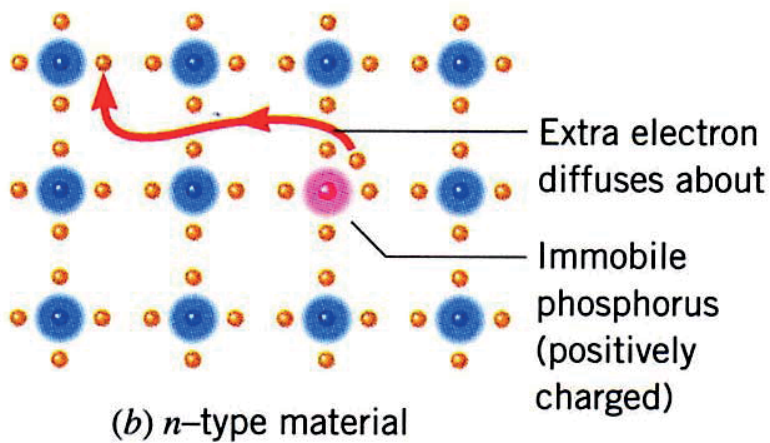
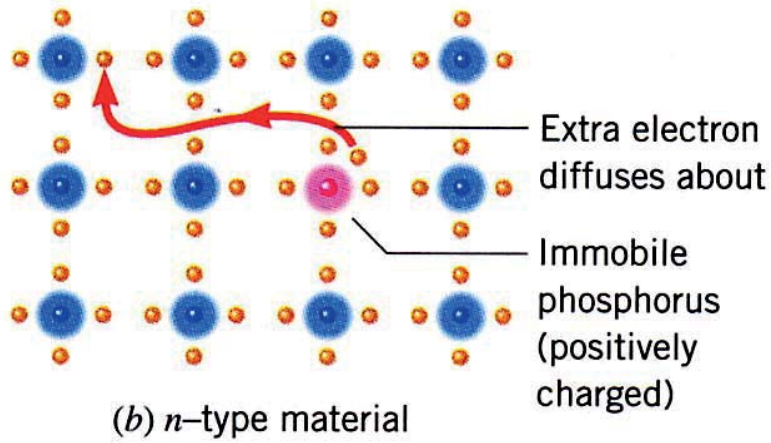


