

Inhaltsverzeichnis

1 Elektrische Leitung

1.1	Das Bändermodell	1
1.2	Metalle	2
1.3	Isolatoren	2
1.4	Halbleiter	2

2 Bauteile und ihre Eigenschaften

2.1	Si- und Ge-Dioden	6
2.2	Z-Dioden	7
2.3	Temperaturabhängige Widerstände	7
2.3.1	Kaltleiterwiderstand (PTC)	8
2.3.2	Heißleiterwiderstand (NTC)	8
2.4	Spannungsabhängige Widerstände	9
2.5	Optoelektrische Bauelemente	9
2.5.1	Photowiderstand	9
2.5.2	Photodiode	9
2.5.3	Phototransistor	10
2.5.4	Leuchtdiode	10
2.6	Druckabhängige Bauelemente	10
2.7	Supraleiter	11

1 Elektrische Leitung

1.1 Das Bändermodell

Die Eigenschaften von Festkörpern lassen sich im Bändermodell anschaulich erklären. Festkörper weisen eine strenge Anordnung der Atome in einem Gitter auf. Innerhalb einer solchen Kristallstruktur kommt es zu einer Reihe von Wechselwirkungen zwischen den benachbarten Atomen. Liegt nur ein einziges Atom vor, besetzen dessen Elektronen scharfe Energieniveaus. Bereits bei der Annäherung zweier Atome kommt es in Folge der Wechselwirkungen zu einer Aufspaltung der scharfen Energieniveaus in Unterniveaus. Im Festkörper wechselwirken eine Vielzahl von Elektronen miteinander, wodurch immer mehr Energieniveaus entstehen, die als **Energiebänder** zusammengefasst werden. Zwischen diesen Bändern liegen **Energie-lücken** E_g . Die Energiebänder sind unterschiedlich breit, was darauf zurückzuführen ist, dass die einzelnen Elektronen unterschiedlich stark an ihr Atom gebunden sind. Elektronen nahe dem Atomkern erfahren eine stärkere Bindung und unterliegen auf Grund dessen weniger Wechselwirkungen, was schmalere Energiebänder zur Folge hat. Mit zunehmendem Abstand vom Atomkern lässt die Bindung der Elektronen an das Atom nach und sie wechselwirken stärker mit den Nachbaratomen - in Folge dessen verbreitern sich die Bänder. Im Festkörper gibt es voll besetzte, teilweise besetzte und leere Energiebänder, was für den Prozess der Leitung ausschlaggebend ist. Voll besetzte Bänder können genauso wie leere Bänder nicht zum Ladungstransport und damit zur elektrischen Leitung beitragen. Um Energie aus einem elektrischen Feld aufnehmen zu können, sind nämlich freie Energieniveaus im Band nötig, was in beiden Fällen nicht gegeben ist. Erst ein nur teilweise besetztes Band macht Ladungstransport möglich. Das energetisch tiefste Band, das nicht voll besetzt ist, wird aus diesem Grund als **Leitungsband** bezeichnet. Das darunterliegende Band heißt **Valenzband** und ist voll besetzt. Elektronen in diesem Band sind die Valenzelektronen, die sich auf Grund

der starken Wechselwirkungen denen sie unterliegen nicht mehr einem bestimmten Atom zuordnen lassen. Eine wichtige Größe in Festkörpern ist die Fermi-Energie E_F , die den Energiewert angibt, für den die Besetzungswahrscheinlichkeit für Elektronen 1/2 ist. Mit Hilfe von Lage und Besetzung der Bänder ist es nun möglich, die Leitungseigenschaften von Leitern (Metallen), Halbleitern und Isolatoren zu erklären.

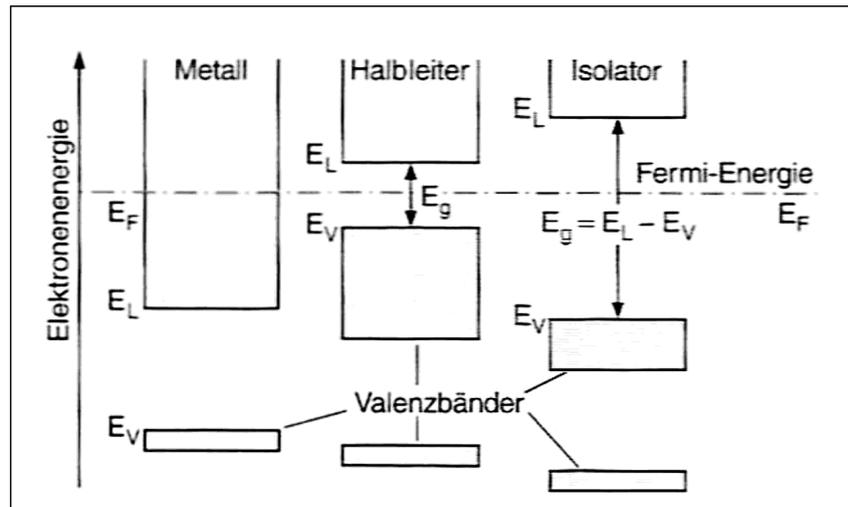


Abbildung 1: Das Bändermodell

1.2 Metalle

Bei Metallen wird in der Regel nicht zwischen Valenz- und Leitungsband unterschieden. Ihr Leitungsband ist bereits bei sehr tiefen Temperaturen teilweise besetzt, wodurch sie sich als gute Leiter auszeichnen. Im mehrwertigen Metall kommt es zu einer Überlappung der höchsten Energiebänder, wodurch bereits kleine angelegte elektrische Feldstärken genügen, um ein Elektron in den nächsthöheren Zustand anzuheben. In Folge dessen sind stets freie Elektronen vorhanden, die zum Ladungstransport beitragen können. Die Anzahl der freien Elektronen ist abhängig vom jeweiligen Werkstoff, für Kupfer und Silber betragen sie beispielsweise:

- Kupfer: $n_{Cu} \approx 8,47 \cdot 10^{22}$ Elektronen/cm³
- Silber: $n_{Ag} \approx 5,87 \cdot 10^{22}$ Elektronen/cm³

Die elektrische Leitfähigkeit nimmt allerdings ab wenn die Temperatur ansteigt, da dann der Effekt der Streuung zunimmt und die Elektronen weniger beweglich sind.

