

16 Elektrotechnik 2

16.1 Grundprinzip einer Verstärkerschaltung

Eine Steuerspannung (z.B. von einem Mikrofon) wird zwischen Steuereingang und Masse an ein Steuerelement (Röhre, Transistor) angelegt. Dieser Stromkreis wird Steuerkreis genannt. An die beiden weiteren Anschlüsse des Steuerelements kann man nun einen Lastkreis mit einer Gleichspannungsenergiequelle anschließen. In diesen Stromkreis muss dann noch ein in Reihe geschalteter Arbeitswiderstand eingefügt werden der mit dem Steuerelement quasi einen Spannungsteiler darstellt. Zwischen Anode und Masse kann man nun die verstärkte Ausgangsspannung abgreifen.

$$U_{AK} = U_{Bat} - U_R$$

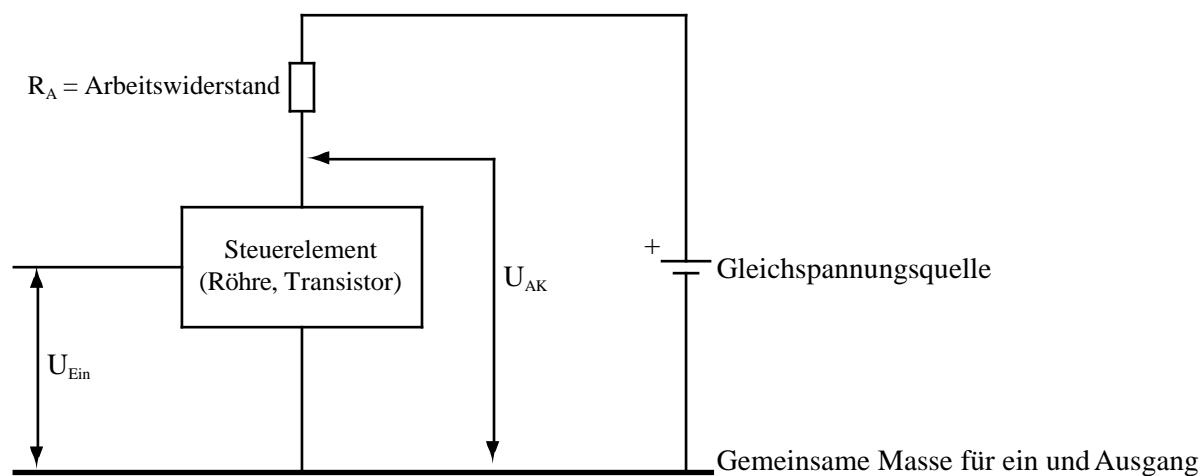


Abb. 1

16.2 Die Röhre

16.2.1 Röhren Diode

Wird bei einer Glühbirne an den Glühfaden ein Strom angelegt, strahlt er nicht nur Licht aus, sondern gibt auch Elektronen ab. Bringt man nun innerhalb der Glühbirne noch eine Metallplatte an, die außerhalb einen Anschluss hat, erhält man eine Röhre. Wird der Anschluss der Metallplatte mit dem positiven Pol einer Gleichspannungsquelle und die Heizspule mit dem negativen Pol verbunden, werden die freien Elektronen von der positiv geladenen Platte angezogen und es fließt ein Strom. Vertauscht man die beiden Pole fließt kein Strom, da die nun negativ geladene Platte die Elektronen abstößt.

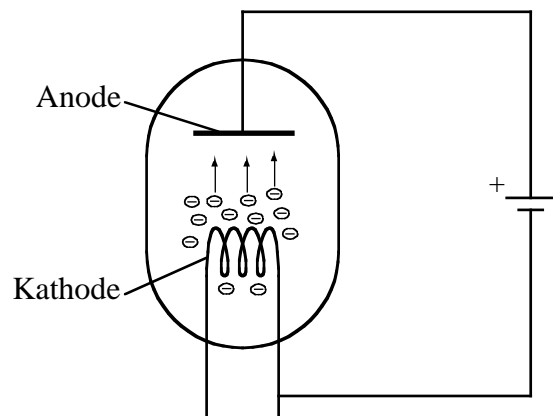


Abb. 2

Aufgrund seiner Eigenschaft Strom in einer Richtung fließen zu lassen und in der anderen Richtung zu sperren, wird die Röhre im englischen auch als Ventil (engl. valve) bezeichnet. Die Heizspule wird auch Kathode und die Metallplatte Anode genannt. Da die Emissionsfähigkeit der Kathode, also ihre Fähigkeit Elektronen abzugeben, sich ständig verringert, nimmt die Verstärkerleistung einer Röhre mit der Zeit ab. Leider glüht die Heizspule bei Materialien die eine hohe Emissionsfähigkeit aufweisen nicht sehr gut und wird sehr schnell zerstört. Um dieses Problem zu lösen wurden indirekt geheizte Röhren entwickelt. Bei diesen Röhren wird die Kathode von einem äußerst haltbaren und gut glühenden Heizfaden erhitzt. Da die Kathode nicht sofort glüht sondern erst vom Heizfaden aufgeheizt werden muss, dauert es beim einschalten eines Röhrenverstärkers 30-60s bis er betriebsbereit ist.

