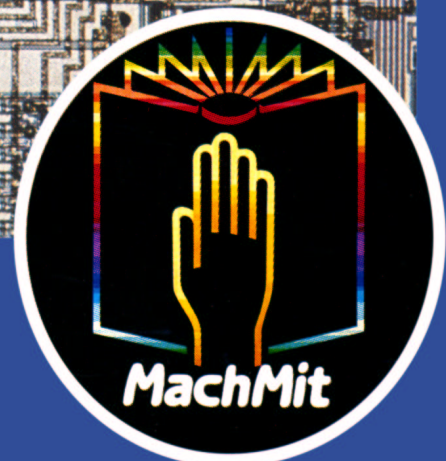
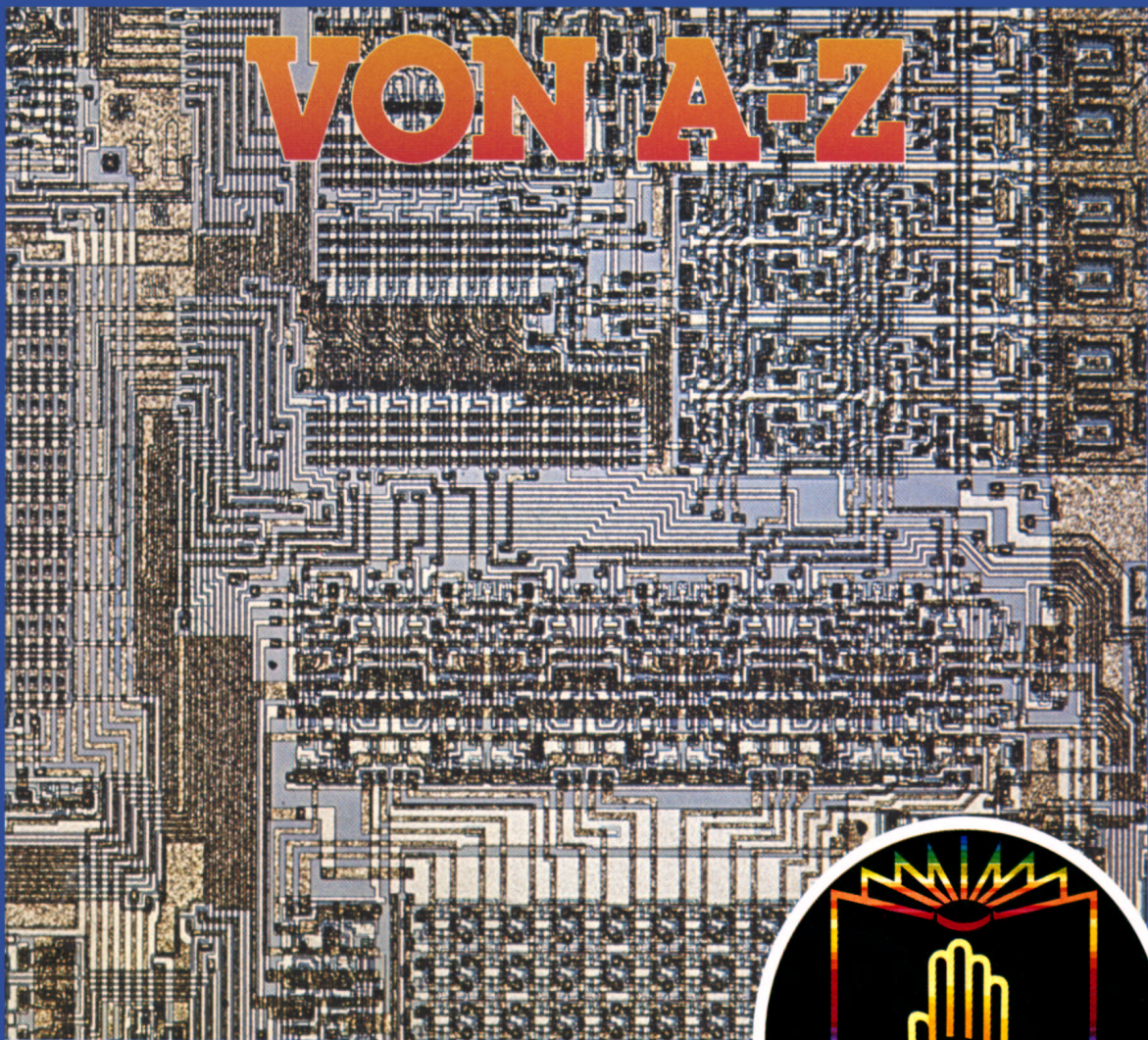


PHILIPS



ELEKTRONIK EXPERIMENTE VON A-Z



EE 3060

Vorwort

Dieses Buch „Elektronik-Experimente von A – Z“ soll eine Einführung in die Schaltungstechnik der Elektronik geben.

Ausgehend vom Leitungsmechanismus im einfachen Stromkreis bis zu grundlegenden Schaltungen mit Halbleitern wird ein Lehrgang vorgelegt, der anhand zahlreicher ausgewählter Experimente und genauer Erklärungen auch schwierigere Zusammenhänge der Elektronik verdeutlicht. Damit bietet dieser Lehrgang sowohl für den Anfänger ohne Vorkenntnisse als auch für den Praktiker mit Erfahrungen eine Möglichkeit der Erarbeitung komplizierter Sachverhalte. Aus diesem Grund wird vom sorgfältig beschriebenen Experiment ausgegangen. Die Beobachtungen und Ergebnisse werden aufgegriffen, und sie bilden die Grundlage für die Erklärungen und deren Einordnung in größere Sachzusammenhänge.

ELEKTRONIK EXPERIMENTE VON A – Z

EE 3060

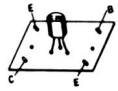
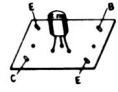



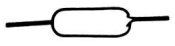

Herausgeber: Philips GmbH
Bereich Hobby-Technik, Mönckebergstraße 7, 2000 Hamburg 1

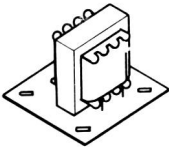
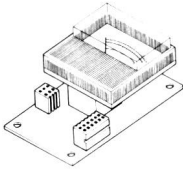








Stichwortverzeichnis



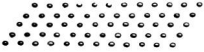
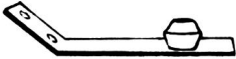
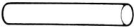
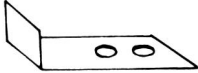
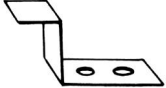
Allzweckdiode	54	Metalraumgitter	14
Ampere	18	Meßinstrument	46
Anode	52	Monostabiler Multivibrator	89
Antidiffusionsspannung	52	Multivibrator	87
Arbeitskennlinie	70	Nichtleiter	48
Arbeitspunkt	73	Ohm	24
Astabiler Multivibrator	91	Ohmsches Gesetz	27
Atom	50	Oszillator	92
Basis	60	p-leitend	51
Basisschaltung	83	Parallelschaltung	17
Bistabiler Multivibrator	87	Periode	44
Brückengleichrichtung	58	Phasenlage	80
Coulomb	17	Primärspule	45
Darlington-Schaltung	84	Proton	13
Defektelektron	50	Rekombination	50
Dielektrikum	35	Reihenschaltung	21
Differenzverstärker	84	Reststrom	49
Diode	48	Schaltbild	16
Durchbruchspannung	55	Schalterbetrieb	86
Durchlaßrichtung	52	Schaltplan	16
Durchlaßspannung	54	Schaltsymbol	16
Durchlaßwiderstand	53	Schaltzeichen	16
Effektivwert	96	Schleusenspannung	54
Einweggleichrichtung	58	Schwellspannung	80
Elektrizitätsmenge	17	Schwingkreis	92
Elektromagnetismus	42	Sekundärspule	45
Elektromotorische Kraft	15	Siebkette	95
Elektron	13	Silizium	49
Entladestrom	37	Sinuskurve	44
Emitter	60	Supraleitfähigkeit	50
Emitterschaltung	81	Spannung	14
Flip-Flop	87	Spannungsteilung	30
Frequenz	44	Spannungsverstärker	59
Gegenkopplung	79	Sperrschicht	51
Germanium	49	Sperrstrom	55
Glättung	58	Sperrichtung	49
Gleichrichtung	57	Spule	42
Grundstoffe	13	Strom	18
Halbleiter	48	Stromgegenkopplung	77
Halbleiterdiode	48	Stromkreis	12
Hertz	44	Stromverstärker	60
Induktion	43	Stromverstärkung	72
Innenwiderstand	74	Transistor	59
Kapazität	37	Transformator	42
Kapazitätsdiode	54	Valenzelektron	50
Katode	52	Verdrahtungsplan	12
Kennlinie	53	Verlustleistung	74
Kippschaltung	87	Verstärker	59
Kirchhoffsches Gesetz	31	Volt	15
Kollektor	60	Vorwiderstand	33
Kollektorschaltung	82	Watt	20
Kondensator	35	Wechselspannung	43
Ladestrom	35	Wechselstrom	43
Leistung	20	Wechselstromwiderstand	94
Leistungsverstärker	60	Widerstand	21
Leiter	40	Zenerdiode	55
Loch	50	Zweiweggleichrichtung	58
Magnet	42		

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abbildungen der Einzelteile und	
Inhaltsverzeichnis	4
Allgemeine Bauanleitung	7
Elektronik Experimente von A – Z	12
Stromkreis	12
Parallelschaltung	17
Reihenschaltung	21
Widerstand	23
Ohmsches Gesetz	27
Spannungsteilung	30
Kirchhoffsches Gesetz	31
Kondensator	35
Spule	42
Transformator	42
Wechselstrom	43
Frequenz	44
Halbleiter	48
Diode	48
Zenerdiode	55
Gleichrichtung	56
Transistor	59
Stromverstärker	60
Leistungsverstärker	60
Eingangskennlinie	66
Ausgangskennlinie	66
Arbeitskennlinie	70
Arbeitspunkt	73
Verlustleistung	74
Innenwiderstand	74
Temperaturabhängigkeit	76
Stromgegenkopplung	77
Spannungsverstärkung	79
Schwellspannung	80
Emitterschaltung	81
Kollektorschaltung	82
Basisschaltung	83
Darlington-Schaltung	84
Multivibrator	87
Bistabiler Multivibrator, Flip-Flop	87
Monostabiler Multivibrator, Mono-Flop	89
Aststabiler Multivibrator	91
Oszillator	92

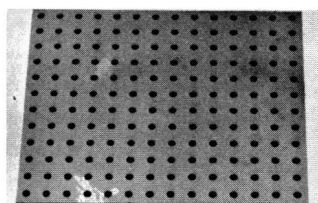
Teil	Bestell.-Nr.	Bezeichnung	Inhalt EE 3060
	349.1001	Transistor Kennfarbe rot	1
	1212	Transistor Kennfarbe weiß	1
	1125	Diode BA 318	1
	2516	Zenerdiode BZX 79 C2V7	1
	1004	Widerstand 1/4 Watt	<div>47 Ohm 1</div> <div>100 Ohm 1</div> <div>220 Ohm 1</div> <div>1 000 Ohm 1</div> <div>2 200 Ohm 1</div> <div>4 700 Ohm 2</div> <div>10 000 Ohm 1</div> <div>22 000 Ohm 1</div> <div>47 000 Ohm 1</div> <div>100 000 Ohm 1</div>
	2504	Metallschichtwiderstand (Shunt)	<div>3,01 Ohm 1</div> <div>10 Ohm 1</div> <div>30,1 Ohm 1</div> <div>107 Ohm 1</div> <div>374 Ohm 1</div>
	1040	Trimm-Potentiometer 10 000 Ohm	1
	1005	Folien-Kondensator	<div>0,047 μF 1</div> <div>0,1 μF 1</div> <div>0,22 μF 1</div>
	1006	Elektrolyt-Kondensator	<div>10 μF 1</div> <div>100 μF 1</div>

Teil	Bestell.-Nr.	Bezeichnung	Inhalt EE 3060
	349.2207	Transformator grün	1
	2544	Meßgerät	1
	1016	Blanker Draht	4 m
	1020	Haarnadelfeder	25
	1021	Klemmfeder	25
	1022	Spiralfeder	4
	1026	Lampenfassung	1
	1028	Gummiband	2
	1124	Lampe 3,8 V 70 mA	1
	1133	Batterieklemme	4

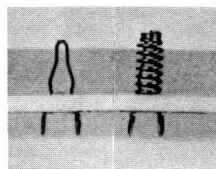
Teil	Bestell.-Nr.	Bezeichnung	Inhalt EE 3060
	349.1527	Litze 1polig	0,5 m
	2051	Stiftkontakt	4
	2057	Gummitülle	4
	2521	Grundplatte	1
	5015	Taste	1
	5020	Stabmagnet	1
	5145	Einschaltkontakt	1
	5151	Umschaltkontakt	1
	1821	Anleitungsbuch	1

Allgemeine Bauanleitung

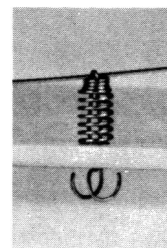
Alle Untersuchungen, die mit diesem Buch „Elektronik-Experimente von A – Z“ durchgeführt werden, baut man auf einer **Grundplatte** (Abb. 1) auf. Die elektronischen Bauelemente und die Verbindungsdrähte werden darauf mit Klemmen befestigt, die wie in Abb. 2 aus **Haarnadelfedern** und **Klemmfedern** zusammengesetzt sind. Die Klemmfeder steckt man von unten durch das entsprechende Loch in der Grundplatte, drückt sie zusammen und schiebt von oben eine Klemmfeder darüber bis sie einrastet. Beim Niederdrücken der Klemmfeder wird eine Öse frei, in die man den Draht hineinsteckt (Abb. 3). Läßt man die Feder los, ist der Draht festgeklemmt.



1

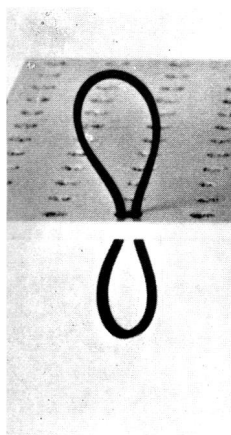


2

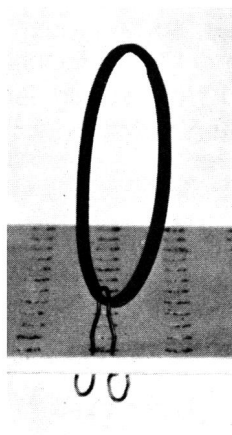
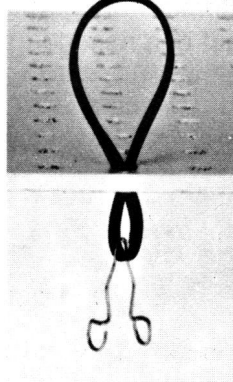


3

Zur Stromversorgung wird eine 4,5 V Flachbatterie benötigt. Sie befestigt man mit zwei Haarnadelfedern und einem Gummiband auf der Grundplatte (Abb. 4). Das Gummiband führt man von oben durch ein Loch, hakt unten die Haarnadelfeder ein und steckt sie in das Loch (Abb. 5). Dasselbe wiederholt man fünf Lochreihen weiter, hebt das Gummiband an und klemmt die Batterie damit fest (Abb. 6). Wird eine zweite Batterie benötigt, klemmt man sie über der ersten mit unter das Gummiband.



4

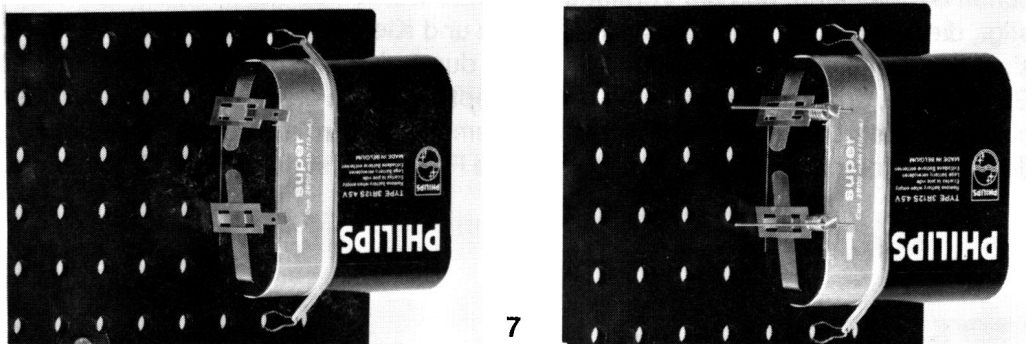


5



6

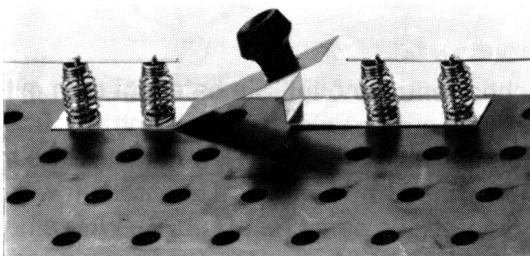
An den Laschen der Batterie werden die Anschlußdrähte mit Batterie-Anschlußklemmen befestigt. Man schiebt sie auf die Laschen und drückt eine Spiralfeder über das kurze Ansatzstück. In das dann sichtbare Loch steckt man den Draht und läßt die Spiralfeder los (Abb. 7).



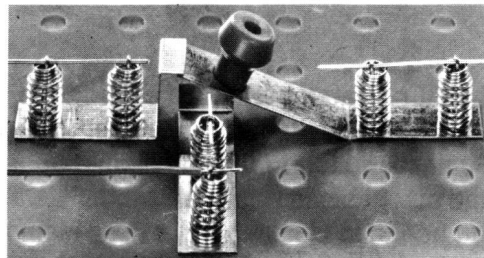
7

Zum Schalten der Batteriespannung wird die **Taste** mit dem **Einschaltkontakt** eingesetzt. Beide befestigt man mit Klemmen auf der Grundplatte und schließt den Draht an der äußeren Klemme an (Abb. 8).

Soll ein **Umschalter** eingesetzt werden, befestigt man in Verlängerung der Taste den **Umschaltkontakt** und rechtwinklig zur Taste den **Einschaltkontakt** wie oben beschrieben (Abb. 9).

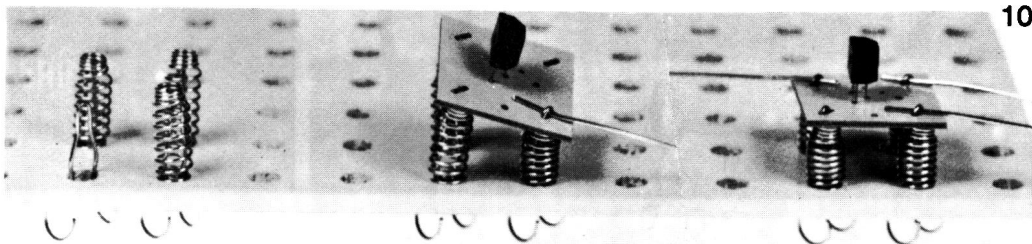


8



9

Zur Befestigung der **Transistoren**, des **Meßinstruments** und des **Transformators** setzt man zunächst vier Klemmen auf die Grundplatte, so daß die Haarnadelfedern in der Richtung verlaufen wie die Schlitze in den Trägerplättchen. Drückt man dann die Trägerplättchen nieder, so kann man sie mit kurzen Drahtstückchen halten (Abb. 10). Später können dafür die Anschlußdrähte bzw. die Bauelemente eingeschoben werden. Bei den Transistoren, ist auf den richtigen Anschluß zu achten, ebenso beim Transformator und dem Meßinstrument.

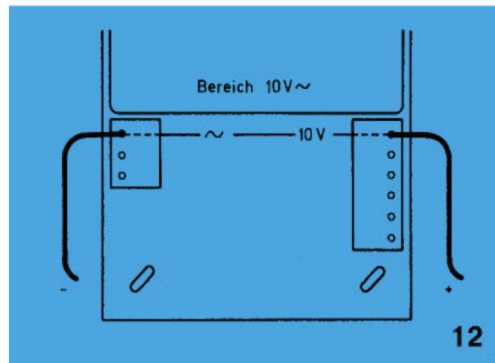


10

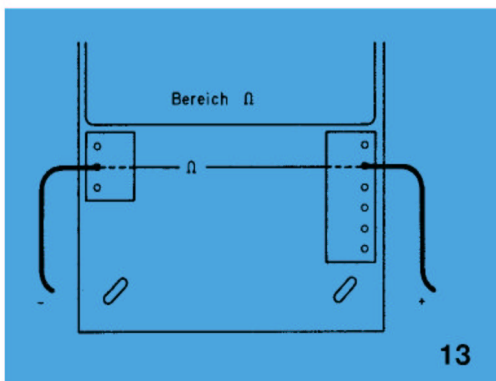
Zum Messen mit dem Meßinstrument werden 2 isolierte Drähte – Enden ca. 8 mm abisolieren – an Stiftkontakten mit einer Flachzange festgeklemmt (Abb. 11). Über die Klemmstellen schiebt man je eine Gummitülle. Die Stiftkontakte steckt man in die Buchsen auf der Trägerplatte des Meßinstruments. Dabei ist zu beachten, was gemessen werden soll.



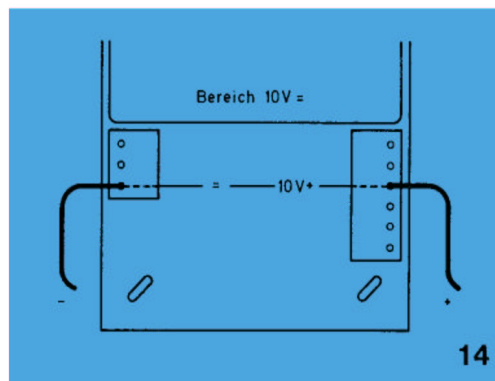
11



12



13



14

Messen von Wechselspannungen: Meßbereich 10 V~

Es werden die beiden obersten Buchsen benutzt, die Polung braucht nicht beachtet werden (Abb. 12).

