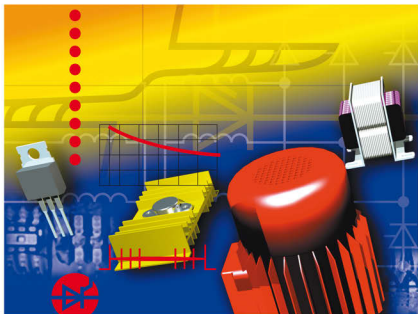


Vogel Fachbuch

Olaf Beuth / Klaus Beuth

Leistungs- elektronik

Elektronik 9



Elektronik 9

Olaf Beuth / Klaus Beuth

Leistungselektronik

Vogel Buchverlag

Weitere Informationen:
www.vogel-buchverlag.de

ISBN 3-8023-1853-6

1. Auflage. 2003

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2003 by

Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG, Würzburg

Umschlaggrafik: Michael M. Kappenstein/Frankfurt/M.

Herstellung: dtp-project, 97222 Rimpar

Vorwort

Elektronikbauelemente in der Halbleitertechnik und die zugehörigen Schaltungen haben die Welt der Nachrichtentechnik in hohem Maße verändert, ja revolutioniert. In Computern und Kommunikationsgeräten werden zunehmend, wie in Ton- und Bildgeräten, kleine Ströme im Milliampere- und Mikroamperebereich immer schneller geschaltet und immer effektiver verstärkt. Einem weiteren Fortschritt steht hier noch keine unmittelbare Grenze entgegen.

Doch wie sieht es mit der Schaltung und Verstärkung größerer Ströme aus? Durch kontinuierliche Forschungsarbeit wurden Bauelemente für die «Elektronik kleiner Ströme» so verändert, dass sie mittlerweile auch große Ströme bewältigen können, und das mit großer Zuverlässigkeit. Es entwickelte sich die «Elektronik großer Ströme»: die Leistungselektronik.

Jetzt gibt es Transistoren, die 3000 Ampere und mehr schalten können, sowie Thyristoren und GTO, die die 10 000-Ampere-Marke überschritten haben. Dioden bewältigen heute schon bis zu 13 000 Ampere. Beim Einsatz dieser Bauteile treten andere Probleme auf, als bei ihren kleinen Brüdern. Das gilt besonders für Kühlung, gleichmäßige Kristall-Durchströmung, Leitfähigkeit, Sperrspannung am Bauteil und für Schaltzeiten. Es müssen außerdem Schutzmaßnahmen gegen Überlastungen getroffen werden.

Eigenschaften sowie Besonderheiten dieser Bauteile und ihre Schaltungen werden praxisnah mit dem notwendigen Maß an Mathematik verständlich dokumentiert und dargestellt. Erläutert werden unter anderem Steuer- und Schutzbeschaltungen, Halbleiterschalter und Halbleitersteller, fremd- und selbstgeführte Stromrichter.

Wichtige Themen der Leistungselektronik, wie das Entstehen von Oberschwingungen und die Blindleistungsaufnahme der unterschiedlichen Schaltungen, werden detailliert beschrieben. Beispiele veranschaulichen wie die Leistungselektronik in der Energieversorgung und Antriebstechnik eingesetzt wird.

Elektroinstallateure, Elektromeister, Elektroingenieure, Elektrofachkräfte der Energietechnik und verwandter Berufe, die energietechnische Anlagen planen, bauen und warten, oder Studenten der Elektrotechnik können damit sowohl gestellte Aufgaben bewältigen als auch Probleme der täglichen Praxis lösen.

Anregungen und Vorschläge zum Thema nehmen die Autoren unter olaf.beuth@web.de gerne entgegen.

Berlin
Waldkirch

Olaf Beuth
Klaus Beuth

In der Fachbuchreihe «Elektronik» erschienen:

Klaus Beuth/Olaf Beuth: Elementare Elektronik

Heinz Meister: Elektrotechnische Grundlagen
(Elektronik 1)

Klaus Beuth: Bauelemente
(Elektronik 2)

Klaus Beuth/Wolfgang Schmusch: Grundsaltungen
(Elektronik 3)

Klaus Beuth: Digitaltechnik
(Elektronik 4)

Helmut Müller/Lothar Walz: Mikroprozessortechnik
(Elektronik 5)

Wolfgang Schmusch: Elektronische Meßtechnik
(Elektronik 6)

Klaus Beuth / Richard Hanebuth/Günter Kurz/Christian Lüders: Nachrichtentechnik
(Elektronik 7)

Wolf-Dieter Schmidt: Sensorschaltungstechnik
(Elektronik 8)

Olaf Beuth / Klaus Beuth: Leistungselektronik
(Elektronik 9)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einleitung	11
2 Bauelemente der Leistungselektronik	13
2.1 Eigenschaften von Leistungshalbleiter-Bauelementen	13
2.2 Leistungsdioden	14
2.2.1 Einschalten einer Leistungsdiode	16
2.2.2 Ausschalten einer Leistungsdiode	19
2.2.3 Verlustleistungen einer Leistungsdiode	20
2.2.4 Schutzbeschaltung einer Leistungsdiode	21
2.3 Thyristoren	22
2.3.1 Betrieb an Sperrspannung	24
2.3.2 Zünden eines Thyristors	27
2.3.3 Einschalten eines Thyristors	30
2.3.4 Ausschalten eines Thyristors	31
2.3.5 Verlustleistungen eines Thyristors	33
2.3.6 Schutzbeschaltung eines Thyristors	34
2.3.7 Asymmetrisch sperrender Thyristor (ASCR)	34
2.3.8 Gate-Assisted-Turn-Off-Thyristor (GATT)	35
2.3.9 Rückwärtsleitender Thyristor (RCT)	35
2.3.10 Light-Controlled-Thyristor (LCT)	35
2.3.11 Gehäuseformen von Thyristoren	36
2.3.12 Vor- und Nachteile von Thyristoren	38
2.4 Triode-alternating-current-switch (Triac)	38
2.5 Abschaltbare Thyristoren	40
2.5.1 Gate-Turn-Off-Thyristor (GTO)	40
Einschalten eines GTO	42
Ausschalten eines GTO	43
Verlustleistungen eines GTO	43
Schutzbeschaltung eines GTO	43
Vor- und Nachteile eines GTO	44
2.5.2 Hard-Driven GTO (HDGTO)	44
2.5.3 MOS-Controlled-Thyristor (MCT)	44
2.5.4 MOS-Turn-Off-Thyristor (MTO)	45
2.5.5 Integrated-Gate-Communicated-Thyristor (IGCT)	46
2.5.6 Emitter-Turn-Off-Thyristor (ETO)	47
2.6 Bipolare Leistungstransistoren (nnp-Transistoren)	48
2.6.1 Spannungs- und Stromverhältnisse am npn-Transistor, Kennlinien	50
2.6.2 Einschalten eines bipolaren Leistungstransistors	55
2.6.3 Ausschalten eines bipolaren Leistungstransistors	56
2.6.4 Verlustleistungen und sicherer Arbeitsbereich	57
2.6.5 Darlingtonschaltung	58
2.6.6 Schutzbeschaltung eines bipolaren Leistungstransistors	59
2.6.7 Gehäuseformen von bipolaren Leistungstransistoren	59

2.6.8	Vor- und Nachteile eines bipolaren Leistungstransistors	59
2.7	Feldeffektleistungstransistoren (FET bzw. MOSFET)	59
2.7.1	Spannungs- und Stromverhältnisse am MOSFET, Kennlinien	61
2.7.2	Einschalten eines MOSFET	65
2.7.3	Ausschalten eines MOSFET	66
2.7.4	Verlustleistungen und Grenzwerte eines MOSFET	67
2.7.5	Schutzbeschaltung eines MOSFET	68
2.7.6	Vor- und Nachteile eines MOSFET	68
2.8	Insulated-Gate-Bipolar-Transistor (IGBT)	68
2.8.1	Spannungs- und Stromverhältnisse am IGBT, Kennlinien	69
2.8.2	Einschalten eines IGBT	70
2.8.3	Ausschalten eines IGBT	71
2.8.4	Verlustleistungen und Grenzwerte eines IGBT	72
2.8.5	Gehäuseformen eines IGBT	74
2.8.6	Vor- und Nachteile eines IGBT	75
2.9	Static-Induction-Transistor (SIT)	75
2.10	Parallel- und Reihenschaltung von Halbleiterbauelementen	75
2.11	Anwendungen von Leistungshalbleiterbauelementen	78
2.12	Zuverlässigkeit von Halbleiterbauelementen	80
3	Steuer- und Schutzbeschaltungen von Halbleiterbauelementen, Kühlung	83
3.1	Sicheres Zünden	83
3.2	Steuerschaltungen	83
3.3	Schutzbeschaltungen	86
3.3.1	Schutz vor dynamischen Überströmen	86
3.3.2	Schutz vor dynamischen Überspannungen	87
3.3.3	Schutz vor statischen Überströmen	88
3.4	Kühlung	89
3.4.1	Entstehung der Wärme	89
3.4.2	Thermisches Ersatzschaltbild	90
3.4.3	Wärmeleitung und Heatpipe, Konvektion, Strahlung	95
3.4.4	Kühlkörperbauformen	97
3.4.5	Aktive Kühlung	98
4	Halbleiterschalter und Halbleitersteller	101
4.1	Halbleiterschalter	101
4.2	Schaltungen zur Drehrichtungsumkehr	104
4.3	Wechselstromsteller	105
5	Kommutierung	109
5.1	Kommutierungsvorgang	110
5.2	Wichtige Definitionen zur Kommutierung	111
6	Stromrichter	113
6.1	Fremdgeführte Stromrichter	115
6.1.1	Netzgeführte Stromrichter	115
	Gleichrichterschaltungen	115
	Gesteuerte 2-pulsige Schaltung mit einem Transformator mit Mittelpunktanzapfung (M2)	119
	Gesteuerte 2-pulsige Brückenschaltung (B2)	124
	Halbgesteuerte 2-pulsige Brückenschaltung (B2H)	125
	3-pulsige Mittelpunktschaltung (M3)	126
	6-pulsige Brückenschaltung (B6)	128
	Halbgesteuerte 6-pulsige Brückenschaltung (B6H)	130