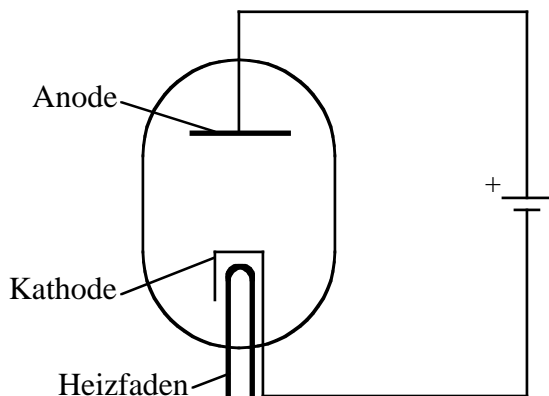


Abb. 3

Der Stromfluss von der Anode zur Kathode ist abhängig von der Spannung zwischen Anode und Kathode (üblicherweise 100V). Erhöht man die Spannung, wird der Stromfluss größer. Erniedrigt man sie wird auch der Stromfluss geringer.

16.2.2 Röhren Triode

Um den Stromfluss von einer Steuerspannung steuerbar zu machen, wird ein Gitter zwischen Anode und Kathode angebracht, welches negativ gegenüber der Kathode geladen sein muss. Schwankt nun die Spannung am Gitter, wird schwankt proportional auch die Ausgangsspannung.

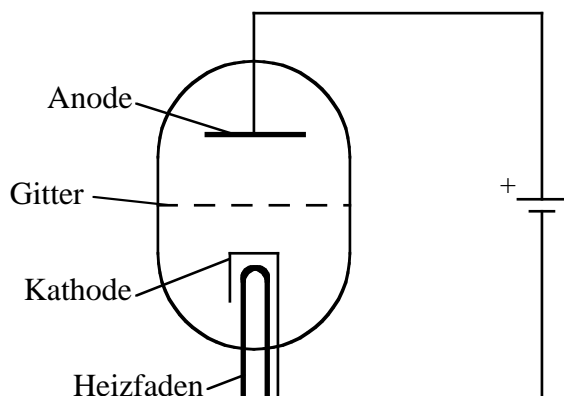


Abb. 4

16.2.3 Bauform

Da die vorangegangenen Abbildungen lediglich schematischer Natur waren, soll im Folgenden die eigentliche Bauform besprochen werden. In der Mitte der Röhre sitzt die Heizspule umgeben von der zylinderförmigen Kathode. Das Gitter besteht aus einem Draht

der um zwei Stäbe gewickelt wird, die rechts und links von der Kathode platziert sind. Die Anode ist wie auch die Kathode zylinderförmig und wird ganz außen angebracht. Diese Anordnung wird nun in einen Glaskolben gebracht und die Luft abgesaugt. Im Glaskolben befindet sich noch der Getter, welcher nach dem Absaugen der Luft aktiviert wird und alle verbliebenen Sauerstoff-Atome bindet. Hat der Getter eine durchgängig milchige Farbe, ist die Röhre undicht.

16.2.4 Kathodenbasis-Schaltung

Die in Abbildung 5 gezeigte Schaltung benötigt insgesamt drei Energiequellen: die Heizspannung, die Gitterspannung und die Spannungsversorgung des Lastkreises.

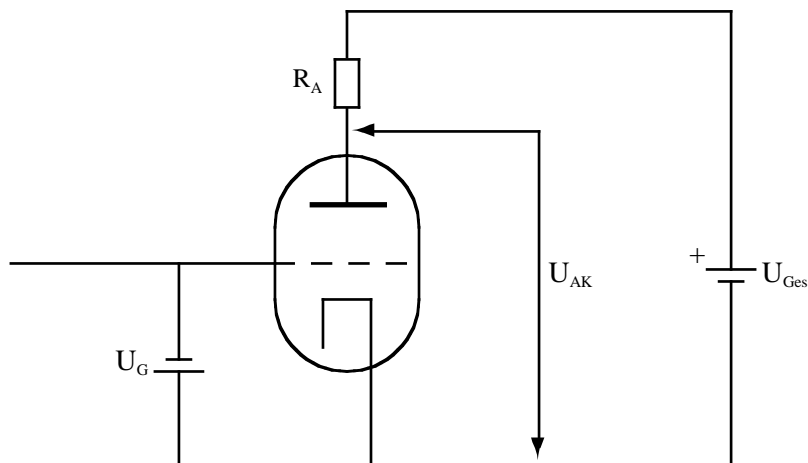


Abb. 5

Um die Anzahl der Versorgungsspannungen zu minimieren, wird das Gitter über einen beliebig großen Widerstand (z.B. $R_G = 1\text{M}\Omega$) auf 0V-Potential gelegt. Da kein Strom über den Widerstand fließt, fällt an ihm auch keine Spannung ab. Zwischen Kathode und Masse wird nun auch ein entsprechend dimensionierter Widerstand geschaltet, um einen Potentialunterschied zwischen Kathode und Gitter zu erzeugen. Um die Spannung an der Kathode bei anliegender Eingangsspannung zu stabilisieren wird zu dem Widerstand ein Kondensator Parallel geschaltet.