Messen von Widerständen: Meßbereich 100 KΩ

Es werden die beiden zweiten Buchsen von oben benutzt, die Nullstellung liegt am rechten Skalenende (Abb. 13). Zum Betrieb wird eine Spannungsquelle benötigt. Genaue Hinweise siehe Seite 23.

Messen von Gleichspannungen: 4 Meßbereiche 0,3 V, 1 V, 3 V, 10 V

Der Minuspol ist für alle Meßbereiche die untere Buchse auf der linken Seite, der Pluspol des entsprechenden Bereichs liegt auf der rechten Seite und ist gekennzeichnet (Abb. 14).

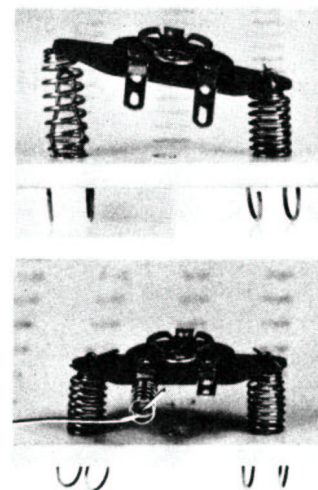
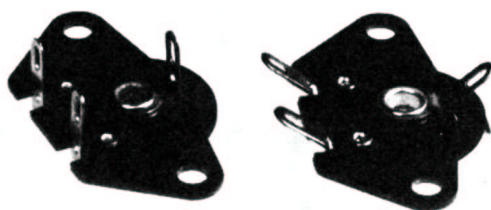
Messen von Gleichströmen: 5 Meßbereiche 100 mA, 30 mA, 10 mA, 3 mA, 1 mA

Für alle Meßbereiche gilt der Spannungsbereich 0,3 V+. Der für den Meßbereich passende Nebenwiderstand liegt direkt in der Schaltung, das Meßgerät wird parallel dazu geschaltet.

Nebenwiderstände (Shunts)

Wert	Farbcode	für Meßbereich
3,01 Ohm	orange, schwarz, braun, silber, braun	100 mA
10 Ohm	braun, schwarz, schwarz, gold, braun	30 mA
30,1 Ohm	orange, schwarz, braun, gold, braun	10 mA
107 Ohm	braun, schwarz, lila, schwarz, braun	3 mA
374 Ohm	orange, lila, gelb, schwarz, braun	1 mA

Vor dem Einbau des **Trimpotentiometers** biegt man die 3 Anschlußösen um. Dann setzt man 2 Klemmen in die Grundplatte, drückt das Trimpotentiometer darauf – der schwarze Ring nach oben – und klemmt es mit zwei Drahtstücken fest. Die Anschlüsse stellt man mit Spiralfedern her wie bei den Batterieanschlußklemmen (Abb. 15).



15

Die Experimente sind auf zwei verschiedene Arten dargestellt: Für alle ist ein Schaltbild gezeichnet, aus dem man die Anordnung der Bauelemente in der Schaltung erkennen kann. Sie sind mit ihren **Schaltsymbolen** dargestellt. Beginnt eine neue Gruppe von Experimenten, ist zusätzlich ein **Verdrahtungsplan** gezeichnet. Darauf sind die Bauelemente wie in der Draufsicht abgebildet. Für die Bauteile ergeben sich folgende Darstellungen:

Batterie

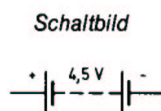
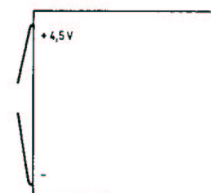


Bild im Verdrahtungsplan



Verbindungsleitung



	Schaltbild	Bild im Verdrahtungsplan
Leitungen mit Verbindung		
Ein- und Ausschalter		
Umschalter		
Lampe		
Meßgerät		
Widerstand		
Potentiometer		
Keramischer Kondensator		
Folien-Kondensator		
Elektrolyt-Kondensator		
Spule		
Transformator		
Diode		
Zenerdiode		
Transistor npn		
Transistor pnp		

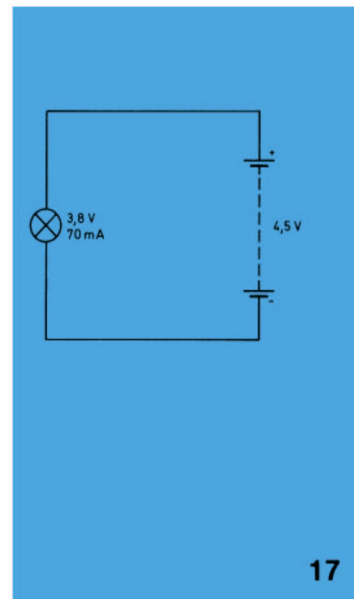
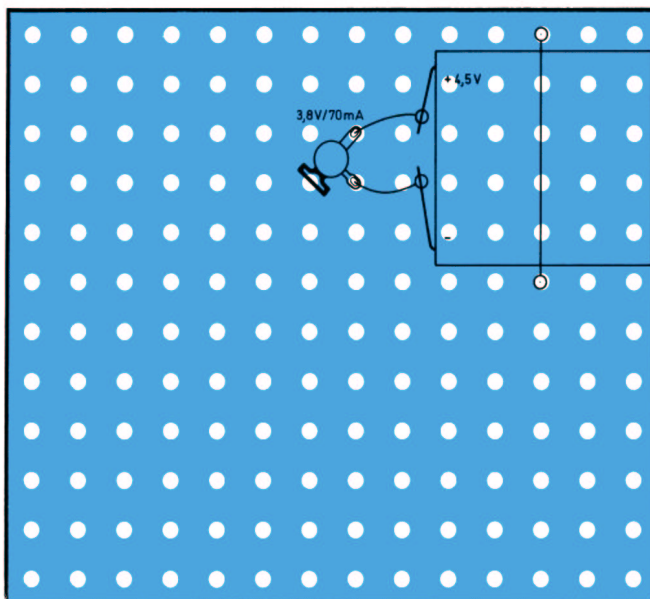
Elektronik-Experimente von A – Z

Die Elektronik ist heute aus dem täglichen Leben nicht wegzudenken. Es fällt leicht, Plattenspieler, Kofferradio, Stereo-Anlage oder Fernsehempfänger zu bedienen. Selbst Kinder können mit elektronischem Spielzeug umgehen, da die Handhabung einfach ist. Dabei ist sicher vielen nicht klar, welche Vorgänge das Funktionieren elektronischer Geräte ermöglichen.

Dieser Philips Elektronik-Lehrgang schafft Voraussetzungen, um in die Geheimnisse der Elektronik einzudringen und somit mehr Verständnis für diese großartige Technik aufzubringen. Alle elektrischen und elektronischen Systeme werden nur mit Hilfe der Elektrizität funktionsfähig. Deshalb ist die Kenntnis von den Gesetzmäßigkeiten des elektrischen Stroms Voraussetzung für deren Verständnis. Da sich die elektrischen Vorgänge der direkten Beobachtung entziehen, muß man aus Erscheinungsformen Rückschlüsse ziehen. Solche Erscheinungen sind z. B. die Wärme in einer Kochplatte, die Bewegung eines Elektromotors und das Licht in einer Glühlampe. Man kann also elektrische Vorgänge durch geeignete Indikatoren (Anzeiger) erkennbar machen.

Eine einfache Anzeige ist z. B. die Glühlampe, die durch Aufleuchten elektrische Energie anzeigt. Genauere Aussagen sind mit Meßgeräten möglich, die später beschrieben werden.

Elektrischer Strom kann nur in einem geschlossenen **Stromkreis** fließen. In der Abb. 17 ist so ein Stromkreis dargestellt. Er besteht aus der Batterie, der Glühlampe und den Leitungen. Der Aufbau der Grundplatte wird nach dem **Verdrahtungsplan** vorgenommen. Wie die Teile befestigt werden, wurde bereits beschrieben. Besteht zwischen Batterie und Glühlampe eine Leitungsverbindung, zeigt das Aufleuchten



der Glühlampe elektrischen Stromfluß an. Alle Metalle und Kohlenstoff leiten den elektrischen Strom, Nichtmetalle wie Gummi, Kunststoffe oder Porzellan leiten ihn nicht. Um die Frage nach dem elektrischen Strom beantworten zu können, muß man sich mit dem Aufbau der Stoffe beschäftigen.

Alle Stoffe sind entweder **Grundstoffe** (Elemente) oder chemische Verbindungen aus diesen Grundstoffen.

Die Grundstoffe wie Wasserstoff, Sauerstoff oder Kupfer bestehen aus kleinsten Bausteinen, den Atomen. Atome sind in ihren Abmessungen so klein, daß sie für das menschliche Auge nicht sichtbar sind. Aus diesem Grunde kann nur eine modellhafte Beschreibung helfen, den Aufbau eines Atoms zu veranschaulichen.

Alle Atome haben einen Kern, um den Elektronen in verschiedenen Bahnen kreisen (Abb. 18).

Das einfachste Atom ist das Wasserstoffatom. Der Kern des Wasserstoffatoms besteht aus einem **Proton**, der kleinsten positiven elektrischen Ladung. Das Proton wird von einem **Elektron** umkreist (Abb. 19). Es hat die kleinste negative elektrische Ladung.

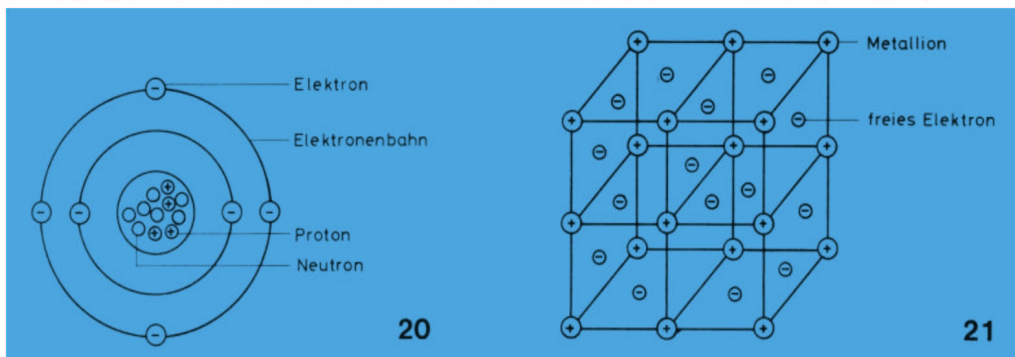


Man bezeichnet deshalb die Elektronen als Träger der negativen Elementarladungen und die Protonen als Träger der positiven Elementarladungen, wobei folgende Abkürzungszeichen Verwendung finden:

Elektron: $-$ / Träger der negativen Elementarladung

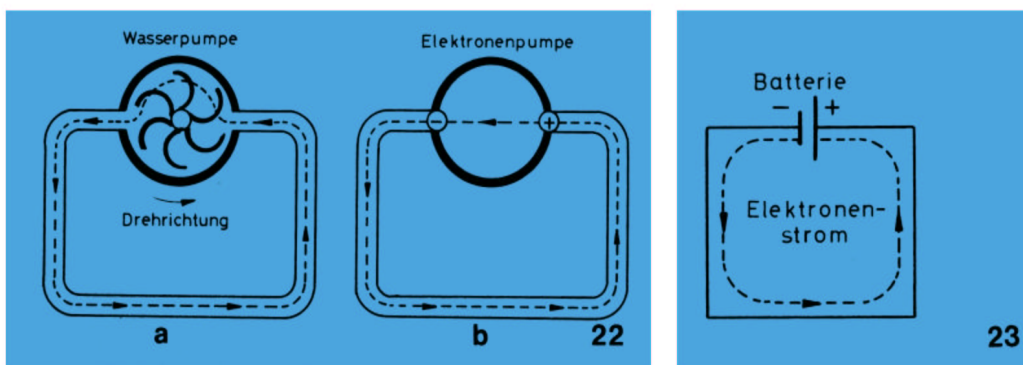
Proton: $+$ / Träger der positiven Elementarladung

Da in einem Atom (Abb. 20) die Summe der negativen Elementarladungen aller Elektronen der Summe der positiven Ladungen aller Protonen entspricht, besteht ein Ladungsgleichgewicht und das Atom wirkt nach außen elektrisch neutral.

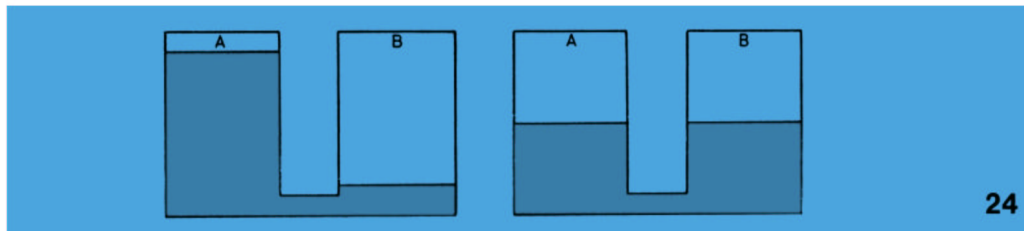


Damit ein elektrischer Strom fließen kann, müssen genügend bewegliche Elektronen als Ladungsträger vorhanden sein. Diese Voraussetzung ist bei allen Metallen gegeben. Metalle haben nämlich auf der äußersten Bahn Elektronen, die bei der Bindung der einzelnen Atome untereinander abgegeben werden. Dabei werden die Metallatome zu positiven Metallionen und bilden ein **Metallraumgitter** (Abb. 16). Zwischen den fest verankerten Metallionen liegen in gleichmäßiger Verteilung die abgegebenen Außenelektronen (Valenzelektronen, Abb. 21). Innerhalb des Metallraumgitters sind sie nicht mehr an einzelne Atome gebunden und deshalb relativ leicht beweglich. Sie lassen sich bei entsprechendem Druck verschieben. Diese freien Elektronen bilden das Elektronengas. Sein Vorhandensein ist die Grundlage für den elektrischen Strom. Elektrischer Strom ist die Bewegung des Elektronengases in einer Richtung. Dazu benötigt man jedoch einen Antrieb, der wie eine Pumpe auf der einen Seite des Stromkreises auf die Elektronen einen Druck und auf der anderen Seite einen Sog ausübt.

Dieser Antrieb erfolgt in jedem Falle durch eine Energie von außen (Abb. 22). Eine Batterie liefert durch chemische Umsetzung die erforderliche Energie. Infolge einer unterschiedlichen Elektronenkonzentration an den beiden Polen der Batterie entsteht ein Zustand, den man als **Spannung** bezeichnet. Dabei herrscht am Minuspol (–) Elektronenüberschuß, am Pluspol (+) Elektronenmangel. Die Folge davon ist ein elektrisches Feld. Verbindet man beide Pole mit einem Draht zu einem Stromkreis, fließt ein Elektronenstrom (Abb. 23) vom Minus- zum Pluspol, weil aufgrund der unterschiedlichen Elektronenbesetzung ein Bestreben zum Ladungsausgleich besteht und die Elektronen durch das elektrische Feld angetrieben werden. Die Spannung drückt den Ladungsunterschied aus und ist Ursache für den elektrischen Strom. Sie wird mit dem Formelzeichen **U** abgekürzt. Die Maßeinheit für die elektrische Spannung ist ein Volt, Einheitszeichen: V. Sie ist benannt nach dem italienischen Physiker Alessandro Volta.



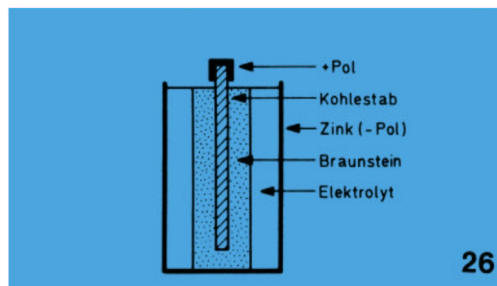
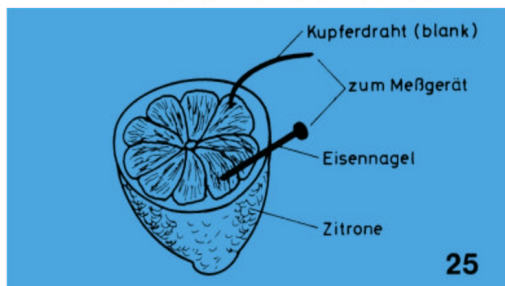
Der Begriff der elektrischen Spannung läßt sich im Vergleich mit Wasser noch zusätzlich veranschaulichen. Zwei Wasserbehälter (A und B) werden wie in Abb. 24 miteinander verbunden und der Behälter A mit Wasser gefüllt. Im Behälter A ist dann ein Wasserüberschuß, der durch die Verbindungsrohre in Behälter B drängt. Der Druck, der dabei ausgeübt wird, ist vergleichbar mit der elektrischen Spannung. Er wird hervorgerufen durch die Schwerkraft, die den Ausgleich herbeiführt.



Die Spannungen in elektrischen Stromkreisen können sehr unterschiedlich sein. In der Elektrotechnik und Elektronik treten Spannungen auf, die viel größer, aber auch viel kleiner als 1 Volt (1 V) sein können. Deshalb werden bei hohen Spannungen Vielfache und bei kleinen Spannungen Teile der Einheit **Volt** verwendet:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ MV} &= 1 \text{ Megavolt} &= & 1\,000\,000 \text{ V} \\
 1 \text{ kV} &= 1 \text{ Kilovolt} &= & 1\,000 \text{ V} \\
 1 \text{ mV} &= 1 \text{ Millivolt} &= & \frac{1}{1000} \text{ V} \\
 1 \mu\text{V} &= 1 \text{ Mikrovolt} &= & \frac{1}{1\,000\,000} \text{ V}
 \end{aligned}$$

Das Prinzip einer Batterie läßt sich an einem einfachen Versuch (Abb. 25) verdeutlichen: In eine halbierte Zitrone steckt man einen Eisennagel und einen Kupferdraht, und diese beiden Metalle verbindet man mit dem Meßinstrument (Meßbereich 0,3 V). Ohne eine erkennbare Spannungsquelle zeigt das Meßgerät eine Spannung an. Diese elektrische Spannung ist bereits zwischen Eisen und Kupfer vorhanden, und man benötigt nur eine leitende Flüssigkeit – in diesem Fall die Säure der Zitrone – um einen Stromfluß zu beobachten.



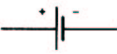
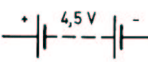


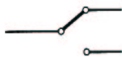



Zwischen verschiedenen Metallen herrscht immer eine Spannung, die Größe hängt von der Art der Metalle ab.

In der Zelle einer Batterie (Abb. 26) werden nicht zwei Metalle als Pole verwendet, sondern Kohle und das Metall Zink. Zwischen diesen beiden Polen besteht ein Spannungsunterschied. Die Flüssigkeit zwischen diesen Stoffen ist allerdings eingedickt, damit das Auslaufen erschwert wird. Um den Kohlestab herum befindet sich Braunstein, eine Verbindung, die leicht Sauerstoff abspaltet. Dieser Sauerstoff geht eine chemische Verbindung mit dem Wasserstoff ein, der bei der Stromabgabe am Kohlestab entsteht. Es entsteht Wasser. Der Zinkbecher ist nicht nur der eine Pol, sondern er bietet gleichzeitig Schutz vor dem Auslaufen. Die Kraft, die bei den Batterien aufgrund der vorhandenen Spannung einen Stromfluß bewirkt, heißt **elektromotorische Kraft**.

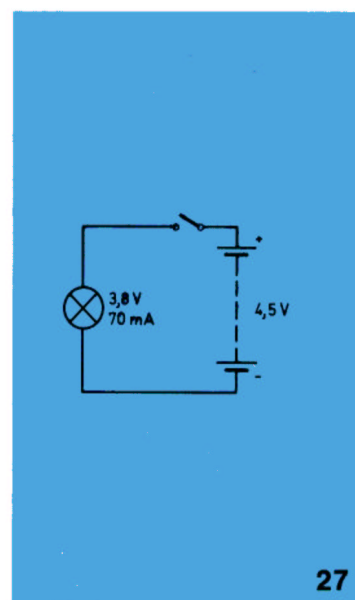
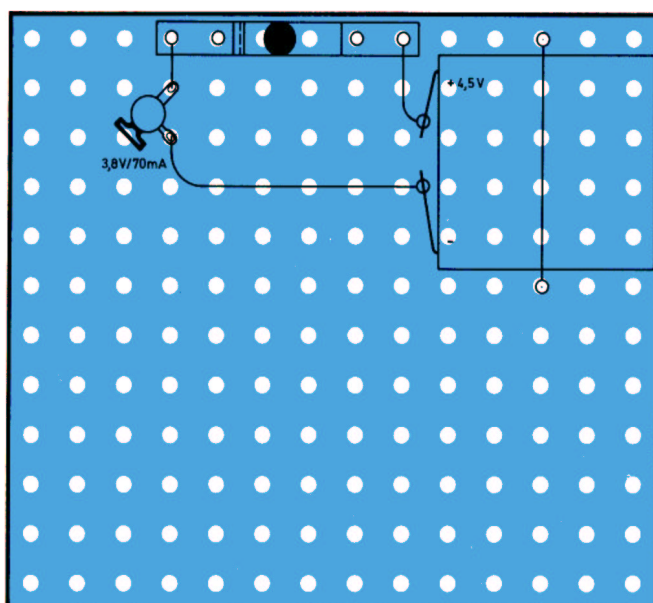
Da gegenständliche Darstellungen bei umfangreichen Schaltungen zu kompliziert und unübersichtlich sind, benutzt man genormte Abkürzungen. Diese Abkürzungen werden **Schaltzeichen** oder **Schaltsymbole** genannt.

Hier die Symbole für die Teile der ersten Schaltungen:

Glühlampe	:		Leitungsdraht	:	
Batterie 1,5 V	:		Schalter	:	
Batterie 4,5 V	:		Verbindungspunkt	:	
Minuspol	:		Umschalter	:	
Pluspol	:				

Zeichnungen, in denen nur Schaltzeichen verwendet werden, heißen **Schaltbilder** oder **Schaltpläne**. Alle Drahtverbindungen werden so gezeichnet, daß sie senkrecht aufeinanderstehen. Sind mehrere Drähte miteinander verbunden, wird das durch einen Verbindungspunkt dargestellt.

