

**Zeitschrift:** Bulletin Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik  
**Band:** 95 (2004)  
**Heft:** 15

**Artikel:** Vielseitige Halbleiter  
**Autor:** Linder, Stefan  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-857960>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 01.04.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Vielseitige Halbleiter

## Auch in der Energietechnik haben sich Bauelemente aus Silizium durchgesetzt

In den letzten 30 Jahren haben Leistungshalbleiter in der Antriebstechnik ebenso wie in der Energieübertragung und -verteilung schrittweise an Bedeutung gewonnen und elektromechanische Lösungen weit gehend verdrängt. Die Ursache hierfür ist, dass dank Halbleiterschaltern hohe Energieflüsse fast nach Belieben geformt werden können.

Das Prinzip von Leistungshalbleitern ist recht einfach erklärt – sie übernehmen die Funktion von einfachen Schaltern, das heisst, sie kennen in erster Linie nur zwei Zustände: «offen» und «geschlossen».

Das ganze Geheimnis der Bauelemente besteht darin, dass sie extrem schnell – typischerweise innerhalb weniger Mikrosekunden – zwischen diesen Zuständen wechseln können. Durch die schnelle Folge von Ein/Aus-Pulsen kann

Stefan Linder

somit fast jede beliebige Form des Energieflusses nachgebildet werden, zum Beispiel die in Bild 1 dargestellte Sinuswelle.

Halbleiterschalter sind mit verschiedensten, genau auf die Bedürfnisse der Kunden abgestimmten Strom- und Spannungskennwerten erhältlich. Die Grenzen liegen heute bei maximal 6,5 bis 8,5 kV Sperrvermögen im offenen Zustand und bei einem maximalen Strom von mehreren Tausend Ampère im geschlossenen Zustand. Reichen diese Spannungen und Ströme nicht aus, können die Schalter parallel oder in Reihe geschaltet werden. Ein Beispiel hierfür ist die Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) mit Spannungen von bis zu 600 kV.

### Verluste sind unvermeidlich

Die heute im oberen Leistungssegment am häufigsten verwendeten Halbleiterbauelemente sind Thyristor, IGCT<sup>1)</sup> und IGBT<sup>2)</sup> (Bild 2 und Tabelle). Trotz ihrer

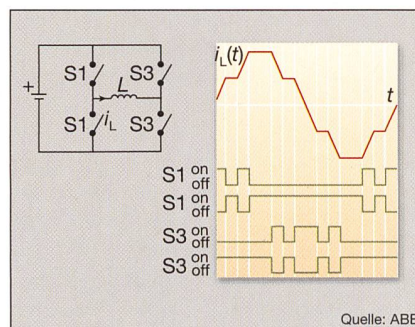


Bild 1 Vier einfache Ein/Aus-Schalter und eine Batterie sind alles, was zur Erzeugung eines annähernd sinusförmigen Stromverlaufs in einer Induktivität (L) erforderlich ist

Dominanz sind sie jedoch keineswegs ideale Schalter, denn sie verursachen Verluste. Diese Verluste sind zwar relativ gering – in der Regel fallen weniger als 0,5% der übertragenen Leistung als Verlustwärme an – doch da die Elemente grosse Mengen Energie übertragen, entstehen absolut betrachtet dennoch grosse Verlustleistungen. Diese müssen mit beträchtlichem Aufwand weggekühlt werden, was einen erheblichen Kostenfaktor beim Bau neuer Systeme darstellt.

Die Ursache der Verluste liegt in der Physik der Bauelemente: Im ausgeschalteten Zustand befinden sich im Siliziumkörper des Schalters fast keine frei beweglichen Elektronen, und deshalb kann kein Strom fließen. Schaltet das Element ein, so wird der Siliziumkörper förmlich mit beweglichen Elektronen «überflutet» und der Schalter kann einen grossen Strom leiten. Die Ladungsträgerdichte ist aber leider nicht so hoch wie beispiels-

weise in einem Metall, und deshalb entsteht ein merklicher Spannungsabfall im leitenden Zustand. Die damit verbundenen Verluste nennt man Durchlassverluste.