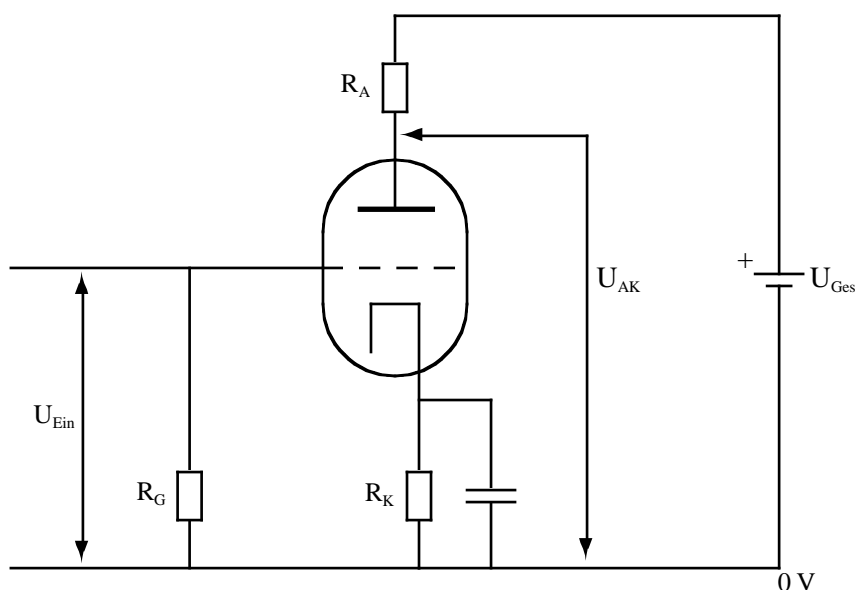


Abb. 6

Nachfolgend sollen nun die Schaltung dimensioniert werden. Als Röhre soll eine handelsübliche ECC83 verwendet werden. Die angestrebte Ausgangsspannung ($U_{AK} = 200V$), die Gitterspannung ($U_G = -1,5V$) und der Arbeitswiderstand ($R_A = 100k\Omega$) werden festgelegt. Aus einem Diagramm in dem der Anodenstrom über der Ausgangsspannung aufgetragen ist, kann man nun den Anodenstrom ablesen.

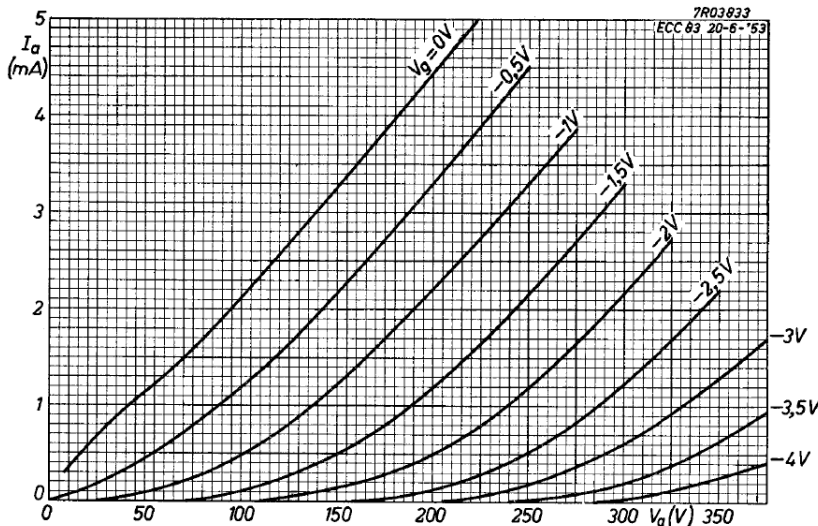


Abb. 7

Es ergibt sich ein Wert von ca. 1mA. Daraus ergibt sich:

$$U_R = R_A \cdot I_{AK}$$

$$U_R = 100k\Omega \cdot 1mA = 100V$$

$$U_{Ges} = U_R + U_{AK}$$

$$U_{Ges} = 100V + 200V = 300V$$

Über dem Widerstand R_K müssen 1,5V abfallen, damit das Gitter um 1,5V negativ gegenüber der Kathode ist.

$$R_K = \frac{U_K}{I_{AK}}$$

$$R_K = \frac{1,5V}{1mA} = 1500\Omega$$

Es soll nun berechnet werden, wie sich der Anodenstrom und die Ausgangsspannung bei einer angelegten Eingangsspannung ($U_{Ein} = 0,2V_{SS}$) verhalten. Abbildung 8 verdeutlicht den Verlauf der Spannung zwischen Gitter und Kathode.

