

ET+A

Leistungselektronik und elektrische Antriebe

Kapitel 6 Leistungshalbleiter

Adrian Omlin

Inhaltsverzeichnis Kapitel 6

6.	LEISTUNGSHALBLEITER.....	3
6.1	Eine Übersicht	3
6.2	Dioden.....	5
6.2.1	Das stationäre Verhalten.....	5
6.2.2	Das dynamische Verhalten	6
6.2.3	Schottky-Dioden	7
6.3	Bipolartransistoren	8
6.3.1	Das stationäre Verhalten.....	8
6.3.2	pnp- und npn-Struktur	9
6.4	Einschaltthyristoren.....	10
6.4.1	Das stationäre Verhalten.....	10
6.4.2	Das dynamische Verhalten	11
6.4.3	Spezielle Thyristoren	12
6.5	Abschaltthyristoren (GTOs, IGCTs).....	13
6.5.1	Das stationäre Verhalten.....	13
6.5.2	Das dynamische Verhalten	14
6.6	Feldeffekttransistoren (FETs)	15
6.6.1	Das stationäre Verhalten.....	15
6.7	IGBTs	16
6.8	Ansteuerung der Leistungshalbleiter	17
6.9	Verluste und Kühlung.....	17
6.9.1	Leitverluste	17
6.9.2	Schaltverluste.....	18
6.9.3	Kühlung	18

6. Leistungshalbleiter

6.1 Eine Übersicht

In der Leistungselektronik werden folgende Halbleiter eingesetzt:

Diode
Thyristor (Einschaltthyristor)
GTO (Gate Turn Off Thyristor)
IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor)
IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)
FET (Feld Effekt Transistor)
Bipolartransistor

Die Diode kann nicht gesteuert werden. Der (Einschalt-)Thyristor kann über ein Gate eingeschaltet, aber nicht ausgeschaltet werden. Die übrigen Elemente sind ein- und ausschaltbar.

Je nach ihren Eigenschaften können die Leistungshalbleiter mit unterschiedlichen Schaltfrequenzen betrieben werden. Auch sind ihre maximal realisierbare Spannungsfestigkeit und die Stromtragfähigkeit unterschiedlich. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht, für welche Schaltfrequenzen und Umrichterleistungen die einzelnen Halbleitertypen eingesetzt werden.

Die Diode ist nicht mit eingezeichnet, da einerseits Dioden für netzgeführte Stromrichter gebaut werden, die in Leistungsbereichen eingesetzt werden können, wie sie für die Thyristoren eingezeichnet sind. Diese werden Netzdioden (line commutated diodes) oder oft einfach als langsame Dioden bezeichnet.

Andererseits existieren sehr schnelle Dioden, die als antiparallele bzw. als Freilaufdioden zusammen mit abschaltbaren Halbleitern eingesetzt werden und von den Leistungsdaten her auf diese Anwendungen optimiert sind.

In der Leistungselektronik werden die Halbleiter als Schalter eingesetzt, d.h. sie werden voll leitend oder voll sperrend betrieben. Ist der Halbleiter voll sperrend, ist der Strom und damit auch die Verlustleistung in Halbleiter Null. Ist der Halbleiter voll leitend, ist die Spannung (nahezu) Null und damit auch die Verlustleistung. So lässt sich der Halbleiter gut ausnutzen (meist gibt die thermische Beanspruchung durch die Verluste die Grenze der Stromtragfähigkeit vor) und es resultieren Schaltungen mit gutem Wirkungsgrad.

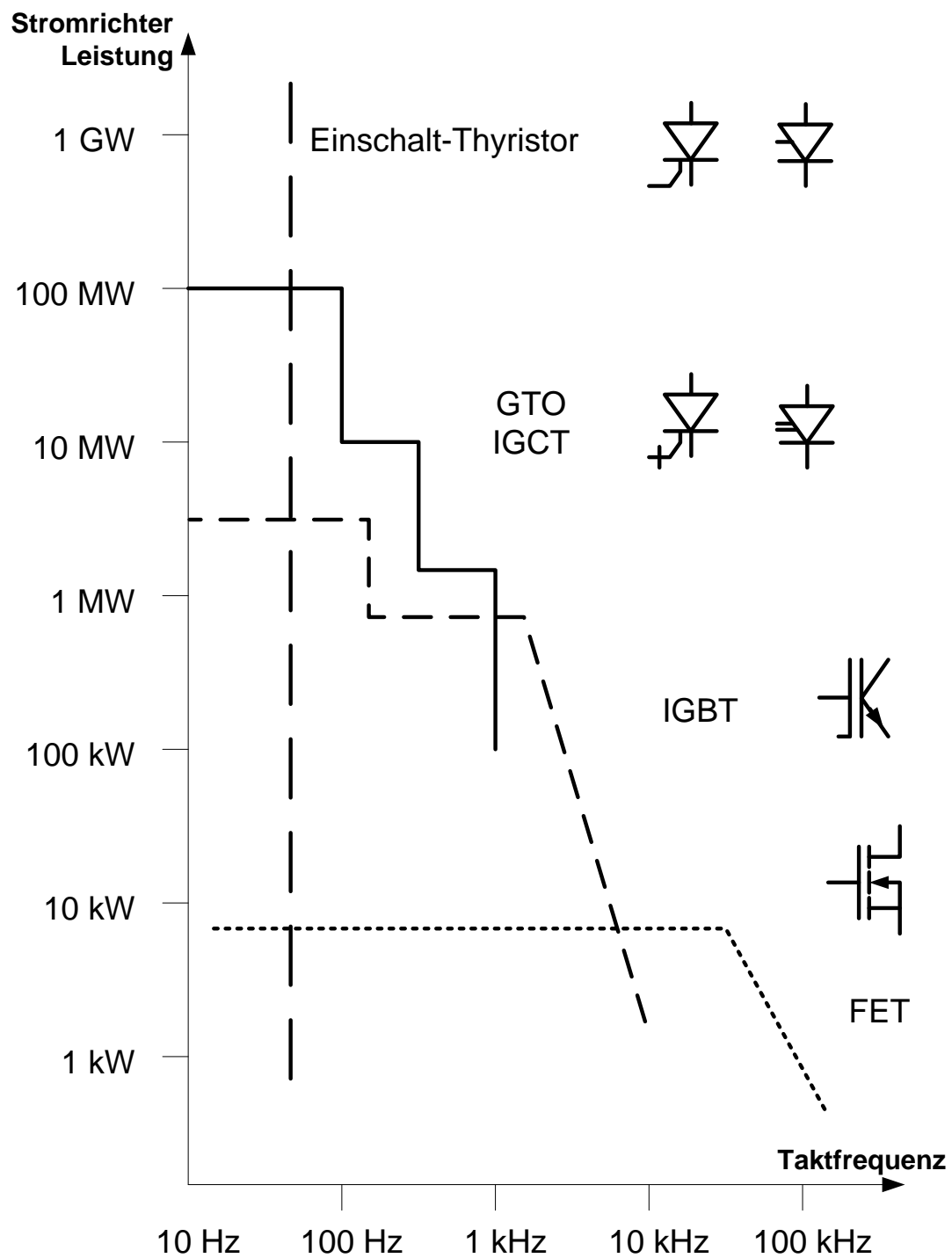


Abbildung 1. Einsatzbereich der verschiedenen Leistungshalbleiter.