Bei der Rückkehr in den nicht leitenden Zustand müssen all diese Ladungsträger durch die wiederkehrende Spannung aus dem Bauelement entfernt («ausgeschwemmt») werden, weshalb beim Öffnen des Schalters für einen kurzen Moment bei hoher Spannung noch Strom fliesst – und die so genannten Abschaltverluste anfallen.

### Der Thyristor

Der Thyristor ist das älteste Halbleiterschalter-Prinzip, welches heute noch eine breite kommerzielle Bedeutung hat. Im Gegensatz zum neueren IGBT und IGCT ist der Thyristor ein Schalter, der zwar ein-, aber nicht ausgeschaltet werden kann. Die Rückkehr zum sperrenden (offenen) Zustand kann ausschliesslich durch die Stromumkehr im Lastkreis bewerkstelligt werden. Dies geschieht entweder durch eine externe Schaltung (einen so genannten Löschkreis) oder durch die natürliche Stromumkehr, zum Beispiel beim Nulldurchgang des Stroms in einer Sinuswelle. Ersteres wird heute in neuen Anwendungen nicht mehr praktiziert, da man die neueren IGBT und IGCT bequem durch ein Steuersignal ab-

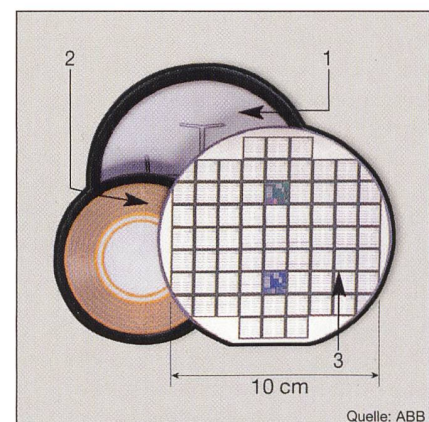


Bild 2 Drei Arten von Halbleiterbauelementen

1: Thyristor-Element für HGÜ-Anwendungen, 2: IGCT-Element für Anwendungen in der Leistungsklasse 2-5 MW, 3: Siliziumwafer mit rund 50 «IGBT-Chips», von denen jeder rund 200 kW schalten kann



Element	Thyristor	IGCT	IGBT
Symbol			
A: Anode; G: Gate (Steuerelektrode); K: Kathode			
Kontrolle	Ein: Stromimpuls an G Aus: Stromumkehr durch A-K	Ein/Aus über Stromsignal an G	Veränderlicher Widerstand, gesteuert durch Spannung über G-K
Parallelschaltung	Parameter müssen übereinstimmen (Auswahl der Elemente)	Verlangt eine Schutzbeschaltung	Ohne Schutzbeschaltung möglich
Serienschaltung	Verlangt eine Schutzbeschaltung		Schutzbeschaltung optional (empfohlen)
Kurzschluss- und Fehlerschutz	Der Kurzschlussstrom ist nicht begrenzt; eine Schutzbeschaltung ist nötig		Der Kurzschlussstrom ist begrenzt; der Kurzschluss kann über ein Steuersignal an G abgeschaltet werden

Quelle: ABB

Tabelle Hauptmerkmale von Thyristor, IGCT und IGBT

schalten kann und sich somit der Aufwand für einen externen Löschkreis erübrigt. Dass der Thyristor aber nicht vollständig durch diese neueren Bauelemente abgelöst worden ist, hängt damit zusammen, dass er im leitenden Zustand unerreicht niedrige Verluste aufweist. Er ist deshalb prädestiniert für Systeme mit hohen Strömen und natürlicher Stromkommutierung – also beispielsweise für die HGÜ. Tatsächlich wird der Thyristor heute noch immer bevorzugt für HGÜ-Systeme mit Leistungen über 500 MW eingesetzt.

**Der IGCT**

Im Gegensatz zum klassischen Thyristor lässt sich der IGCT durch seine spezielle Konstruktion jederzeit ein- und ausschalten und entspricht somit eher einem «echten» Schalter. Doch diese gewonnene Freiheit hat ihren Preis: Der IGCT hat im eingeschalteten Zustand einen grösseren Spannungsabfall, d.h. die Durchlassverluste sind im Vergleich zum Thyristor höher.

Die Steuerung des IGCT erfolgt über Stromsignale an der Steuerelektrode. Die aufzuwendende Leistung hängt stark von dem zu schaltenden Strom sowie der Ein/Aus-Taktfrequenz ab und liegt typischerweise im Bereich von 10–50 W.

