

1. Dioden

1.1 Grundlagen

Leiter – Halbleiter – Isolatoren

Ein elektrischer Strom kann nur dann fließen, wenn Ladungsträger zur Verfügung stehen. Der elementare Ladungsträger ist das Elektron. Elektronen sind jene Elementarteilchen, die die Kerne der Atome umkreisen. Sind alle Elektronen in den Atomen gebunden, so stehen keine Ladungsträger zur Verfügung, um Strom leiten zu können. Ein solcher Stoff stellt einen idealen Isolator (Nichtleiter) dar. Indem man Energie aufwendet, ist es möglich, Elektronen aus dem Atom herauszulösen und somit als freie Ladungsträger verfügbar zu machen. Das betrifft jene Elektronen, die sich in der äußeren Schale befinden und die die Bindungen zwischen benachbarten Atomen bewirken (Valenzelektronen). Die Stoffe unterscheiden sich darin, wieviel Energie zugeführt werden muß, um Valenzelektronen freizusetzen. Hierbei gibt es keinen kontinuierlichen Übergang, sondern Bereiche (Bänder), denen verschiedene Energieniveaus zugeordnet sind (Abb. 1.1). Beim Leiter überlappen sich beide Bänder, so daß auch ohne besondere Energiezufuhr stets freie Elektronen zur Verfügung stehen. Bei Halbleitern und Isolatoren sind die Bänder voneinander entfernt (Energilücke). Um Elektronen aus dem Valenzband herauszulösen und in das Leitungsband zu überführen, ist diese Energilücke durch Energiezufuhr zu überwinden. Die schmale Energilücke der Halbleiter kann überwunden werden. Die breite Energilücke der Isolatoren wäre hingegen nur mit Energiezufuhr in einer Größenordnung zu überwinden, die anwendungspraktisch nicht auftritt¹⁾.

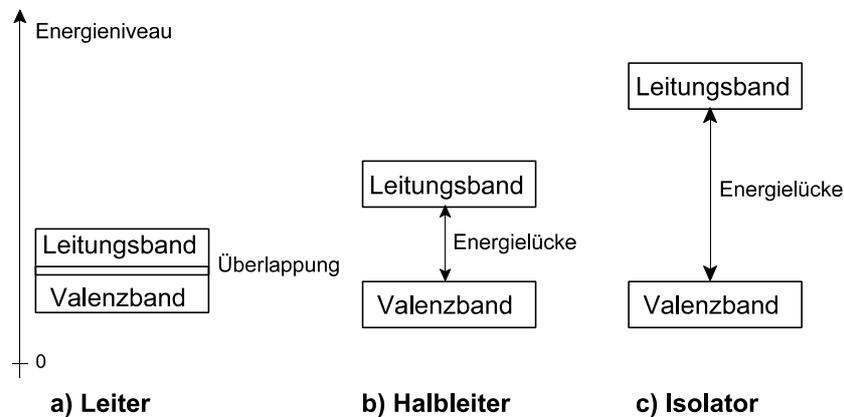


Abb. 1.1 Valenzband: das Elektron befindet sich in der äußeren Schale und kreist um den Atomkern. Leitungsband: das Elektron ist nicht mehr im Atom gebunden, sondern frei beweglich. Es steht somit zur Verfügung, um Strom zu leiten.

Eigenleitung

Die uns interessierenden Halbleitermaterialien sind Kristallstrukturen. Ein absolut reiner Halbleiterkristall, z. B. ein Stück Reinstsilizium, leitet bei tiefen Temperaturen praktisch keinen Strom. Es stehen keine Ladungsträger zur Verfügung, da alle Elektronen in den Atomen des Kristallgitters gebunden sind. Wärme oder Licht versetzen die Atome in Schwingungen. Dadurch werden einige Elektronen aus dem Verband herausgelöst, so daß Strom fließen kann. Die herausgelösten Elektronen hinterlassen buchstäblich "Löcher" (Holes) in den Kristallbindungen. Diese sind logischerweise Träger

1: Oder – falls doch – zerstörende Wirkungen hätte (Durchschlagen, Durchbrennen).

einer positiven Ladung. Ein solches Loch kann von einem Elektron besetzt werden, das dann seinerseits ein Loch hinterläßt. Den Vorgang, daß ein Elektron eine Loch-Position besetzt, nennt man Rekombination.

Obwohl ein Loch (andere Bezeichnungen: Fehlstelle, Störstelle, Defektelektron) nichts Gegenständliches ist, kann man es als Träger positiver Ladung ansehen und mit den entsprechenden Ladungsträger-Kennwerten rechnen. So entsprechen Masse und Ladungsmenge eines Loches der eines Elektrons (nur hat die Ladungsmenge ein umgekehrtes Vorzeichen). Elektronen fließen von Minus nach Plus, Löcher von Plus nach Minus. Die Bewegungsgeschwindigkeit von Löchern ist aber viel geringer als die von Elektronen (das ist die physikalische Ursache dafür, daß man für NPN-Transistoren weniger Silizium braucht als für PNP-Transistoren mit vergleichbaren Kennwerten).

Dotierung

Um mit Halbleitern Gleichricht- und Verstärkerwirkung zu erbringen, ist die Eigenleitung nicht ausreichend. Man muß vielmehr den Leitungsmechanismus gezielt beeinflussen. Dies erreicht man durch Beimischungen von Atomen anderer Wertigkeit (Dotierung). Hat ein solches Atom eine höhere Wertigkeit, so können nicht alle seine Bindungselektronen in den Kristallverband eingebaut (und somit neutralisiert) werden. Somit ist ein Überschuß an Elektronen vorhanden, der verfügbar ist, um Strom zu leiten (Elektronen- oder N-Leitung). Hat ein solches Atom hingegen eine geringere Wertigkeit, so fehlen an den Bindungsstellen des Kristalls Elektronen. Somit ist ein Überschuß an Löchern vorhanden, der ebenfalls zur Stromleitung nutzbar ist (Löcher- oder P-Leitung). Eine Dotierung, die einen Elektronenüberschuß erzeugt, heißt Donator-Dotierung, eine, die einen Überschuß an Löchern erzeugt, Akzeptor-Dotierung. Die Ladungsträger, die infolge der Dotierung vorherrschen, heißen Majoritätsträger, die jeweils anderen Minoritätsträger. Bei Silizium als Halbleiter-Grundwerkstoff bestehen Donator-Dotierungen aus fünfwertigen Atomen (z. B. Antimon Sb oder Phosphor P) und Akzeptor-Dotierungen aus dreiwertigen (z. B. Bor B oder Gallium Ga). Silizium selbst ist vierwertig. Abb. 1.2 zeigt, wie durch Dotierung einer Kristallstruktur N-leitende und P-leitende Halbleiterschichten erzeugt werden. Abb. 1.3 veranschaulicht das Prinzip der Löcherleitung.

Der PN-Übergang

Ein PN-Übergang entsteht, wenn ein Stück Halbleitermaterial auf einer Seite eine Akzeptor-Dotierung und auf der anderen eine Donator-Dotierung erhält, so daß eine P-leitende Zone einer N-leitenden unmittelbar gegenübersteht (Abb. 1.4). Legt man eine Spannungsquelle mit dem Pluspol an die P-leitende Zone und mit dem Minuspol an die N-leitende, so werden die Elektronen zum Pluspol und die Löcher zum Minuspol fließen (gleichnamige Pole stoßen einander ab; die jeweiligen Majoritätsträger werden also buchstäblich aufeinander zgedrückt). Im eigentlichen Übergangsbereich treffen Elektronen und Löcher aufeinander und rekombinieren. Es fließt also tatsächlich ein Strom. Legt man hingegen die Spannungsquelle mit dem Pluspol an die N-leitende Zone und mit dem Minuspol an die P-leitende, so werden die Majoritätsträger förmlich zu den Anschlüssen der Spannungsquelle hingesaugt (ungleichnamige Pole ziehen einander an). Der eigentliche Übergangsbereich ist somit weitgehend frei von Ladungsträgern, so daß kein nennenswerter Strom fließen kann (Sperrschicht).

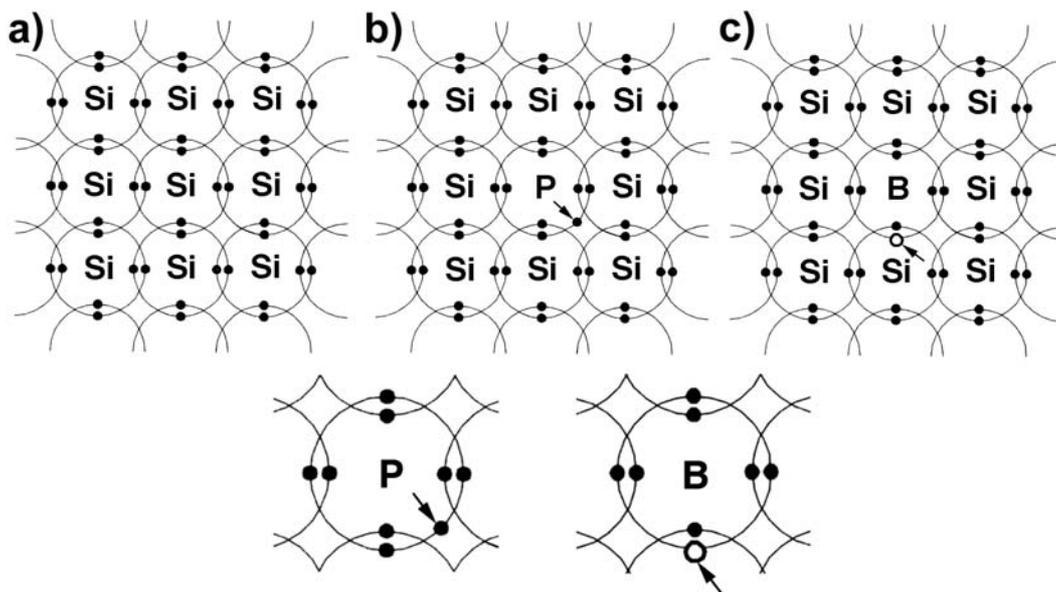


Abb. 1.2 Dotierung eines Halbleiterkristalls. a) ein reiner Siliziumkristall. Alle Valenzelektronen der Atome sind in Doppelbindungen (kovariante Bindungen) einbezogen. b) N-Leitung durch Einbau eines fünfwertigen Atoms (z. B. Phosphor P), c) P-Leitung durch Einbau eines dreiwertigen Atoms (z. B. Bor B).