6.2 Dioden

6.2.1 Das stationäre Verhalten

Die Diode ist ein Zweischicht-Element. Sie weist nur einen pn-Übergang auf.

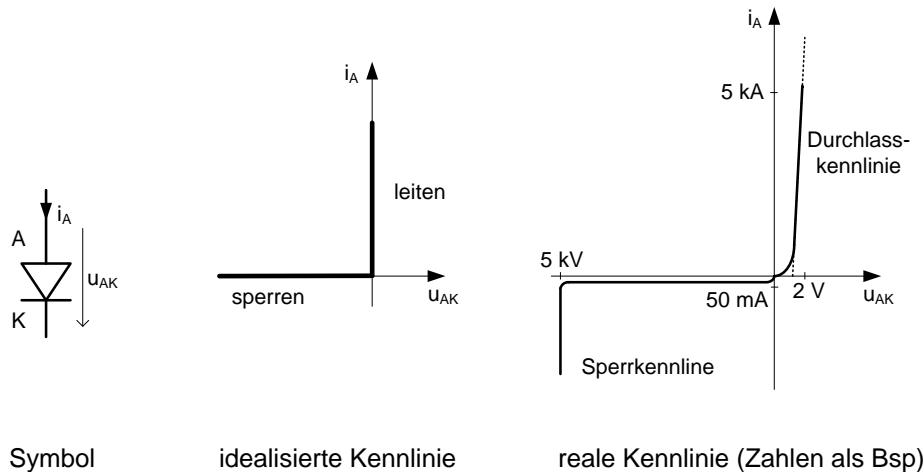


Abbildung 2. Diode: Symbol und Kennlinie.

Abbildung 2 zeigt links das Schaltsymbol mit den Anschlüssen Anode A und Kathode K, sowie die positive Zählpfeildefinition für Strom und Spannung.

Die Durchlasskennlinie ist durch eine Schleusenspannung u_D (z.B. 1 V) und durch einen differentiellen Widerstand r_D (z.B. 1 m Ω) gekennzeichnet. Der leitende Zustand kann durch folgendes Ersatzschaltbild angenähert werden:

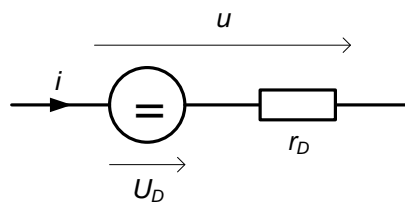


Abbildung 3. Ersatzschaltbild leitend.

Der maximal mögliche Durchlassstrom ist durch die Erwärmung der Diode bestimmt. Die maximal zulässige Junction-Temperatur $T_{j \max}$ (Temperatur der Sperrschicht, eigentlich des Siliziums) liegt typischerweise bei 150°C oder leicht darüber. Die Erwärmung der Diode wird durch die Verluste

$$P_V = \frac{1}{T} \int u(t) \cdot i(t) dt = U_D I_{\text{avg}} + r_D I_{\text{rms}}^2$$

und die Kühlung bestimmt.

Bei den Dioden wird unterschieden, ob sie in fremdgeführten Stromrichtern oder als Freilauf- bzw. antiparallele Diode in selbstgeführten Stromrichtern eingesetzt werden. Dioden in fremdgeführten Stromrichtern schalten nur üblicherweise mit 50 oder 60 Hz. Sie werden für sehr hohe Ströme und hohe Spannung realisiert. Für Netzgeführte Anwendungen sind beispielsweise folgende Typen auf dem Markt erhältlich:

Sperrspannung	Nennstrom (Mittelwert)
V_{RRM}	I_{FAVM}
2000 V	6830 A
5000 V	4700 A
6000 V	1235 A

Die Dioden in selbstgeführten Stromrichtern arbeiten mit der Frequenz des abschaltbaren Leistungshalbleiters. Sie werden deshalb auch als schnelle Dioden bezeichnet. Ihre Eigenschaften richten sich nach dem eingesetzten abschaltbaren Element.

6.2.2 Das dynamische Verhalten

Der Übergang vom sperrenden in den leitenden Zustand benötigt eine endliche Zeit, da die pn-Schicht mit beweglichen Ladungsträgern überschwemmt werden muss, damit sie leitend wird. Wird eine Diode mit sehr hohem di/dt beaufschlagt, reagiert sie mit einem grossen Spannungsabfall, da sie noch nicht über die ganze Fläche leitend ist. Ist das di/dt beim Einschalten zu gross, wird es zur Zerstörung der Diode kommen. Falls der Stromanstieg nicht durch natürlich vorhandene Induktivitäten (z.B. Kommutierungsinduktivität beim netzgeführten Gleichrichter) begrenzt wird, muss er auf einen zulässigen Wert begrenzt werden.

Auch der Übergang vom leitenden in den sperrenden Zustand erfolgt nicht plötzlich, weil die pn-Schicht zuerst wieder ausgeräumt, d.h. von beweglichen Ladungsträgern befreit werden muss, damit sie sperrt.

Nimmt der Durchlassstrom in der Diode bedingt durch äussere Vorgänge in der Schaltung (z.B. Kommutierung beim Gleichrichter oder einschalten des Schalters in einem Abwärtssteller) schnell ab, durchquert er die Nulllinie. Erst beim Erreichen einer relativ hohen Rückwärtsstromspitze sind die beweglichen Ladungsträger ausgeräumt und die Sperrspannung baut sich auf. Sind die Ladungsträger ausgeräumt, wird der Strom schnell Null und das führt zu einer Überspannung in den parasitären Induktivitäten der Zuleitung.

Abbildung 4 zeigt den entsprechenden Verlauf des Anodenstromes i_A und der Spannung u_{AK} über Anode-Kathode der Diode. Q_{rr} ist die Ladung (entspricht der Summe der Ladungsträger, rr: reverse recovery) und t_{rr} ist die Zeit, in der diese Ladungsträger ausgeräumt werden. I_{rr} ist die Rückwärtsstromspitze. Sie ist grösser, je steiler der Strom gegen Null geht (di_A/dt).