1.3 Isolatoren

Das Leitungsband des Isolators ist nicht besetzt und der Bandabstand zwischen Valenz- und Leitungsband so groß ($E_g > 3\text{eV}$), dass Valenzelektronen diesen auch bei hohen zugeführten Energiebeträgen nicht erreichen können. In Folge dessen sind keine freien Elektronen vorhanden, die einen Ladungstransport ermöglichen könnten.

1.4 Halbleiter

Halbleiter sind Stoffe mit der Eigenschaft, dass ihre elektrische Leitfähigkeit zwischen der von Leitern und Isolatoren liegt. Im reinen Halbleiter ist das Valenzband bei sehr tiefen Temperaturen voll besetzt, während das Leitungsband leer ist. Dementsprechend ist die Leitfähigkeit Null bei $T = 0$ K. Zwischen den beiden Bändern liegt eine Bandlücke in der Größenordnung $1\text{eV} < E_g < 3\text{eV}$. Diese ist so klein, dass die Elektronen mit steigender Temperatur aus dem Valenz- in das Leitungsband gelangen können, da sie eine thermische Anregung erfahren. Somit kommt es zum einen zur Elektronenleitung im Leitungsband, gleichzeitig ist an den frei gewordenen Stellen im Valenzband eine sogenannte **Löcherleitung** möglich. Die hinterlassene Lücke kann nämlich von einem benachbarten Elektron besetzt werden, welches wiederum ein Loch hinterlässt. Die Anzahl der freien Elektronen und Löcher ist eine Funktion der Temperatur T , man spricht von Eigenleitung.

$$n_i = p_i = f(T) \quad (1)$$

Diese Art der Leitfähigkeit kann folgende Gründe haben:

- **Leitfähigkeit durch Verunreinigungen:** Auch für hohe Reinheiten können Fremdatome vorhanden sein, die freie Ladungsträger in den Werkstoff einbringen.
- **Leitfähigkeit durch Aufbrechen der Kristallbindungen:** Mit dem Anstieg der Temperatur steigt auch die mittlere Energie der Elektronen. Nimmt ein Elektron eine Energie $E > E_g$ auf, kann es vom Valenzband ins Leitungsband gelangen. Mit steigender Temperatur wächst die Zahl der Elektronen, die die Bandlücke überwinden und es sind mehr freie Elektronen im Halbleiter anzutreffen.
- **Oberflächen-Leitfähigkeit:** An der Oberfläche des Stoffes fehlen die Bindungspartner der Valenzelektronen, da die Atome hier keine Nachbarn haben. Bei Zimmertemperatur (20°C) sind die Werte der Eigenleitfähigkeit für Silizium und Germanium:

$$\chi_i(\text{Si}) = 1 / (2 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}) \quad (2)$$

$$\chi_i(\text{Ge}) = 1 / (40 \Omega \cdot \text{cm}) \quad (3)$$

Silizium (Si) mit einer Bandlücke von $E_g = 1,1 \text{ eV}$ stellt in kristalliner Form die Grundsubstanz zur Herstellung von Halbleitern dar. Weitere gängige Materialien sind Germanium, Selen, Galliumarsenid, Indiumphosphid und Indiumantimonid. Wichtig ist die Reinheit des Kristalls, da Verunreinigungen die Eigenschaften des Stoffes stark beeinflussen können. Anhand von Silizium kann die Struktur der Halbleiterkristalle nachvollzogen werden: Ein Si-Atom hat 14 Elektronen und weist die Eigenschaft auf, dass es vierwertig ist. Das heißt auf der äußeren Schale befinden sich vier Valenzelektronen, die für Bindungen mit benachbarten Atomen verantwortlich sind. Da die restlichen Schalen jeweils voll gefüllt sind, tragen diese nicht zu den Bindungseigenschaften von Silizium bei.

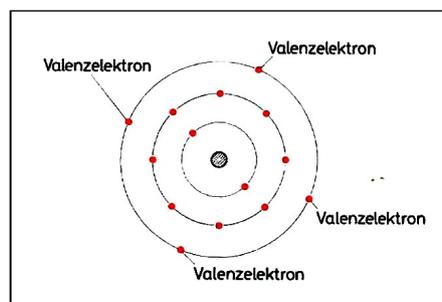


Abbildung 2: Modell eines Si-Atoms

Dotierung

Um verschiedene elektronische Eigenschaften erzielen zu können, sind Halbleiter nötig, die einen Überschuss einer Ladungsträgersorte aufweisen. Um dies zu realisieren, muss eine sogenannte Dotierung durchgeführt werden: ein Einbau von Fremdatomen. Der reine Kristall wird damit gezielt verunreinigt. Unterschieden wird zwischen n-dotierten und p-dotierten Halbleitern, je nachdem, ob mehr Elektronen oder mehr Löcher vorhanden sind.

- **n-Dotierung:** Ein n-Typ Halbleiter verfügt im thermodynamischen Gleichgewicht über mehr freie Elektronen als Löcher. Zur Herstellung eines solchen Halbleiters wird in den Siliziumkristall ein fünfwertiges Element, beispielsweise Phosphor, eingebaut. Dies hat zur Folge, dass eines der fünf Valenzelektronen des Phosphors keine Bindung eingeht. Jedes eingebaute Phosphoratom bringt somit ein freies Elektron in den Werkstoff ein. Das Phosphoratom ist ein sogenannter **Donator**, da es ein Elektron abgibt. Obwohl ein dotierter Kristall freie Elektronen enthält, ist er nach wie vor elektrisch neutral, da es zu jedem Elektron eine Protonenladung im Kern des eingebauten Phosphoratoms gibt.