(a) Pure material

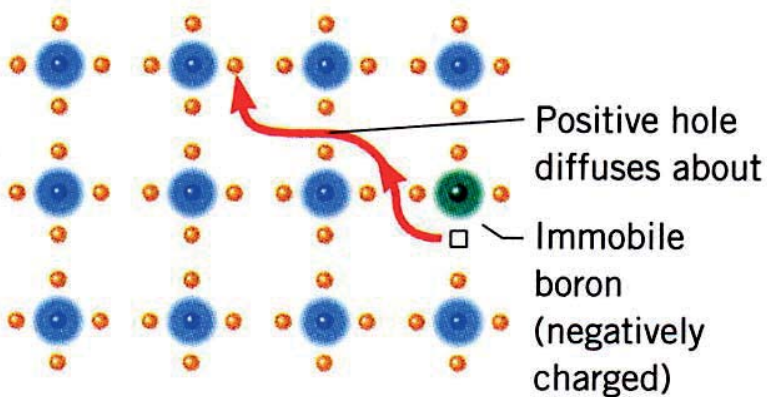
**Dotierung
von
Halbleitern**



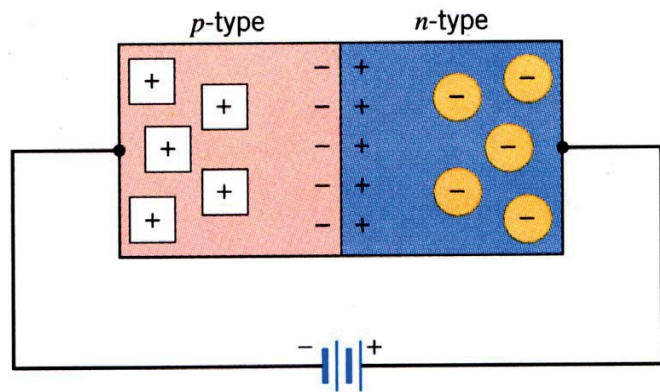
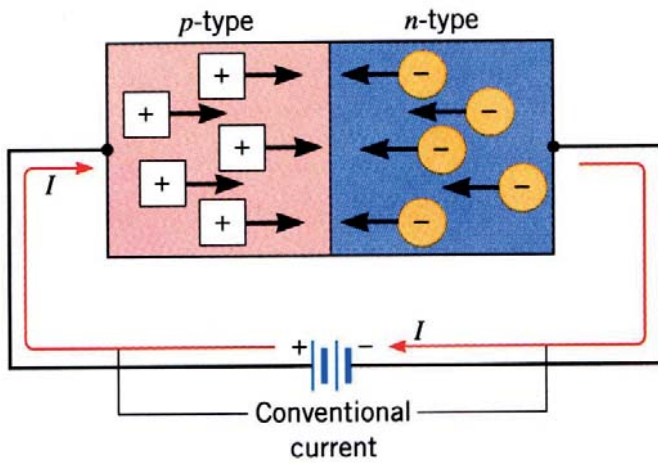
(b) *n*-type material



