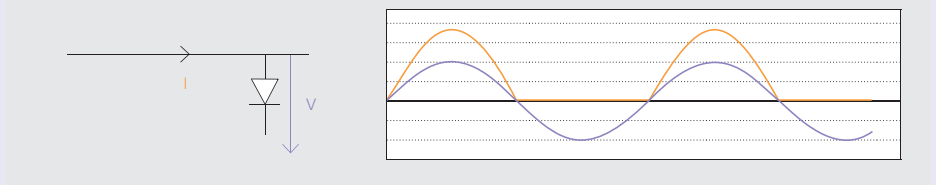




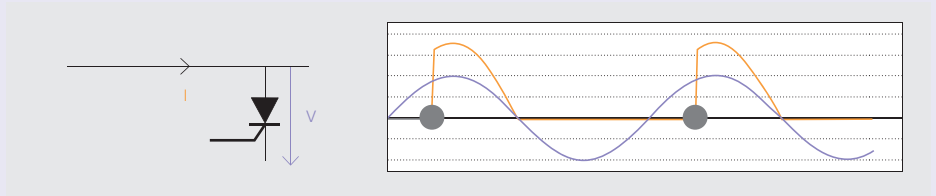
# Leistungshalbleiter

Halbleitertechnik bei ABB – früher und heute

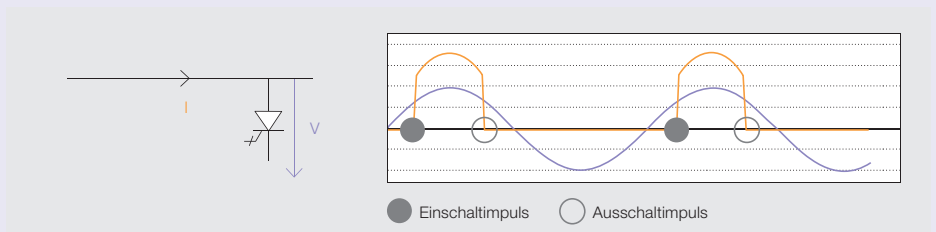
ANDREAS MOGLESTUE, MUNAF RAHIMO, SVEN KLAKA, CHRISTOPH HOLTMANN – Was haben eine Lokomotive, eine HGÜ-Station und ein Telefonladegerät gemeinsam? In allen dreien wird elektrischer Strom umgewandelt, und wenn sie neueren Datums sind, ist dabei höchstwahrscheinlich Leistungselektronik im Spiel. Seit über 60 Jahren entwickeln und fertigen ABB und ihre Vorgängerunternehmen Leistungshalbleiter – jene kleinen, robusten Schaltelemente im Herzen von Stromrichtern.



1a Diode



1b Thyristor



1c GTO

Der Begriff „Halbleiter-Revolution“ wird häufig im Zusammenhang mit neuen Technologien verwendet, die in jüngster Vergangenheit in den Bereichen Kommunikation, Datenverarbeitung und Unterhaltungselektronik entstanden sind. Immer mehr Menschen können soziale Medien nutzen oder Online-Handel betreiben, weil hochintegrierte Halbleiter heute zu geringen Stückpreisen verfügbar sind. Daneben findet sozusagen im Verborgenen eine weitere Halbleiter-Revolution statt, die keinen geringeren Einfluss auf die weitreichenden Veränderungen der letzten Jahrzehnte hatte: die Entwicklung der Leistungselektronik.

Die Leistungselektronik ermöglicht eine sichere, effiziente und kostengünstige Umwandlung von Elektrizität mit verschiedenen Frequenzen und Spannungen. Wenn man bedenkt, dass schätzungsweise 65 % der erzeugten elektrischen Energie für Elektromotoren eingesetzt werden, liegt in der Möglichkeit zur effizienteren Steuerung von Motoren mittels Leistungselektronik ein enormes Einsparungspotenzial im Hinblick auf

Ressourcen und Emissionen. Darüber hinaus kann durch den Einsatz von Leistungselektronik im Stromnetz (z. B. durch FACTS oder HGÜ) die Regelbarkeit des Leistungsflusses verbessert werden, und es kann mehr Leistung mit geringeren Verlusten übertragen werden. Und auch das massive Wachstum im Bereich der Sonnen- und Windenergie in den letzten Jahren wäre ohne leistungselektronische Umrichter als Bindeglied zum Stromnetz nicht möglich gewesen.