Durch Einbau eines Schalters in den Stromkreis kann der Strom beliebig eingeschaltet oder unterbrochen werden (Abb. 27).



27

Im geschlossenen Stromkreis fließen die Elektronen vom Pol mit Elektronenüberschuß (Minuspole) zum Pol mit Elektronenmangel (Pluspol). Dadurch entsteht insgesamt ein Elektronenstrom in einer bestimmten Richtung, nämlich vom Minus zum Pluspol. Das entspricht aber nicht der technischen Stromrichtung. Hier gilt die Festlegung, daß der elektrische Strom vom positiven Pol der Spannungsquelle zum negativen Pol fließt. Das ist darauf zurückzuführen, daß diese Festlegung vor Kenntnis der Elektronentheorie erfolgte und man annahm, daß sich in Metallen die elektrischen Ladungen vom Pluspol zum Minuspole bewegen. In der Elektrotechnik hat man die Auffassung der Stromrichtung von plus nach minus beibehalten können, weil elektrischer Strom als Bewegung positiver Ladungen definiert wird. Untersuchungen im elektrischen Stromkreis werden in diesem Buch jedoch nur auf der Grundlage der Elektronenstromrichtung beschrieben: Also von – nach +.



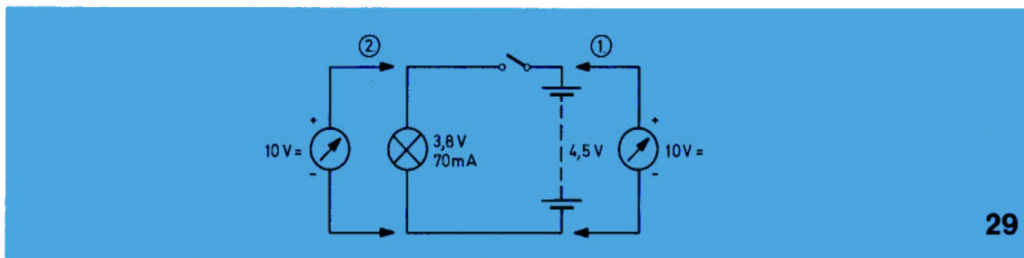
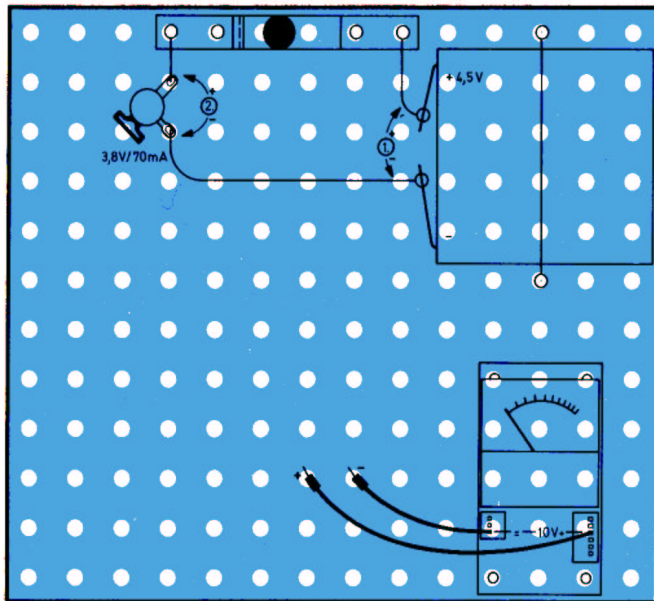
Wird der Stromkreis in Abb. 28 mit dem Schalter geschlossen, leuchtet die Glühlampe auf. Es ist die Anzeige für das Fließen eines Stroms. Ursache für den Strom ist die Spannung der Batterie, die im gesamten Stromkreis wirksam ist.

Die Batteriespannung kann mit dem Meßgerät ermittelt werden. Die Pfeilspitzen im Schaltbild geben an, wo das Meßgerät für die jeweilige Messung angeschlossen wird. Angegeben sind außerdem die Polarität (durch die Zeichen + und –) und der zu verwendende Meßbereich.

Dazu wird das Meßgerät wie in Abb. 29 einmal an Pole der Batterie gehalten und dann an die Anschlüsse der Lampe. Beim Einschalten leuchtet die Glühlampe und der Zeiger des Meßwerkes zeigt eine Spannung von ca. 4,5 V bei einer neuen Batterie an. An der Batterie liegt die gleiche Spannung. Mißt man noch einmal die Spannung an der Batterie und schaltet dann die Glühlampe dazu, stellt man ein geringfügiges Absinken der Batteriespannung fest. Diese Spannungsverringering ist immer festzustellen. Je älter die Batterie ist, desto größer ist der Unterschied. Deshalb sollten stets frische Batterien verwendet werden.

Die Art, wie das Meßwerk bei dieser Messung zur Glühlampe in den Stromkreis geschaltet wird, nennt man **Parallelschaltung**. Spannungen können nur gemessen werden, wenn das Meßgerät parallel zum Bauteil geschaltet wird.

Das Vorhandensein einer elektrischen Spannung ist die Voraussetzung für den Elektronenfluß bei elektrischen Vorgängen. An diesen Vorgängen sind Milliarden von Elektronen als Elementarladungen beteiligt. Die Summe aller Elementarladungen ergibt eine bestimmte Ladungs- oder **Elektrizitätsmenge**. Die Einheit für die Elektrizitätsmenge ist 1 **Coulomb** (1 C). Es bezeichnet eine unvorstellbar große Zahl von Elektronen (Ladungen), nämlich 6,25 Trillionen ($6,25 \cdot 10^{18}$).



29

Wird nun in einer Sekunde 1 Coulomb durch den Leiterquerschnitt transportiert, liegt die Maßeinheit der Stromstärke von 1 **Ampere** (1 A) vor.

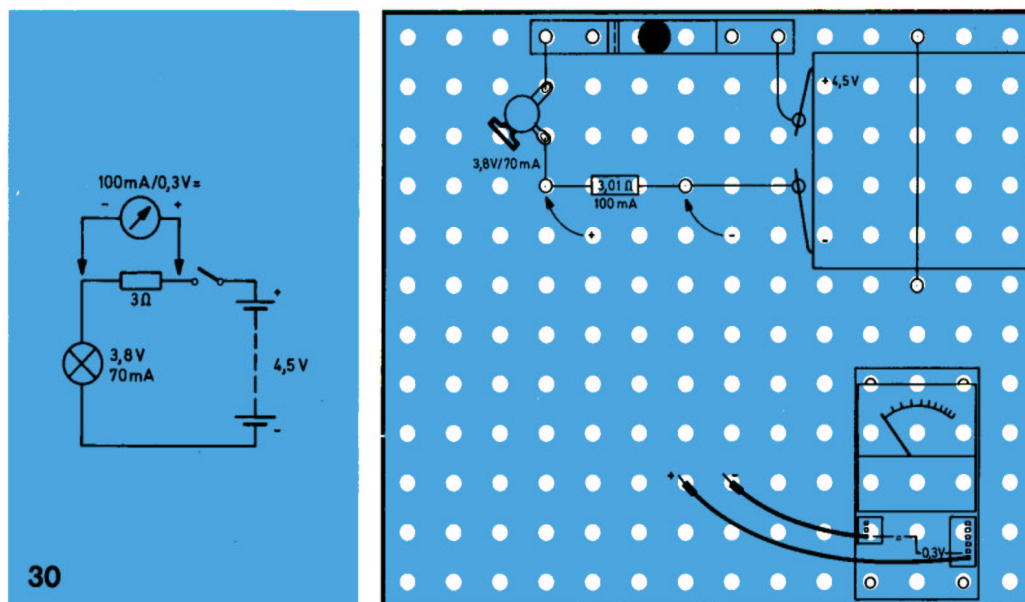
$$1 \text{ Ampere} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ sek}} \quad 1 \text{ A} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}}$$

Die Bezeichnung Ampere ist nach dem französischen Physiker André Maria Ampère benannt, der intensiv die Erforschung der Eigenschaften des elektrischen **Stromes** betrieben hat. Nach neueren Erkenntnissen werden heute auch andere Definitionen für das Ampere verwendet.

Da in elektrischen Stromkreisen sehr unterschiedliche Stromstärken auftreten können, werden auch Teile und Vielfache der Einheit verwendet.

$$\begin{aligned} 1 \text{ kA} &= 1 \text{ Kiloampere} = 1000 \text{ A} \\ 1 \text{ mA} &= 1 \text{ Milliampere} = \frac{1}{1000} \text{ A} \\ 1 \mu\text{A} &= 1 \text{ Mikroampere} = \frac{1}{1\,000\,000} \text{ A} \end{aligned}$$

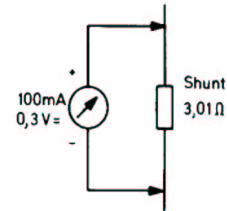
Um die Stärke des elektrischen Stroms zu messen, muß durch das Meßgerät der gleiche Strom wie durch die Glühlampe fließen. Die Schaltung nach Abb. 30 zeigt, wie das Meßgerät (Meßbereich 100 mA, Shunt $3,01 \Omega$) in den Stromkreis geschaltet wird. Das vorhandene Meßinstrument ist so empfindlich, daß es durch den durch die Glühlampe fließenden Strom zerstört würde. Man läßt deshalb den größten Teil des Stroms durch einen Nebenwiderstand (Shunt) fließen und nimmt nur einen kleinen Teil zur Messung. Manche Geräte enthalten diese Shunts eingebaut, und man muß für jede Messung den Stromkreis unterbrechen. Bei diesem Gerät wurden die Shunts in die Schaltung mit eingebaut. Deshalb kann ohne Unterbrechung der Leitungsführung die Stromstärke direkt gemessen werden. Als Shunts dienen fünf grüne Widerstände mit je fünf Farbringen.



Nebenwiderstände (Shunts)

Wert	Farbcode	für Meßbereich
3,01 Ohm	orange, schwarz, braun, silber, braun	100 mA
10 Ohm	braun, schwarz, schwarz, gold, braun	30 mA
30,1 Ohm	orange, schwarz, braun, gold, braun	10 mA
107 Ohm	braun, schwarz, lila, schwarz, braun	3 mA
374 Ohm	orange, lila, gelb, schwarz, braun	1 mA

Im Schaltbild sind Shunt und Meßgerät so dargestellt:



Beim Betätigen des Schalters leuchtet die Glühlampe und das Meßgerät zeigt eine Stromstärke von 80 mA an. Setzt man das Meßgerät mit dem Shunt an eine andere Stelle im Stromkreis, z. B. vor den Schalter oder hinter die Glühlampe, zeigt es beim Betätigen des Schalters die gleiche Stromstärke an.

Der elektrische Strom ist an jeder Stelle im Stromkreis gleich groß.

Aus der elektrischen Spannung und der Stromstärke läßt sich die elektrische **Leistung** nach folgender Formel errechnen:

$$\text{Leistung} = \text{Spannung} \cdot \text{Stromstärke}$$

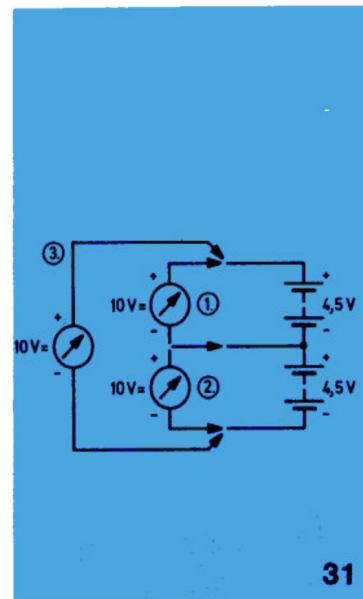
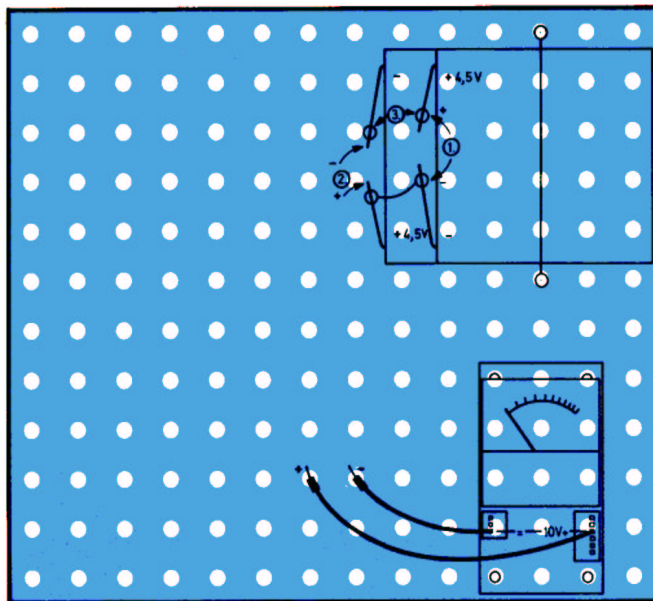
Setzt man die allgemeinen Formelzeichen ein, so lautet die Gleichung:

$$P = U \cdot I$$

Die elektrische Leistung wird in **Watt** angegeben:

Bei besonders großen oder kleinen Leistungen gibt man Vielfache oder Teile der Leistung an.

1 Megawatt (MW)=	1 000 000 W
1 Kilowatt (kW) =	1 000 W
1 Milliwatt (mW) =	$\frac{1}{1\,000}$ W



Schaltet man Bauteile wie in Abb. 30 hintereinander in den Stromkreis, so bezeichnet man das als **Reihenschaltung**. Sollen zwei Batterien in Reihe geschaltet werden, müssen sie so miteinander gekoppelt werden, daß zwischen zwei ungleichnamigen Polen eine Verbindung besteht (Abb. 31). Um die Auswirkung zweier in Reihe geschalteter Batterien festzustellen, mißt man zunächst die Spannung an jeder Batterie. Das Meßgerät zeigt jeweils eine Spannung von 4,5 Volt.

Eine Flachbatterie stellt bereits eine Reihenschaltung von 3 **Einzelzellen** dar. Entfernt man jedoch die Umhüllung, dann erkennt man die 3 Zinkbecher der 3 Einzelbatterien.

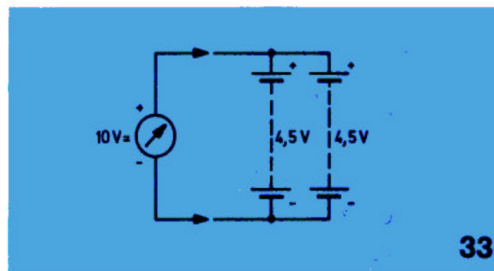
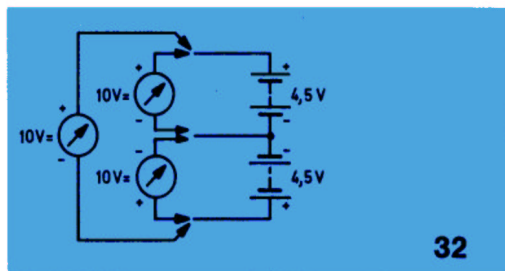
Wird nach dem Zuschalten der zweiten Batterie die Spannung erneut gemessen, zeigt das Meßgerät einen Ausschlag von 9 V. Durch die Reihenschaltung von Batterien addiert sich die Spannung. Der Elektronendruck nimmt also zu. Im vorliegenden Schaltungsbeispiel verdoppelt sich die Spannung: $4,5\text{ V} + 4,5\text{ V} = 9\text{ V}$.

Allgemein kann man sagen:

$$U_g = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

U_1 , U_2 , U_n sind die einzelnen Spannungen, U_g ist die Gesamtspannung. Schaltet man die Batterie nach Abb. 32 so zusammen, daß die gleichnamigen Pole miteinander verbunden sind und mißt dann die Spannung ist die Gesamtspannung bei gleicher Einzelspannung gleich Null. Man muß also immer die Polung beachten.

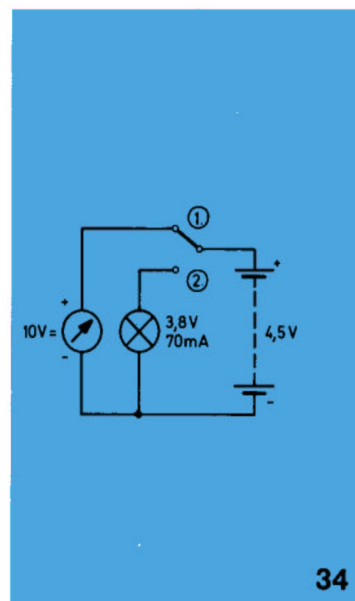
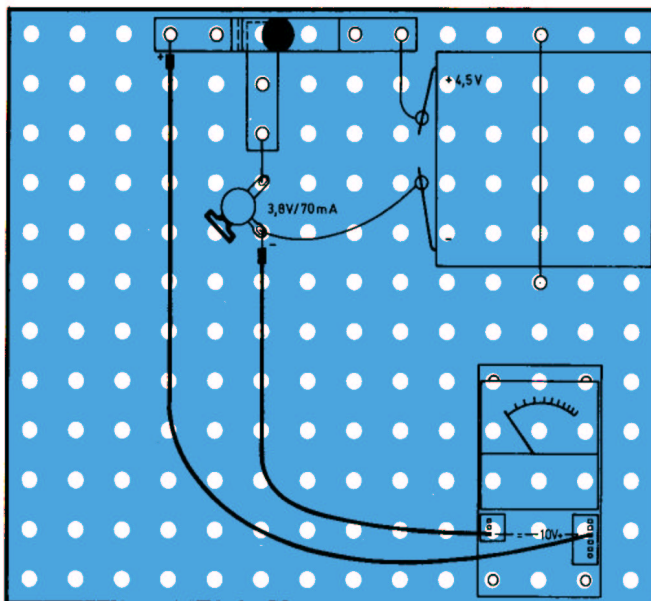
Zur **Parallelschaltung** von Batterien mit gleicher Spannung verbindet man die gleichnamigen Pole (Abb. 33). Beim Messen ist im Vergleich zu einer Batterie keine Veränderung festzustellen (Bedingung: gleiche Einzelspannungen). Bei Parallelschaltung von Batterien (Spannungsquellen) bleibt die Spannung gleich, allerdings erhöht sich die Belastbarkeit.



Bei den nachfolgenden Messungen an Widerständen soll in zwei Stromkreisen gemessen werden. Um nicht jedesmal umbauen zu müssen, verwendet man einen Umschalter nach Abb. 34.

Bei Schaltstellung 1 kann die Glühlampe zum Leuchten gebracht werden, beim Umschalten auf Stellung 2 zeigt das Meßgerät die Batteriespannung an.

Die Bewegung der Elektronen auf dem Weg durch den Leitungsdraht wird durch dauernde Zusammenstöße mit den Teilen des Metallraumgitters gehemmt. Die Bewegungshinderung der Ladungsträger durch den Leiter wird als **elektrischer Widerstand** bezeichnet.



34

Dabei ist es nicht unerheblich, welches Leitermaterial Verwendung findet. Schließt man nacheinander z. B. an eine Stromquelle Leitungen aus verschiedenem Material (Kupfer, Aluminium, Eisen, Gold, Silber), aber gleicher Länge und gleichem Querschnitt und vergleicht mit einem Strommeßgerät die jeweiligen Stromstärken, so zeigt sich, daß jeder Werkstoff dem elektrischen Strom einen anderen Widerstand entgegensetzt. Er wird Artwiderstand oder **spezifischer Widerstand** genannt und ist durch den inneren Aufbau – Atomdichte und Zahl der Valenzelektronen – bestimmt. Der spezifische Widerstand wird abgekürzt mit dem griechischen Buchstaben ρ (gesprochen „ro“) bezeichnet.

Um die Widerstände verschiedener Stoffe vergleichen zu können, verwendet man bei der Ermittlung des spezifischen Widerstandes Drähte von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt. Da der Widerstand besonders bei Metallen stark von der Temperatur abhängt, ist sein Wert immer auf eine Temperatur von 18° C bezogen.

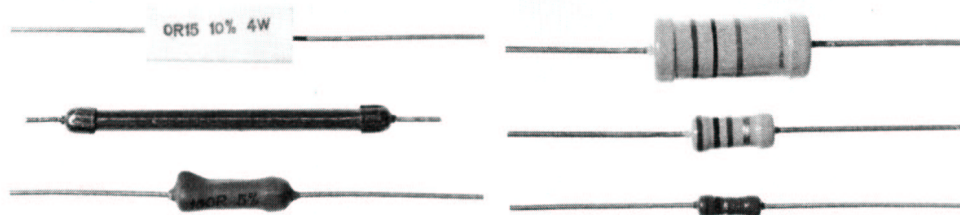
In der Tabelle sind Artwiderstände für einige Leiterwerkstoffe angegeben.

Leiterwerkstoff	spezifischer Widerstand
Silber	0,016
Kupfer	0,017
Aluminium	0,027
Zink	0,059
Eisen	0,098
Platin	0,105
Konstantan	0,5
Kohle	50 bis 100

Aus dieser Tabelle wird deutlich, daß es gute und weniger gute Leiter für den elektrischen Strom gibt.

Durch Verwendung besonderer Wirkstoffe, die sich in Atomdichte und Zahl der freien Elektronen unterscheiden, lassen sich Bauteile konstruieren, die den elektrischen Strom unterschiedlich hemmen. Diese Bauteile heißen **Widerstände**. Man unterscheidet dabei Festwiderstände, einstellbare und veränderliche Widerstände. Bei veränderlichen Widerständen ändert sich der Widerstand durch äußere Beeinflussung, z. B. Änderung des Lichteinfalls oder der Temperatur.

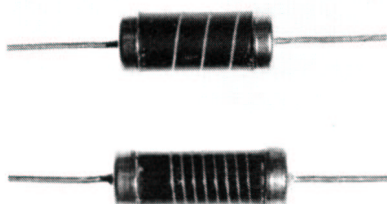
Bei den Festwiderständen unterscheidet man je nach Bauart Kohleschicht-, Metallschicht- oder Drahtwiderstände (Abb. 35).