(b) *n*-type material

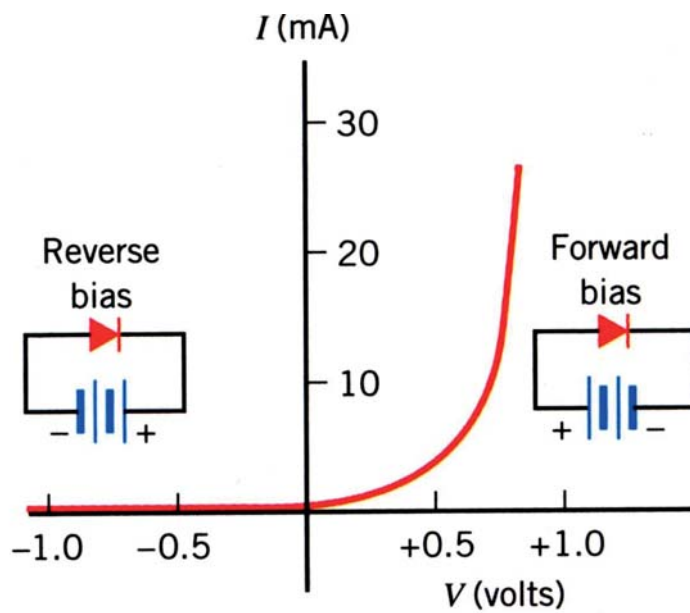


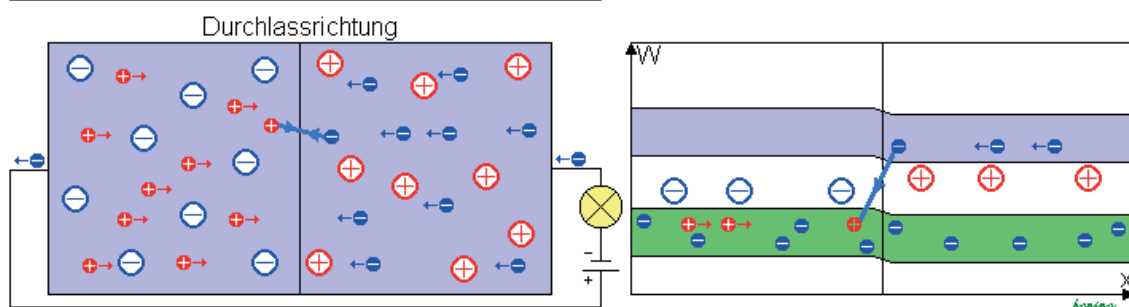
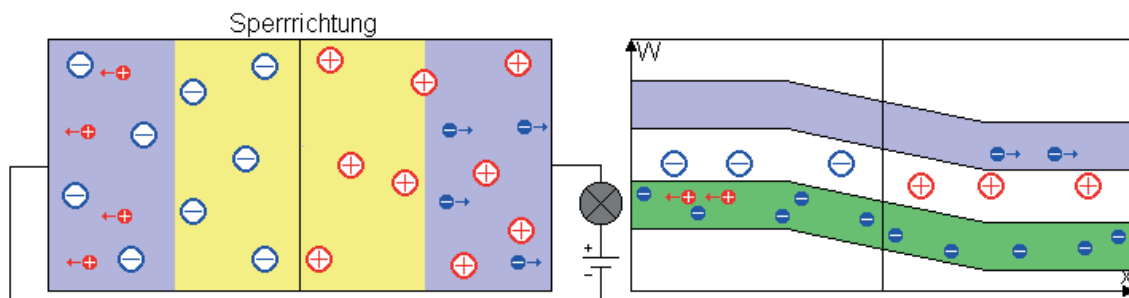
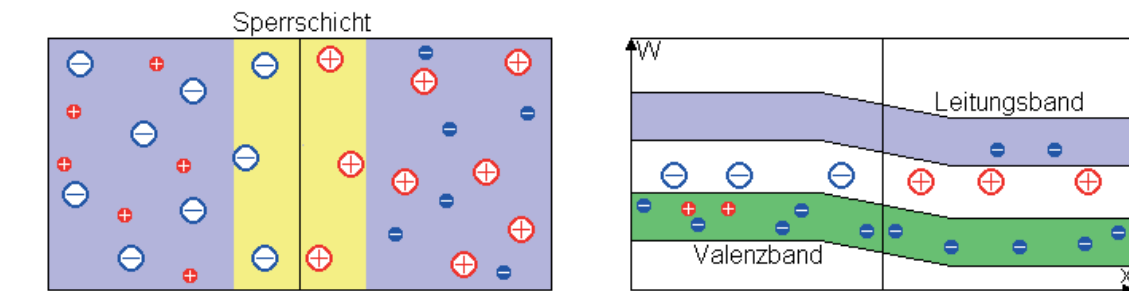
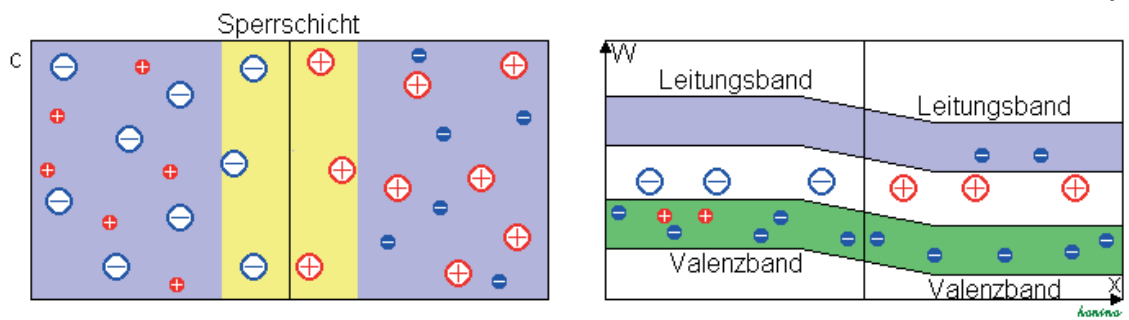
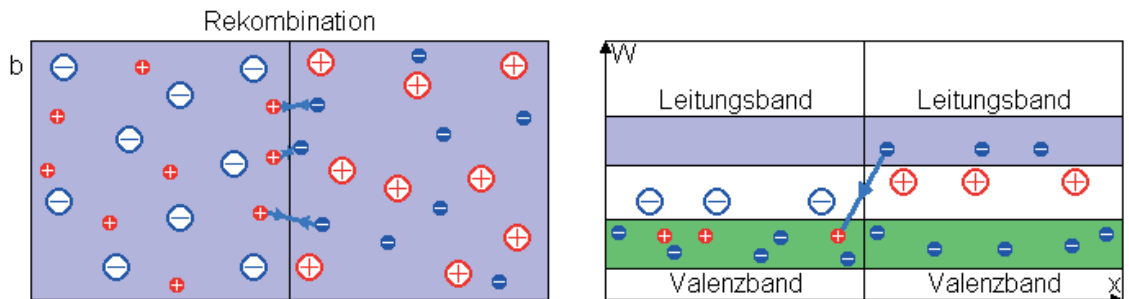
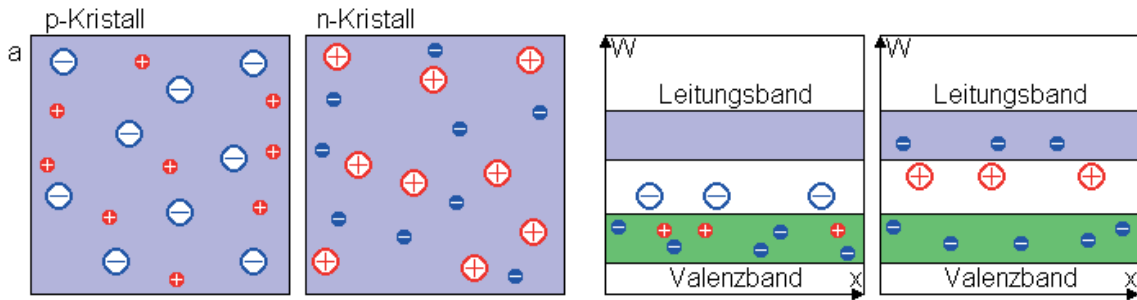
(c) *p*-type material