Doch was genau sind Halbleiter?

Ohne Leistungshalbleiter wäre die derzeitige Revolution der erneuerbaren Energien undenkbar.

#### Halbleiter

Ein Halbleiter ist ein Material, das sowohl die Eigenschaften eines Leiters als auch eines Nichtleiters aufweisen kann. Seine Leitfähigkeit kann durch Faktoren wie Verunreinigungen, Geometrie, elektrische Felder, Temperatur, Druck und Licht

**Titelbild**  
Das ABB-Werk in Lenzburg mit der alten Fabrik für bipolare Bauelemente links und der neuen BiMOS-Anlage rechts.

## 2 Meilensteine in der Halbleitergeschichte von ABB

1954	Beginn der Halbleiterentwicklung in Ludvika (ASEA) und Baden (BBC)
1956	BBC bringt ihre erste Diode auf den Markt (100 V/100 A). Einführung des ersten BBC-Thyristors (1.200 V/100 A)
1961	Diode erreichen 650 V/200 A.
1969	Eröffnung des neuen BBC-Werks in Lampertheim
1970	Thyristoren erreichen 3.000 V/800 A.
1976	Einführung der Neutronen-Transmutationsdotierung (BBC)
1977	Eröffnung des neuen BBC-Werks in Lenzburg
1980	Thyristoren erreichen 5 kV/2 kA.
1988	ASEA und BBC fusionieren zu ABB.
1990	Verkauf des Werks Lampertheim an IXYS
1991	Konzentration der ABB-Halbleiteraktivitäten in Lenzburg
1992	Vorstellung des IGBT-Prototyps für 4,5 kV/600 A
1995	Erste Prototypen des IGCT für 4,5 kV/3 kA. GTOs und Diode erreichen 4,5 kV/4 kA.
1996	Einführung des 3,3-kV/1,2-kA-IGBT-Moduls für Traktionsanwendungen Einführung der BCT-Technologie (bidirektional gesteuertes Thyristor)
1997	ABB bringt eine komplette IGCT-Reihe von 500 kW bis 9 MW auf den Markt. Einführung des 4,5-kV/1,2-kA-IGBT-Moduls mit integriertem Kühlkörper für Traktionsanwendungen Einführung des 2,5-kV/700-A-IGBT für HVDC Light®
1998	Eröffnung der 5"-IGBT-Waferfertigung in Lenzburg
2000	Einführung der 2,5-kV-StakPak-Module für HVDC Light
2001	Einführung des IGBT für 1,2 kV–1,7 kV auf Basis der Thin Wafer Soft Punch-Through (SPT) Plattform
2003	Einführung der Plattform für Hochspannungs-SPT-IGBT/Diode (mit rekordverdächtigem sicherem Arbeitsbereich) Einführung der HiPak-Modulplattform für SPT-IGBT mit 2,5 kV–3,3 kV Erweiterung auf 6"-IGBT-Waferfertigung in Lenzburg
2005	Einführung der HS-HiPak-Modulplattform für SPT-IGBT mit 3,3 kV–6,5 kV
2006	Einführung der verlustarmen SPT+-IGBT-Plattform für 1,2 kV–6,5 kV
2007	Einführung der High-Power-Technology (HPT)-IGBT-Plattform
2009	Einführung des 8,5-kV/8-kA-Thyristors Einführung der Hochspannungs-BIGT-Technologie
2010	Erweiterung der Kapazität in Lenzburg und Akquisition von Polovodice Einführung der 4,5-kV-StakPak-Module für HVDC Light Vorstellung der 10-kV-IGCT-Technologie
2011	Demonstration des BIGT für HGÜ-Leistungsschalter
2013	Spatenstich für WBG-Labor in Baden-Dättwil Einführung des verbesserten HiPak 2013 Einführung der BGCT-Technologie (IGCT mit rückwärts leitender Diode auf demselben Wafer)
2014	Einführung der Enhanced-Trench-IGBT-Technologie

## 3 Thyristoren von BBC aus den 1970er Jahren



## BBC brachte ihren ersten Thyristor 1961 auf den Markt.

beeinflusst werden. Aus diesem Grund eignen sich Halbleiter für viele Sensoranwendungen. Vor allem aber sind sie aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeit der Eingangs- und Ausgangsgrößen inhärent steuerbar. So lässt sich aus einem Transistor, dem vielleicht bekanntesten Halbleiterbauelement, ein einfacher Verstärker bauen: Ein von einer Antenne aufgenommenes (und auf geeignete Weise gefiltertes und gleichgerichtetes) schwaches Signal kann einem Transistor zugeführt werden, wo es in ein stärkeres Ausgangssignal umgesetzt wird, das sich mit einem Lautsprecher wiedergeben lässt. Dies ist die Grundlage für einfaches Radio.

