

Einführung Leistungselektronik für Windenergieanlagen

Kapitel 1 bis 3

Prof. Dr.-Ing. Hans-Günter Eckel

Impressum

Herausgeber:
Universität Rostock
Wissenschaftliche Weiterbildung
2014

Erarbeitet von:
Prof. Dr.-Ing. Hans-Günter Eckel
Universität Rostock
Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

Einführung „Leistungselektronik für Windenergieanlagen“

In drehzahlvariablen Windenergieanlagen sind Umrichter eine Schlüsselkomponente für die Leistungsübertragung zwischen Generator und Transformator. Der Kurs „Leistungselektronik für Windenergieanlagen“ soll Ihnen das notwendige Rüstzeug geben, um die Funktionsweise und Auslegung dieser Umrichter zu verstehen, verwendete Topologien und Leistungshalbleiter beurteilen zu können, sowie kritische Belastungs- und Fehlerfälle zu kennen. Ziel ist es, die für die Systemauslegung der Windenergieanlagen relevanten Umrichtereigenschaften zu kennen und mit Umrichterherstellern fachkundig diskutieren zu können.

Der Kurs setzt Kenntnisse zu Grundlagen der Elektrotechnik, wie sie in einem einsemestrigen Modul in ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen vermittelt werden, voraus. Er gliedert sich in Selbstlernphasen und Vorlesungen. In

den Selbstlernphasen sollen Sie sich die grundlegenden Kenntnisse erarbeiten. Der Aufwand dafür hängt stark von Ihren Vorkenntnissen ab. In den Präsenzveranstaltungen liegt der Schwerpunkt auf der Interpretation und Bewertung des gelernten Stoffes sowie auf weiterführenden Details. Auch besteht hier die Gelegenheit zum Erfahrungsaustausch mit anderen Kursteilnehmern.

Diese Einführung gibt einen Überblick über den in diesem Modul behandelten Stoff. Als Lehrbuch wird „Grundkurs Leistungselektronik“ von Joachim Specovius, Vieweg, empfohlen. Die Kapitelangaben beziehen sich auf die 1. Auflage. Ergänzend können das Semikron „Applikationshandbuch Leistungshalbleiter“ und das infineon Handbuch „IGBT Modules“ besonders zu leistungshalbleiternahen Themen empfohlen werden.

Rostock, den 14.10.14

Prof. Dr.-Ing. Hans-Günter Eckel



1. Grundlagen der Leistungshalbleiter

Leistungshalbleiter gehören zu den Halbleiterbauelementen, weisen gegenüber denen zur Signalverarbeitung aber einige besondere Eigenschaften auf. Zum Verständnis der Leistungshalbleiter ist zunächst ein Grundverständnis der Halbleiter überhaupt erforderlich.

1.1 Halbleitermaterialien

Undotierte Halbleiter besitzen bei Raumtemperatur nur eine geringe Leitfähigkeit. Durch Dotierung mit Donatoren (geben im ionisierten Zustand ein Elektron ab und sind dann als Atomrumpf positiv geladen) und Akzeptoren (nehmen im ionisierten Zustand ein Elektron auf – stellen damit ein Loch zur Verfügung – und sind dann als Atomrumpf negativ geladen) kann die Leitfähigkeit in weiten Grenzen eingestellt werden. Mit Donatoren dotierte Halbleiter haben bei Raumtemperatur eine ihrer Dotierungskonzentration entsprechende Ladungsträgerdichte an Elektronen, entsprechend dotierte Gebiete im Halbleiter werden n-Gebiete genannt. Mit Akzeptoren dotierte Gebiete sind p-Gebiete, in ihnen stehen entsprechend der Dotierungskonzentration Löcher zur Verfügung.

Als Halbleitermaterial kommt in der Leistungselektronik vorwiegend Silizium (Si) zum Einsatz. Wichtigste Eigenschaft des Materials ist die Bandlücke zwischen Valenzband und Leitungsband, die angibt, wie viel Energie notwendig ist, um eine Elektron aus dem Valenzband (in dem es nicht beweglich ist) in das Leitungsband (in dem es frei beweglich ist) zu heben. Je höher die Bandlücke ist, desto höher ist die Temperatur, in der auch der undotierte Halbleiter eigenleitend wird, desto höher ist die kritische Feldstärke, bei der es zum Avalanche Durchbruch kommt und desto größer ist die Schwellspannung in der Kennlinie eines pn-Übergangs.

	Bandlücke	Elektronen- und Löcher-Beweglichkeiten	
	W_G [eV] @ 300K	μ_n [cm ² /Vs] @ 300K	μ_p [cm ² /Vs] @ 300K
Ge	0,66	3900	1900
Si	1,12	1500	450
GaAs	1,42	8500	400
4H-SiC	3,26	1000	115
GaN	3,45	1250	850
Diamant	5,5	1800	1200

Abbildung 1: Materialeigenschaften von Halbleitern

Eine größere Bandlücke erlaubt also einen Betrieb bei höheren Sperrschichttemperaturen (bei Silizium begrenzt auf etwa 200 °C, wobei reale Bauelemente aus anderen Gründen meist niedrigere Grenzen aufweisen). Ein Leistungshalbleiter mit größerer Bandlücke kann wegen der höheren kritischen Feldstärke dünner werden (was Durchlassspannung und Schaltverluste reduziert). Allerdings ist die Schwellspannung deutlich höher.

Als Alternative zu Silizium stehen heute als Materialien mit großer Bandlücke (wide bandgap material, WBG) Silicium-Carbid (SiC) (allerdings zu in etwa Faktor 100 höheren Kosten für die Wafer), und neuerdings auch Gallium Nitrid (GaN) auf Si-Wafer zur Verfügung.

1.2 Der pn-Übergang

Durch Zusammenfügen eines p- und eines n-dotierten Halbleitergebiets entsteht ein pnÜbergang. Im Übergangsbereich diffundieren Elektronen in das p-Gebiet und Löcher in das n-Gebiet und rekombinieren dort (die Elektronen füllen die Löcher auf, die Ladung kompensiert sich, von außen ist keine Ladung mehr sichtbar). So entsteht eine Raumladungszone ohne freie Ladungsträger, in der die Ladung der ionisierten Atomrümpfe nicht

mehr durch Elektronen oder Löcher kompensiert wird, also eine räumlich feste Ladung vorhanden ist. In der Raumladungszone kompensieren sich ohne von außen angelegte Spannung (im thermodynamischen Gleichgewicht) die Diffusionsströme mit den Feldströmen.

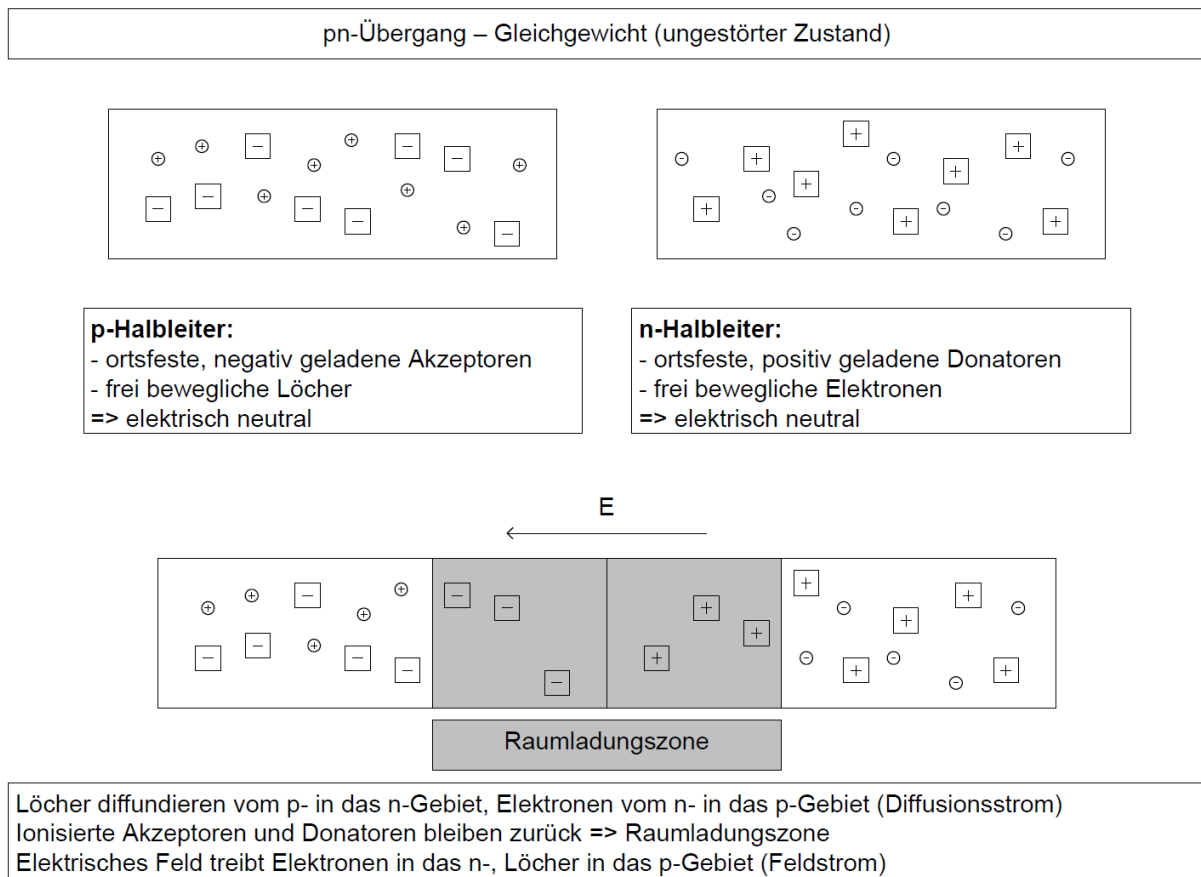


Abbildung 2: Der pn-Übergang im thermodynamischen Gleichgewicht

Die Raumladungszone verhindert einen Stromfluss. Wird von außen eine Spannung in Durchlassrichtung angelegt (positiv an der p-dotierten Anode), dann wird die Raumladungszone kleiner, die Diffusionsströme werden nicht mehr vollständig von den Feldströmen kompensiert, es fließt Strom. Der pn-Übergang (die pn-Diode) wird im Durchlass betrieben. Wird von außen eine Spannung in

Sperrichtung angelegt, so wird die Raumladungszone größer, der pn-Übergang (die pn-Diode) kann Spannung aufnehmen.