pn-Übergang

Diode





hainno

hainno

Diffusionsspannungen

$$U_D = U_T \ln \left(\frac{n_A n_D}{n_i^2} \right)$$

$$U_T = \frac{kT}{e}$$

$$n_i^2(T) = N_L N_V \exp \left(-\frac{W_G}{kT} \right)$$

T = 300 K	Ge	Si	GaAs
n_i^2/cm^{-6}	$5,8 \cdot 10^{26}$	$2,1 \cdot 10^{20}$	$3,2 \cdot 10^{12}$
n_A/cm^{-3}	10^{15}	10^{15}	10^{15}
n_D/cm^{-3}	10^{15}	10^{15}	10^{15}
U_D/V	0,18	0,56	1,0
n_A/cm^{-3}	10^{15}	10^{15}	10^{15}
n_D/cm^{-3}	10^{18}	10^{18}	10^{18}
U_D/V	0,36	0,73	1,18
n_A/cm^{-3}	10^{18}	10^{18}	10^{18}
n_D/cm^{-3}	10^{18}	10^{18}	10^{18}
U_D/V	0,53	0,90	1,35

- Die Diffusionsspannung hängt nur schwach von der Temperatur ab.
- Die Diffusionsspannung hängt nur schwach von den Dotierungen ab.
- Mit wachsender Dotierung geht $U_D \rightarrow E_g/e$

Ausdehnung der Raumladungszone

- Die Gesamtausdehnung der RLZ ist:

$$l = l_p + l_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0 U_D}{e} \left(\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_D} \right)}$$

- Die Ausdehnung teilt sich wie folgt auf den n-HL und den p-HL auf:

$$l_p = l \frac{n_D}{n_A + n_D} \quad l_n = l \frac{n_A}{n_A + n_D}$$

- Je nach Dotierung betragen die Ausdehnungen wenige Nanometer bis zu Mikrometern.
- Ist ein HL wesentlich schwächer dotiert als der andere, befindet sich die RLZ fast ausschließlich im schwach dotierten HL.