In der Leistungselektronik werden Bauelemente mit einer etwas anderen Funktionalität benötigt. Hier ist eine möglichst energieeffiziente Leistungsumwandlung gefragt – nicht nur aus wirtschaftlichen Gründen, sondern auch, weil Verluste unmittelbar in Wärme umgesetzt werden, was die Bauelemente beschädigen kann. Deshalb werden Leistungshalbleiter weniger als Verstärker, sondern eher als physische Schalter konzipiert, die entweder ein- oder ausgeschaltet sind.

### Die Diode

Die Diode ist das einfachste Bauelement in der Leistungselektronik. Sie leitet Strom in eine Richtung und sperrt ihn in die andere Richtung → 1a. Damit eignet sie sich hervorragend für die Gleichrichtung, d. h. die Umwandlung von Wechselstrom (AC) in Gleichstrom (DC). Das Konzept der Diode ist bereits seit 1874 bekannt, als Karl Ferdinand Braun die Gleichrichtung in Metallsulfiden entdeckte. Die ersten für energietechnische Anwendungen geeigneten Halbleiterdioden kamen jedoch erst in den 1950er Jahren auf.

Die ABB-Vorgängerunternehmen ASEA und BBC begannen beide im Jahr 1954 mit der Entwicklung und 1956 mit der Produktion von Halbleiterdioden → 2.

### Der Thyristor

Einer der Nachteile von Diodengleichrichtern ist, dass ihre Ausgangsleistung nicht steuerbar ist. Anders als eine Diode kann ein Thyristor kontrolliert eingeschaltet werden, indem an einen dritten Kontakt, das sogenannte Gate, ein Strom angelegt wird. Nun mag man sich fragen, was ein Schalter nützt, der ein- aber nicht ausgeschaltet werden kann. Wer würde sich z. B. einen Lichtschalter installieren, der nicht wieder abgeschaltet werden kann? Tatsächlich sind in vielen Dimmerschaltern Thyristoren verbaut. Der Trick besteht darin, dass der Strom nicht abgeschaltet werden muss, sondern beim Nulldurchgang von selbst aufhört zu fließen → 1b. Durch Veränderung des Zündphasenwinkels kann die durchschnittliche Leistungsaufnahme der



Im Jahr 1998 eröffnete ABB eine neue Waferfertigung. Seitdem kann die gesamte IGBT-Fertigung in-house abgewickelt werden.

Leuchte (und damit ihre Helligkeit) gesteuert werden. Neben der Wandlung von Wechsel- in Gleichstrom können Thyristoren auch zur Wandlung von DC in AC (Wechselrichtung) eingesetzt werden, sofern eine lokale Kommutation (z. B. eine lokale Stromerzeugung) auf der AC-Seite vorhanden ist.

Der Thyristor wurde erstmals 1950 von William Shockley beschrieben. BBC begann 1961 mit der Produktion.

#### Der GTO

Obwohl der Thyristor in vielen Bereichen Anwendung findet, besteht dennoch ein Bedarf an Bauelementen, die auch abgeschaltet werden können – z. B. bei der Pulsweitenmodulation (PWM) zur Umwandlung von DC in AC ohne die Unterstützung lokaler Kommutation (wobei zudem weniger Oberschwingungen entstehen und somit auf Filter verzichtet werden kann).

Dies wird durch den Gate Turn-Off Thyristor (GTO) ermöglicht. Von der Funktionsweise her ähnelt er dem Thyristor, jedoch kann er durch einen negativen Strom am Gate abgeschaltet werden → 1c.

GTOs gibt es seit den 1960er Jahren, aber sowohl ASEA als auch BBC wurden auf diesem Gebiet erst spät aktiv. So brachte BBC ihren ersten GTO im Jahr 1980 auf den Markt.