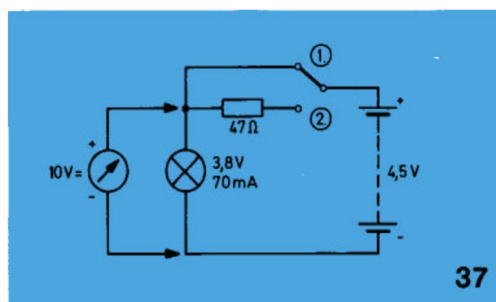
35

Die sehr häufig verwendeten Kohleschichtwiderstände haben als Widerstandswerkstoff eine dünne Kohleschicht, die auf einen Träger aus Keramik (Porzellan) aufgebracht wird, und die gewendelte Bahnlänge bestimmt die Größe des Widerstandes. Die Wendel erzeugt man, indem die durchgehende Kohleschicht mit einem Laser spiralförmig unterbrochen wird (Abb. 36).

Da jede Widerstandswirkung eine Temperaturerhöhung des Widerstandswerkstoffes zur Folge hat, muß für ausreichende Wärmeableitung gesorgt werden. Davon abhängig ist die Belastbarkeit des Widerstandes. Je größer die Oberfläche eines Widerstandes, desto mehr Wärme kann er abgeben und desto höher ist seine Belastbarkeit. Bei erhöhter Umgebungstemperatur nimmt die Belastbarkeit ab. Die in diesem Buch verwendeten Widerstände sind einheitlich mit 0,5 W belastbar. Die Belastbarkeit gilt bei einer Schichttemperatur von 155° C und bei einer Umgebungstemperatur von 70° C.



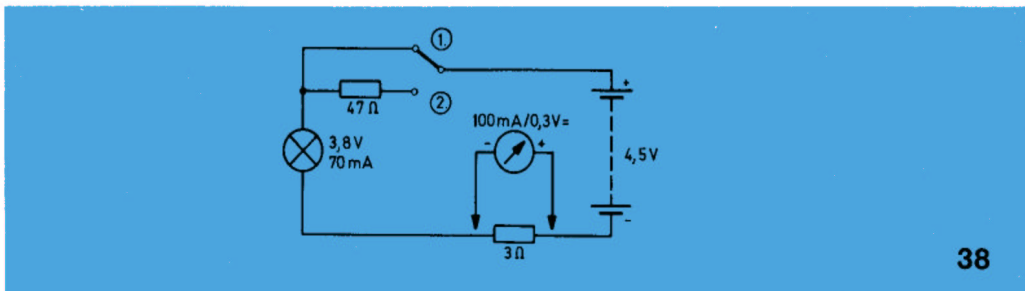
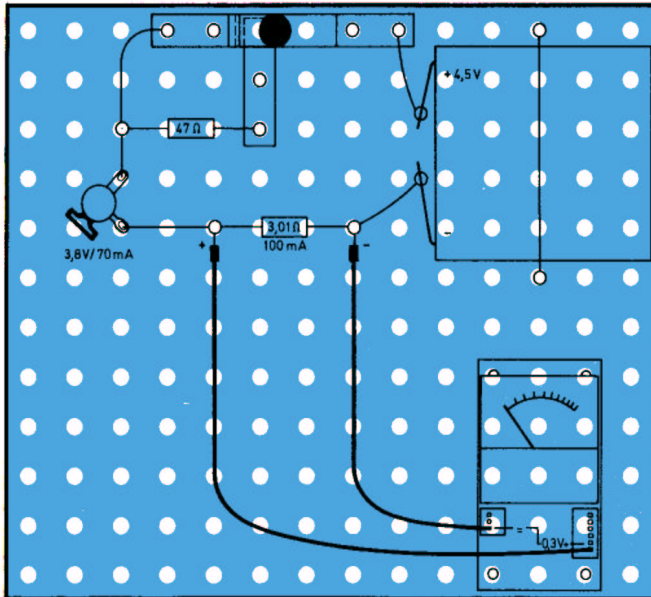
36



37

Um die Wirkungsweise eines Widerstandes zu untersuchen, wird die Schaltung nach Abb. 37 aufgebaut. Mit dem Umschalter wird zunächst in Stellung 1 die Glühlampe zum Leuchten gebracht, wobei am Meßgerät die Spannung an der Glühlampe abgelesen werden kann; sie entspricht der Batteriespannung. Beim Umschalten auf Stellung 2 leuchtet die Lampe mit geringerer Helligkeit, und am Meßgerät ist auch eine geringere Spannung ablesbar.

Der Einbau eines Widerstandes in einen Stromkreis führt zu einer Verringerung des elektrischen Stroms (Abb. 38).



Nach dem deutschen Physiker Georg Simon Ohm ist als Einheit des elektrischen Widerstandes ein **Ohm** mit dem Zeichen Ω festgelegt worden. Das Ω ist der griechische Buchstabe Omega. Als Formelzeichen für den elektrischen Widerstand verwendet man das R. Die Einheit 1Ω ist folgendermaßen definiert:

$1 \text{ Ohm } (1 \Omega)$ ist gleich dem Widerstand, durch den bei der Spannung $1 \text{ Volt } (1 \text{ V})$ ein Strom der Stärke von $1 \text{ Ampere } (1 \text{ A})$ fließt. Das entspricht dem Widerstand eines Quecksilberfadens von $106,3 \text{ cm}$ Länge und 1 mm^2 Querschnitt bei einer Temperatur von 0° C .

Für große Widerstände benutzt man auch Vielfache der Einheit Ohm (Ω), für kleinere Widerstände Teile:

$$\begin{aligned} 1 \text{ k}\Omega &= 1 \text{ Kilo-Ohm} &= & 1\,000 \Omega \\ 1 \text{ M}\Omega &= 1 \text{ Mega-Ohm} &= & 1\,000\,000 \Omega \\ 1 \text{ m}\Omega &= 1 \text{ Milli-Ohm} &= & \frac{1}{1\,000} \Omega \end{aligned}$$

Als Schaltzeichen wird ein elektrischer Widerstand in folgender Form dargestellt



Auf dem Widerstandskörper wird der Wert nach einem international gültigen Farbcode angegeben, meist in Form von Farbringen (Abb. 39).

39

Farbe	Erster Farbring	Zweiter Farbring	Dritter Farbring	Toleranz
schwarz	0	0	–	
braun	1	1	0	
rot	2	2	00	
orange	3	3	000	
gelb	4	4	0 000	rot 2 %
grün	5	5	00 000	gold 5 %
blau	6	6	000 000	silber 10 %
lila	7	7		
grau	8	8		
weiß	9	9		

Auf dem Widerstand sind vier farbige Ringe. Einer dieser Ringe ist silbern oder golden. Wenn man den Farbschlüssel liest, muß sich der silberne oder goldene Ring an der rechten Seite befinden. Dann bedeutet die Farbe des ersten Ringes (von links nach rechts) die erste Zahl, die Farbe des zweiten Ringes die zweite Zahl, und die Farbe des dritten Ringes die Anzahl der Nullen.

Ein goldener Ring zeigt an, daß der Widerstand eine Genauigkeitstoleranz von $\pm 5 \%$ hat und der silberne Ring eine von $\pm 10 \%$.

(Der übliche Toleranzwert ist 10 %.) Hieraus erklärt sich, daß die Widerstandswerte solche „eigenartigen“ Zahlen sind. Die Werte sind 10, 12, 15, 18, 27, 33 usw. Ein 10-Ohm-Widerstand kann als Maximalgröße also $10 \text{ Ohm} + 10 \% = 11 \text{ Ohm}$ haben. Ein 12-Ohm-Widerstand kann auch 10 % weniger sein: $12 \text{ Ohm} - 10 \% = 10,8 \text{ Ohm}$. Wenn ein Widerstand mehr als 10 % abweicht, fällt er automatisch unter eine andere Wertbezeichnung und wird entsprechend benannt.

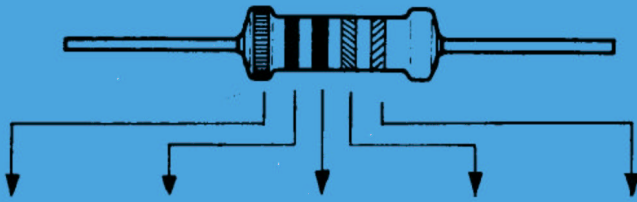
Um den Farbschlüssel richtig zu lesen, muß sich der silberne oder goldene Toleranzring an der rechten Seite befinden. Beispiel: Ein Widerstand hat, von links nach rechts betrachtet, folgende Farbringe:

1. Farbring: gelb	=	4	oder	1. Farbring: braun	=	1
2. Farbring: lila	=	7		2. Farbring: rot	=	2
3. Farbring: rot	=	00		3. Farbring: schwarz	=	–
Ergebnis: 4700 Ohm				Ergebnis: 12 Ohm		
		4 7 00				1 2

10 Ohm	braun, schwarz, schwarz	3 300 Ohm	orange, orange, rot
47 Ohm	gelb, lila, schwarz	4 700 Ohm	gelb, lila, rot
100 Ohm	braun, schwarz, braun	10 000 Ohm	braun, schwarz, orange
150 Ohm	braun, grün, braun	15 000 Ohm	braun, grün, orange
220 Ohm	rot, rot, braun	22 000 Ohm	rot, rot, orange
470 Ohm	gelb, lila, braun	47 000 Ohm	gelb, lila, orange
1 000 Ohm	braun, schwarz, rot	100 000 Ohm	braun, schwarz, gelb
1 500 Ohm	braun, grün, rot	220 000 Ohm	rot, rot, gelb
2 200 Ohm	rot, rot, rot	470 000 Ohm	gelb, lila, gelb

Festwiderstände mit besonders kleinen Toleranzen besitzen fünf Farbringe. Der vierte Farbring gibt den Multiplikator und damit die Dezimalstelle, der fünfte die Toleranz an (Abb. 40).

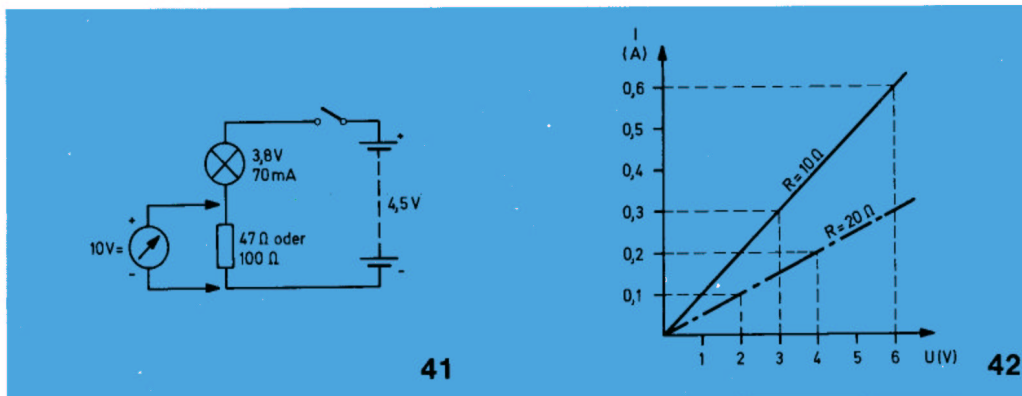
40



	1. Ring	2. Ring Ziffern	3. Ring	Multiplikator	Toleranz
schwarz	–	0	0	10^0	–
braun	1	1	1	10^1	$\pm 1\%$
rot	2	2	2	10^2	$\pm 2\%$
orange	3	3	3	10^3	–
gelb	4	4	4	10^4	–
grün	5	5	5	10^5	$\pm 0,5\%$
blau	6	6	6	10^6	$\pm 0,25\%$
violett	7	7	7	–	$\pm 0,1\%$
grau	8	8	8	–	–
weiß	9	9	9	–	–
silber	–	–	–	10^{-2}	$\pm 10\%$
gold	–	–	–	10^{-1}	$\pm 5\%$

Beim Einsetzen von Widerständen in den Stromkreis wird am Widerstand ein elektrischer Spannungsabfall erzeugt. Setzt man in die Schaltung nach Abb. 17 einen Widerstand von 47Ω , leuchtet nach dem Betätigen des Schalters die Glühlampe und mit dem Meßgerät (Meßbereich 10 Volt) ist am Widerstand ein Spannungsabfall von ca. 2,5 V abzulesen. Ersetzt man in dieser Schaltung den Widerstand durch einen von 100Ω , leuchtet die Glühlampe mit geringerer Helligkeit und mit dem Meßgerät ist ein Spannungsabfall von ca. 3,5 V am Widerstand abzulesen.

Aus der Schaltung ergibt sich: Bei einem großen Widerstand fließt ein kleiner Strom, aber der Spannungsabfall ist groß. Bei einem kleinen Widerstand fließt ein großer Strom, aber der Spannungsabfall ist klein.



Der Zusammenhang zwischen Spannung, Stromstärke und Widerstand ist im **Ohmschen Gesetz** ausgedrückt. Es besteht zwischen den drei genannten Größen folgende Beziehung:

1. Bei konstantem Widerstand wächst die Stromstärke in gleichem Maße (proportional) wie die Spannung und umgekehrt.
Die grafische Darstellung Abb. 42 veranschaulicht diese Proportionalität von Strom und Spannung bei einem Widerstand von 10 Ω und 20 Ω.
2. Bei konstanter Spannung wird die Stromstärke kleiner, wenn der Widerstand wächst und umgekehrt.

In Kurzform:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Widerstand}}$$

Bei Berechnungen benutzt man für die elektrischen Größen die Formelzeichen und setzt für

$$\begin{aligned} \text{Stromstärke} &= I \\ \text{Spannung} &= U \\ \text{Widerstand} &= R \end{aligned}$$

Auf diese Weise ergibt sich:

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

Mit dieser Formel läßt sich auch der Wert einer an einem Widerstand anliegenden Spannung ermitteln. Dazu muß die Gleichung umgeformt werden:

$$U = R \cdot I$$

Mit einer weiteren Umformung läßt sich aus Spannung und Stromstärke der Widerstand bestimmen:

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

Mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes lassen sich also die elektrischen Größen eines Stromkreises berechnen, wenn jeweils zwei bekannt sind. Dabei ist zu beachten, daß die Einheiten Volt, Ampere und Ohm verwendet werden. Liegen die Werte für

die einzelnen Größen in unterschiedlichen Maßeinheiten vor, muß umgerechnet werden. Die Beispiele zeigen Anwendungsmöglichkeiten des Ohmschen Gesetzes:

1. Bei einer Spannung von 9 Volt soll die Stromstärke errechnet werden, wenn ein Widerstand von $47\ \Omega$ in den Stromkreis geschaltet wird.

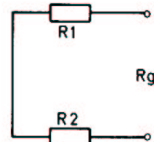
$$I = \frac{U}{R} \quad I = \frac{9\text{ V}}{47\ \Omega} \quad I = 9 : 47 \sim 0,2\text{ A}$$

2. Wie groß muß ein Widerstand gewählt werden, wenn in einem Stromkreis ein Strom von 0,5 A fließen soll und eine Batterie mit 4,5 V angeschlossen wird?

$$R = \frac{U}{I} \quad R = \frac{4,5\text{ V}}{0,5\text{ A}} \quad R = \frac{45}{5} \quad R = 9\ \Omega$$

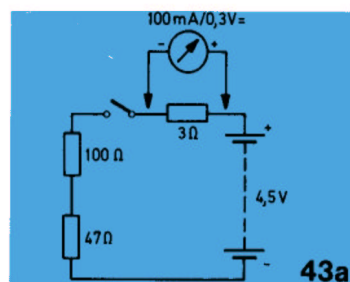
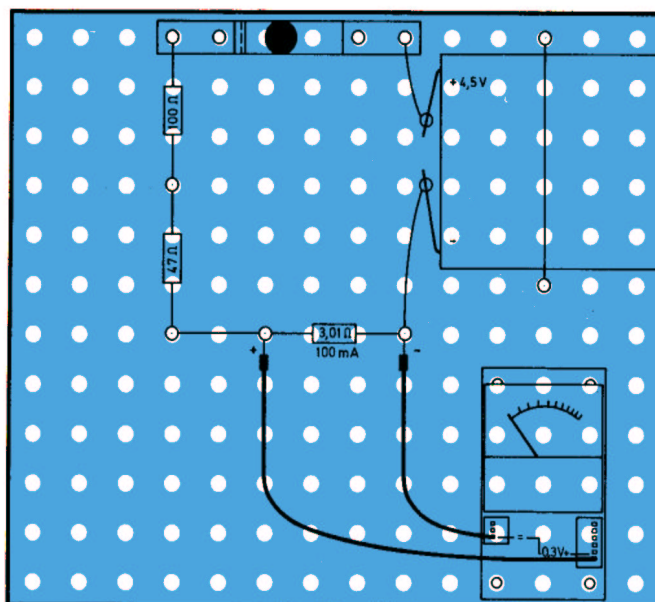
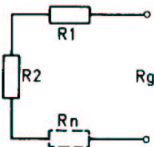
Bei einer Reihenschaltung von Widerständen müssen die Elektronen auf ihrem Weg vom Minus- zum Pluspol beide Widerstände nacheinander passieren. In beiden werden die Elektronen gehemmt, wobei sich die Widerstandswirkung addiert. Der Gesamtwiderstand (abgekürzt R_g) kann also durch folgende Berechnung ermittelt werden:

$$R_g = R_1 + R_2$$

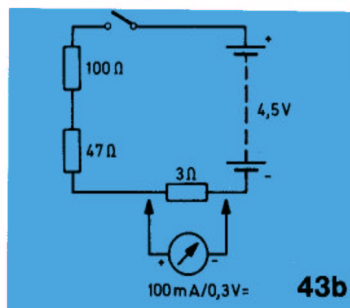


oder

$$R_g = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$



43a



43b

Verwendet man Widerstände von $100\ \Omega$ und $47\ \Omega$ ergibt sich nach der Berechnung

$$R_g = 100\ \Omega + 47\ \Omega$$

$$R_g = 147\ \Omega$$

ein Gesamtwiderstand von $147\ \Omega$.

Schaltet man das Meßgerät (Meßbereich $100\ \text{mA}$, Shunt $3,01\ \Omega$) nacheinander vor (Abb. 43a), zwischen und hinter (Abb. 43b) die Widerstände, so wird jedesmal ein gleichstarker Strom von ca. $30\ \text{mA}$ angezeigt.

In einer Reihenschaltung fließt überall ein gleichstarker Strom, d. h. auch in allen Widerständen ist die Stromstärke gleich groß.

Aus dem Gesamtwiderstand der Reihenschaltung ($100\ \Omega + 47\ \Omega = 147\ \Omega$) nach Abb. 43 läßt sich der Strom errechnen:

$$I = \frac{4,5\ \text{V}}{147\ \Omega}$$

$$I = 0,03\ \text{A}$$

Dieser Strom erzeugt an den in Reihe geschalteten Widerständen jeweils einen Spannungsabfall, der sich nach dem Ohmschen Gesetz errechnet:

für $R_1 = 47\ \Omega$ gilt:

$$U = R \cdot I$$

$$U = 47 \cdot 0,03$$

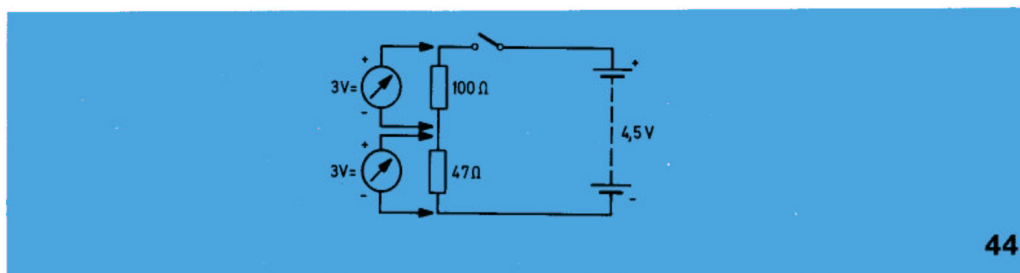
$$U \sim 1,5\ \text{V}$$

Für $R_2 = 100\ \Omega$ gilt:

$$U = R \cdot I$$

$$U = 100 \cdot 0,03$$

$$U \sim 3\ \text{V}$$

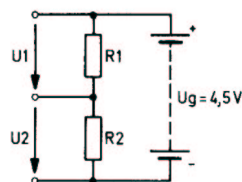


Mit dem Meßgerät (Meßbereich $10\ \text{V}$), läßt sich der nach dem Ohmschen Gesetz errechnete Spannungsabfall an jedem Widerstand überprüfen (Abb. 44). Die Summe der Teilspannungen entspricht der angelegten Gesamtspannung (abgekürzt U_g)

$$U_g = U_1 + U_2$$

$$U_g = 1,5 + 3$$

$$U_g = 4,5\ \text{V}$$

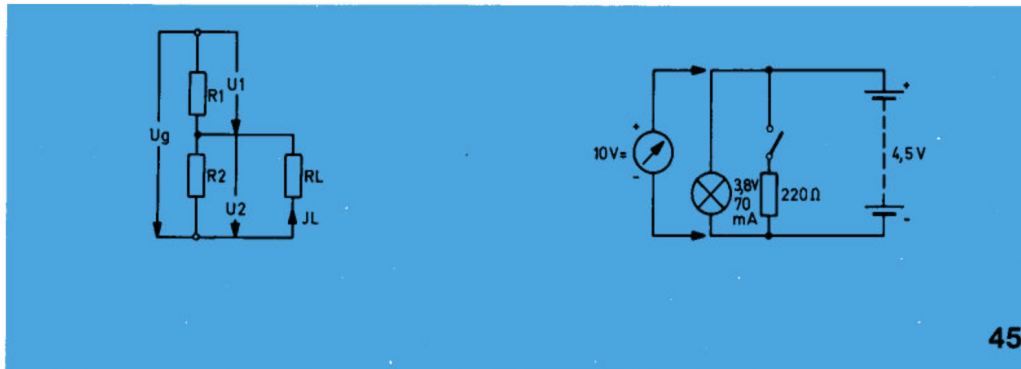


In einer Reihenschaltung mit mehreren Widerständen gilt entsprechend, daß die Gesamtspannung gleich der Summe aller Teilspannungen ist.

$$U_g = U_1 + U_2 + U_3 + \dots U_n$$

Die Reihenschaltung von Widerständen bietet eine wichtige schalttechnische Möglichkeit, die sogenannte **Spannungsteilung**.