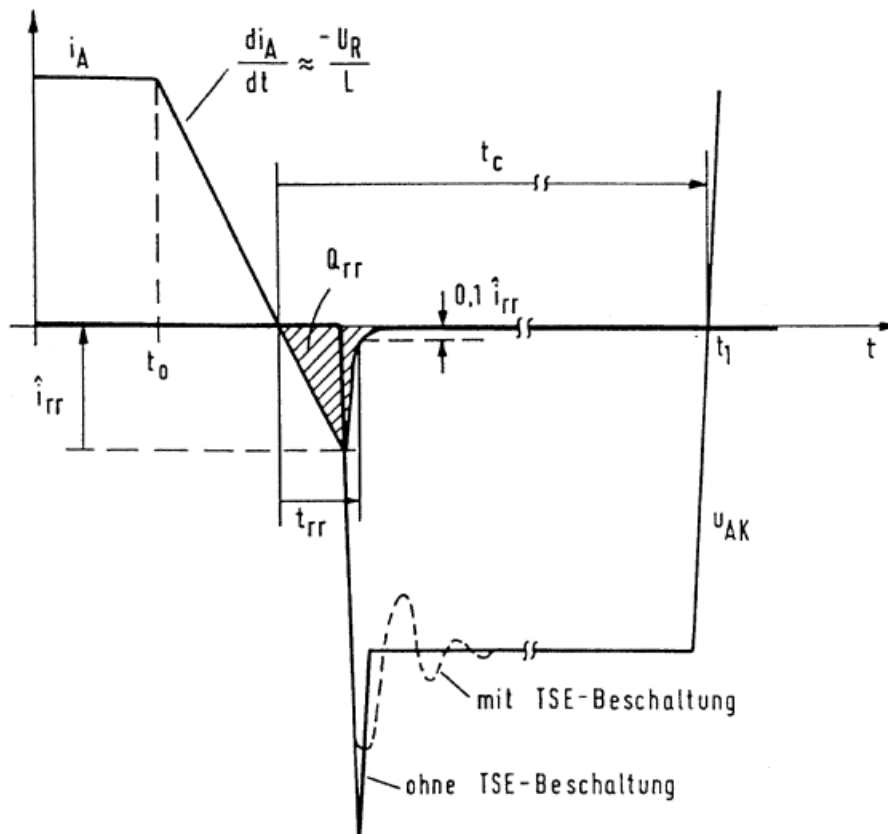


Abbildung 4. Rückwärtsstromspitze und daraus resultierende Überspannung.

Die Diode wird so beim Ausschalten mit einer Überspannung beansprucht. Die in Kapitel 4.5 vorgestellte Beschaltung verkleinert durch den Kondensator parallel zum Halbleiter auch diese durch den Trägerstauereffekt (TSE) verursachte Überspannung.

6.2.3 Schottky-Dioden

Schottky-Dioden haben ein wesentlich idealeres Verhalten. Ihre (stationäre) Durchlassspannung ist viel kleiner (z.B. 0.2 V statt 1 V Schleusenspannung). Der Rückwärtsstrom und seine Spannungszeitfläche Q_{rr} und damit die beim Ausschalten auftretende Überspannung sind ganz erheblich kleiner. Sie sind aber nur für kleine Sperrspannungen (bis ca. 100 V) realisierbar.

6.3 Bipolartransistoren

Bipolartransistoren sind dreischichtige Elemente (nnp- oder pnp-Struktur). Sie sind mit einem Steuerstrom stetig steuerbar. Auch sie werden in der Leistungselektronik zur Minimierung der Verlustleistung nur im Zustand voll leitend oder voll sperrend eingesetzt. Sie können nur in einer Richtung Strom führen, Spannung jedoch in beiden Richtungen aufnehmen.

In der Leistungselektronik wurde der eigentliche Bipolartransistor von Elementen mit verbesserten Eigenschaften verdrängt. Er wird hier trotzdem kurz vorgestellt: zum einen ist es das am längsten verfügbare Schaltelement in der Leistungselektronik, zum andern dient es als Basis für das Verständnis von Thyristoren und IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors), die ja eigentlich - wie schon der Name sagt – verbesserte Bipolartransistoren sind.

6.3.1 Das stationäre Verhalten

Abbildung 5 zeigt links das Schaltsymbol des dreipoligen Bipolartransistors mit seinen Anschlüssen Basis B, Kollektor C und Emitter E. Es zeigt weiter den Kollektorstrom i_C in Abhängigkeit der Kollektor-Emitter-Spannung u_{CE} mit dem Basisstrom i_B als Parameter.

Der Bipolartransistor ist stromgesteuert. Mit dem Strom i_B aus einer kleinen elektronischen Stromquelle, die nur eine kleine Leistung aufbringen muss, da die Spannung u_{BE} in ihrem Lastkreis ebenfalls klein ist, lässt sich der Transistor stetig durchsteuern. Bei angelegter Spannung u_{CE} fließt ein stetig variierbarer Strom i_C , der um Faktoren grösser ist als i_B .

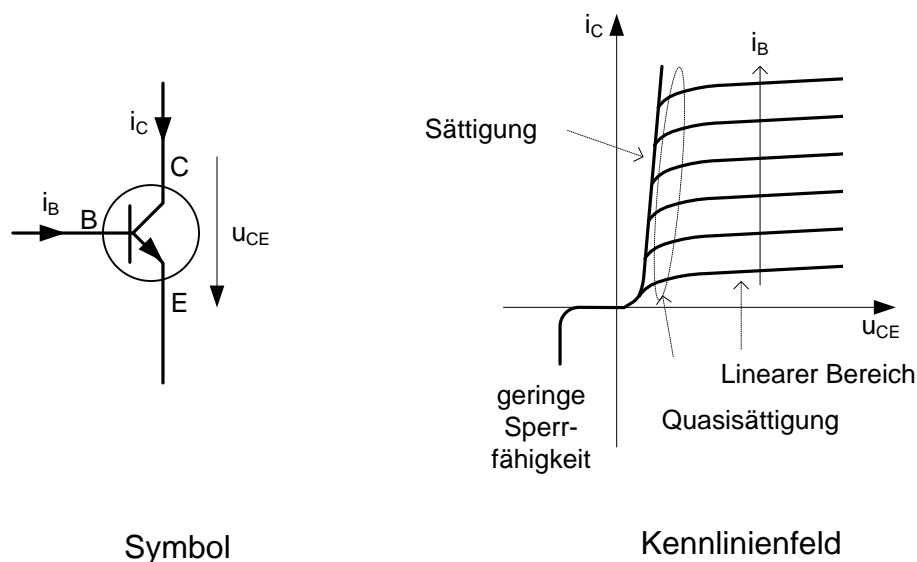


Abbildung 5. Bipolartransistor, Symbol und stationäres Verhalten.