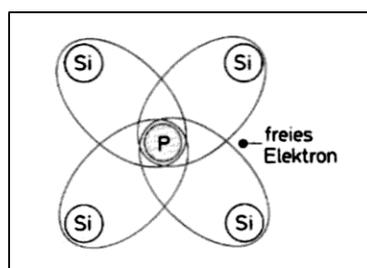


Abbildung 3: n-Dotierung durch Einbau eines 5-wertigen Phosphoratoms ins Kristallgitter

Legt man eine Spannung an ein n-dotiertes Stück Silizium (n-Silizium), fließt ein Elektronenstrom: man spricht von n-Leitung. Durch den Einbau eines Donators entstehen im Bändermodell betrachtete Energieniveaus dicht unterhalb des Leitungsbandes, die bereits von Elektronen mit geringerer thermischer Energie erreicht werden können.

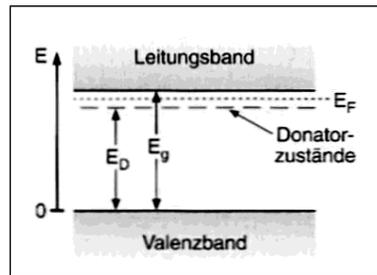


Abbildung 4: Donatorniveaus im Bandschema

• **p-Dotierung:** Ein p-Typ dotierter Halbleiter hat im thermischen Gleichgewicht einen Überschuss an Löchern. p-dotierte Halbleiter entstehen durch Dotieren mit einem dreiwertigen Element wie beispielsweise Aluminium. Da solch ein dreiwertiges Element schnell ein viertes Elektron aufnimmt, wirkt es als **Akzeptor**. Zur Folge hat dies ein negativ ionisiertes Aluminiumatom, sowie ein Loch an der Stelle, an der sich das aufgenommene Elektron vorher befand. Der Halbleiter an sich bleibt nach außen weiterhin neutral.

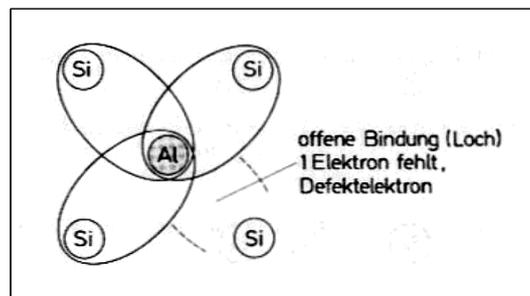


Abbildung 5: p-Dotierung durch Einbau eines 3-wertigen Atoms ins Kristallgitter

An die Stelle des fehlenden Elektrons kann ein anderes Elektron gelangen und wiederum ein Loch hinterlassen. Im Valenzband findet also eine Wanderung von Löchern statt, die einen Beitrag zum Ladungstransport liefert. Der Einbau eines Akzeptors hat zur Folge, dass ein Energieniveau kurz oberhalb des Valenzbandes entsteht, das von den Elektronen leicht erreichbar ist. Im Valenzband bleiben freie Plätze zurück, es kommt zur p-Leitung.

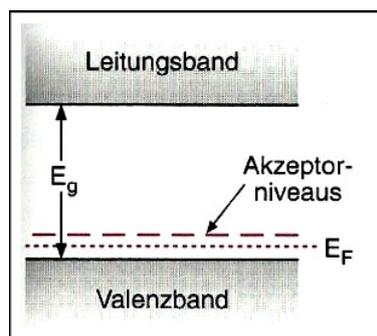


Abbildung 6: Akzeptorniveaus im Bandschema

pn-Übergang:

• **Ohne äußere Spannung:** Den Grenzbereich zwischen p-leitender und n-leitender Zone nennt man pn-Übergang. Auf Grund der Wärmeschwingungen kommt es zur Wanderung von Elektronen von der n-Zone in die p-Zone. Das freie Elektron eines Phosphoratoms am pn-Übergang wandert über die Grenze in die p-Zone und wird dort in die offene Bindung eines Aluminiumatoms gezwungen. Nun fehlt dem Phosphoratom ein Elektron und es ist in Folge dessen positiv ionisiert. Das Aluminiumatom hat im Gegensatz dazu ein Elektron zu viel und ist damit negativ ionisiert. Dieser Vorgang wiederholt sich überall entlang der Grenzschicht, so dass im Grenzbereich der n-Zone viele positiv ionisierte Phosphoratomkerne und im Grenzbereich der p-Zone viele negativ geladene Aluminiumatome anzutreffen sind. Auf beiden Seiten

entsteht eine **Raumladungszone**, in der ein elektrisches Feld herrscht. Seine Richtung zeigt von den positiven Ladungen zu den negativen Ladungen.