T = 300 K	Ge	Si	GaAs
ε_r	16	11,9	13,1
n_A/cm^{-3}	10^{15}	10^{15}	10^{15}
n_D/cm^{-3}	10^{15}	10^{15}	10^{15}
U_D/V	0,18	0,56	1,0
$l_p/\mu\text{m}$	0,4	0,6	0,85
$l_n/\mu\text{m}$	0,4	0,6	0,85
n_A/cm^{-3}	10^{15}	10^{15}	10^{15}
n_D/cm^{-3}	10^{18}	10^{18}	10^{18}
U_D/V	0,36	0,73	1,18
$l_p/\mu\text{m}$	0,8	1	1,3
$l_n/\mu\text{m}$	0,0008	0,001	0,0013
n_A/cm^{-3}	10^{18}	10^{18}	10^{18}
n_D/cm^{-3}	10^{18}	10^{18}	10^{18}
U_D/V	0,53	0,9	1,35
$l_p/\mu\text{m}$	0,02	0,02	0,03
$l_n/\mu\text{m}$	0,02	0,02	0,03

Herstellung von Dioden

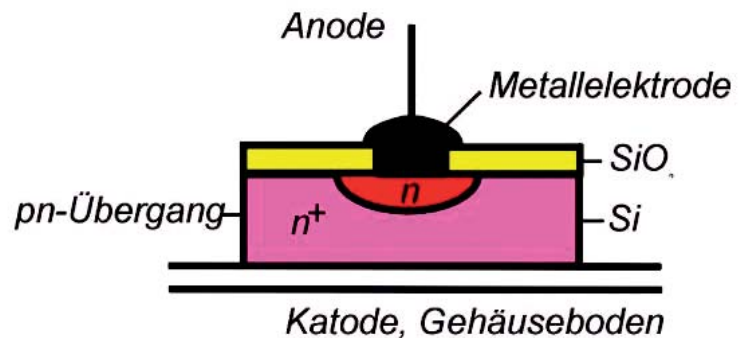
Dioden werden vorwiegend aus Silizium, aber auch noch aus Germanium und für den HF-Bereich aus GaAs hergestellt.

Der Aufbau einer Diode durch Zusammenfügen zweier unterschiedlich dotierter Halbleiter ist für kleine Dioden sehr aufwendig. In der Praxis wird die **Planar-Technik** verwendet. Hierbei wird durch Maskierung mit einer SiO-Schicht erreicht, daß im Dotierungsvorgang nur der gewünschte Bereich des Halbleiters in der Nähe der Oberfläche verändert wird.

Durch Anbringung eines metallischen Kontakts und Konfektionierung wird die verwendbare Diode vervollständigt.

Durch eine Vielzahl weiterer Effekte und Herstellungsprozesse werden sehr unterschiedliche Dioden produziert.

Schottky-Diode



Durchbruchmechanismen

Bei realen Dioden ergeben sich Abweichung von der idealen Kennlinie, die vor allem durch **Durchbrüche** bei angelegter Rückwärtsspannung entstehen. Die wichtigsten Durchbruchmechanismen sind

- **Thermischer Durchbruch** $I_S \neq 0 \Rightarrow U_r \cdot I_S = P_r > 0$

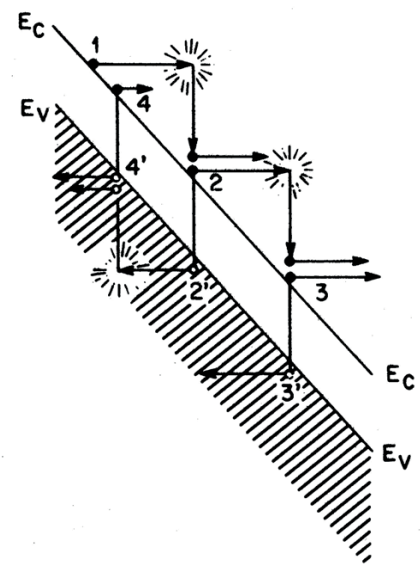
Diese Verlustleistung führt zu einer Erwärmung der Diode.