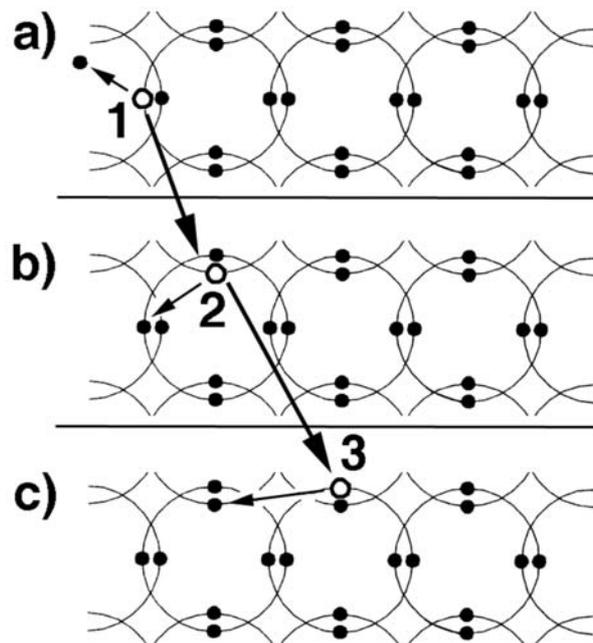


Abb. 1.3 Prinzip der Löcherleitung. Löcher an sich können sich nicht bewegen – auch hier sind es eigentlich die Elektronen. a), b) und c) zeigen die gleichen Atome zu verschiedenen Zeitpunkten. a) Elektron 1 verläßt seinen Platz in einer Doppelbindung; es ergibt sich das erste Loch. b) Elektron 2 verläßt seinen Platz in einer Doppelbindung und fällt gleichsam in die Position des Lochs 1 (Rekombination). c) Loch 2 wird von Elektron 3 gefüllt, das einerseits seinen Platz in einer Doppelbindung verlassen hat. Infolge dieser Elektronenbewegung scheint es so, als ob ein Loch von Position 1 über Position 2 nach Position 3 gewandert ist.

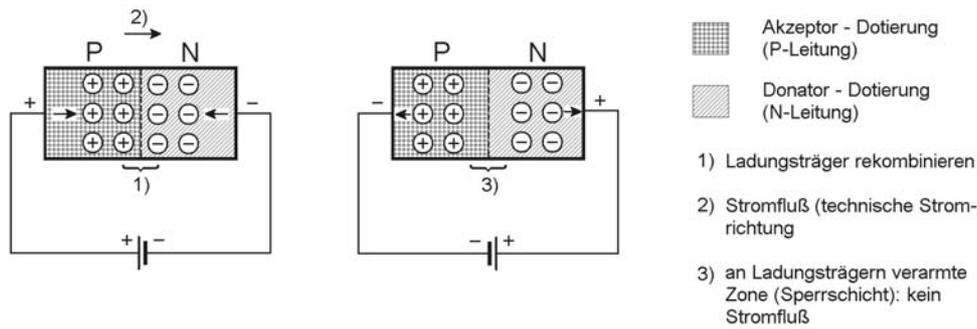


Abb. 1.4 Der PN-Übergang. Links: Betrieb in Durchlaßrichtung, rechts: Betrieb in Sperrichtung.

1.2 Dioden

Dioden sind passive Halbleiterbauelemente mit zwei Anschlüssen. Der eine Anschluß heißt Katode, der andere Anode. Die ideale Diode wirkt wie ein Schalter, dessen Stellung davon bestimmt wird, an welchem der beiden Anschlüsse das positivere und an welchem das negativere Potential anliegt:

- Liegt an der Katode eine negativere und an der Anode eine positivere Spannung an, so ist der Schalter geschlossen: die Diode ist *leitend* bzw. in *Durchlaß- oder Flußrichtung* geschaltet; es kommt ein Stromfluß zustande,
- Liegt an der Katode eine positivere und an der Anode eine negativere Spannung an, so ist der Schalter geöffnet: die Diode ist *gesperrt* bzw. in *Sperrichtung* geschaltet; es kann kein Strom fließen.

In Kurzform:

- Durchlaßrichtung (Forward Direction) = Minus an Katode, Plus an Anode.
- Sperrichtung (Reverse Direction) = Plus an Katode, Minus an Anode.

Es können verschiedene physikalische Effekte und verschiedene Materialien genutzt werden, um derart wirkende Bauelemente zu schaffen. Die meisten modernen Dioden beruhen jedoch auf dem PN-Übergang (üblicherweise als *Sperrschicht* bezeichnet) und auf Silizium als Basismaterial. Abb. 1.5 veranschaulicht die Grundlagen.

Die Diode

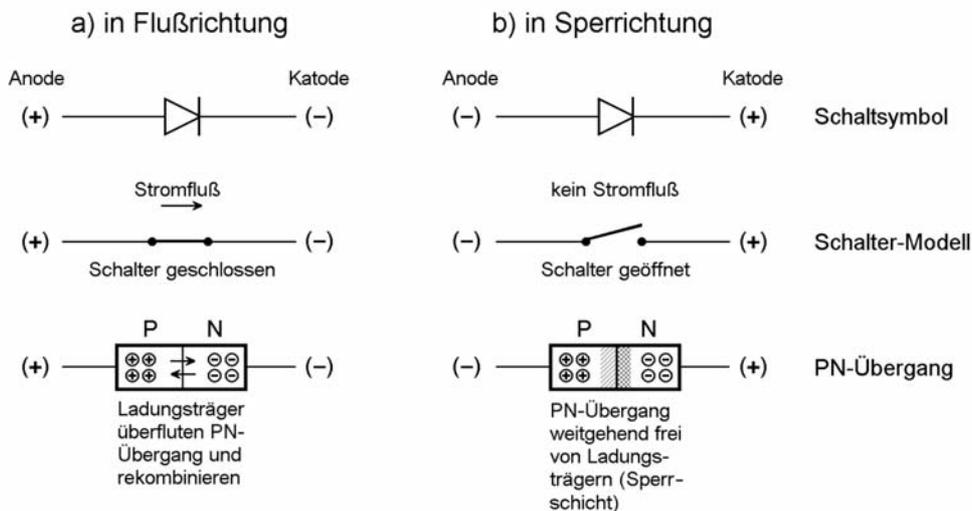


Abb. 1.5 Die (idealisierte) Halbleiterdiode. Die Anode ist P-leitend, die Katode N-leitend.

Die Diode in der Kennlinie

Das einfache Schaltermodell ist für die Praxis zu ungenau. Um die wesentlichen Einzelheiten zu erkennen, müssen wir uns die Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode ansehen (Abb. 1.6).

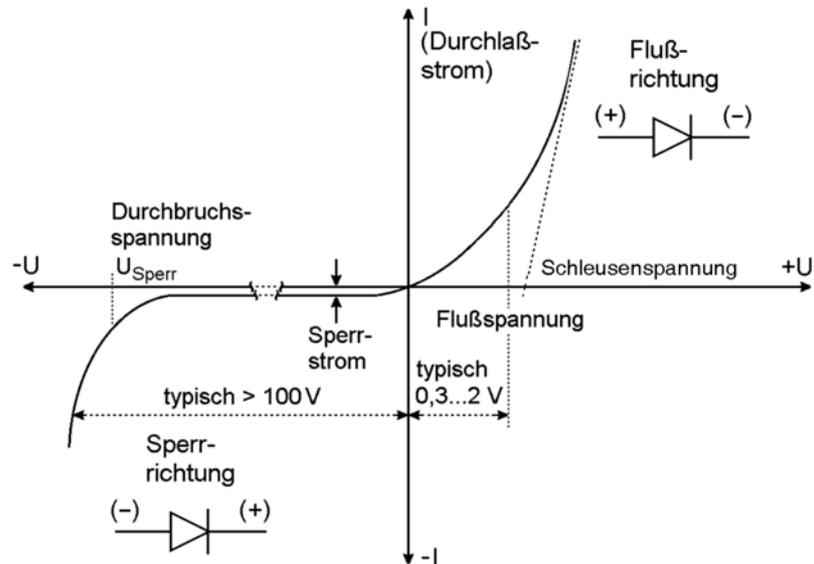


Abb. 1.6 Diodenkennlinie.

Gleichung der Diodenkennlinie:

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{U}{nU_T}} - 1 \right) \approx I_S \cdot e^{\frac{U}{nU_T}}$$

I_S = Sperrsättigungsstrom.

Temperaturspannung $U_T = \frac{kT}{q}$

Bei Zimmertemperatur gilt:

- bei 20 °C: $U_T \approx 25$ mV,
- bei 25 °C: $U_T \approx 26$ mV.

k = Boltzmannkonstante $1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Ws}}{\text{K}}$

T = Temperatur in K

q = Elementarladung $e = 0,16021892 \cdot 10^{-18}$ C

n = Anpassungsfaktor (Erfahrungswert).

	Spannungsbereich	n
Germanium	-	1
Silizium	$U \leq U_s$	2
Silizium	$U > U_s$	1

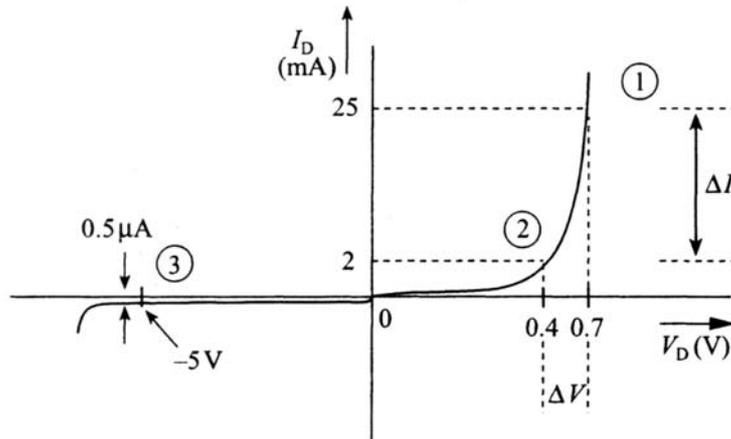


Abb. 1.7 Der statische Widerstand der Diode.