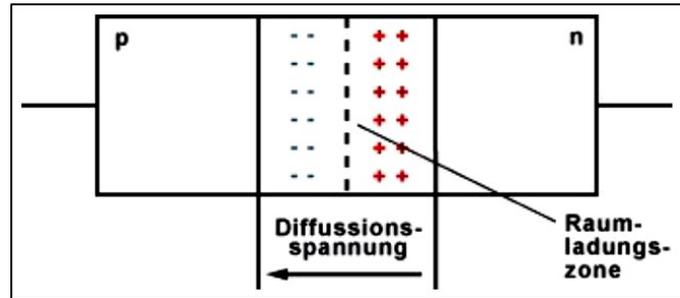


Abbildung 7: Die Raumladungszone ohne äußeres Feld

Die Zonen abseits der Raumladungszone sind weiterhin neutral. Ein Elektron, das von der neutralen n-Zone her in die Raumladungszone eindringt, kann diese nur mit einer sehr großen Anfangsgeschwindigkeit überwinden, da es vom elektrischen Feld gebremst wird. Ist seine Anfangsgeschwindigkeit zu klein, wird es zurück in die n-Zone geschoben. Die Ladungsträgerdiffusion endet erst, wenn sich die Kraftwirkung auf die Elektronen durch das elektrische Gegenfeld mit der der Wärmeschwingungen ausgleicht. Dieser Gleichgewichtszustand ist maßgebend für die Breite der Raumladungszone, die damit stark von der Temperatur abhängt. Mit steigender Temperatur verbreitert sich die Raumladungszone. Durch die Diffusion der Ladungsträger wird eine Spannung erzeugt, die sogenannte **Diffusionspannung**. Typische Werte der Diffusionsspannungen U_{dif} von Silizium und Germanium bei Raumtemperatur (20 °C) sind:

Silizium: $U_{dif} \approx 0,6 \text{ V bis } 0,7 \text{ V}$

Germanium: $U_{dif} \approx 0,3 \text{ V}$

• **Mit äußerer Spannung:** Wird eine äußere Spannung an den Halbleiter angeschlossen, sind zwei Möglichkeiten der Polung gegeben:

(a) Minus an der p-Zone: Durch Anlegen einer Spannung mit dem Minuspol an der p-Zone werden Elektronen vom Minuspol der Spannungsquelle in die p-Zone gedrückt. Die offenen Bindungen, die als Löcher bezeichnet wurden, nehmen die Elektronen auf. Die Raumladungszone wird insgesamt verbreitert. Das Feld in ihrem Inneren erfährt somit eine Verstärkung, so dass der Aufenthalt beweglicher Ladungsträger unmöglich wird. Selbst ein Elektron mit hoher Anfangsgeschwindigkeit kann die Raumladungszone nicht mehr durchqueren, da es zu stark gebremst wird. Die Raumladungszone „sperrt“ die Elektronen, weshalb sie bei Polung „Minus an p-Zone“ auch **Sperrschicht** genannt wird. Es ist kein Stromfluss möglich. Dennoch ist der Widerstand eines so gepolten pn-Übergangs endlich, was darauf schließen lässt, dass es trotz allem noch einzelnen Ladungsträgern gelingt, die Sperrschicht zu durchqueren. Eine Erklärung für diesen Leckstrom liefert die Eigenleitfähigkeit, die auf das Aufbrechen der Kristallbindungen durch Wärmeschwingungen zurückzuführen ist. Hierbei entstehen freie Elektronen, die an ihrer ursprünglichen Position Löcher hinterlassen. In der n-Zone können dadurch Löcher registriert werden, während sich in der p-Zone wenige freie Elektronen aufhalten. Sie werden als **Minoritätsträger** bezeichnet. Diese Minoritätsträger können die Sperrschicht durchqueren.

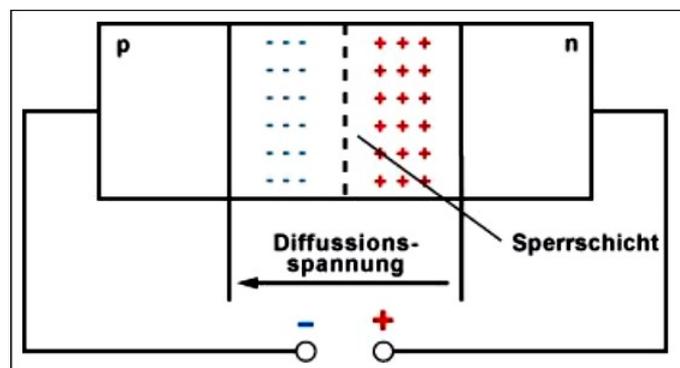


Abbildung 8: Diode in Sperrichtung

(b) Plus an der p-Zone: Bei dieser Polung drückt der Minuspol der Spannungsquelle Elektronen in die n-Zone. In Folge dessen wird die Raumladungszone abgebaut und ein Stromfluss im pn-Übergang ist

möglich, da die angelegte Spannung dem Drift-Feld im Inneren entgegen wirkt. Somit ist die Polung „Plus an der p-Zone“ die **Durchlassrichtung**.

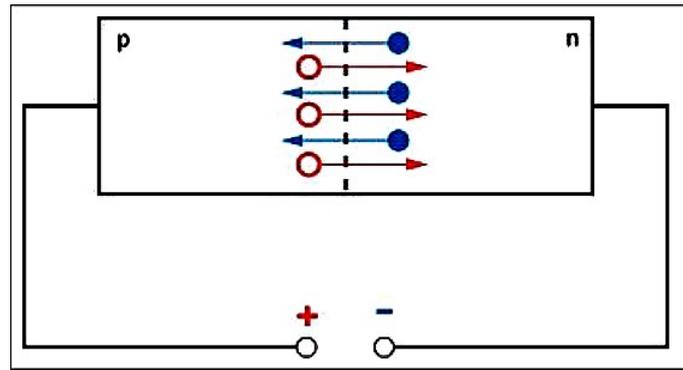


Abbildung 9: Diode in Durchlassrichtung

2 Bauteile und ihre Eigenschaften

2.1 Si- und Ge-Dioden

Dioden bestehen aus einem pn-Übergang, der meist aus Silizium gefertigt ist. Das Halbleiterbauelement verfügt über zwei Anschlüsse, welche mit Anode und Kathode bezeichnet werden. Kennzeichnend für die Diode ist ihre Eigenschaft, Strom nur in eine Richtung durchzulassen - je nach Polung des pn-Übergangs. Eher veraltet aber dennoch gängige Typen sind solche aus Germanium, die im Gegensatz zu Silizium-Dioden eine kleine Durchlassspannung aufweisen. Das Schaltzeichen einer Diode hat die Form eines Dreiecks, wobei die Dreieckspitze die technische Stromrichtung in Durchlassrichtung anzeigt. Es werden drei Betriebsarten unterschieden, die am besten an Hand der Dioden-Kennlinie aufzuzeigen sind. Diese kommt zustande, wenn an die Diode eine Spannung U_D angelegt und der Strom I_D gemessen wird. Dabei gilt, dass der Strom von Anode zu Kathode positiv definiert wird.