Besteht ein Spannungsteiler aus zwei in Reihe geschalteten Widerständen R_1 und R_2 , so kann die angelegte Batteriespannung in zwei Spannungen (U_1 / U_2) aufgeteilt werden. Durch entsprechende Wahl von R_1 und R_2 können Spannungswerte zwischen Null und der Gesamtspannung U_g eingestellt werden, um für bestimmte Bauteile innerhalb einer Schaltung verschieden hohe Spannungen abzugreifen. Dabei muß beachtet werden, daß die abgegriffene Spannung um so konstanter ist, je größer der Strom ist, der durch den Spannungsteiler R_1 / R_2 fließt (Querstrom). Man wählt den Querstrom mindestens 10 mal so groß wie den Laststrom I_L , der durch R_L fließt.



Die Spannungs- und Stromverhältnisse ändern sich, wenn Widerstände parallel in einen Stromkreis geschaltet werden. Die Schaltung nach Abb. 45 zeigt eine Parallelschaltung von Widerstand und Glühlampe, wobei die Glühlampe als Widerstand betrachtet wird.

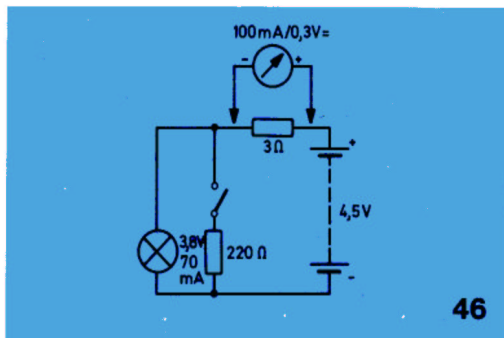
Da beide Widerstände in der Parallelschaltung direkt an der Spannungsquelle liegen, muß die Spannung an beiden gleich groß sein. Das bestätigt die Messung.

Anders verhält es sich mit den Strömen. Man schaltet den Shunt des Meßgeräts (Meßbereich 100 mA, Shunt $3,01 \Omega$) so in den Stromkreis (Abb. 46), daß der Gesamtstrom bei geschlossenem Schalter gemessen werden kann. Er beträgt ca. 100 mA bei einem Widerstand von $R = 220 \Omega$. Öffnet man den Schalter, fließt ein Strom von ca. 80 mA durch die Glühlampe. Der Lampenwiderstand beträgt also

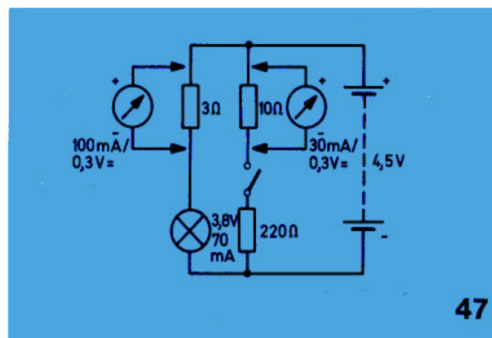
$$R = \frac{U}{I}$$

$$R = \frac{4,5}{0,08}$$

$$R = 56,25 \Omega$$



46

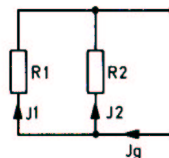


47

Anschließend werden mit dem Meßgerät, wie in Abb. 47, nacheinander die Ströme im Widerstand und der Lampe gemessen.

Durch jeden Zweig fließt ein Strom. Die Summe der beiden Teilströme entspricht dem Gesamtstrom in der gemeinsamen Zuleitung, der in Schaltung Abb. 46 gemessen wurde. Der Gesamtstrom (abgekürzt I_g) verzweigt sich in die einzelnen Strombahnen. Für das Beispiel aus Schaltung 47 gilt

$$I_g = I_1 + I_2$$



Hieraus läßt sich der wirksame Widerstand in der Schaltung errechnen. Da der Gesamtstrom (I_g) 100 mA beträgt, ergibt sich nach dem Ohmschen Gesetz.

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

$$R = \frac{4,5}{0,1}$$

$$R = 45 \Omega$$

Man erkennt, daß der wirksame Widerstand kleiner als der kleinste Widerstand ist.

Der Physiker Robert Kirchhoff untersuchte unter anderem die Verhältnisse bei Stromverzweigungen und faßte seine Erkenntnisse in den folgenden Gesetzen zusammen (Kirchhoffsche Gesetze).

1. Kirchhoffsches Gesetz:

Bei Stromverzweigung ist der Gesamtstrom gleich der Summe aller Teilströme

$$I_g = I_1 + I_2 + I_3 + \dots I_n$$

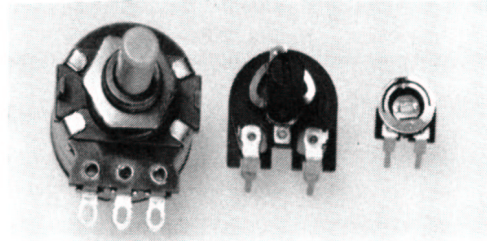
Ein Vergleich der Teilstromstärken mit den entsprechenden Widerstandswerten wird ausgedrückt durch das

2. Kirchhoffsche Gesetz:

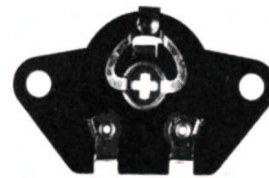
Je größer der Widerstand, desto kleiner der Stromdurchfluß; je kleiner der Widerstand, desto größer der Stromdurchfluß.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Eine besondere Art der Spannungsteilerschaltung läßt sich mit einem veränderbaren Widerstand, einem **Potentiometer** (Abb. 48) aufbauen. Bei Potentiometern ist das Widerstandsmaterial auf einem Ring angeordnet (Abb. 49).

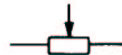


48

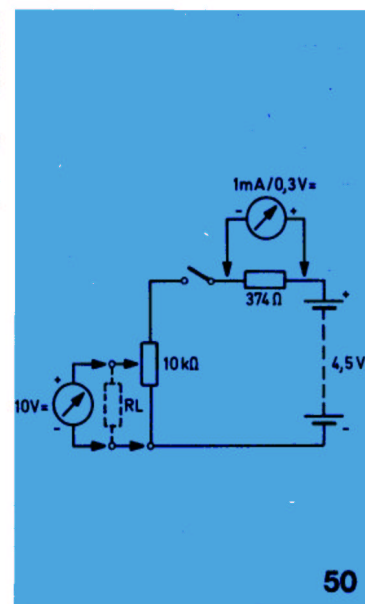
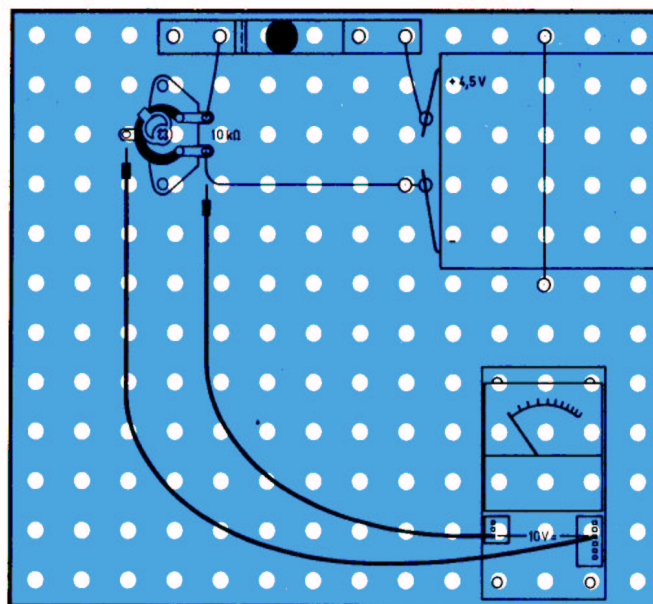


49

Bei diesem Potentiometer besteht das Widerstandsmaterial aus einer Kohleschicht, an deren Enden die Außenanschlüsse liegen. Über einen Schleifer als Mittelanschluß und einen der Außenanschlüsse läßt sich ein beliebig kleiner Teil des Gesamtwiderstandes abgreifen. Als Schaltzeichen für ein Potentiometer verwendet man folgendes Symbol:



In der Potentiometerschaltung nach Abb. 50 wird zunächst das Meßgerät (Meßbereich 1 mA, Shunt $374\ \Omega$) als Amperemeter eingesetzt. Verändert man den Widerstandswert am Potentiometer, zeigt das Meßgerät immer denselben Strom von ca. 0,45 mA an.

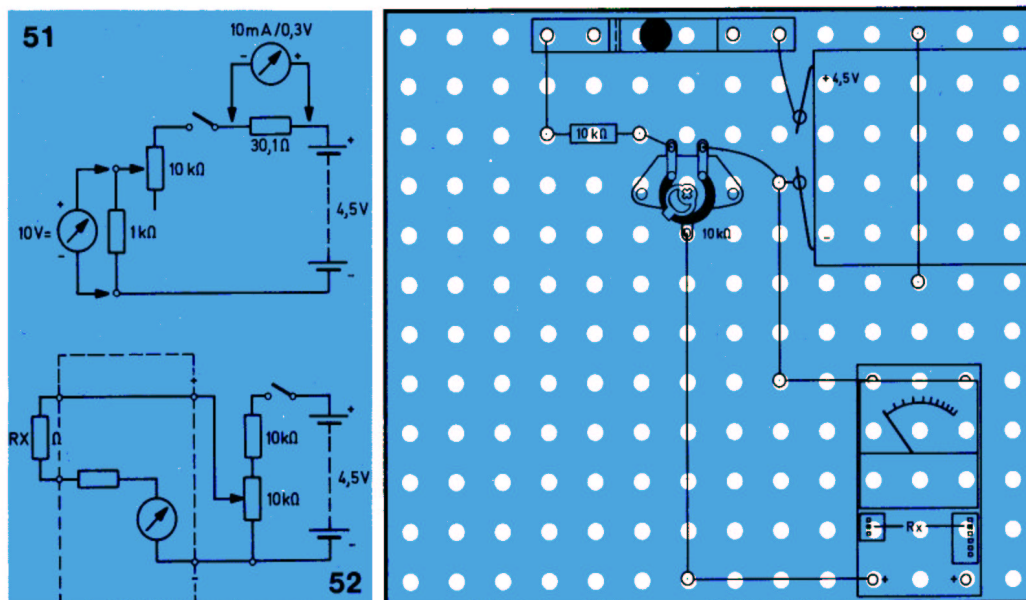


50

Um die Spannungsteilung der Potentiometerschaltung zu untersuchen, setzt man das Meßgerät (Meßbereich 10 V) so als Spannungsmesser ein, daß die Spannung zwischen Mittelanschluß und dem Minuspol der Batterie gemessen wird (Abb. 50). Betätigt man das Potentiometer, so zeigt der Ausschlag am Meßgerät, daß jede Spannung zwischen 0 und 4,5 V einstellbar ist.

In elektronischen Schaltungen ergibt sich mitunter die Notwendigkeit, bestimmte Bauteile vor zu hohen Spannungen zu schützen, wenn ein Strom fließt. Das kann man mit Widerständen erreichen, die in Reihe vor das betreffende Bauteil geschaltet werden. Solche Widerstände heißen **Vorwiderstände**. Ein Vorwiderstand muß stets so bemessen sein, daß durch entsprechenden Spannungsabfall, das in Reihe geschaltete Bauteil, nur mit der zulässigen Spannung versorgt wird. Bei Verwendung eines Potentiometers als Vorwiderstand läßt sich der Spannungsabfall den Vorgaben entsprechend einstellen. In Schaltung Abb. 51 kann die Spannung am Widerstand mit dem Potentiometer verändert werden. Bei zunehmendem Widerstandswert des Potentiometers nimmt die Spannung am Widerstand ab. Diese Spannungsänderung zeigt das Meßgerät an.

Diese Spannungsänderung bewirkt auch eine Änderung des Stroms. Sie kann mit dem Meßgerät (Meßbereich 10 mA, Shunt $30,1\ \Omega$) als Amperemeter nachgewiesen werden (Abb. 51).



In der Schaltung nach Abb. 52 wird das Meßgerät zur Bestimmung von Widerstandswerten eingesetzt. Für die **Widerstandsmessung** muß das Instrument zunächst so abgeglichen werden, daß der Zeiger Vollausschlag aufweist. Dazu überbrückt man die Klemmen $-\Omega-$ mit einer Drahtverbindung, drückt den Tastschalter und regelt mit dem Potentiometer bis das Meßgerät Vollausschlag zeigt. Das entspricht einem Widerstandswert von $0\ \Omega$. Der Widerstand zwischen Potentiometer und $+$ Pol der Batterie verhindert, daß eine zu große Spannung an das Meßgerät gelangen kann. Schaltet man nun einen unbekannten Widerstand R_x zwischen die Klemmen $-\Omega-$, kann der Widerstandswert abgelesen werden, da durch

jeden eingesetzten Widerstand der Strom im Kreis verringert wird. Je größer der Widerstand desto kleiner die Stromstärke. Als Widerstandsmesser zeigt das Instrument umgekehrt an:

kleiner Widerstand – großer Zeigerausschlag

großer Widerstand – kleiner Zeigerausschlag

31 Widerstandsmessung

Bei einer Reihenschaltung von Widerständen wirken alle zusammen wie ein großer Widerstand, denn die Elektronen werden auf dem Weg vom Minus- zum Pluspol in jedem Widerstand entsprechend gehemmt.

In die Widerstandsmeßschaltung wird wie in Abb. 53 zunächst der Widerstand $R_3 = 2,2 \text{ k}\Omega$ eingesetzt. Auf der Skala des Meßgerätes ist der Wert direkt ablesbar. Schaltet man R_2 und später auch R_1 in Reihe mit R_3 , fällt der Zeiger des Meßgerätes immer weiter ab – es wird immer die Summe der eingesetzten Teilwiderstände angezeigt. Für die Reihenschaltung von Widerständen ergibt sich danach folgende Berechnung für den Gesamtwiderstand R_g

$$R_g = R_1 + R_2 + R_3 + \dots R_n$$

Die Teilwiderstände lassen sich auch durch einen einzigen Widerstand ersetzen.

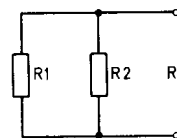
Bei der Parallelschaltung von Widerständen gilt nach dem 1. Kirchhoffschen Gesetz, daß der Gesamtstrom gleich der Summe der Teilströme ist.

Daraus hat er folgende Formel entwickelt:

$$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \frac{1}{R_n}$$

Für zwei Widerstände gilt die vereinfachte Formel:

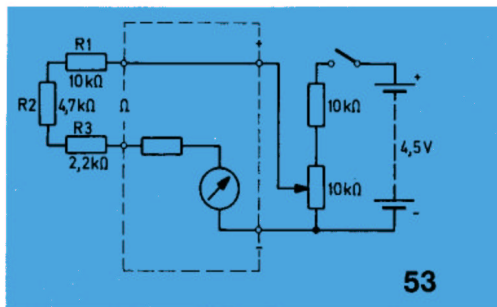
$$R_g = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$



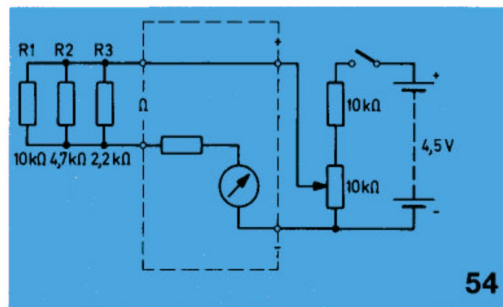
Für Abb. 46 ergibt sich nach dieser Formel folgender Gesamt-Widerstand:

$$\begin{aligned} R_g &= \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \\ R_g &= \frac{220 \cdot 56,25}{220 + 56,25} \\ R_g &= \frac{12,375}{276,25} \\ R_g &\approx 44,8 \end{aligned}$$

Durch das Zuschalten eines Parallelwiderstandes erhöht sich der Gesamtstrom um den Teilstrom, der durch den zugeschalteten Widerstand fließt. Schaltet man wie in Abb. 54 mehrere Widerstände parallel zueinander, so ergibt die Messung, daß sich der Gesamtwiderstand mit jedem Parallelwiderstand vermindert. Dabei wird deutlich, daß die Einzelwiderstände alle größer sind als der Gesamtwiderstand oder,

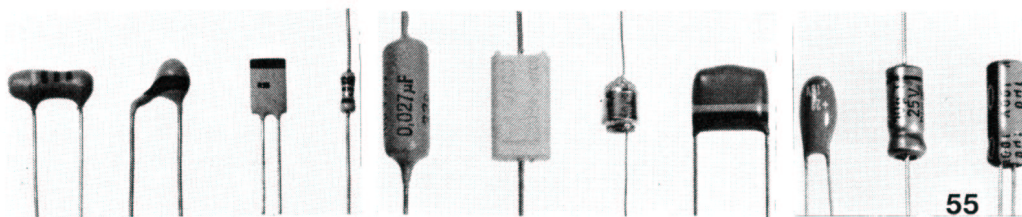


53



54

anders ausgedrückt, ist der Gesamtwiderstand immer kleiner als der kleinste Einzelwiderstand.

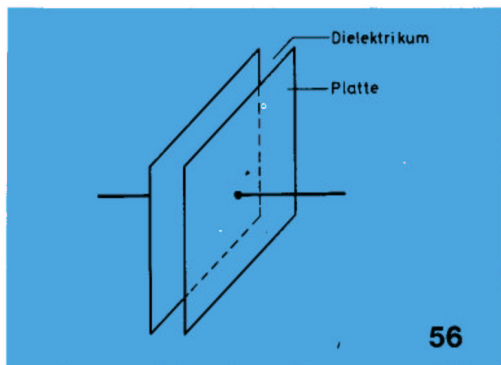


55

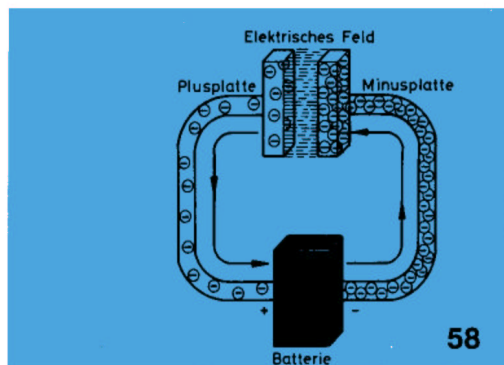
Ein Bauelement mit der Fähigkeit, elektrische Energie zu speichern, ist der **Kondensator**. Nach dem verwendeten Material unterscheidet man verschiedene Kondensatortypen, die jeweils für ein bestimmtes Anwendungsgebiet benötigt werden. Es sind vorwiegend keramische Kondensatoren, Folien-Kondensatoren und Elektrolyt-Kondensatoren (Abb. 55). Außerdem verwendet man auch veränderbare Kondensatoren (Drehkondensatoren). Sie haben folgende Schaltsymbole:

Keramischer und Folien-Kondensator:	
Elektrolyt-Kondensator:	
Drehkondensator:	

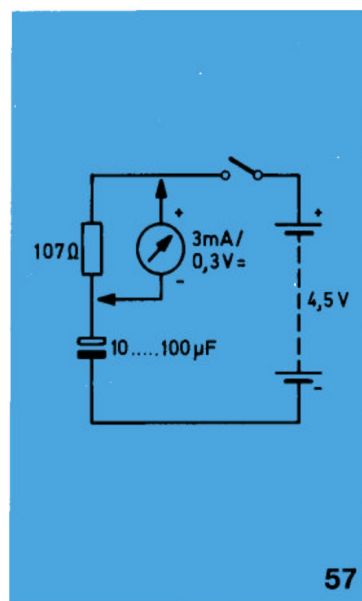
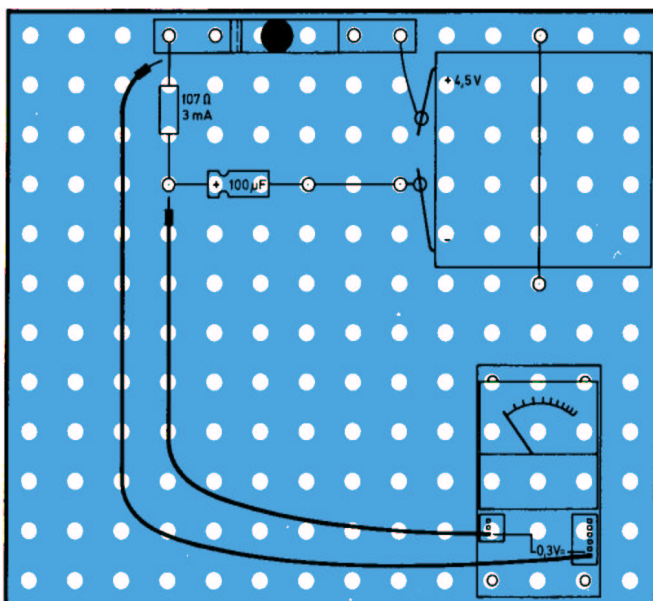
Elektrolytkondensatoren werden dort eingesetzt, wo eine hohe Speicherkapazität bei geringen Abmessungen erforderlich ist. Sie sind meistens gepolt und deshalb nur für Gleichstrom verwendbar. Beim Einsetzen in den Schaltkreis muß unbedingt auf die richtige Polung geachtet werden, da sonst der Kondensator zerstört wird. Kondensatoren bestehen im Prinzip aus zwei Metallplatten oder Metallfolien, die einander isoliert gegenüberstehen. Als Isolation kann Luft dienen. Meist werden aber Isolierstoffe aus Keramik oder Kunststoff verwendet. Die Isolierschicht, das **Dielektrikum**, verhindert, daß Elektronen von einer zur anderen Metallplatte gelangen (Abb. 56). Es kann deshalb kein Strom durch den Kondensator fließen. Trotzdem haben Kondensatoren in elektrischen Schaltkreisen eine wichtige Funktion zu erfüllen. Wird ein Kondensator an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen, fließt kurzzeitig ein **Ladestrom**. Dabei gelangen Elektronen auf die eine Platte, während von der anderen Platte Elektronen abfließen. Sind beide Platten entsprechend geladen, so fließt kein Ladestrom mehr, obwohl die Spannungsquelle noch anliegt.