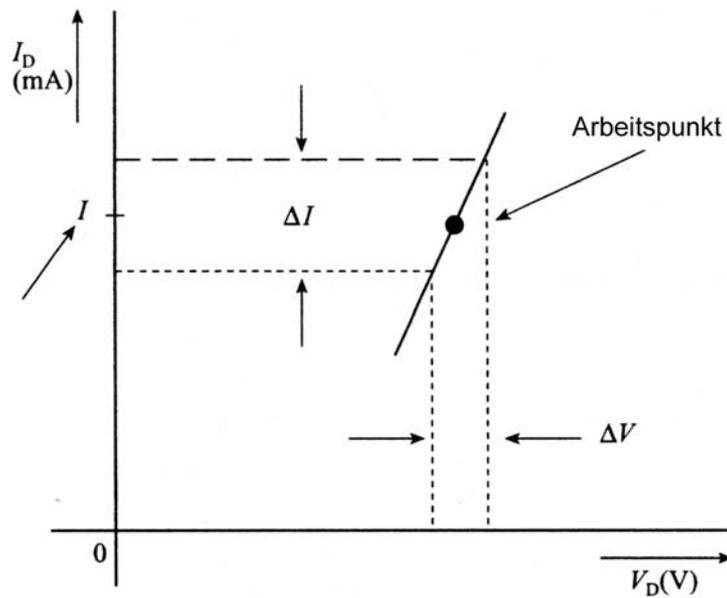


Abb. 1.8 Der differentielle Widerstand (Wechselstromwiderstand). Er gilt für kleine Änderungen von Spannung und Strom.

Differentieller Widerstand :

$$\frac{dI}{dU} = \frac{e}{kT} \cdot I_s \cdot e^{\frac{eU}{kT}}$$

$$r_d = \frac{dU}{dI} = \frac{kT}{e} \cdot \frac{1}{I_S \cdot e^{\frac{eU}{kT}}} \approx \frac{U_T}{I}$$

$$r_d \approx \frac{0,026V}{I}$$

Das entspricht einem differentiellen Leitwert von $38,5 \text{ S} \cdot I$.

Für einen gegebenen Durchlaßstrom I_F gilt somit:

- Widerstand = $26 \text{ } \Omega \cdot \text{mA} : I_F$.
- Leitwert = $38,5 \text{ mS/mA} \cdot I_F$.

Das entspricht einer Zunahme der Flußspannung um 18 mV bei Verdoppelung und um 60 mV bei Verzehnfachung des Durchlaßstroms (also je Oktave bzw. Dekade).

Temperaturabhängigkeit (Silizium):

- für je 1° Temperaturanstieg fällt die Flußspannung um 2 mV,
- für je 10° Temperaturanstieg verdoppelt sich der Sperrstrom.

Die Durchlaßrichtung

Wenn, von Wert 0 an beginnend, die Spannung an der Anode – bezogen auf die Katode – mehr und mehr positiv wird, fließt zunächst ein nur geringer Strom. Erst nach Überschreiten eines gewissen Spannungswertes U_d steigt die Stromstärke steil an. Dabei nimmt der Spannungsabfall über der Diode kaum zu. Den Wert U_d bezeichnet man als Durchlaß-, Fluß- oder Kniespannung der Diode. Bei geringen Spannungen und Strömen entspricht die Kennlinie in guter Näherung einer Exponentialfunktion.

Die Sperrichtung

Wenn, von Wert 0 an beginnend, die Spannung an der Anode – bezogen auf die Katode – mehr und mehr negativ wird, fließt zunächst ein nur geringer Strom, der Sperrstrom. Erst nach Überschreiten eines gewissen Spannungswertes $-U_{\text{sperr}}$ steigt die Stromstärke steil an. Dabei nimmt der Spannungsabfall über der Diode kaum zu. Den Wert U_{sperr} bezeichnet man als maximale Sperrspannung, als Durchbruchspannung oder als Zenerspannung. Bei "gewöhnlichen" Dioden darf dieser Spannungswert im praktischen Betrieb nie erreicht werden. Nur bei den sog. Zenerdioden werden die Durchbruchseffekte praktisch ausgenutzt.

Wir merken uns:

1. Der Stromfluß beginnt bereits bei geringen Spannungen in Flußrichtung. Ein geringer Strom bewirkt auch nur einen geringen Spannungsabfall (exponentielle Abhängigkeit).
2. Über einer Diode, die in Flußrichtung von einem hinreichend starken Strom durchflossen wird, fällt eine Spannung ab, die der Flußspannung entspricht. Der Spannungsabfall nimmt mit wachsender Stärke des Durchlaßstroms nur geringfügig zu (mit anderen Worten: die Diode ist extrem niederohmig, also näherungsweise ein geschlossener Schalter).
3. Durch eine Diode in Sperrichtung fließt nur ein sehr geringer Sperrstrom, der praktisch nicht nennenswert von der anliegenden Sperrspannung abhängt (mit anderen Worten: die Diode ist extrem hochohmig, also näherungsweise ein offener Schalter).
4. Die im Betrieb anliegende Sperrspannung muß stets geringer sein als die maximale Sperrspannung (Durchbruch- oder Zenerspannung).

Der Übergang in den Bereich des steilen Anstiegs wird durch Spannungsangaben gekennzeichnet:

- Schwellenspannung (Threshold Voltage V_{Th}) oder Schleusenspannung U_S : an den steil ansteigenden Bereich der Kennlinie wird eine Tangente angelegt und bis zur Spannungsachse verlängert,
- Flußspannung U_d (Forward Voltage V_F): dies ist typischerweise die über der Diode abfallende Spannung, wenn 1/10 des Nennstroms hindurchfließt.

Wie hoch ist die Flußspannung?

Das hängt vom Halbleiter-Basismaterial und von der Ausführung der Diode ab. Anhaltswerte:

- Siliziumdioden: 0,5...0,8 V (typisch 0,7 V),
- Germaniumdioden: 0,2...0,4 V (typisch 0,35 V),
- Schottky-Dioden: 0,35...0,5 V (typisch 0,45 V).

Abb. 1.9 veranschaulicht die Unterschiede anhand von Kennlinien einer Silizium- und einer Germaniumdiode, die in einem gemeinsamen Koordinatenkreuz dargestellt sind.

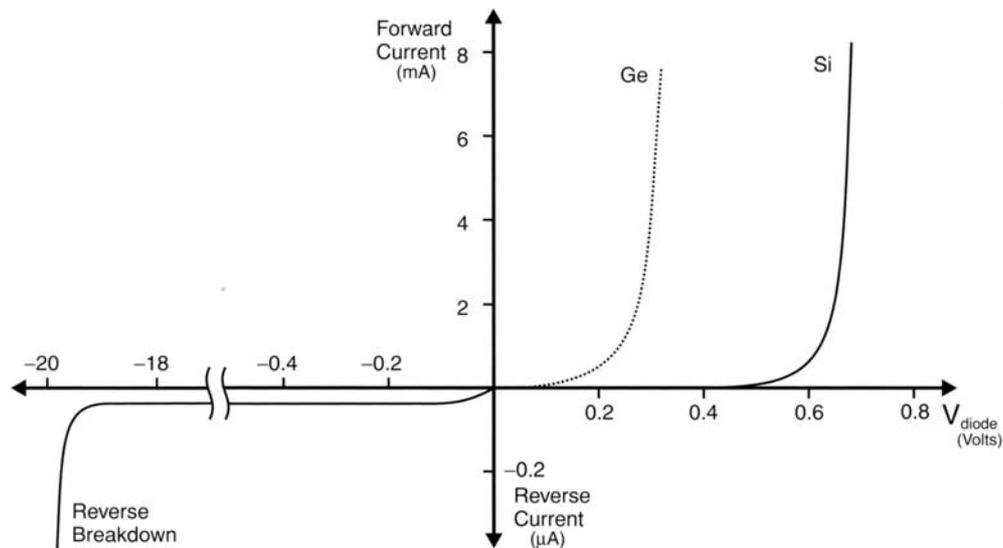


Abb. 1.9 Kennlinien einer Germanium- und einer Siliziumdiode

In vielen Einsatzfällen ist der typische Wert der Flußspannung eine sinnfällige Größe, um sich die Wirkungsweise von Schaltungen klarzumachen oder um in der Hardware zu messen. Genaugenommen hat die Kennlinie aber in der "Gegend", wo der Durchlaßstrom zu fließen beginnt, keinen plötzlichen Knick. Sie ist vielmehr in charakteristischer Weise gekrümmt. Hierbei gibt es deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Typen. Und genau dieser Verlauf ist bei manchen Anwendungen (z.B. als Leistungsgleichrichter) von besonderer Bedeutung. Deshalb wird in den Datenblättern gelegentlich der genaue Kennlinienverlauf in der Umgebung des Flußspannungs-Wertes graphisch dargestellt (Abb. 1.10).

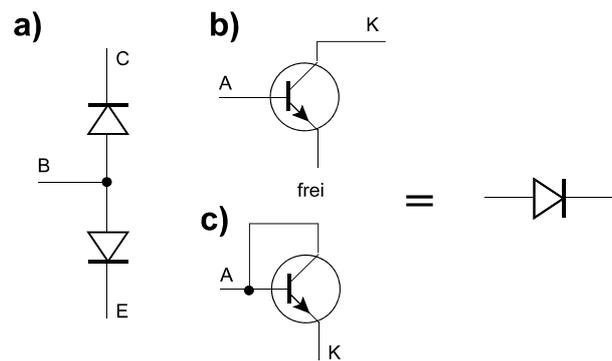


Abb. 1.10 Die Basis-Kollektor-Strecken eines Transistors können als Diode genutzt werden. a) der NPN-Transistor als Verbund zweier Dioden (Ersatzschaltung). b) die Diode zwischen Basis und Kollektor hat geringe Leckströme, aber längere Schaltzeiten. c) die Diode zwischen Basis und Emitter hat besonders kurze Schaltzeiten. Die zulässige Sperrspannung ist aber gering (Richtwert: 5...6 V).

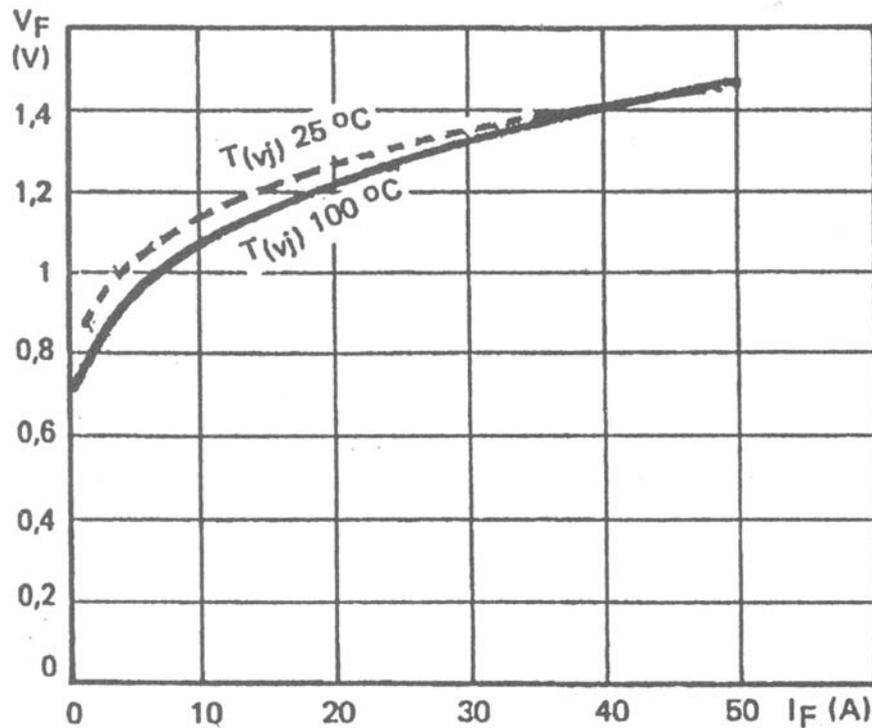


Abb. 1.11 Spannungsabfall V_F in Flußrichtung als Funktion des Durchlaßstroms I_F (Gleichrichterdiode BY 233; Quelle: SGS-Thomson).