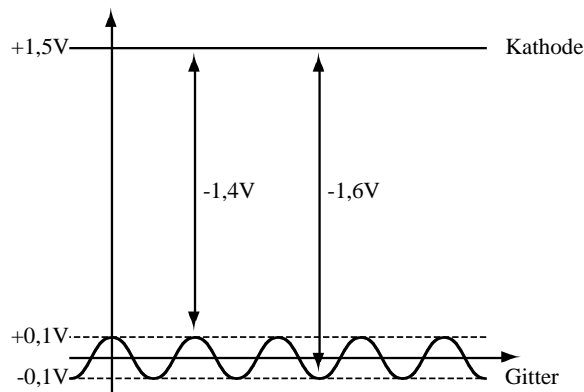


Abb. 8

	$U_{GK} = -1,4V$	$U_{GK} = -1,6V$
$U_R = R_A \cdot I_{AK}$	$U_R = 100k\Omega \cdot 1,05mA = 105V$	$U_R = 100k\Omega \cdot 0,95mA = 95V$
$U_{AK} = U_{Ges} - U_R$	$U_{AK} = 300V - 105V = 195V$	$U_{AK} = 300V - 95V = 205V$

Aus den berechneten Werten ergibt sich eine Verstärkung von:

$$V = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{Aus}}{U_{Ein}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{10V_{SS}}{0,2V_{SS}}\right) \approx 34dB$$

Außerdem ist zu erkennen, dass das Ausgangssignal um 180° in der Phase verschoben ist.

16.3 Halbleitertechnik

Schon sehr früh wurde ein Ersatz für die Mechanisch sehr anfällige Röhre gesucht. Die ersten Patente wurden schon in den 1920er Jahren angemeldet. Bis es diese Technik jedoch zur Marktreife brachte, sollten noch einige Jahrzehnte vergehen.

16.3.1 Dotieren von Halbleitermaterial

In ein Halbleitermaterial (Germanium, Silizium \rightarrow 4-wertige Atome), also ein Material bei dem die Anzahl der freien Elektronen geringer ist als bei Metallen, werden 3- oder 5-wertige Atome eingebracht. Dieser Vorgang wird auch dotieren genannt. Wird das Halbleitermaterial mit 3-wertigen Atomen (Bor, Aluminium, Gallium) dotiert, ergeben sich Lücken im regulären Gittermuster und die Leitfähigkeit erhöht sich. Das so bearbeitete Material wird P-dotiert oder Akzeptor genannt. Der Strom der durch ein P-dotiertes Material fließt wird Elektronenstrom genannt. Werden anstatt 3-wertiger 5-wertige Atome (Phosphor, Arsen, Antimon) verwendet, werden zusätzlich Elektronen frei und es erhöht sich ebenfalls die Leitfähigkeit. Dieses Material wird nun N-dotiert oder Donator genannt und der Strom Elektronenstrom.

16.3.2 Die Halbleiter-Diode

Kombiniert man P- und N-dotiertes Material so bildet sich am Übergang zwischen den Materialien eine Isolationsschicht, auch Sperrschicht genannt. Freie Elektronen aus der N-dotierten Zone werden von den Fehlstellen der P-dotierten Zone angezogen. Legt man nun eine den positiven Pol einer Gleichspannungsquelle an den P-dotierten Teil, werden die Elektronen von der positiv geladenen N-dotierten Zone angezogen. Die Sperrschicht löst sich auf und es fließt ein Strom.

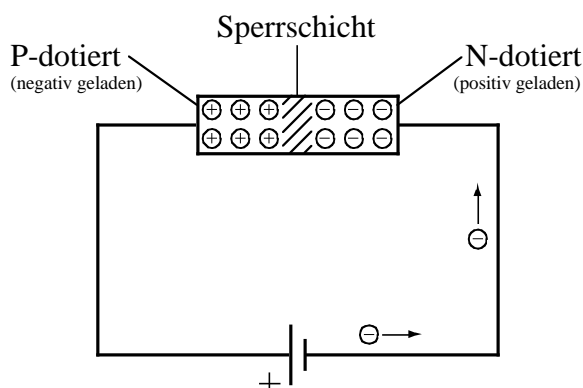


Abb. 9

Vertauscht man die beiden Pole, werden die Elektronen von der negativ geladenen P-dotierten Zone abgestoßen und die Sperrschicht wird noch verstärkt.

