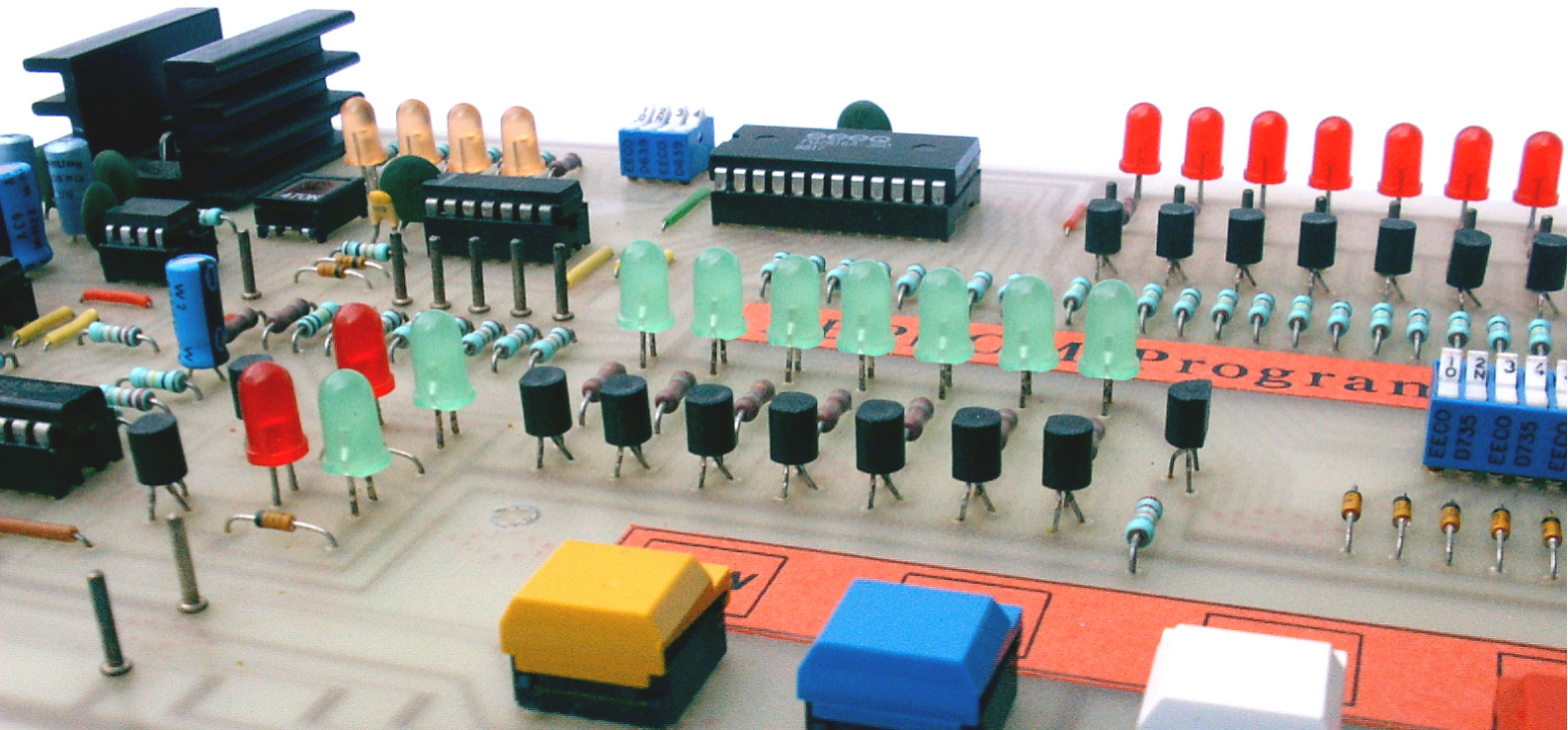
Elektronik mit Herz

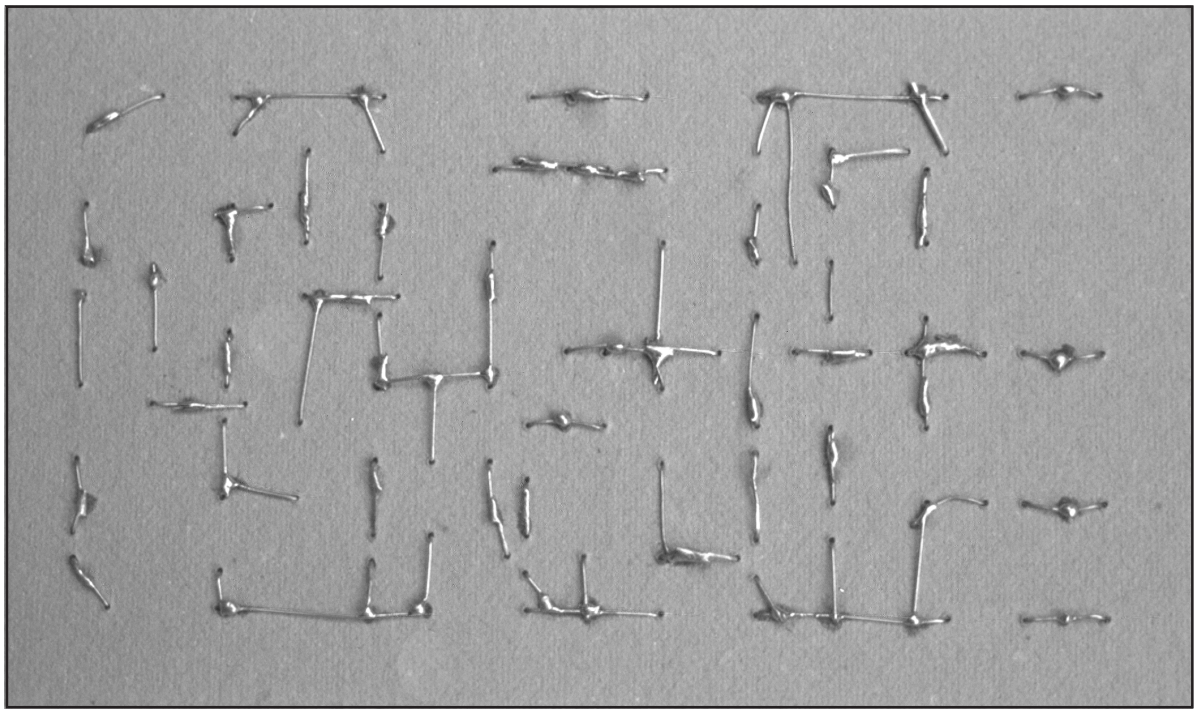
Josef Straßhofer



Josef Straßhofer

Elektronik mit Herz

Grundlagen
Bauelemente
Grundschaltungen
42 Karton-Schaltungen
Bauen - Messen - Rechnen
100 Beispiele für den Praktiker



Karton-Schaltung am Beispiel der **Licht-Alarmanlage** (Seite 88) .... Abbildung der **Rückseite** (Lötseite)

Autor: Josef Straßhofer
Stelzhamerstraße 28
A-4710 Grieskirchen
josef@strasshofer.com

Buch .... 5. Auflage
Code: 3048-25-07

DTG - Druckservice

 Copyright J. Straßhofer

Elektronik mit Herz

Eine Arbeit aus der Praxis für die Praxis

Dieses Buch entstand aus dem Wunsch, dem interessierten Leser und Jung-Elektroniker die **Grundlagen der Elektronik** auf leicht verständliche Weise zu vermitteln. Durch das ergänzende Zusammenwirken von **Schaltungsbau, Theorie und Mathematik** wird Elektronik umfassend behandelt. Das schafft die Voraussetzungen für weitere erfolgreiche Beschäftigung mit diesem interessanten und umfangreichen Fachgebiet.

Das **Karton-System als alternative Technik** des Schaltungsbaus für Ausbildung und Hobby bietet die Möglichkeit, ohne Umwege und mit Freude in die Elektronik einzusteigen. Die **42 Selbstbauschaltungen** sind daher keine Versuchsschaltungen, sondern haben eine realitätsbezogene Funktion. Erst dadurch macht praktizierte Elektronik so richtig Spaß. Zusätzlich wurden 6 Schaltungen zum Thema **„Bauen - Messen - Rechnen“** integriert, die in einem noch erweiterten Ausmaß zeigen, dass weder Theorie noch Schaltungsbau für sich alleine bestehen können. Erst Bauen, Messen und Rechnen zusammen ermöglichen ein realistisches und praxisbezogenes Lernen, bei dem die Freude an der Sache nicht zu kurz kommt.
Denn wer elektronische Schaltungen baut, möchte auch wissen, wie sie funktionieren. Darauf gibt dieses Buch Antwort, ohne zwingend Lernschritte vorzuschreiben.

Je nach individuellen Lernvorstellungen und Wünschen kann der Leser aus den für ihn geeigneten Inhalten auswählen und so mehr und mehr von Elektronik verstehen.
Hauptgedanke bei der Abfassung der **Theorie für den Praktiker** war daher ihre Brauchbarkeit für Ausbildung und Hobby. Sie soll eine Basis für die weitere Beschäftigung mit dem Thema Elektronik sein und praxisorientiertes Wissen bieten, um die Arbeit mit elektronischen Bauelementen und Schaltungen zu unterstützen. Sie bildet den theoretischen Hintergrund für das Analysieren und Verstehen der Karton-Schaltungen mit Hilfe der Schaltungsbeschreibungen.

Keinesfalls ist die Theorie dazu da, dass sie im üblichen Sinn gelernt wird. Ohne den unmittelbaren Umgang mit elektronischen Bauelementen und der Problematik elektronischer Schaltungen ist Theorie wertlos und belegt lediglich Speicherplatz im Gehirn, der für andere Zwecke besser genützt werden kann.
Besonders die **„100 Beispiele für den Praktiker“** bieten die Möglichkeit, mit mathematischen Mitteln die Grundlagen der Elektronik zu ergründen. Sie sind aufbauend angeordnet und bringen den Lernenden auf einen Wissensstand, der die ideale Voraussetzung für eine weitere Beschäftigung mit dem Thema Elektronik ist.

Josef Straßhofer, MA

Die in diesem Buch veröffentlichten Schaltungen und Verfahren werden ohne Rücksicht auf bestehende Patente oder mögliche Schutzrechte mitgeteilt. Sie sind nur für Amateur- und Lehrzwecke bestimmt. Eine gewerbliche Nutzung ohne schriftliche Genehmigung des Autors ist ausdrücklich untersagt. Der Inhalt oder Teile daraus dürfen ohne Genehmigung des Autors weder reproduziert noch unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Alle Schaltungen und technischen Angaben wurden vom Autor mit größter Gewissenhaftigkeit erarbeitet bzw. zusammengestellt. Dennoch lassen sich Fehler nie ganz vermeiden. Es wird deshalb darauf hingewiesen, daß der Nachbau der Schaltungen und Folgen, die auf fehlerhafte Angaben zurückgehen, außerhalb der Verantwortlichkeit und Haftung des Autors liegen.

Elektronik ..... Theorie für den Praktiker

Grundlagen der Elektronik
Aufbau der Materie 4
Elektronen im Leiter 5
Stromkreis 6
Spannung - Strom - Widerstand 7
Das Ohmsche Gesetz 9
Leistung - Arbeit 10
Die Kirchhoffschen Gesetze 11
Leiter - Widerstand 12
Bauelemente der Elektronik
Widerstand 13
Widerstandsbestimmung 14
Veränderbare Widerstände 17
Kondensator 18
Halbleiter - Aufbau und Eigenschaften 23
Halbleiter - PN-Übergang 26
Diode 27
Diode als Gleichrichter 29
Zener - Diode 30
Leuchtdiode - LED 31
NTC - Heißleiter PTC - Kaltleiter 32
LDR VDR Varistor 33
Transistor 34
Transistor als Schalter 38
Transistor - Steuerung 41
Transistor - Kennlinien 42
Transistor BC 547 B 43
Grundschaltungen der Elektronik
Bistabile Kippstufe 44
Monostabile Kippstufe 45
Astabiler Multivibrator 47
Schmitt-Trigger 49
Transistorschaltungen 51
Integrierte Schaltkreise 53

Karton-System ..... 42 Schaltpläne mit Bauplänen und Beschreibungen

LED-Blinker 55
Multivibrator 56
Dämmerungsschalter 57
Anti-Grapsch 58
Kojak-Sirene 59
Mini-Orgel 60
Mini-Roulette 61
Nebelhorn 62
Durchgangsprüfer 63
Elektronischer Würfel 64
Licht-Flip-Flop 65
LED-Timer 66
Infrarot-Lichtschranke 67
Dreiklang-Gong 68
Monoflop 69
Lügendetektor 70
Thermoschalter 71
4-Kanal LED-Lichtorgel 72
Motorrad-Sound 73
Spannungswächter 74
Mückenscheuche 75
Motorsteuerung 76
Mini-Spion 77
Mikrofon-Vorverstärker 78
Aktiver Klangregler 79
Hifi-Endverstärker 80
Professionelle Lichtschranke 81
Martinshorn 83
Digital-Thermometer 84
Transistor-Tester 85
Gegensprechanlage 86
Relais-Karte 87
Licht-Alarmanlage 88
Melodie-Sound 89
Pegelstand-Anzeige 90
Mittelwellen-Empfänger 91
Ampelsteuerung 92
Alarmanlage 94
Schiffsdiesel-Generator 95
Automatik-Blitzer 96
Sound-Generator „For Elise“ 97
Rennbahn-Express 98

Bauen - Messen - Rechnen

LED - Alarm 100
LED - Sensor 101
LED - Thyristor 102
Dämmerungsschalter 103
Thermo-Differenzverstärker 104
Bistabiler Sensor 105

100 Beispiele für den Praktiker ..... Rechenprogramm

Fachmathematik - Rechenprogramm 106
Informationen zu den Rechenaufgaben 107
Ohmsches Gesetz 108
Gemischte Schaltung 112
Elektrische Leistung 114
Glühlämpchen im Stromkreis 116
Temperaturabhängiger Widerstand - NTC 117
Lichtabhängiger Widerstand - LDR 118
Kondensator 119
Diode 121
Zener-Diode 123
Leuchtdiode - LED 124
Transistor als Schalter 125
Transistor - Steuerung 127
Transistor - Anwendung 130
Lösungen zu den Beispielen 133

Informationen zum Schaltungsbau

Karton-Schaltungen 134
Richtiges Löten 135
Experimentierboard 136
Stromversorgung 137
Zubehör 138
Daten - Transistoren 139
Daten - Dioden und Spannungsregler 140
Daten - Netzgerät mit LM 317 T 140

 Copyright J. Straßhofer

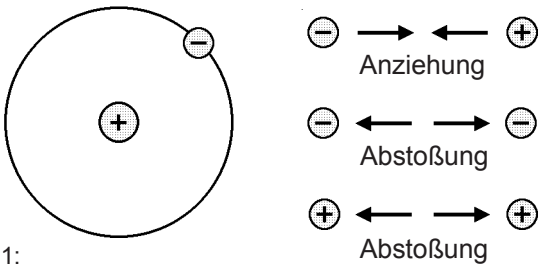


Abb. 1:
Wasserstoffatom
1 Proton ..... **+**
1 Elektron ..... **-**

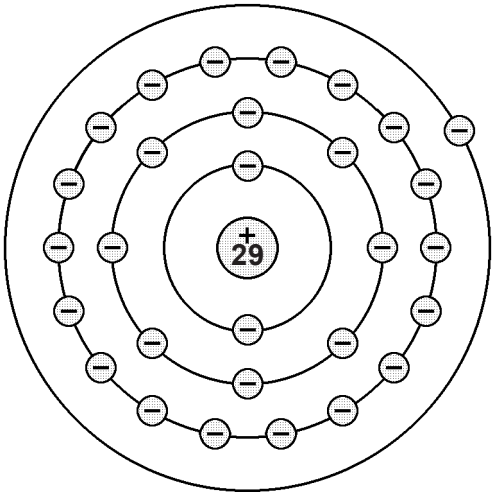


Abb. 2:
Modell eines Kupferatoms (29 - /29 +):
Auf der N-Schale (Außenbahn) befindet sich ein relativ ungebundenes - fast freies - Elektron.

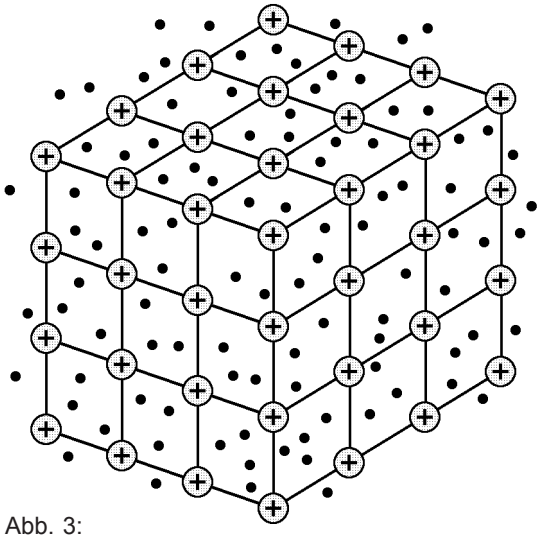


Abb. 3:
Schematische Atomstruktur eines Metalls
Frei bewegliche Elektronen verteilen sich regellos zwischen den positiven Atomrümpfen des Metalls.

Das Atom

Das kleinste chemisch einheitliche Teilchen eines Grundstoffes ist das **Atom**. Jedes Atom besteht aus einem **Kern**, um den in der Atomhülle die **Elektronen** kreisen. Im Kern befinden sich **Neutronen** (keine Ladung) und **Protonen** mit positiver Ladung (+).
Die Elektronen, die in verschiedenen Abständen (Schalen) um den Kern kreisen, sind **negativ** (-) geladen.

Das einfachste Atom ist das **Wasserstoffatom** *(Abb. 1)*, da es nur aus einem Proton (+) und einem Elektron (-) besteht.
Gleichnamige Ladungen (+ + , - -) stoßen einander ab, ungleichnamige (+ -) ziehen sich an. Deshalb kreist das negativ geladene Elektron trotz hoher Geschwindigkeit (2000 km/sec) um den positiv geladenen Kern.

Kupferatom

Sind in einem Atom ebensoviele Elektronen wie Protonen vorhanden, so wirkt es nach außen elektrisch neutral. Beim **Kupferatom** *(Abb. 2)* sind es bereits **29 Elektronen** in der Hülle und **29 Protonen** im Kern. Das **äußerste Elektron**, auch Valenz- oder Leitungselektron genannt, ist relativ schwach an den Kern gebunden. Verläßt das Valenzelektron das Atom, dann bleibt ein **positiv geladener Atomrumpf** (29 Protonen und 28 Elektronen) zurück.

Atomstruktur eines Metalls

Diese **unbeweglichen positiven Atomrümpfe** bilden die Gitterpunkte beim Metall Kupfer *(Abb. 3)*. Dazwischen befinden sich nun die **Elektronen**, die im Inneren des Metalls **frei beweglich** sind.

Diese **freien Ladungsträger**, die in Metallen in mehr oder minder größerer Zahl vorhanden sind, sind für die elektrische Leitfähigkeit der Metalle verantwortlich. Die **Träger des elektrischen Stroms** sind also die **Elektronen**.

⊕ positiv geladene Atomrümpfe

• freies negativ geladenes Elektron

 Copyright J. Straßhofer

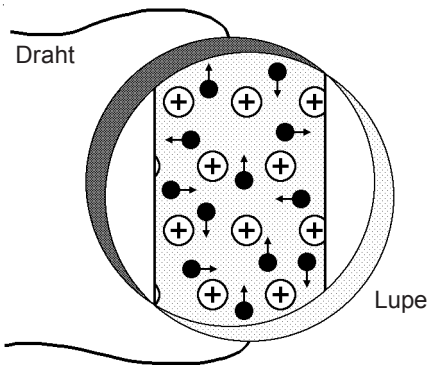


Abb. 1:
Die frei beweglichen negativ geladenen Elektronen verteilen sich regellos zwischen den Atomrümpfen.

Gute Leiter, wie Silber und Kupfer, haben viele freie Leitungselektronen. Sofern am Leiter **keine Spannung** anliegt *(Abb. 1)*, wandern die Elektronen **regellos im Leiter umher**. Keine Richtung wird bevorzugt.

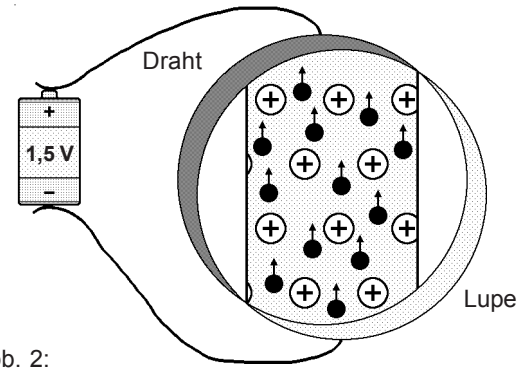


Abb. 2:
Die negativ geladenen Elektronen wandern zum positiven Pol der Spannungsquelle (1,5 Volt - Batterie).

Nach Anlegen einer **Spannung** *(Abb. 2)* wandern die Elektronen des Leiters **weg vom negativen Pol** der Batterie **zum positiven Pol**.
Die Elektronen werden also vom negativen Pol abgestoßen und vom positiven angezogen. Der elektrische Strom in Metallen ist somit die **gerichtete Bewegung freier Leitungselektronen**.

Stromrichtung

Aus dem **negativen Pol** der Batterie *(Abb. 3)*, an dem auf Grund chemischer Reaktionen **Elektronenüberschuß** besteht, werden Elektronen in den Leiter nachgeliefert. Vom **positiven Pol** - hier herrscht **Elektronenmangel** - werden die Elektronen aufgenommen. Der Elektronenstrom bewegt sich also von MINUS (-) nach PLUS (+). Aus früherer Zeit, in der man über die tatsächlichen Vorgänge noch nicht Bescheid wusste, stammt die **Festlegung der Stromrichtung von PLUS (+) nach MINUS (-)**. Man hat diese sogenannte **"Technische Stromrichtung"** für Erklärungen in der Elektronik beibehalten.
Im Gegensatz zum tatsächlichen Elektronenstrom gilt in der Elektronik also die **Stromrichtung von PLUS (+) nach MINUS (-)**.

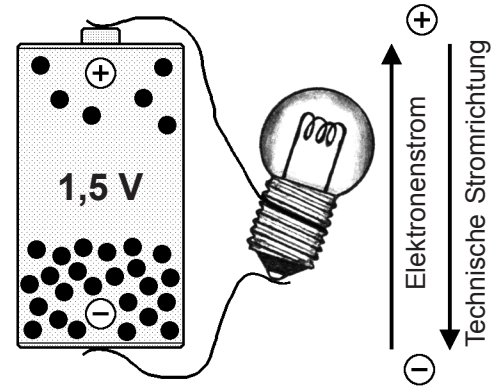


Abb. 3:

Driftgeschwindigkeit ..... Impulsgeschwindigkeit

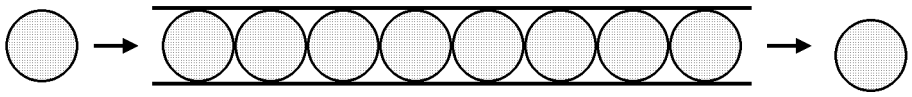


Abb. 4:
Vergleich Tennisbälle - Elektronen: Wird am linken Ende ein Tennisball in das Rohr geschoben, bewegt sich der erste Ball um einen Durchmesser weiter (Driftgeschwindigkeit). Gleichzeitig erhält der letzte Ball einen Impuls und fällt aus dem Rohr (Impulsgeschwindigkeit).

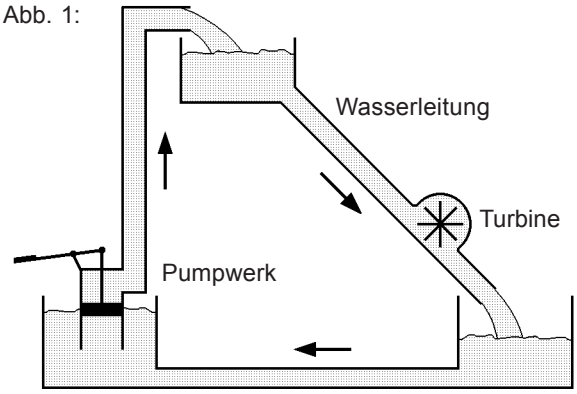
Die **Driftgeschwindigkeit** ist jene **tatsächliche** durchschnittliche Geschwindigkeit, mit der sich die Elektronen im Leiter in Richtung PLUS - Pol bewegen. In Kupfer beträgt sie bei normaler Strombelastung ca. **3 cm pro Minute**.

Die **Impulsgeschwindigkeit** - jene Geschwindigkeit, mit der **Signale** weitergegeben werden - entspricht der Lichtgeschwindigkeit (300000 km/sec).

 Copyright J. Straßhofer

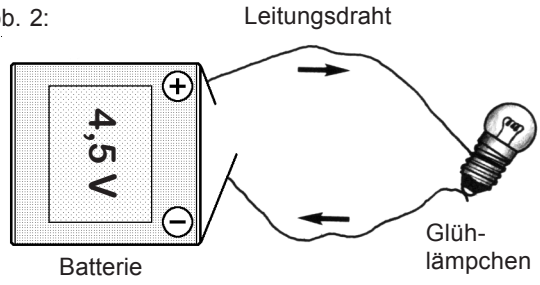
Wasserkreislauf

Abb. 1:



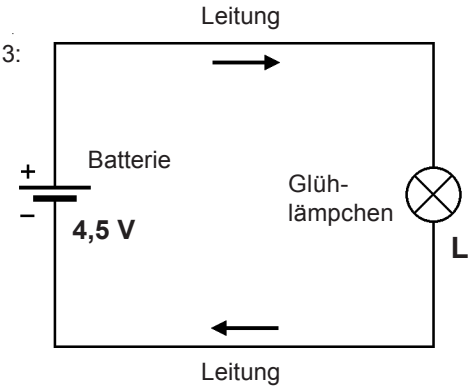
Stromkreis

Abb. 2:



Stromkreis ... Schaltplan

Abb. 3:



Wasserkreislauf und Stromkreis im Vergleich

Der **Wasserkreislauf** *(Abb. 1)* und der **Stromkreis** *(Abb. 2)* besitzen **gemeinsame Merkmale**.

Im **Wasserkreislauf** *(Abb. 1)* fließt das Wasser von einem **höher liegenden Gefäß** durch eine Wasserleitung und eine Turbine in ein **niedriger liegendes Gefäß**. In der Turbine wird die Energie des fließenden Wassers in eine Drehbewegung umgewandelt. Ein Pumpwerk sorgt dafür, dass im oberen Gefäß das Wasser nicht versiegt.

Im **Stromkreis** *(Abb. 2)* ist ein Glühlämpchen über einen Leitungsdraht mit einer Batterie so verbunden, dass Strom fließen kann. Das Lämpchen leuchtet.
In *Abb. 3* wird der **Stromkreis** stark vereinfacht in einem **Schaltplan mit Symbolen** dargestellt. Dies auch deshalb, weil Symbole weniger Platz benötigen.

Gemeinsame Merkmale

Welche gemeinsamen Merkmale lassen sich nun zwischen Wasserkreislauf *(Abb. 1)* und Stromkreis *(Abb. 2)* feststellen?

Beide Kreisläufe besitzen eine **Energiequelle**, die für den Transport des Stroms sorgt. Im Wasserkreislauf ist es das **Pumpwerk**, im Stromkreis die **Batterie**. In *Abb. 1* fließt ein Wasserstrom durch eine **Wasserleitung**, in *Abb. 2* elektrischer Strom durch einen **Leitungsdraht**. Die von der Energiequelle stammende Energie wird in *Abb. 1* von einer **Turbine**, die einen Generator antreibt, verbraucht, in *Abb. 2* von einem **Glühlämpchen**, das leuchtet. Turbine und Glühlämpchen stellen in den Kreisläufen die Verbraucher dar.

Solange genügend Energie vorhanden ist, bleibt der Kreislauf aufrecht.
Wird die Energiequelle schwächer und damit der fließende Strom, wird sich auch die Turbine langsamer drehen bzw. das Lämpchen weniger leuchten. Ist alle Energie verbraucht, fließt kein Wasser (Strom) mehr, und der Kreislauf kommt zum Stillstand. Wenn die Batterie keinen Strom mehr liefert, dann leuchtet auch das Lämpchen nicht mehr.

 Copyright J. Straßhofer

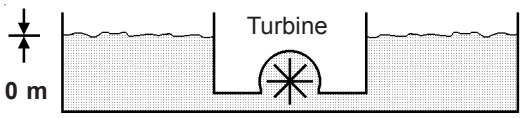


Abb. 1:

„kein Druck“ ..... „keine Spannung“

Abbildung 1 zeigt **zwei Wasserbecken**, die durch einen Kanal verbunden sind. Da sie sich auf **gleicher Höhe** befinden, übt das Wasser **keinen Druck** auf die im Kanal eingebaute Turbine aus.
Es fließt kein Wasser, die Turbine steht still.

Im Vergleich dazu:
Durch ein Lämpchen, an dem **keine Spannung** anliegt, fließt auch **kein Strom**.

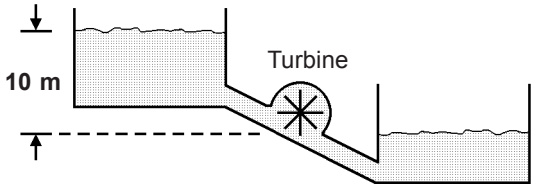
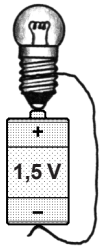


Abb. 2:



„kleiner Druck“ ..... „kleine Spannung“

In *Abbildung 2* besteht zwischen den beiden Wasserbecken eine **Höhendifferenz von 10 m**.
Vom oberen Becken fließt daher Wasser durch den Kanal und durch die Turbine in das untere Becken. Die Turbine läuft jedoch nur mit niedriger Geschwindigkeit, da auf Grund der geringen Höhendifferenz das Wasser nur einen **kleinen Druck** ausübt.

Im Vergleich dazu:
Das Lämpchen leuchtet sehr **schwach**, da bei der relativ **geringen Spannung** von **1,5 Volt** nur ein **kleiner Strom** fließen kann.

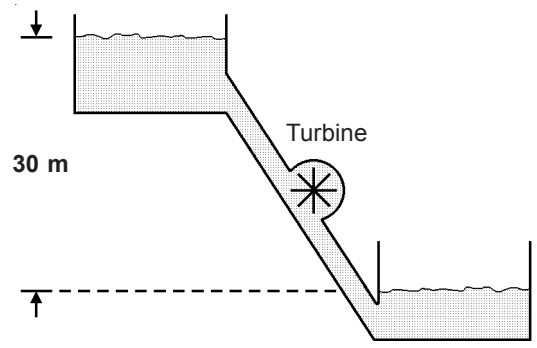
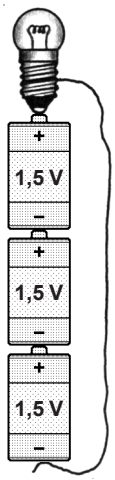


Abb. 3:



„großer Druck“ ..... „große Spannung“

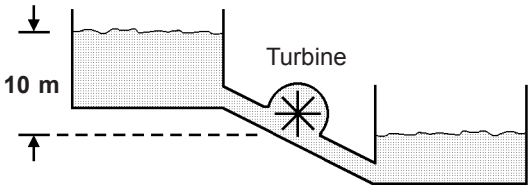
In *Abbildung 3* besteht zwischen den beiden Wasserbecken eine **Höhendifferenz von 30 m**.
Mit **großem Druck** fließt daher das Wasser vom oberen Becken durch den Kanal und durch die Turbine in das untere Becken.
Die Turbine läuft mit hoher Geschwindigkeit.

Im Vergleich dazu:
Wird an dasselbe Lämpchen wie in *Abbildung 2* jetzt eine Spannung von **4,5 Volt** angelegt, so treibt die nun **dreifache Spannung** auch den **dreifachen Strom** durch das Lämpchen.
Das Lämpchen leuchtet sehr hell.

Was ergibt sich daraus?

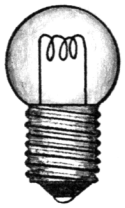
Je **höher die Spannung** ist, an die ein Verbraucher (Turbine, Lämpchen, ...) angeschlossen wird, desto **mehr Strom** fließt durch diesen Verbraucher. *Somit gilt:* **Je mehr Spannung, desto mehr Strom; je weniger Spannung, desto weniger Strom.**

 Copyright J. Straßhofer

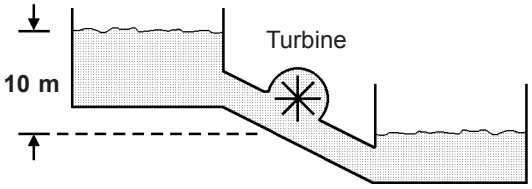


„kleiner Kanal“ ..... „kleiner Strom“
„dünner Leiter“ ..... „großer Widerstand“

Abb. 4:

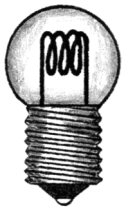


dünner Draht ..... wenig Strom



„großer Kanal“ ..... „großer Strom“
„großer Leiter“ ..... „kleiner Widerstand“

Abb. 5:



dicker Draht ..... viel Strom

Abb. 4 und *Abb. 5* zeigen jeweils zwei Wasserbecken, deren Höhendifferenz 10 m beträgt.
Die **Kanalquerschnitte** sind jedoch **verschieden groß**, sodass auch die Wasserströme verschieden groß sind.
Durch den **großen Kanal** fließt ein **großer Strom**, durch den **kleinen Kanal** ein **kleiner Strom**.