Anhand des Kennlinienfeldes lassen sich drei Betriebsarten verdeutlichen:

- Betrieb im linearen Bereich: Die Gegenspannung u_{CE} , die der Transistor dem Laststrom i_C entgegensetzt, steigt in dem Masse an, wie der Strom i_B verkleinert wird.
- Betrieb in Quasisättigung: Mit erhöhtem Steuerstrom wird erreicht, dass der Transistor nahezu voll eingeschaltet ist. Der Spannungsabfall u_{CE} ist für ein gegebenes i_C nahe bei seinem Minimum.
- Betrieb in Sättigung: Wird der Steuerstrom so gross gewählt, dass der Transistor voll eingeschaltet ist, hat er den kleinstmöglichen Spannungsabfall.

Für den in der Leistungselektronik notwendigen Schaltbetrieb kommen nur der Betrieb in Sättigung oder Quasisättigung in Frage. Oft wird dem Betrieb in Quasisättigung der Vorzug gegeben. Zwar ist der Spannungsabfall etwas grösser, dafür lässt sich der Transistor schneller abschalten, wenn er nicht voll gesättigt ist.

6.3.2 npn- und npn-Struktur

In der Leistungselektronik werden hauptsächlich Transistoren mit npn-Struktur eingesetzt. Es gibt aber auch solche mit pnp-Struktur. Sie werden später zur Erklärung der Funktionsweise von Thyristoren verwendet. Hier wird nur das entsprechende Schaltsymbol gezeigt.

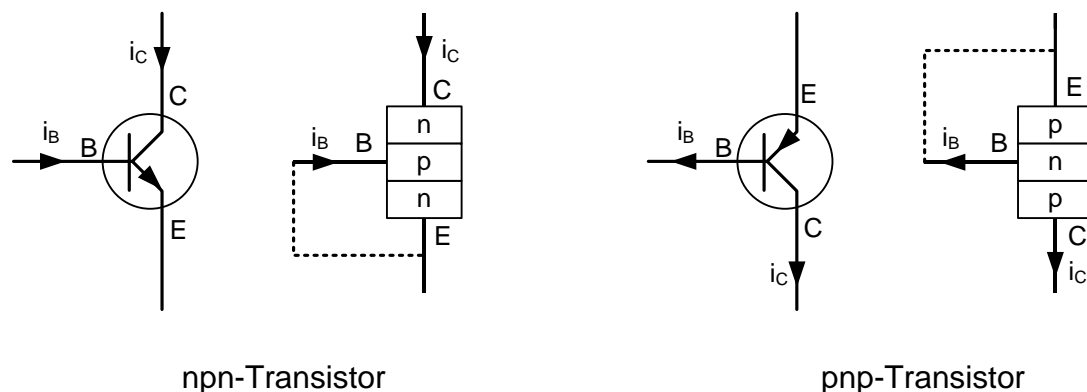


Abbildung 6. npn- und pnp-Bipolartransistor.

6.4 Einschaltthyristoren

Der Einschaltthyristor, meist einfach als Thyristor bezeichnet, war lange Zeit der Leistungshalbleiter schlechthin. Für sehr grosse Leistungen ist das auch heute noch der Fall. Der Thyristor ist ein vierschichtiges Element mit einer pnpn-Struktur.

Abbildung 7 zeigt das Symbol und die idealisierten Kennlinien für ein- und ausgeschalteten Zustand. Die Anschlüsse werden wie bei der Diode als Anode und Kathode bezeichnet. Der Thyristor lässt sich mit einem positiven Stromimpuls über das Gate bei positiver Anoden-Kathoden-Spannung u_{AK} vom sperrenden Zustand (oft zur Unterscheidung des Sperrens bei negativer Spannung als Blockieren bezeichnet) in den leitenden Zustand bringen. Dieser Vorgang wird als Zünden bezeichnet.

6.4.1 Das stationäre Verhalten

Typische maximale Ströme und Spannungen für Hochleistungs-Einschaltthyristoren liegen im Bereich 2 bis 5 kA bei bis zu 8.5 kV. Für kleinere Spannungen sind auch höhere Ströme erhältlich.

Thyristoren lassen sich mit geringen Aufwand Serie- oder Parallelschalten. So lassen sich Stromrichter mit bis zu 150 kA oder (nicht und) 500 kV realisieren.

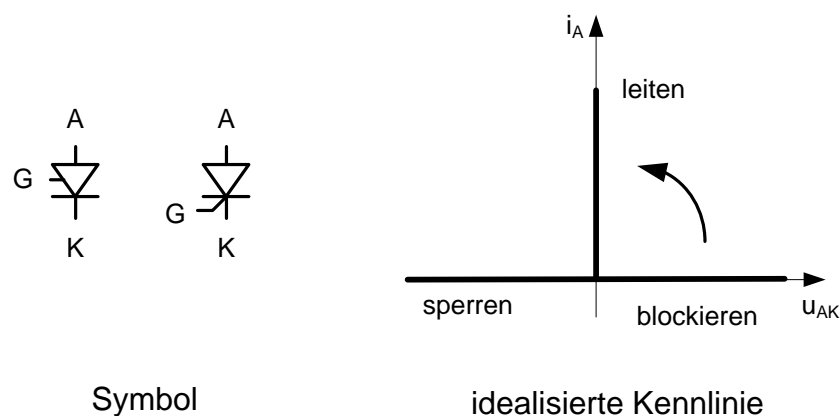


Abbildung 7. (Einschalt-)Thyristor: Symbol und idealisierte Kennlinie.

Im ausgeschalteten Zustand sperrt bzw. blockiert der Thyristor.
Im eingeschalteten Zustand verhält er sich wie eine Diode.