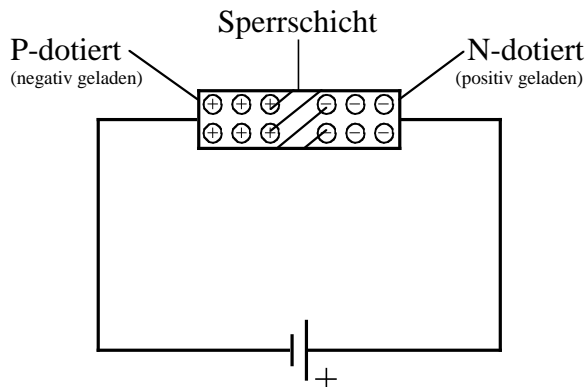


Abb. 10

Die Majoritätsladungsträger sind die jeweils erwünschten Atome, also in der P-dotierten Zone die 3-wertigen Atome und in der N-dotierten Zone die 5-wertigen Atome. Nun passiert es bei der Fertigung jedoch, dass auch in die P-dotierte Zone 5-wertige und in die N-dotierten Zone 3-wertige Atome gelangen. Diese werden dann Minoritätsladungsträger genannt. Sie sind für Rauschen im Halbleiter verantwortlich und machen in obwohl nicht gewünscht leitend. Das Schaltsymbol einer Halbleiter-Diode ist in Abbildung 11 dargestellt.



Abb. 11

Schwellspannung

Erhöht man von 0V die an eine Diode in Fließrichtung angelegte Spannung, fließt nicht sofort ein Strom, sondern es muss erst die Anlauf- oder Schwellspannung überschritten werden. Sie ist notwendig um die Sperrschicht aufzulösen. Danach verhält sich der Strom wie gewohnt proportional zur angelegten Spannung. Bei Siliziumdioden beträgt die Schwellspannung ca. 0,6V, bei Germaniumdioden liegt sie mit ca. 0,2V etwas niedriger.

Maximalspannung & Maximaltemperatur

Die Maximal zulässige Spannung in Sperrrichtung beträgt bei Germanium-Dioden 100V und bei Silizium-Dioden 1200V. Bei höheren Spannungen wird die Sperrschicht dauerhaft zerstört. Die Maximaltemperatur liegt bei Germanium-Dioden bei 80°-90° und bei Silizium-Dioden bei 175°.

Bauform

Die Halbleiterdioden werden in eine zylinderförmige Glas- oder Kunststoffhülle gefasst. An den beiden Enden des Zylinders ragen die beiden Anschlüsse für Anode und Kathode heraus. Um die beiden Anschlüsse unterscheiden zu können ist die Kathodenseite markiert.

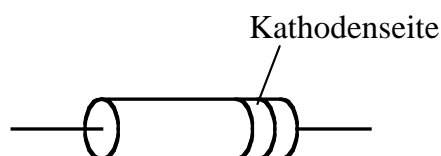


Abb. 12

Halbleiter-Dioden-Schaltungen

Einweggleichrichterschaltung

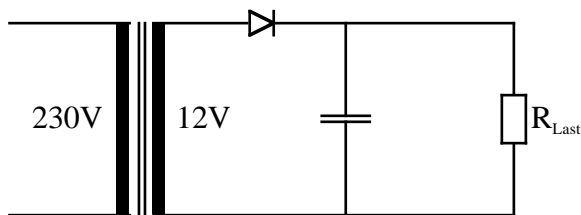


Abb. 13

Die Diode im Einweggleichrichter lässt nur die positiven Halbwellen der Wechselspannung zur Last fließen. Die so entstandene gepulste Gleichspannung wird noch, durch einen parallel geschalteten Kondensator, geglättet. Trotzdem weist die Ausgangsspannung noch eine Restwelligkeit auf. Der Wirkungsgrad von Einweggleichrichterschaltungen ist mit unter 50% äußerst schlecht.

Brückengleichrichterschaltung

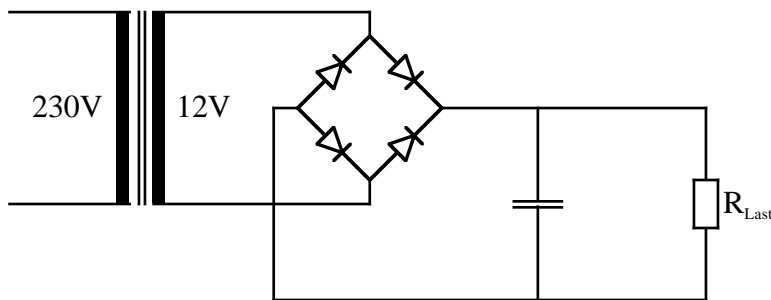


Abb. 14

Durch eine raffinierte Verschaltung von vier Dioden werden positive und negative Halbwellen in der gleichen Stromlaufrichtung zur Last geschickt. Dadurch kann der Wirkungsgrad deutlich gesteigert werden. Auch hier ist ein Kondensator parallel zur Last geschaltet um die Ausgangsspannung zu glätten. Eine Restwelligkeit, wenn auch geringer, weist das Signal immer noch auf.