Im Vergleich dazu: Der **Draht** im Glühlämpchen ist für den Strom ein mehr oder weniger großes **Hindernis** (Widerstand). Er besteht zumeist aus **Wolfram** und hat eine Temperatur von ca. 2500°C, wenn das Lämpchen leuchtet.
Wieviel **Strom** durch den Draht eines derartigen Lämpchens fließt, ist bei gleicher Spannung **von der Drahtstärke abhängig**.

Was ergibt sich daraus?

Je dünner ein Draht ist, desto **größer ist sein Widerstand**, den er dem Strom entgegensetzt. Bei einem **dünnen Draht** fließt daher nur **wenig Strom**, bei einem **dicken Draht viel Strom**. Durch einen großen Widerstand (= dünner Draht) fließt demnach ein kleiner Strom, durch einen kleinen Widerstand (= dicker Draht) fließt ein großer Strom.

U ..... **Spannung**

Einheit: **Volt ..... V**

Die **elektrische Spannung** ist der **Druck des Stroms** in einem Leiter.

Beispiele: U = 100 mV U = 4,5 V U = 230 V

1 V = 1000 mV ..... 1 kV = 1000 V

I ..... **Strom**

Einheit: **Ampere ..... A**

Der **elektrische Strom** ist die **Menge der bewegten Elektronen** pro Zeit.

Beispiele: I = 50 µA I = 25 mA I = 10 A

1 A = 1000 mA ..... 1 mA = 1000 µA

R ..... **Widerstand**

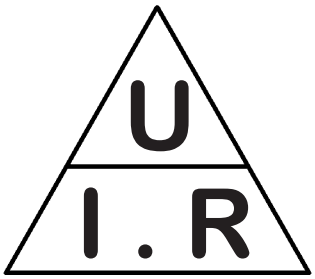
Einheit: **Ohm ..... Ω**

Der **elektrische Widerstand** ist ein **Hindernis** für den Strom.

Beispiele: R = 220 Ω R = 47 kΩ R = 2,2 MΩ

1 kΩ = 1000 Ω ..... 1 MΩ = 1000 kΩ

 Copyright J. Straßhofer

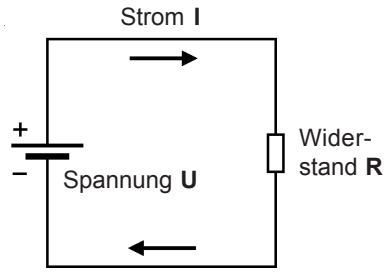


$$U = I \cdot R \qquad I = \frac{U}{R} \qquad R = \frac{U}{I}$$

Sehr viele Probleme in der Elektronik lassen sich mit dem **Ohmschen Gesetz** lösen.
Dieses **Grundgesetz der Elektrotechnik** schafft die Verbindung zwischen den drei Größen **Spannung, Strom** und **Widerstand**.
Grundsätzlich handelt es sich um eine **Gleichung**, die in drei Formen angegeben werden kann. Sind **zwei Werte** gegeben, so kann der **dritte Wert** mit dem Ohmschen Gesetz berechnet werden.

Ohmsches Dreieck: Durch **Verdecken** der gesuchten Größe mit einem Finger ergeben die beiden sichtbaren Größen eine der drei Formen des Ohmschen Gesetzes.

Anwendung des Ohmschen Gesetzes im Stromkreis



Die Abbildung zeigt alle drei Größen des Ohmschen Gesetzes **(Spannung U, Strom I, Widerstand R)** im Stromkreis. In der Regel wird der Widerstand der Verbindungsleitungen (z.B.: Kupferdraht) zwischen Spannungsquelle U und Widerstand R wegen seines minimalen Wertes nicht berücksichtigt. Der Verbraucher - in diesem Fall der **Widerstand R** - stellt ein Hindernis für den Strom im Stromkreis dar und könnte auch ein Lämpchen oder ein Elektromotor sein.

Berechnungen mit dem Ohmschen Gesetz

Berechnung des Widerstandes R

Bei einer **Spannung U von 4,5 V** soll durch den Widerstand R ein **Strom I von 45 mA** fließen.
Welchen Wert muß der **Widerstand R** haben?
Für den **Widerstand R** ergibt die Berechnung einen Wert von **100 Ohm**.

U = 4,5 V, I = 45 mA, **R = ?**

$$R = \frac{U}{I} = \frac{4{,}5\ V}{0{,}045\ A} = \mathbf{100\ \Omega}$$

Berechnung des Stromes I

Bei einer **Spannung U von 4,5 Volt** wird der **Widerstand R auf 180 Ohm** erhöht.
Welcher **Strom I** fließt durch den Widerstand?
Die Berechnung ergibt, dass ein **Strom I von 25 mA** durch den Widerstand fließt.

U = 4,5 V, R = 180 Ω, **I = ?**

$$I = \frac{U}{R} = \frac{4{,}5\ V}{180\ \mathbf{\Omega}} = 0{,}025\ A = \mathbf{25\ mA}$$

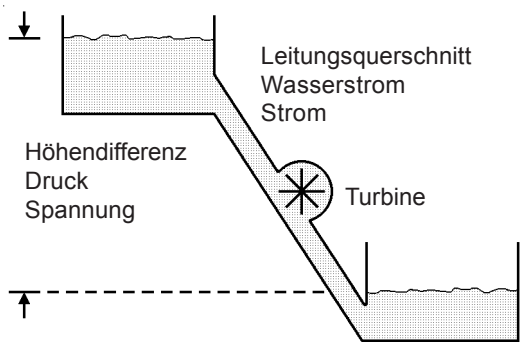
Berechnung der Spannung U

Bei gleichem **Widerstand (R = 180 Ohm)** soll ein **Strom I von 50 mA** fließen.
Welche **Spannung U** ist dazu notwendig?
Das Berechnung zeigt, dass für **50 mA eine Spannung von 9 Volt** nötig ist.

R = 180 Ω, I = 50 mA, **U = ?**

$$U = I \cdot R = 0{,}05\ A \cdot 180\ \Omega = \mathbf{9\ V}$$

 Copyright J. Straßhofer



Elektrische Leistung

Die **Leistung** eines an eine Turbine angeschlossenen Generators steigt mit zunehmendem **Druck** und mit zunehmender **Menge des Wassers**. Je größer also **Spannung** und **Strom** an einem Verbraucher sind, desto größer ist seine **Leistung**. Daraus folgt die Formel:

$$P = U \cdot I \qquad P = I^2 \cdot R \qquad P = \frac{U^2}{R}$$

P ..... **Leistung**

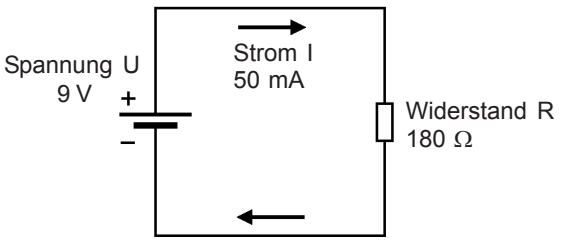
Einheit: **Watt ..... W**

Die Elektrische Leistung ist
Spannung x Strom.

Beispiele: P = 300 mW P = 60 W P = 2 kW

1 mW = 1000 µW ..... 1 W = 1000 mW
1 kW = 1000 W ..... 1 MW = 1000 kW

Leistung: Anwendung und Berechnung im Stromkreis



Die Abbildung zeigt einen Stromkreis, in dem auf Grund der **Spannung von 9 Volt** und dem **Widerstand von 180 Ohm** der **Strom von 50 mA** bereits festgelegt ist.
Im Verbraucher wird laut Rechnung eine **Leistung P_1 von 0,45 Watt** umgesetzt. Dies zeigt sich in der erhöhten Temperatur des Widerstandes R.

Wird nun die **Spannung U** bei gleichbleibendem Widerstand R von **9 Volt** auf **18 Volt** verdoppelt, verdoppelt sich bei gleichbleibendem Widerstand R natürlich auch der **Strom I auf 100 mA**.
Die **Leistung P_2** steigt daher auf das **Vierfache**.
(*Wichtig!* Bei praktischen Versuchen muß hier ein 2 Watt - Widerstand eingebaut werden.)

U = 9 V, I = 50 mA, R = 180 Ω, **P_1 = ?**

$P_1 = U \cdot I = 9\ V \cdot 0{,}05\ A =$ **0,45 W**

U = 18 V, I = 100 mA, R = 180 Ω, **P_2 = ?**

$P_2 = U \cdot I = 18\ V \cdot 0{,}1\ A =$ **1,8 W**

W ..... **Arbeit**

Einheit: **Wattsekunde ..... Ws**

Die Elektrische Arbeit ist
Leistung x Zeit.

Beispiele: W = 50 Ws W = 30 Wh W = 2 kWh

1 Wh = 3600 Ws .....1 kWh = 1000 Wh

Berechnung der Elektrischen Arbeit

P = 0,45 W, t = 20 min, **W = ?**

$W = P \cdot t = 0{,}45\ W \cdot 1200\ s =$ **540 Ws**

Wird in einem Verbraucher (Widerstand, ...) während einer Zeit von **20 min** eine Leistung von **0,45 W** umgesetzt, so ergibt die Rechnung eine Arbeit von **540 Ws**.

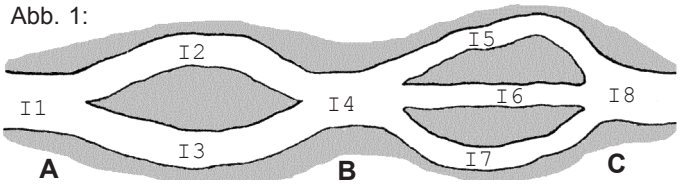
Formel: $$W = P \cdot t$$

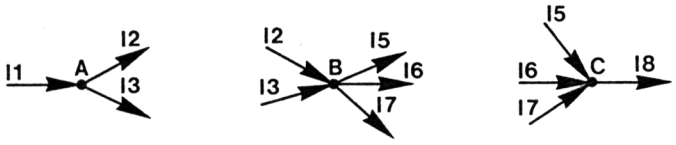
Wird **Leistung** aus einer Batterie oder aus der Steckdose entnommen, so ist nicht nur die **Größe der Leistung** entscheidend, sondern auch die **Zeitdauer** der Leistungsentnahme. Daraus ergibt sich die **Elektrische Arbeit**, die auch bezahlt werden muss (Batterie, Solarzellen, Stromrechnung).

 Copyright J. Straßhofer

1. Kirchhoffsches Gesetz (Knotenpunktsatz) ..... Stromverzweigung

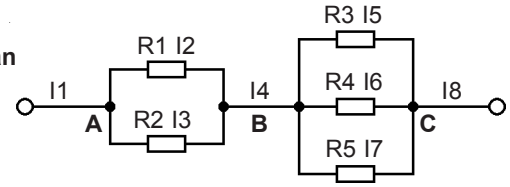
Abb. 1:





I1 = I2 + I3 I2 + I3 = I5 + I6 + I7 I5 + I6 + I7 = I8

Abb. 2:
Schaltplan



Das **1. Kirchhoffsche Gesetz** (Knotenpunktsatz) behandelt die **Stromverzweigung** in einer Schaltung. Zum besseren Verständnis ist in *Abb. 1* ein sich verzweigender Wasserstrom abgebildet, der dem Schaltplan in *Abb. 2* entspricht.

Der zufließende **Gesamtstrom I1** teilt sich in die beiden **Teilströme I2 und I3** (Knotenpunkt **A**). **I2 und I3** sammeln sich im Knotenpunkt **B** (Gesamtstrom **I4**) und teilen sich jetzt in die drei Teilströme **I5, I6 und I7**. Diese sammeln sich wieder im Knotenpunkt **C** zum Gesamtstrom **I8**.
Da kein Strom (Wasser) verlorengeht oder hinzukommt, gilt **I1 = I4 = I8**.

Knotenpunktsatz: Die Summe aller zufließenden Ströme ist gleich der Summe aller abfließenden Ströme.

2. Kirchhoffsches Gesetz (Maschensatz) ..... Spannungsteiler

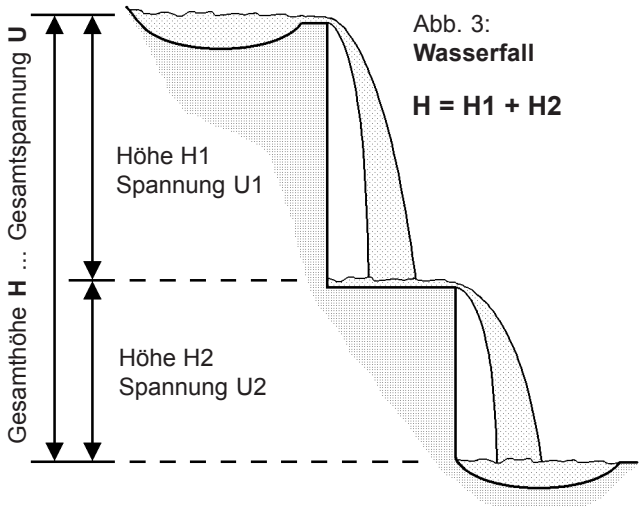
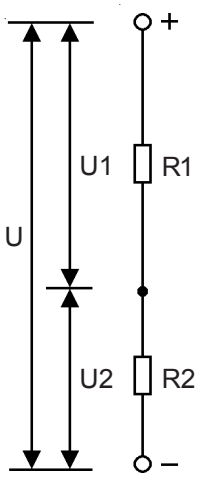


Abb. 3:
Wasserfall

H = H1 + H2

Abb. 4:
Schaltplan



Gesamtspannung **U**
Teilspannung **U1**
Teilspannung **U2**

U = U1 + U2

Das **2. Kirchhoffsche Gesetz** (Maschensatz) behandelt den **Spannungsteiler** in einer Schaltung. Der abgebildete Wasserfall *(Abb. 3)* überwindet die **Höhe H in zwei Stufen (H1 + H2)**, die Gesamthöhe H des Wasserfalls bleibt aber gleich.
Genauso wird die **Spannung U** durch die **Widerstände R1 und R2** geteilt *(Abb. 4)*.

Der Strom I, der auf Grund der Spannung U durch die Widerstände **R1** und **R2** fließt, erzeugt nach der Formel U = I . R in jedem Widerstand einen **Spannungsabfall.**
Beide verbrauchten Spannungsabfälle **U1** und **U2** ergeben also die erzeugte **Spannung U**. In jeder Masche gilt wie hier **U = U1 + U2.**

Maschensatz: In einer Masche ist die Summe aller erzeugten Spannungen gleich der Summe aller verbrauchten Spannungen.

 Copyright J. Straßhofer

Als **Leiter** finden in der Elektronik verschiedenste Stoffe (Gold, Kupfer, ...) Verwendung.

Der **Widerstand R** eines Leiters (Draht, Leiterbahn) hängt von seiner **Länge l**, von seinem **Querschnitt A** und vom spezifischen **Widerstand ρ** des verwendeten Materials ab. **(ρ ..... rho)**

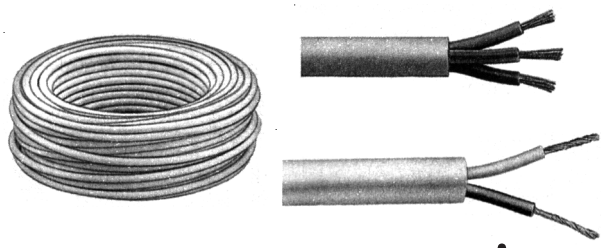


Tabelle: Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit

Material Stoff bei 20°C	Spezifischer Widerstand ρ (Ωmm²/m)	Leitfähigkeit χ (m/Ωmm²)
Aluminium	0,025	40,0
Antimon	0,386	2,59
Blei	0,188	5,32
Chrom	0,026	38,1
Eisen	0,1	10,0
Gold	0,02	50,0
Iridium	0,046	21,7
Kadmium	0,076	13,15
Kupfer	0,016	62,5
Magnesium	0,046	21,7
Molybdän	0,053	18,8
Nickel	0,061	16,4
Palladium	0,109	9,18
Platin	0,098	10,2
Quecksilber	0,958	1,04
Silber	0,015	66,6
Tantal	0,124	8,07
Wismut	1,2	0,83
Wolfram	0,049	20,4
Zink	0,048	20,8
Zinn	0,1	10,0
Bronze	0,18	5,56
Konstantan	0,50	2,04
Manganin	0,42	2,32
Messing	0,063	15,9
Neusilber	0,3	3,33
Nickel-Chrom	1,09	0,92
Nickelin	0,43	2,32
Platiniridium	0,32	3,13
Stahldraht	0,13	7,7
Graphit	22	0,046
Kohlestifte	65	0,015
Silit	1000	0,001

In der abgebildeten **Tabelle** sind der spezifische **Widerstand ρ** und die **Leitfähigkeit χ** von Leitermaterialien (reine Metalle, Legierungen, Halbleiter) angegeben. Umfangreichere Tabellen finden sich in der einschlägigen Fachliteratur.

Formel: $$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

R ..... Ω (Ohm)
l ..... m (Meter)
A ..... mm² (Quadratmillimeter)
ρ ..... Ωmm²/m

Der **spezifische Widerstand ρ** ist der Widerstand eines Drahtes mit der **Länge l von 1 m** und einem **Querschnitt A von 1 mm²** bei einer Temperatur von 20°C.

Entsprechend der Formel gilt daher:

- **.....** je **größer** der spezifische Widerstand ρ, desto **größer** ist der Widerstand R des Leiters;
- **.....** je **länger** der Leiter l, desto **größer** ist sein Widerstand R;
- **.....** je **größer** der Querschnitt A des Leiters, desto **kleiner** ist sein Widerstand R.

Berechnungsbeispiel:
Bei einem Styroporschneider wird ein 15 cm langer Konstantandraht mit einem Durchmesser von 0,1 mm verwendet. Wie groß ist der Widerstand R dieses Drahtes?

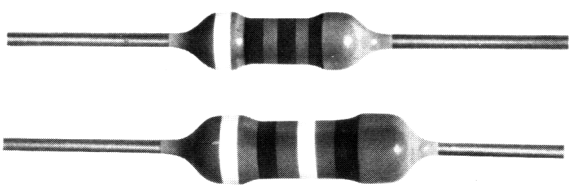
$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{0{,}5 \cdot 0{,}15}{0{,}007854} = \mathbf{9{,}55\ \Omega}$$

Leitfähigkeit χ:

In der Energietechnik wird oft die **Leitfähigkeit χ (kappa)** anstatt des spezifischen Widerstandes ρ verwendet. Die **Leitfähigkeit χ** ist der **Kehrwert** des spezifischen Widerstandes, woraus sich die entsprechende Formel für den Widerstand R bzw. die Daten laut Tabelle ergeben. Je größer also der spezifische Widerstand ρ eines Stoffes ist, desto kleiner ist die Leitfähigkeit χ dieses Stoffes.

$$\chi = \frac{1}{\rho} \qquad R = \frac{l}{\chi \cdot A}$$

 Copyright J. Straßhofer



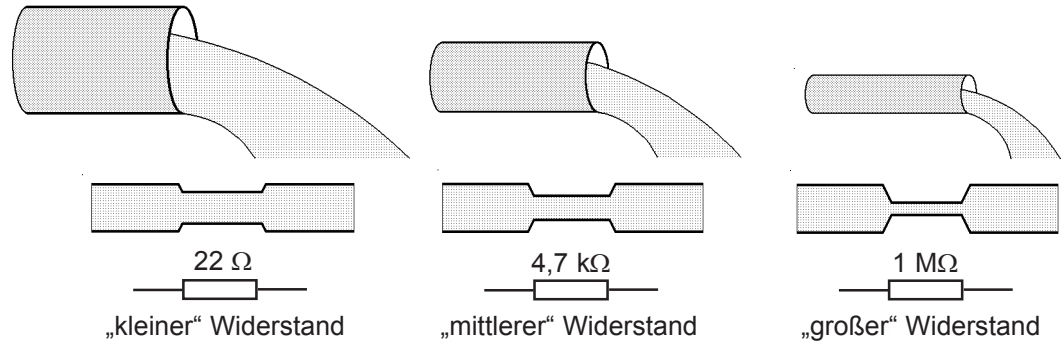
Schaltzeichen eines Widerstandes

Der elektrische **Widerstand** ist ein **Hindernis für den Strom** im Stromkreis.
Entsprechend dem Ohmschen Gesetz kann bei einer vorgegebenen Spannung nur so viel Strom fließen, wie es das **Hindernis** (= Widerstand) erlaubt.

Einheit: **Ohm (Ω)**

1000 Ohm = 1 kOhm (k = kilo)
1000 kOhm = 1 MOhm (M = Mega)

Nennwiderstand (Ohm) ..... die elektronische Größe



„kleiner“ Widerstand „mittlerer“ Widerstand „großer“ Widerstand

Die obige Abbildung zeigt Widerstände unterschiedlicher Größe im Vergleich mit in Rohren fließendem Wasser.
Ein **„kleiner“ Widerstand** (22 Ohm) entspricht einem **großen Rohrquerschnitt**, ein **„großer“ Widerstand** (1 MOhm) einem **kleinen Querschnitt**.

Der **Nennwiderstand** ist auf Grund der normalerweise sehr kleinen Abmessungen der Widerstände als **Farbcode (Farbringe)** auf dem Widerstandskörper aufgedruckt.
Die **Größen** der einzelnen Widerstände sind in den **Normreihen** E6, E12, E24, ... festgelegt.

IEC - Normreihen: E 6, E 12, E 24 (IEC = International Electrotechnical Commission)

E 6			1,0					1,5					2,2					3,3					4,7					6,8		
E 12		1,0			1,2			1,5			1,8			2,2			2,7			3,3			3,9			4,7			5,6			6,8			8,2	
E 24	1,0	1,1		1,2	1,3		1,5	1,6		1,8	2,0		2,2	2,4		2,7	3,0		3,3	3,6		3,9	4,3		4,7	5,1		5,6	6,2		6,8	7,5		8,2	9,1	

Die Normreihen E 48, E 96 und E 192 haben eine noch feinere Abstufung und werden deshalb fast nur in der **Meßtechnik** verwendet. In den IEC - Normreihen sind die Multiplikationswerte für die einzelnen Werte angegeben.

So besagt z. B. der Wert **1,5** in der E 12 - Reihe, daß die Widerstände **1,5 Ohm, 15 Ohm, 150 Ohm, 1k5, 15 k, 150 k, 1M5** in der E 12 - Reihe vorkommen. In der E 12 - Reihe gibt es 12 Multiplikationswerte je Dekade.

Normreihen ..... Toleranzen

E 6: + - 20 % (6 Werte)
E 12: + - 10 % (12 Werte)
E 24: + - 5 % (24 Werte)
E 48: + - 2 % (48 Werte)
E 96: + - 1 % (96 Werte)
E 192: + - 0,5 % (192 Werte)

In der **Praxis** wird die **E 12 - Reihe** eingesetzt, allerdings werden Widerstände mit nur 5 % Toleranz verwendet (4. Ring = gold).

Toleranz .... Abweichung vom Normwert

Die **Toleranz** sagt aus, um wieviel Prozent der tatsächliche Widerstandswert von dem mittels Farbcode angegebenen **Nennwiderstand abweichen kann**. Bei einem Widerstand von 1k5 mit einer Toleranz von 5 % ergeben sich die Grenzwerte mit Rmin = 1,425 k und Rmax = 1,575 k; das ergibt eine maximal mögliche Abweichung vom Normwert von + - 75 Ohm.

 Copyright J. Straßhofer

Farbkennzeichnung der Widerstände

Farbe	Kennziffer	Anzahl der Nullen	Toleranz
silber		x 0,01	+ - 10 %
gold		x 0,1	+ - 5 %
schwarz	0	keine 0	
braun	1	0	+ - 1 %
rot	2	00	+ - 2 %
orange	3	000	
gelb	4	0000	
grün	5	00000	+ - 0,5 %
blau	6	000000	
violett	7	0000000	
grau	8		
weiß	9		

Markierung eines Widerstandes

1 = 1. Kennziffer
2 = 2. Kennziffer
3 = Anzahl der Nullen
4 = Toleranz

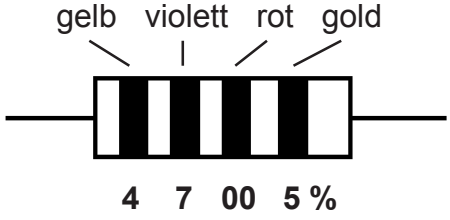
Die **4 aufgedruckten Ringe** geben den **Widerstandswert** (Ohm) und die maximal mögliche herstellerbedingte Abweichung (**Toleranz** in Prozent) an. In der Praxis wird auf das Bestimmen der Toleranz verzichtet, da z.B. Metallfilmwiderstände kaum über einer Toleranz von 1 % liegen.

..... E 12 - Reihe .....

1 Ohm	27 Ohm	680 Ohm	18 kOhm	470 kOhm
1,2 Ohm	33 Ohm	820 Ohm	22 kOhm	560 kOhm
1,5 Ohm	39 Ohm	1 kOhm	27 kOhm	680 kOhm
1,8 Ohm	47 Ohm	1,2 kOhm	33 kOhm	820 kOhm
2,2 Ohm	56 Ohm	1,5 kOhm	39 kOhm	1 MOhm
2,7 Ohm	68 Ohm	1,8 kOhm	47 kOhm	1,2 MOhm
3,3 Ohm	82 Ohm	2,2 kOhm	56 kOhm	1,5 MOhm
3,9 Ohm	100 Ohm	2,7 kOhm	68 kOhm	1,8 MOhm
4,7 Ohm	120 Ohm	3,3 kOhm	82 kOhm	2,2 MOhm
5,6 Ohm	150 Ohm	3,9 kOhm	100 kOhm	2,7 MOhm
6,8 Ohm	180 Ohm	4,7 kOhm	120 kOhm	3,3 MOhm
8,2 Ohm	220 Ohm	5,6 kOhm	150 kOhm	3,9 MOhm
10 Ohm	270 Ohm	6,8 kOhm	180 kOhm	4,7 MOhm
12 Ohm	330 Ohm	8,2 kOhm	220 kOhm	5,6 MOhm
15 Ohm	390 Ohm	10 kOhm	270 kOhm	6,8 MOhm
18 Ohm	470 Ohm	12 kOhm	330 kOhm	8,2 MOhm
22 Ohm	560 Ohm	15 kOhm	390 kOhm	10 MOhm

Widerstandsbestimmung

Beispiel: **4,7 kOhm**



Lage des Widerstandes beim Bestimmen:

Der **Ring**, der dem **Anschlußdraht am nächsten** liegt (***gelb*** beim 4,7 kOhm-Widerstand), muß sich **links** befinden. Da Widerstände mit **goldenem Toleranzring** üblich sind, kann auch dieser Ring zum Finden der richtigen Lage herangezogen werden. **Er befindet sich rechts.**

Bestimmung der Farben mit der Tabelle:

..... Der **1. Ring** hat die Farbe **gelb**; er entspricht der **1. Kennziffer.** Laut Farbtabelle ergibt **gelb** als Kennziffer die **Zahl 4**.

..... **In derselben Weise** ergibt der **2. Ring (violett)** als Kennziffer die **Zahl 7**.

..... Der **3. Ring (rot)** gibt die **Anzahl der Nullen**, die der Kennziffer folgen, an. Die Farbe **rot** ergibt laut Tabelle **2 Nullen (00)**.

Ergebnis: **4700 Ohm = 4,7 kOhm = 4k7**

..... Der **4. Ring (gold)** ergibt eine maximal mögliche **Toleranz von +/- 5 %**.

Da es sich um einen **Standard-Widerstand** handelt, muß er in der **E 12-Reihe**, die bevorzugt in der allgemeinen Elektronik benutzt wird, vorkommen. Die abgebildete **E 12-Reihe** hilft somit, falsche Bestimmungsergebnisse zu vermeiden.

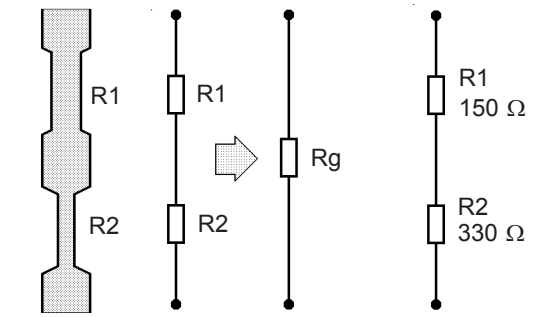
Widerstände mit 5 Ringen:

Widerstände mit 5 Ringen werden bevorzugt in der **Messtechnik** verwendet. Derartige Widerstände haben eine **sehr geringe Toleranz**.
Bei der Bestimmung dieser Widerstände ist darauf zu achten, daß sie **3** - anstatt 2 - **Kennziffern** besitzen.

Wichtig! Widerstände besitzen **keine Polung**. Sie können daher **beliebig** in eine Schaltung eingebaut werden. Auf eine bestimmte Einbaurichtung braucht also nicht geachtet zu werden.

 Copyright J. Straßhofer

Reihenschaltung von Widerständen



Beispiel

Bei der **Reihenschaltung** von Widerständen - auch **Serienschaltung** genannt - fließt der Strom zuerst durch den einen und dann durch den anderen Widerstand. Er muss daher **zwei Strombremsen** überwinden.
Von dieser Widerstandsschaltung kann man den **Gesamtwiderstand Rg** angeben, d. h., beide Widerstände **(R1 + R2)** werden durch einen errechneten **Gesamtwiderstand Rg** ersetzt.
Der **Gesamtwiderstand Rg** wird durch **Zusammenzählen der Einzelwiderstände** ermittelt.

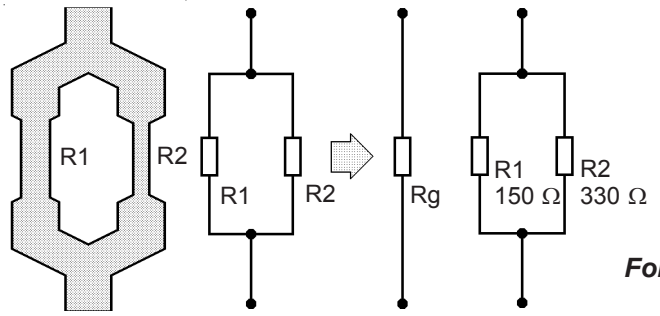
Formel: **Rg = R1 + R2**

allgemein: Rg = R1 + R2 + R3 + ... + Rn

Berechnung:

Rg = R1 + R2 = 150 Ω + 330 Ω = **480 Ω**

Parallelschaltung von Widerständen



Beispiel

Bei der **Parallelschaltung** von Widerständen bieten sich dem Strom **zwei Wege**. Es fließt Strom durch **R1 und** durch **R2**.
Der **Gesamtstrom ist höher** als nur bei einem einzelnen Widerstand.
Daraus folgt, dass der **Gesamtwiderstand Rg** kleiner ist als der kleinste in der Parallelschaltung vorkommende Widerstand.

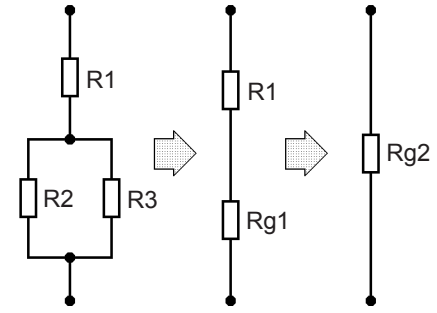
Formeln: $\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{Rg}} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}$ $\quad \mathbf{Rg = \frac{R1 \,.\, R2}{R1 + R2}}$

allgemein: $\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{Rg}} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \text{.....} + \frac{1}{Rn}$

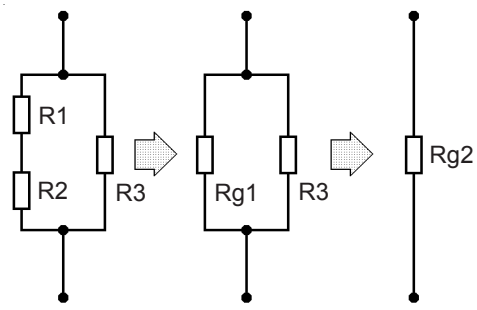
Berechnung:

$$\mathbf{Rg} = \frac{R1 \,.\, R2}{R1 + R2} = \frac{150\ \Omega \,.\, 330\ \Omega}{150\ \Omega + 330\ \Omega} = \frac{49500}{480} = \mathbf{103{,}125\ \Omega}$$

Gemischte Schaltungen: Verbindung von Reihenschaltung und Parallelschaltung



In der elektronischen Praxis sind oft mehrere Widerstände zu einem **Netzwerk** zusammengeschaltet (belasteter Spannungsteiler, ...).
In der obigen Schaltung muss daher **zuerst die Parallelschaltung** von R2 und R3 aufgelöst werden, d. h., sie wird auf den **Widerstand Rg1** reduziert.
Es ergibt sich eine **Reihenschaltung** von zwei Widerständen (R1 und Rg1).
Diese Reihenschaltung wird dann in bekannter Weise aufgelöst, sodass sich die gemischte Schaltung auf einen **einzigen Widerstand** (Rg2) reduziert.