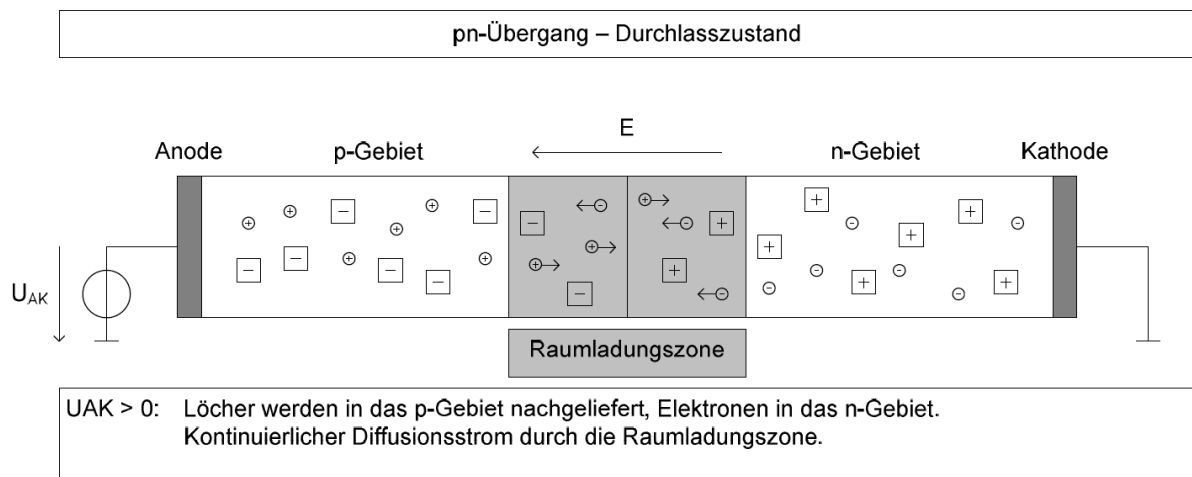


Abbildung 3: Der pn-Übergang im Durchlasszustand

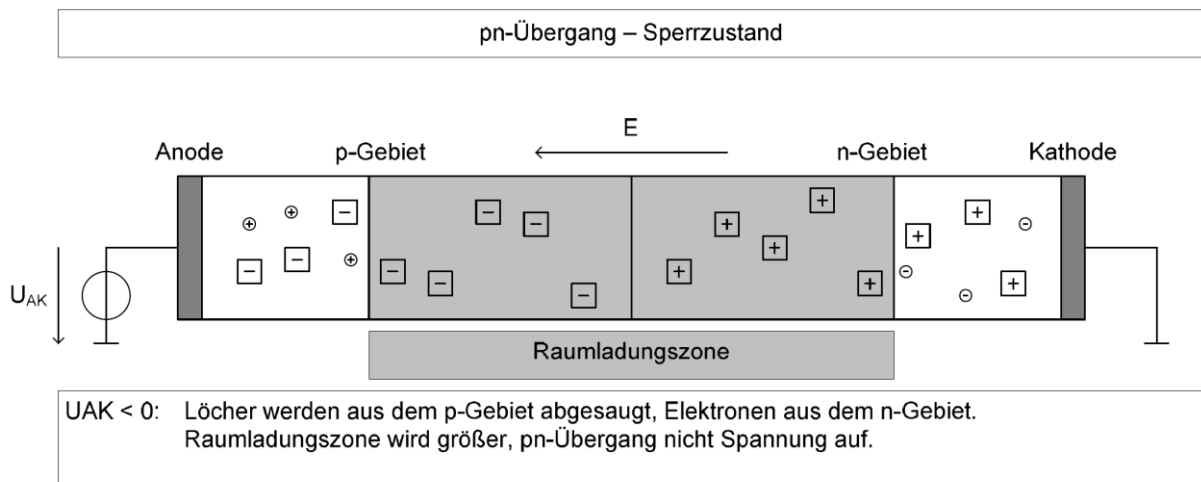


Abbildung 4: Der pn-Übergang im Sperrzustand

Bis hierher unterscheiden sich die Grundlagen der Leistungshalbleiter nicht von denen anderer Halbleiter. Zum Selbststudium ist daher jedes Halbleiterlehrbuch geeignet. Im „Grundkurs Leistungselektronik“ werden diese Zusammenhänge im Kapitel 2 beschrieben.

1.3 Grundprinzipien der Leistungshalbleiter

Im Gegensatz zu Halbleitern für die Signalübertragung müssen Leistungshalbleiter hohe Spannungen sperren und einen hohen Strom führen.

Um den hohen Strom tragen zu können, muss der stromdurchflossene Querschnitt möglichst groß sein. Leistungshalbleiter für Umrichter ab dem kW-Leistungsbereich werden daher so gestaltet, dass der Strom vertikal durch den Chip fließt. So ist z.B. bei einer Diode die ganze Chipoberseite die Anode, die ganze Unterseite die Kathode. Folgerichtig befindet sich auf einem Chip (der eine Größe von zwischen weniger als 1 cm² und mehr als 100 cm² hat) nur eine Diode. Leistungshalbleiter sind daher vertikale

Bauelemente, im Gegensatz zu Halbleitern in der Signalverarbeitung, die lateral auf der Chipoberseite angeordnet sind. Oft werden noch etliche Chips parallel geschaltet.

Die Sperrspannung des Bauelements ergibt sich aus dem Integral der elektrischen Feldstärke über der Raumladungszone.

$$U = \int E dx$$

Für das Verständnis ist eine eindimensionale Betrachtung entlang der vertikalen Achse ausreichend. Da die maximale Feldstärke durch die Avalanche-Generation von Ladungsträgern begrenzt ist, muss zur Aufnahme hoher Sperrspannung die Raumladungszone ausreichend lang, der Leistungshalbleiter also ausreichend dick sein. Um die lange Basisweite (so nennt sich das Gebiet, in dem sich die Raumladungszone ausbreitet) auch ausnutzen zu können, ohne dass es zu zu hohen Feldstärken kommt, muss der Gradient der elektrischen Feldstärke niedrig sein. Da dieser Gradient proportional zur Ladungsträgerkonzentration ist, muss die Ladungsträgerkonzentration und damit die Dotierung niedrig sein.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} = \frac{q}{\epsilon} \cdot N_D$$

Silizium Leistungshalbleiter benötigen eine Länge der niedrig dotierten Basis von etwa 100µm pro kV Sperrspannung. Bei modernen Si-Leistungshalbleitern ist das auch gleichzeitig die Dicke des Bauelements, die mit Anoden, Kathoden, Gates etc. versehenen Ober- und Unterseiten sind nur wenige µm dick. SiC-Leistungshalbleiter benötigen wegen der um Faktor 10 höheren zulässigen Feldstärke nur 1/10 der Länge der Raumladungszone. Aus mechanischen Gründen muss das Bauelement allerdings dicker sein, daher wird bei SiC-Leistungshalbleitern die niedrig dotierte Basis in einem Epitaxieprozess auf das hoch dotierte Substrat aufgewachsen.

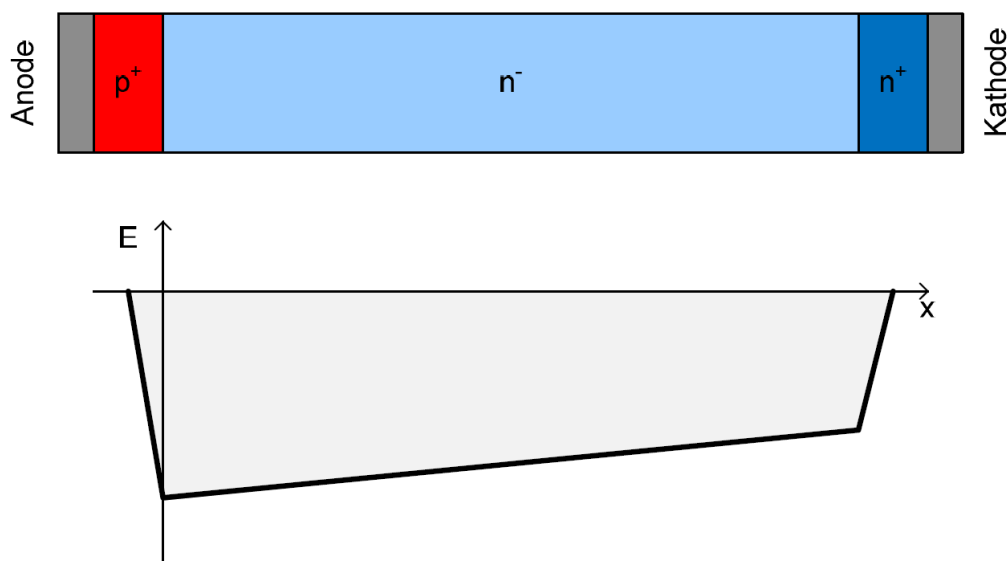


Abbildung 5: Feldstärkeverlauf an der PiN-Diode

Die dicke Mittelschicht eines Si-Leistungshalbleiters ist also niedrig dotiert. Im Durchlasszustand führt die niedrige Dotierung zusammen mit der hohen Dicke zu einem hohen Widerstand des Leistungshalbleiters. Da die Beweglichkeit von Elektronen in Silizium um Faktor 3 besser als die der Löcher ist, wird das niedrig dotierte Gebiet als n-minus Gebiet ausgeführt. Für Spannungsklassen ab 600 V wäre der Durchlasswiderstand trotzdem noch so hoch, dass unipolare Silizium Bauelemente (z.B. MOSFET und Schottky-Dioden), die auf die Leitfähigkeit des Basismaterials angewiesen sind, kaum sinnvoll einsetzbar sind. Eine Ausnahme bilden Kompensations-MOSFET (Superjunction MOSFET, Cool-MOS).

Daher werden bipolare Bauelemente verwendet, bei denen die niedrig dotierte Basis mit Elektronen und Löchern überschwemmt werden. Bei einer Diode kommen diese Ladungsträger aus der hochdotierten Anode und Kathode.

Im Durchlasszustand muss Ladungsträgerneutralität herrschen (sonst baut sich eine gewaltige Feldstärke und damit Spannung auf). Bei unipolaren Bauelementen wird diese Neutralität durch die Elektronen und die ionisierten Donatoren sichergestellt.

$$n = N_D$$

Die hochdotierten n-Gebiete einer Schottkydiode können daher das niedrig dotierte Basisgebiet nicht überschwemmen. Bei bipolaren Bauelementen ist die Konzentration freier Ladungsträger im Durchlass sehr viel höher als die Grunddotierung. Die Ladungsträgerneutralität wird gewährleistet, in dem das n-minus Gebiet von genau so viel Elektronen wie Löchern überschwemmt wird. Man spricht dann auch vom Ladungsträgerplasma.

$$n = p + N_D \approx p \gg N_D$$

Eine Leistungsdiode besteht also aus der dicken, niedrig n-dotierten Mittelschicht (n-minus Basis) und aus den dünnen, hochdotierten p- und n-Randgebieten. Sie wird daher als pin-Diode bezeichnet (das i steht für intrinsisch, obwohl das Mittelgebiet nicht intrinsisch, sondern definiert n-dotiert ist). Je höher die Sperrspannung ist, desto dicker ist die Mittelschicht und desto niedriger ist deren Dotierung.

2. Leistungshalbleiterbauelemente

Für die Realisierung von Stromrichtern stehen verschiedene Leistungshalbleiter-Bauelemente zur Verfügung. Im „Grundkurs Leistungselektronik“ sind diese in den Kapiteln 3 bis 5 beschrieben.