	Umkehrstromrichter	130
	Wechselstromrichter (Direktumrichter)	133
6.1.2	Lastgeführte Stromrichter	136
	Lastgeführter Stromrichter für Synchronmaschinen	136
	Schwingkreis-Wechselrichter	138
6.2	Selbstgeführte Stromrichter	141
6.2.1	Löschung eines Thyristors mit parallelgeschaltetem Löschkondensator	142
6.2.2	Gleichstromsteller	144
6.2.3	Selbstgeführte Wechselrichter	150
	<i>U</i> -Wechselrichter mit blockförmiger Ausgangsspannung	150
	<i>U</i> -Wechselrichter mit pulsförmiger Ansteuerung	154
	3-phasiger <i>U</i> -Wechselrichter	157
	<i>I</i> -Wechselrichter mit blockförmigem Ausgangsstrom	160
	Netzwechselrichter für niedrige Gleichspannungen	165
6.2.4	Wechselstromrichter mit Zwischenkreis	167
	Wechselstromrichter mit eingepprägtem Zwischenkreisstrom	167
	Wechselstromrichter mit eingepprägter Zwischenkreisspannung	168
6.2.5	Gleichstromrichter mit Zwischenkreis, Schaltnetzteile	171
	Sperrwandler	172
	Durchflusswandler	173
6.2.6	Blindleistungsstromrichter	178
6.2.7	Stromrichter als aktive Filter	180
7	Blindleistung und Oberschwingungen	183
7.1	Definition der Blindleistung	183
7.2	Entstehung von Blindleistung und Kompensationsanlagen	186
7.3	Steuerblindleistung	186
7.4	Kommutierungsblindleistung	187
7.5	Entstehung von Oberschwingungen, Saugkreise	187
7.6	Elektromagnetische Verträglichkeit	190
8	Anwendungsbeispiele	193
8.1	Ein- und Ausschalten von Strömen bzw. Spannungen	194
8.2	Wechselstromantriebe und Dimmer (Verändern des Spannungsmittelwertes)	195
8.3	Umwandeln von Wechselstrom in Gleichstrom (Gleichrichten)	195
8.4	Drehzahlgeregelte Gleichstromantriebe	196
8.5	Umwandeln von Drehstrom in Gleichstrom (Gleichrichten)	197
8.6	Drehstromantriebe (Umwandeln der 50-Hz-Netzspannung in eine Spannung variabler Frequenz)	198
	8.6.1 Drehzahlgeregelte Asynchron- und Synchronmotoren	199
	8.6.2 Bahnantriebe (Umwandeln der $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnnetzspannung in eine Spannung variabler Frequenz)	199
8.7	Inselwechselrichter (Umwandeln von Gleichstrom in Wechsel- bzw. Drehstrom)	200
8.8	Photovoltaik-Wechselrichter (Einspeisen von Gleichstrom in ein Wechsel- bzw. Drehstromnetz)	200
9	Datenblätter	201
	Literaturverzeichnis	243
	Stichwortverzeichnis	245

1 Einleitung

Mit den folgenden Kapiteln wird ohne allzu großen mathematischen Aufwand ein Einstieg in die Welt der Leistungselektronik ermöglicht.

Die Leistungselektronik erlaubt das Schalten, Steuern und Umwandeln großer elektrischer Leistung. Die Anwendungsgebiete sind vielfältig und nehmen ständig zu. Die einfachste Anwendung ist der Gleichrichter. Mit nur 1 Diode wird Wechselspannung in Gleichspannung umgewandelt, wenngleich auch die Spannungsqualität bei einer solch einfachen Schaltung zu wünschen übrig lässt. Mit nur wenig Bauteilen mehr lassen sich Netzgeräte bauen. Sie ermöglichen den Betrieb elektronischer Schaltungen am 230-V-Wechselstromnetz. Jeder Computer, jedes Audio- und Videogerät benötigt ein Netzteil zur Erzeugung der intern erforderlichen Gleichspannungen, wenn es am Wechselstromnetz betrieben werden soll. Wechselspannungsnetzteile sind daher sehr verbreitet.

Ein weiteres großes Anwendungsgebiet sind die elektrischen Antriebe. In den letzten Jahren wurden zunehmend drehzahlgeregelte Antriebe eingeführt. Lüfter und Pumpen lassen sich dadurch energiesparend betreiben.

Schienenfahrzeuge sind durch den Einsatz von Leistungselektronik energiesparender geworden und können ihre Bremsenergie ins Netz zurückspeisen. Der mit Hilfe von Sonnenenergie gewonnene Gleichstrom wird mit leistungselektronischen Schaltungen in 50-Hz-Strom umgewandelt und ins Netz eingespeist. Durch Windenergie betriebene Generatoren erzeugen einen drehzahlabhängigen Drehstrom der mit Leistungselektronik an das 50-Hz-Drehstromnetz angepasst werden muss. Auf die Vielzahl der Anwendungen geht Kapitel 8 detailliert ein.

Zunächst beschreibt Kapitel 2 die «Herzstücke» der Leistungselektronik, die **Leistungshalbleiter**. Neben den klassischen Bauelementen wie Dioden und Thyristoren werden moderne Halbleiterbauteile wie GTO, IGBT aber auch verhältnismäßig neue Entwicklungen wie der IGCT vorgestellt. Kapitel 2 erläutert zudem die Auswahl des richtigen Bauelementes in Abhängigkeit der jeweiligen Anwendung. Die wesentlichen Unterschiede im Bereich Sperrspannungsfestigkeit und Strombelastbarkeit werden beleuchtet. Kapitel 3 schildert Schutzbeschaltungen sowie Grundlagen der Wärmeleitung und Kühlung. Schutzbeschaltungen sollen die Halbleiterbauteile vor zu großen Belastungen während des Betriebs schützen. Die Belastungen treten in Form von Strom- bzw. Spannungsspitzen auf und müssen durch Kondensatoren und Induktivitäten begrenzt werden. Die zum Teil hohe Verlustwärme, die in den Halbleitern auftritt, muss über Kühlkörper abgeführt werden.

Kapitel 4 handelt von Halbleiterschaltern und -stellern. Diese einfachen Schaltungen ermöglichen das Schalten eines Wechselstroms. Durch Phasenanschnitt lässt sich die Leistung regulieren.

In den Schaltungen der Leistungselektronik wechselt der Strom zyklisch von einem Schaltungszweig zum anderen. Diesen Vorgang, die Kommutierung, erläutert Kapitel 5. Die dafür aufgewendete Energie nennt man Kommutierungsenergie. Die Kommutierung darf nicht zu schnell ablaufen, da sonst Bauelemente gefährdet sind oder die Schaltung nicht zuverlässig funktioniert.

Kapitel 6 beschreibt die Vielzahl von Stromrichterschaltungen. Dabei wird zwischen fremdgeführten und selbstgeführten Stromrichtern unterschieden. Fremdgeführte Stromrichter können lastgeführt oder netzgeführt sein. Die Klassifizierung erfolgt nach der Herkunft der Kommutierungsenergie. Netzgeführte Stromrichter beziehen ihre Energie, die zum Wechsel von einem Schaltungszweig zum anderen nötig ist, aus dem Netz. Fremdgeführte Stromrichter werden als lastgeführt bezeichnet, wenn die angeschlossene Last, z.B. ein Motor, die Energie zur Verfügung stellt. Selbstgeführte Stromrichter benützen Energiespeicher wie Kondensatoren als Energiequelle für die Kommutierung.