Damit ergibt sich eine weitere Erhöhung von I_S , wiederum höherem P_r etc. Letztendlich steigt der Strom und die Temperatur so stark an, daß es zu einer irreversiblen Zerstörung der Diode kommt.

- **Lawinendurchbruch**

Durch Stoßionisation entsteht ein lawinenartiger Anstieg des Stroms.

Der Vorgang ist reversibel und zerstört das Bauteil nicht (zumindest bei externer Lmitierung des Stroms und damit der Verlustleistung!)

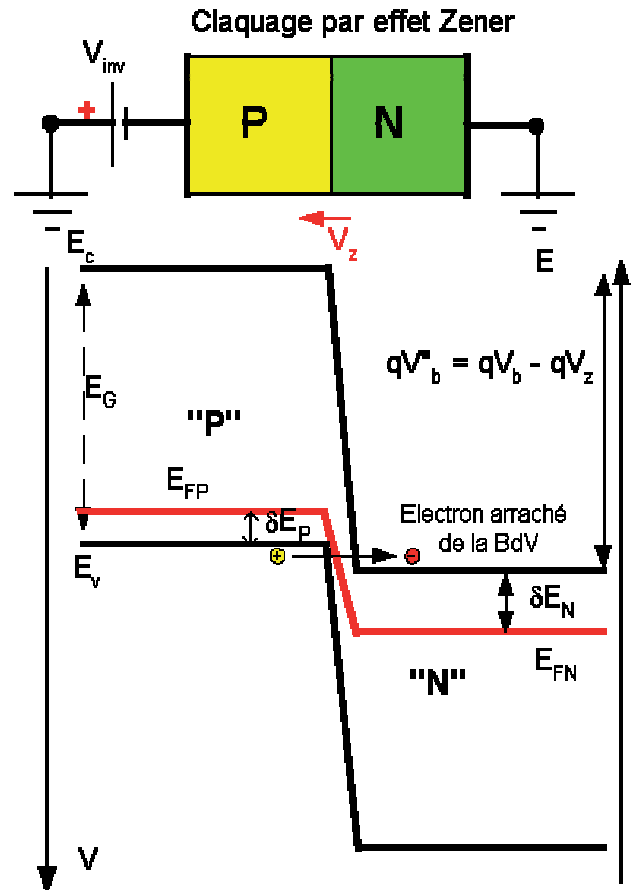


- **Tunneldurchbruch (Zener-Durchbruch)**

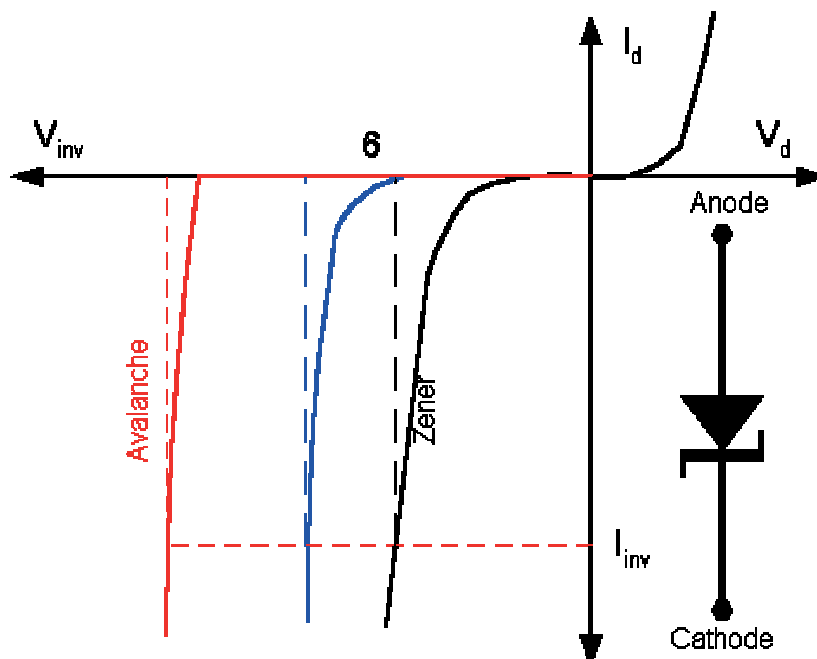
Bei ausreichend hoher Rückwärtsspannung wird die Barriere so steil und damit so dünn, daß eine (quantenmechanische) Durchtunnelung möglich wird.