Die Physik verhindert, dass der IGCT in den Übergängen vom geschlossenen zum offenen Zustand und umgekehrt beeinflussbar ist. Ist das Steuersignal einmal gegeben, gibt es kein Zurück mehr – das Bauelement schaltet alleine, bestimmt durch seine innere Dynamik. Dies hat mehrere für den Anwender wichtige Konsequenzen:

- Der IGCT erzeugt beim Einschalten von Natur aus steile Stromtransienten ( $di/dt$ ), die Hilfsbauelemente (im Speziellen die als elektrische Einwegventile funktionierenden Dioden) zerstören können. Es ist deshalb immer eine Schutzbeschaltung (ein so genannter  $di/dt$ -Snubber) notwendig, welche in Reihe zum IGCT geschaltet wird und die Stromsteilheit begrenzt.
- IGCT lassen sich auf Bauelementebene nur mit einer zweiten Schutzbeschaltung (einem  $dv/dt$ -Snubber) parallel schalten. Diese wird parallel zu den IGCT geschaltet und besteht hauptsächlich aus einem RC-Glied. Um auf den  $dv/dt$ -Snubber verzichten zu können, müsste beim IGCT das «Abschalt-Timing» auf wenige Nanosekunden abgestimmt sein, was in der Praxis noch nicht machbar ist.
- Sollen mehrere IGCT in Reihe geschaltet werden, müssen die Timing-Unterschiede beim Abschalten, welche durch innere Toleranzen im Silizium und externe Faktoren (Synchronität der Steuersignale) bedingt sind, ebenfalls durch den Einsatz eines  $dv/dt$ -Snubbers ausgeglichen werden. Der Kondensator des Snubbers nimmt die Ladungsunterschiede auf, welche durch die kleinen Zeitunterschiede beim Abschalten der IGCT entstehen und ermöglicht dadurch eine gleichmässige Spannungsaufteilung zwischen den Elementen.

Hieraus wird bereits deutlich, wo der IGCT seine Stärken hat: bei Anwendungen im hohen Leistungsbereich, in denen eine direkte Parallel- oder Reihenschaltung unerwünscht oder nicht notwendig ist.

Das klassische Beispiel sind Mittelspannungsantriebe (MVD) mit Leistungen über 500 kW. Dort besticht das Bauelement durch seine ausserordentliche Kompaktheit und durch die niedrigen Systemverluste.

Es bleibt anzumerken, dass der IGCT eine Weiterentwicklung des bewährten GTO<sup>3)</sup> ist, der aber heute wegen der verfügbaren und moderneren IGCT und IGBT kaum mehr in neuen Systemen eingesetzt wird.

**Der IGBT**

Der IGBT besteht im Kern aus einem Transistor und ist als lineares Element im Gegensatz zu Thyristoren jederzeit voll steuerbar. Dadurch können die kritischen Ein- und Ausschaltvorgänge soweit verlangsamt werden, dass der IGBT ausgesprochen anwendungsfreundlich wird:

- Es werden keinerlei Schutzbeschaltungen wie beim IGCT benötigt.
- Parallelschaltung auf Bauelementebene ist problemlos möglich.
- Die Reihenschaltung ist prinzipiell ohne  $dv/dt$ -Snubber möglich. In der Praxis werden aber aus Optimierungsgründen trotzdem meist kleine parallel zum IGBT angeordnete RC-Netzwerke verwendet.
- Des Weiteren verfügt der IGBT über zwei Vorteile, die in der Praxis wichtig sind:
  - Die Steuerung des Bauelements erfolgt durch Spannungssignale auf so genannte MOS<sup>4)</sup>-Eingänge, weshalb die Steuerleistung sehr gering ist – normalerweise reichen 1–2 W. Dies ist speziell bei der Reihenschaltung von Elementen wie in der HGÜ von Bedeutung, denn die Speisung der Steuereinheiten ist in Hochspannungssystemen technisch aufwändig und teuer.
  - Wenn auf Grund eines Systemfehlers ein Kurzschluss im IGBT entsteht, beispielsweise durch den Ausfall einer Motorwicklung, begrenzt der IGBT den Strom automatisch auf einen Wert in der Grössenordnung des 5–10-fachen Nennstroms. Der Kurzschluss kann dann innerhalb von 10 Mikrosekunden über den normalen Steuereingang sicher abgeschaltet werden, ohne dass der IGBT Schaden nimmt.