In Kapitel 7 werden Blindleistung und Oberschwingungen besprochen. Zunächst wird der Begriff der Blindleistung erläutert und dann der Bezug zur Leistungselektronik hergestellt. Die Entstehung der Oberschwingungen wird unter Verzicht auf die mathematische Herleitung nach FOURIER erläutert. Dabei wird auch auf das Thema der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) eingegangen.

In Kapitel 8 werden abschließend entsprechende Schaltungen mit zahlreichen Anwendungsbeispielen zusammengefasst.

2 Bauelemente der Leistungselektronik

2.1 Eigenschaften von Leistungshalbleiter-Bauelementen

Die Halbleiterbauelemente in der Leistungselektronik müssen folgende Eigenschaften aufweisen:

- hohe Strombelastbarkeit,
- hohe Spannungsfestigkeit,
- gute Leitfähigkeit im eingeschalteten Zustand,
- geringste Leitfähigkeit im gesperrten Zustand,
- schnelles Umschalten zwischen Sperr- und Durchlasszustand,
- geringe Ansteuerleistung,
- gute Gehäusewärmeleitwerte, um die unvermeidbaren Verluste abführen zu können,
- möglichst geringe Baugröße.

Diese Anforderungen widersprechen sich teilweise. Hier gilt es, den Schwerpunkt entsprechend der vorgesehenen Anwendung zu legen. Es wird zwischen schnellen Bauelementen und Hochstrombauelementen unterschieden. Die schnellen Bauelemente sind auf kurze Schaltzeiten spezialisiert und kommen bei Schaltungen mit hohen Taktfrequenzen zur Anwendung. Viele Stromrichter arbeiten heute bei 20 kHz. Bei solchen Frequenzen sind die typischen Summgeräusche, wie wir sie von Umrichtern mit Netzfrequenz kennen, nicht mehr hörbar. Werden nicht so kurze Schaltzeiten und kleine Sperrspannungen benötigt, können Hochstrom-Bauelemente eingesetzt werden, deren Bauweise darauf ausgerichtet ist, extrem hohe Ströme bis zu 13 000 A zu schalten. Hohe Sperrspannungen von bis zu 8500 V erfordern eine Reduzierung der maximal möglichen Stromstärke. Im Anhang sind Datenblätter von Dioden, Thyristoren und IGBT eingefügt. Es wird jeweils ein Hochstrom- und ein Hochspannungstyp beschrieben.

Hochstromfähigkeit eines Bauelementes geht auf Kosten des Sperrvermögens und der Schaltzeit.

Wegen der guten Ladungsträgerbeweglichkeit und der hohen Temperaturfestigkeit kommt bei der Herstellung fast ausschließlich Silizium als Werkstoff zum Einsatz. Die geforderte Stromstärke bestimmt die Fläche der Siliziumscheibe.

In modernen Leistungshalbleiter-Bauelementen herrschen Stromdichten bis zu 100 A/cm².

Die entstehende Verlustwärme wird über die Siliziumfläche abgegeben. Die Form des Halbleiterbauelementes muss dem Laststrom die Möglichkeit geben, sich großflächig zu verteilen. Beim Einschalten fließt der Strom zunächst nur in einem kleinen Bereich und breitet sich dann über das ganze Kristall aus. Wichtig für diesen Vorgang ist ein besonders reines Kristall. Nur dann breitet sich der Strom gleichmäßig aus, andernfalls kann es zu lokalen Temperaturerhöhungen kommen, die das Bauelement zerstören.

Die benötigte Spannungsfestigkeit im Sperrzustand gibt die erforderliche Scheibendicke bei der Herstellung vor.

1 μm Werkstoffdicke ergibt ca. 5...10 V Sperrspannungsfestigkeit.

Die elektrischen Eigenschaften von Halbleitern sind temperaturabhängig. Ihre Kennlinien beziehen sich immer nur auf eine Temperatur, häufig auf die maximale zulässige Sperrschichttemperatur $\vartheta_{vj \text{ max}}$. Hierauf muss bei der Auswahl der Halbleiterbauelemente besonders geachtet werden, da die Bauteile zum Teil bei sehr hohen Temperaturen ϑ (180 °C...200 °C) arbeiten.

Die Gehäuse müssen aufgrund der geforderten guten Wärmeabfuhr großflächig und möglichst aus Metall gebaut werden. Die Verbindung zum Kühlkörper soll einen guten Wärmeübergang ermöglichen. Vorteilhaft ist es, wenn das Bauteil 2 Flächen zur Wärmeabfuhr besitzt und zwischen 2 Kühlkörpern montiert werden kann. Die einzelnen Bauformen werden in Abschnitt 3.4.4 vorgestellt.

Dioden und Thyristoren sind die Klassiker der Leistungselektronik. Unter den abschaltbaren Bauelementen sind der abschaltbare Thyristor (GTO) und der bipolare Transistor mittlerweile die altgedienten Leistungshalbleiter. Der MOSFET ist ebenfalls stark verbreitet. Neuere Bauelemente wie der IGBT sind dabei, die altgedienten Bauteile zu verdrängen. Sie werden daher im Folgenden besonders ausführlich beschrieben. Der verhältnismäßig junge IGCT ist im Begriff, den GTO abzulösen.

2.2 Leistungsdioden

Die grundsätzliche Funktion von Dioden (pn-Übergang, Kennlinie) wurde schon in Band Elektronik 2 «Bauelemente» [1] dieser Reihe erläutert. Eine Diode ist ein unidirektionales Bauelement, d.h., sie leitet den Strom nur in einer Richtung. In der anderen Richtung sperrt die Diode.

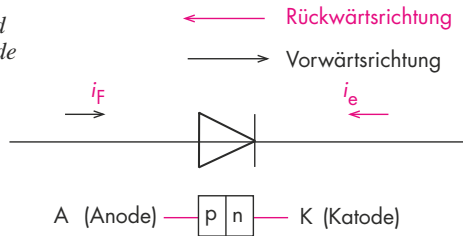
Eine Leistungsdiode leitet den Strom in nur einer Richtung, der Vorwärtsrichtung.

Im Folgenden wird auf die besonderen Eigenschaften von Leistungsdioden eingegangen. Leistungsdioden müssen eine erhöhte Wärmeleistung an die Umgebung ableiten, da sie erheblich höhere Ströme als Kleinsignaldioden führen. Die elektrischen Eigenschaften von

Halbleitern sind temperaturabhängig. Hierauf muss bei der Auswahl der Leistungsdiode und bei der Schaltungsdimensionierung geachtet werden. Zu beachten ist, dass sich die Kennlinien bei zunehmender Sperrschichttemperatur verändern. Bei der für Siliziumdioden maximal zulässigen Temperatur von 180 °C ergeben sich Abweichungen gegenüber einem Betrieb bei 25 °C von ca. 10 %. So beträgt z.B. die Durchlassspannung einer typischen Hochstrom-Leistungsdiode bei 25 °C und 11 000 A ca. 1,13 V, bei 180 °C jedoch nur 1 V.

Bild 2.1 zeigt das Schaltbild einer Leistungsdiode und den prinzipiellen Kristallaufbau. Im Anhang befinden sich z.B. 2 Datenblätter. Die Datenblätter beschreiben das Bauelement und geben die für Schaltungsentwurf und Betrieb wesentlichen Daten an. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

Bild 2.1 Schaltzeichen und Halbleiteraufbau einer Diode



Bei Dioden wird zwischen Vorwärts- und Rückwärtsbelastungen unterschieden (s. Bild 2.1). Fließt der Strom von der Anode zur Katode (in Pfeilrichtung des Schaltbildes), so fließt er definitionsgemäß in Vorwärtsrichtung und heißt **Durchlassstrom** i_F . Die Spannung die in Vorwärtsrichtung über der Diode abfällt heißt **Durchlassspannung** U_F . Ströme, die von der Katode zur Anode fließen (Sperrströme), werden als **Rückwärts-Sperrströme** i_e bezeichnet. Die Spannung die in Rückwärtsrichtung an der Diode abfällt heißt **Rückwärts-Sperrspannung** U_R .

Am pn-Übergang einer Leistungsdiode fällt in Durchlassrichtung eine Spannung von ca. 1...2 V ab. Diese Durchlassspannung U_F ist höher als bei herkömmlichen Kleinsignaldioden (typisch sind dort 0,6 V).

Ca. 1...2 V beträgt die Durchlassspannung einer Leistungsdiode.