Brückengleichrichter gibt es auch als fertige Bauteile. Eine Bezeichnung könnte beispielsweise B280C1500 lauten. Der erste Wert gibt die maximale effektive Wechselspannung an und der zweite Wert den maximal zulässigen Strom in mA.

Dioden als Spannungsbegrenzer

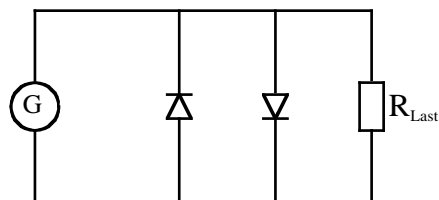



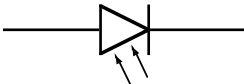
Abb. 15

Ist die Schwellspannung der Dioden nicht erreicht, fließt der Strom über den Lastwiderstand. Wird sie überschritten, schließen die Dioden den Strom kurz. Damit die positive und die negative Halbwellen begrenzt werden müssen zwei antiparallel verschaltete Dioden verwendet werden. Diese drastische Art der Limitierung erzeugt auffällige Clipverzerrungen.


Spezielle Dioden

	<p>Universal-Diode (Si, Ge)</p>
Abb. 16	

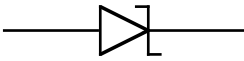
Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich hauptsächlich auf diesen Diodentyp.

	<p>Foto-Diode (Si)</p>
Abb. 17	

Hier ist die Leitfähigkeit des Halbleiters von der Lichteinstrahlung abhängig. Fotodioden haben eine geringe Dynamik sind jedoch sehr schnell. Verwendung finden Foto-Dioden deshalb als Empfänger bei der digitalen optischen Übertragung im Audibereich.

	<p>Kapazitäts-Diode (Si)</p>
Abb. 18	

Ist die Sperrschicht aufgebaut, verhält sich die Diode wie ein Kondensator. Die Größe der Sperrschicht stellt den Plattenabstand dar. Normalerweise ist die Kapazität der Diode nicht erwünscht, man spricht deshalb auch von einer parasitären Kapazität. Man kann sich diese Kapazität jedoch auch zu nutze machen. Da die Größe der Sperrschicht den „Plattenabstand“ bestimmt, kann man durch variieren der an die Diode angelegten Spannung die Kapazität einstellen. Die Kapazität ist jedoch mit 4pF-500pF recht gering. Dieser elektrisch einstellbare Kondensator wird z.B. in Radioempfängern verwendet.

	<p>Zehner-Diode (Si)</p>
Abb. 19	

Im Gegensatz zu normalen Dioden baut sich die Sperrschicht, nach überschreiten der maximal zulässigen Spannung in Sperrrichtung, bei Zehner-Dioden wieder auf. Die Spannung bei welcher die Sperrschicht zerstört wird heißt Zehner-Spannung. Eingesetzt wird sie um die Restwelligkeit aus einer gleichgerichteten Wechselspannung zu entfernen.

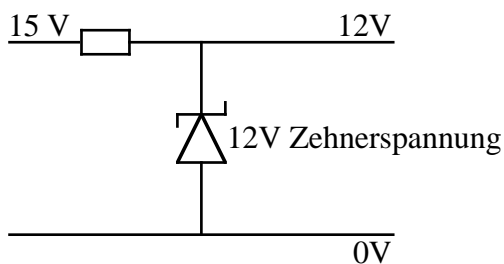
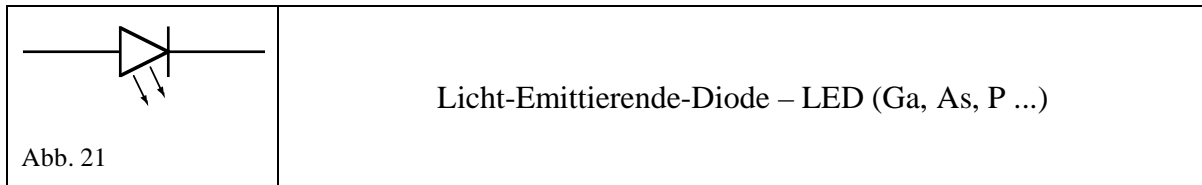


Abb. 20

Am Eingang der Schaltung liegt eine Gleichspannung mit 15V und einer Restwelligkeit an. Die Zehner-Diode leitet alles über 12V nach Masse ab und man kann somit danach eine saubere 12V Gleichspannung abgreifen.