Der Nachteil des IGBT besteht darin, dass er auf Grund einer geringeren Ladungsträgerdichte im Silizium höhere Durchlassverluste aufweist als der IGCT. Die geringere Ladungsträgerdichte resultiert aber auch in niedrigeren Abschaltverlusten, da beim Abschalten weniger Träger ausgeschwemmt werden müssen.



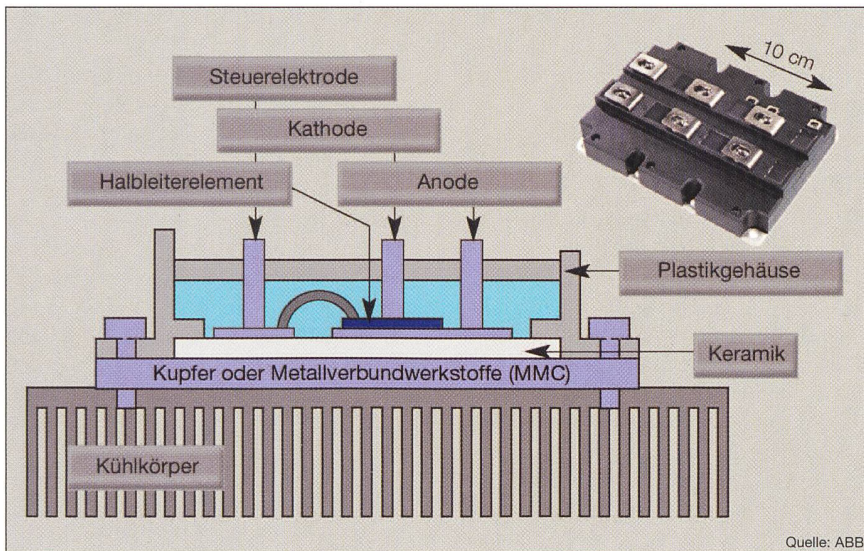


Bild 3 Isoliertes Gehäuse

Da der Kühlkörper galvanisch von den Strom führenden Teilen getrennt ist, können mehrere Komponenten auf einen einzigen Kühlkörper montiert werden

Die einfache Anwendung des IGBT und seine Flexibilität prädestinieren ihn für eine Vielzahl von Anwendungen in der Energieübertragung und -verteilung [1].

### Die Verpackung ist entscheidend

Die Gehäusetechnologie bestimmt ganz wesentlich die Anwendungsbereiche für Leistungshalbleiter. Es sind zwei Arten von Gehäuseformen gebräuchlich, die sich in den folgenden drei Hauptmerkmalen unterscheiden:

- das Konzept der Verlustwärmeabfuhr zum Kühlkörper
- die Art der Isolation zwischen den Lastanschlüssen und dem Kühlkörper

- der elektrische Zustand beim Ausfall des Halbleiters.

### Flexibel: das isolierte Gehäuse

Das Konzept des isolierten Gehäuses besteht darin, die thermische Funktion von der elektrischen zu trennen: Im Inneren des Gehäuses sind die Halbleiterkomponenten auf eine isolierende, aber hoch Wärme leitende Keramik montiert, welche auf den Kühlkörper aufgeschraubt wird (Bild 3). Durch die galvanische Trennung können mehrere Komponenten mit verschiedenen elektrischen Potenzialen auf einem einzigen Kühlkörper montiert werden, welcher seinerseits auf einem definierten Potenzial (zum Beispiel Erdpotential) verbleiben kann. Die Konstruktion des isolierten Gehäuses

erlaubt es auch, ganze Systembausteine – z.B. eine komplette Wechselrichterbrücke – in einem einzigen Gehäuse unterzubringen. Das isolierte Gehäuse hat sich zur Standardbauform für IGBT-Produkte entwickelt. Da es meist mehrere Halbleiterkomponenten enthält, wird es üblicherweise als IGBT-Modul bezeichnet.