Man hat hier die Graphik gegenüber der lehrbuchmäßigen Darstellung (z. B. Abb. 1.6) umgedreht, um die Abhängigkeit des Spannungsabfalls vom Strom deutlich herauszustellen (bei Gleichrichteranwendungen ist der Stromfluß gegeben, und man will wissen, mit welchem Spannungsabfall bei einer bestimmten Stromstärke zu rechnen ist).

Diodenanwendungen in Embedded Systems

Dioden werden sowohl innerhalb integrierter Schaltungen als auch – in beträchtlichen Stückzahlen – als Einzelbauelemente eingesetzt (Abb. 1.12). In Embedded Systems haben folgende Anwendungsgebiete die größte Bedeutung:

- Gleichrichten von Wechselspannungen,
- Spannungstabilisierung,
- Begrenzungs- und Schutzfunktionen,
- Ventil- und Schaltfunktionen,
- optische Wirkungen (Licht aussenden (Leuchtdioden), Licht empfangen (Photodioden)).

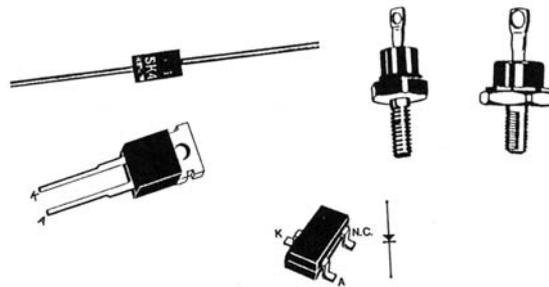


Abb. 1.12 Dioden.

Anschlußkennzeichnung

Dioden in zylindrischen Bauformen haben einen Ring am Gehäuse, der die Katode kennzeichnet. Bei manchen Dioden in Plastikgehäusen (mit beiden Anschlüssen nebeneinander) sind die Anschlußdrähte unterschiedlich lang. Der kürzere ist die Katode. Ist die Anschlußbelegung nicht eindeutig erkennbar, hilft nur Messen.

Dioden für Kühlkörpermontage

Sind beide Anschlüsse gegenüber den Montage-Vorkehrungen (Schraubgewinde, Platte mit Befestigungsbohrung o. ä.) völlig isoliert, ist nichts zu beachten. Ansonsten: es gibt "katodenverbundene" und "anodenverbundene" Typen (der Kühlkörper ist dann – wenn nicht durch Zwischenlagen, Montage mit Kunststoffschrauben usw. isoliert – entweder mit der Katode oder der Anode verbunden). Meistens hat die Vorzugsausführung die Katode am Gehäuse. Praktisch alle einschlägigen Typen werden aber auch mit der Anode am Gehäuse geliefert. Achten Sie also auf die genauen Typen- und Bestellnummern! (So sind zum Aufbau von Brückengleichrichtern je zwei Dioden in jeder Bauform zweckmäßig.)

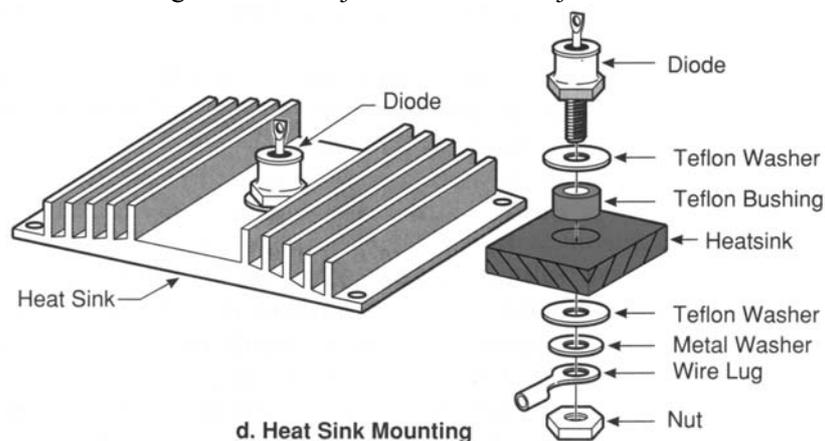


Abb. 1.13 Kühlkörpermontage.

Mehrfachdioden

Mehrfachdioden-Bauelemente enthalten mehrere unabhängige Dioden oder Diodenkombinationen, die für bestimmte Anwendungen gleichsam vorgefertigt sind (als Schutzdioden-Anordnungen, als Zweiweg- oder Brückengleichrichter usw.).

Dioden im Schaltplan

In Abb. 1.14 sind die üblichen Schaltsymbole für Dioden zusammengestellt. Beachten Sie die bildhafte Symbolik: der Querstrich ist die Katode, und der Pfeil zeigt in Flußrichtung, wenn die Anode an positiverer Spannung liegt (technische Stromrichtung von Plus nach Minus).

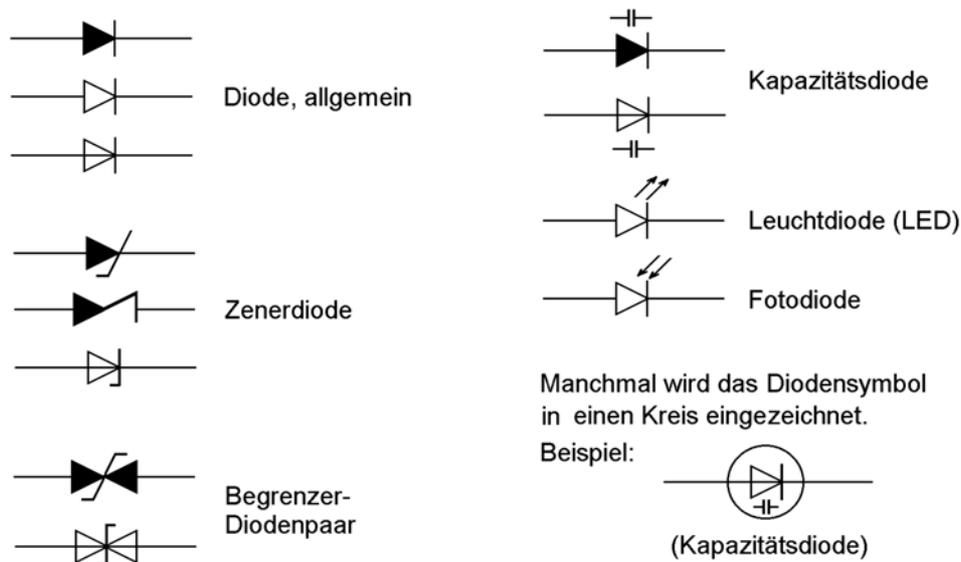


Abb. 1.14 Schaltsymbole für Dioden.

1.3 Siliziumdioden

Statische Kennwerte

Das Strom-Spannungs-Verhalten der gewöhnlichen "Siliziumdiode ist aus Kennlinien ähnlich Abb. 1.9 und 1.11 ersichtlich. Im folgenden geben wir zunächst einen Überblick über die Kennwerte, die wir bisher besprochen haben und nennen die in Datenblättern üblichen Bezeichnungen.

Maximaler Durchlaßstrom (Forward Current I_F)

Zu Schalt- und Kleinleistungsdioden findet man oft nur eine einzige Durchlaßstromangabe. Leistungsgleichrichter werden hingegen durch mehrere Werte charakterisiert. Wir nennen hier die wichtigsten:

- **Dauergrenzstrom (Average Forward Current I_{FAV}):** der höchste zulässige Mittelwert eines sinusförmigen Durchlaßstromes im Dauerbetrieb (bezogen auf einen Frequenzbereich von 50...60 Hz).
- **Dauergleichstrom (I_{FDC}):** der höchste Gleichstrom, der in Durchlaßrichtung fließen darf. Faustregel: $I_{FDC} = 1,5 I_{FAV}$.
- **höchster periodischer Durchlaßstrom (Repetitive Peak Forward Current I_{FRM}):** der höchste zulässige Augenblickswert des Durchlaßstromes, der periodisch wiederholt auftreten darf (die Höchstdauer der Erregung steht im Datenblatt; typisch sind $\geq 10 \mu s$).

- Stoßstromgrenzwert (Surge Non Repetitive Forward Current I_{FSM}): der höchste zulässige Augenblickswert des Durchlaßstromes, der bei nicht periodischem Auftreten zulässig ist (wie der Bezugs-Stromstoß aussieht, steht im Datenblatt; typisch ist eine Sinus-Halbwellenform von 10 ms Dauer).

Flußspannung (Forward Voltage V_F)

Die Flußspannung (Pauschalwert für SI-Dioden um 0,7 V) ist – genau genommen – stromabhängig²⁾. Die Datenblätter nennen deshalb meist nur 1 oder 2 Werte im Tabellenteil³⁾ und geben genauere Abhängigkeiten graphisch an (vgl. Abb. 1.11). "Dicke" Leistungsgleichrichter für Ströme von 100 A und mehr haben Flußspannungen um 1,5... > 2 V.

Temperaturgang der Flußspannung bei konstantem Durchlaßstrom: etwa -2 mV/K (Richtwert). Liegt eine konstante Spannung an, so steigt der Durchlaßstrom exponentiell mit der Temperatur.

Sperrstrom (Reverse Current I_R)

Der Sperrstrom von Siliziumdioden ist sehr gering und hängt im wesentlichen von der Betriebstemperatur ab (Bereich von wenigen nA bis zu einigen μA bei stark belasteten Leistungsgleichrichtern; beispielsweise 50 μA Sperrstrom und 80 A Durchlaßstrom). Genauere Abhängigkeiten werden üblicherweise graphisch dargestellt.

Temperaturgang des Sperrstroms: Verdoppelung bei 10K Temperaturerhöhung (2^{10}).

Maximale Sperrspannung (Peak Reverse Voltage V_R)

Bei Schalt- und Kleinleistungsdioden reicht meist ein einziger Wert für die Sperrspannung. Bei Leistungsgleichrichtern sind hingegen – gemäß den verschiedenen Betriebsfällen – mehrere Sperrspannungsangaben erforderlich.

