungen angepasst sind. Trotzdem sind mögliche Weiterentwicklungen ersichtlich, die aber von der Verfügbarkeit von noch reinerem, homogenerem und perfekterem Silizium einerseits und von der zunehmenden Übernahme von IC-Prozessen anderseits abhängen. Eine Erhöhung der Stromtragfähigkeit, d.h. eine Vergrösserung der aktiven Bauelementfläche, steht nicht mehr im Vordergrund, da die HGÜ als Entwicklungsträger zurzeit eine Leistungsgrenze erreicht hat.

Die Erhöhung der Sperrfähigkeit zur Reduktion der Anzahl Komponenten in Reihenschaltungen geht jedoch weiter. Labormuster mit V_{DRM} = 8 kV sind vorhanden, jedoch ist die Verfügbarkeit von entsprechend hochreinem Silizium noch nicht gesichert. Davon und von der Verlustkapitalisierung hängt auch die weitere Erhöhung auf über 10 kV ab. Zudem muss, trotz der für die höhere Spannung nötigen grossen Siliziumdicke, der obere Grenzwert von $t_q \sim 500$ µs eingehalten werden, ohne den Durchlassspannungsabfall unzulässig zu erhöhen. Eine mögliche Lösung dieses Problems ist z.B. die Lebensdauereinstellung der Ladungsträger durch Protonenbestrahlung. Auch der fortwährende Druck zu kleineren Speicherladungen Q_{rr} und deren Streuung wird neue Methoden zur Lebensdauereinstellung interessant machen. Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit besteht in der Reduktion der Zünd- und Schutzelektronik der einzelnen Thyristoren. Dies kann durch direkte Lichtzündung anstelle der heute üblichen elektrischen Zündung erreicht werden. Ein Vorteil ergibt sich aber nur, wenn dadurch auf die gesamte thyristornahe Elektronik verzichtet werden kann, was bedingt, dass auch die Schutzfunktionen in den Thyristor integriert werden. Heute erfolgt der Überspannungsschutz in Vorwärtsrichtung durch Einbau einer Kippdiode (BOD, vgl. Fig. 3) in den Gatekreis [4], während sich der Thyristor in Rückwärtsrichtung durch seine eigene Avalanchefestigkeit selbst schützt.

Der integrierte Schutz gegen Überkopfzündung kann durch gezielte Reduktion der Durchbruchspannung im Gatebereich erfolgen, z.B. durch lokales Ätzen, Laserbohrung oder eine speziell maskierte Diffusion. Konzepte für direkte Lichtzündung sind bekannt [5]. Probleme ergeben sich noch dabei, sowohl eine genügend hohe Lichtempfindlichkeit als auch eine genügend hohe dV/dt-Festigkeit im selben Bauelement zu verwirklichen sowie geeignete intensive Lichtquellen zu finden. Von der Einführung bei der IC-Herstellung verwendeter Prozesse werden hier wesentliche Fortschritte erwartet.

Es ist vorauszusehen, dass auch abschaltbare Thyristoren (GTO) hoher Schaltleistung in ferner Zukunft in Energieanwendungen eingesetzt werden. Umfang und Zeitpunkt sind aber von den erreichbaren Kosteneinsparungen und der Zuverlässigkeit abhängig.

3. Schnelle und abschaltbare Thyristoren

3.1 Haupteinsatzgebiete und Anforderungen

Im Vergleich zu Netzthyristoren weisen schnelle Thyristoren dynamische Eigenschaften auf, welche für höherfrequente Anwendungen (bis einige kHz) optimiert sind, z.B. für Gleichstrom-Chopper und Umrichterschaltungen. Der Einsatz in der Traktion, vor allem in Hochleistungslokomotiven, bildet die Triebfeder für die Entwicklung solcher Elemente und hat zu einem reichen Sortiment von individuell optimierten Bauelementen geführt. Neben den symmetrischen schnellen Thyristoren gehören dazu asymmetrische Thyristoren, d.h. ohne Sperrfähigkeit in Rückwärtsrichtung, und als Weiterentwicklung die rückwärtsleitenden Thyristoren mit monolithisch integrierter, antiparalleler Diode. Damit können bei Einsatz von nur je einem Bauelement als Haupt- und als Löschthyristor Gleichstrommotoren bis 300 kW stufenlos gesteuert werden. Das Haupteinsatzgebiet von rückwärtsleitenden Thyristoren liegt im Nahverkehr, d.h. bei Trolleybussen, Trams, Metros und Vorortszügen. Figur 9 zeigt die Prinzipschaltung eines Choppers mit rückwärtsleitenden Thyristoren. Die Bereitstellung von schnellen Halbleiterbauelementen hoher Leistung hat massgebend zur Entwicklung der Drehstromtechnik in der Traktion beigetragen. Die dieselelektrischen Lokomotiven wie E120, EA3000 und ICE (Fig. 10) zeugen von diesem Trend.