2.1 Dioden

2.1.1 PiN-Dioden

Silizium pin-Dioden sind die wichtigsten Dioden in der Leistungselektronik. Wie oben erläutert, handelt es sich um bipolare Bauelemente, bei denen im Durchlasszustand das niedrig dotierte Mittelgebiet mit Plasma überschwemmt wird. Bevor die Diode Spannung aufnehmen kann, muss dieses Plasma wieder ausgeräumt werden. Dieser Vorgang wird als Reverse-Recovery bezeichnet.

Wie bei allen bipolaren Bauelementen ist die Plasmakonzentration ein Freiheitsgrad beim Bauelementdesign. Eine hohe Plasmakonzentration führt zu niedrigen Durchlassspannungen, jedoch zu hohen Reverse Recovery Verlusten. Solche Dioden sind für Anwendungen in Netzgleichrichtern geeignet, in denen Reverse-Recovery Vorgänge nur mit 50 (oder 60) Hz auftreten. In Spannungszwischenkreis-Umrichtern kommen schnelle Dioden zum Einsatz, die eine geringere Speicherladung auf Kosten einer höheren Durchlassspannung haben.

Werden keine weiteren Maßnahmen getroffen, wird eine Diode immer zu viel Plasma haben. Die technologischen Anstrengungen gehen also immer in Richtung Reduktion der Plasmakonzentration. Wichtigste Maßnahme ist die Reduktion der Ladungsträgerlebensdauer durch Einbringen von Rekombinationszentren in Form von Fremdatomen (Dotierung) oder Gitterfehlern (Bestrahlung). Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, dass das Reverse-Recovery Verhalten sanft ist, der Diodenrückstrom also nicht abreißt. Dies würde zu hohen Überspannungen und starken Oszillationen führen.

Neben der Softness ist die Robustheit gegenüber Schaltbeanspruchungen wichtig. Sie gibt an, welche Schaltleistung (Produkt aus Spannung und Strom während des Reverse Recovery Vorgangs) die Diode verträgt. Die Schaltleistung ist dabei ein an den Klemmen messbares Maß der inneren Feldstärkebelastung.

Das Reverse Recovery Verhalten der Freilaufdioden in Spannungszwischenkreis-Umrichtern beeinflusst maßgeblich die Schaltverluste auch der Transistoren und ist deshalb ein ständiges Ziel von technologischen Weiterentwicklungen. CIBH und FCE Dioden sind moderne Entwicklungen in Richtung Robustheit.

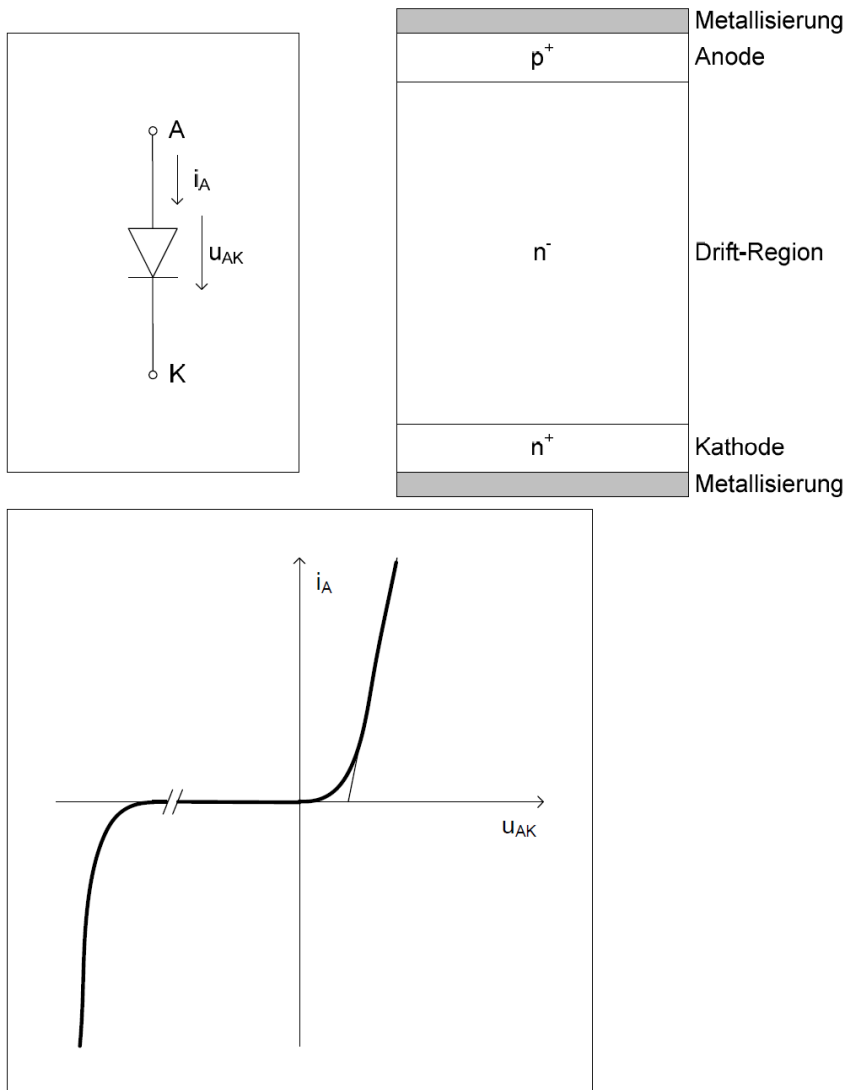


Abbildung 6: PiN-Diode: Schaltzeichen, Halbleiterstruktur, Kennlinie

2.1.2 Schottky-Dioden

Schottky-Dioden sind unipolare Dioden, sie verwenden einen niedrig dotierten Metall-Halbleiterübergang (Schottky-Kontakt) zum Aufnehmen der Spannung. Si-Schottky-Dioden sind nur für Spannungen bis zu wenigen hundert Volt geeignet. Für 1200 V und 1700 V sind aber SiC-Schottky-Dioden verfügbar. Als unipolare Bauelemente haben sie keine Speicherladung, damit treten keine Reverse Recovery Verluste in den Dioden auf und die Schaltverluste der IGBT können signifikant reduziert werden. SiC-Schottky-Dioden sind in Schaltnetzteilen und Power-Factor-Controller (PFC) Schaltungen bereits Stand der Technik. Für Umrichter im MW-Leistungsbereich wären sie technisch auch interessant, sind allerdings immer noch sehr teuer.

2.2 Abschaltbare Leistungshalbleiter

In Spannungszwischenkreis-Umrichter werden – wie auch in anderen selbstgeführten Umrichtern – ein- und abschaltbare Leistungshalbleiter benötigt. Dies können Transistoren oder abschaltbare Thyristoren sein.

2.2.1 Bipolar-Transistoren

Bipolartransistoren benötigen im eingeschalteten Zustand ständig einen Basisstrom und haben nur eine mäßige Abschaltrobustheit. In der Leistungselektronik sind sie daher Anfang der 90er Jahre durch IGBT abgelöst worden.

2.2.2 MOSFET

Si-MOSFET sind für Spannungen bis 100 V die Transistoren der Wahl. Sie haben keine Schwellspannung in der Durchlasskennlinie, deshalb sehr niedrige Durchlassspannungen bei kleinen Strömen. Als unipolare Leistungshalbleiter haben sie zudem kein Plasma und daher nur sehr kleine Ausschaltverluste – allerdings bei höheren Spannungen einen sehr hohen Durchlasswiderstand. Für 1200 V und 1700 V könnten zukünftig SiC MOSFET von Interesse sein, noch sind sie allerdings technisch nicht ausgereift und extrem teuer.

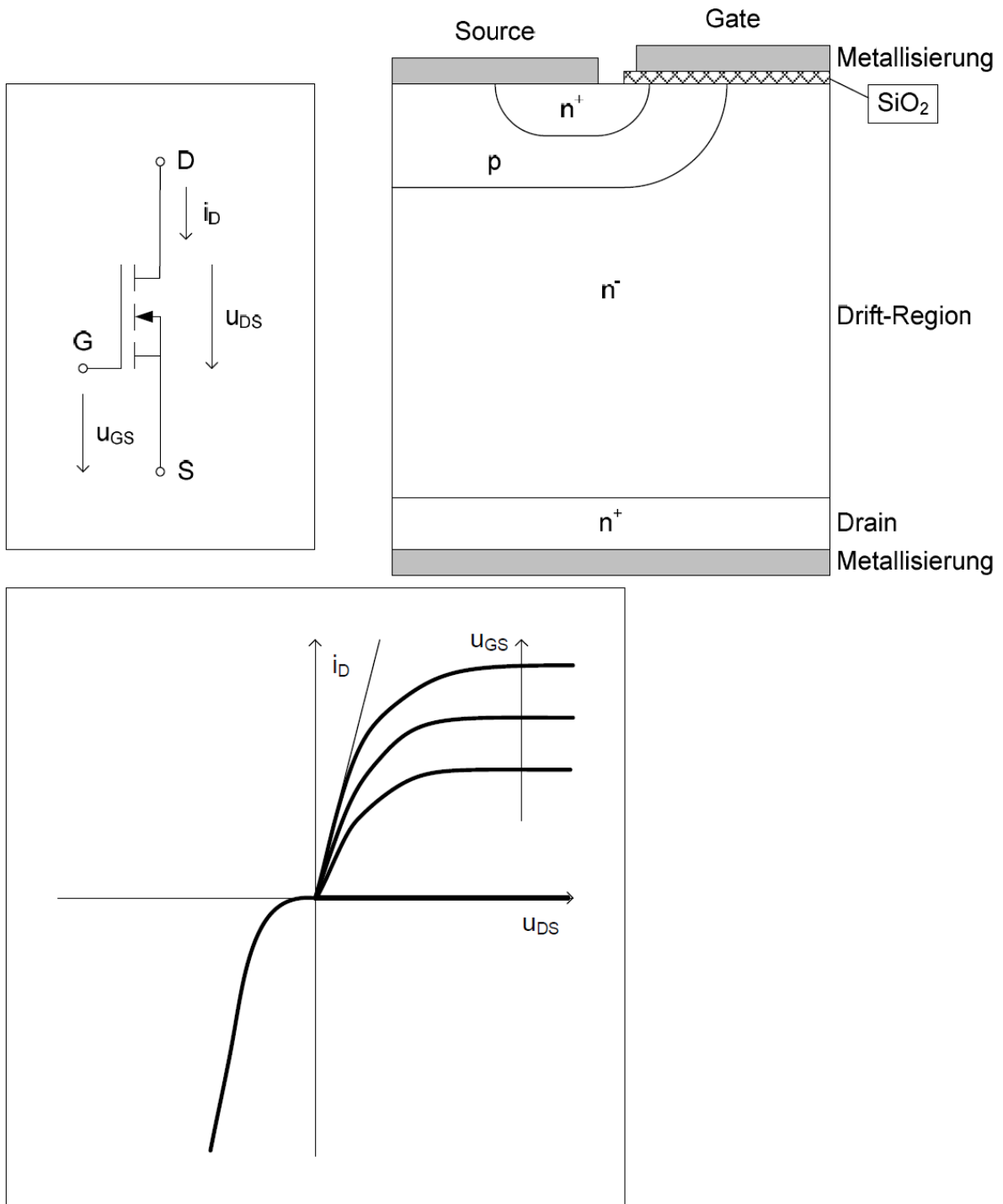


Abbildung 7: Leistungs-MOSFET: Schaltzeichen, Halbleiterstruktur, Kennlinie

2.2.3 IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistoren sind heute die wichtigsten abschaltbaren Leistungshalbleiter für Spannungen zwischen 600 V und 6500 V. Technologisch beruhen sie auf dem MOSFET, besitzen aber einen Rückseiten p-Emitter, wodurch sich in der n-minus Basis ein Plasma ausbilden kann. Sie sind daher bipolare Bauelemente mit im Vergleich zu MOSFET niedrigen Durchlassspannungen und höheren Ausschaltverlusten. Da sie zudem eine hohe Ausschaltrobustheit und eine gute

Kurzschlussfestigkeit besitzen (sie entsättigen und begrenzen so den Strom auf den 5 bis 10 fachen Nennstrom), und wie ein MOSFET spannungs- bzw. ladungsgesteuert angesteuert werden und damit steuerbare Schaltflanken haben, haben sie sich im oben erwähnten Spannungsbereich für Ströme von wenigen Ampere bis zu einigen kA durchgesetzt. Weiterentwicklungen zielen in Richtung niedrigerer Durchlass- bei gleichen Schaltverlusten.

