

10. Halbleiter-Grundlagen, die Diode

Begriffsverwendung

Als **Halbleiter** werden sowohl die Halbleiter**werkstoffe** als auch **elektronische Bauelemente** aus Halbleiterwerkstoffen bezeichnet. Widerstände werden nicht als Halbleiter bezeichnet!

10.1 Halbleiterwerkstoffe

Als Zwischending zwischen Leitern und Isolatoren haben wir bereits die **Widerstände** kennengelernt. Ihre Leitfähigkeit ist schlecht gegenüber Leitern, aber immer noch gut gegenüber Isolatoren.

Für Widerstände wäre der Begriff Halbleiter eigentlich auch naheliegend, wird aber hier **nicht verwendet!** Bei Widerständen ist die reduzierte Leitfähigkeit ungefähr konstant.

Nicht aber bei den eigentlichen Halbleitermaterialien: Ihre Leitfähigkeit ist stark von verschiedenen Faktoren abhängig. Halbleiterstoffe und -elemente könnte man deshalb eher als **"Je-nach-dem-Leiter"** bezeichnen.

Diese Stoffe werden als hochreine Kristalle hergestellt. Im Prinzip werden alle Valenzelektronen für Bindungen benötigt. Da es sich um Halbmetalle handelt, können sich jedoch vereinzelte Elektronen relativ leicht lösen, was eine gewisse **Eigenleitfähigkeit** bewirkt:

Gründe für die Eigenleitfähigkeit sind:

- Verunreinigungen (Fremdatome)
- Wärmebewegung (bricht einige Kristallbindungen auf)
- Oberflächenleitfähigkeit (Randatome haben zuwenige Nachbarn, es gibt einige freie Elektronen)

Die Leitfähigkeit kann erhöht werden durch:

- ☐ Das gezielte Einfügen von Fremdatomen (Dotieren genannt)
- ☐ Temperaturerhöhung,
- ☐ Angelegte Spannung,
- ☐ Energie allgemein, z.B. auch Photonen (Licht)

Elemente und Legierungen, welche diese Eigenschaften haben können, nennt man Halbleiter.

Die wichtigsten davon sind:

Si, Ge, Se, GaAs, InP, InSb, SiC

Der spezifische Widerstand von reinem **Silizium** ist ca. **230kOhm*cm** (Würfel mit 1 cm Kantenlänge),

bei **Germanium** ist er 5000 mal kleiner, ca. **50 Ohm*cm**

10.2 Das Dotieren

Bei der Herstellung von Halbleitern wird zuerst ein möglichst reiner Einkristall hergestellt. Danach wird der reine Halbleiter **dotiert**, das heisst, gezielt "verunreinigt". Im Fall des **vierwertigen Siliziums** mit einem bestimmten **drei- oder fünfwertigen Element**.

Der n-leitende Halbleiter

Wenn das vierwertige Silizium mit einem fünfwertigen Element, zum Beispiel Phosphor, dotiert wird, baut es sich anstelle eines Siliziumatoms in den Kristall ein. Es hat nur vier Bindungspartner, aber 5 Elektronen. Also ist ein Elektron zu viel. Der Werkstoff enthält nun freie negative Ladungsträger. Es kann ein Elektronenstrom fliessen.

Ein Halbleiter, der mit **höherwertigen** Elementen dotiert ist, heisst **n-leitend**, man spricht zum Beispiel von **n-Silizium**. Es gibt einen **Elektronenstrom**.

Der p-leitende Halbleiter

Wenn das Silizium mit einem dreiwertigen Element, zum Beispiel Aluminium, dotiert wird, baut es sich anstelle eines Siliziumatoms in den Kristall ein. Es hat vier Bindungspartner, aber nur 3 Valenzelektronen. Also ist ein Elektron zu wenig da. Dieses fehlende Elektron wird **Loch** genannt. Ein solches Loch kann von einem Nachbaratom aufgefüllt werden, dabei lässt es seinerseits ein Loch zurück. Elektron und Loch haben Platz getauscht. Wird das Platztauschen mit einer Spannung begünstigt, so werden die Elektronen zum Pluspol gezogen, die Löcher "wandern" dabei zum Minuspol.

Es sieht aus, wie wenn ein Strom von Löchern den Elektronen entgegenfliesst. Der Werkstoff enthält nun quasi freie **positive** Ladungsträger. Es kann ein **Löcherstrom** fliessen.

Die Löcher verhalten sich wie freie **positive** Ladungsträger.

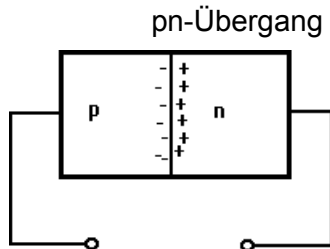
Ein Halbleiter, der mit **tieferwertigen** Elementen dotiert ist, heisst **p-leitend**, man spricht zum Beispiel von **p-Silizium**. Es gibt einen **Löcherstrom**.

10.3 Die Sperrschicht

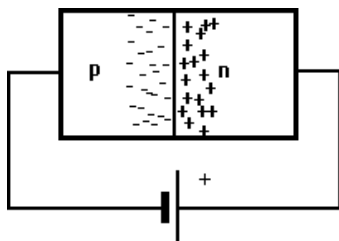
Werden eine p-leitende Zone und eine n-leitende Zone aneinandergesetzt, so entsteht im Grenzbereich ein **pn-Übergang** (oder np-Übergang).

Vom Aufbau dieses pn-Übergangs und von der äusseren Spannung hängt nun das elektrische Verhalten des daraus aufgebauten Halbleiterelements ab.

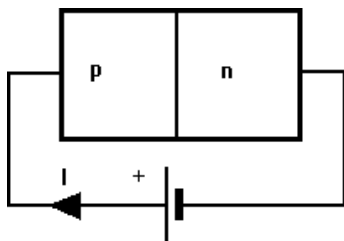
Die Übergangszone wird meist als **Sperrschicht** bezeichnet, da sie je nach äusseren Bedingungen (Spannung) wahlweise den Strom sperrt oder eben nicht.



Im Ruhezustand besteht eine so genannte Raumladungszone; ohne Spannung fliesst logischerweise kein Strom.



Wenn der Minuspol an die p-Zone gelegt wird, verbreitert sich die Sperrschicht, es fliesst kein Strom.