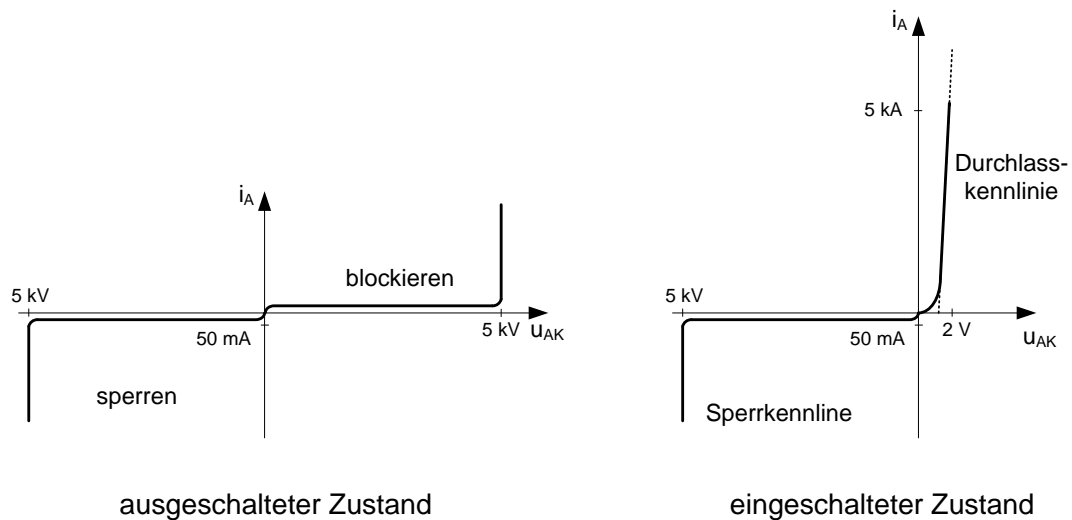


Abbildung 8. (Einschalt-)Thyristor: ein- und ausgeschalteter Zustand.

Die Leitverluste lassen sich wie bei der Diode gezeigt berechnen. Die Schaltverluste können meist vernachlässigt werden.

6.4.2 Das dynamische Verhalten

Thyristoren sind im Gegensatz zu Transistoren nicht stetig steuerbar. Mit einem kurzen Gatestromimpuls aus einer elektronischen Gatestromquelle kleiner Leistung können sie bei positiver Anoden-Kathoden-Spannung u_{AK} vom blockierten in den leitenden Zustand „gekippt“ werden. Wie ein Flip-Flop bleiben sie auch ohne Gatestrom im leitenden Zustand eingerastet. Und das so lange, bis der Anodenstrom i_A durch äussere Umstände wieder zu Null gebracht wird. Dann kippt die Schaltung zurück in den ausgeschalteten Zustand.

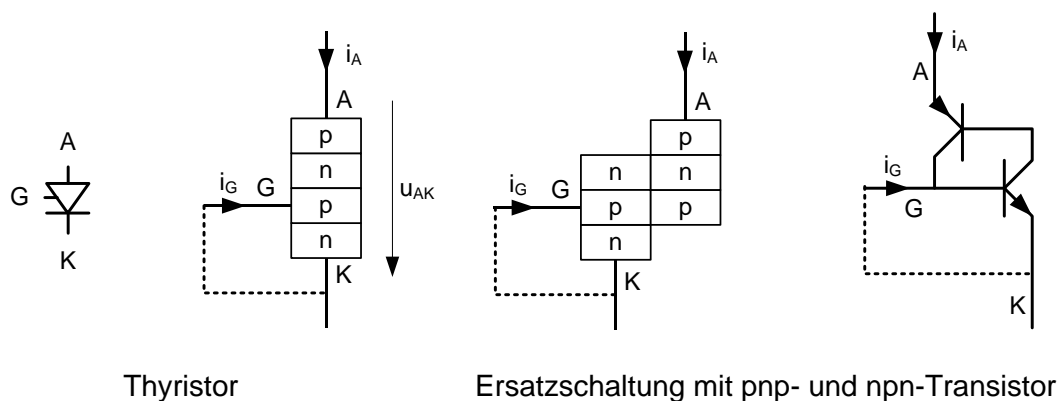


Abbildung 9. Ersatzschaltbild des Thyristors mit zwei Transistoren.

Das Verhalten lässt sich anhand Abbildung 9 erklären. Das Vierschicht-Element Thyristor kann man sich aus einem npn- und einem pnp-Transistor zusammengesetzt vorstellen. Wird im ausgeschalteten Zustand der untere npn-Transistor mit einem kurzen Gatestromimpuls beaufschlagt, wird dieser leitend und speist kollektorseitig die Basis des oberen pnp-Transistors. Dieser liefert nun wiederum den Gatestrom für den untern npn-Transistor, auch wenn von aussen kein Gatestrom mehr eingespeist wird. Der Thyristor bleibt in diesem Einschaltzustand eingerastet, bis der Anodenstrom Null wird und damit auch die gegenseitige Lieferung des Gatestromes versiegt. Der Thyristor ist dann ausgeschaltet und kann erst mit einem neuen Gateimpuls, natürlich nur bei positiver Anoden-Kathodenspannung u_{AK} , wieder eingeschaltet werden.

Damit der Thyristor leitend bleibt, muss ein als Haltestrom bezeichneter Strom durch den Thyristor fließen. Um zu verhindern, dass der Thyristor beim Unterschreiten dieses Stromes löscht, wird zum Teil das Gate mit einem Dauerstromimpuls beaufschlagt.

6.4.3 Spezielle Thyristoren

Der Triac entspricht der Antiparallelschaltung zweier Einschaltthyristoren und kann in beiden Richtungen Strom führen und Spannung aufnehmen. Auch er kann über das Gate ein-, aber nicht ausgeschaltet werden. Triacs haben zum Zünden in beide Stromrichtungen ein gemeinsames Gate. Sie werden oft zur Lichtsteuerung (Dimmer) und in Elektrowerkzeugen eingesetzt. Ihre Anwendung ist auf relativ kleine Ströme (bis einige zehn A) und Spannung und Frequenz des 400 V-Haushaltnetzes beschränkt.

Für Anwendungen im Höchstspannungsbereich (z.B. Hochspannungsgleichstromübertragung) gibt es Thyristoren, die sich direkt mit einem Lichtimpuls zünden lassen. So lässt sich die grosse Potentialschwelle zwischen Ansteuerung und Thyristor mit einem Lichtleiter überbrücken.

6.5 Abschaltthyristoren (GTOs, IGCTs)

Abschaltthyristoren (GTO: Gate Turn Off Thyristor) haben gegenüber den Einschaltthyristoren den grossen Vorteil, dass sie über das Gate auch wieder ausgeschaltet werden können. Sie wurden in der ersten Hälfte der achtziger Jahre zur Einsatzreife gebracht. Weltweit die ersten Grossprojekte waren Triebfahrzeuge für verschieden Schweizer Bahnen (Re 4/4 der SZU und der BT, Re 450 der Zürcher S-Bahn, Re 460 der SBB).

GTOs sind - im Gegensatz zu Transistoren - nicht stetig steuerbar. Man kann Sie am Gate einschalten, und – im Gegensatz zu Einschaltthyristoren – über das Gate wieder Ausschalten.

GTOs können den Strom nur in eine Richtung führen, aber in beide Richtungen eine Spannung aufnehmen.

Im Gegensatz zu einfachen Thyristoren ist es schwierig, GTOs in Serie oder parallel zu schalten.