56



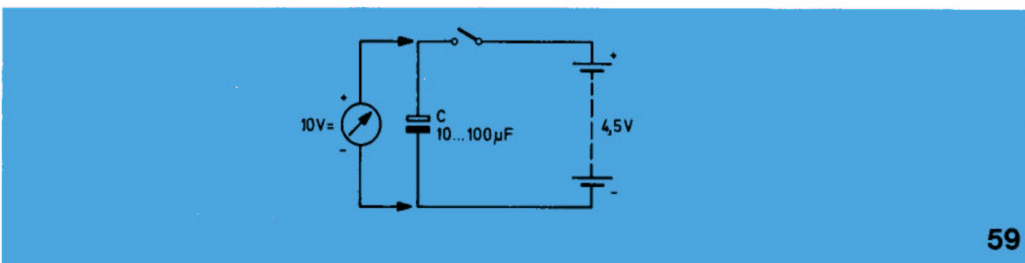
58



57

In der Schaltung nach Abb. 57 mit dem Elko $100\mu\text{F}$ kann beim Schließen des Stromkreises der Ladestrom mit dem Amperemeter (Meßbereich 3mA , Shunt 107Ω) nachgewiesen werden.

Zwischen den beiden Platten bildet sich ein elektrisches Feld aus, das in Abb. 58 schematisch dargestellt ist. Das elektrische Feld füllt das Dielektrikum so aus, wie das magnetische Feld den Raum um einen Magneten. Um den Versuch nach Abb. 59 durchführen zu können, wird der Kondensator erneut aufgeladen.



59

Entfernt man die Spannungsquelle durch Öffnen des Schalters, bleiben der Ladungsunterschied und das elektrische Feld zwischen den Platten bestehen. Das Meßgerät parallel zum Kondensator zeigt kurzfristig diese Spannung an. Gleichzeitig erfolgt über das Meßgerät eine Entladung. Dabei werden die Elektronen vom elektrischen Feld angetrieben. Der aufgeladene Kondensator ist in der Lage, einen **Entladestrom** in entgegengesetzter Richtung durch den Stromkreis zu treiben, und zwar so lange, bis die Ladungen auf den Kondensatorplatten ausgeglichen sind. Er stellt also kurzzeitig selbst eine Spannungsquelle dar. Wiederholt man die Versuche nach Abb. 57 und Abb. 59 mit dem 10 μ F Elko, dann erhält man einen kleineren Ladestrom, und die Spannung beim Entladen fällt schneller ab.

Beide Kondensatoren besitzen unterschiedliche Fassungsvermögen für die elektrische Energie.

Dieses Fassungsvermögen wird als **Kapazität** bezeichnet. Sie hängt unter anderem von der Größe der Platten und dem Dielektrikum ab. Die Maßeinheit für die Kapazität – Formelzeichen C – ist das Farad (nach dem englischen Physiker Michael Faraday), das mit F abgekürzt wird. Ein Kondensator besitzt dann die Kapazität von einem Farad, wenn bei einem Ladestrom von 1 Ampere die Spannung innerhalb einer Sekunde um 1 Volt ansteigt.

$$1 \text{ F} = 1 \frac{\text{As}}{\text{V}}$$

Da die Einheit 1 Farad sehr groß ist und die in der Praxis benutzten Kondensatoren meist wesentlich kleinere Kapazitätswerte haben, verwendet man für die Angabe der Maßeinheit Kurzbezeichnungen für dezimale Unterteilungen.

1 Millifarad	1 mF = 0,001 F
1 Mikrofarad	1 μ F = 0,000 001 F
1 Nanofarad	1 nF = 0,000 000 001 F
1 Pikofarad	1 pF = 0,000 000 000 001 F

Für die Bestimmung der Werte radialer keramischer Kondensatoren gilt im Prinzip die gleiche Tabelle wie für die Widerstände. Nur haben sie nicht gold oder silber als vierte Farbe. Die Grundfarbe hat für die Bestimmung des Wertes keine Bedeutung. Dafür können sie je nach Temperatur und Toleranz einen vierten und fünften Farbring tragen.

Der keramische Kondensator hat zwei Drahtanschlüsse. Diese Anschlüsse haben nicht den gleichen Abstand vom jeweiligen Ende des Kondensatorkörpers. Der eine Zwischenraum zwischen Kondensator-Ende und Anschlußdraht ist kürzer. Um die Werte der Farbringe richtig abzulesen, muß der kurze Anschlußdraht links liegen. Dann lassen sich die Werte der Farbringe genauso ablesen wie bei den Widerständen (Abb. 60).

Nicht alle keramischen Kondensatoren haben Farbringe, sondern auf einige ist der Wert als Zahl gedruckt (Abb. 61). Steht die Zahl allein, drückt der Wert die Kapazität in pF aus.

b. Vollständige Farbkennzeichnung

Grundfarbe	Typ	Farbe der oder des breiten Streifens	Handelsname
grau	1B	rot + violett	P 100
		schwarz	NP 0
		rot	N 075
		orange	N 150
		gelb	N 220
		grün	N 330
		blau	N 470
		violett	N 750
		orange + orange	N 1500

Farbe der vier schmalen Streifen	1. Ziffer des Kapazitätswertes	2. Ziffer des Kapazitätswertes	Multiplikator	Kapazitätstoleranz	
			für Kapazitätswert in pF	C < 10 pF in pF	C ≥ 10 pF in %
schwarz		0	1		± 20
braun	1	1	10 ⁻²	± 0,1	+ 1
rot	2	2	10 ⁻¹	± 0,25	± 2
orange	3	3	10 ⁰		
gelb	4	4	10 ¹		
grün	5	5		± 0,5	± 5
blau	6	6			
violett	7	7			
grau	8	8	10 ⁻²		
weiß	9	9	10 ⁻¹	± 1	± 10

Kennzeichnungsbeispiel



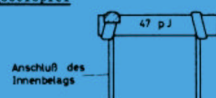
Die Farbstreifen werden vom Anschluß des Innenbelages beginnend gelesen.

60

a. Kennzeichnung durch		
Grundfarbe	Farbzeichen	Aufschrift

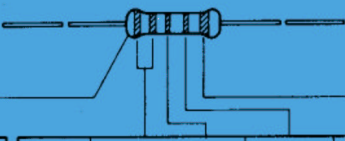
Grundfarbe	Typ	Farbzeichen ¹⁾	Handelsname	Ziffern + Buchstabe	Zahlenwert der Kapazität in pF, nF oder μ F	größer Buchstabe	Kapazitätstoleranz	kleiner Buchstabe ²⁾	Nennspannung
							$C < 10 \text{ pF}$ in pF $C \geq 10 \text{ pF}$ in %		
farblos oder grau	1B	rot+violett	P 100	Buchstabe an Komastelle p für pF n für nF μ für μ F		B	$\pm 0,1$	a	50 V
		schwarz	NP 0		C	$\pm 0,25$	b	125 V	
		rot	N 075		D	$\pm 0,5$	c	160 V	
		orange	N 150		F	± 1	d	250 V	
		gelb	N 220		G	± 2	e	350 V	
		grün	N 330		H	$\pm 2,5$	f	700 V	
		blau	N 470		J	± 5	g	1000 V	
		violett	N 750		K	± 10			
		orange+orange	N 1500		M	± 20			

Kennzeichnungsbeispiel



Die kleinen Abmessungen mancher Kondensatoren lassen eine vollständige Beschriftung jedoch nicht immer zu.

61



Grund- farbe	Nenn- span- nung	Farbe der Ringe	Kapazitätswert in pF		Toleranz der Kapazität	Werkstoff	
			1. u. 2. Ziffer	Multi- plikator		Typ 1	Typ 2
hell-grün	50 V-	schwarz	0	10 ⁰	± 20 %	NP0	
rosa	25 V-	braun	1	10 ¹		N30	Y
rosa ¹⁾	16 V-	rot	2	10 ²		N80	SD
		orange	3	10 ³		N150	
		gelb	4	10 ⁴		N220	
		grün	5			N330	
		blau	6			N470	
		violett	7		± 30 %	N750	
		grau	8				X
		weiß	9			SL	
		gold		10 ⁻¹	± 5 %		V
		silber		10 ⁻²	± 10 %		SB

62

Axiale keramische Kondensatoren unterscheiden sich äußerlich nur wenig von Widerständen. Deshalb ist manchmal nur mit einem Ohmmeter feststellbar, ob es sich um einen Widerstand oder Kondensator handelt. Aus der vorstehenden Tabelle läßt sich der Wert bestimmen (Abb. 62).

Auf den Elektrolyt-Kondensatoren sind die Werte in μF aufgedruckt. Es kann aber auch Zahl/Zahl zu finden sein. Dann haben die Zahlen folgende Bedeutung:

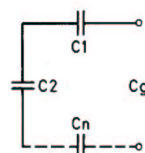
$$\frac{100}{10} \\ \mu F / Volt$$

Keine Bedeutung für den Wert haben die Zahlen, die mit C gekennzeichnet sind.

Wie Widerstände oder andere Bauteile können auch Kondensatoren sowohl in Reihen- als auch in Parallelschaltung verwendet werden.

Die **Reihenschaltung** von Kondensatoren entspricht einer Vergrößerung des Plattenabstandes und bewirkt damit eine Kapazitätsverringering. Dabei ist die Gesamtkapazität stets kleiner als die kleinste Einzelkapazität. Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel:

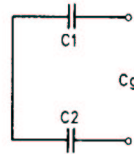
$$\frac{1}{C_g} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$



39

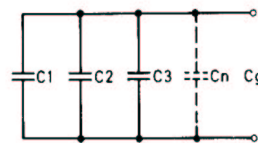
Für die Reihenschaltung von zwei Kondensatoren gilt:

$$C_g = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

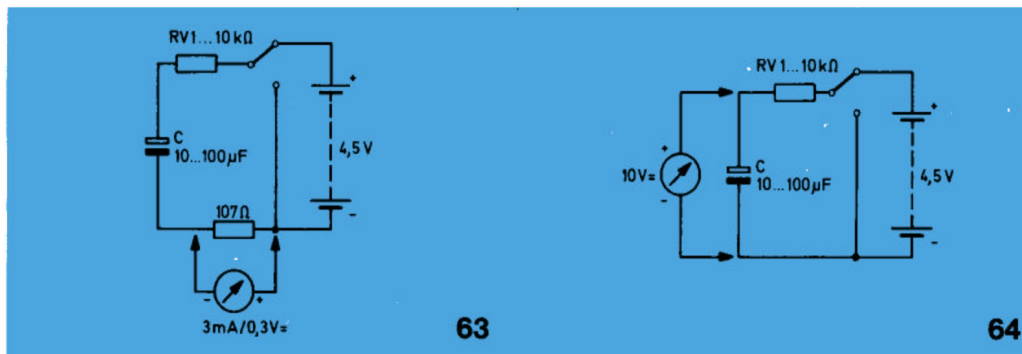


Die Parallelschaltung von Kondensatoren entspricht einer Vergrößerung der Speicherfläche und bewirkt eine Kapazitätsvergrößerung. Die Gesamtkapazität ist gleich der Summe der Einzelkapazitäten.

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$



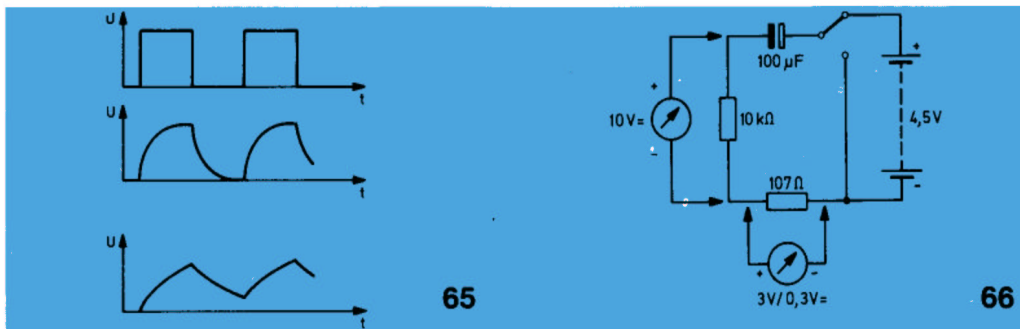
Werden ein Kondensator und ein Widerstand in Reihe an eine Spannungsquelle angeschlossen (Abb. 63), fließt beim Schließen des Schalters der größte Ladestrom, da der Kondensator völlig leer und entsprechend aufnahmefähig ist. Mit zunehmender Aufladung wird der Ladestrom geringer. Er ist beendet, wenn die Spannung am Kondensator der angelegten Betriebsspannung entspricht. Dann ist der Kondensator geladen. Das Verhalten von Strom und Spannung beim Aufladen läßt sich mit dem Meßgerät (Strom = Meßbereich 3 mA, Shunt 107Ω / Spannung = Meßbereich 10 V) in zwei getrennten Messungen für Strom (Abb. 63) und die Spannung (Abb. 64) überprüfen.



Die Spannungsmessung am geladenen Kondensator (Abb. 64) zeigt kurzfristig die volle Betriebsspannung. Sofort erfolgt eine Entladung des Kondensators über das Meßgerät, die Spannung geht auf Null zurück. Entsprechend sinkt auch der Strom auf Null.

Mit dem Umschalter in Schaltung nach Abb. 63 und 64 lassen sich Rechteckimpulse erzeugen, die durch eine Kombination von Widerstand und Kondensator in Reihe verformt werden.

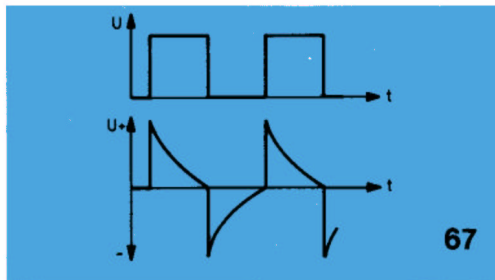
Bei Schalterstellung A erfolgt über den Widerstand R_V die Aufladung des Kondensators. Beim Umschalten entlädt sich der Kondensator, der Entladestrom wird am Strommeßgerät (Meßbereich 3 mA, Shunt $107\ \Omega$) angezeigt. Eine Spannungsmessung (Meßbereich 10 V) wie in Abb. 64 zeigt im Einschaltmoment einen starken Spannungsanstieg, der mit zunehmender Aufladung abnimmt. Für einen festen Umschaltrhythmus spielt die Bemessung der Bauelemente der Kondensator-Widerstands-Kombination für die Verformung eine entscheidende Rolle. Bei kleinem Ladewiderstand $R_V = 1\ \text{k}\Omega$ erfolgt eine schnellere Aufladung mit steilerer Anstiegsflanke. Wird der Ladewiderstand vergrößert ($R_V = 10\ \text{k}\Omega$), so verflachen die Anstiegsflanken. Bei einer Vergrößerung der Kapazität des Kondensators wird die Aufladezeit verlängert, was eine Änderung des Spannungssignals zur Folge hat. Auch beim Entladen laufen die Vorgänge in Abhängigkeit von der Größe des Kondensators und des Widerstandes ab. Durch entsprechende Kombination von Kondensator und Widerstand lassen sich Impulse ganz bestimmter Form, z. B. mit sägezahnartigem Verlauf (Abb. 65) erzeugen.

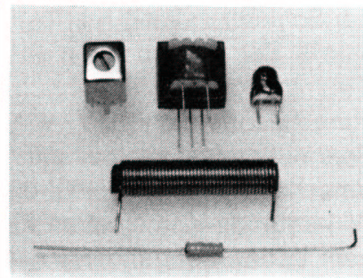
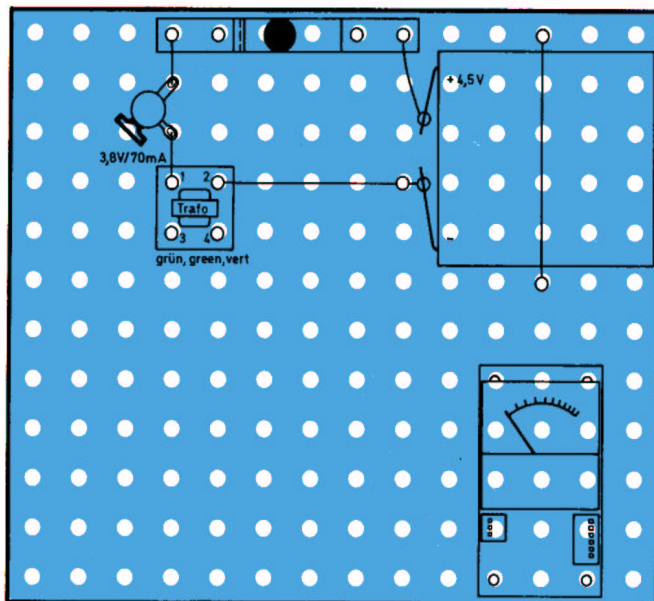


Durch eine RC-Kombination verformte Rechteckimpulse werden häufig in elektronischen Geräten benötigt, um Steuerungs- oder Schaltvorgänge auszulösen. So wird z. B. im Fernsehgerät das Bild zeilenweise durch einen Elektronenstrahl geschrieben, der mit präzise geformten Impulsen geführt wird.

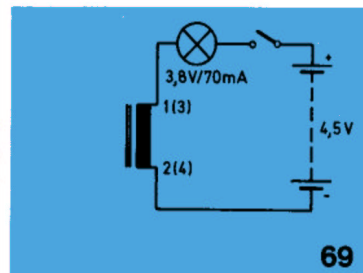
Eine andere Kondensator-Widerstands-Kombination ist das Differenzierglied nach Abb. 66. Beim Einschalten lädt sich der Kondensator auf, es fließt ein Ladestrom. Nach der Aufladung zeigt das Amperemeter keinen Strom mehr an, obwohl die Stromquelle noch angeschlossen ist.

Nach dem Öffnen des Schalters, die Stromquelle ist dann ausgeschaltet, fließt kurzzeitig ein hoher Entladestrom in entgegengesetzter Richtung, den das Meßgerät anzeigt. Die Spannungsmessung am Widerstand $10\ \text{k}\Omega$ zeigt den Verlauf nach Abb. 67.





68



69

Ein weiteres Bauelement, das in der Elektronik Verwendung findet, ist die **Spule** – ein auf einem Träger aufgewickelter langer Draht (Abb. 68). Um die Eigenschaften einer Spule zu untersuchen, verwendet man den **Transformator**, der aus zwei Spulen besteht, die auf einen Spulenkörper gewickelt sind. In Schaltung nach Abb. 69 wird eine Spule – zunächst die Anschlüsse 1 + 2 – in einen Stromkreis mit einer Lampe geschaltet. Schließt man den Schalter, so wird die Spule vom Strom durchflossen, die Glühlampe leuchtet. Schaltet man die Anschlüsse 3 und 4 in Reihe mit der Glühlampe an, fließt ein geringer Strom, die Lampe leuchtet aber nicht. Dieser Transformator enthält zwei Spulen, die unterschiedlich große Windungszahlen haben. Die Spule an den Anschlüssen 3 und 4 hat eine 6 mal so große Windungszahl wie die an den Anschlüssen 1 und 2. Der Widerstand bei Spule 3 und 4 ist dadurch so groß, daß die Lampe nicht mehr leuchten kann.

Eine vom Strom durchflossene Spule verhält sich wie ein **Magnet**. Sie baut um sich herum ein magnetisches Feld auf, so wie es beim Stabmagneten dauernd vorhanden ist. Der Elektromagnetismus einer Spule hat gegenüber dem Permanentmagnetismus eines Stabmagneten den Vorteil, daß er schaltbar ist. Mit dem Strom, der durch den Elektromagneten – die Spule – fließt, kann man den Magnetismus ein- und ausschalten und auch seine Stärke verändern. Bei hochwertigen Spulen legt man großen Wert darauf, daß keine Magnetwirkung nach außen dringt. Deshalb läßt sich der **Elektromagnetismus** an dieser guten Spule nicht ohne weiteres nachweisen.

Die Beziehung zwischen elektrischem Strom und Magnetismus läßt sich auch umkehren. Zur Veranschaulichung baut man die Schaltung nach Abb. 70 auf. Die Spule 1 + 2 des Transformators ist ohne Zwischenschaltung einer Batterie direkt mit dem Meßgerät (Bereich 0,3 V) verbunden. Streicht man nun mit einem Stabmagneten über den Transformator, so zeigt das Meßgerät einen Stromstoß an. Erfolgt

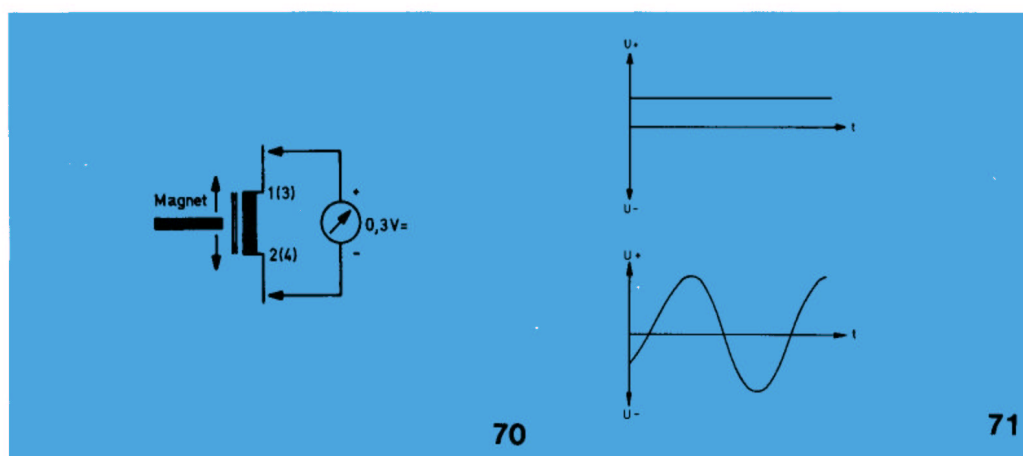
zunächst kein Ausschlag, so erhält man ihn, wenn man mit dem Magneten in entgegengesetzter Richtung über den Transformator streicht. Kehrt man den Stabmagneten um, erfolgt der Ausschlag des Meßgerätes in umgekehrter Richtung.