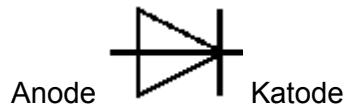
Wenn der Pluspol an die p-Zone gelegt wird, wird die Sperrschicht dünner und kann bei genügend Spannung (ca. **0.7 V**) ganz verschwinden, der pn-Übergang leitet gut, es fliesst ein Strom.

Die Sperrschicht wirkt also wie ein elektrisches Ventil, das den Strom nur in einer Richtung durchlässt.

10.4 Halbleiter-Dioden

Ein elektronisches Halbleiterelement, das aus einer solchen Sperrschicht besteht, nennt man **Diode**.

Eine Diode ist ein elektrisches Ventil und hat grossen technischen Nutzen.



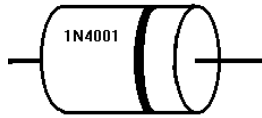
Nebenstehend das Schaltsymbol der Diode.

Der Pfeil zeigt die Richtung an, in der ein Strom fliessen kann (also die Durchlassrichtung).

Der Strich zeigt die Richtung an, in der der Strom blockiert wird (also die Sperrrichtung).



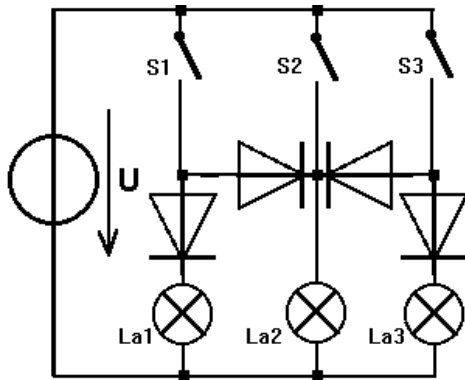
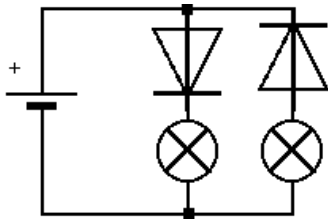
Darunter die Anordnung der Halbleiterschichten.



Die Anschlüsse heissen **Anode** und **Katode** (unabhängig von der Polarität der äusseren Spannung)

Der Halbleiterkristall wird in verschiedenste Schutzgehäuse eingebaut, aus dem die Anschlüsse herausragen. Meist wird auf Kleingehäusen an der Seite der Katode ein Strich angebracht. Dort ist auch der Strich im Schaltsymbol.

10.4.1 Funktion der Diode an einfachen Anwendungs-Beispielen



Mit Dioden (wie schon mit Relais) lassen sich **digitale Schaltungen** realisieren! Das obige Beispiel ist prinzipiell bereits ein Logikgatter, das auf verschiedene Eingangszustände verschiedene Ausgangszustände liefert.

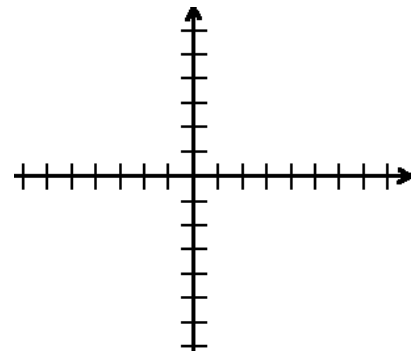
10.4.2 Kenndaten einer Diode

Dioden sind wiederum ganz andere Bauteile als Widerstand, Kondensator oder Spule.

Am besten kann man sich das Verhalten anhand der **U-I-Kennlinie** vorstellen. Beim Widerstand und bei der Glühlampe hatten wir dies bereits gemacht.

Zur Erinnerung die **Kennlinie eines ohmschen Elements**, also eines gewöhnlichen **Widerstands**:

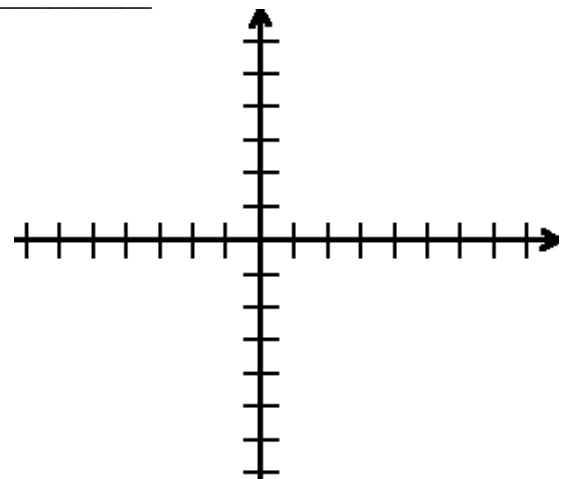
Bei der gewählten Bezeichnung der Achsen entspricht die **Steilheit der Geraden** der **Leitfähigkeit** ($=1/R$) des **Widerstandes**.



Eine **Diode** ist ein **nicht-lineares** Element.

Als Ventil muss sie bei der einen Stromrichtung (+) ein völlig anderes Verhalten zeigen als bei der entgegengesetzten (-).

Man beachte die unterschiedlichen Achseneinteilung im positiven und negativen Bereich.



Im **leitenden Zustand (pos. Bereich)** ist die Leitfähigkeit hoch, aber erst ab einer bestimmten Spannung (0.7 V, siehe Abschnitt 10.3).

In der **Sperrrichtung (neg. Bereich)** muss die Leitfähigkeit sehr gering sein.

Im stark negativen Bereich kommt es irgendwann zu einem Durchbruch.

Als Faustregel gilt:

Silizium-Dioden erzeugen im Durchlassbetrieb einen **Spannungsabfall** von ungefähr **0.7 V**.