Der Stromfluß hängt exponentiell von der Barriere ab!

Der Tunneldurchbruch ist reversibel.



Alle reversiblen Durchbruchmechanismen können in **Zener-Dioden** genutzt werden. Diese bieten die Möglichkeit, bei definierter Spannung Einsetzen von Strom zu erreichen.



In realen Bauteilen werden Lawinendurchbruch und Tunneldurchbruch kombiniert.

Speziell im Übergangsbereich - bei ca. 6,8 V Zener-Spannung - kann ein sehr kleiner differentieller Widerstand realisiert werden. Diese hohe Steilheit der Kennlinie ist für praktische Anwendungen nützlich.

Zener-Dioden können als Spannungsreferenz und zur Stabilisierung von Netzteilen verwendet werden.

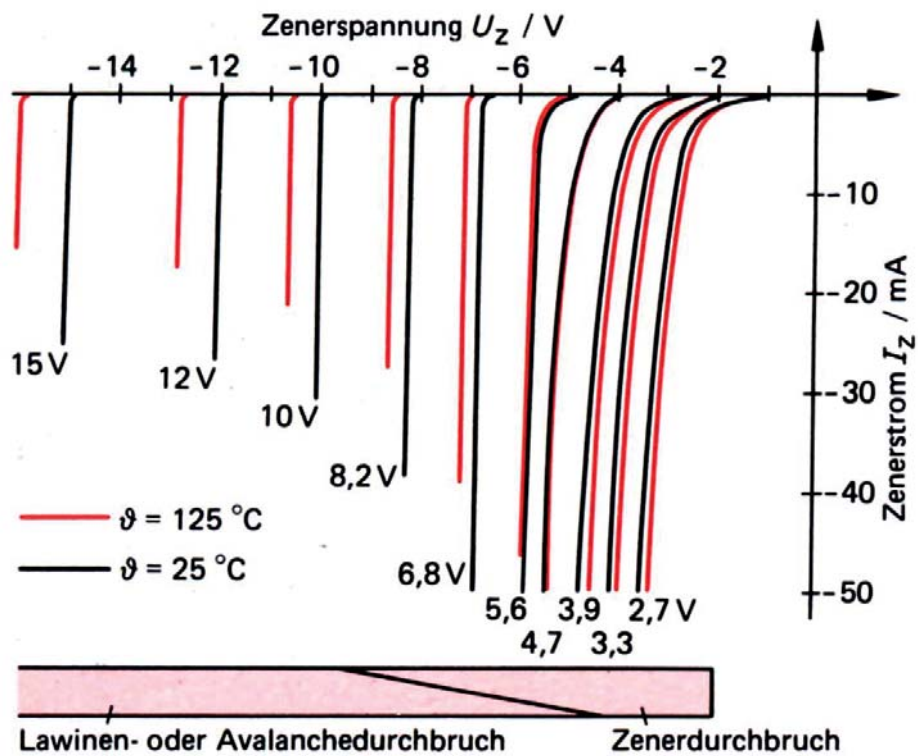


Bild 2-59. Kennlinien verschiedener Z-Dioden.