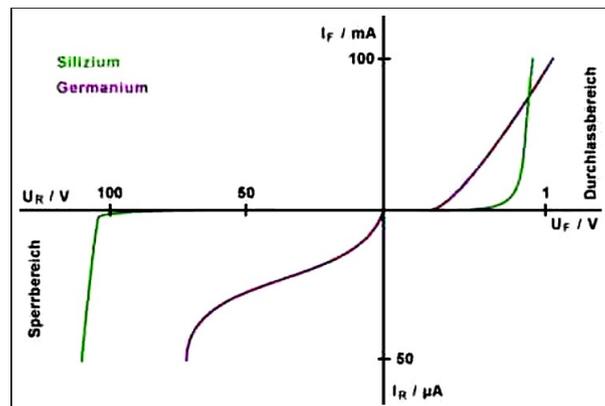


Abbildung 10: Kennlinien einer Si- und einer Ge-Diode

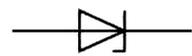
- **Durchlassbereich:** Eine Diode wird im Durchlassbereich betrieben, wenn die Spannung $U_D > 0$ V angelegt ist. Somit muss die Anode am Pluspol angeschlossen sein. Liegt eine sehr kleine Spannung an, so ist lediglich ein geringer Strom messbar, da die Sperrschicht noch nicht abgebaut ist. Mit zunehmender Spannung nimmt der Strom zunächst geringfügig zu. Ab einem bestimmten Spannungswert, der sogenannten Schwellenspannung, steigt der Strom exponentiell an. Si-Dioden haben eine Schwellenspannung von $U = 0,7$ V, Ge-Dioden weisen einen niedrigeren Wert von $U = 0,3$ V auf. Im Kennlinienfeld kann der Durchlassbereich stets im 1. Quadranten beobachtet werden. Verlängert man den steilen Abschnitt der Kurve auf die x-Achse, erhält man die ungefähre Schwellenspannung des Bauteils.
- **Sperrbereich:** Für $-U < U_D < 0$ V sperrt die Diode - dies ist der Fall, wenn die Kathode mit dem Plus-Pol verbunden ist. Es fließt lediglich ein vernachlässigbar kleiner Strom. Wird die Spannung betragsmäßig

erhöht, steigt der Sperrstrom an der Ge-Diode leicht an, während der der Si-Diode ungefähr konstant bleibt. Grund für das Auftreten dieses Stroms ist die Eigenleitfähigkeit des Kristalls.

• **Durchbruchbereich:** Die Durchbruchspannung U_{BR} ist abhängig von der Diode selbst und liegt im Bereich zwischen 50V und 1000V. Im Durchbruchbereich $U_D < -U_{BR}$ bricht die Diode durch und es fließt ein Strom. Sperrbereich und Durchbruchbereich liefern den Kennlinienteil im 3. Quadranten.

Die Kennlinie der Diode ist temperaturabhängig, da die Wärmeschwingungen mit steigender Temperatur zunehmen. Somit brechen mehr Kristallbindungen auf und die Eigenleitfähigkeit nimmt zu, was einen Anstieg des Sperrstroms zur Folge hat. Auch die Beweglichkeit der Ladungsträger nimmt mit steigender Temperatur zu, wodurch die Schwellenspannung minimal abnimmt.

2.2 Z-Dioden



Z(ener)-Dioden sind besonders hoch dotierte Si-Dioden mit schmalen pn-Übergang und spezifizierter Durchbruchspannung. Aus diesem Grund sind sie für den dauerhaften

Betrieb in Sperrrichtung ausgelegt und dienen der Spannungsstabilisierung und -begrenzung. Die Durchbruchspannung, bei der die Z-Diode niederohmig wird, heißt Zener-Spannung U_{Z0} und liegt je nach Typ zwischen 3V und 300V. Z-Dioden verhalten sich in Durchlassrichtung wie normale Dioden. In Sperrrichtung kommt der **Zener-Effekt** zum Tragen, durch den ab einer bestimmten Größe des elektrischen Felds Elektronen aus ihren Kristallbindungen gelöst werden. Sie bilden den Strom I_Z . Bei Erreichen der Zener-Spannung U_{Z0} wird die Z-Diode niederohmig und I_Z nimmt stark zu. Die Ladungsträger, die durch den Zener-Effekt frei geworden sind, werden durch das elektrische Feld beschleunigt und schlagen weitere Elektronen aus ihren Kristallbindungen heraus. Schließlich kommt es zum Zenerdurchbruch der Sperrschicht. Sinkt die angelegte Spannung unter U_{Z0} , werden keine weiteren Ladungsträger mehr freigesetzt. Die Sperrschicht verarmt. An Hand der

Kennlinie sind Sperrbereich und Durchbruchbereich der Z-Diode deutlich zu unterscheiden. Dazwischen liegt der sogenannten Knickbereich, der mit dem Einsetzen des Durchbruchs beginnt. Die Effekte, die das Bauteil keineswegs zerstören, sind stark abhängig von der Temperatur, was sich insbesondere auf die Spannung U_{Z0} auswirkt.