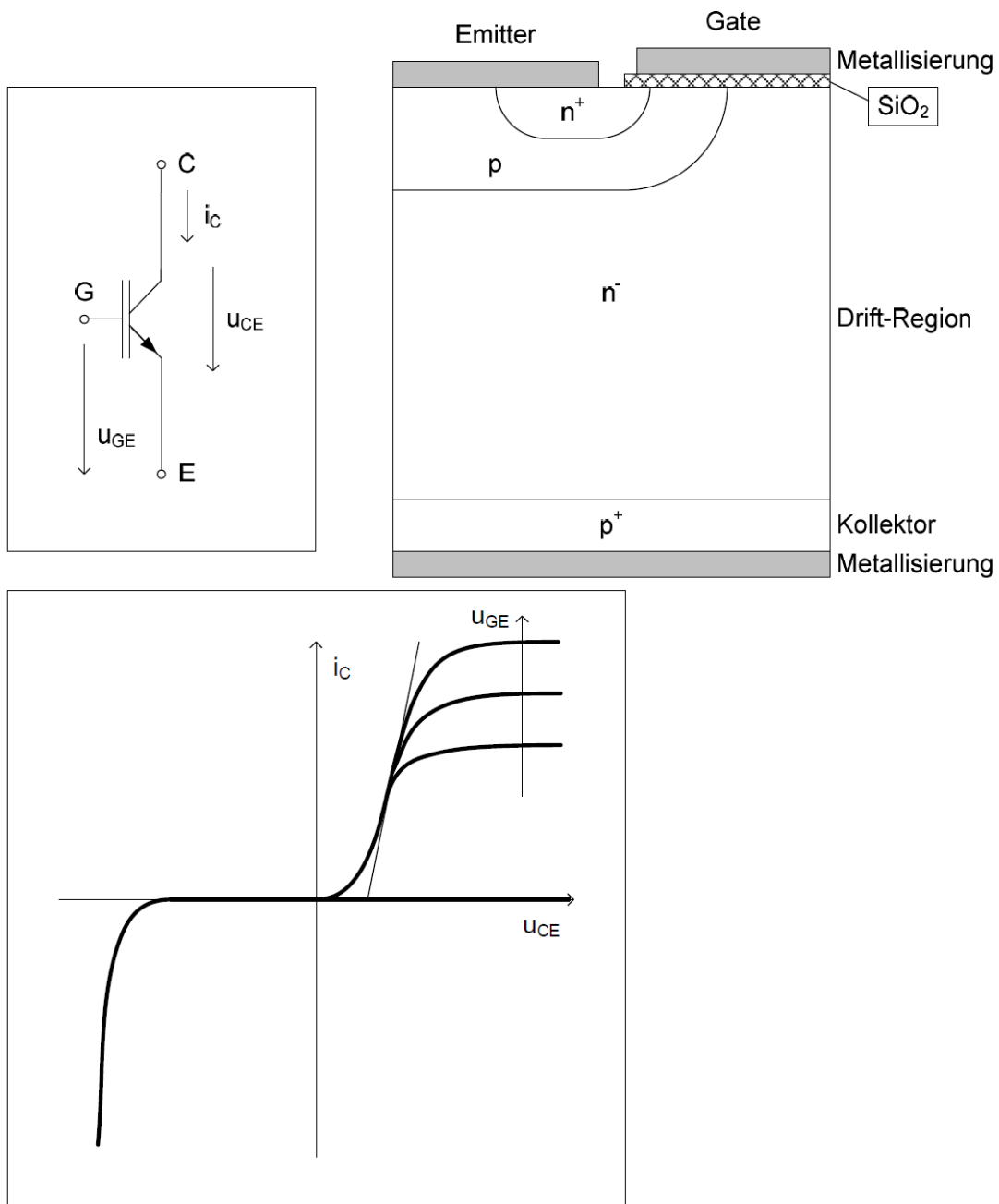


Abbildung 8: IGBT: Schaltzeichen, Halbleiterstruktur, Kennlinie

2.2.4 GTO

Abschaltbare Thyristoren waren zwischen 1985 und 2000 die dominanten abschaltbaren Leistungshalbleiter für Sperrspannungen von 2500 V bis 6500 V und Strömen im kA-Bereich. Als bipolare Leistungshalbleiter mit Ladungsträgerinjektion von beiden Seiten (wie bei Dioden und im Unterschied zu IGBT) haben sie eine sehr niedrige Durchlassspannung und recht hohe Abschaltverluste. Die Schaltflanken des GTO sind durch die Ansteuerung nicht steuerbar. Zum Abschalten benötigen sie eine kapazitive Beschaltung, beim Einschalten muss der Stromanstieg durch eine induktive Beschaltung begrenzt werden. Diese Beschaltungselemente sind vom Volumen deutlich größer als der GTO selber. GTO entsättigen zudem bei hohem Strom nicht und sind damit nicht kurzschlussfest. Im Vergleich zu IGBT, durch die sie weitgehend abgelöst wurden, benötigen sie eine erheblich aufwändigere Ansteuerschaltung. Eine noch heute wichtige Spezialform des GTO ist der IGCT, der die Ansteuerschaltung direkt mit dem Leistungshalbleiter verbindet. Mit ihm lassen sich im Leistungsbereich ab 10 MW immer noch kompaktere Stromrichter bauen als mit IGBT.

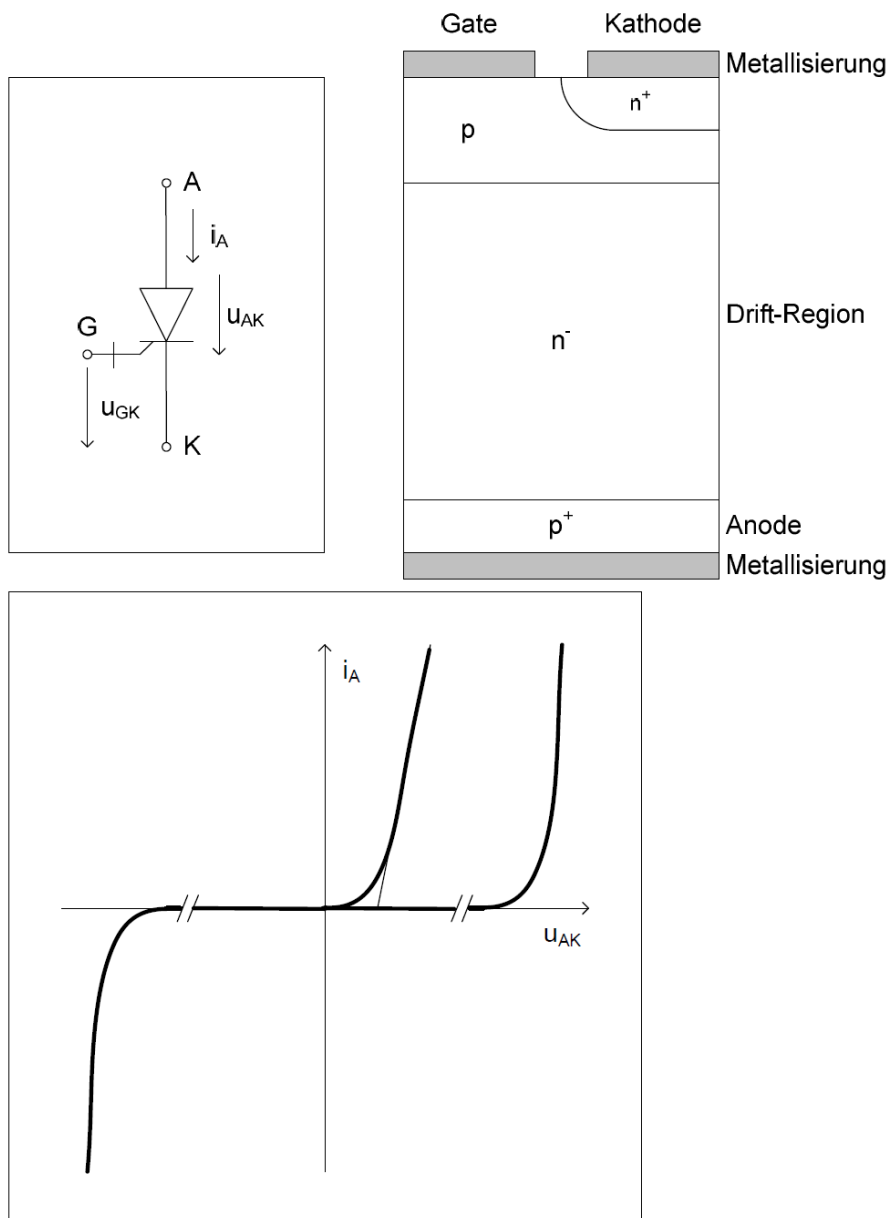


Abbildung 9: GTO: Schaltzeichen, Halbleiterstruktur, Kennlinie

2.3 Nicht abschaltbare Leistungshalbleiter

In netzgeführten Umrichtern (gesteuerte Gleichrichter, Direktumrichter, Softstarter) kommen neben Dioden auch Leistungshalbleiter zum Einsatz, die zwar einschaltbar, nicht jedoch abschaltbar sind. Dabei handelt es sich um Thyristoren.

2.3.1 Thyristoren

Thyristoren sind bipolare Leistungshalbleiter und haben eine entsprechend niedrige Durchlassspannung. Sie sind vor allem für große Ströme deutlich kostengünstiger als abschaltbare Leistungshalbleiter. Die Zündung erfolgt durch einen Strompuls, der Thyristor rastet dann ein und verlöscht erst wieder, wenn der Laststrom Null geworden ist. Bevor der Thyristor in Sperrichtung wieder Spannung aufnehmen kann, müssen die Ladungsträger rekombinieren. Die dafür erforderliche Zeit ist die Freierdezeit. Sie bestimmt maßgeblich das Verhalten netzgeführter Stromrichter.