- höchste periodische Spitzensperrspannung (Repetitive Peak Reverse Voltage V_{RRM}): der höchste Augenblickswert der Sperrspannung, der periodisch wiederholt auftreten darf.
- höchste Stoßspitzensperrspannung (Non Repetitive Peak Reverse Voltage V_{RSM}): der höchste Augenblickswert der Sperrspannung, der bei nicht periodischem Auftreten zulässig ist (maximale Dauer: 10 ms).
- empfohlene Anschlußspannung (V_{RMS}): Nenn-Effektivwert der anliegenden sinusförmigen Wechselspannung (bei Gleichrichter-Anwendungen).
- Faustregel: $V_{RMS} = 0,5 V_{RRM}$.

Abb. 1.15 veranschaulicht, welche Sperrspannung die Diode im einfachen Spitzenwertgleichrichter aushalten muß.

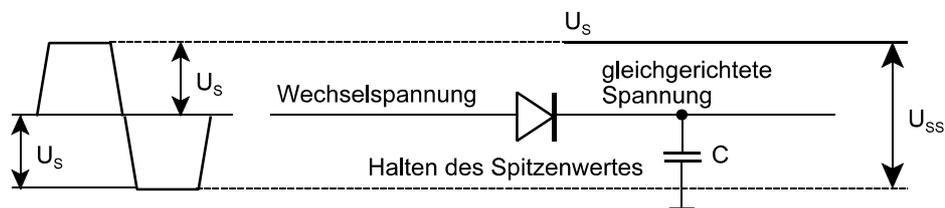


Abb. 1.15 Der ungünstigste Betriebsfall. Der Kondensator ist auf den Spitzenwert aufgeladen, und in Sperrichtung liegt der entgegengesetzt gepolte Spitzenwert an.

-
- 2: Exponentielles Wachstum. Richtwert: bei geringen Strömen um 60...120 mV/Dekade (Verzehnfachung der Stromstärke).
 - 3: Ein typischer Datenblattwert: Spannungsabfall bei 10% des maximalen Durchlaßstroms.

Es gilt also:

$$V_R \geq U_{SS}$$

Bei sinusförmigem Wechselspannungsverlauf:

$$V_R \geq 2,8 \cdot V_{RMS}$$

Verlustleistung (Power Dissipation P_{tot})

Die Verlustleistung ergibt sich - näherungsweise gerechnet - als Produkt von Durchlaßstrom und Flußspannung: $P_{tot} = I_{FAV} \cdot V_F$. Angaben zu Gehäusetemperatur und Anforderungen an die Kühlung beachten!

Das dynamische Verhalten

Wenn eine Diode umgepolt wird, laufen Vorgänge ab, die Zeit erfordern. Betrachten wir dazu nochmals die einfachen Skizzen zum PN-Übergang in Abb. 1.4. Nehmen wir an, die Diode werde in Sperrichtung betrieben. Dann ist der eigentliche PN-Übergang (die Sperrschicht) nahezu frei von Ladungsträgern. Nun polen wir die Spannung um. Jetzt muß die Diode leiten. Aber dazu müssen erst einmal die Ladungsträger zur Sperrschicht kommen. Diesen Effekt bezeichnet man als Durchlaßträgheit, und der entsprechende Zeit-Kennwert heißt Durchlaßverzögerungszeit (Forward Recovery Time t_{fr}). Bei Schalter-Anwendungen kann es sein, daß man mit dieser Verzögerung rechnen muß; bei Gleichrichter-Anwendungen ist sie weniger von Bedeutung. Schließlich geschieht nicht mehr, als daß die Sperrwirkung erst einige ns nach dem Umpolen aufgehoben wird.

Was passiert aber im umgekehrten Fall? – Die Diode leitet, folglich ist die Sperrschicht mit Ladungsträgern regelrecht überflutet. Nun wird auf "Sperrern" umgepolt. Zunächst sind aber noch Ladungsträger in der Sperrschicht. Die Folge: eine gewisse Zeit kann ein recht starker Strom (theoretisch: in Höhe des Durchlaßstromes) in Sperrichtung fließen! Erst dann, wenn sich die Ladungsträger aus der Sperrschicht zurückgezogen haben (man spricht hier bildhaft vom Ausräumen), ist die Diode wirklich gesperrt. Diesen Effekt bezeichnet man als Sperrträgheit; der Zeit-Kennwert heißt Sperrverzögerungszeit (Backward Recovery Time t_{tr}). Abb. 1.16 veranschaulicht das beschriebene Verhalten.

Es ist offensichtlich, daß die halbe Periodendauer einer gleichzurichtenden Wechselspannung viel länger sein sollte als die Sperrträgheit. Sind Wechselspannungen höherer Frequenz gleichzurichten (Spannungswandler, Schaltnetzteile), braucht man Dioden mit besonders geringer Sperrverzögerungszeit (Fast Recovery Diodes). Man erreicht dies durch besondere Gestaltung der Sperrschicht. (So liegt es nahe, die Sperrschicht vergleichsweise hochohmig auszulegen, so daß weniger Ladungsträger auszuräumen sind.)

Orientierungswerte:

Bei modernen Leistungsgleichrichtern liegt t_{fr} um 10 ns und t_{tr} um 200...50 ns.

Abb. 1.17 zeigt die Verbesserung, die sich ergibt, wenn weniger Ladungsträger auszuräumen sind.

Es ist aber auch erkennbar, was es bedeutet, wenn die Sperrschicht sehr schnell ausgeräumt wird: der Ausräum-Strom bricht schlagartig zusammen. Und das hat zur Folge, daß kräftige Spannungsspitzen induziert werden, die auf jeden Fall Störungen hervorrufen, wenn nicht gar den Totalausfall der Diode. Der Ausweg: Man muß nicht nur die Ausräumzeit verkürzen (Fast Recovery), sondern auch dafür sorgen, daß das Ausräumen "sanft" abläuft (Soft Recovery; Abb. 1.18).

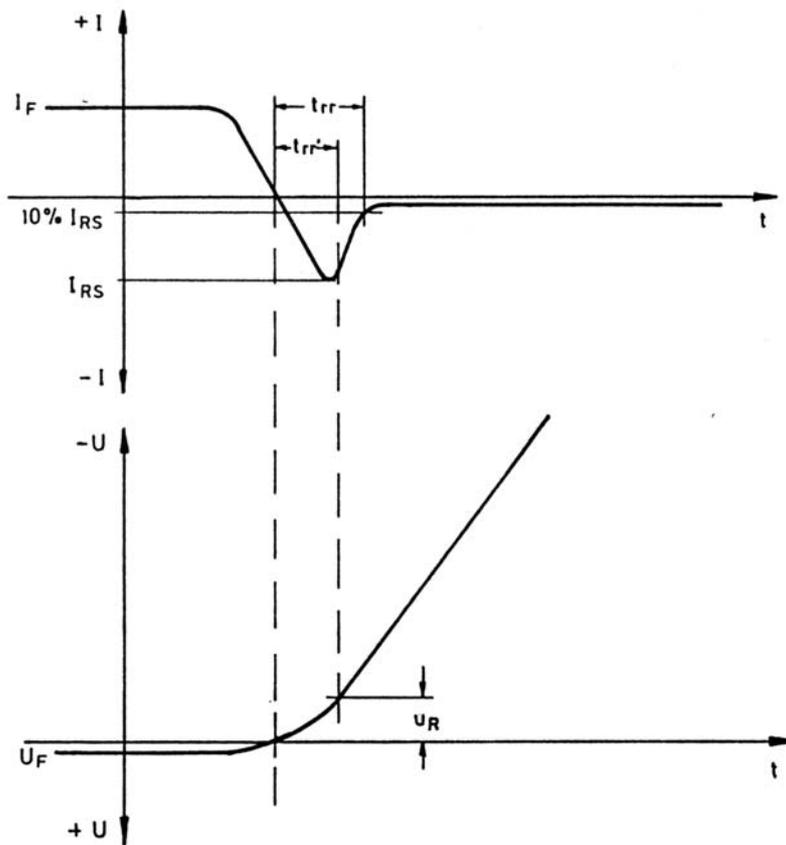


Abb. 1.16 Das Verhalten der Diode beim Umschalten. Oben: der Stromfluß durch die Diode (I_F = Durchlaßstrom, I_{RS} = Ausräumstrom), unten: die Spannung über der Diode (U_F = Flußspannung, U_R = Sperrspannung).

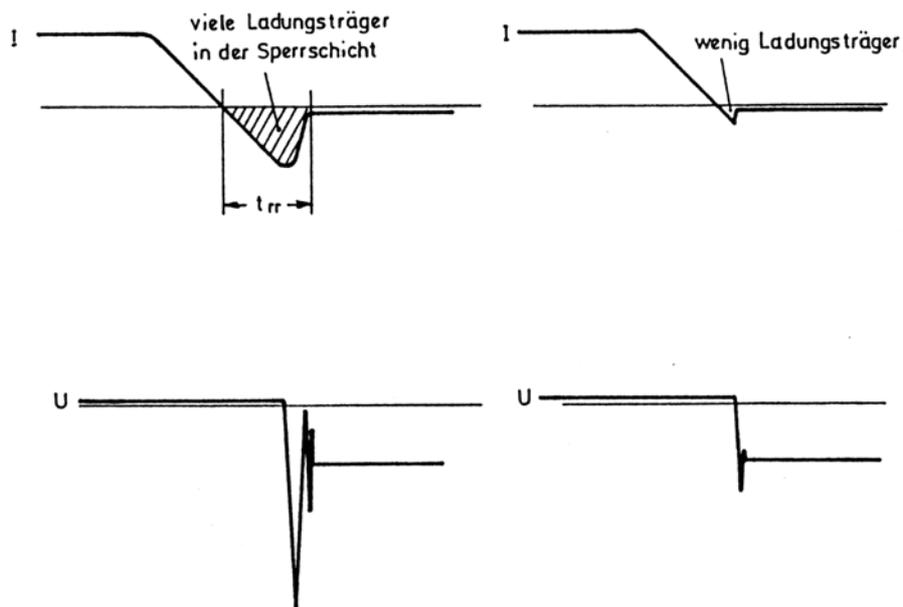


Abb. 1.17 Die Sperrträgeit bei verschiedenen Auslegungen der Sperrschicht.