Bei diesem Beispiel wird **zuerst die Reihenschaltung** von R1 und R2 aufgelöst.
Es verbleibt eine **Parallelschaltung** (Rg1 und R3). Nach deren Auflösung reduziert sich die Schaltung auf den **Widerstand Rg2**.
In einer **gemischten Schaltung** ist oft ein Widerstandswert nicht bekannt, dafür aber der Strom oder die am Widerstand anliegende Spannung. Dann muss man versuchen, mit dem **Ohmschen Gesetz Teillösungen** zu ermitteln, bis eine Berechnung der gesamten Schaltung möglich ist.

 Copyright J. Straßhofer

Nennleistung (Watt):

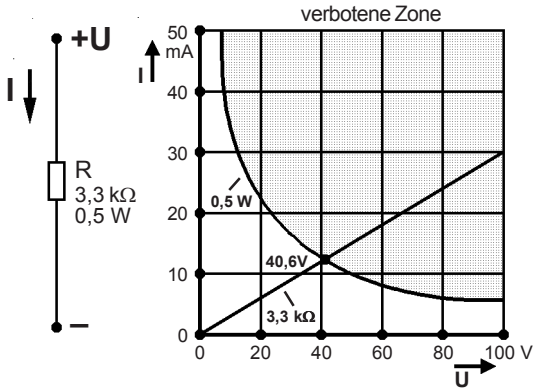
Liegt an einem Widerstand eine **Spannung** an, fließt **Strom** durch ihn. Entsprechend der Formel **P = U . I** ergibt sich eine **Leistung**, die im Widerstand in **Wärme** umgesetzt wird.
Die Abbildung zeigt die **Kennlinie** (Gerade) eines **3,3 kOhm** -Widerstandes und die Leistungshyperbel für **0,5 Watt**.
Ein 3k3 - Widerstand mit 0,5 Watt darf laut Darstellung **maximal** an einer Spannung von **40,6 Volt** liegen, damit er leistungsmäßig nicht überlastet wird.

Die mögliche Maximalleistung ist nur bei größeren Bauformen aufgedruckt, bei Widerständen mit kleineren Abmessungen läßt sich jedoch die Leistung an den Maßen abschätzen.

In der Praxis gibt es folgende **Nennlastreihen:**
1/16 W, 1/8 W, 1/4 W, 1/3 W, 1/2 W, 1 W, 2W, 5W, 7 W, 11 W.
In elektronischen Schaltungen sind normalerweise Widerstände mit **1/4** oder **1/3 Watt** üblich.

Kennlinienfeld eines Widerstandes

3,3 kOhm ... 0,5 Watt



Ein **3,3 kOhm** - Widerstand **(0,5 Watt)** darf maximal an einer Spannung von **40,6 Volt** betrieben werden. Liegt **mehr Spannung** an, wird er leistungsmäßig überlastet, d. h., er wird **zu heiß**.

Bauarten von linearen Widerständen

Kohleschichtwiderstand:

Beim Kohleschichtwiderstand wird eine dünne **Hartkohleschicht** auf einen **Keramikkörper** aufgebracht. Die Schichtdicke der Hartkohle bestimmt den gewünschten Widerstandswert. Durch Einschleifen von Wendeln kann der Widerstand zusätzlich abgeglichen werden bzw. der Widerstandswert erhöht werden. Die Oberfläche des Schichtwiderstandes wird durch Lackieren oder Umhüllen mit Kunststoff gegen Feuchtigkeit und Beschädigung geschützt. Ein **Nachteil** in der praktischen Anwendung ist der **relativ hohe Temperaturkoeffizient**. Er hat zur Folge, dass sich der **Widerstandswert in Abhängigkeit von der Temperatur ändert** (ca. 0,2 % pro °C). Kohleschichtwiderstände werden mit Widerstandswerten zwischen 1 Ohm und 22 MOhm und für Leistungen bis zu 2 Watt hergestellt. Sie sind zumeist bis zu einer Betriebsspannung von 250 Volt ausgelegt.

Metallschichtwiderstand:

Bei diesem Widerstand, auch **Metallfilmwiderstand** genannt, wird auf den Widerstandsträger, der aus Glas optischer Qualität mit außerordentlichen chemischen und mechanischen Eigenschaften besteht, eine äußerst dünne Schicht aus **Edelmetall** bzw. **Metallegierung** (Tantal, Silber, Palladium, Nickel-Chrom, ...) aufgebracht.
Der endgültige Widerstandswert wird durch Einschleifen einer Wendel - zumeist unter Verwendung von Laser in die Widerstandsschicht erreicht. Metallschichtwiderstände zeichnen sich durch einen **sehr kleinen Temperaturkoeffizienten** aus und besitzen auf Grund der Fertigungstechnologie besonders **enge Toleranzen** im Widerstandswert. Sie werden wegen dieser besonderen Konstanz und Genauigkeit in der Messtechnik eingesetzt. Metallschichtwiderstände werden bis zu Toleranzen von 0,1 Prozent und darunter mit Widerstandswerten von 1 Ohm bis 1 MOhm gefertigt. Sie sind zumeist für eine Betriebsspannung von mindestens 250 Volt ausgelegt, werden aber nur für kleinere Leistungen - **üblich ist 1/3 Watt** - gefertigt.

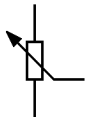
Drahtwiderstand:

Ein **isolierter Draht** aus Widerstandslegierungen (Chrom-Nickel, Konstantan, Manganin) wird in einer Lage auf einen Voll- oder Hohlkörper aus **Keramik** oder auf einen Glasfiberstab gewickelt. Als Isolierung dient eine galvanisch oder chemisch erzeugte Oxidschicht auf der Oberfläche des Drahtes. Zusätzlich isoliert eine aufgebrachte Lackschicht die Windungen voneinander und schützt den Widerstand vor äußeren Einflüssen. Drahtwiderstände weisen auf Grund ihrer Bauart eine entsprechende Größe auf, sodass Widerstandswert, Belastbarkeit und Toleranz aufgedruckt werden können. Ein wesentlicher Vorteil der Drahtwiderstände ist ihre **sehr hohe Belastbarkeit**. Sie werden deshalb bei hohen Strömen eingesetzt. Gefertigt werden sie nur bis ca. 100 kOhm, da man den Widerstandsdraht nicht beliebig dünn machen bzw. in beliebiger Länge auf dem Widerstandskörper unterbringen kann. Drahtwiderstände werden in der elektronischen Technik nur selten verwendet.

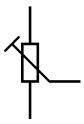
 Copyright J. Straßhofer

Veränderbare Widerstände

Schaltzeichen



Potentiometer
für dauernde Veränderung
(Lautstärkeeinstellung, ...)



Trimmpotentiometer
für einmalige Einstellung
(Justierung auf einer Platine, ...)

Abb. 1:

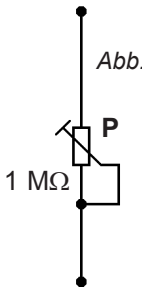
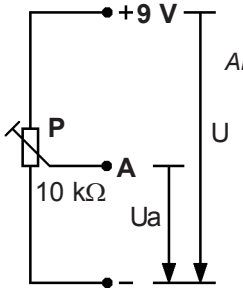
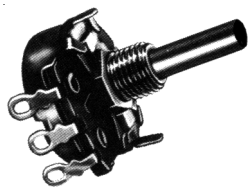


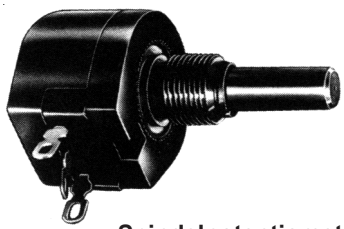
Abb. 2:



Die **veränderbaren Widerstände** (Potentiometer, Trimmpotentiometer, Schieberegler) gleichen im Aufbau den linearen Widerständen, besitzen jedoch zusätzlich einen **Schleifkontakt**, der auf der Widerstandsbahn verschiebbar ist.
Abb. 1 zeigt einen Widerstand, dessen **Wert** von 0 Ohm bis 1 MOhm **verändert** werden kann. In ***Abb. 2*** ist der veränderbare Widerstand als **Spannungsteiler** geschaltet, sodass sich am Schleifkontakt stufenlos Spannungen (0 - 9 Volt) einstellen lassen.

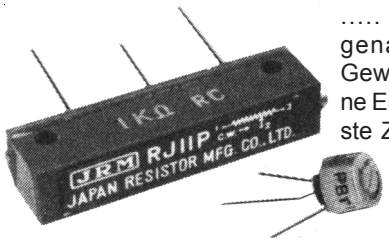


Potentiometer (Poti): ... für Montage an einer Gehäusewand, Drehachse 4 bzw. häufiger 6 mm, Gewinde mit Mutter, Abschirmgehäuse, Lötanschlüsse

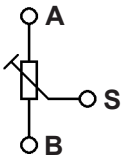


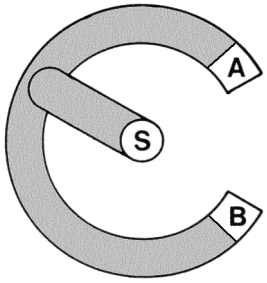
Drahtpotentiometer: ... Drahtwicklung auf Keramik-Körper, für größere Leistungen, massive Ausführung

Spindelpotentiometer: (Cermet-Trimmer) ..... hohe Einstellgenauigkeit durch Gewindespindel, kleine Einbaumaße, höchste Zuverlässigkeit



Aufbau eines veränderbaren Widerstandes





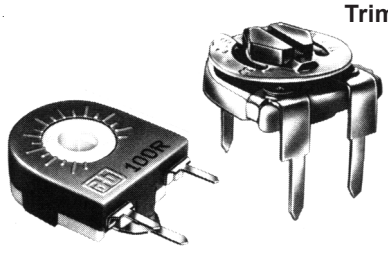
Die **Einstellung des Widerstandswertes** erfolgt durch den **Schleifkontakt S**, der die Widerstandsbahn vom Punkt A bis zum Punkt B überstreicht. Auf diese Weise können **beliebige Widerstandswerte** (0 Ohm bis zum angegebenen Maximalwert) am Schleifer abgegriffen werden. Beim allgemein üblichen linearen Drehwiderstand entspricht die Mittelstellung des Schleifers dem halben Widerstandswert. Der maximale Drehwinkel beträgt 300°.

Handelsübliche Werte

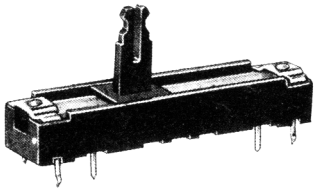
von veränderbaren Widerständen:

alt:	100 Ohm	250 Ohm	500 Ohm
	1 kOhm	2,5 kOhm	5 kOhm
	10 kOhm	25 kOhm	50 kOhm
	100 kOhm	250 kOhm	500 kOhm
	1 MOhm	2,5 MOhm	5 MOhm
neu:	100 Ohm	220 Ohm	470 Ohm
	1 kOhm	2,2 kOhm	4,7 kOhm
	10 kOhm	22 kOhm	47 kOhm
	100 kOhm	220 kOhm	470 kOhm
	1 MOhm	2,2 MOhm	4,7 MOhm

In der **Praxis** können zumeist ohne Probleme vergleichbare **alte** und **neue** Werte (z.B.: 50 kOhm-47 kOhm) eingesetzt werden. Der geringe Unterschied liegt innerhalb des Toleranzbereiches und spielt deshalb praktisch keine Rolle.



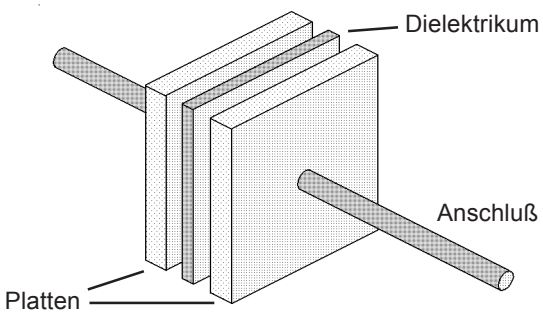
Trimmpotentiometer: ... stehende und liegende Ausführung, Einstellung mit Schraubendreher, oft falsch verwendete Bezeichnung „Trimmer“



Schieberegler:
(Flachbahnregler)
... gerade Widerstandsbahn, schiebbarer Schleifer, für Mischpult, ...

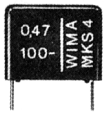
 Copyright J. Straßhofer

Aufbau eines Kondensators



Im Prinzip haben alle Kondensatoren denselben Aufbau: **Zwei leitende Platten** (Metallflächen) stehen sich parallel gegenüber und sind durch eine dünne **Isolierschicht**, dem sog. **Dielektrikum**, voneinander getrennt.

Schaltzeichen von Kondensatoren



Nichtelektrolytischer Kondensator (ungepolt)

Elektrolytkondensator (gepolt)

Je nach spezieller Anwendung und elektronischer Größe des Kondensators werden viele unterschiedliche Materialien für die Platten und das Dielektrikum verwendet. Daraus ergeben sich eine **Menge verschiedener Bauformen** und Baugrößen. Das Verhalten des Kondensators als **Stromspeicher**, ähnlich wie bei Akkumulatoren, zeigen im Vergleich mit Wasser die ***Abbildungen 1 - 4***.

Abb. 1: **ungeladener Kondensator**

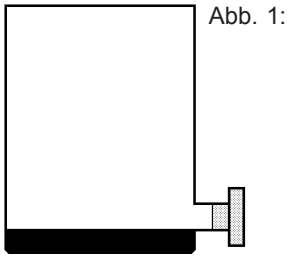


Abb. 2: **Ladung**

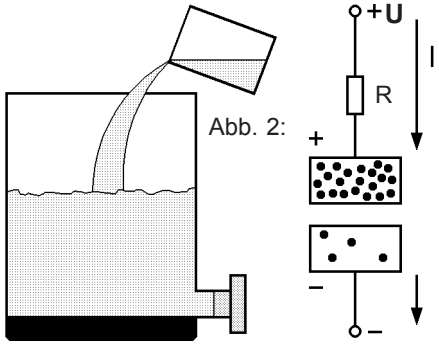
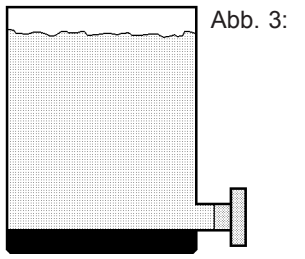
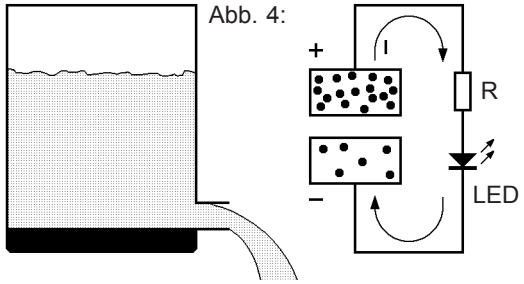


Abb. 3: **geladener Kondensator**



Entladung

Abb. 4:



Ladung und Entladung

Abb.1 zeigt einen **ungeladenen Kondensator**. Die Anzahl der Ladungsträger in beiden Kondensatorplatten ist gleich groß, d.h., zwischen beiden Kondensatorplatten besteht **keine Spannung**.

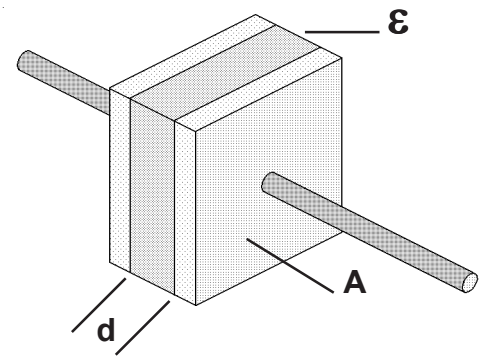
In *Abb.2* wird der Kondensator über einen Vorwiderstand R, der zur Ladestrombegrenzung dient, an eine Gleichspannung U gelegt und **geladen**. Der Strom aus der Batterie kann nicht durch den Kondensator hindurch fließen, da die beiden Platten durch das **Dielektrikum voneinander isoliert** sind. Aus diesem Grund häufen sich Ladungsträger in der oberen Platte an, und ein **Ladungsträgerüberschuss** entsteht. In der unteren Platte ergibt sich durch das Abwandern der Ladungsträger in den negativen Pol ein **Ladungsträgermangel**. Die unterschiedliche Dichte an Ladungsträgern bewirkt, dass sich zwischen den beiden Kondensatorplatten eine **Spannung** aufbaut. Dieser Vorgang dauert so lange, bis die **Spannung** am Kondensator der **Betriebsspannung U** entspricht. Dann kann kein Ladestrom mehr fließen.

Wird nun die Betriebsspannung abgeklemmt *(Abb.3)*, so bleibt der **Kondensator** trotzdem weiterhin **geladen**, da sich die Ladungsträgerdifferenz nicht ausgleichen kann. **Der Strom wird jetzt gespeichert.**

In *Abb.4* wird der positive Pol des Kondensators mit dem negativen Pol über eine Leuchtdiode und einen Vorwiderstand, der zur Strombegrenzung dient, verbunden. Der **Kondensator**, er entspricht jetzt einer **Spannungsquelle**, entlädt sich ... die Leuchtdiode leuchtet. Dieser **Entladevorgang** dauert so lange, bis auf beiden Seiten wieder dieselbe Anzahl von Ladungsträgern vorhanden ist und somit zwischen den **beiden Platten keine Spannung mehr** bestehen kann.
In ähnlicher Weise funktioniert ein Akkumulator (Autobatterie). Auch er wird mit einer Gleichstromquelle geladen und im Gebrauch wieder entladen.

 Copyright J. Straßhofer

Kapazität eines Kondensators



Unter der **Kapazität C** (Einheit: **Farad (F)**) versteht man das **Fassungsvermögen** eines Kondensators. Es ist dies eine konstante technische Eigenschaft, die durch seinen **Aufbau** bestimmt wird.
Die Kapazität ergibt sich somit durch die **Größe der Fläche A** der sich gegenüberliegenden Platten, deren **Abstand d** zueinander und aus der Art des **Isolierstoffes ε (Dielektrikum)**. (ε **...** epsilon) Siehe dazu die Formel für die Kapazität C!

Die Einheit **Farad (F)** ist in der Praxis zu groß. Üblich sind Kondensatoren erst ab dem Bereich **Mikro-Farad (µF)** und kleiner, wobei 1000000 µF einem Farad entsprechen.

C ..... **Kapazität**

Einheit: **Farad ..... F**

Unter der Kapazität C versteht man das Fassungsvermögen eines Kondensators

Beispiele: C = 47 pF C = 100 nF C = 220 µF

1 µF (Mikro-Farad) = 1000 nF (Nano-Farad)
1 nF (Nano-Farad) = 1000 pF (Pico-Farad)

Formel: $$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d}$$

Plattenfläche A:

Die Vergrößerung der **Plattenfläche A** bewirkt laut Formel eine Vergrößerung der Kapazität C.
Dies erklärt sich auch durch den Aufbau des Kondensators. Wenn den Ladungsträgern eine **größere Plattenfläche A** zur Verfügung steht, können **mehr Ladungsträger** von der Platte aufgenommen werden.

Plattenabstand d:

Wird ein Kondensator geladen, so entsteht eine **Spannung zwischen den beiden Kondensatorplatten**, und sie ziehen sich auf Grund ihrer gegensätzlichen Ladung an (Feldstärke E = U/d).
Dies unterstützt die angelegte Betriebsspannung und bewirkt, dass bei kleinerem Plattenabstand d laut Formel die Feldstärke E steigt und somit mehr Ladungsträger in die Platten gedrückt werden.
Je kleiner der Plattenabstand d, desto größer die Kapazität C.

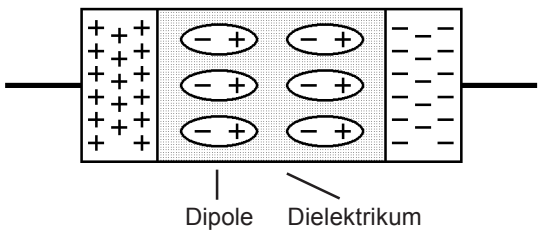
Dielektrizitätskonstante ε:

Unter dem Einfluß des elektrischen Feldes erfolgt eine **Polarisation der Molekulardipole** im Dielektrikum, d.h., die **Ladungen im Isolierstoff** werden geringfügig **verschoben**, und somit wird eine bestimmte Menge der ursprünglich vorhandenen Kondensatorladung durch die Speicherung in den Dipolen neutralisiert. Die Kondensatorplatten können deshalb noch mehr Ladungsträger aufnehmen.

Das **Material des Dielektrikums** ist also auf Grund der Bildung von **Dipolen** für die Größe der Kapazität C des Kondensators von Bedeutung.

Die Kapazität C wird umso größer, je größer die Dielektrizitätskonstante ε wird.

Polarisation im Isolierstoff



Isolierstoffe in Kondensatoren:
Luft, Glas, Porzellan, Polystyrol, Papier, Hartpapier, Pertinax, Acrylglas, Glimmer, Keramik, ...

 Copyright J. Straßhofer

Zeitkonstante eines Kondensators

Laden und Entladen

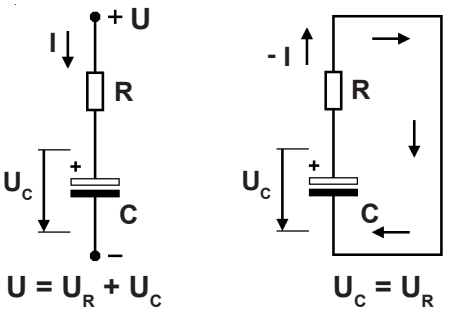


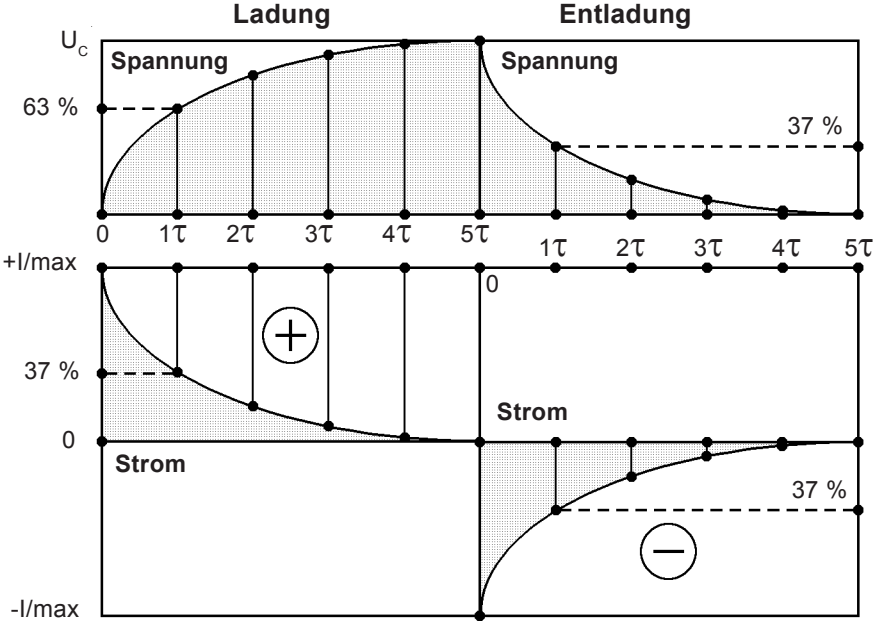
Abb. 1:
RC - Schaltung (= Widerstands-Kondensator - Schaltung) zum Laden und Entladen eines Kondensators

Beim **Laden** eines Kondensators wird an eine **RC - Schaltung** Spannung gelegt *(Abb.1)*.
Da der Kondensator im ersten Augenblick noch ungeladen ist (Uc = 0 Volt), verbleibt für den Widerstand die gesamte Spannung U. Laut Ohmschen Gesetz (I = U / R) fließt ein Ladestrom I.
Mit zunehmender Ladung steigt die Spannung Uc am Kondensator, die Spannung am Widerstand sinkt und damit auch der Ladestrom I.

$$\tau = R \cdot C$$

τ ..... Zeitkonstante ***tau*** (sec)
R .... Widerstand (Ω)
C .... Kapazität (F)

Abb. 2:
Lade- und Entladekurven eines Kondensators (Spannung und Strom)



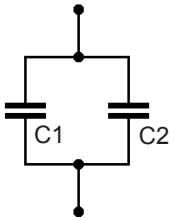
Ladung und Entladung eines Kondensators erfolgen nicht linear - nicht kontinuierlich -, sondern nach einer Kurve (**e - Funktion**).
Wie aus der *Abb. 2* zu ersehen ist, ist nach der **Zeitkonstanten** τ (τ ... tau) die **Spannung am Kondensator** auf **63 %** der Betriebsspannung angestiegen. Gleichzeitig fließen nur mehr **37 % des maximalen Stroms** als zu Beginn der Ladezeit.
Die Ladung verläuft mit steigender Kondensatorspannung immer langsamer und würde theoretisch nie enden. Da aber nach einer Zeit von **5 τ** die **Spannung Uc** auf **99,3 %** der Betriebsspannung angestiegen ist und der Ladestrom nur mehr 0,7 % des Maximalwertes beträgt, spricht man nach **5 τ** von einem **geladenen Kondensator**.

Die **Entladung des Kondensators** erfolgt ebenfalls über den Vorwiderstand R *(Abb.1)*.
Die **Spannung** ist nach der **Zeit τ** bereits auf **37 %** (100 % - 63 %) der maximalen Ladespannung gesunken *(Abb.2)*. Beim **Entladestrom** ist zu beachten, daß dieser jetzt in **umgekehrter Richtung** aus dem Kondensator fließt und daher negatives Vorzeichen (**-I**) besitzt. Auch die **Entladung** betrachtet man nach **5 τ** als abgeschlossen.

Beispiel: **Wie lange** dauert die Ladung eines Kondensators von **47 µF** bei einem Vorwiderstand von **330 kOhm**? *(Siehe Abbildung 1!)*

5τ = 5.R.C = 5 . 330000Ω . 0,000047F = **77,55 sec**

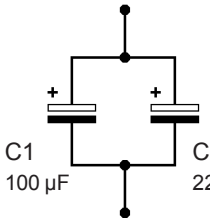
Parallelschaltung von Kondensatoren



Die Parallelschaltung wirkt wie eine **Vergrößerung** der **Plattenoberfläche A**. Daher erhält man für die **Gesamtkapazität** die **Summe der Einzelkapazitäten**. Die Spannung ist für alle Kondensatoren gleich.

Formel: **Cg = C1 + C2** *(Ug = U1 = U2)*

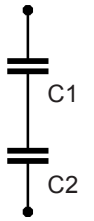
allgemein: Cg = C1 + C2 + C3 + ... + Cn



Berechnung:

Cg = C1 + C2 =
= 100 µF + 220 µF =
= **320 µF**

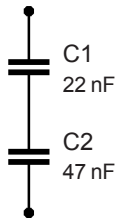
Reihenschaltung von Kondensatoren



Die Reihenschaltung führt zu einer **Verkleinerung der Kapazität**, da sich der **Plattenabstand d vergrößert**. Die Spannungen an den einzelnen Kondensatoren verhalten sich umgekehrt zu den Kapazitäten.

Formeln: $\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{Cg}} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2}$ $\mathbf{Cg = \frac{C1 \,.\, C2}{C1 + C2}}$

allgemein: $\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{Cg}} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \text{.....} + \frac{1}{Cn}$ *(Ug = U1 + U2)*



Berechnung:

$\mathbf{Cg} = \frac{C1 \,.\, C2}{C1 + C2} =$

$= \frac{22\text{ nF} \,.\, 47\text{ nF}}{22\text{ nF} + 47\text{ nF}} = \mathbf{15\text{ nF}}$

Kenndaten von Kondensatoren

Die wichtigsten Kenndaten sind am Kondensator selbst angegeben (Schrift oder Farbcode).

Nennkapazität in Farad **(pF, nF, µF)**:
Die Abstufung erfolgt in der E6- bzw. E12- Reihe.

Herstellungstoleranz: maximale Abweichung des Kapazitätswertes vom Nennwert in Prozent (+/-)

Nennspannung: Angabe als (pulsierende) Gleichspannung oder als (effektive) Wechselspannung bei 40°C; Weiters sind oft angegeben: Temperaturbereich, Temperaturbeiwert (= Kapazitätszunahme bei Temperaturerhöhung), Verlustfaktor, ...

Zusätzlich sind auf dem Kondensator noch häufig der Hersteller bzw. eine Herstellernummer angegeben.
Bei **Elektrolytkondensatoren wird die Polarität** mit einem **PLUS- oder MINUS-Symbol** gekennzeichnet.

Übliche Schaltzeichen für Kondensatoren

Kondensator (ungepolt)

Drehkondensator (stetig einstellbar)

Elektrolyt-kondensator (gepolt)

Trimmkondensator (fest einstellbar)

Nennspannung U_N - Spitzenspannung U_S

Entscheidend für die **Verwendung** von Kondensatoren in elektronischen Schaltungen ist ihre **Spannungsfestigkeit**.

Handelsübliche **ungepolte Kondensatoren** werden für Nennspannungen von 50 Volt und mehr (63 V, 100 V, 160 V , 250 V, 400 V, 630 V,1000 V, ...) hergestellt. Im **Niederspannungsbereich** ist ihre Verwendung daher **unproblematisch.**

Gepolte Kondensatoren (Aluminium-Elkos) werden wegen der Berücksichtigung der Baugröße (Kapazität) in der Regel **für niedrigere Spannungen** gefertigt (6,3 V, 10 V, 16 V, 25 V, 35 V, 40 V, 50 V, 63 V, 100 V, ...).
Die auf dem Kondensator angegebene **Nennspannung** ist die **höchste Gleichspannung**, mit der der Kondensator **betrieben** werden kann.

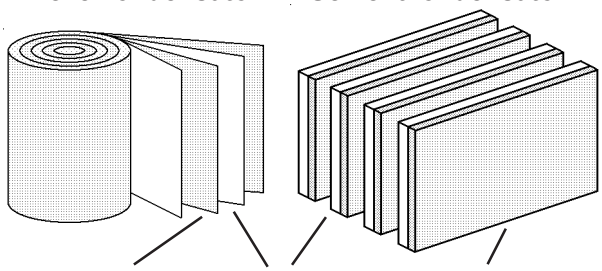
Eine an diesem Kondensator anliegende **Spitzenspannung** darf nicht mehr als **10%** größer sein als die Nennspannung und max. eine Minute auftreten.

Beispiel:
Ein Kondensator mit den Daten **47µF/10V** darf **nicht** an eine Gleichspannung von **12 Volt** angeschlossen werden. Eine an einem Elko anliegende **negative Spannung** darf ebenfalls in der Regel nicht größer als 10 % der positiven Nennspannung sein.

Reststrom: Der Reststrom ist derjenige Gleichstrom, der beim Betrieb **durch den Kondensator hindurchfließt**. Er ist ein Maß für seine **Güte**. Wird ein Elektrolytkondensator mit einem hochohmigen Vorwiderstand betrieben, so spielt die Größe des Reststroms eine erhebliche Rolle.

 Copyright J. Straßhofer

Wickelkondensator **Schichtkondensator**

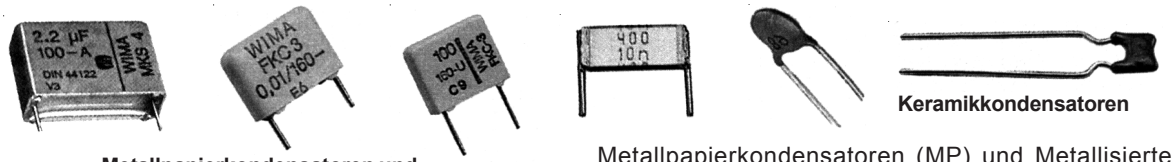


Metallfolie Dielektrikum Plättchen mit Metallbelag

Kondensatortypen

Man unterscheidet **zwei Haupttypen** von Kondensatoren; **feste** und **veränderliche**.
Die **Festkondensatoren** werden zusätzlich noch in **nichtelektrolytische** und in **elektrolytische** Kondensatoren unterteilt. Die **Baugröße** der Kondensatoren ist hauptsächlich vom **Kapazitätswert** und von der **Nennspannung** (Spannungsfestigkeit, vom Dielektrikum bestimmt.) abhängig.

Nichtelektrolytische Kondensatoren



Metallpapierkondensatoren und Kunststoffolienkondensatoren

Keramikkondensatoren

Nichtelektrolytische Kondensatoren sind **ungepolt**, d.h., beim Einbau ist es **nicht notwendig**, auf die Polung des Bauteils zu achten.
Die **Spannungsbelastbarkeit** reicht je nach Bauart von ca. 30 Volt bis über 1000 Volt. **Papierkondensatoren** und **Kunststoffolien- Kondensatoren** bestehen aus **Metallfolien** mit einem Dielektrikum aus **Papier** bzw. **Kunststoffolien**. Sie sind zumeist zu einem Wickel (Wickelkondensator) zusammengerollt.