Alle beschriebenen Bauelemente benötigen zum Erreichen der hohen Schaltfrequenz einen Kommutierungskreis, um eine minimale Freihaltezeit zu erreichen, welche mit t_q verknüpft ist (Fig. 9). Mit abschaltbaren Thyristoren, z.B. dem GTO (gate turn-off thyristor) kann dieser Kreis entfallen. Dies führt zu einer wesentlichen Platz- und Gewichtsersparnis und erlaubt eine weitere diesbezügliche Optimierung der Drehstromtechnik.

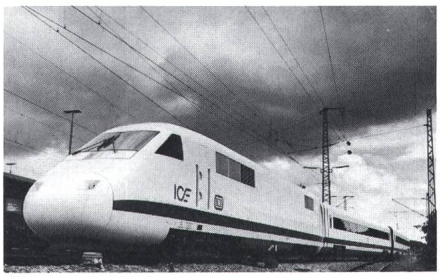

Fig. 10 Hochleistungslokomotive ICE der Deutschen Bundesbahn

Der Antrieb erfolgt in Drehstromtechnik mit Leistungshalbleitern.

Alle technologischen Zusammenhänge, die für die Netzthyristoren ausführlich beschrieben worden sind, gelten im wesentlichen auch für die schnellen und abschaltbaren Thyristoren. Wie bei Netzelementen besteht auch bei schnellen Thyristoren der Wunsch nach möglichst hoher Schaltleistung, d.h. nach möglichst hoher Spannung. Da aber der Schwerpunkt der Optimierung beim raschen Abschalten liegt, beschränken die bei den Netzthyristoren erwähnten Abhängigkeiten die sinnvoll erreichbaren Sperrspannungen auf 2000 bis 3000 V; dafür werden Freiwerdezeiten t_q = 10...100 µs erreicht.

Beim GTO wird das Abschalten eingeleitet, indem ein Teil des Laststromes durch das Gate herausgezogen wird, wodurch die Injektion von Ladungsträgern an der Kathode gestoppt wird. Dies erfordert ein entsprechend ausgedehntes Gate und eine leistungsfähige Ansteuereinheit. Der Aufwand kann um so kleiner gehalten werden, je grösser die Abschaltverstärkung ist, d.h. das Verhältnis von Anodenstrom zu negativem Gatestrom. Trotzdem soll das Einschalten möglichst leistungsarm erfolgen. Auch beim GTO ist das Ausschalten durch das Ausräumen der Ladungsträger bestimmt. Die dazu nötige Zeit, die hier Schweifzeit heisst, soll möglichst kurz sein. Selbstverständlich wird auch hier angestrebt, durch optimale dynamische Daten und minimale Streuung den Beschaltungsaufwand klein zu halten.

3.2 Stand der Technik

Die bestmögliche Datenkombination bei den schnellen Bauelementen ist in den hochsperrenden, rückwärtsleitenden Thyristoren verwirklicht. Sie erreichen V_{DRM} = 2700 V, I_{TAVM} = 700 A bei t_q = 40 µs. Da keine Rückwärtssperrspannung erforderlich ist, kann die Ausdehnung der Raumladungszone durch Eindiffusion einer sogenannten Stoppschicht begrenzt werden, was eine Verbesserung des V_{DRM}-v_T-Verhältnisses ermöglicht [6]. Die für Thyristor und Diode getrennt optimierte Lebensdauereinstellung der Ladungsträger geschieht mit einer Golddiffusion, da diese bei schnellen Elementen bei gleichbleibendem t_q ein leicht niedrigeres v_T als die Elektronenbestrahlung ergibt. Das rasche Einschalten wird durch ein stark verzweigtes Fingergate ermöglicht.