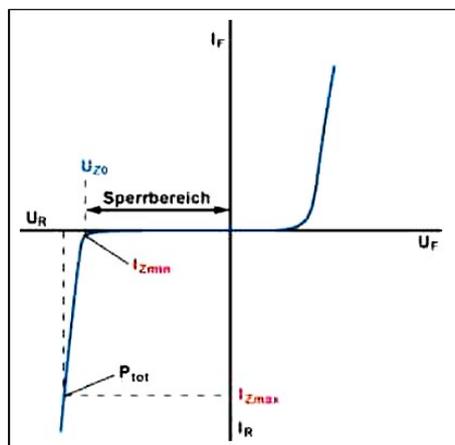


Abbildung 11: Kennlinie einer Z-Diode

2.3 Temperaturabhängige Widerstände

Als elektrische Widerstände werden allgemein Bauteile bezeichnet, die einem Strom einen Widerstand entgegenbringen. Der elektrische Widerstand ist dabei definiert als das Verhältnis zwischen der angelegten Spannung U und dem Strom I , der den Leiter durchfließt:

$$R = U/I \quad (4)$$

Ist der Widerstand bei fester Temperatur konstant, so gilt das Ohmsche Gesetz: $R = const$ (5)

Bei nicht-linearen Widerständen ist dies nicht der Fall. Anhand eines kurzen Abschnitts der U - I -Kennlinie kann lediglich der differentielle Widerstand bestimmt werden, für den gilt:

$$r = \Delta U / \Delta I \quad (6)$$

Der Wert eines Widerstands ist abhängig von der Temperatur, weshalb sich Widerstandsangaben üblicherweise auf eine Temperatur von 20 °C beziehen. Je nach Material kann der Widerstand mit der Temperatur zu- oder abnehmen. Die folgende Gleichung beschreibt die Änderung des Widerstandswerts ΔR bei Temperaturänderung ΔT :

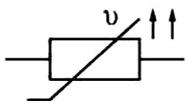
$$\Delta R = R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (7)$$

Dabei ist R_{20} der Widerstandswert bei 20 °C und α der materialspezifische Temperaturbeiwert. Nach einer Temperaturänderung ergeben sich Warmwiderstand R_w bzw. Kaltwiderstand R_k :

$$R_w = R_{20} + \Delta R \quad \text{bzw.} \quad R_k = R_{20} - \Delta R \quad (8)$$

Materialien, die eine besonders große Temperaturabhängigkeit ihres Widerstandswerts aufweisen, können in Kaltleiter- und Heißleiterwiderstände unterschieden werden.

2.3.1 Kaltleiterwiderstand (PTC)



Der Widerstand von Kaltleitern steigt mit zunehmender Temperatur, was bedeutet, dass die Bauteile im kalten Zustand deutlich besser leiten als im erwärmten Zustand. Der Temperaturkoeffizient von Kaltleitern ist positiv, wodurch sich der Name **PTC-**

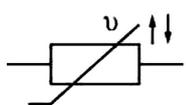
Widerstand (PTC = Positive Temperature Coefficient) ableitet. Nimmt die Temperatur

des Materials zu, vergrößert sich die thermische Geschwindigkeit der Ladungsträger, während die freie Weglänge kleiner wird. Grund hierfür ist, dass mehr Gitterschwingungen angeregt sind und ein Elektron mehr Möglichkeiten hat, seine Energie abzugeben. Auf Grund dessen kommt es zu einer Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit $\sigma_e(T)$ des Metalls und damit zu einer Zunahme des spezifischen Widerstands $\rho_s(T)$. Der Widerstandsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur ist in der Regel nur im sogenannten Arbeitsbereich des Kaltleiterwiderstands linear. Spezielle PTC-Bauteile wie ein PT100 weisen jedoch einen linearen Zusammenhang zwischen R und T auf, weshalb sie sich besonders gut zur Temperaturmessung eignen. Die Angabe PT100 steht dann für den Wert: 100Ω bei 0 °C. Der Temperaturkoeffizient des PT100 ist auf 3850 ppm/K genormt, was bedeutet, dass der Widerstand bei Erwärmung um 1K um 0,385% ansteigt. Somit kann der Platin-Widerstand in einem großen Temperaturbereich näherungsweise durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha T) \quad (9)$$

Mit dem Widerstandswert $R_0 = 100\Omega$ bei $T = 0^\circ\text{C}$ und der Konstanten 0,00385 / K nach DIN.

2.3.2 Heißleiterwiderstand (NTC)



Im Gegensatz zu den Kaltleitern haben Heißleiter einen negativen Temperaturkoeffizient, was darauf schließen lässt, dass ihr Widerstand mit steigender Temperatur sinkt. Sie leiten im heißen Zustand besser als im kalten. Solche sogenannten **NTC-Widerstände** (NTC = Negative Temperature Coefficient) werden aus Metalloxid-Keramik hergestellt und

verfügen über einen recht hohen Temperaturkoeffizient zwischen -2 % und -10 % je Kelvin. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstands wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$1/T = a + b \cdot \ln(R) \quad (10)$$

Die Kennlinie hat den Verlauf:

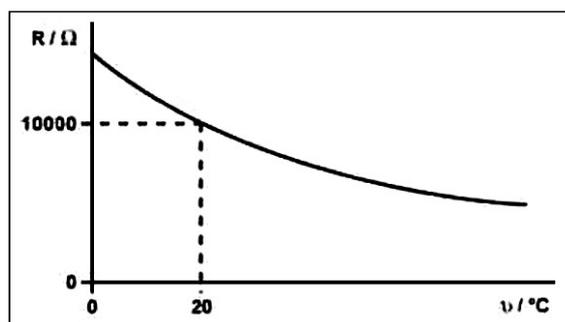
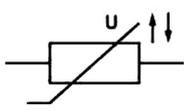