2.4 Vergleichender Überblick

Um einen Überblick über das Spektrum verfügbarer Leistungshalbleiter zu erhalten, werden oft Darstellungen in der Form Strom über Sperrspannung oder Schaltfrequenz über Sperrspannung gewählt. Dabei kann nur ein grober Eindruck vermittelt werden, alleine die Definition des Stroms ist bei unterschiedlichen Leistungshalbleitern unterschiedlich. In diesem Fall wurde die GTO Konvention eines abschaltbaren Stroms verwendet (was natürlicher für normale Thyristoren auch schon wieder nicht sinnvoll ist). IGBT sind zudem derart gut parallelschaltbar, dass eine Stromgrenze nicht wirklich aussagekräftig ist.

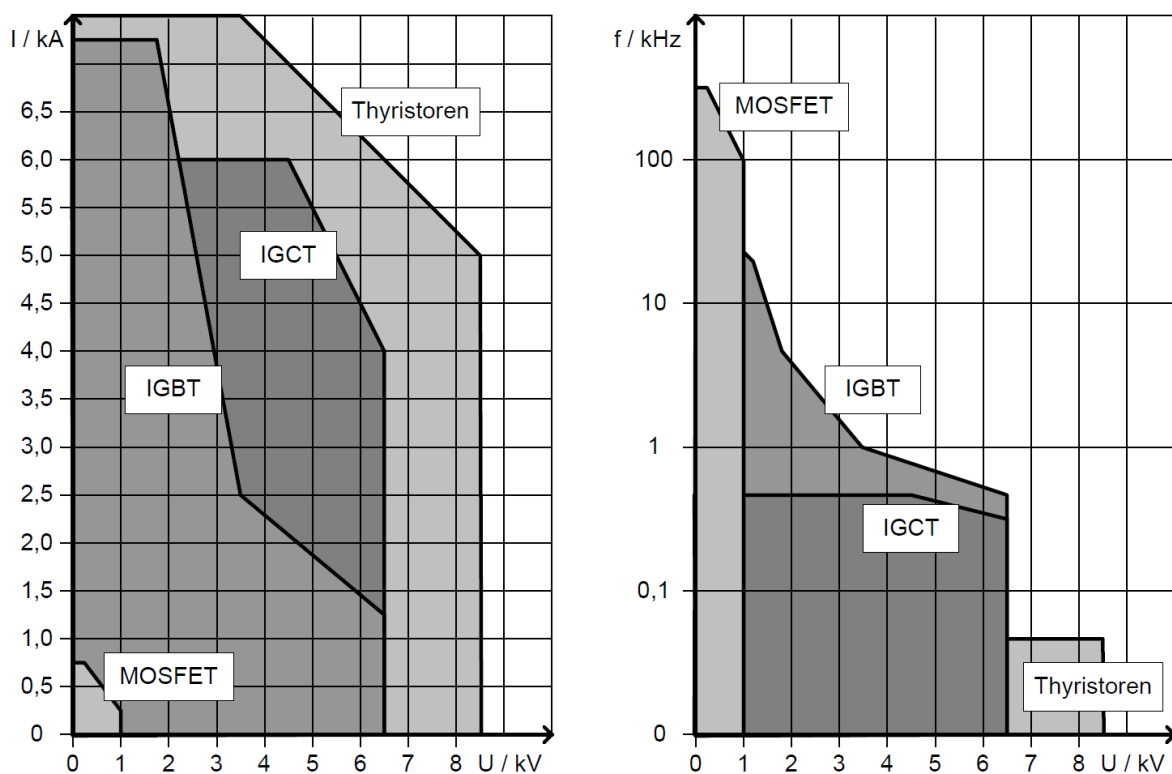


Abbildung 10: Betriebsbereiche von Leistungshalbleitern

3. Gehäuse für Leistungshalbleiter

Zur elektrischen und thermischen Kontaktierung, zur Gewährleistung von Isolationseigenschaften sowie zum Schutz müssen die Halbleiterchips verpackt werden. Mit Ausnahme sehr kleiner Leistungen kommen dafür Modulgehäuse und Scheibenzellen zum Einsatz. Informationen zu diesem Themenkomplex finden sich insbesondere in den Handbüchern von Infineon und Semikron.

3.1 Module mit stoffschlüssigen Verbindungen

Module enthalten mehrere Leistungshalbleiterchips und eine Isolation dieser Chips gegen die Montagefläche, über die gleichzeitig die Kühlung erfolgt. Die Art der Leistungshalbleiter, die ausgeführte Schaltung und die technologische Realisierung sind unterschiedlich. Die für Spannungszwischenkreis-Umrichter im MW-Leistungsbereich typischen IGBT-Module enthalten funktional einen IGBT mit seiner antiparallelen Freilaufdiode oder eine Halbbrücke aus zwei IGBT mit den dazugehörigen antiparallelen Freilaufdioden. Die IGBT- und Diodenfunktion wird dabei jeweils durch einige parallelgeschaltete Chips realisiert. In Hochleistungsmodulen können sich z.B. 24 parallele IGBT-Chips und 36 parallele Diodenchips zur Realisierung der Funktionalität eines IGBT mit antiparalleler Diode befinden.



Abbildung 11: PrimePack Modul – eine Halbbrücke in einem Modulgehäuse
Foto: Infineon

Bei kleineren Leistungen werden auch die sechs IGBT mit ihren antiparallelen Freilaufdioden in ein Modul integriert, zusätzlich können noch IGBT und Freilaufdiode für den Bremssteller und die Dioden für einen Netzgleichrichter integriert sein. Gerade im kleinen Leistungsbereich erlauben flexible Moduldesigns die kostengünstigste Realisierung kundenspezifischer Chipkombinationen.

Im klassischen IGBT Modul sind die Silizium Chips auf eine kupferkaschierte Al_2O_3 Keramik gelötet, die die Isolation übernimmt. Alternative Keramiken sind AlN (bessere Wärmeleitfähigkeit und Teilentladungsfreiheit, dadurch besonders für Spannungen ab 1,7 kV) und Si_3N_4 (mechanisch robuster als AlN). Direkt über diese Keramik erfolgt die Kontaktierung der Chiprückseiten (Kollektor des IGBT, Kathode der Diode). Die Chipvorderseiten werden über Aluminium-Bonddrähte kontaktiert. In einem Modul befinden sich oft mehrere Keramiken, die dann typischerweise auf eine Kupfer-Bodenplatte aufgelötet sind. Die Bodenplatte wird auf dem Kühlkörper festgeschraubt. Mit Ausnahme der Bodenplatte ist das Gehäuse des Moduls aus Kunststoff. Dieses Kunststoffgehäuse fixiert die Last- und Steueranschlüsse. Die Anbindung der Lastanschlüsse erfolgt entweder über Lötens oder Schweißen auf der Keramik oder auch über Bonddrahtverbindungen. Steueranschlüsse werden ebenfalls entweder gelötet oder gebondet, wobei teilweise noch eine Leiterkarte im Modul für die niederinduktive Verteilung der Ansteuersignale sorgt. Die Keramiken mit ihren Chips sind mit einem dauerelastischem Silikongel bedeckt, das die Isolierung zwischen den Potentialen auf der Chipoberseite, zwischen Chipoberseite

und Keramik und ggf. zwischen den Terminals sicherstellen muss. Teilweise befindet sich oberhalb dieses Gels noch ein ausgehärteter Verguss, der für zusätzliche mechanische Stabilität sorgen soll.

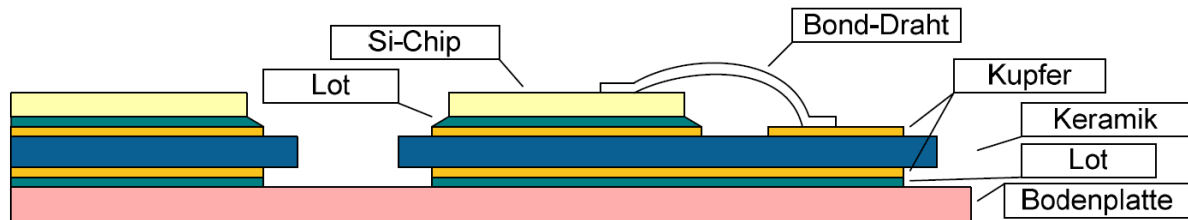


Abbildung 12: Querschnitt durch ein Leistungshalbleitermodul - Prinzipdarstellung

Es wurde bereits erwähnt, dass es neben dieser klassischen Ausführungsform noch viele weitere technologische Realisierungen gibt. Um zu verstehen, warum dies der Fall ist, müssen zunächst die potentiellen Schwachstellen des klassischen Designs diskutiert werden.

Die erste Herausforderung ist die Gewährleistung der Isolation zwischen den Chips und der Bodenplatte. Die Anforderung ist dabei neben dem Bestehen der Isolationsprüfung (60 sec. AC-Belastung) bei höheren Spannungen auch die der Teilentladungsfreiheit (üblicherweise $Q < 10$ pC bei einer Spannung, die üblicherweise bei der halben Prüfspannung liegt). Belastet wird durch diese Prüfungen zum einen die Keramik selber, zum anderen auch das Gel, das verhindern soll, dass Luft mit den hohen Feldstärken belastet wird. Luftbläschen im Gel sind dann auch ein klassischer Fehlermechanismus. Grundproblem jeder Isolationsprüfung ist, dass der Prüfling durch die Prüfung altert. Die Prüfung sagt also strenggenommen nur, dass die Belastung während der Prüfdauer überstanden wurde, enthält jedoch keine Aussage für zukünftige Belastungen. Dem wird Rechnung getragen, in dem weitere Isolationsprüfungen (z.B. die des Gesamtgerätes) mit verminderter Spannung (85%) durchgeführt werden. Auch weitere Isolationsprüfungen im Laufe des Gerätelebens sollten sparsam durchgeführt werden. Bei eingefahrenen Technologien ist das Thema Isolation üblicherweise so gut im Griff, dass die Ausbeute beim Hersteller gut ist und der Kunde keine Probleme mehr hat. Höhere Spannungsklasse oder neue Materialien (z.B. zur Ausweitung des Temperaturbereichs) können aber wieder neue Herausforderungen nach sich ziehen.

Die nächste Herausforderung ist die Alterungsbeständigkeit der stoffschlüssigen Verbindungen. Die einzelnen Materialien, die durch Bonden oder Löten verbunden werden, haben recht unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten.