Im Gegensatz zur Glühlampe strahlen LEDs nur ein begrenztes Farbspektrum ab. Durch unterschiedliche Kombination der Halbleiterelemente kann die Farbe variiert werden. Schon sehr früh waren LEDs in den Farben rot, grün und gelb erhältlich. Erst später war die Herstellung von blauen und weißen LEDs möglich. Werden eine rote und eine grüne Diode in einer LED antiparallel verschaltet, kann durch die Stromrichtung die Farbe zwischen Rot und Grün gewechselt werden. Wird eine solche Duo-LED mit einer Wechselspannung betrieben, entsteht Gelb als Überlagerungsfarbe. Ein weiterer Unterschied zur Glühlampe besteht darin, dass die Helligkeit der LED nicht von der Spannung, sondern vom Strom (20mA-50mA) abhängig ist. Die Spannung wird deshalb konstant im Bereich der Schwellspannung gehalten. Bei der digitalen optischen Übertragung wird als Sender eine rote LED eingesetzt.

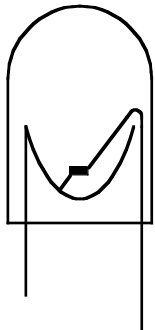
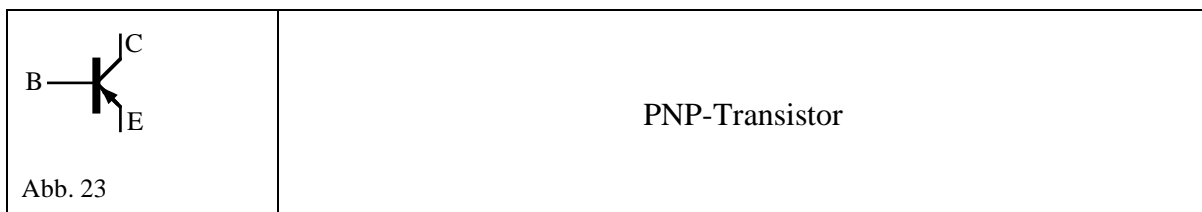


Abb. 22

Der Aufbau einer LED ist in Abbildung 22 dargestellt. Die Diode ist in einem Reflektor angebracht der durch einen Draht einen Anschluss außerhalb hat. Die Kathodenseite der Diode ist mit dem Reflektor verbunden. Die Anodenseite wird direkt mit einem Draht nach außen geführt. Im Neuzustand ist der Draht der Kathode kürzer.

16.3.3 Transistoren

Bipolare-Transistor



Kombiniert man P- und N-dotiertes Material, wie in Abbildung 23 schematisch dargestellt, sodass ein PN- und ein NP-Übergang entstehen, erhält man einen Transistor. Legt man einen Stromkreis an Emitter (positiver Pol) und Kollektor (negativer Pol) an, verhält sich der Transistor wie zwei hintereinander geschaltete Dioden, wobei eine in Flussrichtung und eine in Sperrrichtung betrieben wird. D.h. es fließt kein Strom. Legt man nun jedoch noch zusätzlich an Basis (negativer Pol) und Emitter (positiver Pol) ein Stromkreis an, werden, durch die geringe Größe der Basis, beide Sperrschichten aufgelöst und es fließt auch im Emitter-Kollektor-Stromkreis ein Strom.

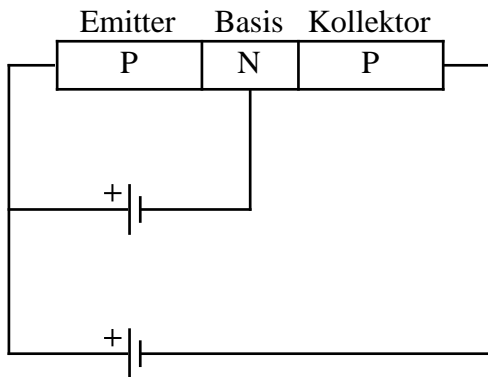


Abb. 24

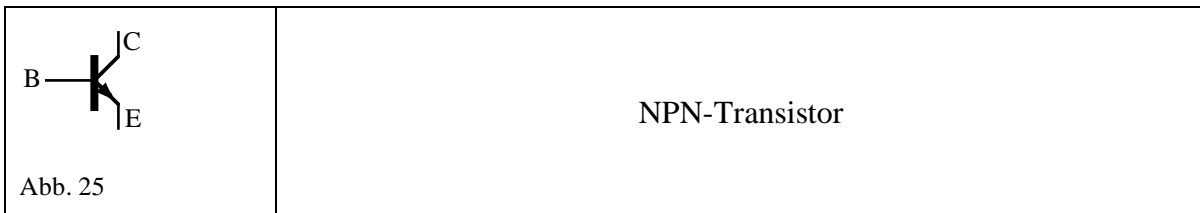


Abb. 25

Die Polaritäten sind bei einem NPN-Transistor vertauscht. Er hat eine höhere Spannungsfestigkeit, rauscht jedoch minimal mehr. Ansonsten verhält er sich genauso wie ein PNP-Transistor.