Abbildung 12: Kennlinie eines NTC-Widerstands

2.4 Spannungsabhängige Widerstände



Widerstände, die ihren Wert mit der anliegenden Spannung ändern, heißen Varistoren oder kurz VDR (=Volt Dependent Resistor). Ein Varistor besteht aus vielen kleinen Halbleiterkristallen, zwischen denen sich Sperrschichten ausbilden. Auf Grund dieses Aufbaus haben Varistoren keine Vorzugsrichtung, da die Halbleiterkristalle und

Sperrschichten völlig ungeordnet vorliegen. Wird eine Spannung angelegt, entsteht ein elektrisches Feld und die Sperrschichten bauen sich teilweise ab. Mit zunehmender Spannung werden immer mehr Sperrschichten abgebaut, sodass der Widerstand des Bauteils sinkt. Die Polung der Spannung spielt dabei keine Rolle. Die Spannung, von der ab ein deutlicher Stromanstieg zu beobachten ist, heißt Schwellenspannung. Sie hängt maßgeblich von der Dicke des Varistors ab, denn je dicker die Varistorscheibe ist, desto mehr Kristalle sind in Reihe geschaltet und desto mehr Sperrschichten müssen abgebaut werden. Auf Grund der Tatsache, dass der Varistor keine Vorzugsrichtung hat, ergibt sich eine symmetrische I - U -Kennlinie:

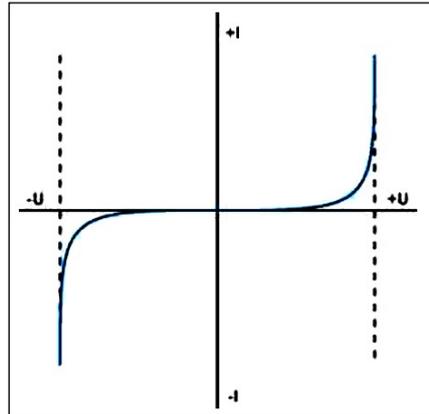
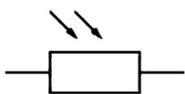


Abbildung 13: Kennlinie eines Varistors

2.5 Optoelektrische Bauelemente

2.5.1 Photowiderstand



Photowiderstände (LDR) sind Bauteile, deren Widerstand R sich mit Beleuchtung ändert.

Dies geschieht auf Grund des inneren Photoeffekts: Bei Beleuchtung treffen Photonen auf die Kristallbindungen, diese werden zerstört und die Elektronen freigesetzt. Die freien Elektronen tragen zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit bei. Der Photowiderstand verhält

sich prinzipiell wie ein ohmscher Widerstand, ist also spannungsunabhängig. Fällt Licht auf den Widerstand, steigt die Leitfähigkeit in Folge der erhöhten Ladungsträgerdichte und Zunahme deren Beweglichkeit an - der Widerstand sinkt. Dieser Effekt hängt von der Intensität des Lichts ab.

2.5.2 Photodiode



Photodioden sind Halbleiterdioden aus Silizium oder Germanium, deren pn-Übergang dem Lichteinfall gut zugänglich gemacht ist. Bei Belichtung kommt es zur Photonenabsorption, wodurch in der Raumladungszone und deren Umgebung Elektronen-Loch-Paare entstehen.

Das Feld trennt die Ladungsträgerpaare, in Folge dessen kommt es zu einem Kurzschlussphotostrom I_{ph} , der zwei Ursachen hat:

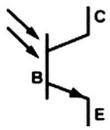
- Innerhalb der Raumladungszone entstehen Elektronen-Loch-Paare, die sich als Driftstrom durch die Raumladungszone bewegen.
- Außerhalb der Raumladungszone werden Elektronen-Loch-Paare gebildet, die sich als Diffusionsstrom zur Raumladungszone hin bewegen.

Der Photostrom I_{ph} setzt sich somit aus Drift- und Diffusionsstrom zusammen und hängt hauptsächlich von der Beleuchtungsstärke E ab. Es gilt: ~

$$I_{ph} \sim E \quad (11)$$

Im Kennlinienfeld wird häufig der Zusammenhang zwischen Sperrstrom und Sperrspannung für verschiedene Beleuchtungsstärken dargestellt (siehe Phototransistor).

2.5.3 Phototransistor



Spezielle Siliziumtransistoren, deren Basis-Kollektor-Sperrschicht lichtzugänglich gebaut ist, heißen Phototransistoren. Ihr Basisanschluss ist meist nicht herausgeführt. Das Bauteil wird lediglich über den Lichteinfall gesteuert, welcher eine Spannung erzeugt. Die Transistorstufe sorgt dafür, dass Phototransistoren eine deutlich höhere Lichtempfindlichkeit haben als andere optoelektrische Bauteile, da der Photoeffekt verstärkt wird. Bei der Darstellung der Kennlinie wird meist eine Auftragung des Kollektorstroms I_C über der Spannung U_{CE} zwischen Kollektor und Emitter in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke gewählt.

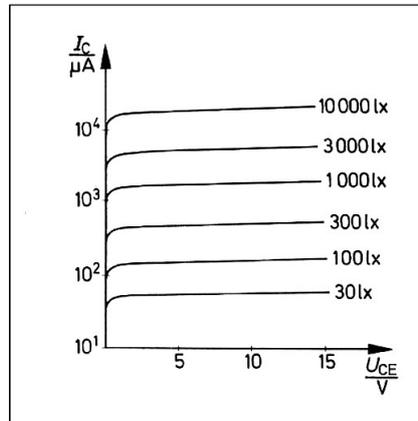
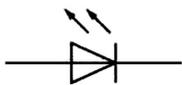


Abbildung 14: Kennlinie des Phototransistors in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