Die Kennlinie ist auch weniger steil als die von Kleinsignaldioden, so dass die Durchlassspannung U_F bei Anstieg des Durchlassstroms I_F nicht unwesentlich zunimmt. Die Durchlassspannung U_F und der Durchlassstrom verursachen im Halbleiterkristall Wärmeverluste, die über das Gehäuse abgeführt müssen.

$$P_V = U_F \cdot I_F$$

Das ist nur mit einer großflächigen Bauweise und über gute Kühlkörper möglich. Leistungsdioden können Ströme bis 13 000 A führen. Dabei entstehen Durchlassverluste von bis zu 26 000 W. Das ist die Wärmeleistung von 10 (!) konventionellen Herdplatten. Bild 2.2 zeigt

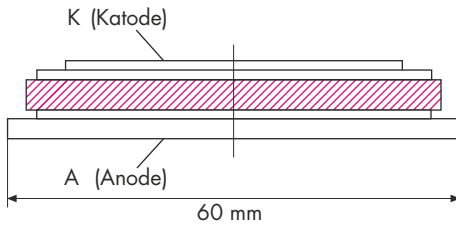


Bild 2.2 Gehäuse einer Hochstromleistungsdiode

eine typische Bauform (Pillenform) einer Leistungsdiode. Die Pillenform erlaubt dem Laststrom, sich auf eine große Fläche zu verteilen (s. Abschnitt 2.1).

Durch die Pillenform wird ein großflächiger Kontakt zum Kühlkörper ermöglicht.

Im ausgeschalteten Zustand liegt die Sperrspannung U_R an der Diode. Die Diode lässt nur den Sperrstrom i_R fließen. Er liegt bei der im Anhang beschriebenen 13 000-A-Leistungsdiode bei ca. 100 mA.

Spannungen, die einen Strom in Rückwärtsrichtung treiben, heißen Rückwärtsspannungen. 2 definierte Werte der Sperrspannung sind wichtig: Die **periodische Rückwärts-Sperrspannung** U_{RRM} gibt an, welche Sperrspannungen periodisch wiederkehrend maximal auftreten dürfen. Bei der Auswahl von Dioden wählt man einen Sicherheitsfaktor von 1,5...2,5, je nach dem, wie ungewiss die möglichen Überspannungen sind. Werden hohe Überspannungen erwartet, empfiehlt sich ein Überspannungsschutz mit spannungsabhängigen Widerständen (Varistoren). Die **Rückwärts-Stoßsperrspannung** U_{RSM} gibt an, welche Sperrspannung bei 25 °C maximal kurzzeitig auftreten darf. Wird sie überschritten, wird die Diode meist zerstört.

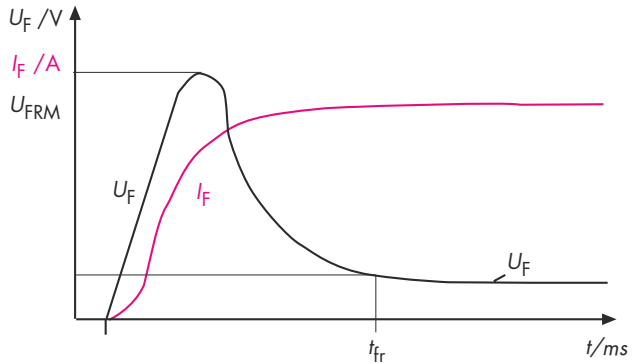
2.2.1 Einschalten einer Leistungsdiode

Durch Anlegen einer Spannung, die größer als die Durchlassspannung U_F ist, wird die Diode leitend. Die großflächigen Kristallstrukturen reagieren nicht unmittelbar auf Veränderungen der von außen anliegenden Spannung. Daher vergeht zunächst eine Trägheitszeit, bis die Diode durchzusteuern beginnt. Das ist bei der Dimensionierung schnellschaltender, hochfrequenter Schaltungen zu beachten.

Das Einschalten einer Leistungsdiode beginnt mit einer Verzögerung.

Beim Einschalten einer Diode, also beim Umschalten vom sperrenden in den leitenden Zustand, steigt die Durchlassspannung U_F linear an, erreicht ein Maximum, die **Durchlassverzögerungsspannung** U_{FRM} , und fällt dann auf ihren stationären Wert (Bild 2.3a).

Bild 2.3a Einschalten einer Leistungsdiode

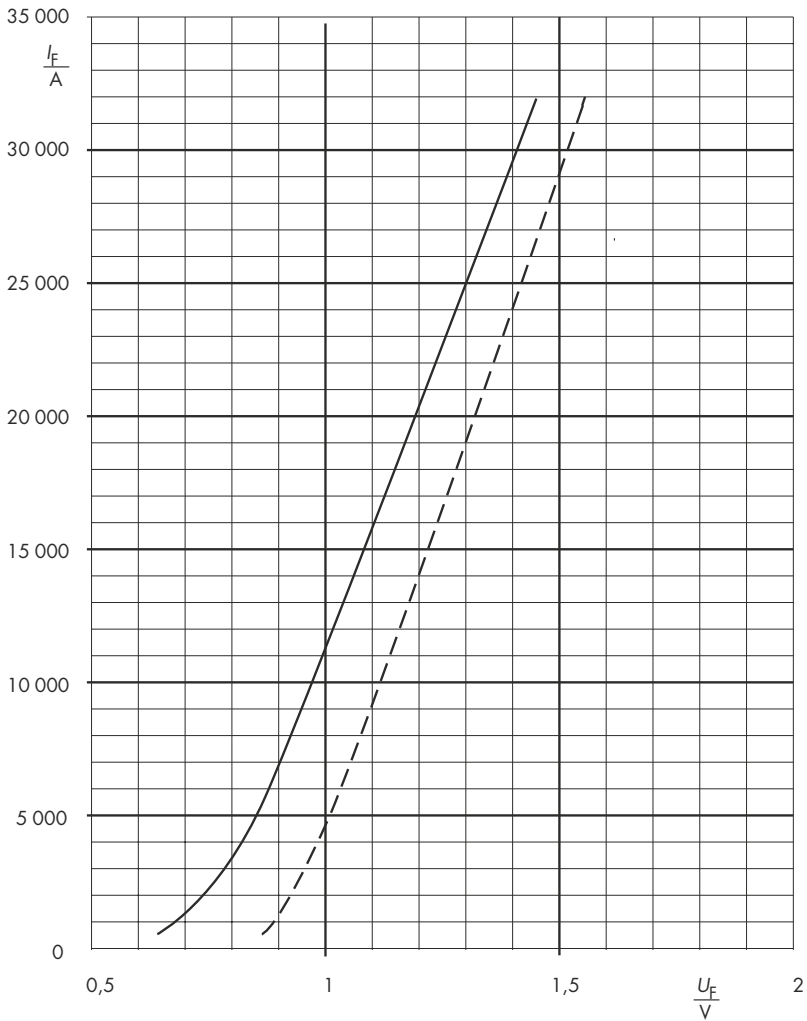


Da das Produkt aus Durchlassstrom I_F und Durchlassspannung U_F die **Durchlassverlustleistung** P_F ergibt, verursacht dieses Maximum der Durchlassverzögerungsspannung U_{FRM} gegenüber dem stationären Betrieb erhöhte Verluste. Diese Verluste werden Einschaltverluste genannt. Zu Beachten ist, dass mit zunehmender Schaltfrequenz, also zunehmenden Schaltvorgängen/Sekunde, die Einschaltverluste zunehmen und damit die Wärmelast steigt, die über das Gehäuse und den Kühlkörper abgegeben werden muss. Die Zeit, die vergeht, bis die Diode vollständig leitet, heißt **Durchlassverzögerungszeit** t_{fr} .

Mit steigender Schaltfrequenz steigt die Einschaltverlustleistung.

Nach dem Einschalten führt die Diode den Durchlassstrom I_F . Die Durchlasskennlinie weist jedem Wert des Durchlassstroms I_F einen Wert der Durchlassspannung U_F zu. Bild 2.3b zeigt die Durchlasskennlinie der im Anhang näher beschriebenen 13 000-A-Leistungsdiode. Es ist eine Kennlinie für die Umgebungstemperatur (25 °C) und eine Kennlinie für den Betrieb bei **höchst zulässiger Sperrschichttemperatur** $T_{vj \max}$ (180 °C) dargestellt. Nähert man die Kennlinie für 180 °C an eine Gerade, so schneidet diese Ersatzgerade die Spannungsachse in einem Punkt. Dieser Punkt definiert die Schleusenspannung U_{TO} . In Bild 2.3a liegt sie bei 0,7 V. Die Steigung der Ersatzgeraden entspricht einem Widerstandswert ($R = U/I$). Dieser **Ersatzwiderstand** r_T errechnet sich in unserem Beispiel zu 0,028 mΩ. Die Ersatzgerade ist im Dauerstrombereich (hier zwischen 10 000...30 000 A) eine gute Näherung an die verhältnismäßig kompliziert zu berechnende Durchlasskennlinie.