Der IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) kann als Weiterentwicklung des GTOs betrachtet werden. Er ist schneller als der GTO.

IGCTs werden auch in Reihe geschaltet. An einer Parallelschaltung wird zurzeit gearbeitet. Was möglich ist, auch beim GTO, eine kleine Anzahl von Elementen über Parallelschaltdrosseln parallelzuschalten.

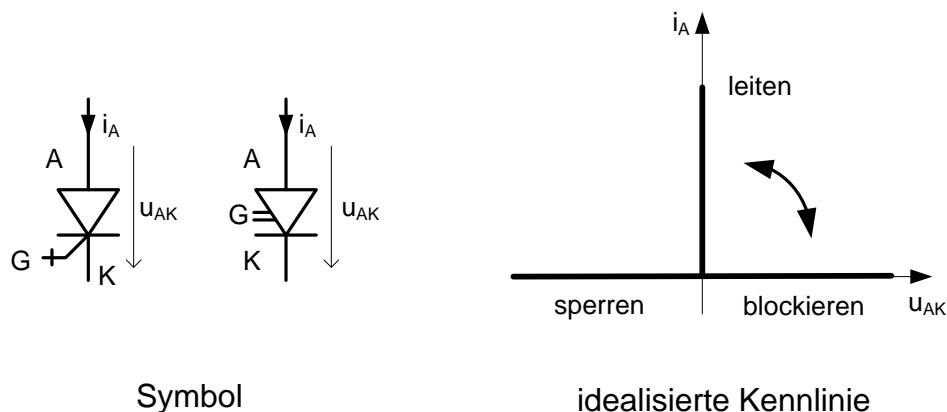


Abbildung 10. GTO und IGCT: Symbol und idealisierte Kennlinie.

6.5.1 Das stationäre Verhalten

Punkto Leitverluste gilt das beim Thyristor respektive bei der Diode bereits gesagte.

Wenn ein GTO oder ein IGCT mit antiparalleler Diode betrieben wird, z.B. in einem Wechselrichter, wird seine Sperrfähigkeit nicht beansprucht. Für solche Fälle gibt es Elemente mit reduzierter maximaler Sperrspannung, z.B. 200 V statt 4.5 kV. In Vorwärtsrichtung („blockieren“), können sie natürlich die volle Spannung aufnehmen.

GTOs sind bei einer Sperrspannung von 4.5 kV mit einem abschaltbaren Strom von bis zu 4 kA erhältlich. IGCTs gibt es bis 6.5 kV und 4.2 kA, bei 3 kV können es sogar 6 kA abschaltbarer Strom sein.

Im Vergleich zu den Strömen in Dioden und Thyristoren handelt es sich bei den Angaben hier um den abschaltbaren Strom. Der Betriebsstrom ist beträchtlich kleiner und beträgt in der Regel etwa $1/3$ des abschaltbaren Stromes.

6.5.2 Das dynamische Verhalten

GTOs sind nicht stetig steuerbar. Man kann sie wie Einschaltthyristoren mit einem Gatestromimpuls in den Einschaltzustand kippen. Da bleiben Sie eingerastet, bis sie ein kräftiger, negativer, laststromabhängiger Gatestromimpuls in den ausgeschalteten Zustand zurückkippt.

Das Verhalten kann ähnlich wie beim Einschaltthyristor erklärt werden. Zum einschalten wird mit einem kleinen positiven Gatestromimpuls der untere npn-Transistor eingeschaltet (Vgl. Abbildung 9 und dazugehörige Erklärung in Kapitel 6.4.2), welcher den oberen pnp-Transistor einschaltet, so dass sich die beiden Transistoren gegenseitig leitend halten. Zum Ausschalten wird eine kleine negative Spannung (z.B. -15 V) ans Gate angelegt. Sie zieht die Gatestromrückkoppelung aus dem Kollektor des pnp-Transistors vollständig ab und unterbricht so die Selbsthaltung. Das ist beim GTO möglich, weil er – anders als der Einschaltthyristor – viel feiner strukturiert ist: sein Gateanschluss ist sehr fein aufgegliedert und über den ganzen Halbleiterquerschnitt verteilt und kann so viel wirkungsvoller eingreifen. Zum Ausschalten ist ein hoher Gatestrom nötig. Er beträgt ca. $1/3$ des abzuschaltenden Stromes (z.B. $i_G = -750$ A, um $i_A = 2000$ A Laststrom erfolgreich abzuschalten).

Beim IGCT ist im Vergleich zum GTO der Gateanschluss viel niederinduktiver ausgeführt. Das erlaubt höhere Schaltgeschwindigkeiten. Der Strom der zum Ausschalten kurzzeitig aus dem Gate „gezogen“ werden muss, entspricht in etwa dem abzuschaltenden Laststrom (z.B. $i_G = -2000$ A, um $i_A = 2000$ A Laststrom erfolgreich abzuschalten). Um den Gateanschluss niederinduktiv zu halten, ist er rund um den Halbleiter angeordnet und die Ansteuerungsplatte ist fest mit dem Halbleiter verbunden (integrated).

6.6 Feldeffekttransistoren (FETs)

Der FET ist das wichtigste Halbleiterelement in der Kleinleistungselektronik. Spannungsgesteuert und fast leistungslos ist er stetig steuerbar und verhält sich wie ein stetig verstellbarer Widerstand. Er lässt sich auch schnell ein- und ausschalten. In der Leistungselektronik wird er als Schalter eingesetzt. Den steuerbaren Strom kann er nur in einer Richtung führen. In der andern Richtung wirkt er wie eine Diode. Dementsprechend kann er nur Spannung in Richtung des steuerbaren Stromes aufnehmen.

6.6.1 Das stationäre Verhalten

Abbildung 11 zeigt das Schaltsymbol des FET mit den Anschlüssen Gate G, Drain D und Source S. Rechts ist das Kennlinienfeld für ein- und ausgeschalteten Zustand dargestellt.