#### Der IGBT

In den 1990er Jahren tauchte ein neues Bauelement in der Leistungselektronik

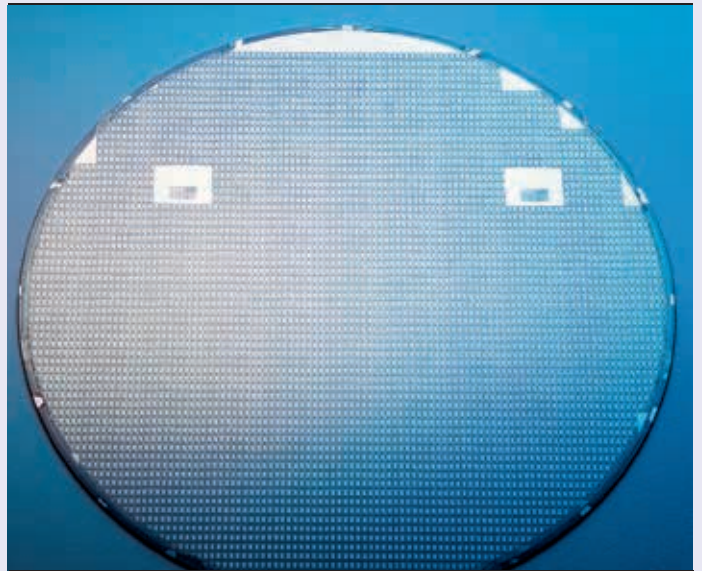
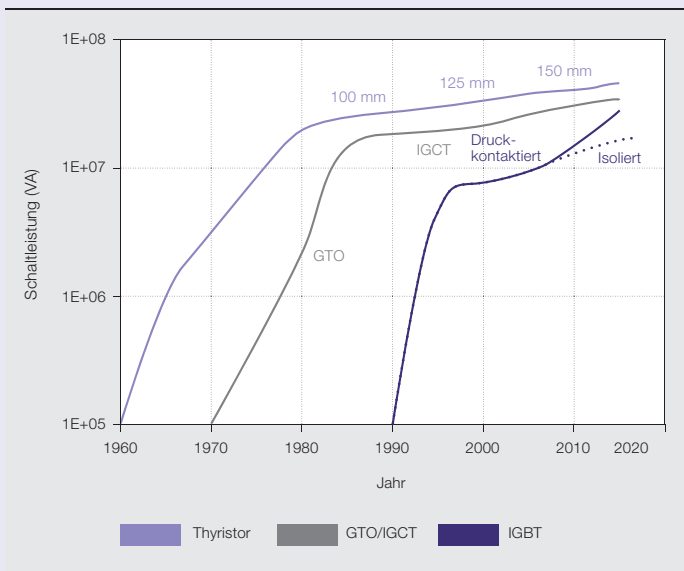
auf. Der Integrated-Gate Bipolar Transistor (IGBT) wird durch Anlegen einer Spannung anstelle eines Stroms gesteuert, was die Steuerschaltung deutlich vereinfacht. Zudem bietet er eine höhere Betriebsstabilität als die oben beschriebenen früheren Bauelemente (die unter dem Begriff der bipolaren Technologie zusammengefasst werden), da die Spannung des IGBT bei einem Kurzschluss ansteigt und der Strom automatisch begrenzt wird. Dies reduziert die Komplexität der erforderlichen Schutzbeschaltung. Und da IGBTs nicht in druckkontaktierten Stapeln (sog. Stacks) montiert werden müssen, lassen sie sich leichter installieren und austauschen.

ABB begann im Jahr 1992 mit der IGBT-Fertigung. Im Jahr 1998 eröffnete das Unternehmen eine neue Waferfertigung im schweizerischen Lenzburg. Seitdem kann die gesamte IGBT-Fertigung in-house abgewickelt werden.

Während IGBTs zunächst hauptsächlich für Antriebsanwendungen eingesetzt wurden, spielen sie seit Einführung der selbstgeführten HGÜ mit HVDC Light im Jahr 1997 auch in Stromnetzen eine Rolle.

#### Der IGCT

Auch wenn man denken könnte, dass mit der raschen Verbreitung des IGBT die Ära des GTO ebenso schnell zu Ende gehen müsste, sind diese Bauelemente besonders in höheren Leistungsklassen, die von IGBTs nicht optimal bedient werden, noch immer gefragt.