Die Kennlinie (die U-I-Kennlinie)

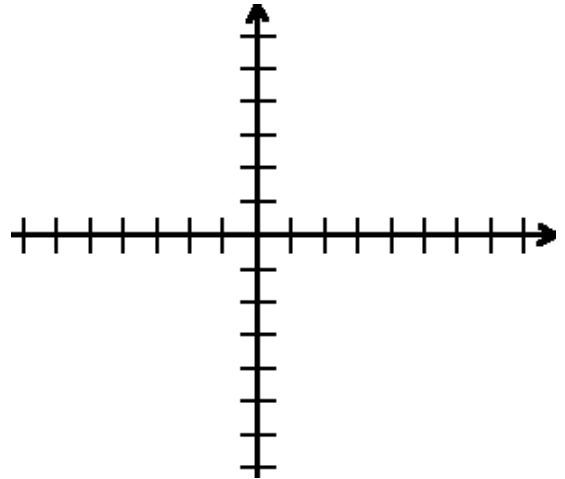
- Sie charakterisiert die Ventilwirkung
- Sie zeigt den zu erwartenden Spannungsabfall im Durchlassbetrieb
- Sie zeigt die ungefähre Durchbruchspannung im Sperrbetrieb
- Man kann grob sagen, ob es sich um eine Silizium- oder eine Germaniumdiode handelt: Bei einer Germaniumdiode ist der Spannungsabfall kleiner (ca. 0.3 V) aber auch stärker vom Strom abhängig (flachere Kennlinie, siehe Bild unten)

Der "Widerstand" einer Diode

Eine **Diode** ist ein **nicht-lineares** Element. Das heisst, man kann nicht von **dem** Widerstand einer Diode sprechen, sondern muss den Arbeitspunkt kennen.

Im Bild die Kennlinie einer **Germaniumdiode**

- Der Widerstand ist in jedem Punkt der Kennlinie ein anderer
(Bei Kondensator und Spule war der Widerstand abhängig von der Frequenz des Stromes)
- Der **Gleichstromwiderstand** ist einfach U/I in einem bestimmten Punkt der Kennlinie
- Der **differentielle Widerstand** ist die **Änderung** von U / die **Änderung** von I im Bereich eines Punktes auf der Kennlinie



Grenzdaten / Durchbrucharten

Grenzdaten einer Diode sind Kenndaten, die keinesfalls überschritten werden dürfen. Solche Grenzdaten sind:

- Der **Maximalstrom** in Durchlassrichtung oder die **maximale Verlustleistung ($U \cdot I$)**
(Die Spannung kann im Durchlassbetrieb ja nicht wesentlich über 0,7 V hinaus ansteigen.)
- Die **Maximalspannung** in Sperrichtung (bis 3000 V)
- Die **Maximaltemperatur** der Sperrschicht (Bei Siliziumdioden ca. 200 Grad)

Bei Überschreitung von Maximalstrom, -leistung oder -temperatur kommt es zum **Wärmedurchbruch**, was zur **Zerstörung** des Bauteils führt.

Die Überschreitung der maximalen Sperrspannung kommt es zum so genannten **Zener-Durchbruch**. Die Sperrschicht hält die hohen elektrischen Feldstärken (ca. 20'000 V/mm) nicht mehr aus, die Elektronen verlassen die Kristallbindungen. Der Zener-Durchbruch muss nicht zur Zerstörung führen, wenn der Strom - gleich wie im Durchlassbetrieb - auf ein bestimmtes Mass begrenzt wird. Dieser Effekt wird bei den so genannten Zener-Dioden gezielt ausgenutzt (siehe späteres Kapitel).

Bauformen

Die zulässige Verlustleistung (=Wärmeabgabe) einer Diode bestimmt ihre Bauform und -grösse. Dioden für hohe Ströme oder Leistungen sind grösser. Je nach Einsatzgebiet müssen Dioden manchmal gekühlt werden, das heisst, die in der Sperrschicht entstehende Wärme muss optimal nach aussen abgeführt werden.

Solche Dioden haben meist ein Metallgehäuse, welches sich auch auf einen Kühlkörper montieren lässt.

Schaltzeiten

Wichtig können auch die Schaltzeiten einer Diode sein. Sie sollten möglichst klein sein.

Unter Schaltzeit versteht man die Zeiten, welche die Diode braucht, um vom Sperrzustand in den leitenden Zustand zu gelangen und umgekehrt.

Diese Eigenschaft ist jedoch vor allem bei **Hochfrequenzanwendungen** bedeutsam, zum Beispiel in Schaltnetzteilen (PC-Netzteile).

Die Schaltzeiten liegen im Bereich von 1-200 **Nanosekunden** (ns, Milliardstelsekunden)

Sperrschichtkapazität

Von Bedeutung ist manchmal auch die Sperrschichtkapazität. Im Prinzip ist die Schicht einem Kondensator ähnlich und hat deshalb eine gewisse, wenn auch kleine Kapazität. Die Sperrschichtkapazität ist **abhängig von der Sperrspannung**, also der momentan anliegenden Spannung im Sperrbetrieb der Diode.

Bei normalen Dioden ist die Sperrschichtkapazität eigentlich unerwünscht, da sie die Schaltzeiten erhöht.

Bei so genannten Kapazitätsdioden wird dieser Effekt aber gezielt erzeugt und ausgenutzt. Sie wirken dann als spannungsgesteuerte Kondensatoren.

Anwendung: Radio- und TV-Tuner, Sender (Frequenzmodulation).

Temperaturabhängigkeit von Dioden

Wie bereits unter 10.1 festgestellt, wird durch eine Temperaturerhöhung auch die Eigenleitfähigkeit von Halbleiterwerkstoffen erhöht. Dies ist bei der Diode sowohl im Durchlass- wie im Sperrbereich feststellbar:

Bei einer vorgegebenen, konstanten Spannung ist der Diodenstrom stark temperaturabhängig.

Der Strom steigt exponentiell mit der Temperatur!

Als Faustregel gilt:

Pro 10 Grad Temperaturerhöhung verdoppelt sich der Strom bei konstanter Spannung

Bei konstanter Spannung und 100 Grad Temperaturerhöhung steigt der Strom also auf rund das 1000-fache! ($2^{10}=1024$)

Dioden können deshalb auch als **Temperatursensoren** verwendet werden.
(Wichtige weitere Anwendungen später.)

10.4.3 Prüfen einer Diode

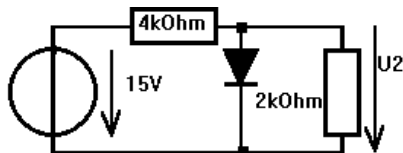
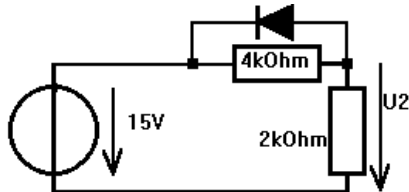
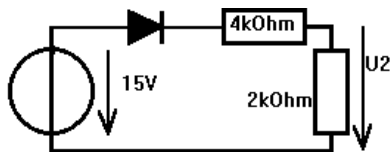
Aufgrund der Kennlinie und der Ventilwirkung kann man einfach die Leitfähigkeit der Diode bei verschiedener Stromrichtung testen. Dazu kann man ein Ohmmeter, eine Messbrücke (Wheatstone-Messbrücke, siehe Formelsammlung oder ein spezielles Diodenmessgerät benutzen. Am einfachsten ist es, die Diode mit einem akustischen Durchgangsprüfer (Piepser) zu testen.