Tabelle II gibt einen Überblick über die GTOs höchster Leistung (diese Elemente befinden sich noch in Entwicklung). Die Abschaltverstärkung beträgt etwa 5. Um beim Abschalten

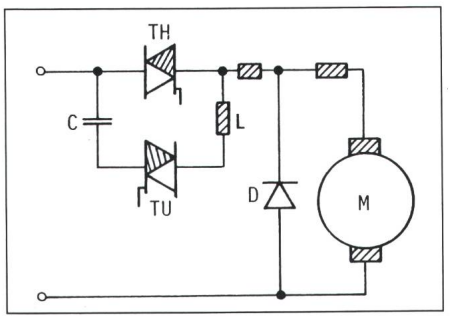

Fig. 9 Prinzipschaltung eines Gleichstromchoppers mit nur je einem Bauelement als Haupt- und Löschthyristor

TH rückwärtsleitender Hauptthyristor
TU rückwärtsleitender Löschthyristor
D Freilaufdiode
C Löschkondensator
L Umschwingdrossel
M Gleichstrommotor

Eckdaten von hochsperrenden abschaltbaren Thyristoren Tabelle II

Typ	Blockierspannung V_{DRM} (V)	Durchlassspannungsabfall v_T bei I_{TGQM} (V)	Durchschaltzeit t_r (typ.) (µs)	Schweifzeit I_{tail} (typ.) (µs)	dV/dt (V/µs)	max. abschaltbarer Anodenstrom I_{TGQM} (A)	Stossstrom I_{TSM} (kA)	Gehäusedurchmesser (Zoll)
CSG 600	1600	3,5	1,5	4	1000	600	2	2
CSG 2000	2500	3,0	2,0	20	1000	2000	14	4
CSG 2500	4500	2,8	4,0	60	1000	2500	25	5

Bemerkungen: t_r mit Zündimpuls I_{GM} = 15A, dI_G/dt = 15 A/µs
I_{tail} bei I_{TGQM}, 125 °C
dV/dt bei 125 °C
I_{TGQM} repetitiv bei 125 °C
I_{TSM}: 10-ms-Puls

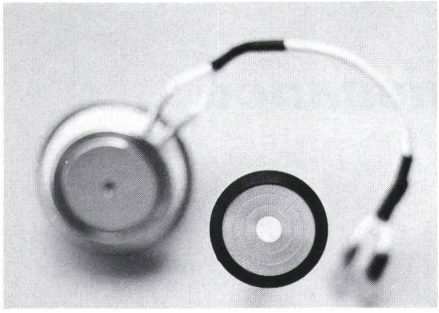

Fig. 11 Aktivteil eines abschaltbaren Thyristors (GTO)

Sperrspannung V_{DRM} = 1600 V
abschaltbarer Strom I_{TGQM} = 600 A

Man erkennt die starke Segmentierung der Kathoden-Emitterfläche. Das Zentrum und die Flächen zwischen den Emitterfingern bilden ein grosses gemeinsames Gate.

der Ladungsträger effektiv aus der p-Basis des Elementes absaugen zu können, muss ein sehr guter Zugriff des Gates gewährleistet sein. Man erreicht dies durch Aufteilung des Aktivteiles in mehrere hundert Einzelthyristoren mit einem grossen gemeinsamen Gate (Fig. 11). Die Emitterfinger sind typischerweise 200–300 µm breit und einige mm lang.

Ein kritischer Punkt beim Abschalten eines GTO ist das Vermeiden von lokalen Stromüberhöhungen, die zur Überhitzung und Zerstörung führen können. Dazu müssen einerseits die Bauelemente exakt dimensioniert werden, anderseits muss durch genaueste Kontrolle der Herstellungsprozesse sichergestellt werden, dass die vielen hundert Einzelthyristoren gleichzeitig ein- und ausschalten. Es hat sich dabei bewährt, für die Dotierung der p-Basis mit Bor die Ionenimplantation anzuwenden. Um die Schweifzeit zu verkürzen, werden neben den schon beschriebenen Methoden wie Golddiffusion und Elektronenbestrahlung auch Emitterkurzschlüsse auf der Anodenseite des GTO (Anodenshorts) eingesetzt.