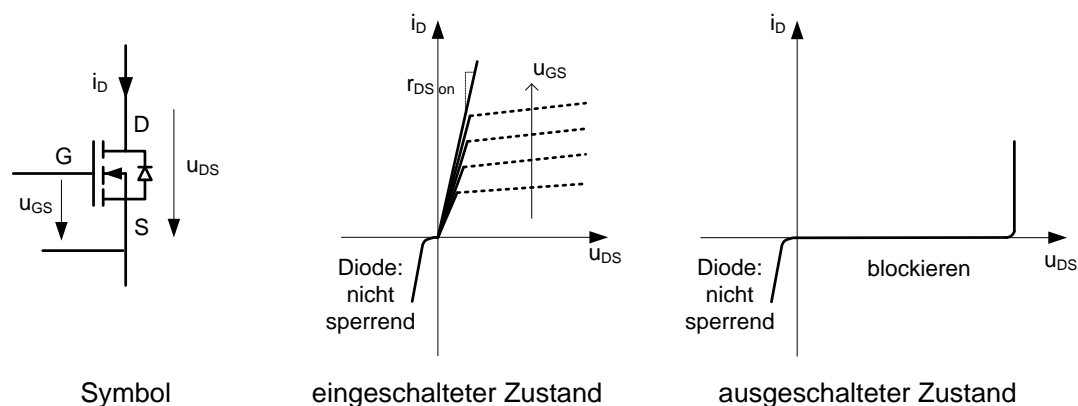


Abbildung 11. FET, Symbol und Kennlinien.

Die Kennlinienschar im eingeschalteten Zustand hat u_{GS} als Parameter. Der FET verhält sich wie ein steuerbarer Widerstand r_{DS} . Im voll eingeschalteten Zustand beträgt bei Nennstrom der Spannungsabfall über dem Widerstand r_{DS} typischerweise 1% der maximalen Spannung $u_{DS \max}$.

Der FET ist spannungsgesteuert: mit einer kleinen Spannung (z.B. 15 V) einer Steuerspannungsquelle, die im ein- und ausgeschalteten Zustand keinen Strom i_G liefern muss, kann der FET stetig durchgesteuert werden. Das heisst, dass der Spannungsabfall u_{DS} am Widerstand r_{DS} , den der FET dem Laststrom i_D entgegenstellt, eingestellt werden kann. In der Leistungselektronik wird der FET nur voll durchgesteuert verwendet. Das entspricht den ausgezogenen Linien im Kennlinienfeld von Abbildung 11 Mitte.

Die Ströme und Spannungen des FET sind beschränkt auf etwa 200 A bei 50 V oder 5 A bei 1000 V.

6.7 IGBTs

Der IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ist ein spannungsgesteuerter Bipolartransistor. Er ist das jüngste und mittlerweile am häufigsten verwendete Element der Leistungselektronik. Es werden immer grössere Leistungsbereiche erschlossen. So hat beispielsweise in der neusten Generation von Triebfahrzeugen der IGBT den GTO verdrängt.

Der IGBT besteht im Prinzip im Steuerkreis aus einem FET, und im Lastkreis aus einem Bipolartransistor. Er kombiniert die Vorteile beider Elemente: er kann grosse Ströme nahezu leistungslos steuern.

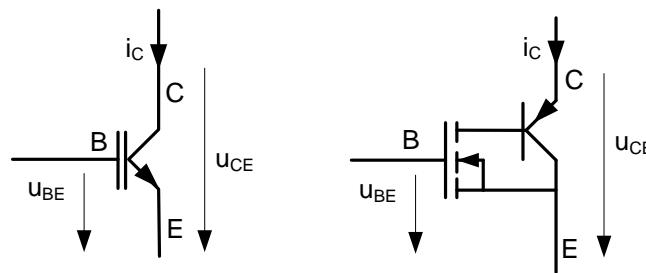


Abbildung 12. IGBT, Schaltsymbol und prinzipieller Aufbau aus FET und Bipolartransistor.

Die Anschlüsse werden wie beim Bipolartransistor mit Basis (B), Kollektor (C) und Emitter (E) bezeichnet.

Abbildung 13 zeigt neben dem Symbol das Kennlinienfeld. IGBTs lassen sich schnell schalten (typischerweise einige kHz), dafür ist aber die Durchlassspannung im eingeschalteten Zustand verglichen mit GTOs hoch (4 - 5 V statt 2 - 3 V). IGBTs werden aber stetig verbessert.

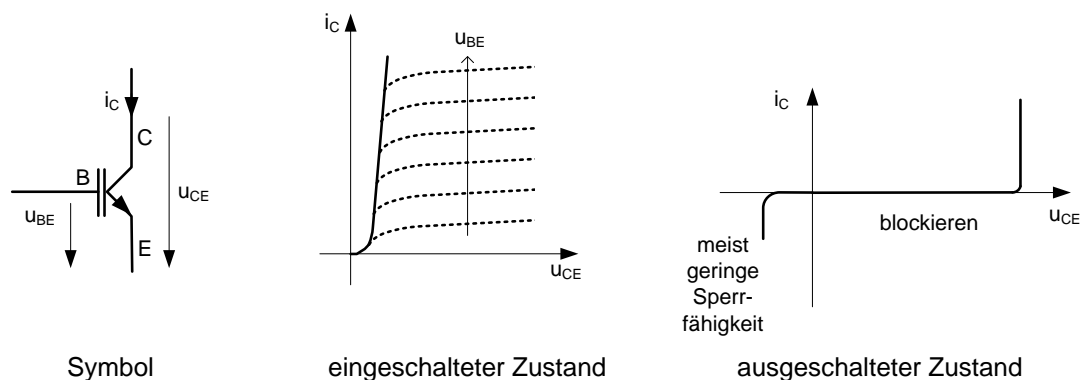


Abbildung 13. IGBT: Symbol und Kennlinienfeld.

Typische Spannungsclassen von IGBTs sind 1200 V, 1700 V, 3300 V und 4500 V maximale Sperrspannung. Die Ströme pro Gehäuse gehen bis 2400 A, bei einer Spannung von 4500 V sind mittlerweile Elemente mit 900 A erhältlich. IGBTs lassen sich parallelschalten.

6.8 Ansteuerung der Leistungshalbleiter

Die Ansteuerung hat die Aufgabe, entsprechend den vom Modulator kommenden Ein- und Ausschaltbefehlen, die zum Steuern des Halbleiters nötige Energie als Strom- oder Spannungssignal dem Gate bzw. der Basis zuzuführen.

Die Signalelektronik der Regelung und des Modulators, der die Schaltbefehle generiert, sind an das Erdpotential gebunden. Die anzustuernden Leistungshalbleiter können auf wesentlich höherem Potential sein und springen beim Schalten potentialmässig umher. Eine weitere Aufgabe der Ansteuerung ist deshalb die Potentialtrennung.

Die potentialmässig getrennte Übertragung des Signals kann über einen induktiven Wandler erfolgen. Dabei ist gleichzeitig eine Übertragung von Energie möglich.

Das Schaltsignal kann auch via Lichtleiter übertragen werden. Bei kompakten Aufbauten kleinerer Leistung kommen auch Optokoppler in Frage. Die Energie wird auch dann über einen induktiven Übertrager auf Potential gebracht.