	Wärmeleitfähigkeit	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
	[W/mK]	[10 ⁻⁶ /K]
Al ₂ O ₃	24	6,8
AlN	180	4,7
Si ₃ N ₄	70	3,4
Epoxyd	3	
Polyimid	0,4	
AlSiC	200	7,5
Al	237	23,5
Cu	394	17,5
Mo	138	5,1
Si	148	4,1

Abbildung 13: Wärmeleitfähigkeit und thermische Ausdehnungskoeffizienten wichtiger Materialien für Leistungshalbleitermodule
Quelle: Lutz, Halbleiter Leistungsbaulemente

Durch Temperaturwechsel kommt es zu einer Belastung dieser Verbindungen – bis hin zum Versagen. Typische Ausfallmechanismen sind:

- Versagen der Bondverbindung. Der stark unterschiedliche Ausdehnungskoeffizient zwischen Aluminium-Bonddraht und Silizium-Chip kann dazu führen, dass der Bonddraht oberhalb der Bondstelle reißt und dann abhebt (Bond Lift-Off). Die Ausdehnung des Bonddrahtes bei Erwärmung führt zu einer Verlängerung des Drahts und damit zu einer Knickbelastung am Bondfuß. Dies kann dazu führen, dass der Bonddraht an der Knickstelle einreißt (Heel Crack).
- Zerrüttung des Chiplots. Die Ausdehnungskoeffizienten des Silizium-Chips und der Keramik liegen zwar recht dicht zusammen, das dazwischen liegende Lot hat jedoch einen deutlich größeren Ausdehnungskoeffizienten. Bei Temperaturerhöhung kann sich das Lot nur in die senkrechte Richtung ausdehnen, bei nachfolgender Temperaturreduktion jedoch wieder in allen Richtungen zusammenziehen. Das kann zu feinen Rissen im Lot führen. Typisch an dieser Lotzerrüttung ist, dass sie in der Mitte des Chips auftritt, da dort die Temperaturwechsel am größten sind.

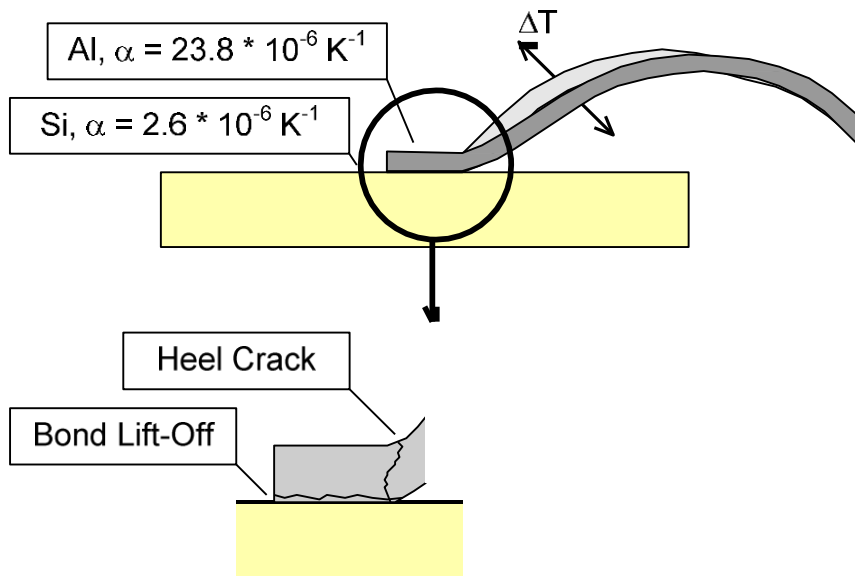


Abbildung 14: Fehlermechanismen in der Bondverbindung

- Alterung des Systemlots: Die thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Keramik und Kupfer-Bodenplatte sind wiederum recht groß, was dazu führen kann, dass diese Lotverbindung (Systemlot genannt) von den Ecken her einreißt.

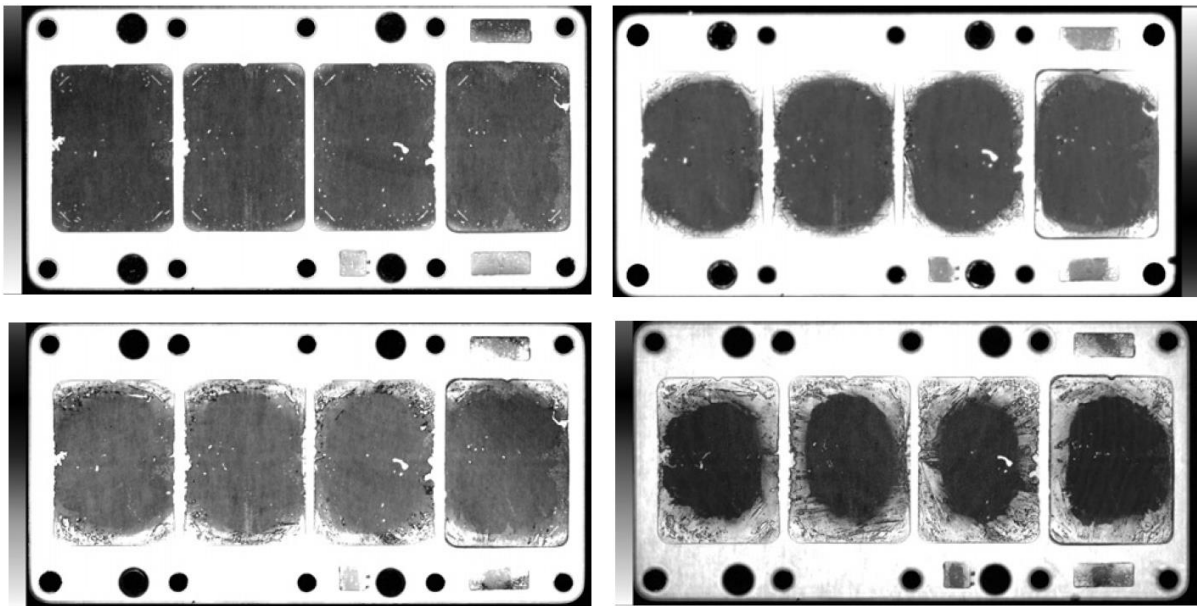


Abbildung 15: Systemlotdegradation
Fotos: Infineon

- Delamination der Lastanschlusslötungen: Wenn die Kupfer-Lastterminals auf das Substrat gelötet werden, kann auch diese Verbindung altern.

Folgende Gegenmaßnahmen zu diesen Ausfallmechanismen wurden entwickelt:

Bond Heel Crack und Bond Lift-Off

- Die Haltbarkeit des Bonddrahtes kann durch eine Lackierung mit einem Polyimid verbessert werden. Der Bonddraht klebt praktisch am Chip fest. Bei den sogenannten Traktionsmodulen (so genannt wegen der hohen Lastwechselanforderungen in der Traktion) kommt dies zum Einsatz.
- Eine sehr gute Wirkung hat auch ein Hartverguss, wie er z.B. bei klassischen Einzelchipgehäusen (TO 218 etc.) zum Einsatz kommt. Der feste Verguss verhindert, dass der Bonddraht seinen Platz verlässt.
- Durch Kupfer-Bonddrähte wird einerseits wegen deren besseren elektrischen Leitfähigkeit die Verlustleistung und damit die Temperatur reduziert, andererseits durch deren größerer mechanischer Festigkeit die Belastbarkeit erhöht. Infineon führt dies in der .XT Technologie ein. Allerdings ist dafür auch eine Kupferoberfläche auf dem Chip notwendig, was technologisch wegen der Neigung von Kupfer, in das Silizium zu diffundieren, nicht trivial ist.
- Durch das Aufsintern von Kupferbügeln oder kaschierten Folien wird die Bondverbindung durch eine Sinterverbindung (Niedertemperaturverbindung, NTV, LTJ) ersetzt. Der Schmelzpunkt dieser Verbindungen liegt weit oberhalb der Verarbeitungstemperatur. Im Betrieb bleibt die homologe Temperatur unterhalb von 0,4, dadurch wird Kriechen vermieden, die Verformungen bleiben elastisch. Die Technologie ist allerdings recht aufwändig.
- Werden Bondverbindungen durch Federkontaktverbindungen ersetzt, so können sie auch nicht mehr degradieren. Auch Federkontaktverbindungen sind natürlich nicht per se alterungsresistent und müssen entsprechend ausgeführt sein. Dies ist aber in ausreichender Qualität möglich.

Chiplötzerrüttung

- Durch Diffusionslötten mit einer extrem dünnen Lotschicht wird erreicht, dass sich durch Diffusion intermetallische Phasen bilden und kein reines Lot zurückbleibt. Auch die so entstandene Verbindung hat einen erheblich höheren Schmelzpunkt mit den oben geschilderten Vorteilen. Infineon verwendet diese Technologie in den .XT Modulen.
- Der gleiche Effekt lässt sich auch mit einer Niedertemperaturverbindung (NTV, LTB) erreichen, bei der bei vergleichbaren Temperaturen wie beim Lötten Chip und Keramik mit einem dazwischen aufgebracht Silberpulver unter hohem Druck verbunden werden. Diese Technologie ist von Scheibenzellen (s.u.) bereits seit Jahrzehnten bekannt und wird zur Zeit auch für Module eingeführt – z.B. von Semikron.

Systemlotdelimitation

- Durch Verwendung einer AlSiC Bodenplatte (Silizium Karbid Matrix mit Aluminium verfüllt) lässt sich der Ausdehnungskoeffizient an den der Keramik anpassen und damit die Belastung dieser Verbindung erheblich reduzieren. Allerdings ist AlSiC teuer und schwierig zu bearbeiten, daher ist diese Lösung den Traktionsmodulen vorbehalten.

- Der völlige Verzicht auf die Bodenplatte beseitigt auch diese potentielle Fehlerstelle. Die Keramik kann allerdings nicht auf den Kühlkörper verschraubt werden, daher ist ein Gehäuse notwendig, dass die Keramik auf den Kühlkörper drückt. Die fehlende Bodenplatte macht zudem die Beherrschung der elektrischen Feldstärken am Rand der Keramik schwieriger, daher ist diese Technik auf Anwendungen bis zu 1700 V beschränkt. Zudem muss berücksichtigt werden, dass zwar der thermische Widerstand der Bodenplatte entfällt, dafür aber auch deren wärmespreizende Wirkung und deren Wärmekapazität. Da die zwischen Bodenplatte und Kühlkörper bzw. bei bodenplattenlosen Modulen zwischen Keramik und Kühlkörper befindliche Wärmeleitpaste von allen Stoffen im Entwärmungspfad die schlechteste Wärmeleitfähigkeit hat, ist das Weglassen der Bodenplatte thermisch durchaus kritisch zu betrachten. Module ohne Bodenplatte sind im untersten Leistungsbereich sehr üblich um Kosten zu senken. Im für Windenergieanlagen relevanten Leistungsbereich fertigt Semikron Module ohne Bodenplatte
- Optimierte Lottechnologien mit partikelverstärkten Weichloten, wie sie z.B. infineon in den .XT Modulen verwendet, fügen in das Lot Rissbarrieren ein und zögern so die Delamination heraus.