- Wenn die Diode in der einen Richtung leitet, und in der anderen nicht, dann ist sie wahrscheinlich intakt.
- Wenn man mit beiden Polaritäten das gleiche Verhalten feststellt (leitet oder leitet nicht), ist die Diode defekt.

10.4.4 Übungen und Anwendungen zur Diode

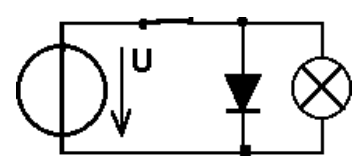
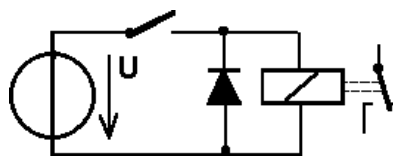
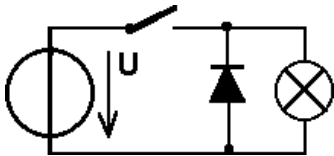
1.

Wie gross ist U_2 in den drei untenstehenden Schaltungen?



2.

Was ist die Funktion der Diode in den drei untenstehenden Schaltungen?



3.

Welches Eingangssignal, Spannungsfunktion $U(t)$ muss bei A auf die Leitung gegeben werden, damit bei den Lampen bei B folgendes geschieht:

Lampe 1 soll 1 Sekunde aufleuchten, dann soll es für 2 Sekunden lang auf Lampe 2 umschalten, dann sollen 1 Sekunde beide Lampen dunkel bleiben.



10.4.5 Spezialdioden

Je nach Halbleiter-Kristallart, Dotierungsart, Bauweise, Schichtdicke usw. lassen sich viele verschiedene Dioden herstellen.

Ein paar speziell wichtige werden in den folgenden Abschnitten ab 10.4.5.1 behandelt.

Die übrigen sind hier in einer Tabelle zusammengefasst:

Kapazitätsdioden Siehe auch 10.4.2: Sperrschichtkapazität	Anwendung als spannungsgesteuerter Kondensator (die Kapazität ändert mit der Spannung) Anwendung: Tuner
Tunneldioden	Sie ist eine Diode ohne Sperrzustand. Sie hat einen Bereich mit einem negativen differentiellen Widerstand. Sie kann dadurch als Schwingungsgenerator (Oszillator) verwendet werden.
Backward-Dioden	Spezielle Tunneldiode, wird "rückwärts" betrieben, also eigentlich im nichtexistierenden Sperrzustand. Geeignet, um kleinste Wechselspannungen gleichzurichten (in Gleichspannung zu verwandeln).
PIN-Dioden	Frequenzabhängig: Bei tiefen Frequenzen wie normale Diode. Bei hohen Frequenzen lässt sie das ganze Signal durch (ähnlich wie der Kondensator).

10.4.5.1 Schottkydioden

Recht verbreitet sind die so genannten Schottky-Dioden. Schaltzeichen:



Eigenschaft	Anwendung
Schottky-Dioden haben einen tieferen Spannungsabfall (ca. 0.35 V) Weniger Spannungsabfall = weniger Verlustleistung = weniger Wärme.	<u>Digitaltechnik:</u> (Low-Power-Schottky-Technologie in integrierten Schaltungen): Von einem erforderlichen Spannungspegel (z.B. 5V) geht weniger verloren <u>Solar-/Energietechnik:</u> Schutzdiode gegen das falsche Polen von Geräten oder Batterien
Schottky-Dioden haben extrem kurze Schaltzeiten (unter 1 ns)	Schaltnetzteile, Hochfrequenztechnik

10.4.6 Optoelektronische Dioden

10.4.6.1 Leuchtdioden

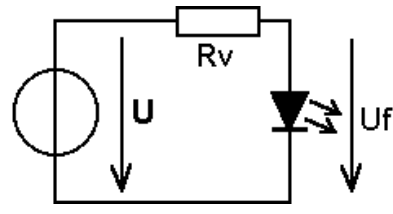
Eine Leuchtdiode wird oft als **LED** bezeichnet (**L**ight **e**mitting **D**iode, Licht aussendende Diode).

Schaltzeichen:



Damit eine Leuchtdiode leuchtet, muss sie in **Durchlassrichtung** betrieben werden.

Betrieb einer Leuchtdiode:
Meist ist ein Vorwiderstand erforderlich.



Leuchtdioden sind heute die weitestverbreiteten Signalisierungs- und Anzeigeelemente. Sie ersetzen die Glühlämpchen fast vollständig. Schon fast altbekannt sind die LED-Displays, meist rotleuchtende 7-Segment-Anzeigen (z.B. Radiowecker).

Aufbau, Funktion:

Durch spezielle Dotierung erreicht man, dass unter Spannungseinfluss Elektronen im Kristall oft mit Löchern zusammentreffen (Rekombination). Dabei wird Energie in Form von Licht freigesetzt. Die p-Zone ist so dünn, dass das Licht entweichen kann. Die Sperrschicht ist in einem transparenten Gehäuse untergebracht.

Vorteile gegenüber Glühlämpchen:

- Viel höhere Lebensdauer: mind. 1'000'000 Stunden statt nur 1000 wie Lämpchen
- Besserer Wirkungsgrad (mehr Licht mit weniger elektrischer Leistung)
- Alle Farben ohne Einfärbung des Glases möglich (von Blau bis Infrarot)
- Mehrfarbige LEDs sind möglich (verschieden leuchtende Kristalle in einem Gehäuse)
- Extreme Leuchtstärken erreichbar, zum Teil augengefährdend!
- Sehr schnelle Reaktion, geeignet für Nachrichtenübertragung (modulierbar)

Elektrische Daten:

LEDs sind für einen bestimmten **Durchlassstrom I_F (Ifoward, Vorwärtsstrom)** gebaut. Gebräuchlichste Werte für einfache Anzeige-LEDs sind 2 mA und 20mA. Extrem helle LEDs haben bis über 100mA. Der Strom I_F ist also die wesentlichste Angabe, wenn man eine Leuchtdiode betreiben will. Dieser Strom sollte auch nicht wesentlich überschritten werden, sonst wird sie zerstört. Deshalb benötigen die LEDs meist einen **Vorwiderstand!**

Der Spannungsabfall **U_F (Vorwärtsspannung)** ist dabei nicht genau definiert, liegt aber höher als bei normalen Dioden; je nach Leuchtfarbe liegt er etwa im Bereich von 1,4V bis 4V.