Die Erzeugung eines elektrischen Stromes durch ein sich änderndes Magnetfeld nennt man **elektrische Induktion**. Nach diesem Prinzip arbeiten alle Generatoren in den Kraftwerken, der Fahrraddynamo und die Lichtmaschine im Auto. Wiederholt man das Experiment mit den Anschlüssen 3 und 4 ist ein größerer Ausschlag festzustellen. Die Spule 3 und 4 hat eine höhere Windungszahl. Es wird deshalb eine höhere Spannung induziert.

Ebenso vergrößert sich die Induktionsspannung bei Verwendung eines stärkeren Magnetfeldes.

Die Stromrichtung ist von der Polung des Magnetfeldes und seiner Bewegungsrichtung abhängig. Durch Hin- und Herbewegen des Magneten über dem Transformator erhält man also einen elektrischen Strom, der seine Richtung fortlaufend ändert, einen **Wechselstrom**.

Stellt man den Verlauf einer Gleichspannung und einer **Wechselspannung** grafisch dar (Abb. 71), so erkennt man die grundsätzlichen Unterschiede:



Beim Betätigen des Schalters steigt die Spannung z. B. bei einer Batterie von 4,5 V auf den vollen Wert an, und diese Spannung bleibt so lange erhalten, bis der Schalter wieder betätigt wird. Auf der senkrechten Achse des Koordinatensystems trägt man deshalb die Spannung ein, auf der waagerechten die Zeit.

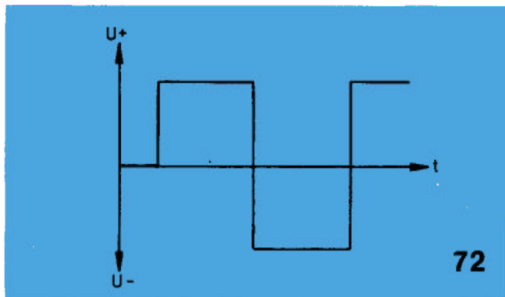
Polt man die Batterie um, so liegt eine negative Spannung vor.

Von einer Wechselspannung spricht man, wenn sie regelmäßig ihre Richtung ändert und einmal im positiven und dann im negativen Bereich verläuft (Abb. 72).

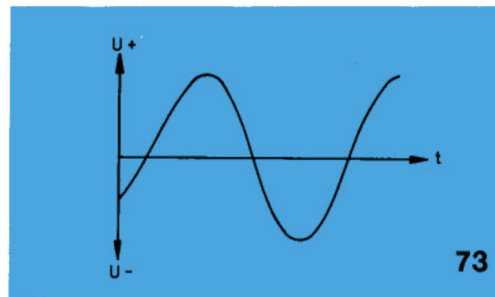
Hier ist die Wechselspannung rechteckförmig. Wechselspannung kann auch den Kurvenverlauf nach Abb. 73 haben.

Das Kurzzeichen für eine Wechselspannung sieht deshalb auch wie eine Welle aus:

~



72

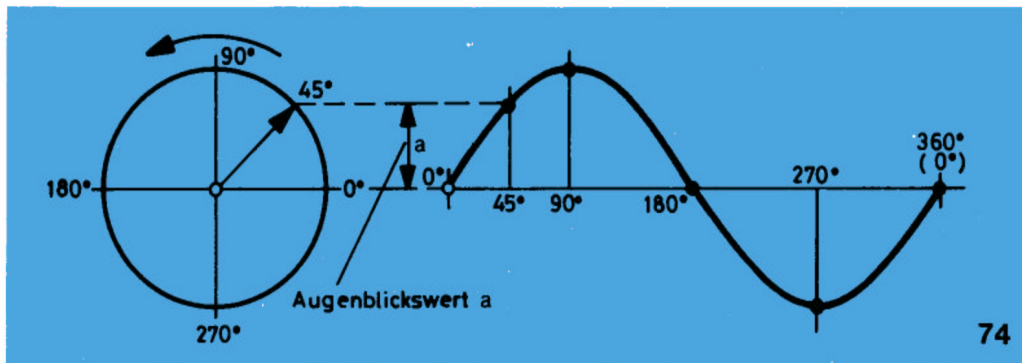


73

Für technische Zwecke ist es wichtig zu wissen, mit welcher Geschwindigkeit das Wechseln der Polarität einer Spannung erfolgt.

Geht man davon aus, daß eine Wechselspannung eingeschaltet wird, dann ist sie im Moment des Einschaltens gleich 0 Volt. Sie steigt dann kontinuierlich bis zu einem Höchstwert an, um allmählich wieder auf 0 abzufallen. Sie steigt nun im negativen Bereich bis zum Höchstwert an, fällt wieder auf 0 ab. Diesen Vorgang » 0 V, + Höchstwert, 0 V, – Höchstwert, 0 V « nennt man **Periode**. Läuft eine Periode in einer Sekunde ab, dann hat die Wechselspannung eine **Frequenz** (Häufigkeit) von **1 Hertz**. Diese Maßeinheit Hertz für die Frequenz wurde nach dem deutschen Physiker Heinrich Hertz benannt, der sich sehr mit Schwingungsvorgängen befaßte. Bei hohen Frequenzen verwendet man Vielfache der Einheit Hertz:

1 Kilohertz	(kHz) = 1 000 Hertz
1 Megahertz	(MHz) = 1 000 000 Hertz
1 Gigahertz	(GHz) = 1 000 000 000 Hertz

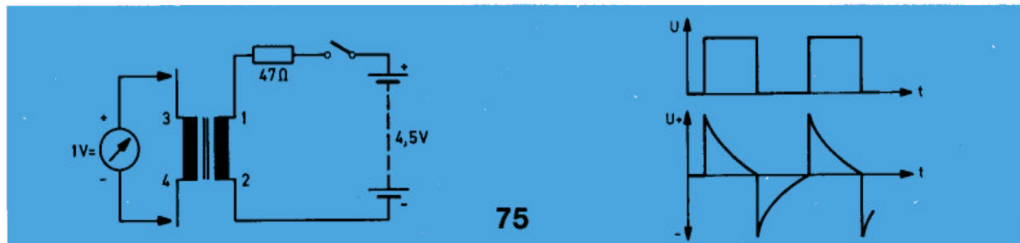


74

Eine Wechselspannungskurve wie in Abb. 74 nennt man eine **Sinuskurve**. Eine solche Kurve läßt sich aus einem Kreis konstruieren, dessen Radius r gleich 1 sein soll. Der Radius ist als Zeiger zu sehen, der entgegengesetzt zum Uhrzeigersinn rotiert.

Die „Sinusfunktion“ ist eine Winkelfunktion im rechtwinkligen Dreieck. Sie gibt das Streckenverhältnis an, das aus der einem Winkel gegenüberliegenden Seite (Kathete) und der Hypothense (sie liegt dem rechten Winkel gegenüber) gebildet wird. Wenn der Radius $r = 1$ ist, wie in diesem Beispiel, so wird der Wert immer durch die Strecke a dargestellt. Diese momentanen Werte für a trägt man als Senkrechte in gleichen Abständen in das Koordinatensystem ein. Verbindet man dann die Punkte miteinander, so entsteht die Sinuskurve des Wechselstroms (Abb. 74).

Elektromagnetismus und Induktion sind in besonderer Weise in einem Transformator miteinander verknüpft. Ein Transformator besteht aus zwei Spulen, die auf einem gemeinsamen Eisenkern gewickelt sind. Die Spulendrähte sind nicht miteinander verbunden. Die zwei Spulen haben unterschiedliche Windungszahlen, die sich in diesem Fall wie 1 : 6 verhalten.



Um den Transformator in seiner Wirkung zu untersuchen, wird die Schaltung nach Abb. 75 aufgebaut. Dabei wird die Batterie über den Schalter an die Spule mit der kleineren Windungszahl (1 + 2) angeschlossen. Das Meßgerät wird mit der größeren Spule (3 + 4) verbunden. Öffnet und schließt man nun den Schalter in schneller Reihenfolge, so zeigt das Meßgerät einen Ausschlag.

Obwohl beide Spulen nicht direkt miteinander verbunden sind, besteht zwischen beiden doch eine Kopplung. Die kleine Spule wird beim Schließen des Stromkreises vom Strom durchflossen. Sie baut ein magnetisches Feld auf. Man nennt diese Spule Erregerspule oder **Primärspule** eines Transformators.

Das magnetische Feld der Primärspule induziert in der anderen Spule – **Sekundärspule** genannt – einen elektrischen Strom, der vom Meßgerät angezeigt wird. Im Transformator sind also Elektromagnetismus und elektrische Induktion wirksam. Die Übertragung der elektrischen Energie erfolgt über das magnetische Feld.

Wie in Abb. 70 bereits gezeigt, wird nur dann in einer Spule eine elektrische Spannung induziert, wenn das Magnetfeld in Bewegung ist. Beim Transformator wird das Magnetfeld auf elektrische Weise bewegt. Es baut sich beim Einschalten des Stromes um die Spule herum auf, d. h. es breitet sich aus. Wird der Stromkreis unterbrochen, fällt das magnetische Feld zusammen. Es ist also beim Aus- und Einschalten des Stromes dauernd in Bewegung und kann so in der Sekundärspule einen Strom erzeugen.

Den Sachverhalt bestätigt das Meßgerät, indem es beim Betätigen des Schalters nur Stromstöße anzeigt und nicht einen Dauerstrom. Transformatoren sind nur für Ströme geeignet, deren Stärke und Richtung sich ständig verändern wie das z. B. beim technischen Wechselstrom der Fall ist.

Der Eisenkern hält das Magnetfeld zusammen. Es ist dadurch dichter, und die Übertragungsverluste sind geringer.

Die Abhängigkeit der Spannungsübertragung vom Verhältnis der Windungszahlen läßt sich mit der Schaltung nach Abb. 75 zeigen, wenn die Batterie an die Klemmen 3 und 4 und das Meßgerät an die Klemmen 1 und 2 des Transformators angeschlossen werden. Induziert man durch Öffnen und Schließen des Schalters eine Span-

nung, läßt sich am wesentlich geringeren Ausschlag des Meßgerätes ablesen, daß die Spannung heruntertransformiert wird, bedingt durch das Verhältnis der Windungszahlen im Verhältnis 6 : 1. Diese Gesetzmäßigkeit, daß sich Spannungen am Transformator wie die Windungszahlen der Spulen verhalten, wird durch folgende Formel ausgedrückt

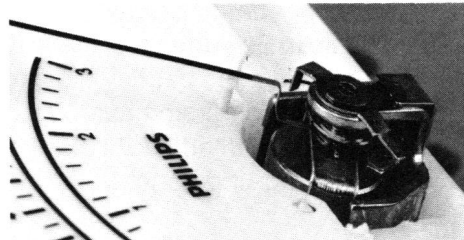
$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

Soll z. B. für eine elektrische Eisenbahnanlage die angelegte Wechselspannung von 220 Volt (U_1) auf ca. 14 Volt (U_2) heruntertransformiert werden, so kann das ein Transformator leisten, dessen Primärspule (W_1) 600 Windungen hat. Wieviel Windungen (W_2) muß die Sekundärspule haben?

$$\begin{array}{rcl} \frac{W_1}{W_2} & = & \frac{U_1}{U_2} \\ \frac{600}{x} & = & \frac{222}{14} \quad 200 \times = 8400 \\ & & x = 38 \text{ Windungen} \end{array}$$

Genau umgekehrt verhält es sich mit den Stromstärken. Beim Transformator sind Ausgangsleistung und Eingangsleistung annähernd gleich. Deshalb muß durch die Transformatorwicklung, an der die größere Spannung auftritt, die kleinere Stromstärke fließen und durch die Wicklung mit der kleineren Spannung die größere Stromstärke. Bei der Transformation stehen die Stromstärken im umgekehrten Verhältnis zu den Windungszahlen der Spulen und damit auch entsprechend zu den Spannungen.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$$



76

Das bereits für Strom- und Spannungsmessungen eingesetzte **Meßinstrument** Abb. 76 ist ein Zeigerinstrument, dessen Zeigerausschlag auf der magnetischen Ablenkung einer Drehspule des Meßwerkes beruht. Zur Erzeugung des magnetischen Feldes muß der Strom durch die Spule des Meßwerkes fließen. Die Spule selbst besitzt einen elektrischen Widerstand von 750Ω , den Innenwiderstand R_i . Daraus ergibt sich für die einzelnen Gleichspannungsmeßbereiche folgender Gesamtwiderstand ($R_i + R_v$).

Er ist so bemessen, daß das Gerät bei einem Stromdurchfluß von $200 \mu A$ Vollausschlag zeigt.

Das ergibt eine Spannung bei Vollausschlag:

$$U = R \times I$$

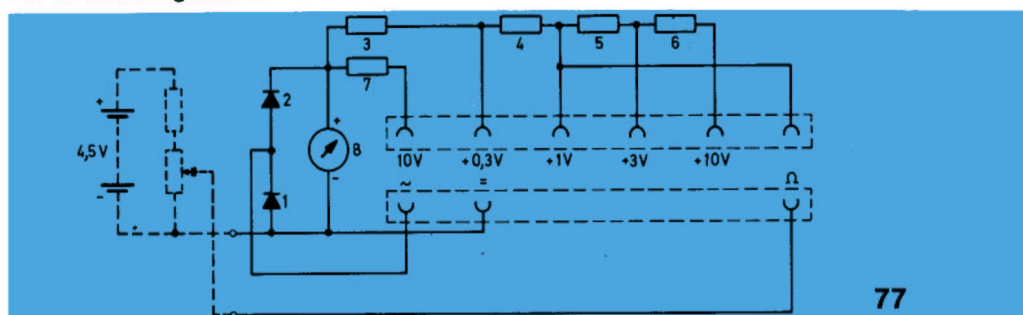
$$U = 750 \times 0,0002$$

$$U = 0,15 \text{ V}$$

Da jedoch größere Spannungsbereiche erforderlich sind, müssen Vorwiderstände R_V den Strom entsprechend reduzieren.

Meßbereich U	$R_I + R_V$	$(R_I + R_V \text{ in Abb. 77})$
0,3 V	1,5 K Ω	8 + 3
1 V	5 K Ω	8 + 3 + 4
3 V	15 K Ω	8 + 3 + 4 + 5
10 V	50 K Ω	8 + 3 + 5 + 5 + 6

Die einzelnen Spannungsbereiche werden durch Umstecken der Stiftkontakte am Gerät eingestellt.



Alle Strommessungen mit diesem Meßgerät werden im kleinsten Spannungsbereich von 0,3 Volt vorgenommen. Die direkt in die Schaltung eingebauten Nebenwiderstände, sog. Shunts, ergeben sich für die einzelnen Meßbereiche aus der folgenden Tabelle.

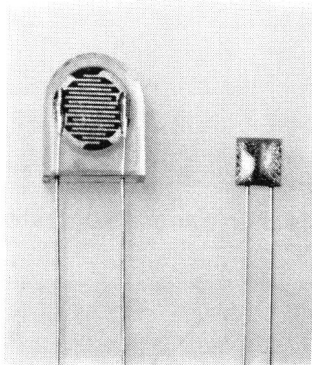
Meßbereich	\approx Nebenwiderstand
1 mA	374 Ω
3 mA	107 Ω
10 mA	30,1 Ω
30 mA	10 Ω
100 mA	3,01 Ω

Um auch Wechselspannungen messen zu können, wird die Spannung mit den Dioden 1 und 2 gleichgerichtet. Der Vorwiderstand R_7 ergibt einen Meßbereich mit 10 V Vollausschlag.

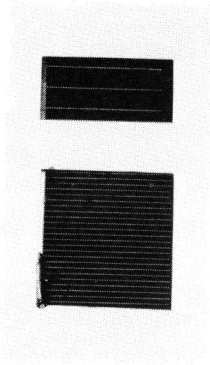
Als Ohmmeter eingesetzt, benötigt man eine regelbare Spannungsquelle, die in Abb. 77 gestrichelt eingezeichnet ist. Mit ihr wird bei 0 Ohm (Drahtbrücke) der Vollausschlag bei 1 V eingestellt. Jeder Widerstand reduziert den Strom, das Instrument zeigt dies entsprechend an. Bei Mittelstellung hat der zu messende Widerstand ca. 15 k Ω .

Die in der Elektronik verwendeten Werkstoffe besitzen eine unterschiedliche Leitfähigkeit für den elektrischen Strom. Die besten **Leiter** sind Gold und Silber mit einem sehr geringen elektrischen Widerstand. Da sie jedoch sehr teuer sind, verwendet man z. B. Gold nur dort, wo es nicht nur um eine gute Leitfähigkeit, sondern auch um eine ständig blanke Oberfläche geht, wie bei Relais- und Schalterkontakten, bei Steckerpaaren usw. Auch Kupfer ist ein sehr guter Leiter.

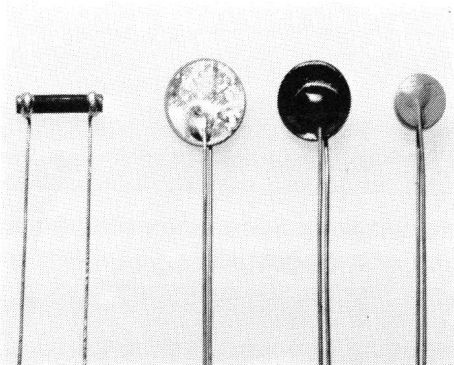
Isolatoren haben einen sehr hohen elektrischen Widerstand und leiten daher den Strom nicht. Sie werden auch **Nichtleiter** genannt.



78

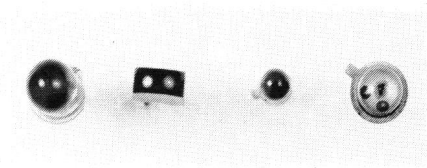


79

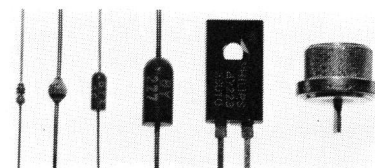


80

Daneben gibt es Stoffe, deren Leitfähigkeit zwischen der der Leiter und der Nichtleiter liegt. Man nennt sie **Halbleiter**. Die Leitfähigkeit ist allerdings nicht das besondere Merkmal der Halbleiter. Diese Bedingung erfüllen auch Kohlestäbe, deren Widerstandswert dem der Halbleiter entspricht. Das wesentliche Merkmal ist, daß Halbleiter ihre Leitfähigkeit durch äußere Einflüsse verändern können. So verändern z. B. Fotowiderstände (LDR = light dependent resistor) bei Lichteinfall ihren Widerstand (Abb. 78). Fotoelemente oder Solarzellen (Abb. 79) liefern Strom, wenn Licht darauf fällt. Andere Halbleiterelemente verändern ihren Widerstandswert in Abhängigkeit von einer angelegten Spannung (VDR) oder in Abhängigkeit von der Temperatur (NTC, PTC, Abb. 80):



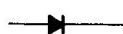
81

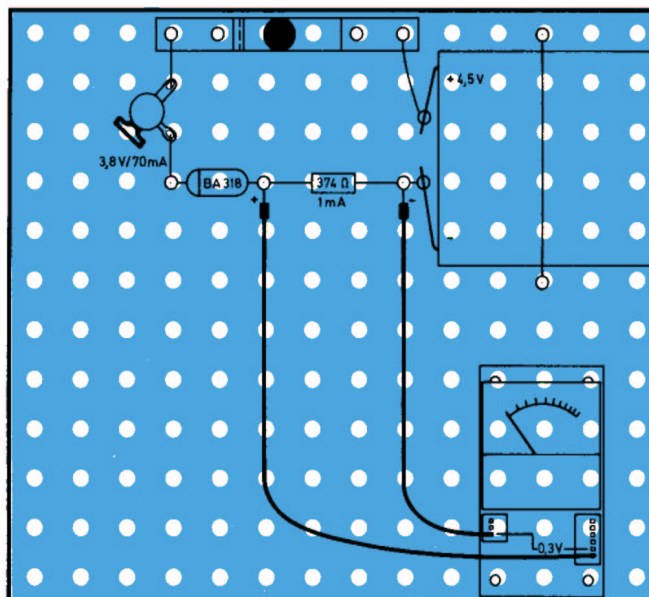
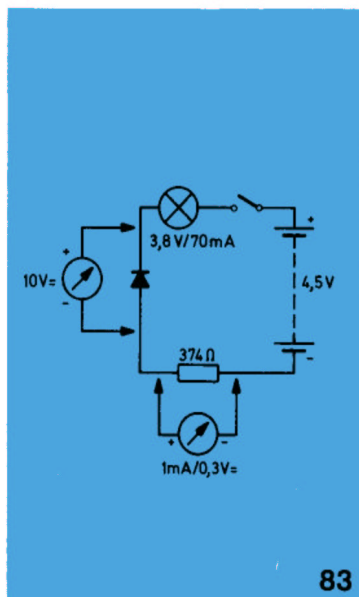


82

Leuchtdioden (Abb. 81) erzeugen bei einer angelegten Spannung Licht. Besondere elektrische Verhältnisse erzielt man in der Halbleiterdiode (Abb. 82), in der Halbleitermaterial unterschiedlicher Leitfähigkeit aneinanderstößt. Sie läßt dadurch den Strom in der einen Richtung besser hindurchfließen als in der anderen. Im folgenden sollen die Eigenschaften der **Halbleiterdiode** untersucht und die Erscheinungen erklärt werden.