Diodentyp	Schaltdiode	Schottkydiode	Gleichrichterdiode	Schottky-Leistungsdiode	Z-Diode	Diac
Schaltzeichen						
Gleichstromkennlinie						
Nutzkennlinie, schematisch						
genutzter Effekt	Ventilwirkung	Ventilwirkung	Ventilwirkung	Ventilwirkung	Zener- oder Lawinendurchbruch	kontrollierter Durchbruch
innerer Aufbau	pn Silicium (Germanium)	Metall-n Silicium	pn Silicium	Metall-n Silicium	pn Silicium	pnp Silicium
Frequenzbereich	Gleichstrom Niederfrequenz Hochfrequenz	Gleichstrom bis Höchstfrequenz	Gleichstrom Netzfrequenz Niederfrequenz	Gleichstrom bis mittlere Frequenzen	Gleichstrom Niederfrequenzen	Netzfrequenz
besondere Eigenschaften	schnell, klein, kleiner Sperrstrom, kleiner Durchlaßwiderstand, preisgünstig	sehr schnell, klein, kleine Durchlaßspannung	hohe Sperrspannung, hoher Durchlaßstrom, niederohmig, preisgünstig	sehr schnell, kleine Sperrspannung, hoher Durchlaßstrom, kleine Verluste	kontrollierter Durchbruch in Sperrichtung	Kennlinie mit Bereichen negativen Widerstandes
Anwendungsbereich	Universaldiode zum Schalten, zum Begrenzen, zum Entkoppeln, für Logikschaltungen	Hochfrequenzgleichrichter, Gleichrichter mit kleiner Schleusenspannung, schnelle Logikschaltungen	Gleichrichter bei Netzfrequenz für kleine und große Spannungen und Ströme, auch für Schaltregler bei höheren Frequenzen	Gleichrichter bei hohen Frequenzen, hohen Strömen, aber kleinen Spannungen, Freilaufdiode	Spannungsstabilisierung, Spitzenspannungsbegrenzung	Triggerdiode zur sicheren Zündung bei einfachen Triacschaltungen zur Phasenanschnittsteuerung.

Fotodiode	Kapazitätsdiode	pin-Diode	Step-Recovery-Diode	Tunnel diode	Backward-Diode
lichtstärke-abhängiger Sperrstrom	spannungs-abhängige Sperrschichtkapazität	strom-abhängiger Durchlaßwiderstand	der Sperrstrom endet abrupt	Tunnel-effekt	Ventil-wirkung
pn pin Metall-n Silicium	pn Silicium Galliumarsenid	pin Silicium	pn Silicium	pn Germanium hoch dotiert	pn Germanium hoch dotiert
Gleichstrom bis Hochfrequenz	Hochfrequenz				
Sperrstrom abhängig von der Beleuchtung der Sperrschicht. Avalanche-Effekt	Sperrschichtkapazität ist spannungsabhängig, hohe Güte	Durchlaßwiderstand ist stromabhängig, hohe Güte	abrupt endende Sperrverzögerung Sperrverzögerungszeit typenabhängig	Kennlinie mit negativem Widerstandsbereich	keine Schleusenspannung, sehr kleine Sperrspannung
Messung der Lichtstärke in einem großen Dynamikbereich, Datenempfänger am Ende einer Glasfaserstrecke	spannungsgesteuerte Abstimmung von Schwingkreisen für Frequenzfilter, Synthesizer, Phasenschieber	stromgesteuerte analoge Dämpfungsglieder für Hochfrequenz, stromgesteuerte Schalter für Hochfrequenz	Frequenzvervielfacher bis in den GHz-Bereich mit sehr geringem Aufwand	sehr schnelle Triggerdiode Entdämpfung von Schwingkreisen, Höchsthochfrequenzoszillator	Gleichrichter für sehr kleine Hochfrequenzspannungen