6.9 Verluste und Kühlung

6.9.1 Leitverluste

Die Berechnung der Durchlassverluste (eingeschalteter Zustand) wurde für die Diode bereits im Kapitel 6.2.1 behandelt. Die gleiche Ersatzschaltung kann auch für Einschaltthyristoren, GTOs, IGCTs und Bipolartransistoren verwendet werden. Beim FET ist die Spannungsquelle null und als r_D muss der entsprechende Widerstand r_{DS} eingesetzt werden.

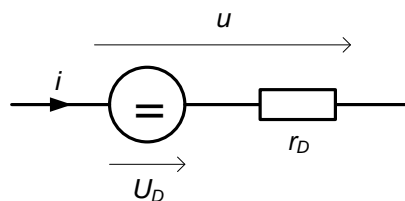


Abbildung 14. Ersatzschaltbild leitend.

$$P_{V\text{ Leit}} = \frac{1}{T} \int u(t) \cdot i(t) dt = U_D I_{\text{avg}} + r_D I_{\text{rms}}^2$$

Im sperrenden Zustand fliesst bei vernünftiger Spannungsbeanspruchung, nur ein sehr kleiner Leckstrom und die Sperrverluste können vernachlässigt werden.

6.9.2 Schaltverluste

Bei Dioden und Thyristoren können die Schaltverluste in der Regel vernachlässigt werden. In der nötigen Beschaltung können erhebliche Verluste auftreten, die aber nicht zur Erwärmung des Halbleiters beitragen.

Bei abschaltbaren Elementen entstehen Schaltverluste, die in der Regel proportional zur sperrenden Spannung, proportional zum Strom im eingeschalteten Zustand und proportional zur Schaltfrequenz F sind.

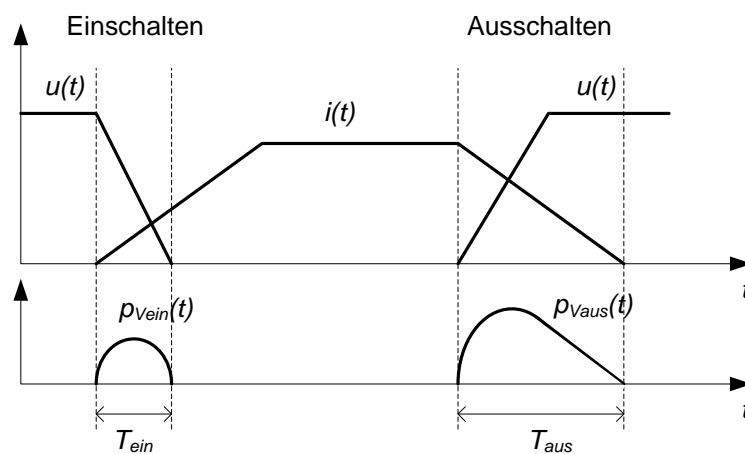


Abbildung 15. Verluste beim Ein- und Ausschalten.

$$E_{ein} = \int_0^{T_{ein}} u(t) \cdot i(t) dt \quad E_{aus} = \int_0^{T_{aus}} u(t) \cdot i(t) dt$$

$$P_{V\,Schalt} = (E_{ein} + E_{aus}) \cdot F$$

Bei tiefer Schaltfrequenz sind die Schaltverluste gegenüber den Durchlassverlusten eher klein, bei grösserer Schaltfrequenz liegen Schalt- und Durchlassverluste in der gleichen Grössenordnung.

6.9.3 Kühlung

Jeder Halbleiter hat eine maximal zulässige Temperatur der Sperrschicht (junction) T_{jmax} . Bei schaltbaren Elementen liegt sie typischerweise bei 125°C , bei Dioden können es 150°C oder noch mehr sein. Oberhalb dieser Temperatur verliert der Halbleiter

seine Sperrfähigkeit und wird beim Anlegen einer Spannung durch den grossen Rückwärtsstrom zerstört.

Die aktuelle Temperatur der Sperrschicht hängt von den Verlusten und der Kühlung ab. Abbildung 16 zeigt eine schematische Darstellung. In der Sperrschicht (junction), d.h. im Silizium, entstehen die Verluste. Die Verlustenergie wird als Wärme über das Gehäuse des Halbleiters (case, c) und den Kühlkörper (heat sink, h) ans Kühlmedium (Umgebung = ambient, a) abgegeben. Besonders bei den Übergängen sind Wärmeübergangswiderstände R_{th} zu überwinden, an welchen Temperaturdifferenzen entstehen, die zur übertragenen Verlustleistung proportional sind.

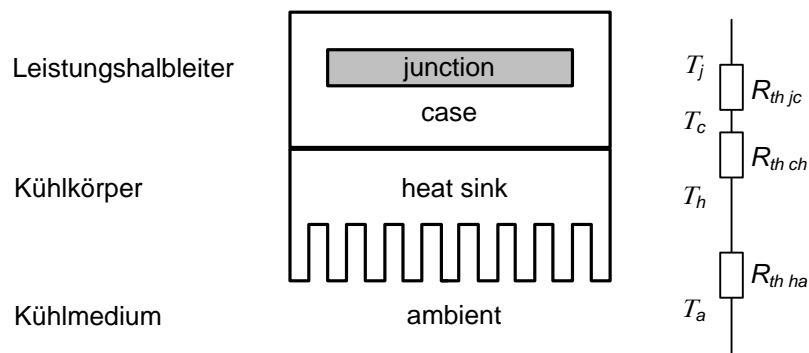


Abbildung 16. Kühlung und Wärmeübergangswiderstände.

Analog zum ohmschen Gesetz lassen sich mit den Wärmeübergangswiderständen und der übertragenen Verlustleistung die Temperaturunterschiede bestimmen.

$$\Delta T_{jc} = T_j - T_c = P_{Vtot} \cdot R_{th\,jc} \quad \text{mit} \quad P_{Vtot} = P_{V\,Leit} + P_{V\,Schalt}$$

$$\Delta T_{ch} = T_c - T_h = P_{Vtot} \cdot R_{th\,ch}$$

$$\Delta T_{ha} = T_h - T_a = P_{Vtot} \cdot R_{th\,ha}$$

$$\Delta T_{ja} = T_j - T_a = P_{Vtot} \cdot R_{th\,ja} \quad \text{mit} \quad R_{th\,ja} = R_{th\,jc} + R_{th\,ch} + R_{th\,ha}$$

Die Temperatur der Sperrschicht des Halbleiters berechnet sich zu

$$T_j = T_a + \Delta T_{ja}$$

Bei den Verlusten und bei den Temperaturen handelt es sich um die über eine Schaltperiode gemittelten Werte. Bei sehr tiefen Schaltfrequenzen oder bei dynamischen Vorgängen ist die Energiespeicherfähigkeit der einzelnen Komponenten zu berücksichtigen.