Metallpapierkondensatoren (MP) und Metallisierte Kunststoffolien-Kondensatoren (MKS, MKP, MKT, MKC, MKU) besitzen auf der Papier- bzw. Kunstoffolie eine dünne aufgedampfte **Metallschicht**.
Bei einem **Durchschlag** (Überspannung) verdampft an der Fehlerstelle der Metallüberzug; es entsteht **kein Kurzschluss**. Sie sind also **selbstheilend**.
Keramische Kondensatoren besitzen als Dielektrikum eine keramische Masse und können deshalb mit sehr kleinen Abmessungen als Rohr, Rechteck oder Scheibe gebaut werden. Sie werden besonders in der HF-Technik verwendet.

Elektrolytkondensatoren

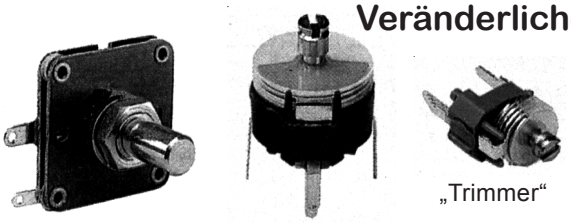
Tantal-Kondensator

Aluminium - Elektrolytkondensatoren

Elektrolytkondensatoren - kurz **Elkos** genannt - besitzen durch Verringerung des Plattenabstandes (Dielektrikum = isolierende Oxidschicht) eine wesentlich **höhere Kapazität** als alle anderen Typen.
Wichtig! Beim Einbau ist auf die **Polung** zu achten. Elkos (Ausnahme: ungepolte Elkos) dürfen **nicht an Wechselspannung** betrieben werden. Die Polung ist durch ein **MINUS-** bzw. **PLUS-**Zeichen am Elko, durch eine **Einkerbung** (Ring = PLUS) bzw. durch einen **kürzeren Anschluss** (MINUS) gekennzeichnet.

Aluminium-Elektrolytkondensatoren: Die Anode besteht aus einer Aluminiumfolie, auf der eine Oxidschicht aufgebracht ist. Die Katode (Alubecher = negativer Pol) ist ein Elektrolyt mit einer Aluminiumfolie als Hilfselektrode. Bei falscher Polung wird die Oxidschicht abgebaut, der Kondensator erwärmt sich und wird zerstört.
Tantal-Elektrolytkondensatoren sind sehr stabil, die Kapazität ist nahezu unabhängig von Temperatur und Spannung. Sie werden jedoch selten verwendet.

Veränderliche Kondensatoren



„Trimmer“

Veränderliche Kondensatoren sind so gebaut, daß ihr **Kapazitätswert** zwischen einem **Minimal-** und einem **Maximalwert** kontinuierlich **eingestellt** werden kann, indem die Platten gegeneinander verschoben werden.

Drehkondensatoren sind für **stetige Veränderung** (Empfängerabstimmung) ausgelegt. Ein **drehbares Plattenpaket** taucht in ein feststehendes mehr oder weniger ein, sodass sich bei gleichbleibendem Abstand **unterschiedliche Plattenflächen** gegenüberstehen. Meist ist Luft, seltener Glimmer oder Hartpapier das Dielektrikum.
Trimmkondensatoren sind für Justierzwecke und bestehen aus Metallplättchen, getrennt durch eine Plastikfolie.

 Copyright J. Straßhofer

Abb. 1: **Polykristallines Silizium**

Abb. 2: **Halbleiter - Werkstoffe**

Benennung		Verwendung
Silizium	Si	Dioden, Transistoren IC, Mikroprozessoren
Germanium	Ge	Transistoren (selten)
Selen	Se	Gleichrichterdioden Fotoelemente
Galliumarsenid	GaAs	Leuchtdioden
Bleisulfid	PbS	Fotowiderstände

Das am häufigsten verwendete Halbleitermaterial ist mit großem Abstand **Silizium**.
Andere Halbleitermaterialien werden nur mehr selten bzw. bei speziellen Bauelementen verwendet.

Halbleitertechnologie

Seit der **Entwicklung des ersten Transistors** im Jahr **1948** durch die Amerikaner J. **Bardeen** und W. H. **Brattain** haben Halbleiterbauelemente weltweit einen ungeahnten Siegeszug in der Elektronik angetreten.

Bereits der Name **Halbleiter** (*Abb. 1:* Silizium, Germanium, Selen, ...) gibt zu erkennen, dass die **Leitfähigkeit** dieser Werkstoffe (*Abb. 2*) **zwischen** der von **Leitern** (Kupfer, Silber, Eisen, ...) und der von **Nichtleitern** (Kunststoffe, Glimmer, Glas, Keramik, ...) liegt (*Abb. 3*).

„Halb - Leiter“

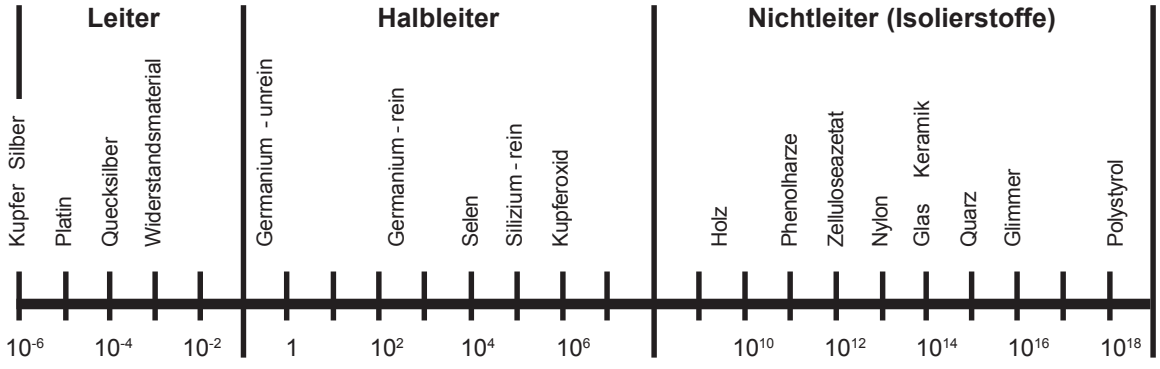
Halbleiterwerkstoffe besitzen also eine **geringere Leitfähigkeit als Metalle**, leiten den elektrischen Strom aber **besser als Isolatoren** ..... sie sind also **halb-leitend**.

Silizium ... der wichtigste Halbleiter

Der wichtigste Halbleiter und damit **Rohstoff Nummer 1** in der Elektronik ist das Element Silizium, das nur in chemischen Verbindungen (Silikate, Quarz) vorkommt.
Gäbe es auf der Erde kein Silizium - es ist nach Sauerstoff das zweithäufigste Element der Erdrinde -, hätte sich die Computertechnologie kaum so stürmisch entwickeln können.

Superreines Einkristall-Silizium wird aufwändig in **energieintensiven Prozessen** hergestellt.

Abb. 3: **Durchgangswiderstände verschiedener Werkstoffe in Ohm / cm³**



Der **Durchgangswiderstand** eines Werkstoffes wird an einem **Würfel** von **1 cm Kantenlänge** bei einer Temperatur von 20°C gemessen.

Für seinen Wert ist die **Anordnung der Elektronen um den Atomkern** verantwortlich.
Der Halbleiter Germanium hat z.B. einen Widerstand von 50 Ohm, Silizium von 20 Kilo-Ohm.

 Copyright J. Straßhofer

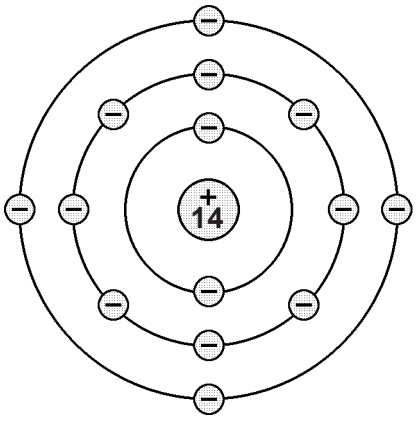


Abb. 4: **Modell eines Siliziumatoms**

Silizium ist wegen seiner **guten Halbleitereigenschaften** das am häufigsten verwendete Halbleitermaterial. Während z.B. beim **Germanium** die **maximale Betriebstemperatur 75°C** beträgt, liegt sie beim **Silizium** bei etwa **175°C**.
Das Siliziumatom (*Abb. 4*) besitzt in seiner äußeren Schale **4 Valenzelektronen**, die normalerweise fest gebunden sind.

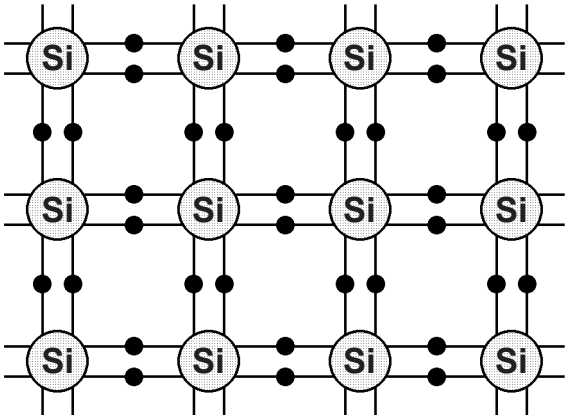


Abb. 5: **Kristallgitter des Siliziums**

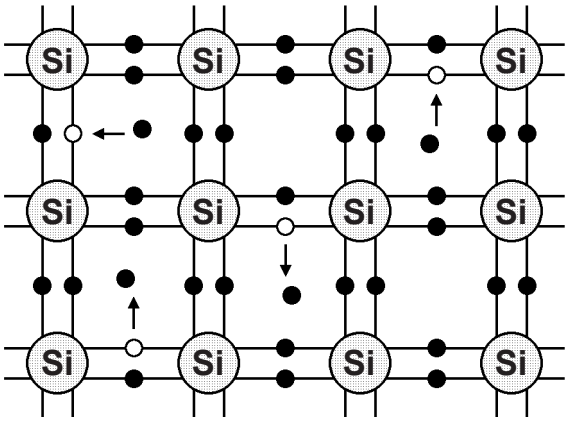


Abb. 6: **Eigenleitung**

Kristallgitter des Siliziums

Jedes **Atom** hat jedoch die Tendenz, eine komplette äußere Schale mit **8 Elektronen** zu bilden (Edelgaskonfiguration), um eine hohe Stabilität zu erreichen. Im Kristallgitter des Siliziums (*Abb. 5*) ist dieses Bestreben des Atoms folgendermaßen gelöst: Das **Siliziumatom** verleiht seine **4 Außenelektronen** (•) an die **4 benachbarten Atome** und leiht sich gleichzeitig von jedem Nachbaratom ein Elektron aus. Der Idealzustand von **8 Elektronen in der äußeren Schale** ist dadurch hergestellt. Somit baut sich ein äußerst **stabiles Kristallgitter** auf, in dem jedes **Atom fest** an seinem Platz sitzt und sich nur die Elektronen zwischen benachbarten Atomen hin und her bewegen. Bei **Normaltemperatur** ist Silizium praktisch ein **Isolator**, da keine Ladungsträger (Elektronen) im Kristall zur Verfügung stehen.
Die *Abbildung 5* zeigt einige **Atomrümpfe** (**Si:** Atomkern + 10 Elektronen) und die jeweils dazugehörenden 4 Valenzelektronen.

Eigenleitung

Bedingt durch den Kristallaufbau sind die Valenzelektronen in den Atomen gebunden (*Abb. 6*).
Erwärmt man jedoch einen **Siliziumkristall**, so bleiben die Atome nicht unbeweglich an ihrem Platz, sondern schwingen je nach Temperatur um ihren Standort. Dabei lösen sich einzelne **Elektronen aus ihren Bindungen**. Dort, wo sich vorher ein Elektron befand, fehlt nun die negative Ladung. Diese Stelle bezeichnet man als Defektelektron oder als **Loch**, dessen positive Ladung genau so groß ist wie die negative der Elektronen. Das frei gewordene **Elektron wandert** durch den Kristall, bis es auf ein Loch trifft. Dann kommt es zur **Rekombination zwischen Elektron und Loch**; d.h., das Elektron füllt das entsprechende Loch auf ..... das Atom wird wieder neutral (**o** .... Loch). Da es fortwährend zum Aufbrechen von Bindungen und zu Rekombinationen kommt, wandern sowohl **Elektronen** als auch **Löcher** durch den Kristall.

Wird **Spannung** an das Silizium gelegt, so wandern die **Elektronen** zum **positiven Pol**. Da jedes rekombinierte Elektron irgendwo ein Loch hinterläßt, wandern die Löcher scheinbar zum negativen Pol. Weil sowohl **Elektronen** als auch **Löcher** an der Stromleitung beteiligt sind, bezeichnet man das Stromverhalten dieser Halbleiter als **bipolar** (.... auf zwei Pole gerichtet).

 Copyright J. Straßhofer

Störstellenleitung

Die **Temperaturabhängigkeit** (Eigenleitung) von Halbleitern ist ein in der elektronischen Praxis **unerwünschter Effekt**. Die Leitfähigkeit von Halbleitermaterial soll temperaturunabhängig und sehr viel höher sein als bei der Eigenleitung. Deshalb werden durch gezielte Verunreinigungen mit **3- bzw. 5-wertigen Fremdatomen** im Kristallgitter **zusätzliche Elektronen bzw. Löcher** erzeugt.

Dieses Einbringen von Störstellen in den Siliziumkristall bezeichnet man als **Dotieren**.
Der regelmäßige Kristallaufbau wird durch das Dotieren gestört, der **Kristall** selbst bleibt nach außen jedoch **neutral**. Um die gewünschte Leitfähigkeit zu erzielen, genügt **ein Fremdatom** auf **10000 Siliziumatome**.

N - Leiter

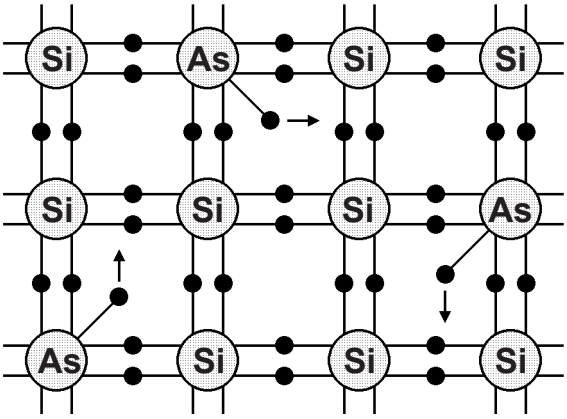


Abb. 7: **N - Leiter ... dotiert mit Arsen**

Abbildung 7 zeigt einen mit einem **Arsenatom** (As) dotierten Siliziumkristall. Beim Arsenatom befinden sich insgesamt **5 Elektronen** in der äußeren Schale, nur 4 davon werden jedoch zur Bindung an das Silizium benötigt. Das **fünfte überzählige Elektron** ist nicht zur Kristallbildung notwendig, es kann sich daher **frei bewegen** und durch das Material wandern. In einem mit Arsen dotierten Siliziumkristall sind also **mehr Elektronen** vorhanden als im reinen Siliziumkristall.
Da Elektronen **negativ geladen** sind und in überwiegender Zahl vorkommen, bezeichnet man ein mit einem 5 - wertigen Atom dotiertes Halbleitermaterial als **negativ leitend** oder kurz als **N - leitend**.

P - Leiter

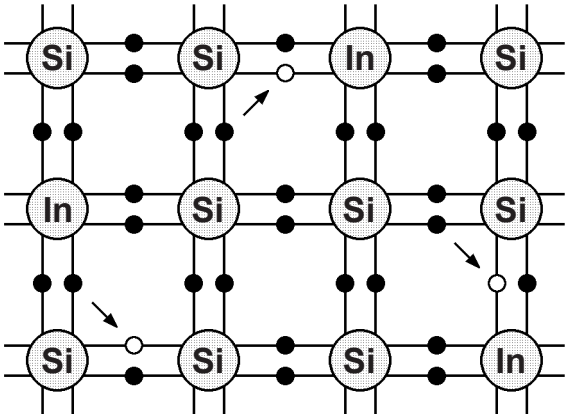


Abb. 8: **P - Leiter ... dotiert mit Indium**

Sind in das Kristallgitter des Siliziums Atome eingebaut, die nur **3 Elektronen** in der äußeren Schale besitzen (*Abb. 8*, **Indium**), so fehlt im Kristallaufbau ein Elektron. An dieser Stelle entsteht ein **Loch**. Dieses Loch wandert, indem ein Valenzelektron eines benachbarten Atoms überspringt und seinerseits ein Loch hinterläßt. Dieses rekombiniert mit einem weiteren Elektron, das wiederum ein Loch zurückläßt.

Löcher sind **positive Ladungsträger** und in überwiegender Mehrzahl im mit 3 - wertigen Atomen dotierten Silizium vorhanden. Deshalb bezeichnet man dieses Halbleitermaterial auch als **positiv leitend** oder kurz als **P - leitend**.

Donatoren

Folgende Atome geben leicht Elektronen ab und werden daher zur Herstellung von **N - leitendem** Material verwendet.
Man bezeichnet sie als **Donatoren**: Antimon (Sb), Phosphor (P), Arsen (As), Wismut (Bi).

Akzeptoren

Folgende Atome nehmen leicht Elektronen auf und werden daher zur Herstellung von **P - leitendem** Material verwendet.
Man bezeichnet sie als **Akzeptoren**: Aluminium (Ab), Bor (B), Gallium (Ga), Indium (In).

 Copyright J. Straßhofer

PN - Übergang

Zwei eng miteinander verbundene **Schichten** aus **verschieden dotiertem Halbleitermaterial** bilden die Grundlage für die **Halbleiterdiode**.

Abb. 9 zeigt eine schematische Darstellung mit einem **P-dotierten** und einem **N-dotierten** Siliziumkristall. In der **P-Zone** befinden sich die beweglichen positiven Ladungsträger (**Löcher**), in der **N-Zone** die negativen (**Elektronen**).

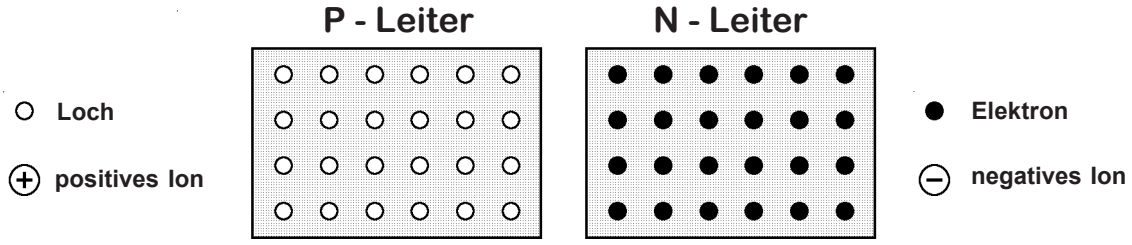


Abb. 9: **P- und N-Leiter vor der Verbindung**

Bei der **Produktion** wird eine Diode **aus einem Stück Silizium** durch unterschiedliche Dotierung hergestellt. Um den PN-Übergang **besser verstehen** zu können, ist es jedoch sinnvoll, ihn aus zwei Zonen zusammengefügt zu betrachten.

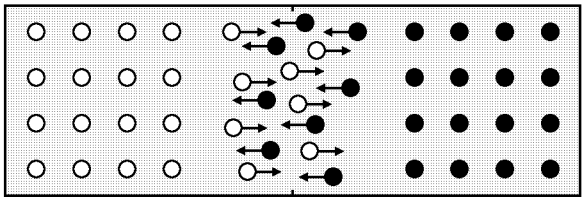


Abb. 10: **Diffusion der Ladungsträger**

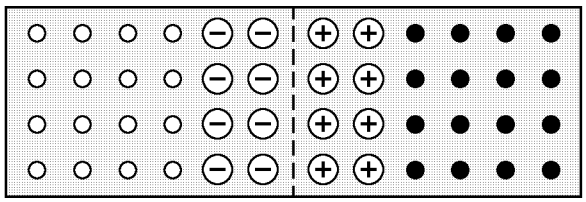


Abb. 11: **Sperrschicht am PN-Übergang**

Die **beiden Zonen** sind jede für sich **elektrisch neutral**, da das eindotierte Material ein Elektron (Arsen, 5-wertig) bzw. ein Loch (Indium, 3-wertig) mitbringt, das sich dann ebenfalls im entsprechenden Kristall befindet. Das Silizium mit seinen **vier** Aussenelektronen ist ohnehin vollständig eingebaut.

Im Kristall ist also die **Anzahl der Elektronen gleich der Anzahl der Protonen** in den Atomkernen. Auch der zusammengefügte PN-Halbleiter (*Abb. 10*) ist nach außen elektrisch neutral.

Nach dem **Zusammenfügen** der beiden Halbleitermaterialien dringen Löcher in die N-leitende und Elektronen in die P-leitende Zone. Diesen Vorgang bezeichnet man als **Diffusion** (*Abb. 10*). Dadurch entsteht eine Schicht, die auf Grund der Rekombination von Elektronen und Löchern frei von Ladungsträgern ist. Dieser schmale Bereich (ca. 0,003 mm) wird als **Sperrschicht** bezeichnet (*Abb. 11*).

Wie entsteht die Sperrschicht?

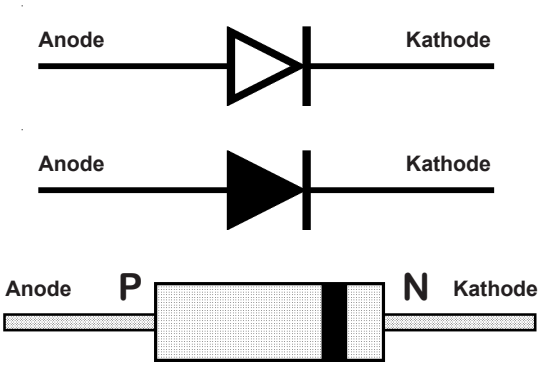
Durch **gegenseitige Anziehung** von Löchern und Elektronen werden dem N-Leiter an der Grenzschicht zum P-Leiter Elektronen entzogen, sodass in der N-leitenden Schicht positive Atomrümpfe zurückbleiben. Diese sind fest an ihrem Platz gebunden. Den Atomen des Dotierungsmaterials (Arsen) fehlt jetzt ein Elektron. Sie werden deshalb zu positiven Ionen. Die Elektronen rekombinieren mit den Löchern im P-Leiter, sodass an der Grenze zum N-Leiter negative Atomrümpfe entstehen.
Die Atome des Dotierungsmaterials (Indium) besitzen nun **ein zusätzliches Elektron**.

Sie werden deshalb zu negativen Ionen. Als Folge entsteht eine **Diffusionsspannung**, die als **Sperrschicht** den weiteren Austausch von Ladungsträgern verhindert. Ein Ladungsträgeraustausch ist nur so lange möglich, bis die Anziehungskräfte zwischen Elektronen und Löchern mit den Rückholkräften der im Kristall festgefügten Ionen im Gleichgewicht sind. Die **Breite der Sperrschicht** stellt sich deshalb von selbst ein.

Die Diffusionsspannung beträgt bei Silizium ca. 0,5 - 0,8 Volt, bei Germanium 0,2 - 0,4 Volt.

 Copyright J. Straßhofer

Schaltzeichen einer Diode



Bauform einer Diode (mit Farbring)

PN-Übergang ... Halbleiterdiode

Die Halbleiterdiode ist ein elektronisches Bauelement, das aus einem **PN-Übergang** besteht.

Ihre grundsätzliche Funktion ist einfach zu beschreiben, da sie sich mit dem **Ventil eines Fahrradschlauches** vergleichen lässt. Das Ventil hat die Aufgabe, Luft **nur in einer Richtung** strömen zu lassen und sie in der **Gegenrichtung** zu **sperren**. Auf die **Diode** übertragen bedeutet dies, dass sie den elektrischen Strom in einer Richtung fließen lässt (**Durchlassrichtung**) und ihn in der Gegenrichtung sperrt (**Sperrichtung**).

Die Diode besitzt also eine **Ventilwirkung**, die bereits im **Schaltzeichen** dargestellt ist. Der Strom kann nur in der **Pfeilrichtung** (..... von der Anode zur Kathode) fließen.

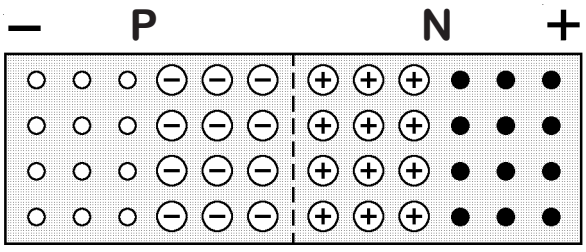


Abb.1: **Diode ... in Sperrichtung**

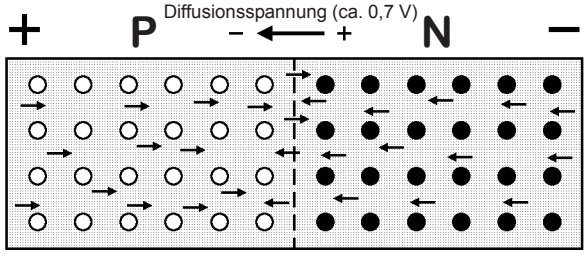


Abb. 2: **Diode ... in Durchlassrichtung**

Diode in Sperrichtung

Legt man an eine Diode eine Gleichspannung *(Abb. 1)* mit dem **negativen Pol** an die **P-Schicht** und mit dem **positiven Pol** an die **N-Schicht**, so fließt **kein Strom.**

Warum nicht? Wie bereits erwähnt, ziehen sich ungleichnamige Ladungen an, gleichnamige dagegen stoßen einander ab. In der **P-leitenden Schicht** werden deshalb die Löcher zum **MINUS-Pol** der angelegten Spannung gezogen, in der **N-leitenden Schicht** die Elektronen zum **PLUS-Pol**.
Die angelegte Spannung bewirkt also ein **Auseinanderziehen der Ladungsträger** und damit eine **Verbreiterung der Sperrschicht**. In der Grenzschicht stellt sich ein Mangel an Ladungsträgern ein. **Wo keine Ladungsträger, dort kein Transport!** Es fließt somit nahezu kein Strom.

Ein vernachlässigbar geringer Sperrstrom ergibt sich auf Grund der Eigenleitung des Halbleiters. Er ist jedoch in der Praxis selten von Bedeutung. Eine Erhöhung der **Sperrspannung** ist nur bis zu einem bestimmten **Maximalwert (Durchbruchspannung)** möglich. Bei **Überschreiten dieser Spannung** werden gebundene Ladungsträger vom Kern getrennt, was einen erhöhten Strom in Sperrichtung und damit die **Zerstörung der Diode** zur Folge hat.

Diode in Durchlassrichtung

Legt man den **PLUS-Pol** an die **P-Schicht** und den **MINUS-Pol** an die **N-Schicht** *(Abb. 2)*, so **leitet die Diode**. Da gleichnamige Ladungen einander abstoßen, werden Löcher und Elektronen zur Sperrschicht gedrängt. Die **Sperrschicht wird abgebaut**, und Strom kann fließen.

Ein Stromfluss ist z.B. bei **Silizium** erst ab einer Spannung von **0,7 Volt** (0,5 - 0,8 Volt) möglich, da die vorhandene **Diffusionsspannung** der angelegten Spannung entgegenwirkt.
Diesen Spannungsabfall über der Diode bezeichnet man als **Schleusenspannung**.
Durch andauerndes Rekombinieren der Ladungsträger **erwärmt** sich der **Halbleiter**, weshalb sich für den Strom bzw. für die Spannung bestimmte **Maximalwerte** ergeben (Pmax = Umax **.** Imax).

Bei einer **Diode** sind also die **Daten** für den **maximalen Strom** und für die **maximale Sperrspannung** besonders wichtig!

 Copyright J. Straßhofer

Kennlinie einer Siliziumdiode

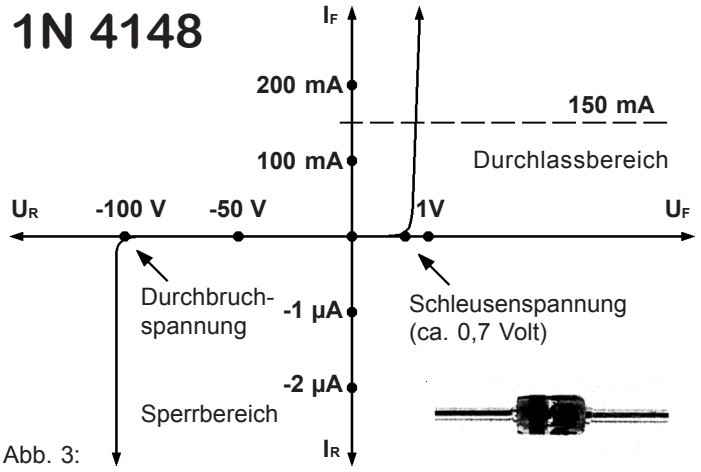


Abb. 3:

U_F:	Spannung in Durchlassrichtung (Durchlassspannung)	V
U_R:	Spannung in Sperrichtung (Sperrspannung)	V
I_F:	Strom in Durchlassrichtung (Durchlassstrom)	mA
I_R:	Strom in Sperrichtung (Sperrstrom)	µA

Wichtige **Grenzwerte** der Diode **1N 4148**

-100 V:	Durchbruchspannung (max. Sperrspannung)
150 mA:	max. Dauerdurchlassstrom
500 mW:	max. Verlustleistung

Eine **Kennlinie** gibt den **Zusammenhang zwischen Spannung und Strom** an einem elektronischen Bauelement wieder. Die abgebildete Kennlinie der Diode **1N 4148** *(Abb. 3)* zeigt, dass bei langsamen Anstieg der Spannung U_F (0,1 ... 0,4 Volt) in Durchlassrichtung kein nennenswerter Strom I_F fließt. Ab ca. 0,5 Volt und besonders bei etwa **0,7 Volt** steigt der Strom I_F bei nur geringfügiger Spannungsänderung U_F jedoch stark an.

Hier wird die anliegende Spannung U_F größer als die Diffusionsspannung. Die Schleusenspannung einer Silizium-Diode wird deshalb allgemein mit **0,7 Volt** angenommen (Germanium-Diode ..... ca. 0,3 Volt). Im **Sperrbereich** fließt vorerst nur ein **kleiner Sperrstrom I_R** von einigen Nano-Ampere. Wird jedoch die **Durchbruchspannung** erreicht, steigt der Strom I_R rasch an. **Als Folge wird die Diode zerstört.**

Die Diode in einer elektronischen Schaltung

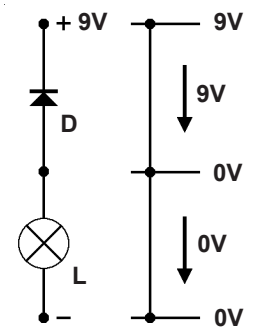


Abb. 4:
Diode in Sperrichtung
Die Diode sperrt den Strom. Die Lampe L leuchtet nicht.

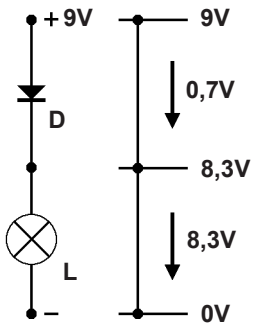


Abb. 5:
Diode in Durchlassrichtung
Durch die Diode und durch die Lampe L fließt Strom.

Wird eine Diode in **Sperrichtung** betrieben, so ist auf die laut Datenliteratur **maximal mögliche Sperrspannung** zu achten!

Wird eine Diode in **Durchlassrichtung** betrieben, so ist auf den **maximal möglichen Durchlassstrom** zu achten!

Diode in Sperrichtung

In der abgebildeten Schaltung *(Abb. 4)* sind die **Diode D** und die **Lampe L in Reihe** geschaltet. Die **Diode sperrt** den Strom, die Lampe leuchtet also nicht. Über der Diode fällt somit die gesamte Betriebsspannung ab; in diesem Fall 9 Volt.

Diode in Durchlassrichtung

Die **Diode D** ist so in den Stromkreis geschaltet, daß Strom durch sie fließt und die **Lampe L leuchtet** *(Abb. 5)*. Somit fällt über der Diode eine **Schleusenspannung von 0,7 Volt** ab.

Wie aus der Kennlinie *(Abb. 3)* zu entnehmen ist, ist die Schleusenspannung in einem schmalen Bereich (0,5 - 0,8 Volt) stromabhängig.
Aus rechnerischen Gründen hält man sich jedoch fast immer an den Mittelwert von **0,7 Volt**. Für die Lampe L verbleiben in dieser Schaltung somit nur mehr **8,3 Volt** (9 V - 0,7 V = 8,3 V).

 Copyright J. Straßhofer

Diode als Gleichrichter von Wechselstrom

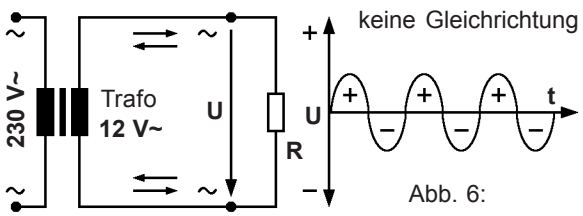


Abb. 6:

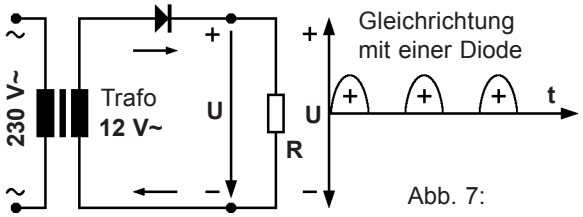


Abb. 7:

Ein wichtiger Anwendungsbereich der Halbleiterdiode ist die **Gleichrichtung von Wechselstrom** in Netzgeräten.