LEDs haben andererseits sehr kleine zulässige Sperrspannungen **U_R (Ureverse, Rückwärtsspannung)**. Es ist deshalb darauf zu achten, dass man sie nicht verkehrt anschliesst, denn bei fehlender Strombegrenzung melden sie sich dabei gerade ab.

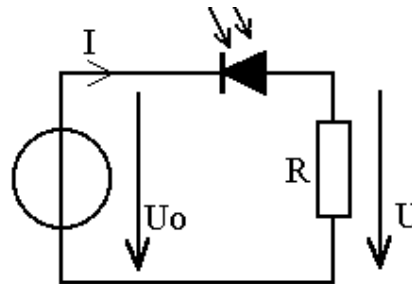
10.4.6.2 Fotodioden

Eine Fotodiode ist eine Halbleiterdiode, bei welcher der pn-Übergang dem Licht zugänglich gemacht wird. Das Schaltzeichen ist analog dem der Leuchtdiode, die Pfeile bedeuten Licht.



Fotodioden werden **in Sperrrichtung betrieben**. Die höchstzulässige Sperrspannung beträgt meist 20 bis 30 Volt. U ist proportional zum Strom und damit zum Lichteinfall.

Betrieb einer Fotodiode:



Es gibt Si- und Ge-Fotodioden.

- Bei Dunkelheit fließt wie bei normalen Dioden nur der sehr kleine Sperrstrom (ca. 500nA).
- Durch Lichteinfall auf die Sperrschicht werden freie Elektronen erzeugt. Der Sperrstrom kann dabei um viele Zehnerpotenzen steigen.
- Zwischen Beleuchtungsstärke und diesem Sperrstrom besteht in guter Näherung ein linearer Zusammenhang, weshalb sie für Lichtmessungen geeignet ist.
- Auf Änderungen der Beleuchtung reagiert die Fotodiode fast ohne Verzögerung. Dank der sehr schnellen Reaktion ist sie deshalb geeignet als **Empfänger** für modulierte Licht bei der **Nachrichtenübertragung**, z.B. durch Lichtwellenleiter.

Im Prinzip ist jede Sperrschicht lichtempfindlich. Normale Dioden sind deshalb in einem undurchsichtigen Gehäuse. Früher gab es nur Dioden im Glasgehäuse, welche aus diesem Grund schwarz angestrichen werden mussten. Auch Leuchtdioden sind transparent und deshalb etwas lichtempfindlich. Beide Diodenarten und Sperrschichten allgemein können bei Beleuchtung nicht nur besser leiten, sondern sogar eine Spannung erzeugen wie ein sogenanntes Fotoelement (Solarzellen).

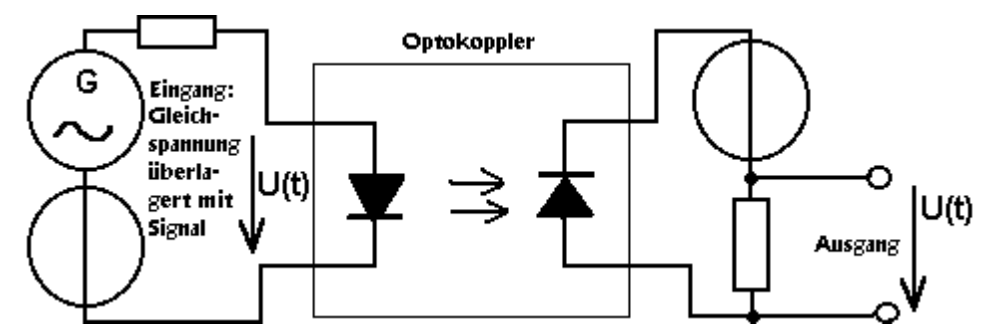
10.4.6.3 Optokoppler

Wie erwähnt lassen sich LEDs als Sender und Fotodioden als Empfänger bei der Signalübermittlung einsetzen, z.B. über Lichtwellenleiter. Eine Kombination von Lichtsender und Lichtempfänger am gleichen Ort und in **einem** Gehäuse heissen Optokoppler. Optokoppler sind optische Koppler. Sie koppeln zwei elektronische Baugruppen, wobei die Signalübertragung optisch erfolgt. Als Empfänger können Fotodioden dienen, es gibt aber auch andere, z.B. Fototransistoren.

Sinn und Vorteile von Optokopplern:

- **Galvanische Trennung** der Baugruppen oder Stromkreisen
- Optokoppler sind **rückwirkungsfrei**, d.h. es ist nur eine Einbahnübertragung möglich. Vom Ausgangsseite kann kein Signal auf den Eingang gelangen, dies im Gegensatz zu Transformatoren, die in beiden Richtungen funktionieren.

Anwendungsbeispiel: Optokoppler mit Fotodiode als Empfänger:



10.4.7 Zenerdioden

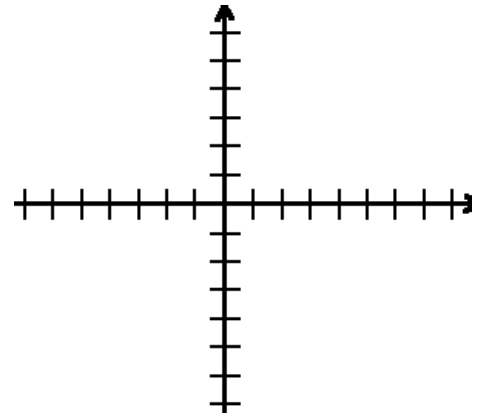
Zenerdioden sind sehr wichtig. Sie können zur Spannungsregelung verwendet werden.