Bei einem Strom von 20 000 A erhält man 2 Arbeitspunkte. Bei 25 °C fallen an der Diode 1,32 V Durchlassspannung ab. Das ergibt Durchlassverluste P_F von $P_F = 1,32 \text{ V} \cdot 20\,000 \text{ A} = 26\,400 \text{ W}$. Bei 180 °C fallen nur 1,2 V ab. Deshalb entstehen nur 24 000 W Durchlassverluste. Im Folgenden werden die verschiedenen, typischen Stromdefinitionen erläutert. Im Datenblatt der im Anhang beschriebenen Hochstrom-Diode steht ein **Dauergrenzstrom** I_{FAVM} von 8470 A. Die Buchstaben «AV» stehen für das englische Wort «average» für Mittelwert. Dieser Strom ist ein arithmetischer Mittelwert des höchsten dauernd zulässigen Durchlassstroms. Weiterhin steht im Datenblatt ein **Durchlassstrom-Grenzeffektivwert** I_{FRMSM} von 13 300 A. Er ist ein quadratischer Mittelwert des Durchlassstroms. Er ist der höchste Mittelwert, der



————— $T_{vj} = 180^\circ\text{C}$
 max
 - - - - - $T_{vj} = 25^\circ\text{C}$

Bild 2.3b Durchlasskennlinie einer Leistungsdiode

unter Berücksichtigung der thermischen und elektrischen Belastbarkeit der Diode fließen darf. Der im Arbeitspunkt fließende Strom von 20 000 A darf also nicht dauerhaft fließen. Er darf so lange fließen, bis der maximal zulässige Wert für das **Grenzlastintegral i^2t** überschritten ist. Dieses beschreibt die maximal zulässigen Verluste. Das Grenzlastintegral trägt dem thermischen Verhalten der Diode Rechnung. Kurzzeitige hohe Ströme führen noch nicht zu langfris-

tigen Erwärmungen. Es hängt davon ab, wie lange ein Strom mit welcher Stromstärke die Diode belastet. Mathematisch entspricht das der Bildung eines Zeitintegrals über dem Strom.

Da negative Ströme auch zu den gleichen Verlusten führen wie positive wird über das Quadrat des Laststroms integriert.

Ansonsten würden sich negative und positive Ströme aufheben. Wird der Wert des Grenzlastintegrals i^2t im Betrieb überschritten, kann die Diode zerstört werden.

Um die Diode vor Zerstörung zu schützen, wird der Durchlassstrom häufig überwacht und bei Überschreiten eines vom Hersteller vorgegebenen Wertes abgeschaltet. Dieser Wert heißt **Grenzstrom** $I_{F(OV)M}$. Auf diesen Wert werden die Schutzeinrichtungen i.A. eingestellt.

Der Grenzstrom $I_{F(OV)M}$ darf sehr kurzzeitig überschritten werden. Der kurzzeitig maximal zulässige Stromstoß wird durch den **Stoßstromgrenzwert** I_{FSM} festgelegt. Bei der betrachteten Leistungsdiode liegt er bei 103 kA (bei 25 °C). Wird dieser Strom überschritten, droht der Diode Zerstörungsgefahr.

2.2.2 Ausschalten einer Leistungsdiode

Beim Anlegen einer Sperrspannung fällt der Strom, der bisher als Durchlassstrom i_F floss, steil linear ab, erreicht nach dem Nulldurchgang ein vorübergehendes Maximum i_{RM} , das als **Rückstromspitze** bezeichnet wird, und fällt dann auf den stationären Wert des Rückwärts-Sperrstroms i_e ab (Bild 2.4).

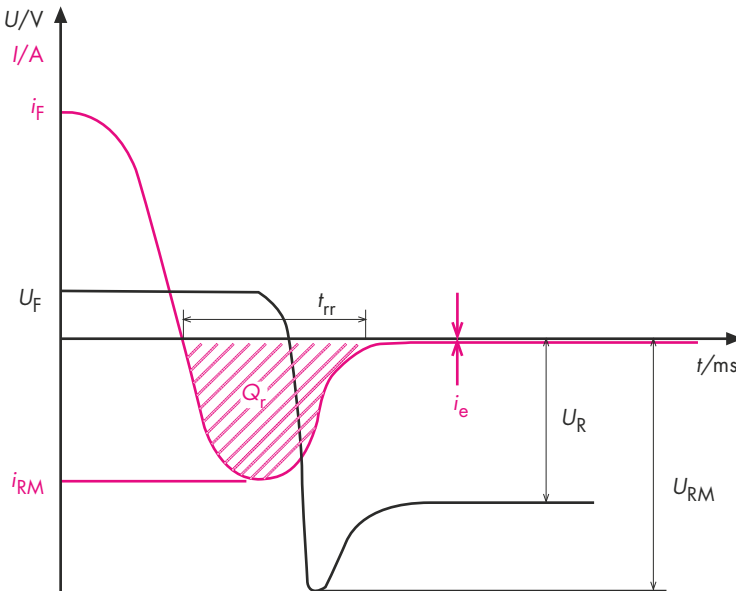


Bild 2.4 Ausschalten einer Leistungsdiode

Während des Ausschaltens fließt der Strom kurz in Rückwärtsrichtung weiter.

Die in Bild 2.4 schraffierte Fläche im i/t -Diagramm steht für eine Ladung. Sie fließt nach dem Nulldurchgang des Stroms in Rückwärtsrichtung von der Diode ab, bis der Sperrstrom seinen stationären Wert erreicht. Die Ladung ist ein Maß für die Verzögerung des Sperrvorganges und heißt daher **Sperrverzögerungsladung** Q_r . Die Zeit, die vergeht, bis diese Sperrverzögerungsladung Q_r abgeflossen ist wird Sperrverzögerungszeit t_{rr} genannt.

Während des Ausschaltens wird die Sperrverzögerungsladung abgebaut.

Wie beim Einschalten erzeugt der steile Anstieg der Sperrspannung auf das kurzzeitige Maximum U_{RM} im Zusammenhang mit dem Rückstrom eine Ausschaltverlustleistung. Auch hier sei noch einmal auf die Zunahme der Verluste bei Erhöhung der Schaltfrequenz hingewiesen.

Mit steigender Schaltfrequenz steigen die Ausschaltverluste.

2.2.3 Verlustleistungen einer Leistungsdiode

In den vorigen Abschnitten wurde bereits teilweise auf die entstehenden Verluste eingegangen. Bei einer Diode entstehen Durchlass-, Sperr- und Schaltverluste.

Die **Durchlassverlustleistung** P_F ergibt sich aus dem arithmetischen Mittelwert des Durchlassstroms I_{FAV} , dem Effektivwert des Durchlassstroms I_{FRMS} , der Durchlassspannung U_F und dem Widerstandswert r_T .

$$P_F = I_{FAV} \cdot U_F + I_{FRMS}^2 \cdot r_T$$

Die **Sperrverluste** P_R ergeben sich aus dem Sperrstrom i_c und der Sperrspannung U_r .

Die **Einschaltverluste** P_{FT} und die **Ausschaltverluste** P_{RQ} ergeben zusammen die Schaltverlustleistung.

Alle Verluste addieren sich zur **Gesamtverlustleistung** P_{tot} , die das Bauelement als Wärme abführen muss.

Die Halbleiterindustrie ist bemüht, Dioden zu entwickeln, bei denen die Vorgänge weniger steil ablaufen und so die Verluste und Überspannungen geringer werden.

Eine weitere immer wichtiger werdende Forderung ist eine schnelle Schaltgeschwindigkeit der Dioden. Heute arbeiten die meisten Stromversorgungen mit vergleichsweise hohen Frequenzen, um die Baugröße der Transformatoren zu reduzieren.

Je höher die Schaltfrequenz ist, desto kleiner und leichter kann der Transformator gebaut werden.

Der Grund hierfür liegt im Induktionsgesetz, woraus ersichtlich wird, dass die induzierte Spannung in einer Spule linear mit der Frequenz zunimmt. Hohe Schaltfrequenzen fordern von Leistungsdioden einen schnellen Wechsel vom leitenden in den sperrenden Zustand und umgekehrt. Maßgeblich ist hierfür die Sperrverzögerungszeit t_{rr} . Bei einer heute realisierbaren Frequenz f von 250 kHz beträgt die Periodendauer T nur noch $4 \mu\text{s}$ ($T = 1/f$). Auch die später erläuterten Stromrichter arbeiten mit Frequenzen von ca. 8...20 kHz. Es bestehen also unter anderem folgende Anforderungen an Leistungsdioden:

- ❑ niedrige Durchlassspannung U_F , um die Verluste klein zu halten,
- ❑ eine kurze Sperrverzögerungszeit t_{rr} für schnelle Schaltzeiten.

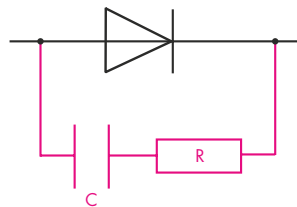
Bei der Auswahl einer Diode muss also überlegt werden, ob die Verluste oder die Schaltzeiten im Vordergrund stehen. Die Durchlassverzögerungszeit t_{fr} , die Sperrverzögerungsladung Q_r und Sperrverzögerungszeit t_{rr} begrenzen die Einsetzbarkeit einer Leistungsdiode bei hohen Frequenzen.

Die Gesamtverluste P_{tot} sind i.A. so hoch, dass die Wärmeabfuhr durch Kühlkörper verbessert werden muss. In den Datenblättern werden die Wärmewiderstände der einzelnen Wärmeübergänge angegeben. Auf die genauen Verhältnisse bei der Berechnung einer ausreichenden Kühlung geht Kapitel 3 ein.