3.3 Weitere Entwicklung

Asymmetrische und rückwärtsleitende Thyristoren haben einen reifen Entwicklungsstand erreicht. In Zukunft wird das Sortiment ergänzt und die anwendungsspezifische Optimierung weitergetrieben werden. Beim GTO zeichnen sich die folgenden Tendenzen ab:

- Die Fingergeometrien werden mit Breiten von 50 µm und weniger noch feiner werden, um eine höhere dV/dt-Festigkeit und besseres Abschalten zu erreichen [7].
- Heutige GTO können nur mit grossem Aufwand in Reihe geschaltet werden. Dies wird sich mit den schon in den Labors erarbeiteten Typen mit V_{DRM} bis zu 6 kV bei I_{TGQM} = 3000 A für den Betrieb an Zwischenkreisspannungen bis 3000 V umgehen lassen. Auch hier wird die Stoppschicht zum Einsatz kommen.
- Im Gegensatz zu Netzthyristoren sind beim GTO die dynamischen Verluste grösser als die statischen Durchlassverluste. Durch eine geschickte Ladungsträger-Lebensdauerkontrolle und bessere Optimierung können hier Fortschritte erzielt werden.
- Das grosse und weitverzweigte Gate hat gegenüber konventionellen Thyristoren einen um bis zu einer Grössenordnung höheren Zündstrom zur Folge. Die Integration eines Hilfsthyristors (amplifying gate) wird dadurch interessant.
- Mit rückwärtsleitenden GTO wird es möglich sein, die Kompaktheit und Zuverlässigkeit von spannungseingeprägten Wechselrichtern erheblich zu steigern.
- Das Entlehnen von Prozessen, die heute zur Herstellung von integrierten Schaltkreisen dienen, wird viele Detailverbesserungen erlauben.

Eine interessante Alternative zum GTO könnte der FCTh (field controlled thyristor) darstellen [8]. Er hat eine pn- oder pin-Diodenstruktur, wobei die Injektion von Ladungsträgern am Emitter durch eine sehr feine Gitterstruktur kontrolliert wird. Das Element hat einen sehr kleinen Durchlassspannungsabfall und eine bessere dV/dt-Festigkeit als der GTO, was bei mittleren Leistungen höhere Schaltfrequenzen zulässt. Nachteilig sind allerdings die extremen Anforderungen an die Herstellprozesse für das feine Gitter, speziell für grosse Scheibendurchmesser.

Literatur

[1] *J. Vitins:* Halbleiter-Bauelemente für die Leistungselektronik. BBC-Druckschrift Nr. CH-E 3.40591.8. Baden, Brown Boveri & Cie.

[2] *R. Sittig* und *A. Rüegg:* Perspektiven für die weitere Entwicklung von Halbleiter-Leistungsbauelementen. Brown Boveri Mitt. 71(1984)5, S. 222...227.

[3] *A.A. Jaecklin:* Leistungshalbleiter ohne Silizium? Bull. SEV/VSE 74(1983)17, S. 1024...1029.

[4] *H. Lawatsch* and *J. Vitins:* Protection of thyristors against overvoltage with BOD breakover diodes. IEEE-IAS Conference Proceedings (Industry Application Society), Toronto 1985; p. 935...939.

[5] *A.A. Jaecklin:* Light-activated, high-voltage thyristors. In: Eurocon '80. From electronics to microelectronics. Stuttgart, March 24...28, 1980. Preprints, p. 360...363.

[6] *P. De Bruyne, J. Vitins* and *R. Sittig:* Reverse conducting thyristors. Proceedings of the Brown Boveri Symposium on Semiconductor Devices for Power Conditioning, Baden, 21...22 September 1981; New York/London, Plenum Press, 1982, p. 151...175.

[7] *P. Roggwiller* a.o.: A highly interdigitated GTO power switch with recessed gate structure. IEEE International Electron Devices Meeting, San Francisco, 1984; p. 439...442.

[8] *J.-I. Nishizawa* a. o.: Low-loss, high speed switching devices, 2300 V 150 A static induction thyristor. IEEE Trans. ED 32(1985)4, p. 822...830.