Isolierte Gehäuse eignen sich am besten für Systeme mit Leistungen bis zu einigen MW. Werden höhere Leistungen gefordert, wie beispielsweise in der HGÜ, muss in der Regel zur Reihenschaltung von Bausteinen gegriffen werden. Hierfür ist das isolierte Gehäuse nur bedingt geeignet, denn

- das Isolationsvermögen der verwendeten Keramiken ist auf einige kV begrenzt, weshalb eine Reihenschaltung von hohen Spannungen auf einem einzigen Kühlkörper nur bedingt möglich ist;
- aus Verfügbarkeitsgründen werden in der HGÜ-Technik und in anderen Hochspannungs-Anwendungen mehr als die minimale Anzahl Schalter in Reihe geschaltet (Einbau von Redundanzen). Fällt eines der in Reihe geschalteten Elemente aus, so können die restlichen Schalter die Funktion des Ventils noch immer sicherstellen – vorausgesetzt, dass das ausgefallene Element in einen niederimpedanten Zustand («Kurzschluss») übergeht. Beim isolierten Gehäuse führt der Ausfall eines Halbleiters aber aus konstruktionsbedingten Gründen meist zu einem offenen Kontakt.

Um die Vorteile der IGBT-Technologie dennoch für die HGÜ und andere Hochspannungs- und Hochleistungsanwendungen wie beispielsweise zur Blindleistungskompensation oder für die Netzstörung nutzen zu können, setzt

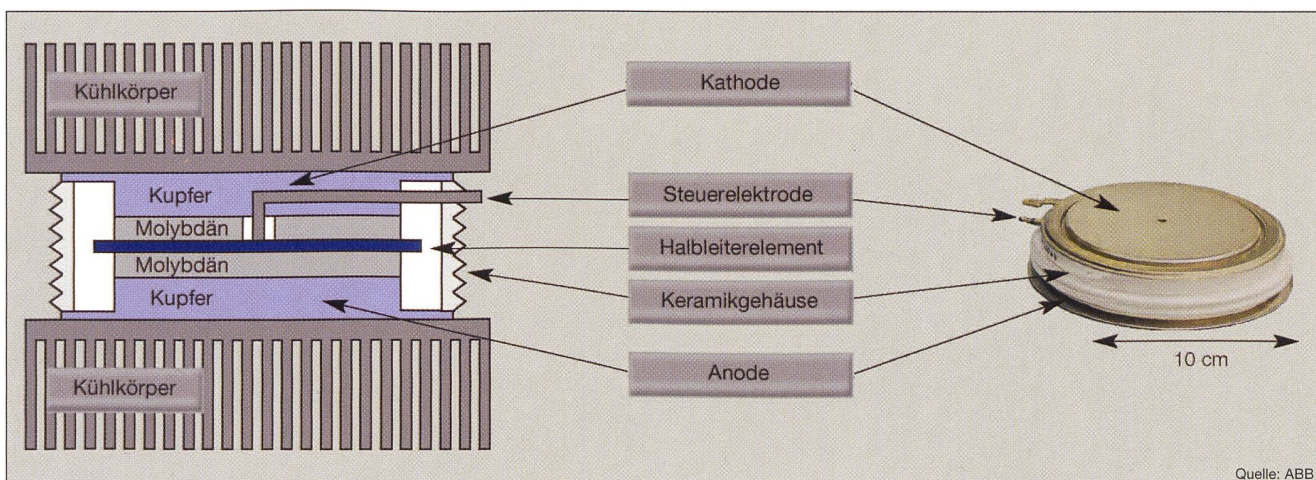


Bild 4 Druckkontaktiertes Gehäuse

Die Kühlkörper befinden sich auf dem elektrischen Potenzial der Anode und Kathode. Molybdänscheiben fungieren als «Dehnungspuffer» und reduzieren die mechanische Abnutzung auf Grund von Temperaturänderungen.



man druckkontaktierte Gehäuse für IGBT ein.

### Kraftvoll: das druckkontaktierte Gehäuse

Beim druckkontaktierten Gehäuse sind der thermische und der elektrische Kreis nicht durch eine Keramik getrennt (Bild 4). Stattdessen wird das Bauelement mit hoher Kraft, welche durch eine externe Einspannvorrichtung erzeugt wird, mit den elektrischen Kontaktflächen gegen zwei Kühlkörper gedrückt. Der geschaltete Strom fließt «vertikal» durch das Element, üblicherweise durch die Kühlkörper hindurch.