2.2.4 Schutzbeschaltung einer Leistungsdiode

Die steilen Stromabfälle erzeugen an den Induktivitäten des Stromkreises hohe Spannungsabfälle. Das Parallelschalten einer Widerstands-Kondensator-Kombination (RC-Schutzbeschaltung; Bild 2.5) schützt die Diode vor Überspannungen.

Bild 2.5 RC-Schutzbeschaltung einer Leistungsdiode



Im Folgenden wird für einen praktischen Anwendungsfall die richtige Diode ausgewählt. Für eine Schaltanlage sollen Sperrdioden dimensioniert werden. Die Nennspannung der Anlage ist 1200 V, der Nennstrom beträgt 3 A. Teilweise treten Spannungsspitzen bis zu 2000 V und Überlastströme bis 5 A auf.

Als Rückwärts-Spitzensperrspannung U_{RRM} der Diode sollte deshalb 3000 V gewählt werden. Darin ist ein Sicherheitsfaktor von 1,5 enthalten. Den Dauergrenzstrom I_{FAVM} der Diode berechnet man über die auftretenden Überlastströme zu 5 A.

2.3 Thyristoren

Der Thyristor besitzt 2 stabile Zustände, einen hochohmigen und einen niederohmigen. Die Umschaltung erfolgt über den Steueranschluss (Gate).

Ein Thyristor ist ein einschaltbares, unidirektionales Bauelement.

Der Thyristor ist ein vierschichtiges Halbleiterbauelement. Die Leitfähigkeit der Schichten wechselt sich ab (pnpn). Wie bei der Diode wird der Anschluss an der p-Zone **Anode** genannt, der an der n-Zone **Katode**.

Es soll zunächst der «normale» katodenseitig gesteuerte, rückwärts sperrende Thyristor beschrieben werden. Später werden die anderen, seltener verwendeten Bauweisen behandelt.

In der Leistungselektronik wird zudem zwischen dem N-Typ für Anwendungen bei Netzfrequenz und dem F-Typ für Hochfrequenzanwendungen unterschieden.

Bild 2.6 zeigt den Kristallaufbau, Bild 2.7 das Schaltzeichen und die Bilder 2.8 zeigen 3 typische Bauformen von Hochstrom-Thyristoren. Im Anhang ist das Datenblatt eines Thyristors, der bis zu 10 200 A schalten kann, eingefügt. Auch das Datenblatt eines Thyristors mit einer Spannungsfestigkeit bis zu 8000 V liegt bei.

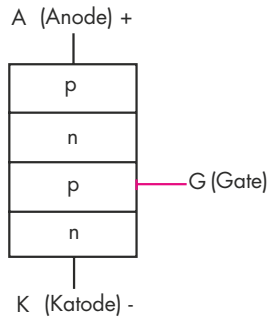


Bild 2.6 Katodenseitig gesteuerter Thyristor

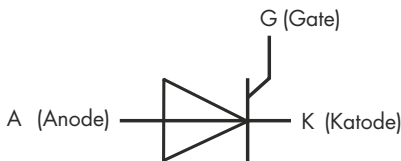


Bild 2.7 Schaltzeichen des katodenseitig gesteuerten Thyristors

Bild 2.8a Gehäuse eines Hochstromthyristors

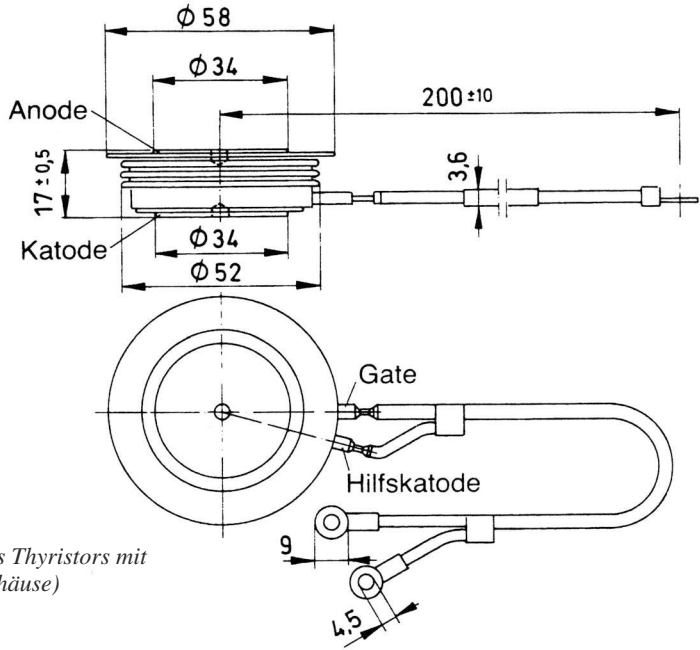
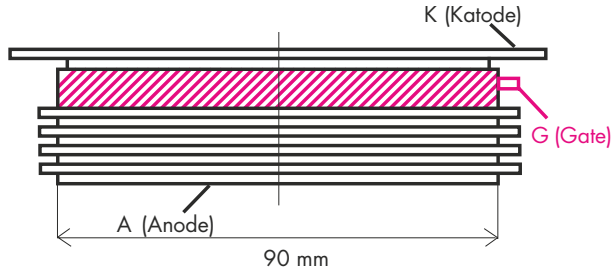


Bild 2.8b Gehäuse eines Thyristors mit Anschlüssen (Scheibengehäuse)

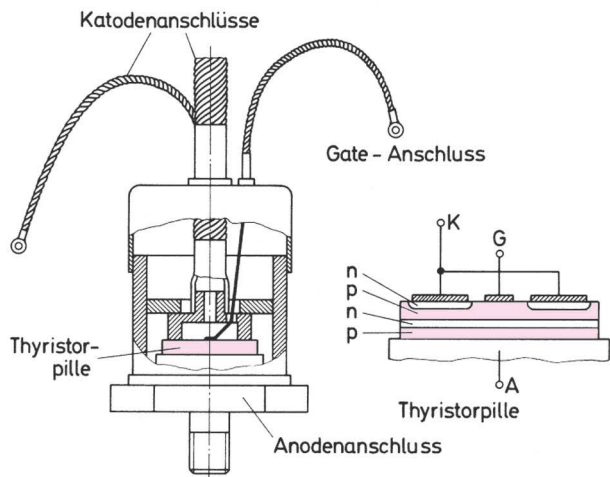


Bild 2.8c Schnitt durch ein Thyristorgehäuse

Der 4-schichtige Aufbau enthält insgesamt 3 Diodenstrecken (D1, D2 und D3). Jeder pn-Übergang bildet eine Diodenstrecke (Bild 2.9). Beim katodenseitig gesteuerten Thyristor befindet sich an der katodenseitigen p-Zone der Steueranschluss (Gate). Die äußere p- bzw. Anodenzone erwärmt sich durch den Durchlassstrom im Betrieb sehr stark. Sie muss daher gut gekühlt werden und ist zu diesem Zweck meist großflächig mit dem Gehäuse verbunden.

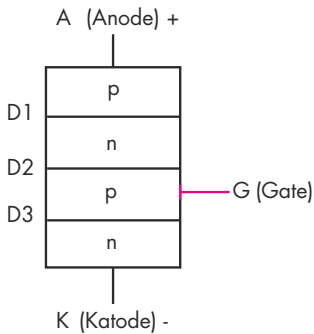


Bild 2.9 Diodenstrecken eines Thyristors

Wie bei der Diode werden 2 Richtungen unterschieden. Die Vorwärtsrichtung beschreibt Spannungen und Ströme, deren Zählpfeile von der Anode zur Katode zeigen, also in Richtung des Pfeils im Schaltzeichen. Die Rückwärtsrichtung beschreibt die umgekehrte Richtung.

2.3.1 Betrieb an Sperrspannung

Legt man an den Thyristor eine Spannung, sodass die Anode negatives Potential gegenüber der Katode bekommt, sperren die beiden Diodenstrecken D1 und D3. D2 ist in Durchlassrichtung gepolt. Der Thyristor wird in Rückwärtsrichtung betrieben. Es fließt ein kleiner **Rückwärts-Sperrstrom i_R** .

In Rückwärtsrichtung fließt nur ein kleiner Sperrstrom durch den Thyristor.

Die Spannung, die am Thyristor abfällt, heißt **Rückwärts-Sperrspannung U_R** . In dieser Betriebsweise werden zudem wie bei der Diode die **Periodische Rückwärts-Sperrspannung U_{RRM}** und die **Rückwärts-Stoßspitzenspannung U_{RSM}** als maximal zulässige Werte vom Hersteller vorgegeben.