Mit einem **Transformator** wird die 230 Volt Netzspannung auf einen brauchbaren Wert von z.B. **12 Volt** heruntertransformiert. Auch diese 12 Volt sind noch **Wechselstrom**, also Strom mit ständig wechselnder Richtung. Während beim Gleichstrom die Ladungsträger nur in einer Richtung fließen, bewegen sie sich beim Wechselstrom andauernd hin und her; in der Regel 50 mal pro Sekunde, also mit **50 Hertz** (1 Hertz = 1 Schwingung pro Sekunde).

Durch den **Widerstand R** (Verbraucher) in *Abb. 6* fließt somit ein Strom, der mit 50 Hertz ständig seine Richtung wechselt. Elektronische Schaltungen, die ihre Betriebsspannung z.B. auch aus einer Batterie ziehen können, benötigen zum Betrieb jedoch **Gleichstrom**.

In *Abb. 7* wird der Wechselstrom des Transformators mit der **Diode D** gleichgerichtet, der Strom kann also nur mehr in einer Richtung durch den Widerstand R fließen, in der Gegenrichtung wird er durch die Diode gesperrt. Von den beiden Halbwellen des Wechselstroms bleibt somit nur mehr die **positive Halbwelle** über.

Da jedoch lediglich 50 mal pro Sekunde positive Spannungsimpulse zur Verfügung stehen, entspricht diese Form des Gleichstroms noch lange nicht der Qualität eines Gleichstroms aus einer Batterie. Eine elektronische Schaltung würde mit dieser Gleichrichterschaltung kaum funktionieren. Mittels relativ einfacher Schaltungstechnik ist dieses Problem jedoch zu lösen.

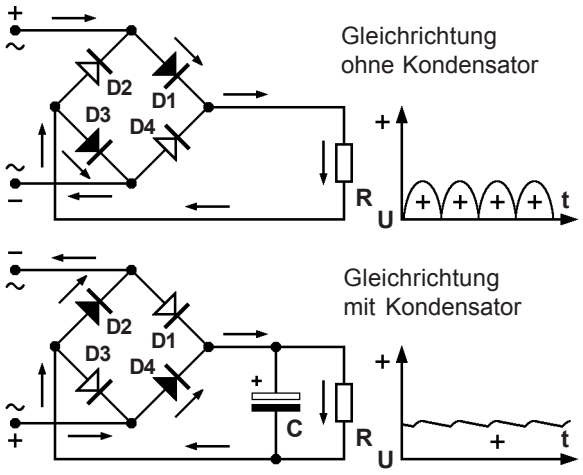
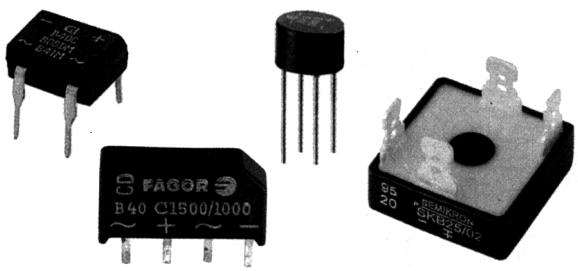


Abb. 8: **Graetzgleichrichtung**

Die am **häufigsten verwendete Gleichrichterschaltung** ist die **Graetzgleichrichtung**, die mit **4 Dioden** beide Halbwellen des Wechselstroms ausnützt.

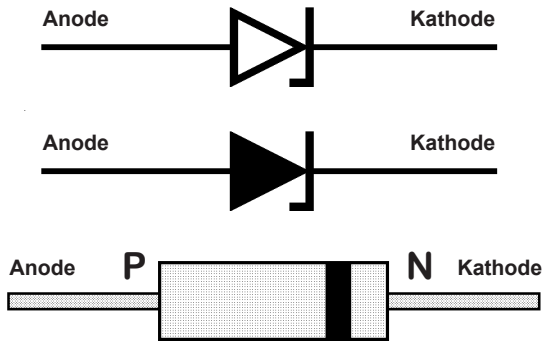
Abb.8 zeigt die jeweils in Durchlassrichtung liegenden Dioden (D1 - D3, D2 - D4) bei wechselnder Polarität der anliegenden Spannung. Die Ausgangsspannung **ohne Glättungskondensator C** wechselt somit 100 mal pro Sekunde zwischen 0 Volt und dem positiven Maximalwert. Das Ergebnis ist ein pulsierender Gleichstrom, der ebenfalls nur selten zu gebrauchen ist. Deshalb wird der **Glättungskondensator C** (Dimensionierung: 1 µF - 2µF pro mA), der als **Zwischenspeicher** die pulsierende Gleichspannung glättet, eingebaut. Diese **geglättete Spannung** kann in den meisten Fällen verwendet werden, nicht selten wird man jedoch ein **100 Hertz - Brummen** im Lautsprecher eines angeschlossenen Verstärkers hören. Um die **Qualität der Gleichspannung** weiter zu verbessern, werden **integrierte Spannungsregler** (Festspannungsregler (7805, 7812, ...) oder einstellbare Spannungsregler (LM 317T, ...)) verwendet.

Brückengleichrichter im Gehäuse



 Copyright J. Straßhofer

Schaltzeichen einer Zener-Diode



Bauform einer Zener-Diode (mit Farbring)

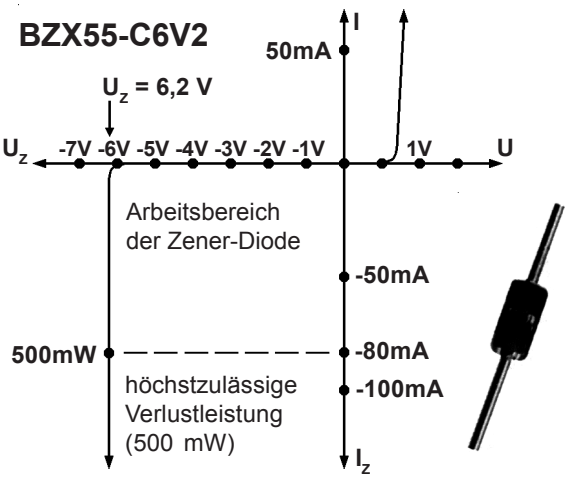


Abb. 1: **Kennlinie der Zener-Diode BZX55-C6V2)**

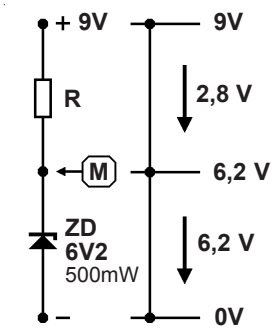


Abb. 2:
Zener-Diode ZD mit Vorwiderstand R (Spannungsabfälle)

Bezeichnungsschema für Zener-Dioden
Beispiel: **BZX55-C6V2**

BZX55: Grundtyp, Verlustleistung in Watt (500 mW)
C: Toleranz der Zener-Spannung in Prozent C ..... 5 %, D ..... 10 %)
6V2: Spannungswert der Zener-Diode (6,2 Volt)

Zener-Dioden gibt es standardmäßig in Spannungsabstufungen von 0,7 bis 200 Volt.
z.B.: ....., 3V3, 3V6, 3V9, 4V3, 4V7, 5V1, 5V6, 6V2, 6V8, 9V1, 10V, 11V, 12V, 13V, ...
Mehrere Verlustleistungsgruppen sind üblich: 400mW, 500mW, 1W, 1,3W, ...

Zener-Diode (Z-Diode)

Zener-Dioden - auch Z-Dioden genannt - sind Silizium-Dioden, die in **Sperrichtung** betrieben werden und sich im Durchlassbereich wie normale Dioden verhalten. Wie bei den Dioden ist zunächst der Sperrstrom gering, ab einer bestimmten **Sperrspannung Uz** steigt der Strom Iz jedoch sehr rasch an. Dieser Effekt wird dazu benutzt, um **Spannungen zu stabilisieren**.

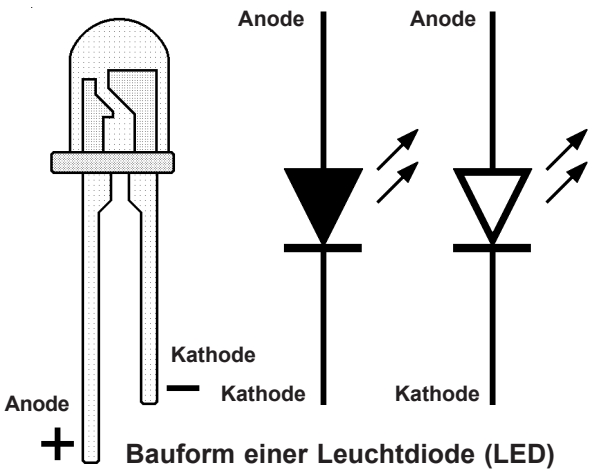
Der steile Sperrstromanstieg ist die Folge eines Durchbruchs in der Sperrschicht. Erreicht die Feldstärke am PN-Übergang einen kritischen Wert, so werden Elektronen aus dem Kristallgitter gerissen. Dieses Verhalten der Ladungsträger wurde 1940 von Carl Zener entdeckt. Der deshalb so benannte Zener-Effekt ist jedoch nur bis zu einer Spannung von 5,5 Volt von Bedeutung. Bei höheren Spannungen werden die Elektronen so stark beschleunigt, dass sie mit weiteren Ladungsträgern zusammenstoßen und diese aus ihren Bindungen schlagen. Die Anzahl der Elektronen wächst lawinenartig an; darum die Bezeichnung Lawinen-Effekt. Zener- und Lawinen-Effekt bewirken, dass bei Z-Dioden der Sperrstrom ab einer **gewissen Sperrspannung** (je nach Z-Diode) stark ansteigt.

Zener-Dioden haben die Aufgabe, **Spannungen konstant zu halten**. In der angegebenen Schaltung *(Abb. 2)* ist die Spannung am **Punkt M** mit einer Zener-Diode auf **6,2 Volt** festgelegt. Die Differenz (2,8 Volt) zur Betriebsspannung (9 Volt) fällt über dem **Vorwiderstand R** ab. Auch wenn sich die Betriebsspannung ändert, bleibt die Spannung an der Zener-Diode praktisch konstant 6,2 Volt. Geringfügige Änderungen ergeben sich, da die Kennlinie *(Abb. 1)* im Durchbruchbereich bei 6,2 Volt nicht genau senkrecht ist. Eine Änderung der Betriebsspannung bewirkt deshalb eine geringfügige Änderung des Stroms in der Zener-Diode bzw. im Vorwiderstand R. Dies wiederum bewirkt laut Kennlinie eine minimale Änderung der Spannung am Punkt M. Dennoch erfolgt eine weitgehende **Glättung** einer schwankenden Betriebsspannung (z.B.: Netzbrumm, ...) auf 6,2 Volt.

Zur Dimensionierung des **Vorwiderstandes R** müssen die wesentlichen Daten (Zener-Spannung, max. Verlustleistung) der Zener-Diode bekannt sein. Ein bestimmter **Mindeststrom** muss fließen, damit die Zener-Diode im linearen Bereich der Kennlinie betrieben wird. Dieser Strom sollte ca. **5 mA** betragen. Auch die Überlegung mit Imin = 0,1 **.** Imax führt zu einer richtigen Dimensionierung. Der max. Strom Iz wird von der max. Verlustleistung der Zener - Diode (500 mW) bestimmt. Mit der Formel **P = U . I** ergibt sich in *Abb. 1*: 80 mA.

 Copyright J. Straßhofer

Schaltzeichen einer Leuchtdiode



Bauform einer Leuchtdiode (LED)

Auch bei Leuchtdioden kann der Strom, wie bei normalen Dioden, nur in einer Richtung fließen. Die **Durchlasspannungen** (Schwellspannungswerte, Schleusenspannungen) sind jedoch höher und je nach Farbe verschieden. Da auch die Kennlinie der Leuchtdioden nicht linear ansteigt, werden die Durchlasspannungen bei **20 mA** angegeben:

LED rot ... U_F = 1,6 Volt

LED grün, gelb, orange ... U_F = 2,2 Volt

Bei **Berechnungen** sind diese Werte zu berücksichtigen, wobei gilt: $\mathbf{U_{LED} = U_F}$

Berechnung des Vorwiderstandes R

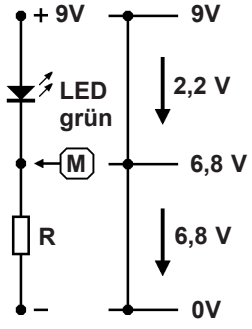
Strombegrenzung für Leuchtdioden

Leuchtdioden dürfen nicht ohne **Vorwiderstand** betrieben werden! Es spielt keine Rolle, ob der Vorwiderstand an der Anode oder an der Kathode angeschlossen wird. Oft ist man versucht, eine LED zu überprüfen, indem man sie direkt an eine 4,5 Volt Batterie anschließt. Wenn die LED diese Behandlung dennoch heil übersteht, so ist das in der Regel auf eine schwache Batterie (hoher Innenwiderstand) zurückzuführen.

Berechnung des Vorwiderstandes R (Beispiel):

Betriebsspannung = 9 V, U_{LED} (grün) = 2,2 V

I_{LED} = 20 mA (gewünschter LED-Strom), **R = ?**



Berechnung von R:

$$R = \frac{U - U_{LED}}{I} = \frac{9\ V - 2{,}2\ V}{0{,}02\ A} =$$

$$= \frac{6{,}8\ V}{0{,}02\ A} = \mathbf{340\ \Omega}$$

Normwert (E 12 - Reihe): **R = 330 Ω**

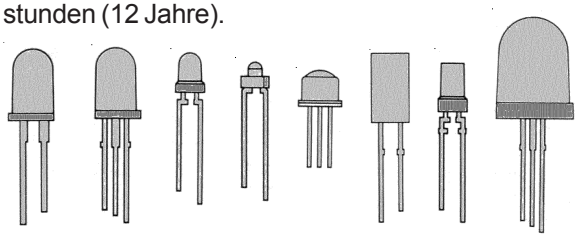
Leistung im Vorwiderstand (Wärme):

P = U **.** I =

= 6,8 V **.** 0,02 A = **136 mW**

Leuchtdiode .... LED

Leuchtdioden (Lumineszenzdioden, LED) sind aus ungewöhnlichen **Halbleitermaterialien** (Galliumarsenid, Galliumaluminiumarsenid, Galliumphosphid) aufgebaut. Wie bei einer normalen Halbleiterdiode (z.B. 1N 4148) entspricht die abfallende Spannung an einer LED (1,6 V oder 2,2 V) einer **Verlustleistung** (P = U **.** I), die in Wärmeenergie umgewandelt wird. Bei Leuchtdioden wird ein **Teil dieser Energie** in Form von **sichtbarer oder unsichtbarer Strahlung** abgegeben, wobei für die **verschiedenen Farben** (infrarot, rot, orange, gelb, grün, blau) die **unterschiedlichen Halbleitermaterialien** verantwortlich sind. Mittels **Vorwiderstand** kann der LED-Strom, üblicherweise 10 bis 30 mA, je nach gewünschter Leuchtstärke eingestellt werden. Die Lebensdauer beträgt bei einem Strom von 20 mA durchschnittlich 100000 Betriebsstunden (12 Jahre).



Gehäuse von Leuchtdioden:

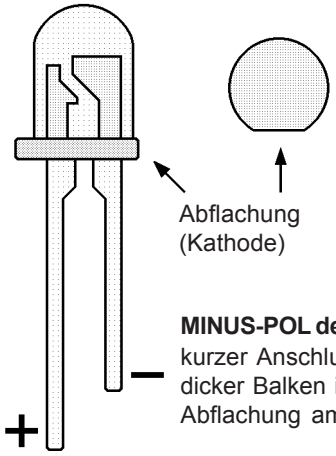
Das Gehäuse einer LED kann je nach **Verwendungszweck** sehr unterschiedliche Formen haben (z.B.: Symbol-LED: Pfeil, Punkt, Balken, ...).

Übliche Baugrößen (Durchmesser) sind:

1,8 mm - 3 mm - 5 mm - 8 mm - 10 mm

Im 10 mm - Gehäuse sind 2 LED eingebaut. Auch die Balken einer 7 Segment-Anzeige können LED sein. Zweifarbige LED besitzen 3 Anschlüsse, da sie z.B. von rot auf grün umgeschaltet werden können.

Beim **Einbau** der **LED** und beim **Anschluss** an die Betriebsspannung ist auf die **richtige Polung** zu achten!



MINUS-POL der LED:
kurzer Anschluss
dicker Balken in der LED
Abflachung am Gehäuse

 Copyright J. Straßhofer

Sensoren der Elektronik

Heißleiter (NTC) und Kaltleiter (PTC) sind **Fühler** der Elektronik (Sensoren) in die Umwelt und elektronisch betrachtet **Messwertaufnehmer für Temperatur.**
Bei **Änderung der äußeren Bedingungen** (Temperaturänderung, heiß - kalt) ändert sich der ohmsche Wert des Widerstandes (NTC bzw. PTC) und folglich z.B. das **Teilerverhältnis eines Spannungsteilers**. Diese **Spannungsänderung** auf Grund äußerer Einflüsse wird durch eine elektronische Schaltung ausgewertet. Heißleiter und Kaltleiter bestehen aus **Halbleitermaterial**.
Anwendungsbereiche: Messtechnik, Regel- und Steuerungstechnik, ...

Heißleiter .... NTC

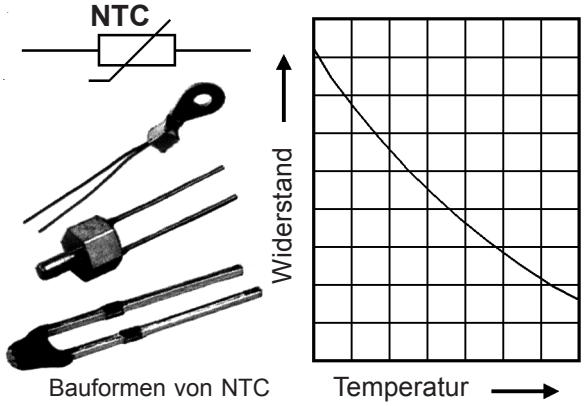


Abb. 1: **Widerstands-Temperatur-Kennlinie** eines NTC: Der Widerstandswert wird bei höheren Temperaturen geringer.

Kaltleiter .... PTC

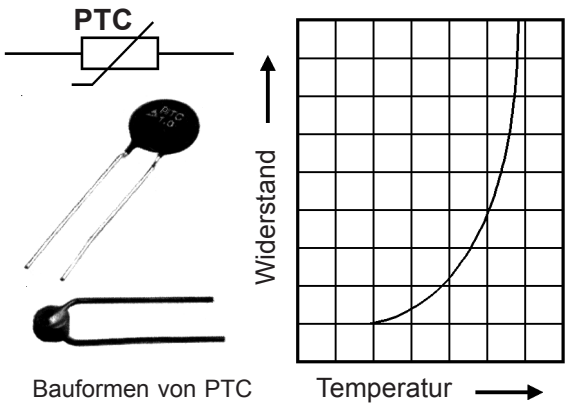


Abb. 2: **Widerstands-Temperatur-Kennlinie** eines PTC: Der Widerstandswert steigt bei höheren Temperaturen stark an.

Heißleiter .... NTC

Heißleiter (NTC = Negativer Temperatur-Koeffizient) **leiten im warmen Zustand besser** als im kalten, d.h., ihr Widerstand nimmt mit zunehmender Temperatur ab *(Abb. 1)*.
Erklärung: Wird Energie in Form von Wärme zugeführt, werden die Elektronen im Werkstoff (Metall-Oxid-Mischung) beweglicher, wodurch sich die Leitfähigkeit mit ca. 2 - 6 % pro °C erhöht.
Meist wird der Widerstand eines NTC bei **+ 25 °C** angegeben (Nennwiderstand).
So hat z.B. ein **10 kOhm-NTC** (= Widerstand bei +25 °C) bei -40 °C 1 MOhm, bei 0° 30 kOhm und bei +100 °C nur mehr 600 Ohm. Übliche Toleranzen sind + - 5 %, + -10 % bzw. + - 20 %.
NTC werden mit **Nennwiderständen** von einigen Ohm bis Mega-Ohm (E 12 oder E 24 - Reihe oder willkürlich gestaffelt) für Leistungen von ca. 0,1 Watt bis zu mehreren Watt produziert. Im Laborbetrieb genügen jedoch einige Standardwerte.
Anwendung: Temperaturmessung, Temperaturregelung, Leistungsanwendung: Anzugsverzögerung von Relais, schonendes Einschalten von Kleinmotoren oder Lampen, ...

Kaltleiter .... PTC

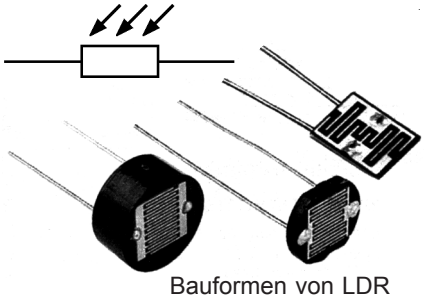
Kaltleiter (PTC = Positiver Temperatur-Koeffizient) **leiten im kalten Zustand besser** als im warmen, d.h., ihr Widerstand ist im kalten Zustand gering und nimmt mit zunehmender Temperatur sehr stark zu *(Abb. 2)*. Kaltleiter bestehen aus Bariumtitanat.

Das typische Verhalten eines PTC - Widerstandes zeigt auch die **Glühlampe.** So hat z.B. eine **60 Watt - Lampe** bei einer Temperatur von + 25 °C einen Widerstand von ca. 70 Ohm. Im Betrieb steigt der Widerstand bei einer Temperatur des Glühfadens von etwa 2500°C auf 800 Ohm. Diese PTC-Eigenschaft ist z.B. beim Schalten von Lampen größerer Leistung von Bedeutung.

PTC werden mit **ganz bestimmten Widerstandswerten** für die praktische Anwendung und für einen bestimmten Temperaturbereich hergestellt. PTC werden in der Praxis nur mehr sehr selten verwendet. Allein von der Bauform her sind PTC und NTC oft nicht zu unterscheiden.
Anwendung: Thermostat, Stromregelung, Überstromsicherung, ...

 Copyright J. Straßhofer

Fotowiderstand .... LDR



Bauformen von LDR

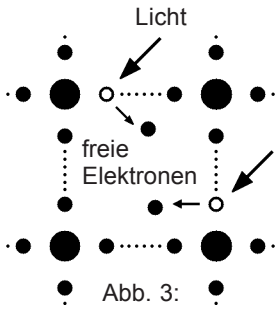
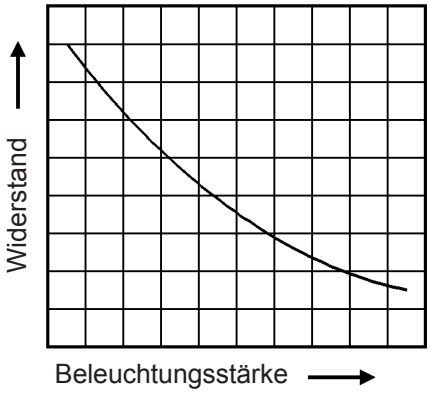


Abb. 3:

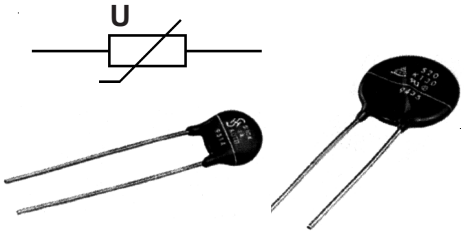


Widerstand in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

Wird die **lichtempfindliche Fläche** eines **LDR** (Light - Dependent - Resistor) bestrahlt, so werden durch die auftreffenden Fotonen Elektronen aus ihren Bindungen gelöst *(Abb. 3)*. Dadurch erhöht sich die **Eigenleitung** des Materials (Selen, Cadmiumsulfid, ...) und der Widerstand sinkt. Der Dunkelwiderstand eines LDR liegt bei **10 MOhm**, der Hellwiderstand (1000 Lux) zwischen **75 und 300 Ohm**. Handelsübliche LDR haben eine maximale Verlustleistung von 50 bis 200 mW. **LDR** sind relativ **träge**, für Frequenzen über 1 kHz daher nicht geeignet. Die **Polung** spielt **keine Rolle**.

Anwendung: Dämmerungsschalter, Lichtschranke, Luxmeter, ...

Varistor .... VDR

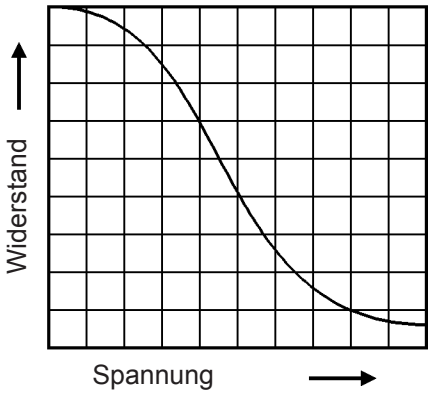


Bauformen von VDR

Verhalten des VDR bei Spannungsspitzen

Spannungsspitzen werden vom VDR kurzgeschlossen.

ohne VDR mit VDR

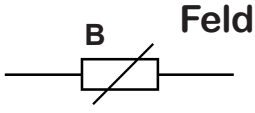


Widerstand in Abhängigkeit von der Spannung

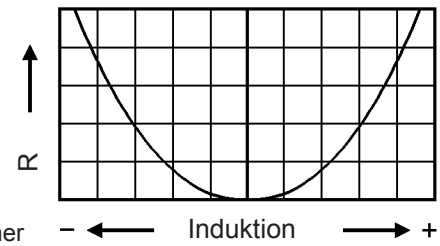
Varistoren (VDR = Voltage - Dependent - Resistor) sind **spannungsabhängige Widerstände** aus Siliziumkarbid oder Zinkoxid. Der **Widerstand** nimmt **mit zunehmender Spannung** sehr rasch **ab** (Kennlinie Siemens S14 K 50: 50 V - 1 MOhm, 100 V - 10 kOhm, 130 V - 100 Ohm), was ein starkes Ansteigen des Stroms bewirkt. **VDR altern** je nach Belastung, es ist daher ein Typ mit entsprechender Nennspannung und erforderlicher Belastbarkeit zu wählen. Beim Einbau des VDR in eine Schaltung spielt die **Polung keine Rolle**.

Anwendung: Funkenlöschung, Überspannungsschutz, ...

Feldplatte



Bauform einer Feldplatte



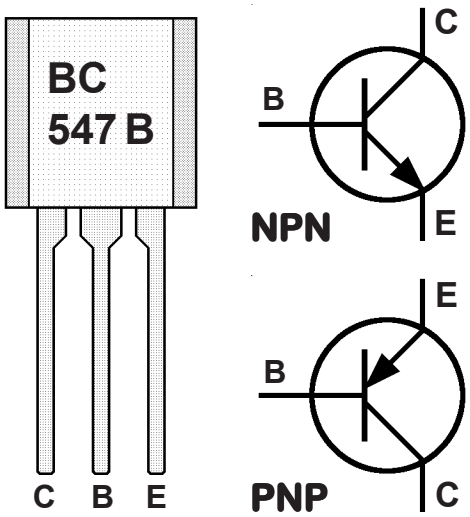
Widerstand in Abhängigkeit von der magnetischen Induktion

Die Feldplatte ist ein **magnetisch steuerbarer Widerstand** aus Halbleitermaterial. Wird sie von einem Magnetfeld durchflutet, so wirkt dieses Feld auf die im Material fließenden Elektronen, was die Ladungsträger ablenkt. Dadurch verlängert sich deren Weg, und der Widerstand erhöht sich.

Anwendung: berührungslose Schalter, Feldplattenpotentiometer

 Copyright J. Straßhofer

Der Transistor



Bauform eines Kleinsignaltransistors

Schaltzeichen von NPN- und PNP-Transistor

Der **Transistor** ist für die heute stattfindende **Entwicklung der Elektronik** hauptverantwortlich. Ob im Radio oder im Computer, im Auto oder in der Hifi-Anlage, überall findet sich dieses wichtige elektronische Bauelement.

Was ist der Grund dafür, dass der Transistor so unentbehrlich wurde? Wie nahezu überall im Leben versucht der Mensch, sich die Dinge einfach zu machen. So auch in der **Energietechnik**. Der Mensch möchte und muss inzwischen den manchmal gewaltigen **Energiefluss** (Kraftwerk, Rakete, Schiff, ...) mit möglichst wenig Energieaufwand (Schalter umlegen, Taste drücken, ...) **steuern**.

In vergangenen Jahrtausenden bediente man sich der Mechanik und der Kraft des Tieres. **Dampfmaschine, Relais und Elektronenröhre** waren weitere Schritte. Auf der Suche nach noch bequemeren Möglichkeiten entwickelte sich im **20. Jahrhundert** die **Elektronik** und als vorläufiger Höhepunkt der **Transistor**, der sich in komprimierter Form im **Mikroprozessor** wiederfindet.

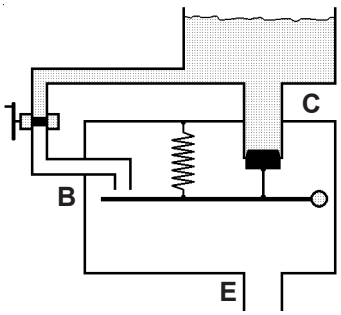


Abb. 1: „Transistor“ gesperrt

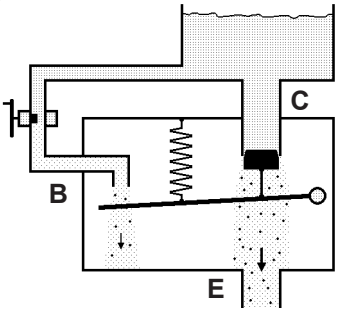


Abb. 2: „Transistor“ ein wenig leitend

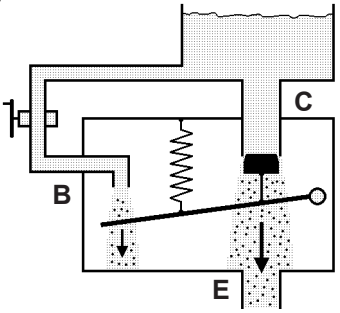


Abb. 3: „Transistor“ voll leitend

Das Transistorprinzip

Das **Prinzip des Transistors** lässt sich sehr einfach mit der **Hebelwirkung** vergleichen.

In *Abb.1* ist ein **Wassergefäß** dargestellt, aus dem zwei Leitungen führen. Ein **kleines Rohr** führt über einen Wasserhahn **B**, der zugedreht ist, zu einem **Hebel**. Dieser Hebel ist an seinem rechten Ende beweglich gelagert und an einer Feder aufgehängt. Ein auf dem Hebel befestigter Korken wird durch diese Feder in ein größeres Rohr **C** gedrückt, sodass aus diesem kein Wasser nach **E** fließen kann.

In *Abb.2* wird nun der **Wasserhahn B** ein wenig aufgedreht. Auf das Ende des Hebels fallen einige Tropfen Wasser. Durch den entstehenden Druck bewegt sich der Hebel leicht nach unten, die Feder spannt sich, und aus dem großen Rohr **C** fließt ein wenig Wasser.

Aus beiden Rohren sammelt sich das Wasser im Gehäuse und fließt über ein weiteres Rohr **E** ab. In *Abb.3* wird der Wasserhahn **B** voll aufgedreht. Der Wasserstrahl aus dem kleinen Rohr **B** drückt den Hebel weit nach unten, die Feder wird stark gespannt, und aus dem großen Rohr **C** kann das Wasser nahezu ungehindert nach **E** fließen.

Die drei Abbildungen zeigen, dass **mit wenig Wasser B ein großer Wasserstrom von C nach E** gesteuert werden kann. Es ist **nicht viel Wasser** erforderlich, um den Hebel nach unten zu drücken. Als Folge davon strömt jedoch **viel Wasser** vom Rohr **C** zum Rohr **E**. Genau dieses **Prinzip** wird im Transistor verwirklicht.

Wenig Strom an der **Basis B** steuert einen **großen Strom** vom **Kollektor C** zum **Emitter E**.

 Copyright J. Straßhofer

Bipolare Transistoren

Bipolare Transistoren sind aus **drei Halbleiterschichten aufgebaut** *(Abb. 4)*. **N-leitendes** und **P-leitendes** Halbleitermaterial ergeben so zwei Möglichkeiten der Schichtfolge: **NPN** und **PNP**.
Bipolar heißen diese Transistoren, weil der Betriebsstrom durch N- und P- Schichten fließt.