Lastanschlusslötungen

- Alternativ zur Weichlötung können die Lastanschlüsse auch hartgelötet werden.
- Ebenso ist es möglich, die Lastanschlüsse gar nicht auf dem Substrat, sondern im Gehäuse zu befestigen und die elektrische Verbindung dann mit Bonddrähten zu realisieren.

Auch mit diesen Verbesserungsmaßnahmen werden Lastwechselfälle nicht abgestellt. Entscheidend ist, dass die Lastwechselfestigkeit für die vorgesehene Anwendung ausreichend ist. Dafür muss die Abhängigkeit von den relevanten Betriebsparametern bekannt sein.

Wichtigste Belastungsgröße sind die Temperaturwechsel. Für die Bonddrähte und das Chiplot sind die Temperaturwechsel der Sperrschicht relevant, für die Systemlötung die Temperaturwechsel der Bodenplatte. In den Herstellerunterlagen werden die zulässigen Temperaturwechsel über der Höhe des Temperaturhubs angegeben. Möglicherweise gibt es noch eine Angabe, welcher Anteil der Population bei der angegebenen Belastung höchstens ausgefallen sein wird.

Weitere Einflussgrößen sind die absolute Höhe der Temperatur (höhere Temperaturen führen zu einer schnelleren Alterung) und die Dauer der Zyklen (die der Alterung zugrunde liegenden Kriechvorgänge sind zeitabhängig).

Die Lastwechselfestigkeit wird durch beschleunigte Versuche ermittelt. Dabei wird zwischen Power Cycling (aktiv, durch Eigenerwärmung) und Temperature Cycling (passiv, in der Temperaturkammer) unterschieden.

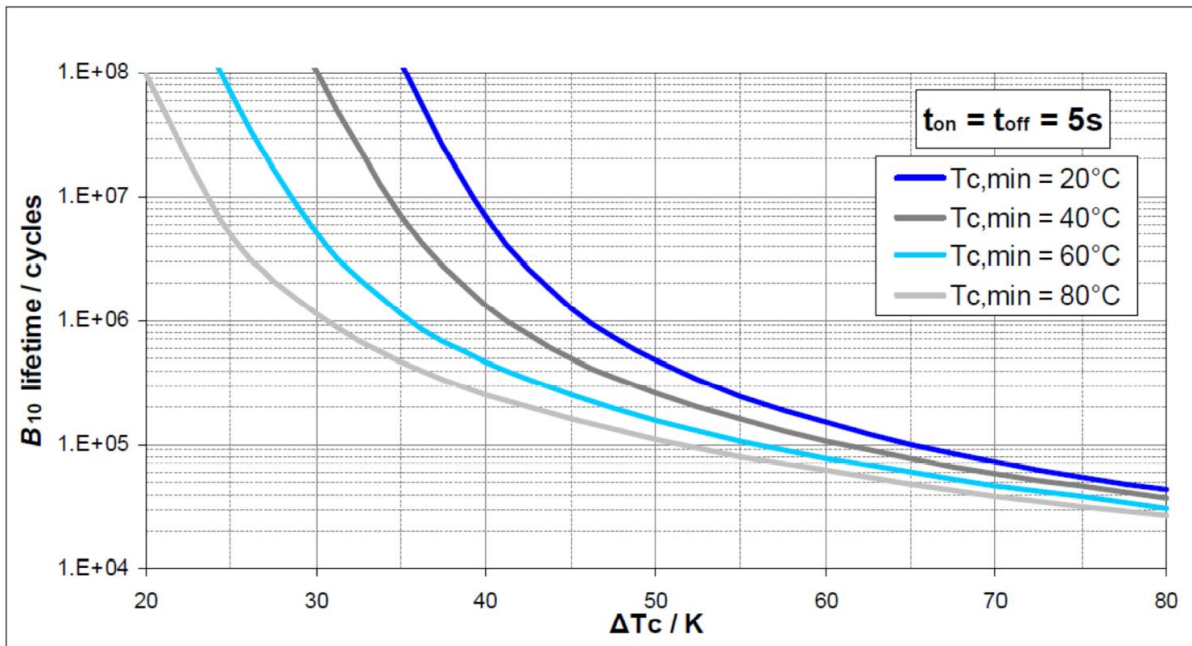


Figure 3 The B_{10} lifetime curves of the solder joints of the conductor leads and substrates for t_{cycle} equal to 10s.

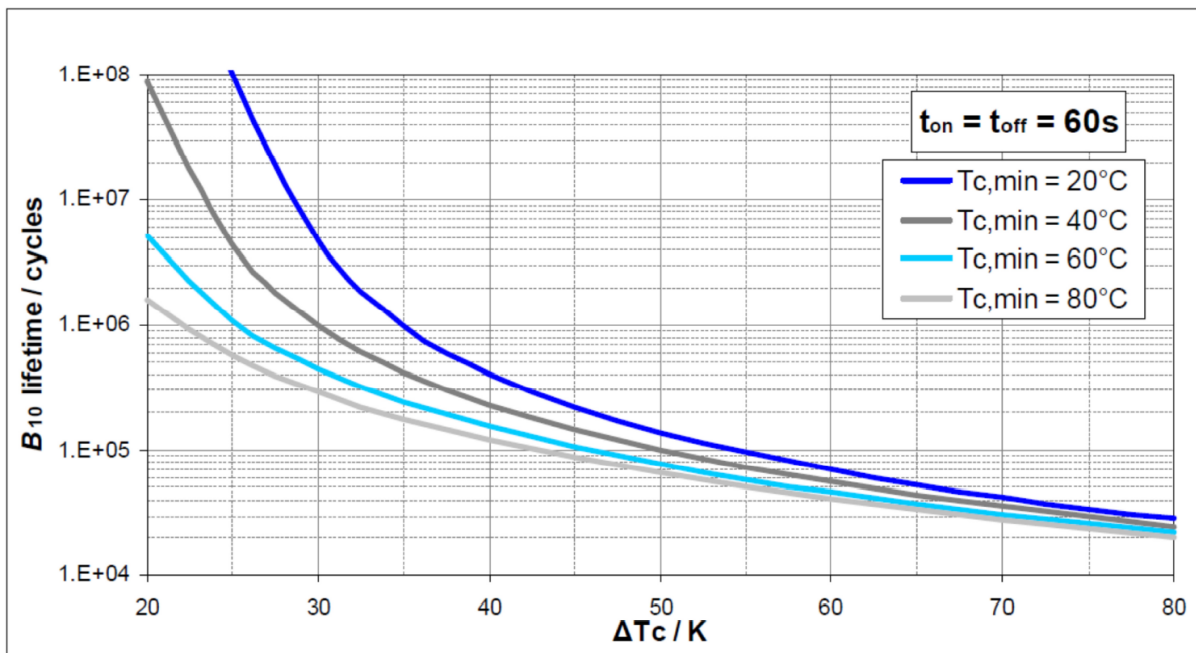


Figure 5 The B_{10} lifetime curves of the solder joints of the conductor leads and substrates for t_{cycle} equal to 120s.

Abbildung 16: Lebensdauer der Systemlötlung und der Lastanschlüsse

Quelle: ABB application note: load-cycling capability of HiPak IGBT modules

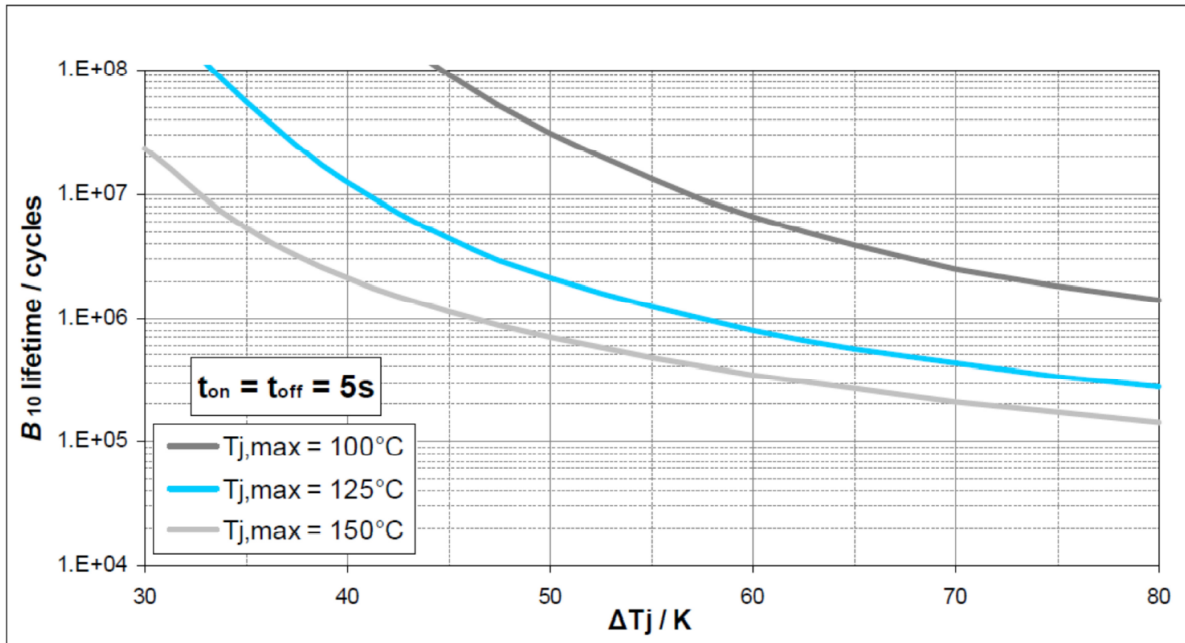


Figure 8 The B_{10} lifetime curves of the solder joint of the chips for t_{cycle} equal to 10s.

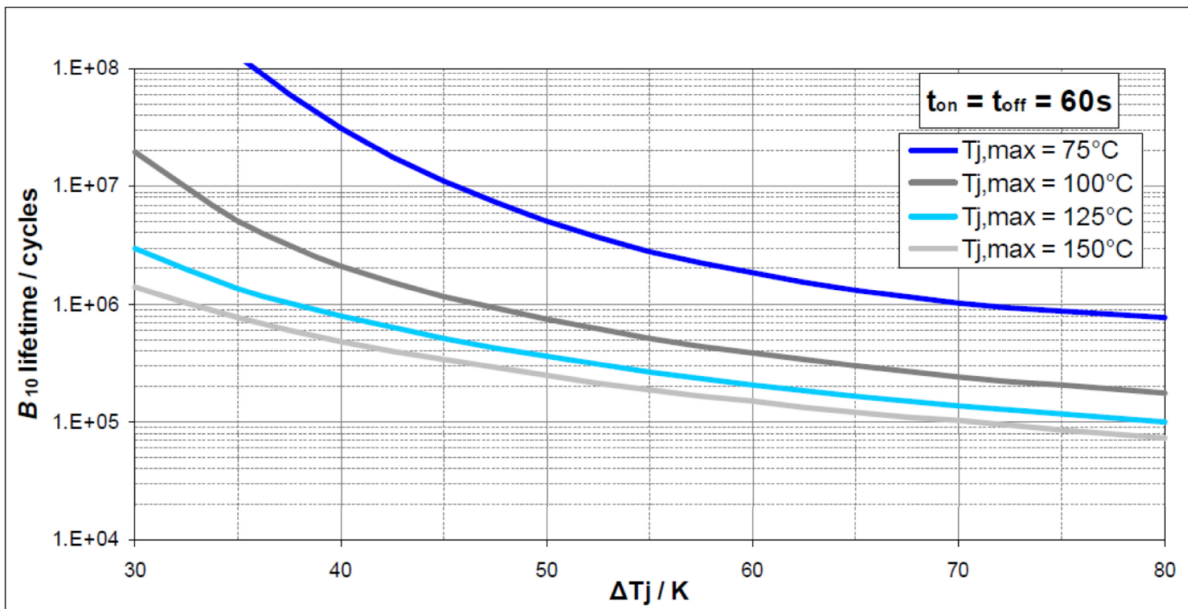


Figure 10 The B_{10} lifetime curves of the solder joint of the chips for t_{cycle} equal to 120s.