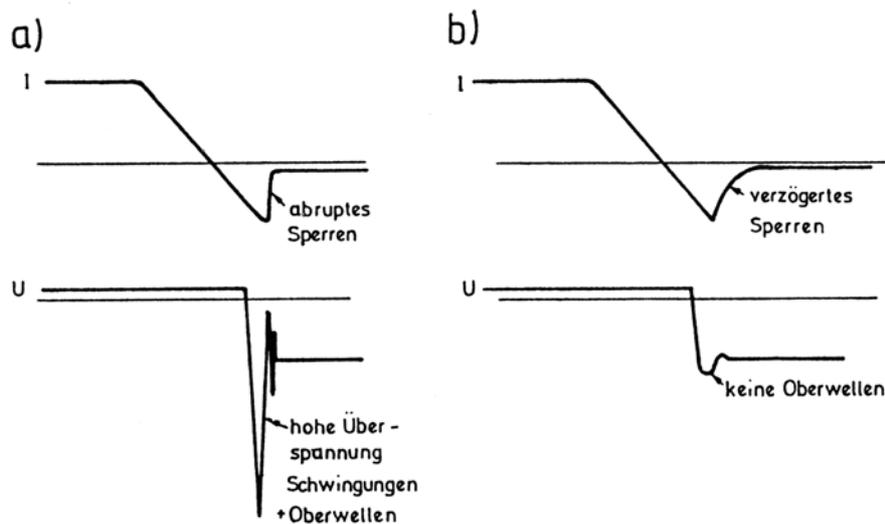


Abb. 1.18 Der Verlauf des Ausräumstroms. (a) steiler, b) verzögerter Abfall (Soft Recovery).

1.4 Schottky-Dioden

Schottky-Dioden beruhen auf einem Metall-Halbleiter-Übergang. Sie haben gegenüber gewöhnlichen Siliziumdioden folgende Besonderheiten:

- Die Flußspannung ist etwa auf die Hälfte reduziert (typisch 0,35...0,45 V; vgl. Abb. 1.19a).
- Der Sperrstrom (Leckstrom) ist höher (vgl. Abb. 1.19b).
- Der Ausräumstrom ist praktisch vernachlässigbar (vgl. Abb. 1.19c).
- Die Sperrschichtkapazität ist deutlich geringer (wenige pF) und kaum spannungsabhängig (vgl. Abb. 1.19d).
- Die Durchlaß- und Sperrverzögerungszeiten sind sehr gering. Man gibt meist nur einen Wert als "Schaltzeit" τ an; Größenordnung: 100 ps. Achtung: einige Zeit nach dem Umschalten in die Sperrichtung können noch schwache Restströme fließen (z. B. einige μA für etwa 1 μs). Die Ursache: ein parasitärer pn-Übergang, der dem eigentlichen Schottky-Übergang parallelliegt.

Abb. 1.19 veranschaulicht diese Unterschiede anhand von Kennlinien und Werteverläufen (die 1N1418 ist eine "Wald-und-Wiesen"-Siliziumdiode, die BAR- und BAT-Typen sind Schottky-Dioden).

1.5 Kapazitätsdioden

Eine in Sperrichtung betriebene Diode ist praktisch ein Kondensator, dessen Dielektrikum die Sperrschicht ist. Weshalb? – Zwischen Katode und Anode liegt eine Spannung, es fließt aber (fast) kein Strom: die Sperrschicht wirkt als Isolator. Die tatsächliche Dicke der Sperrschicht hängt von der anliegenden Sperrspannung ab. Je höher die Spannung, um so dicker die Sperrschicht bzw. das Dielektrikum (Abb. 1.20). Das heißt, die Sperrschichtkapazität kann durch die Sperrspannung verändert werden. Kapazitätsdioden (Abstimmioden, Varicaps, Varaktoren) sind ausdrücklich für diese Nutzungsweise entwickelt worden. Abb. 1.21 zeigt die Sperrschichtkapazität als Funktion der Sperrspannung für verschiedene Diodentypen (daraus geht auch die typische Größenordnung der Sperrschichtkapazität hervor).

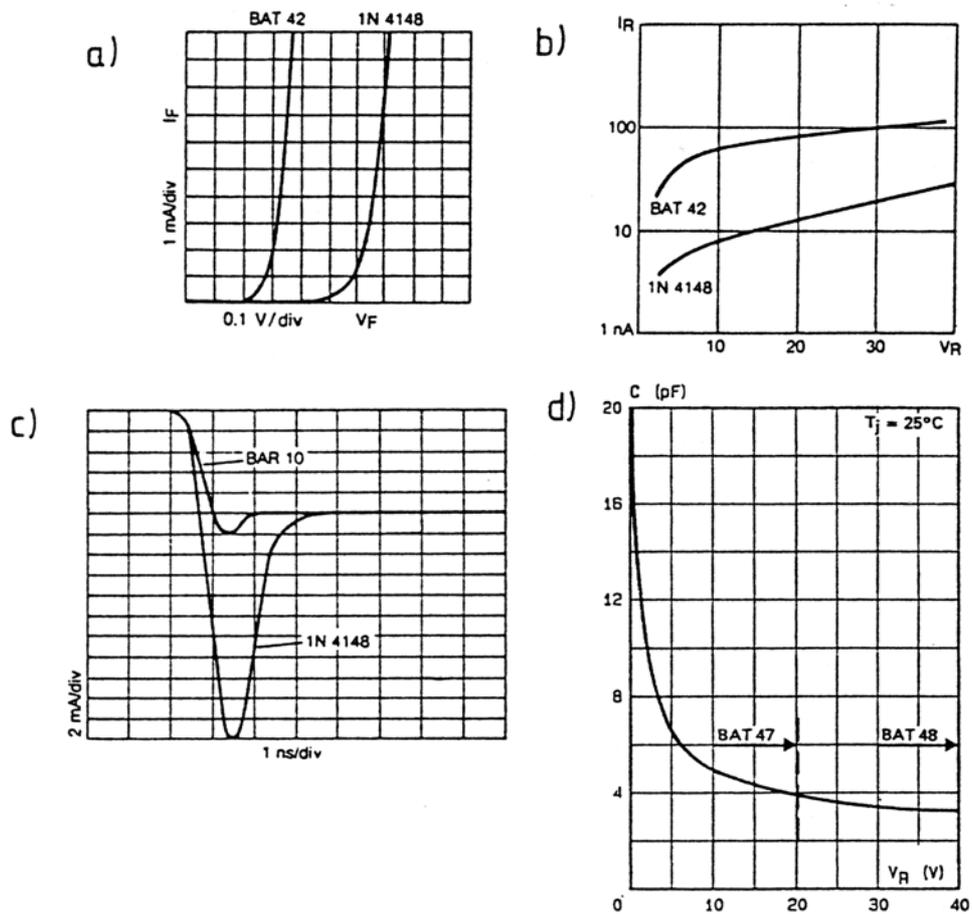


Abb. 1.19 Das statische und dynamische Verhalten von Schottky-Dioden. a) statische Kennlinie in Durchlaßrichtung, b) statische Kennlinie in Sperrichtung, c) Verlauf des Ausräumstromes, d) Sperrschichtkapazität in Abhängigkeit von der Sperrspannung (Quelle: SGS-Thomson).

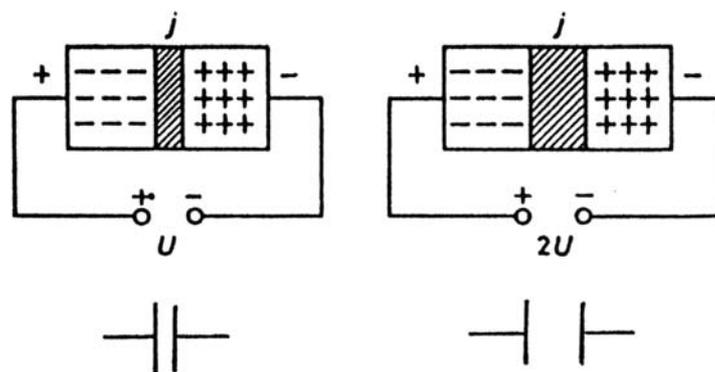


Abb. 1.20 Die Sperrschichtkapazität. Das Prinzip der Kapazitätsdiode.

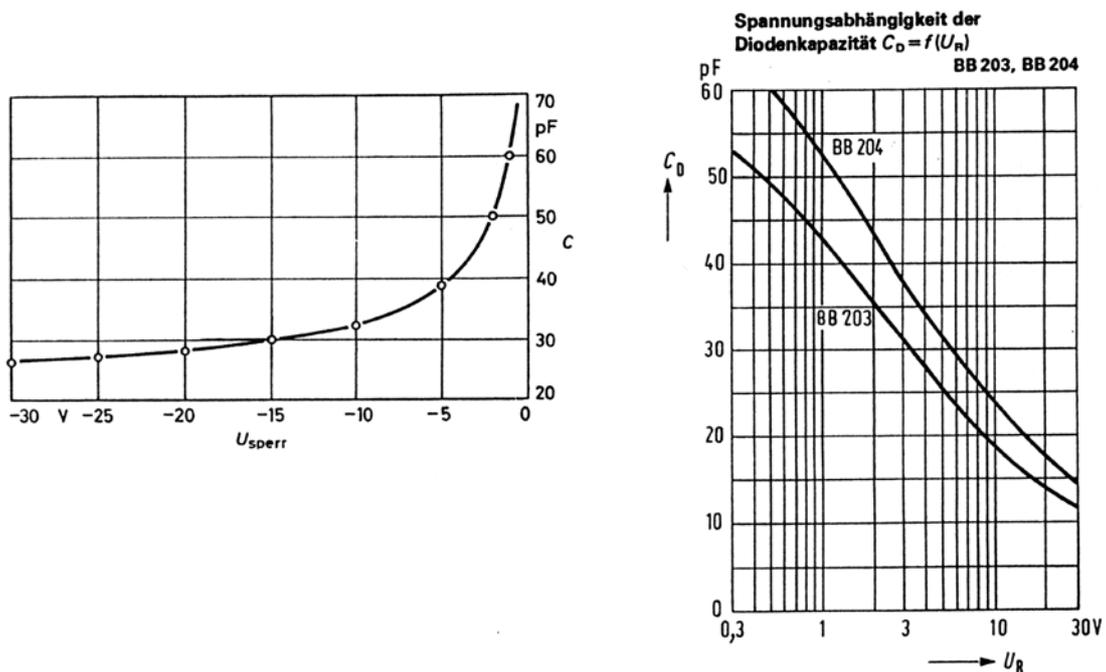


Abb. 1.21 Die Sperrschichtkapazität in Abhängigkeit von der Sperrspannung. Links: linearer, rechts: logarithmischer Maßstab (Quellen: AEG-Telefunken, Siemens).

Abb. 1.22 zeigt, wie man eine Kapazitätsdiode einsetzen kann, um einen Schwingkreis abzustimmen.