## Der IGCT ist im Wesentlichen ein GTO mit integrierter (statt externer) Gate-Einheit.

Im Jahr 1997 brachte ABB den Integrated Gate-Commutated Thyristor (IGCT) auf den Markt. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um einen GTO mit integrierter (statt externer) Gate-Einheit, die Stromimpulse an das Gate liefert. Die stärkere räumliche Integration verringert die Induktivität, was schnellere Schaltvorgänge und geringere Oberschwingungen ermöglicht. Der IGCT eignet sich hervorragend für Hochleistungs-Antriebsanwendungen. Alle diese Schaltelemente werden von ABB kontinuierlich weiterentwickelt → 6.

### Halbleiterfertigung

Die Herstellung von Leistungshalbleitern ist ein komplexer Prozess, der eine hohe Präzision und eine kontrollierte, äußerst saubere Umgebung erfordert. Der Grundwerkstoff ist ein reiner monokristalliner Siliziumhalbleiter in Form einer dünnen Scheibe (Wafer), dessen elektrische Eigenschaften durch Einbringen von Fremdatomen eines Dotierstoffs in die Kristallstruktur verändert werden. Zur Herstellung der komplexen Struktur eines Leistungshalbleiters sind zahlreiche Schritte notwendig → 7. Aus dem fertigen Wafer

werden schließlich die einzelnen Halbleiter zugeschnitten, getestet und gehäust.

### Halbleiter bei ABB

Die beiden ABB-Vorgängerunternehmen ASEA und BBC stiegen unabhängig voneinander im Jahr 1954 in die Halbleiterforschung und -herstellung ein → 2. Zum Zeitpunkt der Fusion im Jahr 1988 gab es drei aktive Fertigungsstandorte, die 1991 im Lenzburger Werk zusammengeführt wurden. Während die Erforschung und Fertigung von Halbleitern anfangs vor allem der Unterstützung anderer Aktivitäten des Unternehmens diente, konnte ABB nach Gründung der Tochtergesellschaft ABB Semiconductors Ltd das Halbleitergeschäft weiter ausbauen, um schließlich auch externe Kunden direkt zu beliefern.

1998 wurde in Lenzburg eine Fabrik für BiMOS-Bauelemente (IGBTs und Dioden) eröffnet → Titelbild. Mit der Übernahme des Prager Unternehmens Polovodice kam 2010 ein zweiter Fertigungsstandort hinzu. Heute findet die Fertigung bipolarer Bauelemente sowohl in Prag als auch in Lenzburg statt, während BiMOS nur in Lenzburg hergestellt werden.

### Wide-Bandgap-Materialien

Abgesehen von einigen frühen Germaniumdioden basieren alle bisher beschriebenen ABB-Halbleiter auf Silizium. Im Jahr 2014 eröffnete ABB in ihrem Forschungszentrum in Baden-Dättwil (Schweiz) ein neues Labor für die Entwicklung von Werkstoffen mit großem Bandabstand (Wide Bandgap). Bauele-

mente aus diesen Werkstoffen versprechen geringere Verluste und eine bessere Wärmebeständigkeit als Elemente auf Siliziumbasis, sodass noch höhere Leistungen erreicht werden können. Damit setzt sich die Halbleiter-Revolution auch nach mehr als 60 Jahren Entwicklung kontinuierlich fort.

Dieser Beitrag basiert zum Teil auf dem Artikel „Halbleitergenerationen: Rückblick auf 60 Jahre Halbleiterentwicklung bei ABB“, der in der ABB Review 3/14 erschienen ist.

**125**  
YEARS SERVING  
THE WORLD FROM  
SWITZERLAND  
[www.abb.com](http://www.abb.com)

### Andreas Moglestue

ABB Review

Baden-Dättwil, Schweiz

[andreas.moglestue@ch.abb.com](mailto:andreas.moglestue@ch.abb.com)

### Munaf Rahimo

Sven Klaka

Christoph Holtmann

ABB Semiconductors Ltd.

Lenzburg, Schweiz

[munaf.rahimo@ch.abb.com](mailto:munaf.rahimo@ch.abb.com)

[sven.klaka@ch.abb.com](mailto:sven.klaka@ch.abb.com)

[christoph.holtmann@ch.abb.com](mailto:christoph.holtmann@ch.abb.com)