Besitzt die Anode positives Potential gegen Katode, ist D2 gesperrt, D1 und D3 sind jetzt in Durchlassrichtung gepolt. Der Thyristor wird in Vorwärtsrichtung betrieben. Jetzt fällt die **Vorwärts-Sperrspannung U_D** ab. Es fließt ein kleiner **Vorwärts-Sperrstrom I_D** .

In Vorwärtsrichtung fließt bis zum Zünden nur ein kleiner Sperrstrom durch den Thyristor

Analog zum Betrieb in Rückwärtsrichtung sind die beiden Spannungen **periodische Vorwärts-Sperrspannung** U_{DRM} und die **Vorwärts-Stoßspitzenspannung** U_{DSM} definiert. Wie bereits bei den Dioden beschrieben, sind bei der Auswahl von Bauelementen Sicherheitsfaktoren zwischen 1,5...2,5 einzuhalten. Real auftretende Spannungen sind mit diesen Faktoren zu multiplizieren. Die errechneten Spannungen müssen unter den in den Datenblättern angegebenen Grenzwerten liegen.

Das Sperrvermögen heutiger Thyristoren ist sehr gut. Es ist in beiden Betriebsrichtungen in etwa gleich. Selbst ein Anlegen von mehr als 2200 V bewirkt nur geringe Sperrströme von einigen 100 mA. In Verbindung mit den hohen Sperrspannungen (bis zu 8000 V) entstehen aber trotzdem erhebliche Verluste.

Wird ein bestimmter Wert der Vorwärts-Sperrspannung U_{D} überschritten, schaltet der Thyristor, ohne dass ein Steuerstrom über den Steueranschluss fließt, vom hochohmigen in den niederohmigen Betriebszustand.

Ein Überschreiten der Vorwärts-Sperrspannung führt zum ungewollten Zünden des Thyristors.

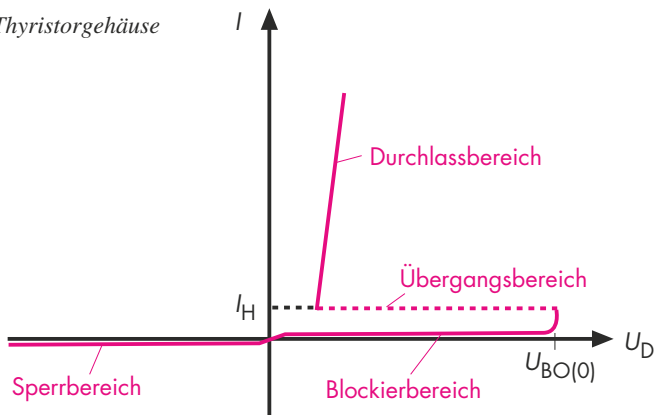
Allgemein wird ein solches unerwünschtes Durchsteuern als **Kippen** oder **Überkopfzünden** bezeichnet. Die Spannung, bei der dies geschieht, wird **Nullkippspannung** $U_{\text{BO}(0)}$ genannt. «0» deutet auf den Steuerstrom $i_{\text{G}} = 0$ hin. Der Thyristor wird dadurch nicht zerstört, allerdings ist das nicht der betriebsmäßig gewünschte Zündvorgang.

Wie wir später sehen werden, ist die Nullkippspannung $U_{\text{BO}(0)}$ temperaturabhängig.

Wird die maximal zulässige Rückwärts-Sperrspannung U_{R} überschritten, führt dies zur Zerstörung des Thyristors.

Bild 2.10 stellt die Kennlinien eines Thyristors dar: 3 Kennlinien werden unterschieden, die Vorwärts-Sperrkennlinie, die Durchlasskennlinie, und die Rückwärts-Sperrkennlinie.

Bild 2.10 Schnitt durch ein Thyristorgehäuse



Die Durchlasskennlinie gleicht einer Diodenkennlinie – mit dem Unterschied, dass 3 Diodenkennlinien in Reihe geschaltet sind und damit die Durchlassspannung höher ($\sim 2\text{ V}$) ist. Damit sind auch die **Durchlassverluste** P_T höher.

Die Vorwärts- und Rückwärts-Sperrkennlinien sind stark von der Bauelementtemperatur abhängig (Bild 2.11a und b). Mit zunehmender Temperatur steigt der jeweilige Sperrstrom i_D bzw. i_R an. Daher nehmen die Sperrverluste mit zunehmender Temperatur ebenfalls zu. Bild 2.12 zeigt die Temperaturdrift der Nullkippspannung $U_{BO(0)}$. Beträgt die Kristalltemperatur mehr als 130 °C fällt die Kippspannung stark ab. Bei 160 °C kippt der Thyristor im Beispiel in Bild 2.12 schon bei 1000 V .

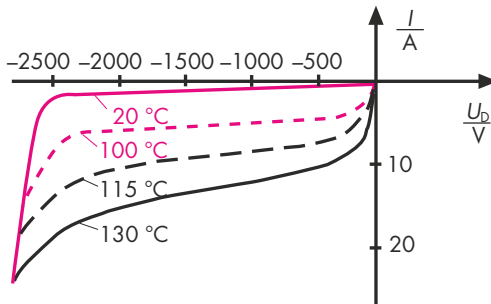


Bild 2.11a Temperaturabhängigkeit der Rückwärtssperrkennlinie

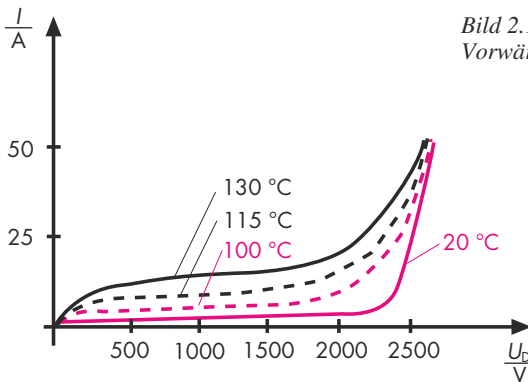
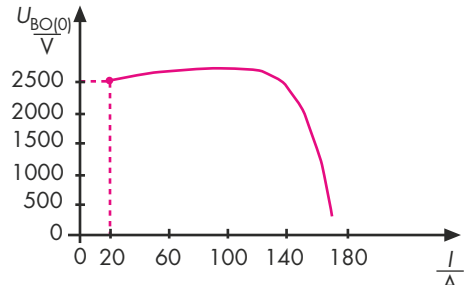


Bild 2.11b Temperaturabhängigkeit der Vorwärtssperrkennlinie

Die Sperrkennlinien eines Thyristors sind temperaturabhängig.

Der pn-Übergang der Diodenstrecke D2 stellt im gesperrten Zustand eine Kapazität dar. Für Kapazitäten gilt $I = C \cdot \Delta U / \Delta t$. Ein steiler Spannungsanstieg der Vorwärts-Sperrspannung U_D kann also einen kapazitiven Strom erzeugen, der wie ein Zündstrom wirkt und den Thyristor durchsteuert. Dabei kann der Thyristor zerstört werden. Die Vorwärts-Sperrspannung darf daher die **kritische Spannungsteilheit** $(\Delta U / \Delta t)_{cr}$ nicht überschreiten.

Bild 2.12 Temperaturdrift der Nullkippspannung $U_{BO(0)}$



2.3.2 Zünden eines Thyristors

Das betriebsmäßige Durchsteuern des Thyristors erfolgt am Steueranschluss G. Die pnpn-

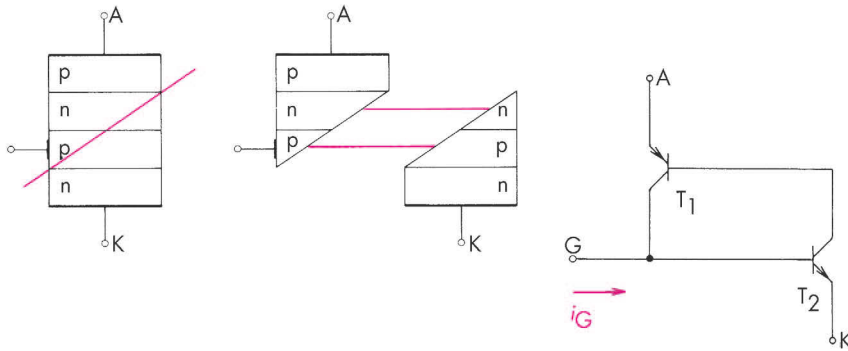


Bild 2.13
Aufteilung des Thyristorkristalls in 2 Transistorstrecken und Ersatzschaltung des Thyristors

Struktur kann als Zusammenschaltung von 2 Transistoren dargestellt werden (Bild 2.13). Fließt bei positiver Anodenspannung ein **Steuerstrom** i_G in den Steueranschluss, der größer ist als der im Datenblatt angegebene **Zündstrom** i_{GT} (T: wie triggern = zünden) steuert T_2 durch, leitet ein gegenseitiges Aufsteuern von T_1 und T_2 ein und der Thyristor zündet. Der Zündstromimpuls am Gate muss eine definierte **Stromsteilheit** $\Delta i_G / \Delta t$ haben und darf die vorgeschriebene **Steuerimpulsdauer** t_G nicht überschreiten.