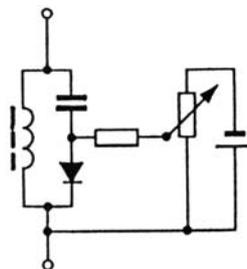


Abb. 1.22 Schwingkreis-Abstimmung mittels Kapazitätsdiode.

1.6 Zenerdioden

Zenerdioden werden in Sperrichtung betrieben, und zwar im Bereich ihrer Durchbruchspannung. Die Durchbruchspannung der üblichen Siliziumdioden liegt in einer Größenordnung von 100 V und mehr, und man ist bestrebt, diese so hoch wie möglich zu halten. Zenerdioden sind hingegen für praktisch brauchbare Durchbruchspannungen (Zenerspannungen) entwickelt worden. Sie dienen zur Spannungsstabilisierung und zu Schutzzwecken. Zenerdioden gibt es mit Zenerspannungen zwischen etwa 1,8 und ca. 270 V, wobei die Nennwerte typischerweise gemäß einer E-Reihe gestaffelt sind. Abb. 1.23 zeigt Sperr- und Durchlaßkennlinien typischer Zenerdioden.

Durchbrucheffekte

Je höher die Sperrspannung, um so mehr werden die Ladungsträger aus dem Bereich des PN-Übergangs förmlich zu den Anschlüssen hin abgesaugt (vgl. Abb. 1.4). Hohe Sperrspannung bedeutet aber auch hohe Feldstärke. Von einem gewissen Spannungswert an wird die Feldstärke so hoch, daß Elektronen aus ihren

Bindungen im Halbleitermaterial gerissen werden und somit als freie Ladungsträger zur Verfügung stehen. Die Folge: der Widerstand sinkt beträchtlich, und der Sperrstrom nimmt schlagartig zu (Durchbruch). "Zenerdiode" (Z-Diode) ist die Allgemeinbezeichnung. Tatsächlich werden zwei Durchbrucheffekte ausgenutzt:

- Der eigentliche Zener-Effekt. Tritt in dünnen, hochdotierten Sperrschichten bei vergleichsweise geringen Sperrspannungen (ca. 5...6 V) auf. Temperaturkoeffizient negativ.
- Der Avalanche-Effekt (Lawinendurchbruch). Tritt in dickeren Sperrschichten bei höheren Sperrspannungen (ab etwa 6 V) auf. Temperaturkoeffizient positiv.

Temperaturkoeffizient: etwa $\pm 0,1...0,001$ V/K.

Der Zener-Effekt ist "schlechter" als der Avalanche-Effekt (Durchbruchskennlinie nicht so steil, schlechterer TK).

Im Bereich um 5 V (4...7 V) werden beide Effekte wirksam. Somit heben sich die Temperaturgänge weitgehend auf; es ergibt sich ein sehr geringer Temperaturkoeffizient. Anwendung: Referenzspannungsquellen. (Bauelemente mit eingebauter Temperaturkonstanthaltung: 0,5...1 ppm/K; Langzeitstabilität 5...10 ppm/K über 1000 h.) Solche Bauelemente vertragen aber nur schwache Ströme (Richtwert: ca. 10 mA). Sie sollten zudem näherungsweise mit ihrem Nennstrom betrieben werden, sonst bringen sie nicht die Genauigkeit, die im Datenblatt versprochen wird.

Achtung: Zenerdioden halten keine übermäßige Strombelastung über längere Zeit aus. Derating-Kurven beachten!

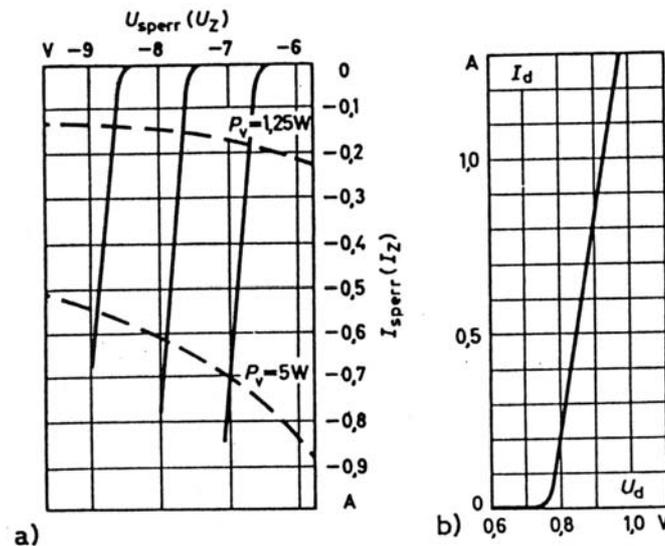


Abb. 1.23 a) Sperr- und b) Durchlaßkennlinien typischer Zenerdioden

Datenblattwerte

Die wichtigsten Kennwerte sind die Zenerspannung, der minimale Zenerstrom und die maximale Verlustleistung. Viele Datenblätter sind ausgesprochen knapp gehalten. Abb. 1.24 veranschaulicht, was die Werte von Zenerstrom und Zenerspannung typischerweise bedeuten. Die Abbildungen 1.25 bis 1.30 zeigen Datenblattauszüge.

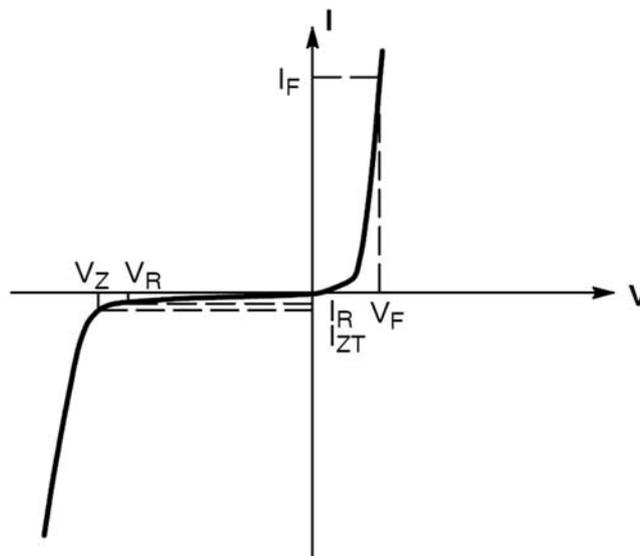


Abb. 1.24 Zenerstrom und Zenerspannung (Quelle: ON Semiconductor).

Der Teststrom I_{ZT}

Die typische Zenerstromangabe betrifft die minimale Stromstärke, bei der über der Zenerdiode eine Zenerspannung im Bereich der Datenblattwerte abfällt; mit anderen Worten, es ist der Strom, mit dem die Zenerspannung abgeprüft wird (Teststrom).

Der maximale Zenerstrom I_{ZM}

Das ist die Stromstärke, die die Zenerdiode auf Dauer aushält (Derating für höhere Umgebungstemperaturen beachten!). Manche Datenblätter enthalten solche Werte, ander nicht. Dann ist der maximale Zenerstrom aus der Verlustleistungsangabe zu berechnen:

$$I_{ZM} = \frac{P_V}{V_{Zmax}}$$

P_V = Verlustleistung laut Datenblatt, V_{Zmax} = die jeweils maximale Zenerspannung.

Richtwerte zum minimalen Zenerstrom

Welcher Strom muß mindestens durch die Zenerdiode fließen, damit die Zenerspannung sicher im Bereich der Datenblattwerte liegt? Der Datenblattwert ist der oben genannte Teststrom I_{ZT} .

Ist I_{ZT} nicht bekannt oder geht es nur um Überschlagsrechnungen zwecks Vorauswahl von Bauelementen, kann man ansetzen:

$$I_{Zmin} \approx 0,2 \dots 0,25 \cdot I_{ZM}$$

$$I_{Zmax} = 4 \dots 5 \cdot I_{Zmin}$$

Für sehr überschlägige Rechnungen genügt gelegentlich auch ein Faktor von 0,1 bzw. 10.

Je stärker der Strom, desto weiter liegt der Arbeitspunkt im steilen Bereich der Kennlinie, desto besser die Spannungsstabilisierung.

Was spricht aber dagegen, den Zenerstrom dem zulässigen Maximum (I_{ZM}) anzunähern?

- Die Tatsache der Stromaufnahme an sich (Verlustleistung).
- Die Erwärmung der Zenerdiode (Temperaturgang).

Wo der Durchbruch einsetzt

Der Übergang vom Sperr- zum Durchbruchsbereich wird gelegentlich durch Angabe eines sog. Kniestroms I_{ZK} charakterisiert.

Die Zenerdiode in Flußrichtung

Sie verhält sich im Grunde wie eine gewöhnliche Siliziumdiode. Manche Typen weisen aber eine höhere Flußspannung auf (vgl. Abb. 1.26).

Der differentielle oder dynamische Widerstand r_z

Dieser Datenblattwert gibt die Steigung der Kennlinie an:

$$r_z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

Hieraus ergibt sich die maximale Änderung der Zenerspannung gemäß

$$\Delta U_Z = r_z \cdot \Delta I_Z$$

Partnumber	Zener Voltage Range			Dynamic Resistance		Test Current	Temperature Coefficient of Zener Voltage		Reverse Leakage Current	
							TK _{VZ} @ I _{ZT}		I _R @ V _R	
	V _Z @ I _{ZT}			r _{zj} and TK _{VZ} @ I _{ZT}		I _{ZT}	%K		μA	V
	V			Ω		mA				
	min	typ	max	typ	max		min	max	max	
BZG03C10	9.4	10	10.6	2	4	50	0.05	0.09	10	7.5
BZG03C11	10.4	11	11.6	4	7	50	0.05	0.1	4	8.2
BZG03C12	11.4	12	12.7	4	7	50	0.05	0.1	3	9.1
BZG03C13	12.4	13	14.1	5	10	50	0.05	0.1	2	10
BZG03C15	13.8	15	15.6	5	10	50	0.05	0.1	1	11
BZG03C16	15.3	16	17.1	6	15	25	0.06	0.11	1	12
BZG03C18	16.8	18	19.1	6	15	25	0.06	0.11	1	13
BZG03C20	18.8	20	21.2	6	15	25	0.06	0.11	1	15
BZG03C22	20.8	22	23.3	6	15	25	0.06	0.11	1	16
BZG03C24	22.8	24	25.6	7	15	25	0.06	0.11	1	18
BZG03C27	25.1	27	28.9	7	15	25	0.06	0.11	1	20
BZG03C30	28	30	32	8	15	25	0.06	0.11	1	22
BZG03C33	31	33	35	8	15	25	0.06	0.11	1	24
BZG03C36	34	36	38	21	40	10	0.06	0.11	1	27
BZG03C39	37	39	41	21	40	10	0.06	0.11	1	30
BZG03C43	40	43	46	24	45	10	0.07	0.12	1	33
BZG03C47	44	47	50	24	45	10	0.07	0.12	1	36
BZG03C51	48	51	54	25	60	10	0.07	0.12	1	39

Abb. 1.25 Datenblattbeispiel 1 (Quelle: Vishay).