Druckkontaktierte Gehäuse können offensichtlich sehr leicht in Reihe geschaltet werden, indem man sie – jeweils durch einen Kühlkörper getrennt – aufeinander stapelt. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass beim Ausfall eines Halbleiters durch den hohen Anpressdruck die metallenen Platten der Anoden- und Kathoden-Elektroden verschmelzen und sich in der Folge ein sicherer Kurzschluss

bildet. Diese beiden Eigenschaften machen das druckkontaktierte Gehäuse zur idealen Lösung für alle Hochspannungs- und Hochleistungsanwendungen<sup>9)</sup>.

### Was bringt die Zukunft?

Die Technologie der heute erhältlichen Leistungshalbleiter nähert sich bereits den Grenzen dessen, was das Material Silizium zulässt. Es sind deshalb keine Quantensprünge in der Bauelementtechnologie mehr zu erwarten, und Komponenten mit viel höherer Spannung (über 10 kV) sind technisch kaum realisierbar.

Um diese Grenzen überwinden zu können, wird weltweit seit Jahren intensiv nach neuen Materialien mit besseren Eigenschaften geforscht. Das bekannteste hiervon ist Siliziumkarbid (SiC). Doch leider bringen diese neuen Materialien eine Reihe von technischen Problemen mit sich, die nur schwer zu lösen sind. Aus heutiger Sicht werden diese Materialien im Leistungssegment von 100 kW und höher wohl frühestens in 10–15 Jah-

ren eine wirtschaftliche Alternative zu Silizium darstellen.

Was wir aber in der Zwischenzeit erwarten dürfen, ist eine kontinuierliche Verbesserung der heute erhältlichen Komponenten mit niedrigeren Verlusten, höherer Stromtragfähigkeit und besserem Schaltverhalten. Ferner sind in der Gehäusetechnologie deutliche Fortschritte möglich. Die Anwendung der Bauelemente wird sich einfacher gestalten, und neue Materialien im Bereich der Kühlung werden eine verbesserte Ausschöpfung des vollen Siliziumpotenzials ermöglichen.

### Referenz

- [1] G. Asplund, et al: HVDC Light – Gleichstromübertragung mit Spannungszwischenkreis-Umrichtern. ABB Technik 1/1998, S. 4-9. Weitere Informationen zum Thema: [www.abb.com/semiconductors](http://www.abb.com/semiconductors).

### Angaben zum Autor

**Stefan Linder**, Dr. sc. techn., Dipl. El.-Ing. ETH, ist Entwicklungsleiter der Geschäftseinheit Semiconductors bei ABB.  
[stefan.linder@ch.abb.com](mailto:stefan.linder@ch.abb.com)

## Des semiconducteurs polyvalents

### Les composants au silicium se sont imposés également dans la technique énergétique

Ces 30 dernières années, les semiconducteurs de puissance ont joué un rôle de plus en plus important dans la technique d'entraînement aussi bien que dans la transmission et la distribution d'énergie, remplaçant largement les solutions électromécaniques. La raison en est que les commutateurs à semiconducteurs permettent de former les flux importants d'énergie presque à volonté.

<sup>1</sup> IGCT: Integrated Gate Commutated Thyristor

<sup>2</sup> IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

<sup>3</sup> GTO: Gate Turn-off Thyristor

<sup>4</sup> MOS: Metal Oxide Semiconductor

<sup>5</sup> Bei ABB sind druckkontaktierte Gehäuse die Standardbauform für Thyristoren, GTO und IGCT; während bei Thyristoren eine grosse Auswahl von Spannungs- und Stromklassen bis zu einer Maximalspannung von 8,5 kV anbietet, sind IGCT in verschiedenen Konfigurationen mit Sperrspannungen zwischen 4,5 kV und 6,5 kV erhältlich.

Durch eine spezielle von ABB entwickelte Konstruktionsform ist das IGBT-Druckkontaktgehäuse fast vollständig immun gegen Fehler in der Einspannung, was die Aufbaukosten beim Anwender senkt und die Zuverlässigkeit im Betrieb erhöht. Durch eine modulare Aufbauweise kann die Stromtragfähigkeit zudem mit einfachsten Mitteln den Kundenbedürfnissen angepasst werden.