C	**... Kollektor**	**....**	**Sammler**
B	**... Basis**	**....**	**Basis**
E	**... Emitter**	**....**	**Aussender**

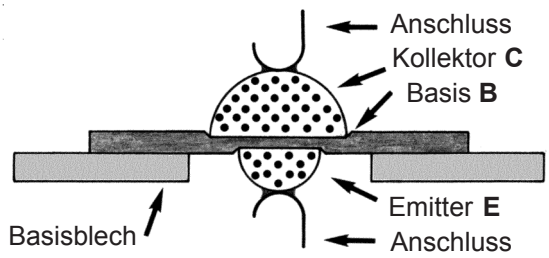


Abb. 4: Aufbau eines Transistors der ersten Entwicklungsphase (Schnittdarstellung)

Abb. 5:

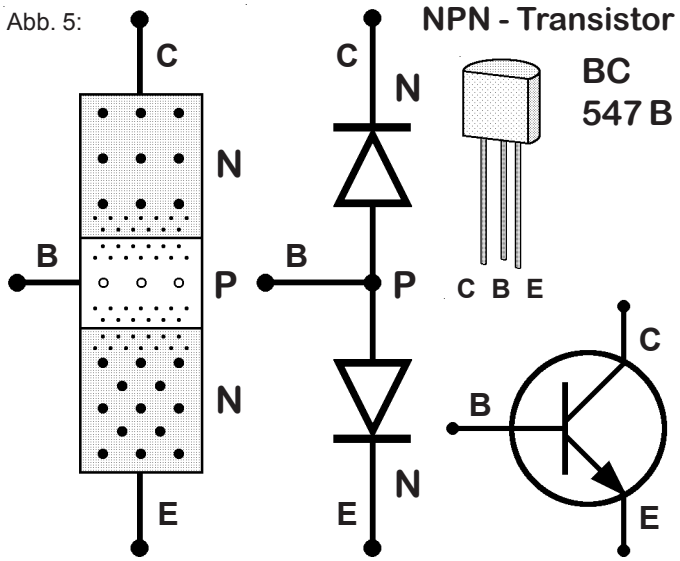
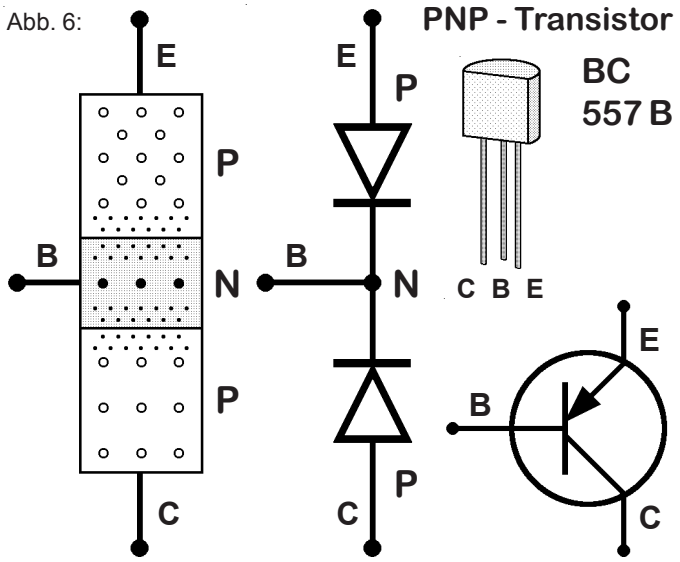


Abb. 6:



NPN - Transistor

Abb. 5 zeigt einen NPN-Transistor, dessen typischer Vertreter der **BC 547 B** ist. Die beiden äußeren Schichten bestehen aus **N-dotiertem Material**, wobei die Emitter-Zone etwas höher dotiert ist. Aus diesem Grund dürfen in der Praxis **Emitter E** und **Kollektor C** nicht vertauscht werden.
Die mittlere nur einige Mikrometer schmale Schicht **(Basis B)** ist **P-dotiert**.
Grundsätzlich besteht ein NPN-Transistor aus zwei Dioden, deren Anoden miteinander verbunden sind. Die zwei so entstehenden **PN-Übergänge** bilden durch Rekombination der Ladungsträger **zwei** selbständige **Sperrschichten** aus. Trotzdem ist es nicht möglich, einen Transistor aus zwei Dioden aufzubauen, da der Abstand der beiden PN-Übergänge für die Funktion des Transistors eine entscheidende Rolle spielt.

PNP - Transistor

In *Abb. 6* ist der **Komplementärtyp** zum BC 547 B, der **BC 557 B**, abgebildet.
Die Schichtfolge ist **komplementär (umgekehrt gleich)** zum NPN, also **PNP**. Beide Typen besitzen praktisch **gleiche Daten**, nur ihre Polung und Ansteuerung ist gegensätzlich.

Für Erklärungen wird in der Elektronik jedoch der **NPN-Typ** benützt, da der Schaltungsentwickler grundsätzlich **NPN-Transistoren** zu Beginn einer Schaltungsentwicklung verwendet.

 Copyright J. Straßhofer

Der Transistor schaltet den Strom .... Transistorprinzip

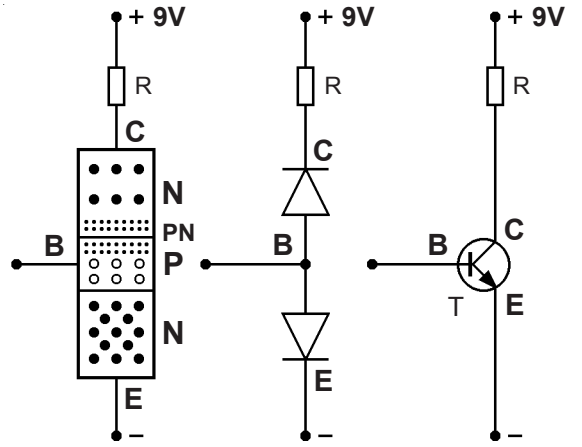


Abb. 7: **Transistor ohne Ansteuerung an der Basis**

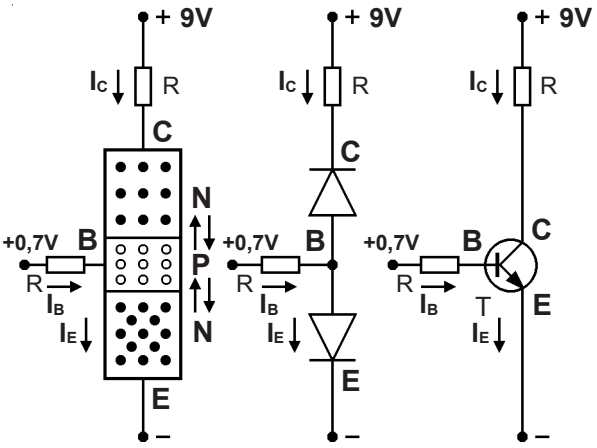


Abb. 8: **Transistor mit Ansteuerung an der Basis**

Der Transistor sperrt.

Abb.7 zeigt den **Aufbau eines Transistors** aus den drei Halbleiterschichten **N-P-N** mit dem Diodenersatzschaltbild und dem dazugehörenden Transistor-Schaltzeichen, welches die Anschlüsse symbolisch darstellt.

Der **Kollektor C** ist über den Widerstand R mit dem PLUS-Pol der Betriebsspannung (9 Volt) verbunden, der **Emitter E** mit dem MINUS-Pol. Die **Basis B** bleibt frei. Der **Widerstand R** vom PLUS-Pol zum Kollektor dient zur **Strombegrenzung** und ist für die eigentliche Transistorfunktion nicht von Bedeutung.

Da sich entgegengesetzte Ladungen anziehen, wandern die **N-Ladungsträger** vom **Kollektor C** zum PLUS-Pol. Gleichzeitig werden die **P-Ladungsträger** der mittleren Schicht **(Basis B)** vom PLUS-Pol abgestoßen (gleichnamige Ladung) und vom MINUS-Pol angezogen (ungleichnamige Ladung).

Als Folge verbreitert sich die **Sperrschicht (PN)**, die wie eine in Sperrichtung geschaltete Diode wirkt. Der zweite PN-Übergang von der **Basis B** zum **Emitter E** ist in Durchlassrichtung gepolt (N-Zone am MINUS-Pol, P-Zone auf der Seite des PLUS-Pols) und wäre also leitend.

Insgesamt kann aber bei **offener Basis** dennoch **kein Strom** durch den Transistor fließen, da der **PN-Übergang vom Kollektor zur Basis den Strom sperrt.**

Der Transistor leitet.

Ein Transistor hat aber nur dann einen Sinn, wenn man mit ihm etwas verändern kann; im einfachsten Fall den **Strom ein-** bzw. **ausschalten**.

Zu diesem Zweck dient die **Basis B**. Ist sie nicht angeschlossen, so sperrt der Transistor in der bekannten Weise. Um den Transistor leitend zu machen, ist es notwendig, die sperrende Wirkung der **CB-Diode** aufzuheben *(Abb.8)*. Zu diesem Zweck wird an die **BE-Diode** eine Spannung von etwa **0,7 Volt** angelegt (0,7 Volt ... Schleusenspannung der Diode). Der **Widerstand R** dient aus Sicherheitsgründen zur Strombegrenzung und ist eigentlich für die Transistorfunktion unerheblich.

Wie bewirkt nun der Strom in die **Basis B** ein Leiten der **CB-Diode**? Zur Erklärung geht man von der Elektronenstromrichtung aus. Die freien Elektronen im **Emitter E** werden vom MINUS-Pol in die Basis-Zone abgedrängt. Die Emitter-Zone ist sehr hoch dotiert, die Basis-Zone schwach und sehr schmal. Am **PN-Übergang** rekombinieren daher nur wenige Ladungsträger, der größere Teil der Elektronen bleibt in der **Basis B** frei beweglich. Damit leitet der PN -Übergang von der **Basis B** zum **Emitter E**. Die überschüssigen Elektronen werden von der positiven Basis-Spannung (0,7 Volt) und von der positiven Betriebsspannung (9 Volt) angezogen. Die Elektronen fließen somit zum größeren Teil zum **Kollektor C** (größere Spannung), ein kleiner Teil zum PLUS-Pol der viel kleineren Basis-Spannung. **Der Transistor leitet.**

 Copyright J. Straßhofer

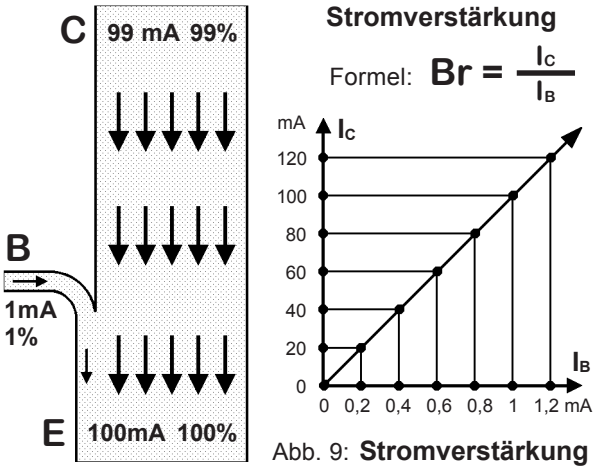


Abb. 9: **Stromverstärkung**

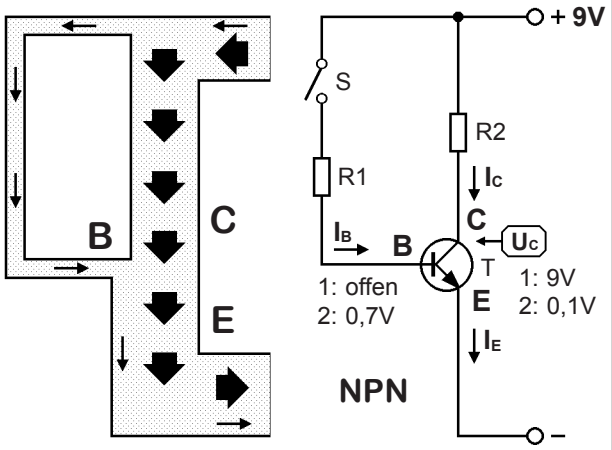


Abb. 10: **Schaltung mit NPN-Transistor**

Stromverstärkung

In *Abb.9* ist das Verhältnis von **Basisstrom I_B** zu **Kollektorstrom Ic** in der üblichen technischen Stromrichtung dargestellt. Die Kennlinie zeigt ebenfalls diese Beziehung. Auf Grund des Transistoraufbaus (PN-Übergänge) genügt ein **geringer Basisstrom**, um den viel **größeren Kollektor-Emitter-Strom** zu steuern. Fließt bei einem Transistor ein Basisstrom I_B von **1 mA**, so bewirkt dieser Strom einen **Kollektorstrom I_C** von **99 mA**. Der Basisstrom wird also um das **99-fache** verstärkt. Die Beziehung **I_C** zu **I_B** wird im **Stromverstärkungsfaktor Br** ausgedrückt; er beträgt in diesem Fall **99**. Reduziert man z.B. den Basisstrom **I_B** auf **0,1 mA**, so ergibt sich ein Kollektorstrom **I_C** von **9,9 mA**, bei **I_B = 0,2 mA .... I_C = 19,8 mA**, usw.

Beliebige **Basisströme I_B** ergeben so auf Grund der 99-fachen Stromverstärkung dieses Transistors einen 99-fach höheren **Kollektorstrom I_C** (.... natürlich innerhalb der Grenzwerte des jeweiligen Transistors). Mit wenig Leistung **(P = U . I = 0,7 . I_B)** wird mit dem Transistor also ein 99 mal höherer Strom gesteuert **(I_C = Br . I_B = 99 . I_B)**.
In der **real** eingestellten **Stromverstärkung Br** wird demnach das Prinzip des Transistors sichtbar.

Zur **Ansteuerung** des Transistors ist eine Spannung von ca. **0,7 Volt** für die **Basis-Emitter-Diode** erforderlich. Es wäre nicht sinnvoll, dazu eine zweite Spannungsquelle zu verwenden, wenn bereits eine Betriebsspannung vorhanden ist. Deshalb wird der erforderliche Strom aus der Betriebsspannung (9 Volt) über den Widerstand R1 bezogen. Für das Ein- und Ausschalten des Transistors genügt somit nur eine Spannungsquelle *(Abb.10)*.

Ist der Schalter S offen *(Zustand 1)*, fließt kein Basisstrom ... der Transistor sperrt. Ein gesperrter Transistor wirkt wie ein sehr hochohmiger Widerstand. Die Spannung **U_C** am **Kollektor C** des Transistors beträgt daher **9 Volt**. Für R2 verbleibt keine Spannung, also fließt auch kein Strom.

Bei **geschlossenem Schalter S** *(Zustand 2)* fließt Basisstrom ... der Transistor leitet und hat deshalb fast keinen Widerstand, d.h., im Verhältnis zu R2 ist der Widerstand des Transistors äußerst klein. Somit fällt an ihm nahezu keine Spannung ab ... im Idealfall - bei entsprechender Dimensionierung der Bauelemente - beträgt **U_C** ca. **0,1 Volt**.

NPN- und PNP-Transistor

Ein **Vergleich** der *Abbildungen 10 und 11* zeigt die Ähnlichkeit der beiden Transistorschaltungen, die grundsätzlich gleich funktionieren. Während jedoch ein NPN-Transistor an der Basis positiv angesteuert werden muss, ist beim **PNP-Transistor** eine **negative Basisspannung (8,3 Volt)** gegenüber der Betriebsspannung (9 Volt) erforderlich.

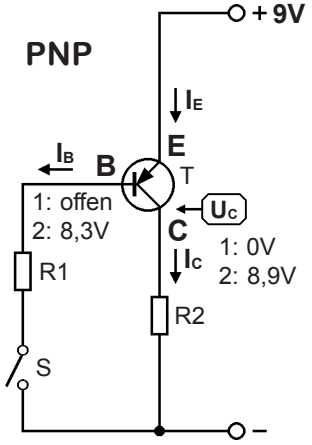


Abb. 11: **Schaltung mit PNP-Transistor**

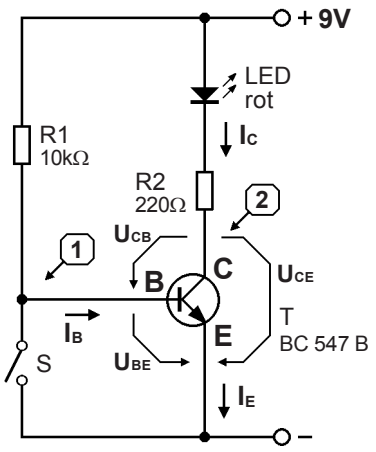


Abb. 12: **Der Transistor als Schalter**

Berechnung ..... Schalter S offen

T: U_{BE} = 0,7 V LED: U_F = 1,6 V
U_{CEsat} = 0,1 V
Bmin = 200
($I_{LED} = I_{R2} = I_C$, $I_E = I_C + I_B$)

$$I_{R2} = \frac{U_{R2}}{R2} = \frac{7{,}3V}{220\Omega} = \mathbf{33{,}18\ mA}$$

$$I_{R1} = \frac{U_{R1}}{R1} = \frac{8{,}3V}{10000\Omega} = \mathbf{0{,}83\ mA}$$

$$B_r = \frac{I_C}{I_B} = \frac{33{,}18mA}{0{,}83mA} = \mathbf{39{,}98 = 40}$$

$$\ddot{U} = \frac{B_{min}}{Br} = \frac{200}{40} = \mathbf{5}$$

Transistor als Schalter

Mechanische Schalter haben den Nachteil, dass sie sich mit der Zeit durch Funkenerzeugung abnützen. Ein **Transistorschalter** dagegen ist ein **kontaktloser Schalter**, da keine beweglichen Teile vorhanden sind; Abnützung ist daher ausgeschlossen.

Weiters lässt ein Transistorschalter sehr **hohe Schaltfrequenzen** (Anzahl der Schaltvorgänge pro Zeit) zu. Die Grenze bei mechanischen Schaltern liegt dagegen bei 400 Hertz (Reed-Relais).

Der Transistorschalter hat aber auch einige **Nachteile** (schlechtere Leitfähigkeit, schlechteres Sperrverhalten). Diese lassen sich jedoch durch schaltungstechnische Maßnahmen stark reduzieren.

In *Abb.12* wird eine **Leuchtdiode** über den Transistor T geschaltet. **Ist der Schalter S offen, leuchtet die Leuchtdiode, ist er geschlossen, ist die Leuchtdiode dunkel.**

Signal-Zeit-Plan

Ein Signal-Zeit-Plan dient dazu, verschiedene **Schaltungssituationen im Zeitablauf** zu erfassen. Der Transistorschalter kennt **zwei Zustände** (EIN ... AUS). Wichtig ist, wie sich **Eingang** (Basis B, Messpunkt 1) und **Ausgang** (Kollektor C, Messpunkt 2) zueinander verhalten.

Aus der *Abb.13* ist zu ersehen, dass am Ausgang (MP 2) eine Spannung von **0,1 Volt** herrscht, wenn am Eingang (MP 1) **0,7 Volt** anliegen. Hat der Eingang **0 Volt**, liegen am Ausgang **9 Volt** (= Betriebsspannung). Der Transistor *dreht* die Spannung zwischen Eingang und Ausgang um, er ist also ein **INVERTER** (Bezeichnung aus der Digitaltechnik).

Sättigungsspannung

Ein **Transistor leitet**, wenn genügend Basisstrom I_B fließt, damit vom **Kollektor C** zum **Emitter E** Strom (Kollektorstrom I_C) fließen kann. Im leitenden Zustand soll also die Spannung am Messpunkt 2 (Kollektor C) möglichst gering sein. Für den Widerstand R2 verbleibt dann mehr Spannung, und folglich fließt mehr Kollektorstrom.

Schon bei **0,7 Volt** Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} betrachtet man den Transistor als voll leitend. In der Praxis ist es aber sinnvoll - besonders dann, wenn vom Kollektor aus weitere Transistoren angesteuert werden -, dass die Spannung U_{CE} geringer als 0,7 Volt wird. Man erreicht dies, indem man den **Basisstrom I_B erhöht** (Verkleinerung des Widerstandes R1). Im Idealfall fällt dann die Sättigungsspannung **U_{CEsat}** auf ca. 0,1 Volt. Der Transistor wird damit fast zum idealen Schalter.

Übersteuerung: Grundsätzlich fließt somit **mehr Basisstrom I_B**, als für die Schalterfunktion des Transistors erforderlich wäre. Der Transistor wird also mit **bis zu 10 mal mehr Basisstrom I_B** übersteuert, um eine möglichst geringe Sättigungsspannung U_{CEsat} - also ca. 0,1 Volt - zu erhalten.

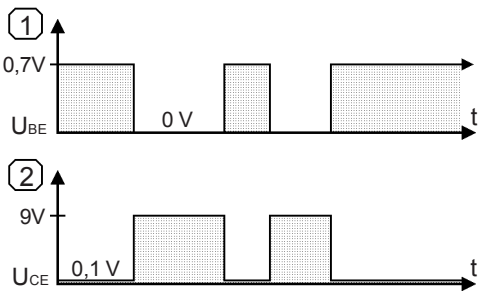


Abb. 13: **Signal - Zeit - Plan**

 Copyright J. Straßhofer

Funktion der Schaltung ... Beschreibung

Transistor EIN - geschaltet

Der **Schalter S** ist in diesem Zustand **geöffnet**. Durch die Widerstände R1 und R2 fließt Strom; die Leuchtdiode leuchtet.
Da durch den Widerstand R2 Strom fließt, fällt an ihm auch eine Spannung ab. Wie groß diese Spannung ist, hängt von der anliegenden Betriebsspannung **(U = 9 Volt)**, von der Schleusenspannung der roten LED **(U_F = 1,6 Volt)** und von der Sättigungsspannung des jeweiligen Transistors **(U_{CEsat} = 0,1 Volt)** ab.

Die Leuchtdiode **(LED)** verbraucht also eine Spannung von **1,6 Volt**, und der **Transistor** im durchgesteuerten Zustand **0,1 Volt**. Für den **Widerstand R2** verbleiben daher nur mehr **7,3 Volt**.
Die Dimensionierung von R2 (Normwert 220 Ohm) ergibt einen Strom von **33,18 mA** durch den Widerstand und in der LED.

Dieser Strom ist aber auch der **Kollektorstrom I_C** des Transistors. Damit dieser Strom fließen kann, ist ein bestimmter **Basisstrom I_B**, der durch den **Widerstand R1** festgelegt wird, notwendig. An R1 liegt eine Spannung von **8,3 Volt**, da die Basis-Emitter-Diode des Transistors, durch die I_B fließt, mit **0,7 Volt** zu berücksichtigen ist.

Die Berechnung ergibt für I_B einen wesentlich geringeren Strom als für I_C, nämlich nur **0,83 mA.** Das **Verhältnis** der beiden **Ströme I_C zu I_B** gibt die in dieser Schaltung eingestellte (relative) **Stromverstärkung Br** an.
Der **Faktor 40** besagt, dass 40 mal mehr **Kollektorstrom I_C als Basisstrom I_B** fließt.

Stromverstärkungsfaktor B

In der Datenliteratur ist der **Stromverstärkungsfaktor B** des Transistors **BC 547B** mit 200 - 450 angegeben. Da der Stromverstärkungsfaktor B von den im Transistor fließenden Strömen, von der Umgebungstemperatur und von den Fertigungstoleranzen abhängig ist, wählt man bei Berechnungen für Transistorschalter aus Sicherheitsgründen den **Minimalwert Bmin = 200**. Dieser Wert wird vom Hersteller unter allen Betriebsbedingungen garantiert. Die **Stromverstärkung Br** gibt dann die tatsächlich (real) in einer Schaltung eingestellte Stromverstärkung an.

Übersteuerungsfaktor Ü

In der Praxis schickt man jedoch noch **wesentlich mehr Basisstrom I_B (2 - 10 mal mehr)** in den Transistor, als vom Grenzwert gefordert wird, damit der Transistor auf jeden Fall **gut leitet** und an ihm möglichst wenig Spannung verloren geht.
Der Kollektorstrom I_C kann aber trotz höherem Basisstrom nicht mehr größer werden, da er ja durch **R2 begrenzt** wird. Man spricht in diesem Fall von **Sättigung des Transistors**.
Dieses **Zuviel an Basisstrom** bewirkt, dass die **Sättigungsspannung U_{CEsat}** auf den minimalen Wert von **0,1 Volt** fällt und der Transistor damit fast die Qualität eines geschlossenen Schalters erreicht.
Das Ausmaß der Sättigung wird durch den **Übersteuerungsfaktor Ü** angegeben und ist das Verhältnis zwischen dem minimalen Stromverstärkungsfaktor **Bmin** - beim Transistor BC 547 B eben **200** - und der tatsächlich in dieser Schaltung eingestellten Stromverstärkung **Br (40)**.

Für den **Übersteuerungsfaktor Ü** sind je nach Dimensionierungskriterien Werte von **2 - 10** üblich. Im Beispiel auf *Seite 38* hat der **Übersteuerungsfaktor Ü** den Wert **5**.

Transistor AUS - geschaltet

Berechnung ... Schalter S geschlossen

U_{BE} = 0 V ..... Transistor sperrt
I_B = 0 mA ..... LED leuchtet nicht

$$I_{R1} = \frac{U}{R1} = \frac{9\ V}{10000\ \Omega} = \mathbf{0{,}9\ mA}$$

Bei **geschlossenem Schalter S** liegt an der Basis-Emitter-Diode keine Spannung an, da der Schalter S die Basis des Transistors nach MINUS kurzschließt. (Damit der Transistor leiten kann, würde er ja an der Basis ca. 0,7 Volt Spannung benötigen.) Es kann daher **kein Basisstrom I_B** in den Transistor fließen.

Fließt kein Basisstrom, **sperrt der Transistor** und es kann auch kein Kollektorstrom fließen. Die LED ist dunkel. R1 liegt jetzt direkt über den Schalter S an der Betriebsspannung von 9 Volt. Der Strom in R1 und damit in der gesamten Schaltung beträgt daher laut Rechnung **0,9 mA**.

 Copyright J. Straßhofer

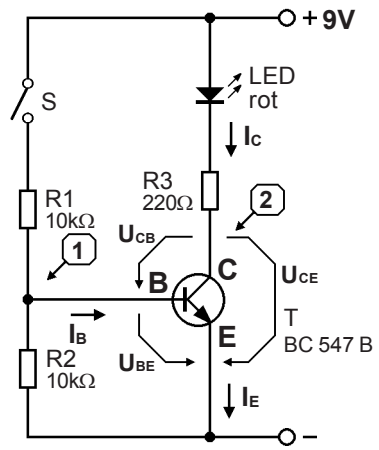


Abb. 14:
Der Transistor als Schalter

Transistor als Schalter

Bei **dieser Art des Transistorschalters** *(Abb.14)* liegt der **Schalter S** zwischen Basis und positivem Pol der Betriebsspannung (9 Volt).
Dies hat zur Folge, dass die Funktion im Gegensatz zum Transistorschalter in *Abb.12* umgekehrt wird, auch wenn der Transistor nach wie vor das Eingangssignal invertiert.
Bei **geschlossenem Schalter** fließt Basisstrom, die Leuchtdiode leuchtet. Ist der Schalter offen, kann kein Basisstrom fließen, und die Leuchtdiode bleibt dunkel. Am Messpunkt 1 liegt eine Spannung von 0,7 Volt, am Messpunkt 2 ca. 0,1 Volt.
Bei **offenem Schalter** hat der Messpunkt 1 eine Spannung von 0 Volt, Messpunkt 2 daher eine Spannung von 9 Volt.
Die beiden Transistorschaltungen *(Abb. 12 und Abb. 14)* sind sonst grundsätzlich gleich. Während jedoch bei der ersten Schaltung *(Abb. 12)* die LED leuchtet, wenn der Schalter offen ist, leuchtet sie in *Abb. 14*, wenn der Schalter geschlossen ist.
Der zusätzliche **Widerstand R2** ist für die Funktion selbst nicht von untergeordneter Bedeutung.

Berechnung ... Schalter S geschlossen

T: U_{BE} = 0,7 V LED: U_F = 1,6 V
U_{CEsat} = 0,1 V ($I_{LED} = I_{R3} = I_C$)
Bmin = 200 ($I_E = I_C + I_B$)
($I_{LED} = I_{R3} = I_C$, $I_E = I_C + I_B$)

$$I_{R3} = \frac{U_{R3}}{R3} = \frac{7{,}3V}{220\Omega} = \mathbf{33{,}18\ mA}$$

$$I_{R1} = \frac{U_{R1}}{R1} = \frac{8{,}3V}{10000\Omega} = \mathbf{0{,}83\ mA}$$

$$I_{R2} = \frac{U_{R2}}{R2} = \frac{0{,}7V}{10000\Omega} = \mathbf{0{,}07\ mA}$$

$$I_B = I_{R1} - I_{R2} = \mathbf{0{,}76\ mA}$$

$$B_r = \frac{I_C}{I_B} = \frac{33{,}18mA}{0{,}76mA} = \mathbf{43{,}66}$$

$$Ü = \frac{B_{min}}{Br} = \frac{200}{43{,}66} = \mathbf{4{,}58}$$

Berechnung der Schaltung

Ist der **Schalter S geschlossen**, so herrscht am **Meßpunkt 1** eine Spannung von **0,7 Volt**. Der Spannungsabfall über dem Widerstand R1 von 8,3 Volt (9 V - 0,7 V = 8,3 V) ergibt durch R1 einen Strom von **0,83 mA**. Parallel zur Basis- Emitter-Diode liegt der **Widerstand R2**. An ihm fällt eine Spannung von **0,7 Volt** ab, was einen **Strom I_{R2} von 0,07 mA** ergibt. Da dieser Strom zwar durch R1 fließt, aber am Transistor vorbei, verbleiben für den **Basisstrom I_B** nur mehr **0,76 mA**.

Im Vergleich zum Transistorschalter in *Abb.12* fließt bei gleichem Kollektorstrom I_C jetzt ein geringerer Basisstrom I_B. Die eingestellte **Stromverstärkung Br** ist daher etwas größer **(43,66)**, der Übersteuerungsfaktor Ü mit **4,58** somit etwas kleiner. Diese Unterschiede werden allein durch **R2** bewirkt, haben aber keinen nennenswerten Einfluss auf die Funktion der Schaltung.

Reststrom eines Transistors ... Auswirkungen und Maßnahmen

Bei dieser Beschaltung des Transistors ist für eine einwandfreie Funktion der Schaltung ein zusätzlicher **Widerstand R2** notwendig. Bei offenem Schalter fließt zwar kein Basisstrom über R1 in den Transistor, jedoch ein kleiner Reststrom von einigen **Nano-Ampere** durch die in Sperrichtung liegende **Kollektor-Basis-Diode**.
Ohne R2 würde dieser Strom in die Basis fließen und mit dem entsprechenden **Verstärkungsfaktor B** verstärkt einen **Kollektorstrom Ic** verursachen.
Dieser Strom kann sich störend auf die Funktion der Schaltung auswirken, besonders dann, wenn mehrere Transistoren zusammengeschaltet sind. **R2 hat die Aufgabe**, diesen Reststrom zum **MINUS-Pol** abzuleiten, sodass er den Transistor nicht mehr ansteuern kann. Für eine wirkungsvolle Reststrombegrenzung verwendet man in der Praxis Widerstände zwischen **1 kOhm** und **47 kOhm**. Die Größe des Widerstandes ist natürlich von der Schaltung und von der Art des Transistors abhängig.

 Copyright J. Straßhofer

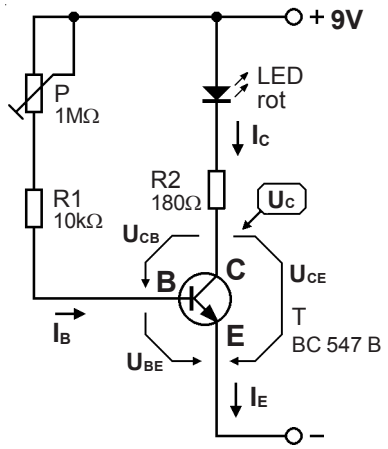


Abb. 15:
Transistor - Steuerung

Transistor - Steuerung

Der Transistorschalter kann nur **zwei Zustände** (EIN ... AUS) einnehmen. In der elektronischen Praxis ist es jedoch erforderlich, die Kollektorspannung bzw. den **Kollektorstrom** eines Transistors **stufenlos ändern** zu können und nicht auf zwei Pegel beschränkt zu sein. Eine mögliche Anwendung ist die Schaltung in *Abb.15*, mit der die **Leuchtkraft der LED** kontinuierlich mit dem **Trimmpotentiometer P** eingestellt werden kann.

Die **Kollektorspannung U_C** und der **Kollektorstrom Ic** werden somit durch Änderung des **Basisstroms I_B** gesteuert.

Funktion der Schaltung

Berechnung: Um eine Berechnung der Schaltung durchführen zu können, müssen einige **Fixwerte** für die Schleusenspannungen festgelegt werden.

Die **Schleusenspannungen** des Transistors (Basis-Emitter-Diode: U_{BE} = **0,7 Volt**) und der roten Leuchtdiode (U_F = **1,6 Volt**) sind stromabhängig. So kann bei einem sehr niedrigen Basisstrom die Spannung U_{BE} der Basis-Emitter-Diode auf ca. 0,5 Volt zurückgehen. Aus der Diodenkennlinie, die ja nicht linear ansteigt, ist dies ersichtlich.

In der Praxis allerdings sind die angenommenen Fixwerte, die bei üblicher Strombelastung gelten, für Berechnungen in der Elektronik praktisch immer ausreichend genau. Ebenso werden z.B. Toleranzen von Widerständen nicht berücksichtigt, da auf Grund derart minimaler Abweichungen keine Auswirkungen auf die Funktion der Schaltung zu erwarten sind.