NTE Type Number	Nominal Zener Voltage $V_z @ I_{zt}$	Zener Test Current (I_{zt})	Maximum Dynamic Impedance			Maximum Leakage Current $I_R @ V_R$		Max DC Zener Current (I_{zm})	Max Forward Voltage $V_F @ I_F$	
			$Z_{zt} @ I_{zt}$	$Z_{zk} @ I_{zk}$		μA	Volts		mA	Volts
	Volts	mA	Ω	Ω	mA	μA	Volts	mA	Volts	mA
NTE5094A	87	2.9	225	3000	0.25	5	65.7	-	1.2	200
NTE5095A	91	2.8	250	3000	0.25	5	69.2	-	1.2	200
NTE5096A	100	2.5	350	3000	0.25	5	76.0	-	1.2	200
NTE151A	110	2.3	600	5000	0.25	0.5	80	9.1	1.0	1A
NTE5097A	120	2.1	700	5000	0.25	0.5	90	8.3	1.0	1A
NTE5098A	130	1.9	800	5000	0.25	0.5	95	7.7	1.0	1A
NTE5099A	140	1.8	900	5000	0.25	0.5	105	7.1	1.0	1A
NTE5100A	150	1.7	1000	5000	0.25	0.5	110	6.6	1.0	1A
NTE5101A	160	1.6	1100	5000	0.25	0.5	120	6.3	1.0	1A
NTE5102A	170	1.5	1200	5000	0.25	0.5	130	5.9	1.0	1A
NTE5103A	180	1.4	1300	5000	0.25	0.5	140	5.6	1.0	1A
NTE5104A	190	1.3	1400	5000	0.25	0.5	150	5.3	1.0	1A
NTE5105A	200	1.3	1500	5000	0.25	0.5	160	5.0	1.0	1A

Abb. 1.26 Datenblattbeispiel 2 (Quelle: NTE). Für manche Typen ist der maximale Zenerstrom angegeben. Man achte zudem auf die Flußspannung.

Device*	Device Marking	Zener Voltage (Note 3)				Leakage Current		
		V_z (Volts)			$@ I_{zT}$	$I_R @ V_R$		
		Min	Nom	Max	μA	μA	Volts	
MMSZ4678T1G	CC	1.71	1.8	1.89	50	7.5	1	
MMSZ4679T1G	CD	1.90	2.0	2.10	50	5	1	
MMSZ4680T1G	CE	2.09	2.2	2.31	50	4	1	
MMSZ4681T1G	CF	2.28	2.4	2.52	50	2	1	
MMSZ4682T1G	CH	2.565	2.7	2.835	50	1	1	
MMSZ4683T1G	CJ	2.85	3.0	3.15	50	0.8	1	
MMSZ4684T1G	CK	3.13	3.3	3.47	50	7.5	1.5	
MMSZ4685T1G	CM	3.42	3.6	3.78	50	7.5	2	
MMSZ4686T1G	CN	3.70	3.9	4.10	50	5	2	
MMSZ4687T1G	CP	4.09	4.3	4.52	50	4	2	
MMSZ4688T1G	CT	4.47	4.7	4.94	50	10	3	
MMSZ4689T1G	CU	4.85	5.1	5.36	50	10	3	
MMSZ4690T1G/T3G	CV	5.32	5.6	5.88	50	10	4	
MMSZ4691T1G	CA	5.89	6.2	6.51	50	10	5	
MMSZ4692T1G	CX	6.46	6.8	7.14	50	10	5.1	
MMSZ4693T1G	CY	7.13	7.5	7.88	50	10	5.7	
MMSZ4694T1G	CZ	7.79	8.2	8.61	50	1	6.2	
MMSZ4695T1G	DC	8.27	8.7	9.14	50	1	6.6	
MMSZ4696T1G	DD	8.65	9.1	9.56	50	1	6.9	
MMSZ4697T1G	DE	9.50	10	10.50	50	1	7.6	
MMSZ4698T1G	DF	10.45	11	11.55	50	0.05	8.4	
MMSZ4699T1G	DH	11.40	12	12.60	50	0.05	9.1	
MMSZ4700T1G	DJ	12.35	13	13.65	50	0.05	9.8	
MMSZ4701T1G	DK	13.30	14	14.70	50	0.05	10.6	
MMSZ4702T1G	DM	14.25	15	15.75	50	0.05	11.4	

Abb. 1.27 Datenblattbeispiel 3 (Quelle: ON Semiconductor).

Device	V _Z (V) @ I _Z (Note 1)			Z _Z (Ω) @ I _Z (mA)		Z _{ZK} (Ω) @ I _{ZK} (mA)		I _R (μA) @ V _R (V)		T _C (%/°C)
	Min.	Typ.	Max.							
1N5221B	2.28	2.4	2.52	30	20	1,200	0.25	100	1.0	-0.085
1N5222B	2.375	2.5	2.625	30	20	1,250	0.25	100	1.0	-0.085
1N5223B	2.565	2.7	2.835	30	20	1,300	0.25	75	1.0	-0.080
1N5224B	2.66	2.8	2.94	30	20	1,400	0.25	75	1.0	-0.080
1N5225B	2.85	3	3.15	29	20	1,600	0.25	50	1.0	-0.075
1N5226B	3.135	3.3	3.465	28	20	1,600	0.25	25	1.0	-0.07
1N5227B	3.42	3.6	3.78	24	20	1,700	0.25	15	1.0	-0.065
1N5228B	3.705	3.9	4.095	23	20	1,900	0.25	10	1.0	-0.06
1N5229B	4.085	4.3	4.515	22	20	2,000	0.25	5.0	1.0	+/-0.055
1N5230B	4.465	4.7	4.935	19	20	1,900	0.25	2.0	1.0	+/-0.03
1N5231B	4.845	5.1	5.355	17	20	1,600	0.25	5.0	2.0	+/-0.03
1N5232B	5.32	5.6	5.88	11	20	1,600	0.25	5.0	3.0	0.038
1N5233B	5.7	6	6.3	7.0	20	1,600	0.25	5.0	3.5	0.038
1N5234B	5.89	6.2	6.51	7.0	20	1,000	0.25	5.0	4.0	0.045
1N5235B	6.46	6.8	7.14	5.0	20	750	0.25	3.0	5.0	0.05
1N5236B	7.125	7.5	7.875	6.0	20	500	0.25	3.0	6.0	0.058
1N5237B	7.79	8.2	8.61	8.0	20	500	0.25	3.0	6.5	0.062
1N5238B	8.265	8.7	9.135	8.0	20	600	0.25	3.0	6.5	0.065
1N5239B	8.645	9.1	9.555	10	20	600	0.25	3.0	7.0	0.068
1N5240B	9.5	10	10.5	17	20	600	0.25	3.0	8.0	0.075

Abb. 1.28 Datenblattbeispiel 4 (Quelle: Fairchild Semiconductor). Hier ist auch der Kniestrom angegeben.

NTE Type Number	Nom Zener Voltage (Note 1) V _Z @ I _{ZT}	Zener Test Current (I _{ZT})	Max DC Zener Current (Note 2) (I _{ZM})	Max Zener Impedance (Note 3)		Typical Temperature Coefficient α _{VZ}	Max Leakage Current I _R @ V _R	
				Z _{ZT} @ I _{ZT}	Z _{ZK} @ 0.25mA (I _{ZK})		μA	Volts
	Volts	mA	mA	Ohms	Ohms	%/°C	μA	Volts
5010T1	5.1	5	98	50	2050	+0.025	2.0	2.0
5011T1	5.6	5	89	25	1800	+0.035	2.0	3.0
5013T1	6.2	5	81	10	1300	+0.040	1.0	4.0
5019T1	10.0	5	50	15	600	+0.065	0.1	8.0
5021T1	12.0	5	42	22	600	+0.073	0.1	9.1

Note 1. Voltage measurement to be performed 20 seconds after application of the DC test current.

Note 2. The maximum zener current (I_{ZM}) shown is for the nominal voltages. The following formula can be used to determine the worst case current for any tolerance device:

$$I_{zm} = \frac{P}{V_{zm}}$$

Where V_{zm} is the high end of the tolerance specified and P is the rated power of the device.

Note 3. Zener impedance is derived from the 1kHz AC voltage which results when an AC current having an RMS value equal to 10% of DC zener current (I_{ZT} or I_{ZK}) is superimposed on I_{ZT} or I_{ZK}.

Abb. 1.29 Datenblattbeispiel 5 (Quelle: NTE) mit Anmerkungen zu den Meßbedingungen.

Types	V_{ZT}/I_{ZT}^*		r_{ZT}/I_{ZT}	I_{ZT}
	min (V)	max	max (Ω)	(mA)
P ZPY3V9	3.7	4.1	7	100
P ZPY4V3	4.0	4.6	7	100
P ZPY4V7	4.4	5.0	7	100
P ZPY5V1	4.8	5.4	5	100
P ZPY5V6	5.2	6.0	2	100
P ZPY6V2	5.8	6.6	2	100
ZPY6V8	6.4	7.2	2	100
P ZPY7V5	7.0	7.9	2	100
P ZPY8V2	7.7	8.7	2	100
P ZPY9V1	8.5	9.6	4	50
P ZPY10	9.4	10.6	4	50
ZPY11	10.4	11.6	7	50
P ZPY12	11.4	12.7	7	50
ZPY13	12.4	14.1	9	50
P ZPY15	13.8	15.8	9	50
ZPY16	15.3	17.1	10	25
ZPY18	16.8	19.1	11	25
ZPY20	18.8	21.2	12	25
P ZPY22	20.8	23.3	13	25
P ZPY24	22.8	25.6	14	25
P ZPY27	25.1	28.9	15	25
ZPY30	28	32	20	25
P ZPY33	31	35	20	25
P ZPY36	34	38	60	10
ZPY39	37	41	60	10
ZPY43	40	46	80	10
ZPY47	44	50	80	10
ZPY51	48	54	100	10
ZPY56	52	60	100	10
ZPY62	58	66	130	10
ZPY68	64	72	130	10
ZPY75	70	79	160	10
ZPY82	77	88	160	10
ZPY91	85	96	250	5
ZPY100	94	106	250	5

* Pulse test : $20\text{ms} \leq t_p \leq 50\text{ms}$ $\delta < 2\%$.

The regulation voltages are defined according to the E24 series.

P : Preferred Voltage

Abb. 1.30 Datenblattbeispiel 6 (Quelle: SGS-Thomson).