Schaltzeichen:



Eigenschaften:

- Im Sperrbetrieb besteht eine relativ tiefe Durchbruchspannung, die Zenerspannung. (Siehe Kap 10.4.2: Grenzdaten / Durchbrucharten)
Die Zenerdiode wird absichtlich so hergestellt.
Wenn man die Zenerdiode in Sperrichtung betreibt, beginnt sie ab einer bestimmten Spannung zu leiten.
Zenerdioden werden zur Nutzung dieser Eigenschaft in Sperrichtung betrieben!
- Im Durchlassbetrieb funktionieren sie wie normale Dioden.



Auf den Dioden ist meist die Zener-Kennspannung angegeben. Es ist die Spannung, bei der ein gewisser Strom (meist 5mA) fließt. Es sind Werte möglich von 2,7V bis mehrere hundert Volt.

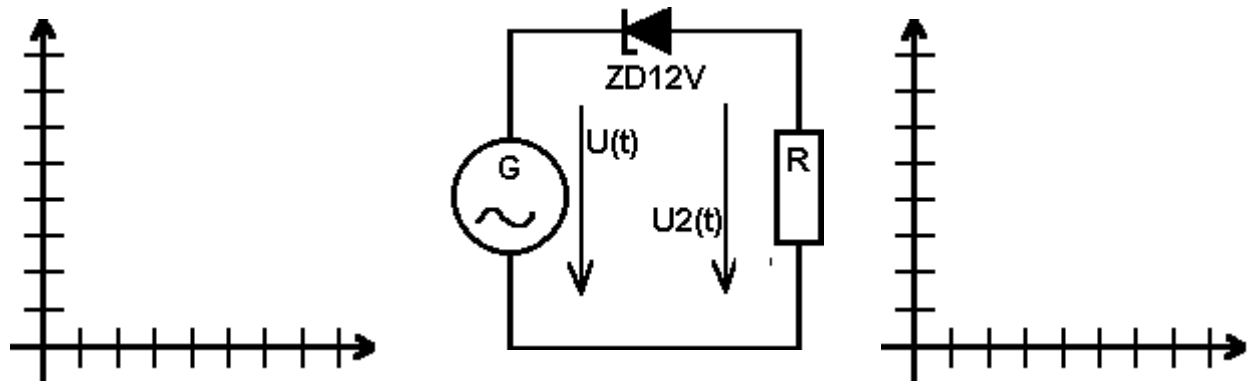
Standard-Anwendungsbeispiele

Am besten zeigt man die Funktion der Zenerdiode anhand einer einfachen Schaltung:

Eine Quelle erzeugt eine nicht konstante, **zeitabhängige Spannung $U(t)$** .

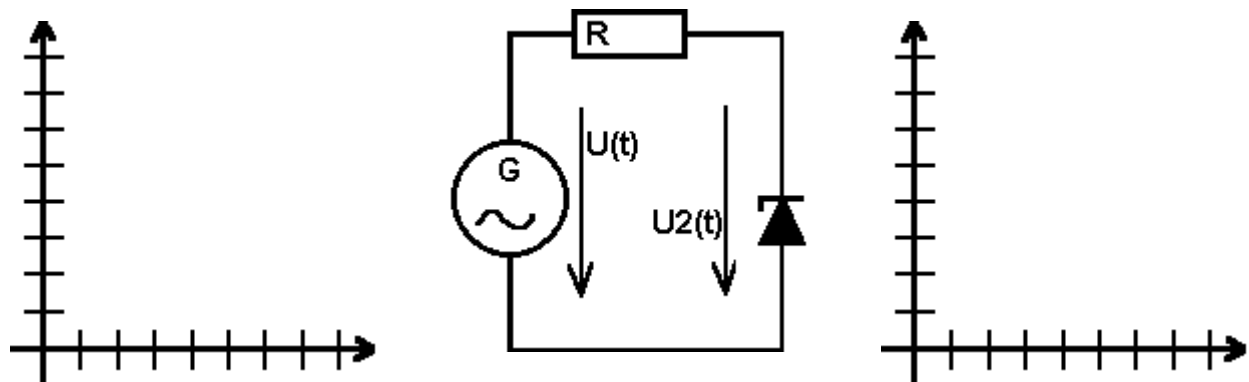
Dieses Signal wird auf zwei verschieden geschaltene Zenerdioden gegeben.

1)



Effekt: Jener Anteil von $U(t)$, der über der Zenerspannung von 12V liegt,

2)



Effekt: Jener Anteil von $U(t)$, der über der Zenerspannung von 12V liegt,

.....

Dies ist der ähnliche Effekt wie bei der normalen Diode in der Durchlassrichtung (siehe Übungsblatt nach Kap 10.4.3): Die Diode erzeugt einen Spannungsabfall, diese Spannung kann nicht überschritten werden. Sie kann nur unterschritten werden, und zwar wenn der Lastwiderstand R_L klein genug ist und die Spannung deshalb weiter heruntergeteilt wird (Spannungsteiler).

10.5. Dioden als Gleichrichter

Problem:

Sämtliche elektronischen Geräte (vom Taschenradio bis zum PC) benötigen grundsätzlich Gleichstrom. Das Stromnetz liefert aber Wechselstrom. Beispiel:

Stromversorgung für ein Modem mit einem Netzadapter:

Wie macht man aus der Netzspannung von **230 Volt Wechselspannung** die benötigten **12 Volt Gleichspannung**?

Lösung:

Das Verfahren ist grundsätzlich mindestens zweistufig:

1. **Transformieren** von 230 V Wechselspannung auf 12 V Wechselspannung mittels Transformator
2. **Gleichrichten** der Wechselspannung zu Gleichspannung mittels einem Gleichrichter.

Danach kann allenfalls noch eine Nachbehandlung der Gleichspannung erfolgen:

3. **Glätten** des pulsierenden Gleichstroms mittels Siebketten (meist Kondensatoren)
4. **Stabilisieren** (Konstanthalten) der Gleichspannung mittels Zenerdioden oder besser mit elektronischen Stabilisierungsschaltungen.