Das betriebsmäßige Zünden eines Thyristors erfolgt durch einen Steuerstrom.

Um ein ungewolltes Zünden eines Thyristors zu vermeiden, wird der Wert des **nicht zündenden Steuerstroms** i_{GD} angegeben. Alle Steuerströme i_G unterhalb dieses Wertes führen bei keinem Thyristor des angegebenen Typs zum Zünden.

Zum sicheren Zünden muss auch die **Steuerspannung** U_G , die zwischen Gate und Katode anliegt den Wert der **Zündspannung** U_{GT} erreichen. Liegt die Steuerspannung U_G unterhalb der **nicht zündenden Steuerspannung** U_{GD} , zündet kein Thyristor des angegebenen Typs.

Der Zündstrom i_{GT} und die Zündspannung U_{GT} sind von der Diodenkennlinie Gate-Katode abhängig. Diese Kennlinie verschiebt sich in Abhängigkeit von der Temperatur und von Exemplarstreuungen. Es ergibt sich ein Streuband für den Temperaturbereich des Thyristors in dem die Werte für ein sicheres Zünden des Thyristors abgelesen werden können (Bild 2.14). Es lassen sich 3 Bereiche definieren: Bereich des Nichtzündens (I), Bereich eines möglichen Zündens (II) und Bereich der sicheren Zündung (III).

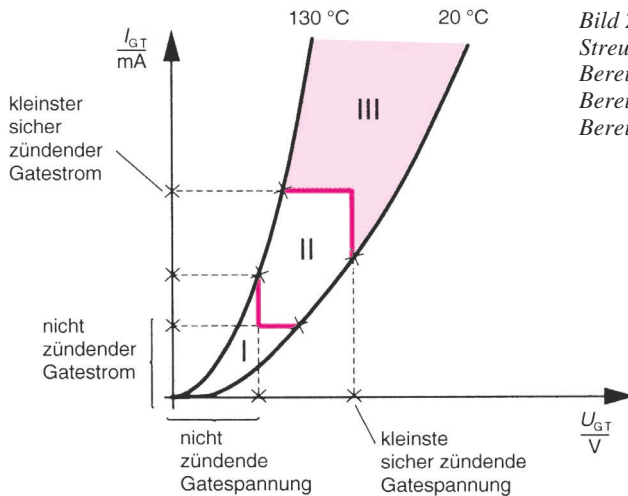


Bild 2.14
Streuband der Eingangskennlinien
Bereich I Nichtzündung
Bereich II Zündung möglich
Bereich III sichere Zündung

Für einen sicheren Betrieb müssen Zündimpulse im Bereich III liegen, Störimpulse müssen im Bereich I liegen, damit der Thyristor nicht ungewollt zündet.

Damit der Thyristor durchsteuert, muss der **Einraststrom** i_T als Durchlassstrom fließen, wenn der Steuerimpuls abklingt. Er ist abhängig von den Steuerimpulsgrößen und von der Sperrschichttemperatur.

An einem durchgesteuerten Thyristor fällt die Durchlassspannung U_T ab. Der leitende Thyristor besitzt einen Widerstandswert von wenigen m Ω .

Der Durchlassstrom i_T muss daher unbedingt durch einen Lastwiderstand begrenzt werden (Bild 2.15).

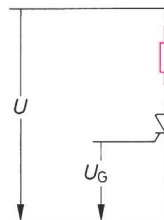


Bild 2.15 Strombegrenzung durch einen Lastwiderstand R

Wie bei der Diode kann auch die Durchlasskennlinie durch eine **Ersatzgerade** angenähert werden. Die Ersatzgerade nähert die Kennlinie an und liefert einen konstanten Widerstandswert, den **Ersatzwiderstand** r_T . Der Ersatzwiderstand dient zur vereinfachten Berechnung der Durchlassverluste.

Der Zündstrom i_{GT} ist auch von der Vorwärts-Sperrspannung U_D abhängig. In der Kippkennlinie eines Thyristors (Bild 2.16) lässt sich der Zündstrom i_{GT} ablesen. Die Kippkennlinie kann in ein Strom-Spannungs-Kennlinienfeld überführt werden. Hieraus lassen sich die Mindeststeuerströme ablesen (Bild 2.17).

Bild 2.16
Kippkennlinie eines Thyristors

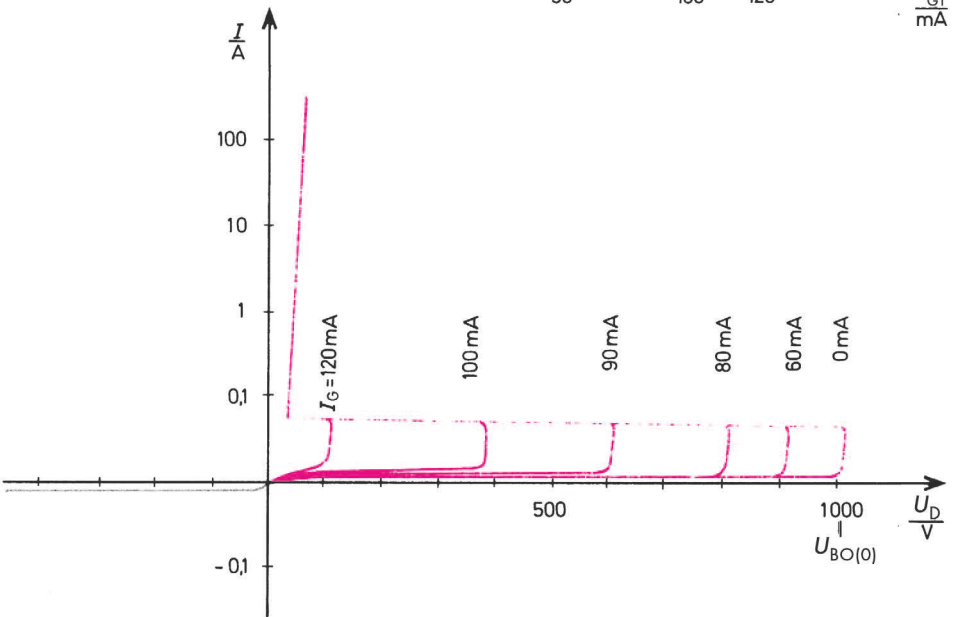
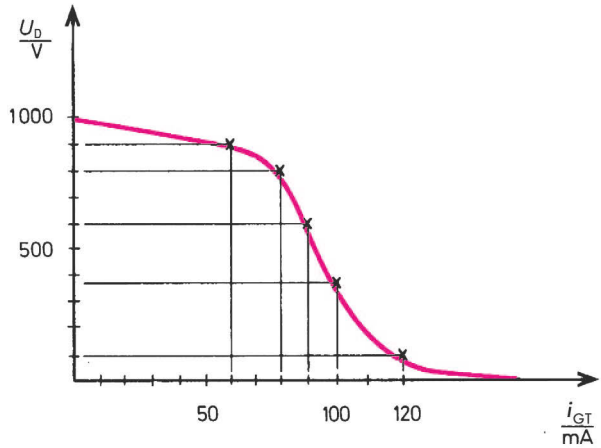


Bild 2.17 Strom-Spannungs-Kennlinie eines Thyristors mit Angabe der Mindeststeuerströme

Ein gezündeter Thyristor ist von Ladungsträgern überschwemmt. Er lässt sich über den Steueranschluss nicht abschalten. Der Thyristor bleibt so lange niederohmig, bis der ihn durchfließende Durchlassstrom i_T einen Mindestwert, den **Haltestrom** i_H , unterschreitet.

Der eingeschaltete Thyristor lässt sich nur durch Unterschreiten des Laststroms abschalten.

Dann kippt der Thyristor in den hochohmigen Zustand zurück, die Sperrschichtladungsträger werden ausgeräumt, und die mittlere Sperrschicht wird wieder aufgebaut. Die hierfür erforderliche Zeit wird **Freiwerdzeit** t_q genannt.

2.3.3 Einschalten eines Thyristors

Ein Diagramm, in dem die Vorwärts-Sperrspannung U_D über der Zeit t aufgetragen ist, verdeutlicht das Schaltverhalten des Thyristors (Bild 2.18): Nach Anlegen des Steuerimpulses ändert sich die Spannung U_D zunächst nur wenig. Die Zeit, bis sie auf 90 % ihres Anfangswertes gefallen ist, wird **Zündverzögerzeit** oder **Zündverzugszeit** t_{gd} genannt. Der Durchlassstrom i_T steigt je nach Impedanz des Lastkreises mehr oder weniger steil an.

Die Zeit, in die Vorwärts-Sperrspannung U_D auf 10 % fällt, nennt man **Durchschaltzeit** t_{gr} . Der Strom hat inzwischen sein Maximum erreicht. An die Durchschaltzeit schließt sich die Zündausbreitungszeit t_{gs} an.