Berechnung der Kollektorspannung U_C

T: U_{BE} = 0,7 V LED: U_F = 1,6 V
B = 300 (R1 + Pm = 510 kOhm)

$$I_B = \frac{U_{P/R1}}{R1+Pm} = \frac{8,3\ V}{510000\Omega} = \mathbf{16,27\ \mu A}$$

$I_C = B \cdot I_B = 300 \cdot 16,27\ \mu A =$ **4,88 mA**

($I_C = I_{R2} = I_{LED}$)

$U_{R2} = I_{R2} \cdot R2 = 0,00488\ A \cdot 180\Omega =$ **0,8788 V**

$U_C = U - U_F - U_{R2} = 9V - 1,6V - 0,8788\ V =$ **6,52 V**

Die **Kollektorspannung U_C** beträgt bei Mittelstellung des Potentiometers P **6,52 Volt**.

Zur Berechnung kann eine **beliebige Schaltungssituation** angenommen werden. In diesem Fall befindet sich das **Trimmpotentiometer P in Mittelstellung**, d.h., der **Widerstand von P** beträgt **500 kOhm**. **R1** dient dem Transistor als **Schutzwiderstand** für den Fall, dass **P auf 0 Ohm** eingestellt wird. Der gesamte eingestellte Vorwiderstand beträgt also **510 kOhm**. Der Spannungsabfall über diesen Vorwiderständen (R1 + Pm) beträgt **8,3 Volt**, der Strom somit **16,27 µA**.

Nun muss ein Mittelwert für den **Stromverstärkungsfaktor B**, der laut Datenblatt für den Transistor BC 547 B von **200 - 450** reicht, gewählt werden. **Wichtig!** Im Gegensatz zum Transistor-Schalter (Bmin = 200) **besteht bei der Transistor- Steuerung** eine unmittelbare Abhängigkeit zwischen **I_B und I_C**, sodass ein allgemein gültiger Mittelwert mit **B = 300** anzunehmen ist. Der **Kollektorstrom I_C** beträgt somit **4,88 mA**.

Dieser Strom erzeugt am Widerstand R2 einen Spannungsabfall ($U_{R2} = I_{R2} \cdot R2$) von **0,8788 Volt**. Um die Kollektorspannung U_C ermitteln zu können, zählt man die einzelnen Spannungsabfälle (U_F, U_{R2}) von der Betriebsspannung (9 Volt) weg. Somit verbleiben für den Transistor **6,52 Volt**.

Da der Emitter direkt auf MINUS liegt, ist diese **Kollektorspannung U_C** der Kollektor-Emitter-Spannung **U_{CE}** gleichzusetzen.

In gleicher Weise kann die Kollektorspannung auf Grund anderer Trimmpotentiometerstellungen (z.B.: 200 kOhm, 700 kOhm, ...) berechnet werden. **Je geringer der Basisstrom, desto geringer ist der Kollektorstrom** und **desto größer ist die Kollektorspannung. Wichtig!** Der **maximale Kollektorstrom** ist durch **R2** festgelegt.

 Copyright J. Straßhofer

Kennlinien des Transistors BC 547 B

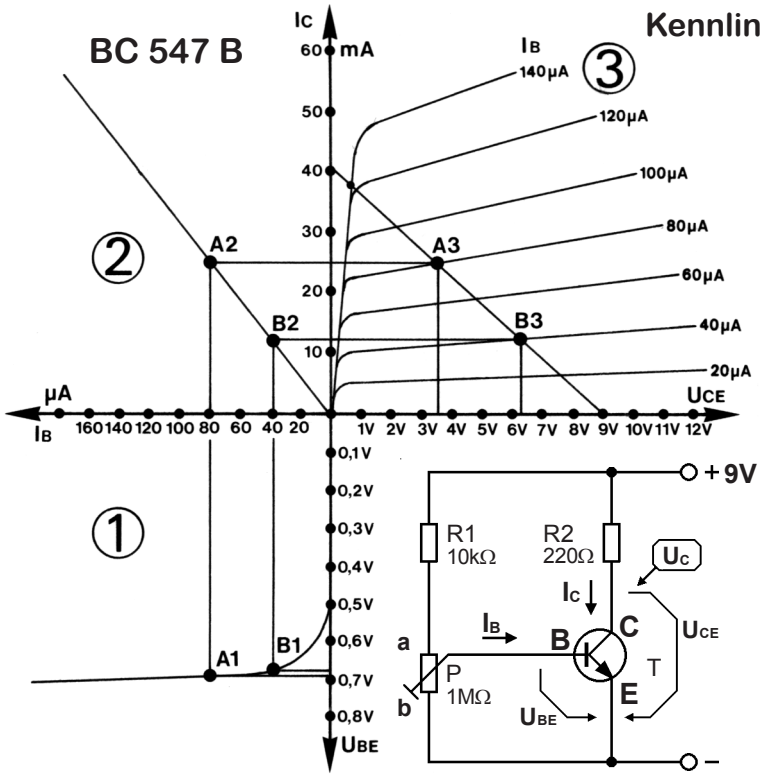


Abb. 16: **Kennlinien des Transistors BC 547 B**
Beispiel: Arbeitsgerade mit den Arbeitspunkten A und B

Kennlinien dienen dazu, mathematisch komplizierte Abhängigkeiten in übersichtlichen **bildlichen Zusammenhängen** auszudrücken.
Die Kennlinien in *Abb.16* und *Abb.17* umfassen die wesentlichen Größen des Transistors **BC 547 B**, sodass sich Berechnungen einfach nachvollziehen und überprüfen lassen.

In *Abb.16* sind die Ein- und Ausgangskennlinien zusammengefasst. Das dazugehörende **Schaltungsbeispiel** ist so ausgelegt, dass die Basis-Emitter-Spannung U_{BE} mit dem Trimmpotentiometer auf weniger als 0,7 Volt (bis 0 Volt) eingestellt werden kann. Da **unter 0,5 Volt kein Basisstrom** mehr fließt, wird erreicht, dass im Gegensatz zur Transistor-Steuerung in *Abb.15* der Transistor mit dem Potentiometer P vollkommen gesperrt werden kann.

Im **Sektor 1** ist die Eingangskennlinie (**I_B** und **U_{BE}**) der Basis-Emitter-Diode dargestellt. Den Zusammenhang zwischen Basisstrom **I_B** und Kollektorstrom **I_C** (Stromverstärkungsfaktor B) zeigt die nahezu **gerade Linie** im **Sektor 2**. Das Ausgangskennlinienfeld im **Sektor 3** zeigt die Beziehung zwischen Kollektor-Emitter-Spannung **U_{CE}** und dem Kollektorstrom **I_C**. Die bereits im Sektor 1 angeführten Basisströme sind zur besseren Orientierung nochmals eingezeichnet.
Die **Arbeitsgerade** bezieht sich konkret auf die abgebildete Schaltung. Sie ist einfach zu ermitteln. Wenn der Transistor sperrt, beträgt die Spannung **U_{CE} 9 Volt**. Würde sich nur der Widerstand R2 im Stromkreis befinden, würde ein Strom von **40,9 mA** fließen. Somit sind die **beiden Endpunkte** der Arbeitsgeraden festgelegt.

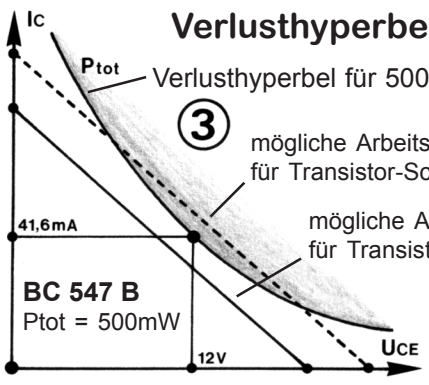


Abb. 17:

Ausgehend vom **Sektor 1** können nun einzelne Schaltungszustände verfolgt werden. Der eingangsseitige **Arbeitspunkt A1** wird durch die Basis-Emitter-Spannung **U_{BE}** (ca. **0,69 Volt**) bzw. durch den Basisstrom **I_B** (**80 µA**) festgelegt. Im **Sektor 2** (A2) kann mit dem bekannten **Basisstrom I_B** der **Kollektorstrom I_C** (ca. **24 mA**) gefunden werden.
Durch die Lage des **Punktes A3** auf der ausgangsseitigen Arbeitsgeraden im **Sektor 3** wird die Kollektor-Emitter-Spannung **U_{CE}** (ca. **3,7 Volt**) festgelegt.
Der **Arbeitspunkt B** (B1, B2, B3) stellt eine weitere Schaltungssituation dar. Auch der Weg zurück - ausgehend von einer beliebigen Ausgangsspannung - ist möglich. Eine Transistorschaltung kann so auf einfache Weise durch Einzeichnen der Arbeitsgeraden und der Arbeitspunkte „berechnet“ werden.

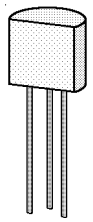
Auf Grund des **Aufbaus** (Baugröße, Kühlung, Halbleiter) ist der Transistor nur für eine **bestimmte Maximalleistung Ptot (BC 547 B ... 500 mW)** ausgelegt.
Berechnung: **$P_{tot} = U_{CE} \cdot I_C + U_{BE} \cdot I_B = U_{CE} \cdot I_C$**
Mit dieser Formel kann die **Verlusthyperbel** *(Abb.17)* einfach berechnet werden. Der **Arbeitspunkt** des Transistors darf sich **nicht innerhalb der Verlusthyperbel** befinden, d.h., die Arbeitsgerade darf die Verlusthyperbel nicht schneiden. Eine Ausnahme ist der **Transistor-Schalter**, der auf Grund seiner zwei Zustände (EIN ... AUS) die Arbeitsgerade blitzartig durchläuft und praktisch nicht in der verbotenen Zone verweilt.

 Copyright J. Straßhofer

BC 547 B mit Familie

Der Kleinsignaltransistor **BC 547 B** ist zusammen mit dem Komplementär-Transistor **BC 557 B** der am meisten verwendete Standard-Transistor der Industrie- und Hobby-Elektronik. (Komplementär-Transistoren sind NPN- und PNP-Typen mit etwa gleichen Daten.) Zur **Familie** gehören Transistoren mit ähnlichen Bezeichnungen und Daten:

NPN: BC 546 B, BC 547 B, BC 548 B, BC 549 B, BC 550 B
PNP: BC 556 B, BC 557 B, BC 558 B, BC 559 B, BC 560 B
Sie können mit wenigen Ausnahmen füreinander verwendet werden (z.B.: BC 547 B für BC 548 B).



Grenzdaten BC 547 B

Kollektor-Basis-Spannung	U_{CBO}	50 V
Kollektor-Emitter-Spannung	U_{CEO}	45 V
Emitter-Basis-Spannung	U_{EBO}	6 V
Basisstrom	I_B	50 mA
Kollektorstrom	I_C	100 mA
Verlustleistung	Ptot	500 mW
Sperrschichttemperatur	Tj	175 °C

BC 548 B und BC 549 B	BC 546 B
U_{CBO} = 30 V	U_{CBO} = 80 V
U_{CEO} = 30 V	U_{CEO} = 65 V

(Alle anderen Daten wie BC 547 B.)

Stromverstärkung

Der letzte Buchstabe bei der Transistorkennzeichnung gibt den **Stromverstärkungsfaktor B** an. Zu jeder Nummer eines Transistors (z.B. BC 547) gibt es in der Regel 1 - 4 verschiedene Verstärkungstypen (A, B, C, 6, 10, 16, ...).

BC 547 6 ····· B = 110 (75 - 150)
BC 547 A ····· B = 180 (110 - 220)
BC 547 B ····· B = 300 (200 - 450) Standard!
BC 547 C ····· B = 500 (420 - 800)

Wichtig! Beim Stromverstärkungsfaktor ist der **B-Typ** - Siehe BC 547 B! - ein gewisser Standard. In Schaltungen können Probleme auftreten, wenn ein Transistor mit zu niedrigem Verstärkungsfaktor verwendet wird (z.B. BC 547 A für einen BC 547 B). Weitere Transistoren .... **Siehe Datenliteratur!**

Transistoren für die Hobby-Praxis

In der einschlägigen **Datenliteratur** sind Tausende verschiedene Transistoren verzeichnet. Die **elektronische Praxis** zeigt jedoch, dass - mit wenigen Ausnahmen - eine geringe Anzahl von Standard-Typen zum Bau üblicher elektronischer Schaltungen genügt. Auch in der Fachliteratur kommen fast immer dieselben Transistoren - bestenfalls Vergleichstypen - vor.

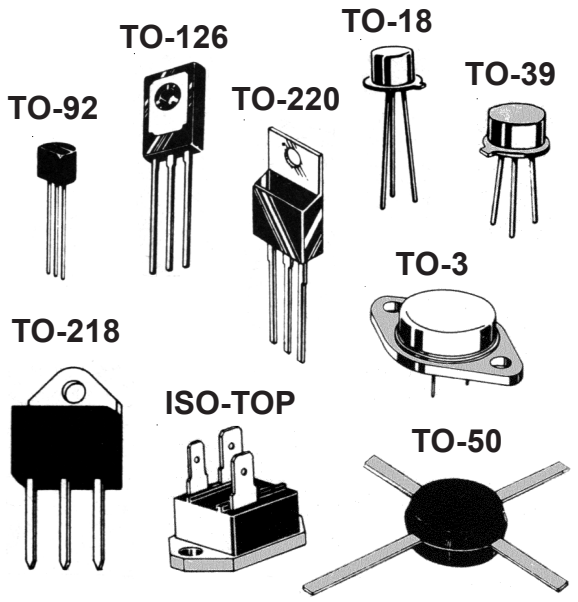
NPN:	**PNP:**
BC 547 B	BC 557 B
BC 337-25	BC 327-25
BD 139-16	BD 140-16
2N 3055	

Bei Bedarf nach besonderen Transistortypen ist es sinnvoll, sich nicht immer an die im Schaltplan vorgegebenen Transistoren zu halten, sondern in der Datenliteratur nach gängigen **Vergleichstypen**, die oft billiger sind, zu suchen.

Allgemeine Transistorbezeichnungen

1) **Europäische Transistortypen**
   1. **Buchstabe:** Ausgangsmaterial
      A ... Germanium (Ge)
      B ... Silizium (Si)
   2. **Buchstabe:** Verwendung
      C ... NF-Transistor
      D ... NF-Leistungstransistor
      F ... HF-Transistor
      L ... HF-Leistungstransistor
      S ... Schalttransistor
      U ... Leistungsschalttransistor
   3. **Ziffern** (+ Buchstabe oder Ziffern)
2) **Amerikanische Transistortypen**
   2N + Ziffern
3) **Japanische Transistortypen**
   2S + Buchstabe + Ziffern

Gehäuseformen von Transistoren



 Copyright J. Straßhofer

Bistabile Kippstufe

Diese einfachste Kippstufe zeichnet sich durch **2 stabile** (= bistabil) **Zustände** aus.

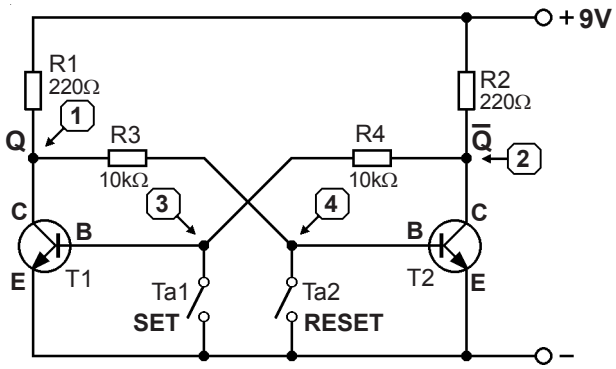
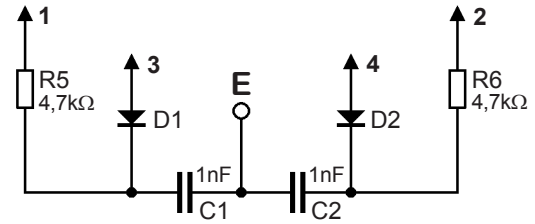


Abb. 1: **Bistabile Kippstufe (Flip - Flop)**

Bistabile Kippstufen besitzen **zwei Eingänge - SET (3) und RESET (4)** - und **zwei Ausgänge - Q (1) und $\overline{Q}$ (2)**. Sie bestehen aus **zwei Transistorschaltern**, die sich gegenseitig beeinflussen. Der Eingang (Basis) des einen Transistors ist jeweils über einen Strombegrenzungswiderstand (R3 bzw. R4) mit dem Ausgang (Kollektor) des anderen Transistors verbunden.

Beschreibung der Funktion

Wird die Taste **SET** gedrückt, so liegt Punkt 3 und damit die **Basis von T1 auf 0 Volt**. **T1 sperrt** daher, was zur Folge hat, dass am **Punkt 1** eine Spannung von fast **9 Volt** herrscht. Genau 9 Volt sind es deshalb nicht, weil die Spannung am Punkt 1, wenn T1 sperrt, vom Spannungsteiler R1 und R3 - und von der Basis-Emitter-Diode von T2 - bestimmt wird, wobei R3 wesentlich größer als R1 anzunehmen ist.
Über **R3** wird somit die **Basis von T2 positiv angesteuert** ... **T2 leitet**, und seine Kollektorspannung (Punkt 2) beträgt ca. **0,1 Volt**.
Auch nach dem **Öffnen** des Tasters **SET** bleibt dieser **Zustand erhalten**, da die Basis von T1 über R4 maximal eine Spannung von **0,1 Volt** erhalten kann.
Der **Signal-Zeit-Plan** in *Abb.2* zeigt diesen geringen Spannungssprung von **0 Volt** (Taster SET gedrückt) auf **0,1 Volt** (Taster SET geöffnet).



Schaltungserweiterung für die bistabile Kippstufe

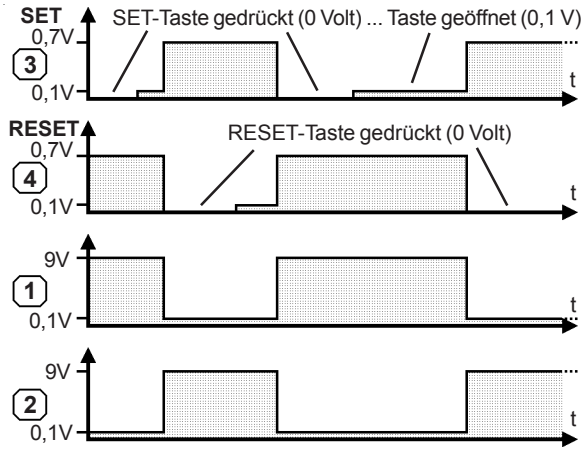
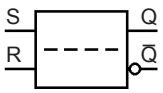


Abb. 2: **Signal-Zeit-Plan:**
Die Tastimpulse (0 Volt am Punkt 3 oder 4) sind beliebig gewählt. SET und RESET dürfen nicht gleichzeitig gedrückt werden, da der auftretende Zustand logisch widersprüchlich und der nachfolgende unbestimmt ist.



Schaltzeichen
einer bistabilen Kippstufe

An den anderen Meßpunkten tritt auch dann keine Spannungsänderung auf, wenn die SET-Taste mehrmals hintereinander gedrückt wird. Der jeweilige Schaltzustand (SET oder RESET) bleibt immer erhalten **(gespeichert)**.
Wird nun die **RESET**-Taste gedrückt, so kippt die Schaltung schlagartig **in den zweiten stabilen Zustand**. Der durch SET ausgelöste Schaltungszustand wird durch RESET also widerrufen. Da die **Schaltung symmetrisch** aufgebaut ist, entsprechen die Spannungen nach dem RESET spiegelbildlich dem SET-Zustand.

Der **Signal-Zeit-Plan** in *Abb.2* zeigt die genauen **Pegelverhältnisse** in der Kippstufe.
Die Dimensionierung der Bauelemente orientiert sich am Transistorschalter.

Die Grundschaltung der bistabilen Kippstufe kann durch Beschaltung mit den Bauelementen R5, R6, C1, C2, D1 und D2 so erweitert werden, dass nur **ein einziger Eingang E** genügt, um die Schaltung kippen zu lassen. Dies geschieht durch einen **negativen Impuls** an der jeweiligen Basis des Transistors. Diese Form der Schaltung wird als bistabile Kippstufe mit **dynamischem Eingang** bezeichnet.

 Copyright J. Straßhofer

Monostabile Kippstufe

Eine monostabile Kippstufe besitzt **einen stabilen** Zustand **(= monostabil)** und einen **nicht stabilen** Zustand. Sie kippt auf Tastendruck vom stabilen in den nicht stabilen Zustand und fällt **selbständig** nach einer vorgegebenen Zeit - abhängig von den verwendeten Bauelementen - wieder **in den Ausgangszustand** zurück. Ein typischer Vertreter dieser Schaltungsfunktion ist der **Timer**.

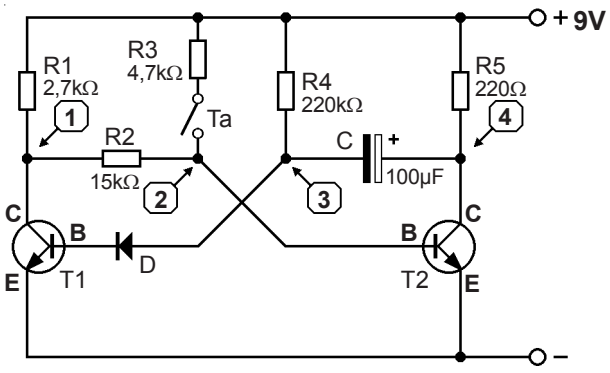


Abb. 3: **Monostabile Kippstufe (Monoflop)**

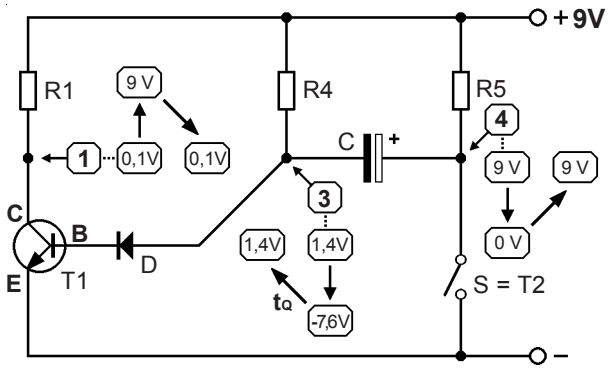


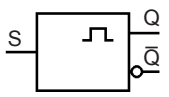
Abb. 4: **Ankopplung über Kondensator**

Beschreibung der Funktion

Eine monostabile Kippstufe *(Abb.3)* besteht aus **zwei Transistorschaltern (T1 und T2)**, wobei der rechte Transistorschalter T2 gleichstrommäßig über den Widerstand R2 vom Ausgang des Transistors T1 (Messpunkt 1) abhängig ist. Transistorschalter T1 ist über den **Kondensator C** mit dem Ausgang von T2 (Messpunkt 4) wechselstrommäßig verbunden. Die *Abbildung 4* zeigt diese zeitbestimmende wechselstrommäßige Kopplung.

Von einer **wechselstrommäßigen Kopplung** spricht man dann, wenn nur Wechselstrom bzw. eine Stromänderung von einem Schaltungsteil zu einem anderen übertragen wird. Diese Verbindung läßt keinen Gleichstrom durch, wie dies beim Kondensator C in dieser Schaltung der Fall ist.
Zum besseren Verständnis ist in *Abbildung 4* jener Schaltungsteil herausgezeichnet, der wesentlich für die **Funktion der monostabilen Kippstufe** verantwortlich ist. Die einzelnen Spannungen an den Messpunkten 1, 3 und 4 sind in ihrem **zeitlichen Ablauf** angegeben.

Bei **offenem Schalter S** *(Abb. 4)* - er entspricht im Monoflop *(Abb.3)* dem Transistor T2 - stellt sich am **Punkt 3** eine Spannung von **1,4 Volt** (Spannungsabfälle von Diode D und der Basis-Emitter-Diode von T1) ein. Am **Punkt 4** liegt die Betriebsspannung von **9 Volt** an. Der Transistor T1 wird somit über R4 angesteuert, er leitet deshalb und seine Kollektorspannung beträgt daher 0,1 Volt (Messpunkt 1).



Schaltzeichen
einer monostabilen Kippstufe

Der **Kondensator C** ist auf eine Spannung von **7,6 Volt** aufgeladen. Dieser Zustand bleibt stabil, bis dass der Schalter S geschlossen wird. Dann fällt die **Spannung am Messpunkt 4 schlagartig** von **9 Volt** (H - Pegel) auf **0 Volt** (L - Pegel). Da sich die **Ladung eines Kondensators** und damit seine Spannung **nie sprunghaft ändern kann**, fällt die Spannung am Meßpunkt 3 im ersten Augenblick auch um 9 Volt auf **- 7,6 Volt**. Der Transistor **T1** wird somit **gesperrt**, und seine Kollektorspannung (Punkt 1) steigt von 0,1 Volt (L - Pegel) schlagartig auf fast 9 Volt (H - Pegel).
Vor **zu hoher negativer Spannung** an der Basis - in diesem Fall **- 7,6 Volt** - wird der Transistor geschützt, indem man die **Diode D** vorschaltet.
Der **Kondensator C** beginnt sich nun über den Widerstand R4, der relativ groß dimensioniert ist, zu entladen. Die **Spannung am Punkt 3** steigt von **- 7,6 Volt auf + 1,4 Volt** nach einer **e - Funktion** (Kurve)**.** Siehe dazu die *Abbildung 5!*

Verweilzeit der Schaltung

Die **Zeit** für die Entladung des Kondensators wird nach der Formel $\mathbf{t_Q = 0,7 \cdot R4 \cdot C}$ berechnet. Dann leitet der Transistor T1 wieder, da er an der Basis positives Signal erhält. Für die Zeit t_Q war also T1 gesperrt. Diese Zeit (Punkt 1 auf H - Pegel) wird als **Verweilzeit** bezeichnet.

 Copyright J. Straßhofer

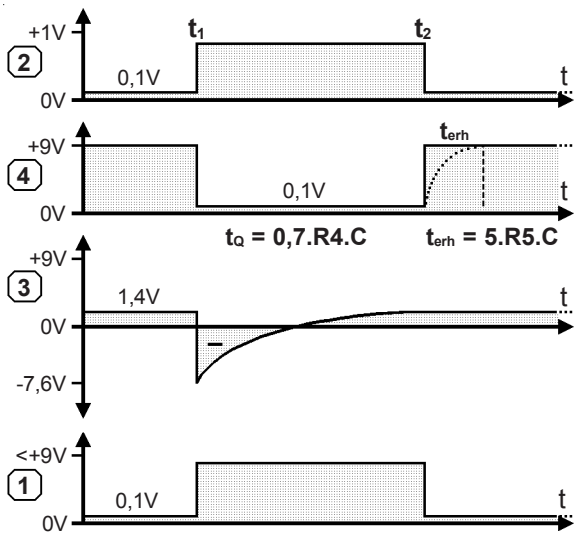


Abb. 5: **Monoflop (Signal-Zeit-Plan)**

Unter der **Verweilzeit t_Q** versteht man also jene Zeit, in der die Schaltung im **instabilen Zustand** ist. Nach Ablauf dieser Zeit fällt sie selbständig wieder in den stabilen Zustand zurück.
Mit positivem Signal an der Basis des Transistors T1 fällt nun auch dessen Kollektorspannung wieder auf **0,1 Volt** wie vor dem Drücken des Tasters. Am **Kondensator C** liegt nun eine geringe **negative Spannung von - 1,4 Volt**. Der Kondensator ist also zu diesem Zeitpunkt **verkehrt gepolt**. Eine geringe negative Spannung von - 1,4 Volt schädigt ihn allerdings nicht.

Erholzeit der Schaltung

Wird der Schalter S geöffnet, lädt sich der Kondensator sehr schnell - da R5 klein ist - wieder positiv auf 7,6 Volt auf. Diese **Erholzeit** ist zwar kurz, spielt aber bei der praktischen Verwendung von Monoflops eine wichtige Rolle.
Die Formel für die Berechnung lautet für diese Schaltung: **t_{erh} = 5 . R5 . C**. Damit ist der Ausgangszustand der Schaltung vor dem Schließen des Schalters S erreicht; es herrschen wieder dieselben Anfangsbedingungen.

Grundschaltung des Monoflops

In der Grundschaltung des Monoflops *(Abb.3)* wird der **Schalter S** durch den **Transistor T2** ersetzt. Da im stabilen Zustand der Kollektor von T1 (Messpunkt 1) eine Spannung von **0,1 Volt** aufweist, liegt die Basis von T2 über R2 ebenfalls auf **0,1 Volt**. **T2 sperrt** also, und somit beträgt dessen Kollektorspannung (Punkt 4) 9 Volt.

Auslösen der Verweilzeit

Wird jetzt der **Taster Ta** gedrückt und somit die Timerfunktion gestartet, so erhält die **Basis von T2** positives Signal, der Transistor steuert durch, und seine Kollektorspannung fällt auf **0,1 Volt**.
Auch wenn der **Taster wieder geöffnet** wird, steuert T2 weiter durch, da dessen Basis jetzt über die Widerstände R1 und R2 angesteuert wird.
Der Transistor T1 ist gesperrt, da am Messpunkt 3 eine Spannung von anfangs **- 7,5 Volt**, die entsprechend der Verweilzeit t_Q nur langsam steigt, herrscht. Die Sättigungsspannung von T2 ist mit **0,1 Volt** berücksichtigt, weshalb die maximale negative Spannung jetzt im Gegensatz zur Schaltung in *Abbildung 4* nur **- 7,5 Volt** beträgt.

Ende der Verweilzeit

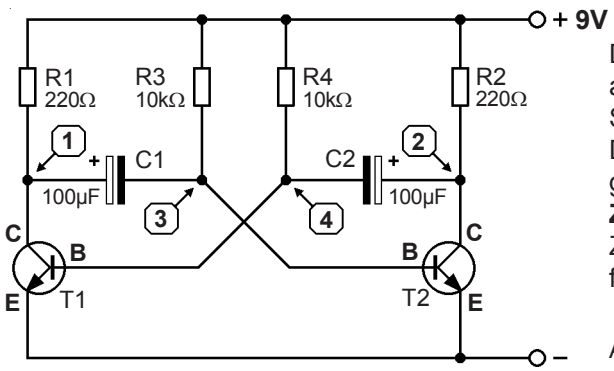
Erreicht der Kondensator C am Punkt 3 wieder **1,4 Volt** positive Spannung, wird T1 wieder angesteuert, er leitet und seine **Kollektorspannung** fällt somit schlagartig auf **0,1 Volt**. Über den Widerstand R2 wird nun T2 gesperrt. Dessen Kollektorspannung steigt, da sich über R5 der Kondensator C wieder auf 7,6 Volt entsprechend der **Erholzeit t_{erh}** auflädt.

In *Abbildung 5* sind die **Spannungsverläufe** für das Monoflop in zeitlich richtiger Zuordnung dargestellt. Die Erholzeit t_{erh} wurde dabei stark gedehnt gezeichnet.

Dimensionierung der Schaltung

Grundsätzlich gelten beim Monoflop dieselben Regeln wie beim **Transistorschalter**. Es ist allerdings besonders zu beachten, dass **T2** über die Widerstände R1 und R2 **ausreichend Basisstrom** zur Übersteuerung erhalten muss.
Die **Zeitkonstante t_Q** (Verweilzeit) kann in weiten Bereichen durch den **Kondensator C** und den **Widerstand R4** bestimmt werden. Für den Widerstand R4 ist allerdings eine gewisse Obergrenze festgelegt, da über ihn ausreichend Basisstrom für T1 fließen muss.
In der **Praxis**, wenn es auf **längere Verweilzeiten** ankommt, wird man mit einer derart einfachen Schaltung nicht mehr das Auslangen finden. Insbesondere dann, wenn es auf große Wiederholgenauigkeit ankommt, z.B. bei Timern für die Belichtungszeit (Fotografie) etc., werden integrierte **Timer-ICs** verwendet.

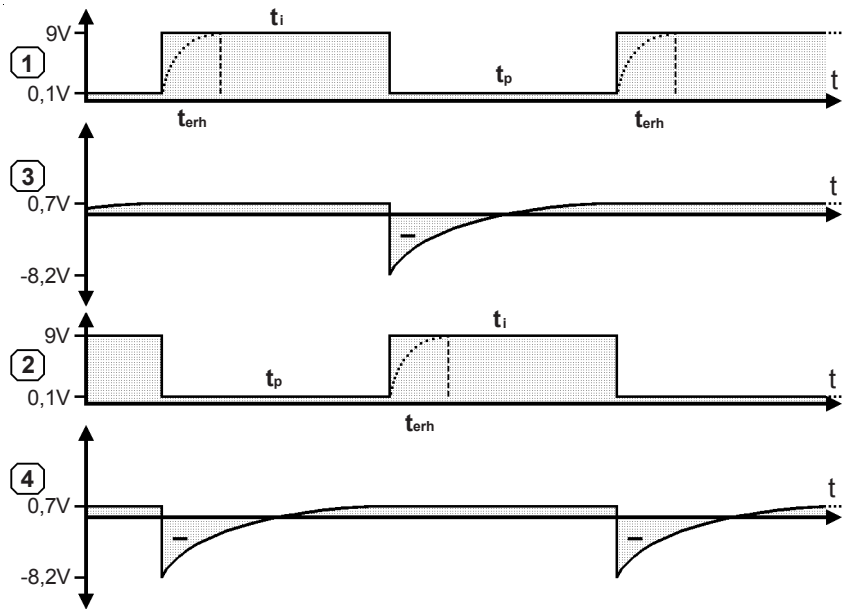
 Copyright J. Straßhofer



Astabiler Multivibrator

Der astabile Multivibrator (astabile Kippstufe) ist aus **zwei Transistorschaltern** aufgebaut. Die Schaltung ist komplett **symmetrisch**.
Der astabile Multivibrator - auch Vielfachschwinger genannt - kennt **keinen stabilen (= astabil) Zustand**, sondern wechselt ständig zwischen zwei Zuständen. Er wird deshalb auch als Signalgenerator für unterschiedliche Frequenzen verwendet.