Doch alles der Reihe nach:

10.5.1 Einfache Gleichrichterschaltung: Der Einweggleichrichter

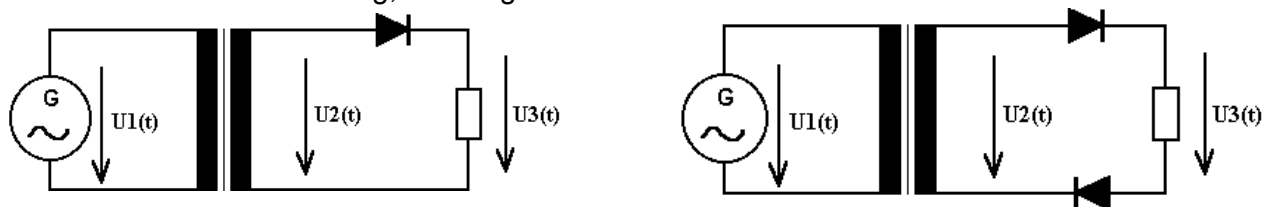
Für Stufe 1 brauchen wir einen Transformator (Trafo) (Kap 8.7). Er wandelt eine **Wechselspannung** in eine andere Wechselspannung mit **gleicher Frequenz** um.



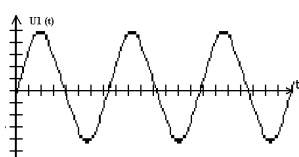
Der Effekt beruht auf Induktion: Die Primärspule erzeugt ein veränderliches Magnetfeld, die Sekundärspule induziert aus dem veränderlichen Magnetfeld eine Spannung. Man kann bekanntlich nur Wechselspannungen auf diese direkte Art transformieren!

Für Stufe 2 kommt nun die Diode zum Einsatz. Da wir Gleichstrom wollen, müssen wir den negativen Teil der Wechselspannung (wenn der Strom rückwärts fließen will) "herausfiltern": Man nimmt dazu beispielsweise die **linke** Diodenschaltung.

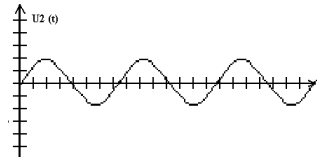
Die Schaltung **rechts** leitet uns dann zu einer weiteren Gleichrichterart über, sie hat den gleichen Effekt wie die linke Schaltung, allerdings reduziert sich U_3 um weitere 0.7V.



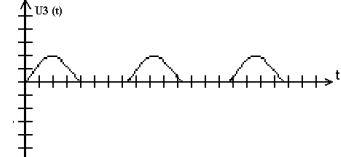
Spannungsverlauf $U_1(t)$ vor Trafo



$U_2(t)$ nach Trafo



$U_3(t)$ über dem Verbraucher



Die negative Halbwelle wird mit diesem Verfahren nicht genutzt, (wie abgeschaltet). Diese Schaltung heisst deshalb **Einweg-Gleichrichter**

Was könnte man tun, um auch die negative Halbwelle zu nutzen? Man müsste sie zu einer positiven Halbwelle machen, also in der **gleichen Richtung** durch den Verbraucher schicken wie die positive Halbwelle. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten:

10.5.2 Der Zweweggleichrichter

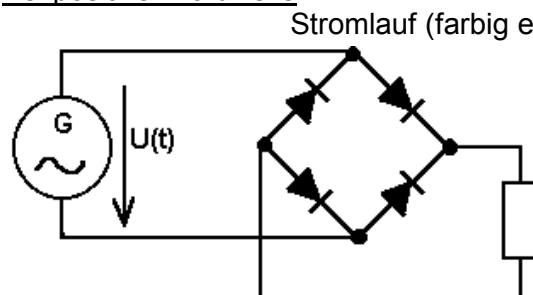
1. Möglichkeit, ausgehend vom Einweggleichrichter

Bei umgekehrter Stromrichtung vom Trafo her wird der Strom mittels zusätzlicher Dioden in gleicher Richtung durch den Verbraucher gelenkt:

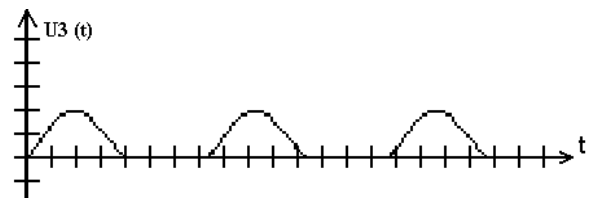


Die rechte Schaltung kann man vorteilhafter folgendermassen zeichnen:

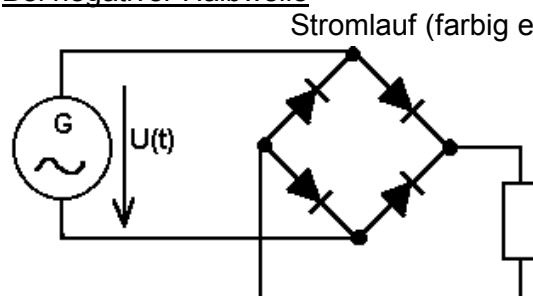
Bei positiver Halbwelle



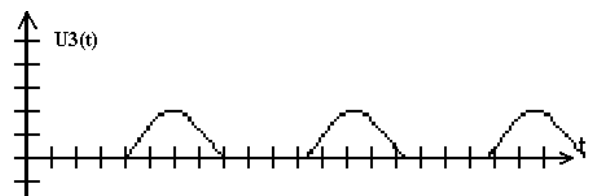
Spannungsverlauf am Verbraucher



Bei negativer Halbwelle

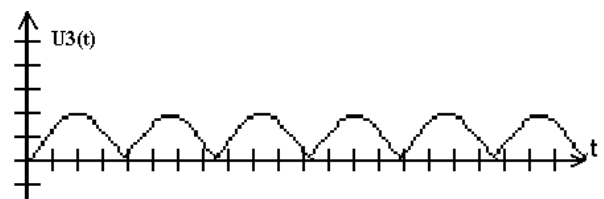


Spannungsverlauf am Verbraucher



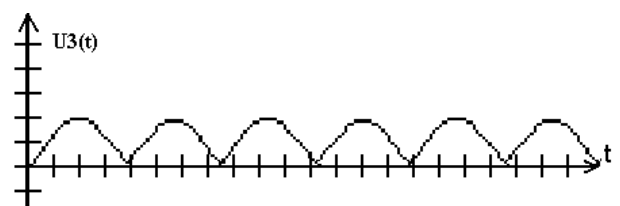
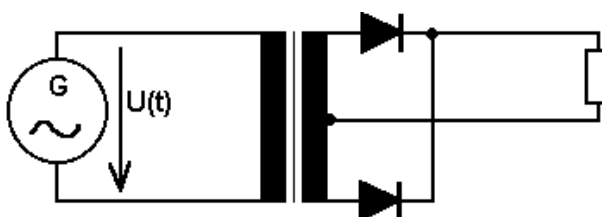
Natürlich wechseln sich beide Halbwellen ab und sind damit überlagert.