2.5.4 Leuchtdiode



Leuchtdioden, kurz LED (Light Emitting Diode), senden Licht aus, wenn sie in Durchlassrichtung betrieben werden. Das heißt, elektrische Energie wird in Licht umgewandelt. Die Leuchtdiode besteht aus einem n-leitenden Grundhalbleiter, auf dem eine sehr dünne p-leitende Halbleiterschicht mit großer Löcherdichte aufgebracht ist. Durch die hohe Löcherdichte rekombinieren die Elektronen. Dabei fällt ein Elektron aus dem Leitungsband (höheres Energieniveau) ins Valenzband (niedrigeres Energieniveau) und gibt die Energiedifferenz ΔE in Form eines Lichtimpulses ab. Der Lichtimpuls hat dabei eine Wellenlänge $\lambda = c/f$. Die Wellenlänge wird durch den energetischen Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband bestimmt und gibt die Farbe des abgestrahlten Lichts an. Da die p-Schicht sehr dünn ist, kann das Licht entweichen. Schon bei kleinen Stromstärken ist eine Lichtabstrahlung wahrnehmbar. Die Lichtstärke wächst proportional mit der Stromstärke. Leuchtdioden reagieren sehr empfindlich auf einen zu großen Durchlassstrom, deshalb wird ein strombegrenzender Vorwiderstand in Reihe zur Leuchtdiode benötigt. Farbe und Wellenlänge des Lichts hängen vom Halbleitermaterial ab. Auch die Durchlassspannungen der Bauteile unterscheiden sich. Die I - U -Kennlinie ist in Folge dessen je nach Material der LED auf der U -Achse verschoben, alle weisen jedoch einen exponentiellen Zusammenhang auf:

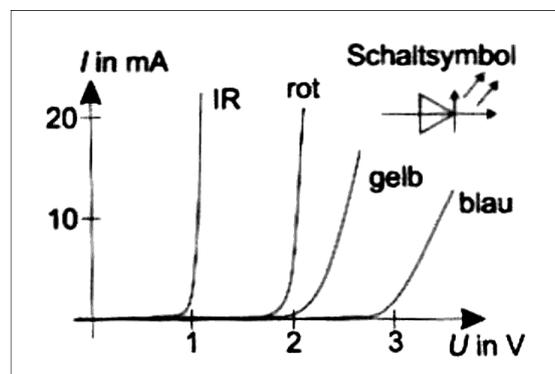


Abbildung 15: Kennlinien verschiedenfarbiger LEDs

2.6 Druckabhängige Bauelemente

Druckabhängigen Bauteilen liegt der **piezoelektrische Effekt**, kurz Piezoeffekt, zu Grunde. Hierbei werden bestimmte Kristalle verwendet, bei denen eine Druckänderung zur Ladungsträgertrennung führt. Der Effekt kann auf zwei Arten genutzt werden: In Form des direkten und des indirekten piezoelektrischen Effekts. Der **direkte piezoelektrische Effekt** beschreibt das Auftreten von Spannungen an Festkörpern, wenn sie durch

Krafteinwirkung verformt werden. Dabei muss die Kraft gerichtet sein, das heißt, sie darf nicht von allen Seiten gleichzeitig auf den Körper wirken. Wird das piezoelektrische Material verformt, kommt es zur Verschiebung der Ladungsträger und in Folge dessen zur Ausbildung von Dipolen innerhalb der Elementarzelle. Die Summe über das dadurch auftretende Feld in allen Zellen führt zu einer messbaren Spannung am Festkörper. Beim **indirekten piezoelektrische Effekt** kommt es zu einer Verformung des Materials bei Anlegen einer äußeren Spannung. Legt man an ein Piezoelement ein elektrisches Feld, induziert dieses im Inneren des Körpers eine Polarisation, die zu einer Deformation führt. Wie andere Festkörper sind auch Piezoelemente in der Lage, Schwingungen auszuführen. Dies ist zu beobachten, wenn eine sinusförmige Wechselspannung angelegt wird. Eine Größe zur Charakterisierung des piezoelektrischen Materials ist der piezoelektrische Koeffizient. Er ergibt sich aus dem Verhältnis von mechanischer Energie zu elektrischer Energie, die beide durch den piezoelektrischen Effekt miteinander korreliert sind.

2.7 Supraleiter

Supraleiter sind Stoffe, deren Widerstand unterhalb einer bestimmten Temperatur auf einen unmessbar kleinen Wert fällt. Diese kritische Temperatur T_C wird als Sprungtemperatur bezeichnet. Die Sprungtemperatur ist abhängig vom Material des Supraleiters. Stoffe mit vergleichbar hohen Sprungtemperaturen werden Hochtemperatursupraleiter genannt. Der Effekt der Supraleitung an sich kann durch die Bildung sogenannter Cooper-Paare auf Grund von Polarisationswechselwirkungen mit dem Gitter im Leiter erklärt werden. In elektrischen Leitern entsteht der Widerstand durch Wechselwirkungen der Elektronen mit den Fehlstellen des Kristallgitters und Gitterschwingungen. Durch die Kopplung der Elektronen im Supraleiter zu Cooper-Paaren kann keine Energie an das Gitter abgegeben werden und ein widerstandsloser Stromfluss ist möglich. Die Elektronen des Paares sind Fermionen, das heißt sie tragen beide einen Spin $s = 1/2$, was auf Grund des Pauli-Prinzips bedeutet, dass sie sich nicht im gleichen Zustand aufhalten können. Cooper-Paare haben durch die antiparallele Anordnung der Spins einen Gesamtspin $s = 0$ und sind Bosonen, die alle den energetisch niedrigen Grundzustand annehmen können. Oberhalb der Sprungtemperatur T_C zerfallen die Cooper-Paare wieder in zwei normale Elektronen, da die thermische Energie größer wird als die Bindungsenergie.

Literatur:

Demtröder: *Experimentalphysik 2*

Tietze, Schenk: *Halbleiterschaltungstechnik*

Beuth: *Bauelemente*

Bauckholt: *Grundlagen und Bauelemente der Elektrotechnik*

Vers. Mar 2022