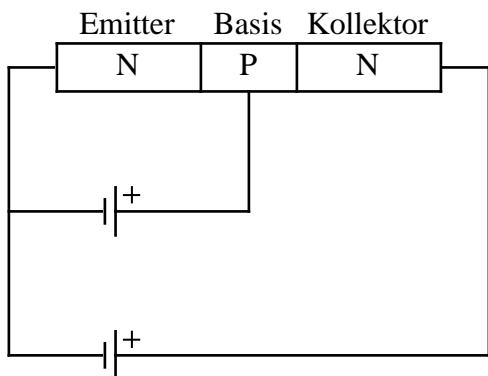


Abb. 26

Bipolare Transistoren sind Leistungsgesteuerte Bauteile. Aus $P = UI$ ist also ersichtlich, dass sie von Strom und Spannung gesteuert sind.

Die Stromverstärkung β ist bei jedem Transistor unterschiedlich. Sie liegt je nach Transistor zwischen 20 und 900.

$$\beta = \frac{\text{Laststrom}}{\text{Steuerstrom}} = \frac{I_{CE}}{I_{BE}}$$

Transistor-Schaltungen

Schalterentlastende-Schaltung

An Kollektor und Emitter wird der Stromkreis angeschlossen, welcher geschaltet werden soll. Über einen entsprechend dimensionierten Widerstand wird dann zwischen Kollektor und Basis der Schalter eingefügt. Da nun ein geringerer Strom über den Schalter fließt, wird der Schalter entlastet.

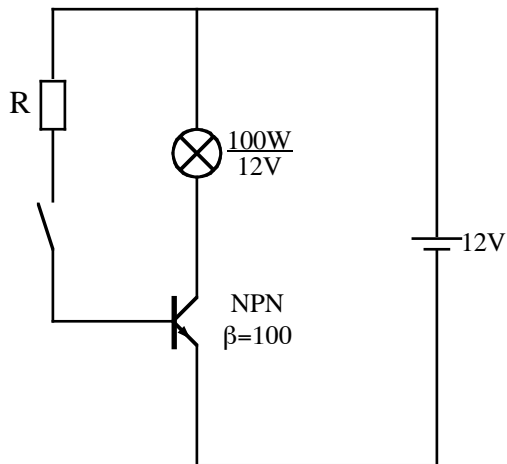


Abb. 27

Emitterschaltung

- spannungsverstärkend
- phasendrehend

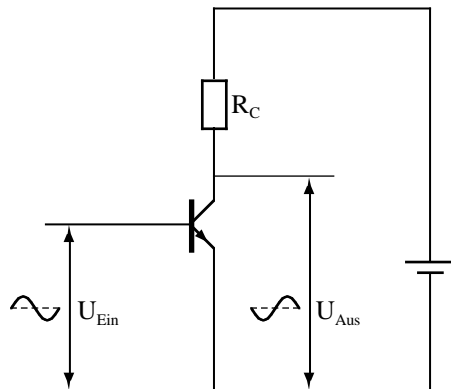


Abb. 28

Kollektorschaltung (Emitter-Folge-Schaltung)

- stromverstärkend
- keine Spannungsverstärkung ($U_{\text{Ein}} = U_{\text{Aus}}$)
- keine Phasendrehung
- Impedanzwandler

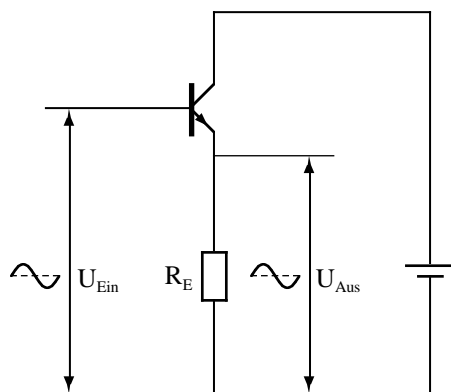


Abb. 29

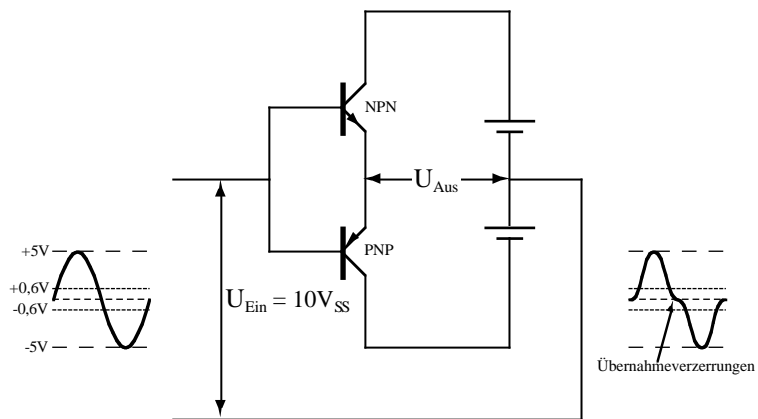
Gegentaktschaltung

Abb. 30