Im Endeffekt sieht der Spannungs- (und Strom-) Verlauf am Verbraucher so aus:



Diese Schaltung heisst **Brückengleichrichter**

2. Möglichkeit, nur mit einem Spezial-Trafo möglich (Sekundärwicklung hat einen Mittelabgriff)



Diese Schaltung heisst **Mittelpunkts-Zweiweg-Gleichrichter**

10.5.3 Siebschaltungen

Unter 10.5.1 haben wir vier Stufen genannt, die zur "Herstellung" von Gleichstrom aus Wechselstrom nötig sind. Nach der Gleichrichtung (Stufe 2) hat man erst einen sehr ungleichmässigen Gleichstrom; er fliesst zwar immer in die gleiche Richtung, aber unterschiedlich stark. Besonders gut ist dies bei der Einweggleichrichterschaltung sichtbar, da dort während der negativen Halbwelle der Strom eine halbe Periodendauer lang abgeschaltet ist.

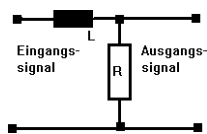
Die Ausgangsspannung nach der Gleichrichtung ist noch keine Gleichspannung, sondern eine pulsierende Gleichspannung.

Man kann sie auch als Mischspannung auffassen, weil man sie sich aus der Addition einer echten Gleichspannung und einer Wechselfspannung vorstellen kann (Überlagerung).

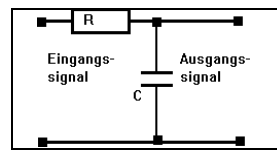
Es gilt nun also, in einer 3. Stufe die Wechselfspannungsanteile mit der Frequenz **100Hz (!)** beim Zweiweggleichrichter) herauszufiltern oder herauszusieben.

Man benötigt also ein elektrisches **Tiefpass-Filter**. Es muss die relativ hohe Frequenz 100 Hz blockieren, und die **tiefe** Frequenz 0 Hz (Gleichspannung) **passieren** lassen.

Aus Kap. 9 wissen wir, wie so ein Filter aussehen kann. Als Tiefpass können das L-R-Glied oder das R-C-Glied dienen:

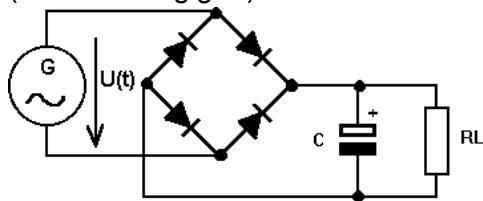


(selten)



häufigst verwendet

Ein solches Filter kann man nun hinter den Gleichrichter schalten. In der Praxis erweist sich die rechte Schaltung als sehr zweckmässig (bei der linken Schaltung müssten Spulen mit grosser Baugrösse eingesetzt werden). R wird oft auch weggelassen, da schon die Dioden einen (stromabhängigen) Widerstand bilden.



Der Kondensator **C** heisst **Lade-Kondensator**. Er hat eine relativ grosse Kapazität und ist meist ein Elektrolytkondensator (gepolt), abgekürzt nennt man ihn **Lade-Elko**.

C = Lade-Elko, RL = Lastwiderstand, Verbraucher

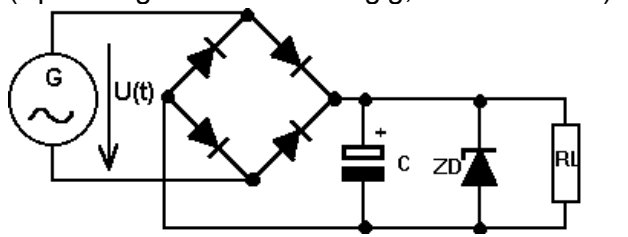
Funktionsweise:

Während des Anstiegs der pulsierenden Gleichspannung lädt sich der Kondensator auf. Sobald die Spannung des Gleichrichters wieder unter die aktuelle Kondensatorspannung sinkt, wirkt der **Kondensator als Quelle**. Er speist den Verbraucher RL und überbrückt die Zeit, in der die pulsierende Gleichstromzufuhr vom Gleichrichter her klein ist. Damit wird der pulsierende Gleichstrom geglättet. Man bringt jedoch nie alle Wechselfspannungsanteile weg, es bleibt die so genannte **Restwelligkeit**. Für die Bemessung des Kondensators C gilt: möglichst gross wählen. Denn:

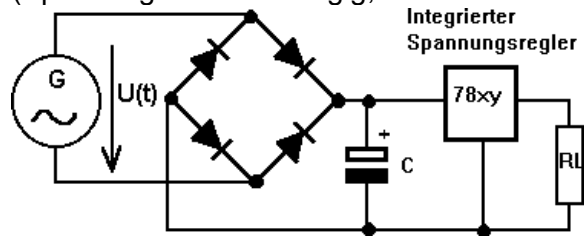
Je **grösser der Lastwiderstand** (grosser Lastwiderstand heisst schwache Belastung) und je **grösser die Kondensator-Kapazität**, desto **höher ist die Gleichspannung** und desto **glatter ist der Gleichstrom (desto geringer die Restwelligkeit)**.
Bei fehlender Belastung (ohne RL) lädt sich C auf den **Scheitelwert** der Wechselfspannung auf.

In einer letzten Stufe (Stufe 4) kann der Gleichstrom noch begrenzt oder geregelt werden:

Spannungsbegrenzung mit einer **Zener-Diode**:
(Spannung leicht lastabhängig, hohe Verluste)



Einsatz eines **integrierten Spannungsreglers**:
(Spannung lastunabhängig, kleinere Verluste)



10.5.4 Wirkung von Siebketten bei Gleichrichterschaltungen

Aufgabe:

Simulation von Einweg- und Zweiweggleichrichter mit verschiedenen Siebketten.

Vorgehen:

- Schaltungen zeichnen (bzw. übernehmen und abändern)
- Untersuchen Sie jeweils den Einfluss **verschiedener Werte** der Elemente (zum Beispiel der Kondensator-Kapazitäten C , der Serie-Widerstände und des Lastwiderstands).
- Notieren Sie die gewählten Werte, welche der Schaltung ein typisches Verhalten geben.
- Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf der **Spannung U_L über dem Lastwiderstand R_L** .