Abb. 6: **Astabiler Multivibrator (AMV)**



Schaltzeichen einer astabilen Kippstufe

Abb. 7:
Astabiler Multivibrator Signal-Zeit-Plan

Beschreibung der Funktion

Der astabile Multivibrator gehört zur Familie der **Rechteckgeneratoren** und wird auf Grund seiner Funktion auch als **Kippstufe** bezeichnet.
Er besteht aus **zwei gleichartig aufgebauten Transitorschaltern** (T1, R1, R4 und T2, R2, R3), die **wechselstrommäßig** über die Kondensatoren C1 und C2 miteinander verbunden sind *(Abb. 6)*.
Beide Transistorschalter sind so dimensioniert, dass die jeweiligen Transistoren T1 und T2 bei fehlenden Kondensatoren voll leiten würden. In Kombination mit den Kondensatoren ergibt sich aber eine Kippstufe, in der sich **beide Transistorschalter gegenseitig steuern**.
Wenn ein Transistor leitet, sperrt er den anderen und umgekehrt. An beiden **Ausgängen** (Messpunkt 1 und 2) ändert sich somit ständig die Spannung. Es liegt eine **Wechselspannung** an, die nahezu rechteckförmig ist.

Da die astabile Kippstufe **keinen stabilen Zustand** einnimmt, muss man bei der Beschreibung der Funktion der Schaltung von einem Augenblickszustand ausgehen.
Wird der Multivibrator an die Betriebsspannung (9 Volt) gelegt, so läuft zunächst ein kurzer **Einschwingvorgang** ab. Angenommen, T1 ist gerade leitend geworden (Basisspannung von ca. 0,7 Volt), dann befindet sich das Potential an seinem Kollektor (Punkt 1) und damit auch der positive Anschluss von C1 auf ca. 0,1 Volt (Sättigungsspannung) über dem negativen Potential *(Abb. 7)*.
Da T2 gleichzeitig sperrt, wird C2 über den relativ kleinen Widerstand R2 auf 8,3 Volt aufgeladen.
Warum sperrt T2?
Ein kurzer Rückblick: Während T1 gesperrt war, wurde C1 über den Widerstand R1 auf ca. 8,3 Volt (9 V- 0,7 V = 8,3 V) geladen.

 Copyright J. Straßhofer

Nun ist aber T1 leitend geworden und seine Kollektorspannung von 9 Volt schlagartig auf 0,1 Volt gefallen. Dieser **Spannungssprung** wird über C1 auf die Basis von T2 übertragen, und zwar deshalb, weil sich der Kondensator C1 nicht schlagartig, sondern nach einer e - Funktion langsam entlädt.

Im **ersten Augenblick** fällt die Spannung am Punkt 3 sogar auf **- 8,2 Volt**, da C1 auf 8,3 Volt (0,1 Volt beträgt die Sättigungsspannung von T1) aufgeladen war. Solange in die Basis von T2 kein Strom fließt, sperrt T2. Über R3 wird C1 nun langsam entladen (umgeladen), bis sich der negative Anschluss von C1 (Punkt 3) auf ca. 0,7 Volt befindet.

Die Polarität von C1 ist zwar dann kurzzeitig vertauscht, was aber Elektrolytkondensatoren klaglos hinnehmen. Eine Spannung von 0,7 Volt an der Basis von T2 bewirkt, dass das Kollektorpotential von T2 (Punkt 2) schlagartig von fast 9 Volt auf 0,1 Volt fällt. Dieser Spannungssprung wird auf die Basis von T1 übertragen, weshalb T1 jetzt sperrt. Über R1 wird nun C1 wieder relativ schnell geladen über R4 der Kondensator C2 entladen, bis der negative Anschluss von C2 wieder auf 0,7 Volt liegt.

Die beschriebenen **Vorgänge wiederholen sich selbsttätig** und ohne Beeinflussung von außen, wodurch sich der Begriff des astabilen Multivibrators erklärt.

Formeln zur Frequenzberechnung des astabilen Multivibrators

Symmetrischer Multivibrator

$$f = \frac{1}{1{,}4 \cdot R \cdot C}$$

R = R3 = R4
C = C1 = C2

Asymmetrischer Multivibrator

$$f = \frac{1}{0{,}7 \cdot (R3 \cdot C1 + R4 \cdot C2)}$$

Dimensionierung des astabilen Multivibrators

Die Vorwiderstände R3 und R4 an der Basis der Transistoren ergeben sich aus dem geforderten Strom in den Kollektorwiderständen, wobei eine gute Übersteuerung der Transistoren (ca. 5-fach oder mehr) nicht schadet. Wenn z.B. LED eingebaut sind, ist der Strom bereits vorgegeben.

Symmetrischer Multivibrator

Üblicherweise sind derartige Multivibratoren symmetrisch aufgebaut; d.h., der Widerstandswert von R3 ist gleich dem von R4, R1 gleich dem von R2. Die Kapazität des Kondensators C1 entspricht der von C2. Die **Impulszeit ti** ist dann genau so lang wie die **Pausenzeit tp** *(Abb. 7)*.

Frequenz der Kippstufe

Die **Frequenz f** der Kippstufe hängt von der Entladezeitkonstanten, die sich aus **R3 . C1** bzw. **R4 . C2** ergibt, ab. Siehe dazu die Formeln! Unterschiedliche Betriebsspannungen beeinflussen die Frequenz kaum. Von untergeordneter Bedeutung für die Funktion ist die Ladezeitkonstante bzw. **Erholzeit t_{erh} (t_{erh} = 5 . R1 . C1 bzw. 5 . R2 . C2)**. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Entladezeitkonstante mindestens **5 mal so lange** dauert wie die Ladezeitkonstante, damit eine vollständige Ladung der Kondensatoren gewährleistet ist. Die Ladezeitkonstante bzw. Erholzeit ist auch dafür verantwortlich, dass die Ausgangsspannung am Kollektor (Punkt 1 bzw. 2) nur **annähernd Rechteckform** erreicht.

Asymmetrischer Multivibrator

Beim asymmetrischen Multivibrator ergeben sich auf Grund anderer Bauelementegrößen verschiedene Impuls- und Pausenzeiten, wie sie oft bei Impulsgeneratoren (Tongenerator) benötigt werden.

Dioden als Schutz

In vielen astabilen Multivibratoren sind an der jeweiligen Basis der Transistoren **Dioden** eingebaut. Sie stehen zwar mit der Funktion des Multivibrators in keinem unmittelbaren Zusammenhang, haben aber die Aufgabe, die Transistoren **vor negativer Basis-Emitter-Spannung zu schützen**.
Bei 9 Volt Betriebsspannung beträgt diese am Kondensator auftretende negative Spannung immerhin kurzfristig - 8,2 Volt. Ab 12 Volt Betriebsspannung sind diese Schutzdioden auf jeden Fall erforderlich.

 Copyright J. Straßhofer

Schmitt - Trigger

Beim Schmitt - Trigger handelt es sich um einen **Schwellwertschalter**, der auf Grund einer sich ändernden Eingangsspannung die Ausgangsspannung bei einem gewissen Schwellwert ein- bzw. ausschaltet.

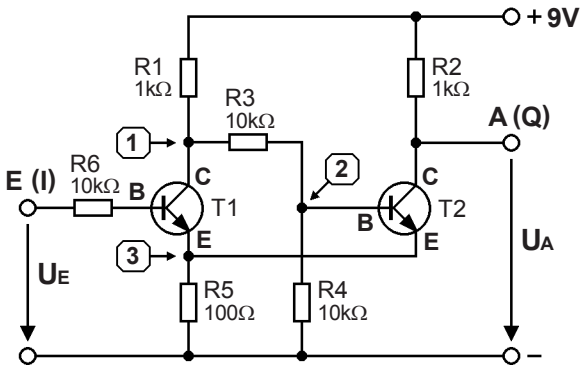


Abb. 8: **Schmitt - Trigger**

Beschreibung der Schaltung

Ein Schmitt -Trigger besteht grundsätzlich aus **zwei Transistorschaltern** *(Abb. 8)*, die miteinander **gekoppelt** sind (**T1 sperrt - T2 leitet** oder **T1 leitet - T2 sperrt**).

Beim **Überschreiten** einer bestimmten **Eingangsspannung U_E** kippt die Schaltung in den Arbeitszustand, beim **Unterschreiten** einer bestimmten Eingangsspannung U_E kippt der Schmitt-Trigger wieder in den Ruhezustand zurück. Der Schmitt-Trigger wird deshalb auch als **Schwellwertschalter** bezeichnet. Wesentlich dabei ist, dass das **Umschalten** von einem Zustand in den anderen **sprunghaft** vor sich geht. Es gibt deshalb nur die **beiden stabilen Zustände EIN und AUS**.
Bei einem beliebigen Verlauf der Eingangsspannung U_E hat somit die Ausgangsspannung U_A immer einen rechteckförmigen Verlauf, wobei der jeweilige Schaltzustand von der Eingangsspannung U_E abhängt *(Abb. 9)*.

Funktion des Schmitt-Triggers

Wird die Schaltung in *Abb. 8* an die Betriebsspannung (9 Volt) angeschlossen und die **Eingangsspannung U_E** auf **0 Volt** eingestellt, so ergibt sich folgender Zustand:
Transistor T1 sperrt, da die zum Leiten erforderliche Basis-Emitter-Spannung U_{BE} nicht vorhanden ist und daher kein Basisstrom I_B fließen kann.

Auch wenn sich die Eingangsspannung nur allmählich ändert, erfolgt das Schalten schlagartig.
Ein typischer Anwendungsfall für den Schmitt - Trigger ist der **Dämmerungsschalter**.

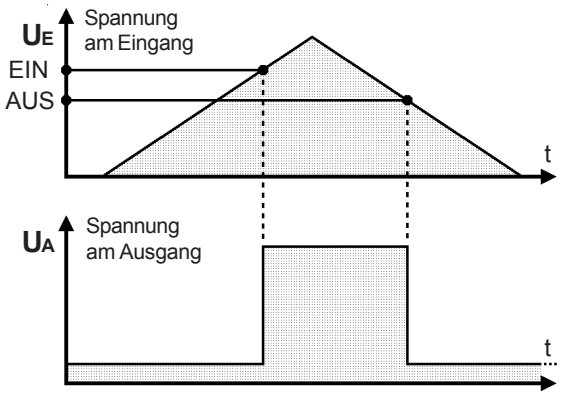
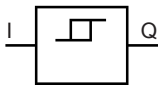


Abb. 9: **Abhängigkeit zwischen Eingangsspannung U_E und Ausgangsspannung U_A**



Schaltzeichen eines Schmitt-Triggers

Der Transistor **T2** erhält somit über R1 und R3 Basisstrom und **leitet**. Über den Widerstand R2 und R5 fließt der Kollektorstrom von T2; an R5 fällt somit eine geringe Spannung ab (U = I.R). Da T2 leitet, liegt am Ausgang eine um etwa 0,1 Volt höhere Spannung U_A als am Emitter von T2 (Punkt 3) an. Da **beide Emitter direkt miteinander** verbunden sind, erfolgt über den Emitterwiderstand R5 eine **Kopplung der beiden Transistoren**.

Die Spannung steigt.

Steigt nun die Eingangsspannung U_E von 0 Volt ausgehend, so ändert sich zunächst nichts. In der Nähe des **Schwellwertes U_{EIN}** aber beginnt T1 ein wenig zu leiten, während T2 immer noch leitet.
Auf Grund des **zusätzlichen Kollektorstroms** von T1 steigt jedoch die Spannung an R5 (und damit am Punkt 3) geringfügig an.
Diese Erhöhung der Emitterspannung wirkt dem Umschalten entgegen, da die Basis-Emitter-Spannung von T1 nicht merklich größer wird, wenn die Spannung am Emitter von T1 und somit auch am Emitter von T2 der Eingangsspannung folgt.

 Copyright J. Straßhofer

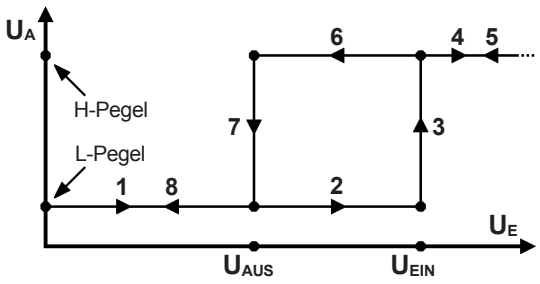


Abb. 10: Idealisierte **Übertragungskennlinie** eines Schmitt-Triggers:
Die Ziffern stehen für den zeitlichen Ablauf einer zuerst ansteigenden und dann absinkenden Eingangsspannung U_E

Steigt die **Eingangsspannung U_E** nun weiter an, so vermindert sich die Kollektorspannung von T1 (Punkt 1) immer mehr; so lange, bis dass der Basisstrom von T2 geringer wird und somit auch der Kollektorstrom von T2. Die Zunahme des Kollektorstroms von T1 ist jetzt geringer als die Abnahme des Kollektorstroms von T2.

Der Kippvorgang setzt ein.

Nun setzt der Kippvorgang, der bedingt durch die Mitkopplung **sehr schnell** vor sich geht, ein. Die Basis-Emitter-Spannung von T1 vergrößert sich, da ja durch die Abnahme des Kollektorstroms (Summe von T1 und T2) die **Spannung über R5 sinkt**. Folglich leitet T1 immer mehr, und seine Kollektorspannung (Punkt 1) sinkt noch weiter ..... T2 leitet noch weniger.
Infolge dieser doppelten Wirkung (U_{BE} von T1 wird größer, U_{BE} von T2 wird kleiner) kommt es zum **plötzlichen Kippen der Schaltung** bei Überschreiten des Schwellwertes U_{EIN}. Nun leitet T1, und dessen Sättigungsspannung von ca. 0,1 Volt zwischen Punkt 1 und 3 schließt den Transistor T2 kurz .... T2 sperrt folglich. Am **Ausgang A** liegt somit die Betriebsspannung von 9 Volt an **(H-Pegel)**. Dieser Zustand bleibt erhalten, solange die Eingangsspannung U_E größer ist als der Schwellwert U_{AUS}. Die Übertragungskennlinie in *Abb. 10* zeigt die einzelnen Spannungspegel.

Die Spannung sinkt.

Sinkt nun die Eingangsspannung U_E, so vermindert sich in der Nähe des Schwellwertes U_{AUS} die Basis-Emitter-Spannung von T1 ... sein Kollektorstrom sinkt und folglich sinkt auch der Spannungsabfall am Widerstand R5.

Auch in diesem Fall wirkt dieser Vorgang vorerst dem Kippen der Schaltung entgegen. Bei weiterem Vermindern von U_E beginnt ab einem bestimmten Punkt, der von der Übersteuerung von T1 abhängig ist, die Kollektorspannung U_C von T1 zu steigen. T2 erhält Basisstrom ... folglich fließt auch Kollektorstrom durch T2. Dieser Strom erhöht den Spannungsabfall an R5 ..... der Kippvorgang setzt ein. Eine höhere Spannung an Punkt 3 vermindert U_{BE} von T1. U_C von T1 steigt weiter ... T2 erhält noch mehr Basisstrom ... die Schaltung kippt. T2 leitet nun, während T1 sperrt. Die **Ausgangsspannung U_A** hat wieder **L-Pegel**.

Hysterese

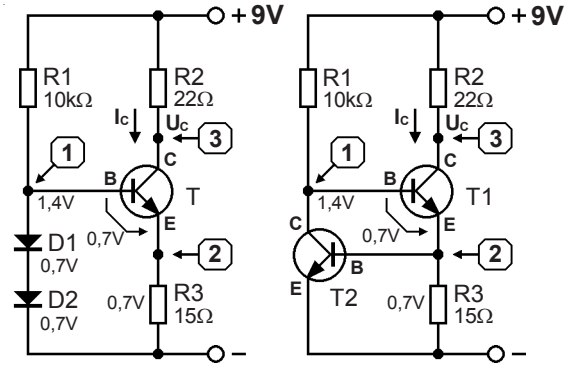
Abbildung 9 und 10 zeigen, dass zwischen **Ein- und Ausschaltpunkt** des Schmitt-Triggers eine **Differenz** besteht. Diesen Spannungsunterschied bezeichnet man als Hysterese. Die Größe der Hysterese hat mehrere Ursachen, deren Zusammenhang sich mathematisch schwer erfassen läßt, weshalb man bei der Dimensionierung der Schaltung auf Erfahrungswerte zurückgreift.

Beim Schalten des Schmitt-Triggers spielen die **Spannungsabfälle an R5** eine wichtige Rolle. Unmittelbar vor dem Schalten in den Arbeitszustand fließt noch der Kollektorstrom von T2 und zusätzlich ein geringer Teil des Kollektorstroms von T1. Der somit größere Strom in R5 (Summe von T1 und T2) erhöht die Spannung am Punkt 3. Deshalb muss zum Schalten (EIN) die Eingangsspannung U_E höher sein. Beim Ausschalten dagegen fließt durch T2 noch kein Strom, während der Kollektorstrom von T1 unmittelbar vor dem Schalten vermindert wird. An R5 ergibt sich somit ein geringerer Spannungsabfall ... die Spannung am Punkt 3 ist niedriger. Da U_E über U_{BE} von T1 mit der Emitterspannung (Punkt 3) gekoppelt ist, muss die Ausschaltschwelle U_{AUS} niedriger sein. Die Übersteuerung von T2 ist somit für die Größe der Hysterese mitbestimmend (Spannungsteiler R3 - R4). Auch die übrigen Widerstände spielen eine wichtige Rolle. Die Hysterese vergrößert sich, wenn der Widerstandswert von R1 nicht gleich dem von R2 ist. Da an R5 Spannung abfällt, ist die Hysterese größer, wenn R5 größer ist. **Ein- und Ausschaltschwelle** können so im Zusammenhang mit der Hysterese **innerhalb bestimmter Grenzen festgelegt** werden.

 Copyright J. Straßhofer

Konstantstromquellen

Konstantstromquellen liefern nahezu unabhängig von der Betriebsspannung einen **konstanten Strom**. Sie werden deshalb auch bei elektronischen **Ladegeräten** verwendet.



$$I_{R3} = \frac{0{,}7V}{R3}$$

Formel zur Berechnung des Konstantstroms

Konstantstromquellen dienen auch häufig zur **Verbesserung von Schaltungseigenschaften**. Sie werden dann eingesetzt, wenn ein Verbraucher mit einem **konstanten Strom** versorgt werden soll.

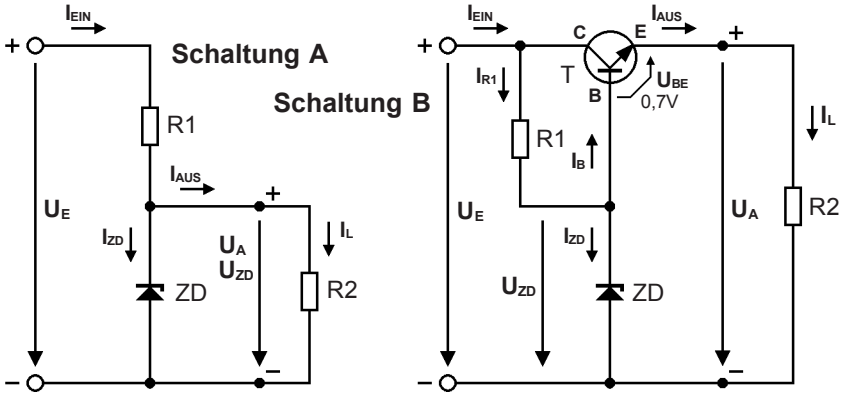
Die **Funktion** der Konstantstromquelle ist einfach. In der **Schaltung A** wird mittels der beiden Dioden D1 und D2 am Punkt 1 und damit an der Basis des Transistors T eine Spannung von **1,4 Volt** erzeugt. Zählt man den Spannungsabfall an der Basis-Emitter-Diode **(0,7 Volt)** weg, so verbleiben für den Emitterwiderstand R3 ebenfalls **0,7 Volt**. Somit bestimmt die **Größe von R3** den Emitterstrom des Transistors. Dieser Strom entspricht praktisch dem Kollektorstrom I_C, der durch R2 fließt. Änderungen von R2 beeinflussen I_C nicht. Auch bei Kurzschluss vom Kollektor zur Betriebsspannung fließt der von R3 festgelegte Strom. Natürlich darf I_C durch R2 nicht so weit begrenzt werden, dass der Transistor in den Sättigungsbereich gerät. Änderungen der an R2 abfallenden Spannung werden vom Transistor ausgeregelt.
Auch bei Änderung der Betriebsspannung bleibt I_C nahezu konstant, da sich der Spannungsabfall an den beiden Dioden nur geringfügig in Abhängigkeit vom Stromfluss über R1 verändert.
Dennoch stabilisiert die **Schaltung B** noch **besser**, da der Transistor T2 als aktives Bauelement Schwankungen der Betriebsspannung entgegenwirkt. Jede Veränderung des Stroms in R3 würde eine Änderung des Basisstroms und damit der Kollektorspannung (Punkt 1) von T2 bewirken. Dies wieder beeinflußt die Basis von T1. T1 und T2 steuern sich somit in einem Regelkreis gegenseitig, was die Qualität steigert.

Konstantspannungsquellen

Konstantspannungsquellen haben die Aufgabe, unabhängig vom Strom eine **konstante Spannung** zu liefern. Sie werden deshalb vor allem in **Netzgeräten** verwendet.

$$U_A = U_{ZD} - U_{BE}$$

Formel zur Berechnung der Ausgangsspannung in Schaltung B

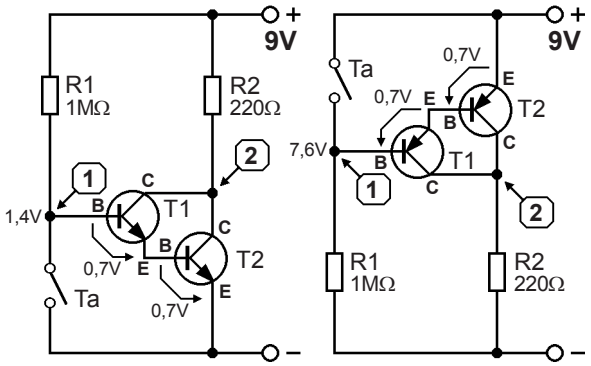


Konstantspannungsquellen erfüllen zwei Aufgaben: **Unabhängig vom Laststrom** bleibt die Ausgangsspannung konstant. Spannungsschwankungen am Eingang werden ausgeregelt. **Schaltung A** zeigt eine einfache Spannungsstabilisierung mittels **Zener-Diode**. Die Spannung der Zener-Diode entspricht der Ausgangsspannung U_A. Bei dieser Schaltung kann jedoch nur ein geringer Ausgangsstrom I_{AUS} fließen, da sonst die Zener-Spannung zusammenbrechen würde. Um höhere Ausgangsströme zu erreichen, benötigt man einen Transistor **(Schaltung B)**, der leistungsmäßig entsprechend belastbar ist.

Die Ausgangsspannung ergibt sich aus der Spannung der **Zener-Diode vermindert** um die **Basis-Emitter-Spannung des Transistors**. Schwankungen der Eingangsspannung wirken sich kaum auf die Ausgangsspannung aus; sie werden vom Transistor ausgeregelt. Änderungen des Laststroms I_L regelt der Transistor aus, indem sich U_{BE} bei größerem Strom erhöht und bei kleinerem vermindert. Der Transistor und der Lastwiderstand R2 bilden somit einen Spannungsteiler, der nahezu unabhängig vom Strom eine konstante Ausgangsspannung liefert.
Moderne Konstantspannungsquellen werden mit integrierten Schaltkreisen gebaut.

 Copyright J. Straßhofer

Darlingtonschaltung



In manchen Fällen (Verstärker-Endstufe, geringer Ruhestrom, ...) genügt die **Stromverstärkung** eines einzigen Transistors nicht. Um einen **hohen Stromverstärkungsfaktor** zu erreichen, werden deshalb zwei Transistoren zu einer sog. **Darlingtonschaltung** zusammengeschaltet. Die üblichen Kombinationen mit **NPN- und PNP-Transistoren** zeigen die beiden Abbildungen.

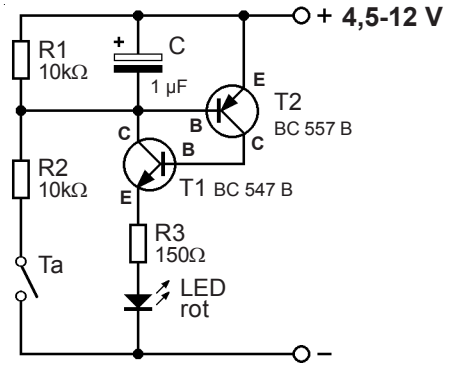
Da der bereits verstärkte **Emitterstrom von T1** gleichzeitig **Basisstrom von T2** ist und nochmals von T2 verstärkt wird, ergibt sich eine sehr hohe **Gesamtstromverstärkung Bg**. Zur Berechnung werden die Stromverstärkungsfaktoren B beider Transistoren miteinander multipliziert.

Die Dardingtonschaltung hat gegenüber dem einfachen Transistor einige Besonderheiten, die in der Schaltungspraxis zu beachten sind.

Die Basis-Emitter-Spannung beträgt ca. **1,4 Volt**, da der Basisstrom durch zwei PN-Übergänge fließt. Die **Sättigungsspannung** beträgt etwa **0,8 Volt**, weil der Emitter von T1 bereits eine Spannung von 0,7 Volt hat. Darlingtonschaltungen gibt es in mehreren Leistungsklassen und mit **Stromverstärkungsfaktoren** von **750 - 30000** in einem einzigen Transistorgehäuse mit den üblichen drei Anschlüssen (z.B.: BC 516, BC 517, BD 677, ...).

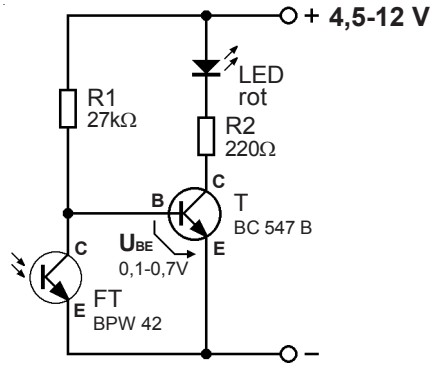
Gesamtstromverstärkung: $\mathbf{Bg = B_{T1} \cdot B_{T2}}$

Thyristor-Ersatzschaltung



Bei dieser **Thyristor-Ersatzschaltung** wird die **Funktion eines Thyristors**, der üblicherweise als Wechselspannungsschalter verwendet wird, mit zwei Transistoren nachgebildet. Wird die Schaltung bei offenem Taster an die Spannung angeschlossen, so sperren T1 und T2. Über R1 liegt die Basis von T2 an PLUS, wobei der Kondensator Störungen unterdrückt. Die Basis von T1 erhält keinen Strom, da ja T2 sperrt. **Beim Drücken des Tasters zündet der Thyristor**. T2 erhält über R2 Basisstrom T1 erhält Basisstrom aus dem Kollektor von T2 .... die **LED leuchtet**. Nach Öffnen des Tasters leitet T2, da nun sein Basisstrom über T1 fließt. Somit halten sich beide Transistoren gegenseitig leitend. Man kann den Thyristor wieder **löschen**, indem man die **Spannung abklemmt**.

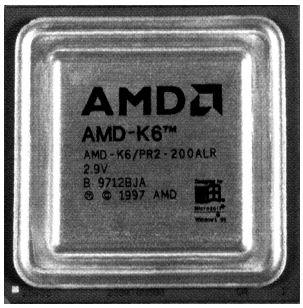
Dämmerungsschalter



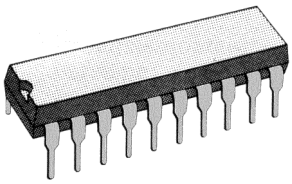
Dieser sehr **einfache Dämmerungsschalter** zeigt die praktische Anwendung eines **Transistorschalters**. Der **Fototransistor BPW 42** beeinflußt als **lichtabhängiger Widerstand** die Basis-Emitter-Spannung des Transistors und schaltet diesen EIN bzw. AUS. Der Übergang von EIN nach AUS ist nicht schlagartig, sondern allmählich.

Der **Fototransistor** besteht aus einer **Fotodiode** mit einem **nachgeschalteten Transistor**. Der Widerstand der zwischen Kollektor und Basis in Sperrichtung betriebenen Fotodiode verringert sich bei **Lichteinfall**. Der dadurch ermöglichte Stromfluss steuert den Transistor an. Bei **Dunkelheit sperrt der Fototransistor**, bei guter **Beleuchtung** kann die **Sättigungsspannung** auf ca. **0,1 Volt** fallen.

 Copyright J. Straßhofer



Mikroprozessor



Integrierter Schaltkreis
im Gehäuse (CMOS-IC)

Integrierte Schaltkreise (IC) sind eine logische Folge der **Transistortechnologie**. Mitte der sechziger Jahre erkannte man die Möglichkeit, in einem Herstellungsprozeß mehr als einen Transistor auf einem Silizium-Plättchen **(Chip)** unterzubringen.

Der **IC** war geboren. Auch Widerstände, kleine Kondensatoren, Dioden und die Verbindungsleitungen lassen sich in integrierter Technik erzeugen, sodass ICs eine vollständige Funktionseinheit - eine elektronische Schaltung - bilden.

Der Chip wird in ein Gehäuse mit entsprechenden Anschlüssen **(PIN)** geklebt und über Golddrähte mit diesen Anschlüssen verbunden, sodass er wie ein anderes Bauelement in eine Schaltung eingebaut werden kann. Die einfache Handhabung führte und führt zur Herstellung einer großen Zahl verschiedener ICs. Die Tendenz geht zu immer **höherer Integrationsdichte** (Bauelemente pro Quadratmillimeter), zu **höherer Signalgeschwindigkeit** und zu **geringerer Leistungsaufnahme** (CMOS - Technologie).

Integrationsgrade von Integrierten Schaltungen

		Anzahl der Funktionen	Anzahl der Transistoren	Fläche in mm²
SSI	Small-Scale-Integration (Kleinintegration)	2 - 20	100	3
MSI	Medium-Scale-Integration (Mittlere Integration)	20 -100	500	8
LSI	Large-Scale-Integration (Großintegration)	100 - 50000	<100000	20
VLSI	Very-Large-Scale-Integration (Größtintegration)	>50000	>100000	>30

Einteilung der Integrierten Schaltkreise nach der Herstellungstechnologie

bipolare IC: Ladungsträger sind sowohl Elektronen als auch Löcher
TTL (Transistor-Transistor-Logik) (7400, 7447, ...)
Analog-IC (LM 741, 7805, ...)

unipolare IC: Ladungsträger sind entweder nur Löcher oder nur Elektronen
CMOS (complementary symmetrie metal-oxide-silicon) (4001, 4017, ...)

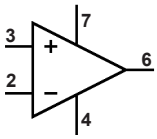
Einteilung der IC nach Schaltungsart (analog - digital)

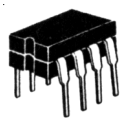
analog: Änderung der Spannung am Ausgang des IC im Verhältnis zum Eingang
LM 741, 7805, LM 723, ...

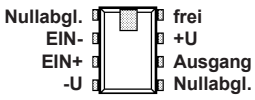
digital: Ein- und Ausgänge kennen nur die Zustände 0 und 1 (L- und H-Pegel)
7400, 7402, 4001, 4017, ...

LM 741

Präzisions-Operationsverstärker LM 741 mit interner Frequenzkompensation

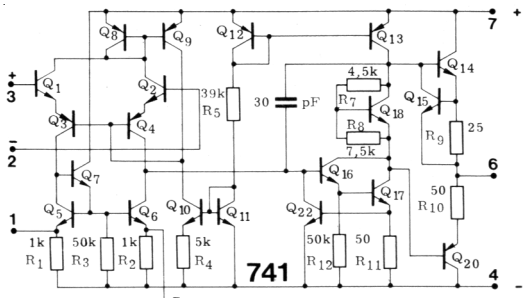






Schaltzeichen Gehäuse Anschlußbelegung

Ein typischer und häufig verwendeter Vertreter eines IC ist der OP **LM 741**. Sein Innenleben könnte auch eine mit **Einzel-Bauelementen** diskret aufgebaute Schaltung sein und ist auch so zu verstehen. Grundsätzlich ist jedoch die **Kenntnis des Innenlebens** für die praktische Anwendung **kaum von Bedeutung**. Lediglich die **Lage** und die **Daten** der einzelnen **Anschlüsse** sind wichtig. Deshalb sind nur wenige allgemeine Aussagen zu IC möglich. Einige Gruppen von IC (analog, digital, CMOS, TTL, ...) haben spezifische Eigenschaften (TTL .... 5 Volt Betriebsspannung). Um mit Integrierten Schaltkreisen bauen und sie verstehen zu können, ist daher eine ausführliche **Datenliteratur** mit IC -Beschreibung erforderlich.



Innenschaltung des LM 741

Gehäuseformen
von ICs

 Copyright J. Straßhofer