Abbildung 17: Lebensdauer Chipplötung

Quelle: ABB application note: load-cycling capability of HiPak IGBT modules

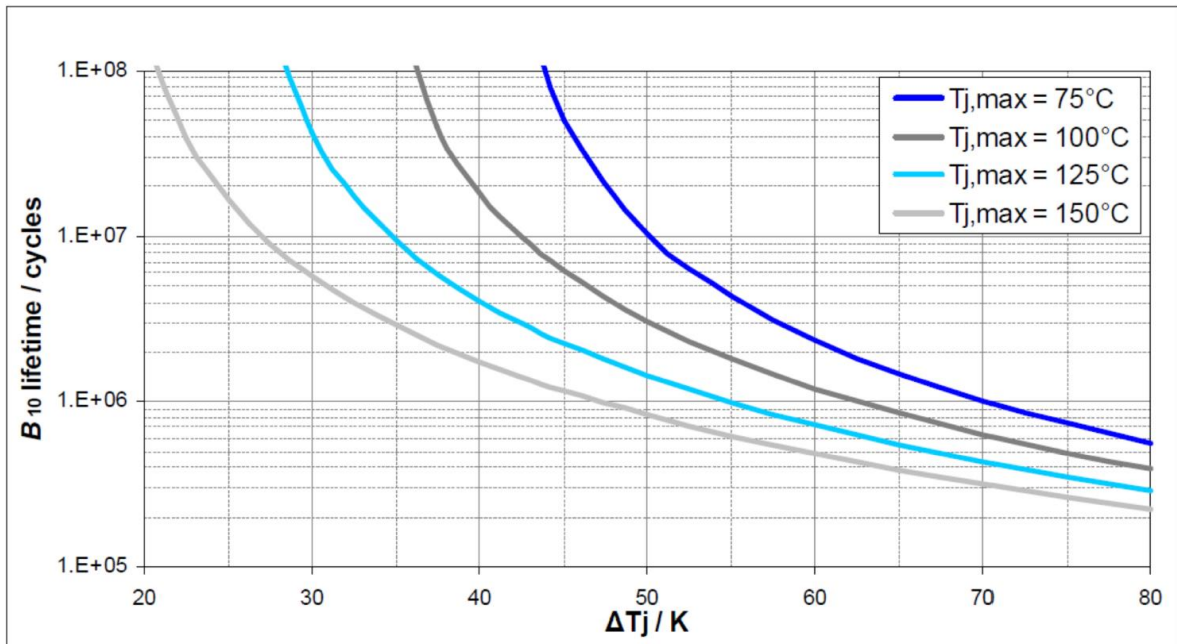


Figure 12 The B_{10} lifetime curves of the wire bonds for various cycling conditions.

Abbildung 18: Lebensdauer Bonddrähte

Quelle: ABB application note: load-cycling capability of HiPak IGBT modules

In der Projektierung müssen die Temperaturverläufe ermittelt und dann z.B. mittels des rainflow counting Verfahrens in einzelne Temperaturhübe zerlegt werden. Aus den mechanischen Lastspielen werden die elektrischen Größen des Generators gewonnen, daraus die Verluste in den Leistungshalbleitern und mit Hilfe des thermischen Modells die Temperaturen. In vielen Fällen ist dabei die Ermittlung der relevanten Belastungen der größte Unsicherheitsfaktor.

3.2 Druckkontaktierte Scheibenzellen

Dioden, Thyristoren und GTO bzw. IGCT hoher Leistungen werden in druckkontaktierten Scheibenzellen montiert. Scheibenzellen haben ein gasdichtes Keramikgehäuse, Boden und Deckel sind aus dicken, außen vernickelten Kupferscheiben. Die Keramik hat einen hohen CTI Wert, ist also relativ unempfindlich gegenüber schmutziger Umgebungsluft, dadurch sind kurze Kriechstrecken realisierbar. Die Gasdichtigkeit des Gehäuses, das üblicherweise mit Stickstoff gefüllt wird, schafft für den Leistungshalbleiter eine trockene und saubere Atmosphäre. Für raue Umgebungsbedingungen ist dies ein nicht zu unterschätzender Vorteil.

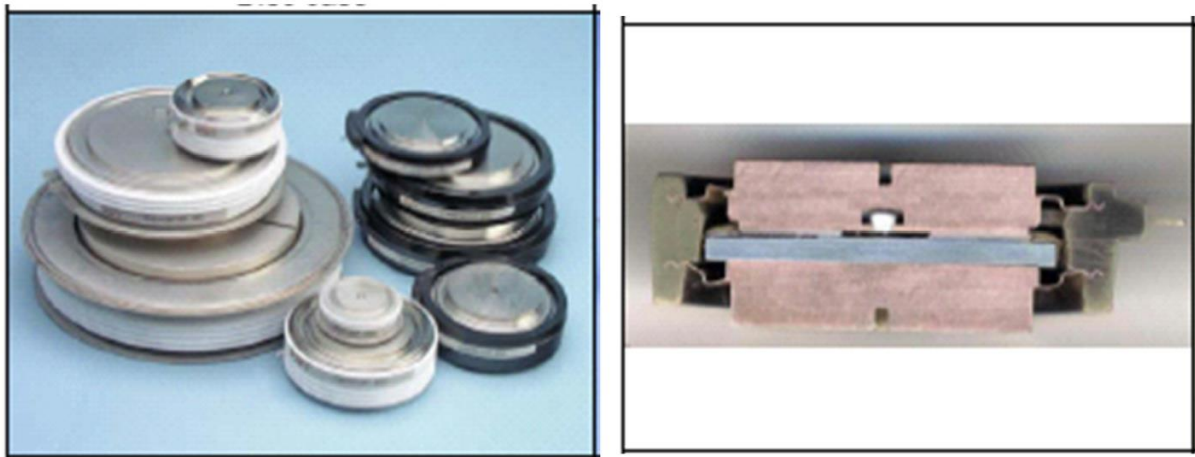


Abbildung 19: Scheibenzellen
Fotos: Infineon

Zwischen die beiden Kupferscheiben wird der eine großflächige Siliziumchip eingespannt. Da, wie bereits erläutert, Silizium und Kupfer deutlich unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten haben, wird ober- und unterhalb des Chips zunächst eine Molybdänscheibe angeordnet, dem schließt sich ein Gleitsystem aus teilweise mehreren Molybdän- und Kupferfolien an. Es gibt dabei sowohl Varianten, bei denen der Chip lose auf der unteren Molybdänscheibe liegt, als auch solche, bei denen der durch eine Niedertemperaturverbindung (NTV, LTJ) stoffschlüssig mit dieser Molybdänscheibe verbunden ist.

Der gesamte Aufbau ist in sich lose und muss durch einen externen Spannverband zusammengehalten werden. In diesen Spannverband werden dann auch Kühlkörper (für Luftkühlung) oder Kühldosen (für Wasserkühlung) und die Stromschienen integriert. Wenn die Kühlung auf Potential liegt, was bei Wasserkühlung entionisiertes Wasser erfordert, ist keine weitere Isolation mehr erforderlich, sonst werden Keramikscheiben (Al_2O_3 oder AlN) in den Spannverband eingebracht.

Die Lastwechselfestigkeit von druckkontaktierten Scheibenzellen ist im allgemeinen deutlich höher als die von Modulen. Das liegt zum einen an der Aufbautechnik mit Gleitschichten, aber auch an den robusteren, grob strukturierten Leistungshalbleitern selber. Details können aber auch in dieser Bauform Schwierigkeiten machen, z.B. kann es bei GTO durch die hohen Ströme im Gatekreis zu Verschweißungen der Gatekontaktfeder mit dem Chip kommen, die in Verbindung mit Temperaturwechseln immer wieder aufreißt und so zur Zerstörung des Chips führt. Auch die Kathodenfinger von fein strukturierten GTO (die immer noch deutlich gröber als IGBT sind), können abgerieben werden.

Das thermische Verhalten der Druckkontakt-Scheibenzellen ist recht günstig, da viel Kupfer thermisch eng mit dem Silizium verbunden ist und damit eine hohe thermische Kapazität direkt am Chip angeordnet ist. Die Kühlung kann zudem doppelseitig erfolgen, wobei der Wärmefluss durch die strukturierte Oberseite von Thyristoren deutlich schlechter als durch die glatte Unterseite ist.

Ein prinzipbedingter Vorteil großflächiger Chips in druckkontaktierten Gehäusen ist ihr günstiges Fehlverhalten. Die Kontaktierung verträgt auch hohe Stoßströme und der defekte Chip wird

niederohmig, so dass im Fehlerfall ein definierter Kurzschluss auftritt. Dies ist insbesondere für die Reihenschaltung von Thyristoren gewünscht.

Scheibenzellen für IGBT Chips haben sich nicht auf breiter Front durchsetzen können. Da es IGBT Chips nicht in der Größe von Thyristoren gibt (wegen der erheblich höheren Defektdichte, die keine sinnvolle Ausbeute mehr ermöglichen würde), müssen mehrere Chips in einem Druckkontaktgehäuse parallel geschaltet werden. Dies erfordert ausgeklügelte Maßnahmen zur gleichmäßigen Druckverteilung. In Verbindung mit den mechanisch erheblich empfindlicheren Chips geht der Vorteil der prinzipbedingt besseren Robustheit zunächst verloren. Auch das definierte Fehlerverhalten ist nicht mehr einfach zu erreichen, der Fehlerstrom konzentriert sich in einem fehlerhaften Chip, durch die hohen Stromdichten kommt es zu hohen Temperaturen und dadurch zu Oxidbildungen an der Oberfläche, die die Kontaktierung unterbrechen. Es bleibt lediglich der Vorteil des hermetischen Gehäuses, der allerdings mit erheblichen Mehrkosten erkaufte wird.

Im kleineren Spannungs- und Leistungsbereich (für das 400 V Netz) gibt es Module, die im Inneren einen vollständigen Spannverband mit druckkontaktieren Chips incl. Keramik zur Isolation enthalten. Oft sind auch zwei Dioden oder zwei Thyristoren so angeordnet, dass einfach netzgeführte Stromrichter realisiert werden können.