Schaltsymbol der Diode:



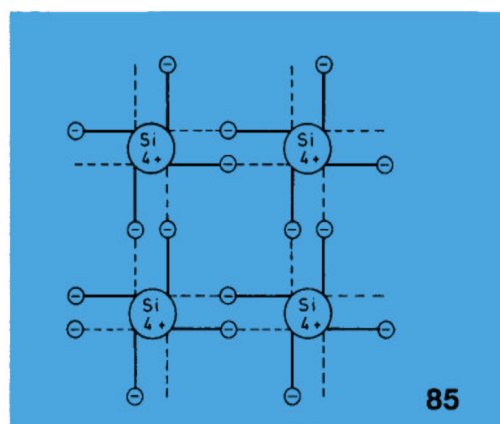
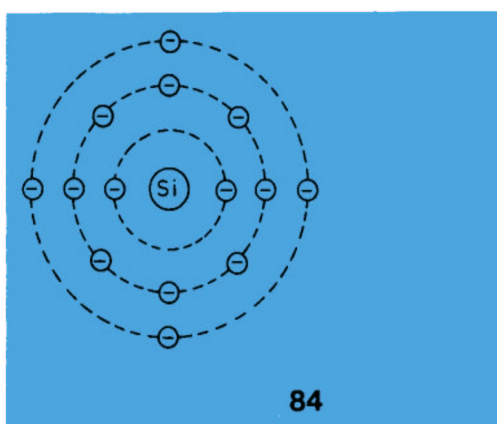


Schaltet man eine Diode nach Abb. 83 so in einen Stromkreis mit einer Glühlampe, daß der Ring auf der Diode zum Pluspol der Batterie zeigt, leuchtet die Glühlampe nicht. Das Meßinstrument als Voltmeter geschaltet (Meßbereich 10 V) zeigt die Batteriespannung an. Legt man das Meßinstrument als Amperemeter (Meßbereich 1 mA, Shunt $374\ \Omega$) an den Stromkreis, so erhält man die Bestätigung, daß kein Strom fließt. Allenfalls mit einem sehr empfindlichen Instrument ließe sich ein sehr kleiner **Reststrom** messen.

Es kann festgestellt werden:

Durch die Diode fließt kein Strom. Sie ist in **Sperrichtung** geschaltet.

Zur Erklärung dieser Erscheinung muß der atomare Aufbau in einer Halbleiterdiode betrachtet werden: Als Werkstoffe zur Herstellung dienen im allgemeinen die chemischen Elemente **Germanium** oder **Silizium**, die in sehr reiner Form vorliegen müssen.

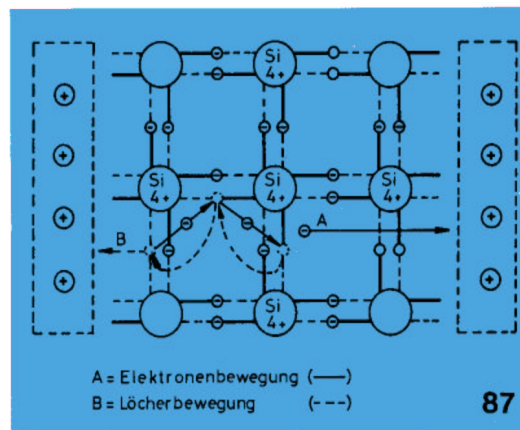
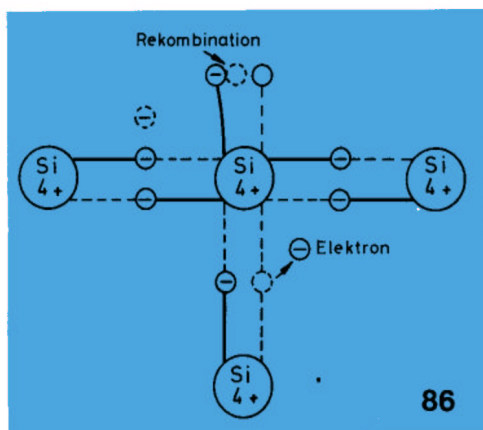


Beim Halbleitermaterial Silizium besteht ein **Atom** aus einem Atomkern und 14 Elektronen, Abb. 84. Von den 14 Elektronen sind jedoch nur die äußeren vier **Valenzelektronen** von Bedeutung. Diese vier Valenzelektronen bilden mit den Valenzelektronen der vier benachbarten Atome gemeinsame Elektronenpaare (Abb. 85).

In einem reinen Siliziumkristall sind beim absoluten Nullpunkt (-273°C) alle Elektronen so fest an die Atome gebunden, daß keine freien Ladungsträger für den elektrischen Strom zur Verfügung stehen. Dann ist der Widerstand unendlich groß, Silizium ist unter diesen extremen Bedingungen ein Isolator. Bei Normaltemperatur dagegen geraten die Atome – und damit auch die Elektronen – in Wärmeschwingungen, so daß sich einzelne Elektronen aus dem Atomverband lösen können und damit zu freien Ladungsträgern werden wie bei den Metallen. Mit zunehmender Temperatur erhöht sich die Zahl der freien Elektronen, und damit steigt die Leitfähigkeit an. Erhitzt man Halbleiter zu sehr, so wird allerdings der Kristall zerstört.

In diesen Punkten verhalten sich die Leiter anders: Beim absoluten Nullpunkt sind die Metalle hervorragende Leiter; man spricht von **Supraleitfähigkeit**. Bei steigender Temperatur wird die Wärmeschwingung der Elektronen größer. Sie kann so groß werden, daß sich die Elektronen gegenseitig behindern. Dann sinkt die Leitfähigkeit ab.

Hat ein Elektron seinen Platz im Silizium-Kristall verlassen, so entsteht dort eine Lücke, die man **Defektelektron** oder **Loch** nennt. Das Atom, dem ein Elektron fehlt, ist aufgrund des Mangels an negativen Ladungen, selbst positiv geladen. Ein Loch stellt also einen positiven Ladungsträger dar. Andererseits kann ein anderes freies Elektron in eine solche Lücke hineinstoßen und damit den Verband wieder vervollständigen. Diesen Vorgang nennt man **Rekombination** (Abb. 86).

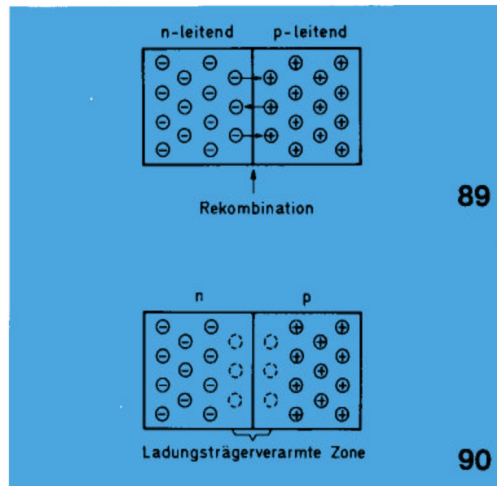
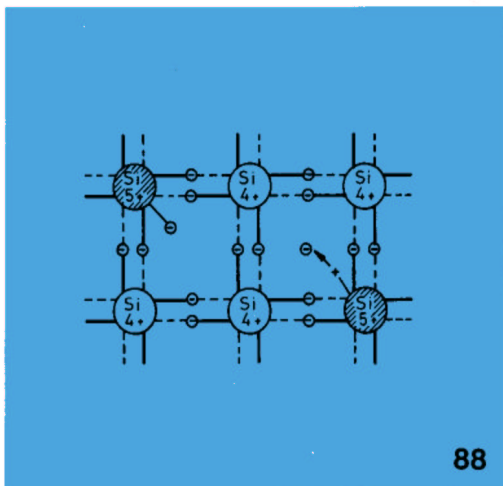


Legt man nun an einen solchen Siliziumkristall bei normaler Temperatur eine Spannung an, dann fließt ein kleiner elektrischer Strom, d. h. Elektronen bewegen sich vom negativen Pol der Spannungsquelle zum positiven Pol. Ein freies Elektron kann aber auch wieder von einem Loch aufgenommen werden, wobei es selbst an anderer Stelle ein Loch hinterläßt. Auch das hat das Bestreben, ein Elektron einzufangen. Es entsteht also durch diesen Vorgang der Eindruck, als „wanderten“ Löcher vom positiven Pol der Spannungsquelle zum negativen Pol (Abb. 87).

Tatsächlich aber sind es die Elektronen, die zum positiven Pol fließen und die Löcher hinterlassen. Faßt man diese beiden Erscheinungen zusammen, so ergibt sich:

In einem Halbleiterkristall fließt ein Elektronenstrom vom negativen zum positiven Pol der Spannungsquelle. Entgegengesetzt dazu fließt ein Löcherstrom.

Durch das Einfügen von Fremdatomen – z. B. Antimon (chemisches Zeichen Sb) – ändert sich die Zahl der freien Elektronen. Denn Antimon besitzt 5 Valenzelektronen, von denen aber nur vier in das Kristallgitter eingebaut werden können. Das fünfte Elektron ist darum leicht beweglich (Abb. 88).



Die Zahl der Elektronen ist nun größer als zum Kristallaufbau erforderlich. Der Kristall besitzt also einen **Elektronenüberschuß**, und man spricht vom negativ – leitenden oder n-leitenden Material. Das Silizium kann auch mit Fremdatomen verunreinigt werden, die nur 3 Valenzelektronen besitzen.

Ein solches chemisches Element ist z. B. das Indium (chemisches Zeichen In). Innerhalb des Kristallgitters, das mit Indium verunreinigt ist, kann ein Elektron eines Siliciumatoms kein Elektronenpaar bilden. Es versucht nun, von anderen benachbarten Atomen Elektronen zu entreißen, so daß dort ein Loch entsteht. Durch die Zugabe von 3wertigen Fremdatomen stehen zum Bau des Kristalls also zu wenig Elektronen zur Verfügung. Es herrscht **Elektronenmangel**. Man sagt dazu auch: Dieses Halbleitermaterial ist positiv-leitend oder **p-leitend**.

Das Verhalten einer Halbleiterdiode erklärt sich daraus, daß p-leitende und n-leitende Materialien aneinanderstoßen. Da die Elektronen bei Normaltemperatur ständig in Bewegung sind, wandern sie an der Grenzfläche zwischen den beiden Schichten in das p-leitende Material hinein und vereinigen sich dort mit den Löchern (Rekombination Abb. 89). Gleichzeitig wandern auch Löcher in das n-leitende Material, und dort spielt sich derselbe Vorgang ab. In dem Grenzbereich – es ist allerdings nur eine sehr dünne Schicht – stehen damit so gut wie keine Träger für die Elektrizität zur Verfügung (Abb. 90).

Der Bereich zwischen den beiden Schichten heißt **Sperrschicht**.

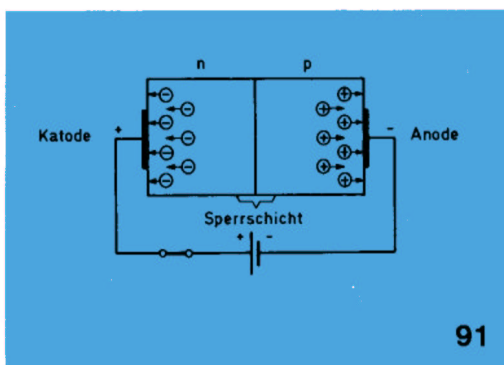
Durch die Rekombination von Löchern und Elektronen im Grenzbereich wird verhindert, daß die Grenzschicht breiter als wenige μm wird. Wandern nämlich Elektronen in die p-Schicht, so bleiben die Atomrümpfe zurück, die dann positiv geladen sind. Es entsteht also in der n-Schicht eine dünne Zone, die leicht positiv geladen ist. Umgekehrt entsteht in der p-Schicht, wenn Löcher wandern, eine negative Zone. Zwischen beiden Zonen baut sich eine Spannung auf, die **Antidiffusionsspannung**. Sie wirkt der gleichmäßigen Verteilung der Elektronen und Löcher im ganzen Kristall – Diffusion genannt – entgegen und verhindert den vollständigen Ausgleich der Ladungsträger zwischen den beiden Schichten.

Diese Antidiffusionsspannung ist abhängig vom Material, aus dem der Halbleiter hergestellt ist. Für Silicium beträgt sie etwa 0,7 Volt, für Germanium etwa 0,3 Volt.

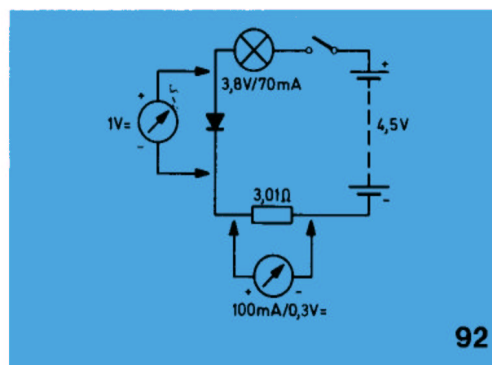
Die Bezeichnungen für die beiden Anschlüsse der Halbleiterdiode hat man von Röhrendiode übernommen. Die p-Schicht heißt **Anode**, die n-Schicht heißt **Katode**.

Die Katode ist auf dem Diodenkörper durch einen breiten Farbring gekennzeichnet.

Schaltet man in einem Stromkreis die Diode so, daß die Anode am Minuspol und die Katode am Pluspol der Batterie liegt, kann kein Strom hindurchfließen. Durch die unterschiedlichen Ladungen zwischen den Halbleiterschichten und den Batteriepolen werden die positiven Löcher zum negativen Pol und die negativen Elektronen zum positiven Pol der Spannungsquelle gezogen. Die Sperrschicht wird damit noch breiter, und ihr elektrischer Widerstand wird so groß, daß kein Strom hindurchfließen kann. Die Diode sperrt also den elektrischen Strom. Man sagt auch die Diode ist in **Sperrichtung** geschaltet (Abb. 91).



91

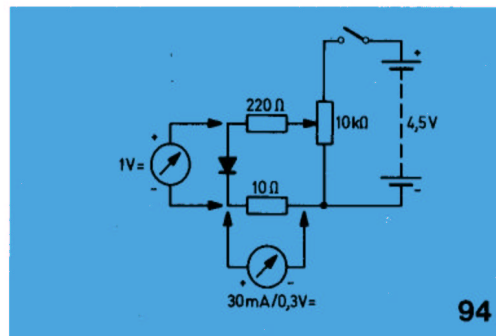
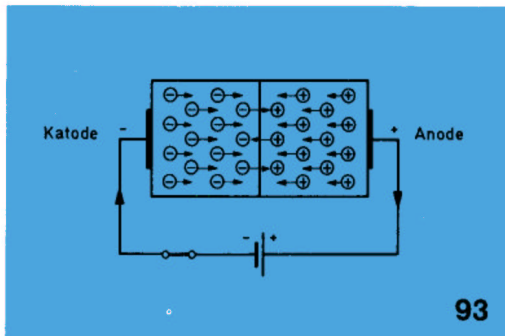


92

Das Verhalten einer Diode im Stromkreis bei umgekehrter Polung soll in der Schaltung Abb. 92 untersucht werden. Die Katode ist über das Meßinstrument mit dem Minuspol, die Anode über die Lampe mit dem Pluspol der Batterie verbunden. Das Meßinstrument (Meßbereich 100 mA, Shunt $3,01\Omega$) wird zunächst als Amperemeter in den Stromkreis geschaltet. Nach dem Einschalten zeigt das Meßinstrument einen Stromfluß an, und die Glühlampe beginnt zu leuchten. Wird das Meßinstrument (Meßbereich 3 V) anschließend als Voltmeter parallel zur Diode geschaltet, so zeigt es nur einen geringen Spannungsabfall an. Ihr Widerstand ist nun klein. Man sagt, die Diode ist in **Durchlaßrichtung** geschaltet.

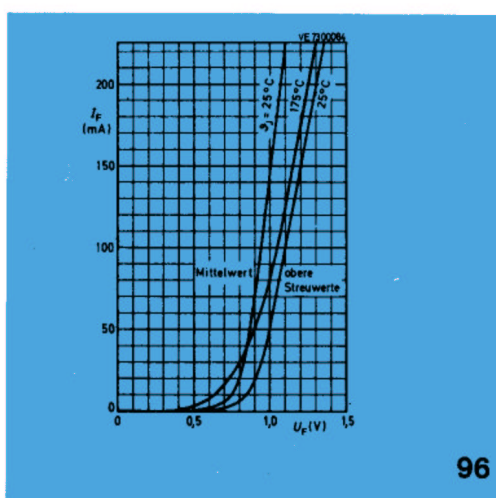
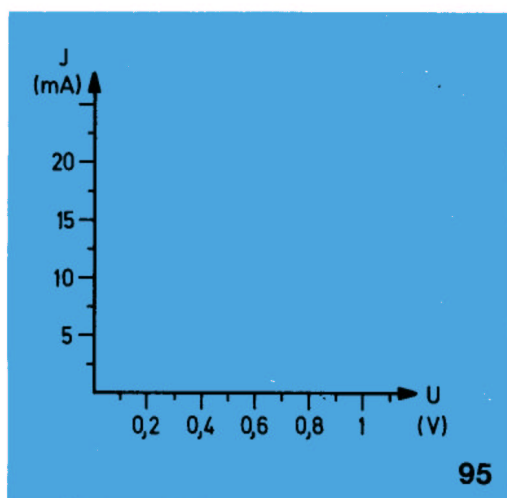
Nach dem Betätigen des Schalters werden Elektronen aus der n-Schicht und Löcher aus der p-Schicht in die Sperrschicht hineingedrückt (Abb. 93). Sie wird also mit Ladungsträgern angereichert, so daß sich der Sperrwiderstand der Grenzschicht erheblich verringert und zu einem kleinen **Durchlaßwiderstand** absinkt. Nun kann ein Strom ungehindert durch die Diode hindurchfließen.

Der Durchlaßwiderstand von Halbleiterdioden beträgt je nach Bauart einige Ohm bis zu einigen hundert Ohm, der Sperrwiderstand dagegen kann einige $M\Omega$ betragen.



Um genauere Kenntnis von dem Verhalten einer Diode bei unterschiedlichen Spannungen zu erhalten, soll eine **Kennlinie** aufgenommen werden. Einer solchen Kennlinie kann man den Zusammenhang zwischen einer vorgegebenen Spannung und dem dazugehörigen Strom entnehmen. Die Schaltung Abb. 94 gibt den Versuchsaufbau zur Kennlinienaufnahme in Durchlaßrichtung wieder. Das Meßinstrument muß mehrfach umgeklippt werden, damit zu jeder eingestellten Spannung die Stromstärke gemessen werden kann. Als Spannungsmesser geschaltet, wird der Meßbereich 1 V gewählt, als Amperemeter (Meßbereich 30 mA, Shunt 10 Ω).

Nach dem Einschalten wird die Spannung mit dem Potentiometer stufenweise von 0 V um jeweils 0,1 V erhöht. Die durch Messung ermittelte zugehörige Stromstärke trägt man in ein Koordinatensystem (Abb. 95) ein. Durch das Verbinden der einzelnen Werte entsteht eine **Kennlinie**.

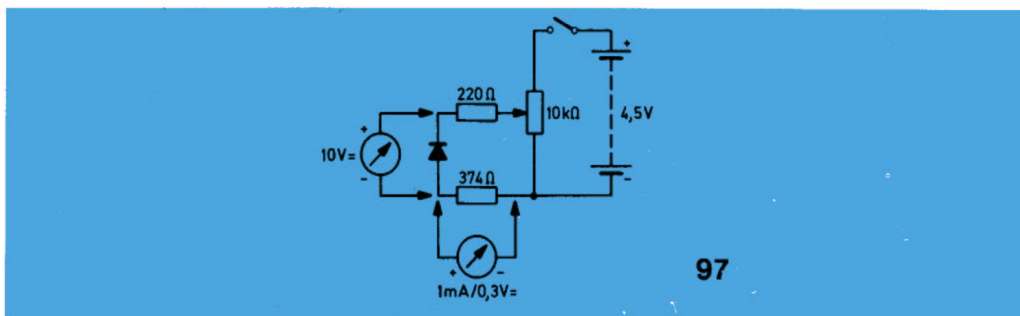


Der Kennlinienverlauf der BA 318 zeigt einige Auffälligkeiten (Abb. 96). Zunächst ist bis etwa 0,6 V kein Stromfluß zu messen, obwohl die Diode in Durchlaßrichtung geschaltet ist. Dann allerdings steigt der Strom sprunghaft an, und die Kennlinie verläuft sehr steil. Zur Erklärung dieses Kennlinienverlaufs sei noch einmal an die Antidiffusionsspannung von 0,7 V für Silizium erinnert. Sie verhindert einen vollständigen Austausch der Ladungsträger über die Sperrschicht hinaus. Diese Antidiffusionsspannung muß erst durch die angelegte Spannung überwunden werden, damit ein Strom fließen kann. Dann allerdings ist der Durchlaßwiderstand so gering, daß ein fast ungehinderter Stromfluß möglich ist. Die Spannung, bei der der Durchlaßstrom merklich ansteigt, nennt man **Durchlaßspannung** U_F oder **Schleusenspannung**. Sie ist charakteristisch für das Halbleitermaterial, und beträgt für Silizium 0,7 V, für Germanium 0,3 V.

Der Durchlaßstrom in einer Diode darf nicht unbegrenzt ansteigen, da sonst die Diode schnell zerstört wird. Durch einen stärkeren Strom wird nämlich eine größere Wärmeentwicklung hervorgerufen, durch die die Eigenbeweglichkeit der Ladungsträger vergrößert und damit ihre Zahl erhöht wird. Mehr Ladungsträger führen aber wieder zu einem stärkeren Strom, der den Halbleiter noch mehr erwärmt. Auf diese Art entsteht ein so großer Strom, der den Halbleiter zerstört. Deshalb darf eine Diode in einem Stromkreis niemals ohne einen strombegrenzenden Widerstand betrieben werden. Das kann auch eine Glühlampe sein, die den gleichen Effekt erzielt.

Beim Gebrauch einer Diode in elektronischen Schaltungen ist auch immer die Temperatur zu berücksichtigen, bei der sie sicher betrieben wird. Germaniumdioden können z. B. nur Temperaturen bis ca. 75° C aushalten, Siliziumdioden bis ca. 150° C.

Die Buchstaben, die zur Kennzeichnung der Diodentype verwendet werden, geben einige Information über dieses Halbleiterelement. Ist der erste Buchstabe ein B, handelt es sich um eine Siliziumdiode. Ein A deutet auf die Verwendung von Germanium als Halbleitermaterial hin. Der zweite Buchstabe kennzeichnet den Verwendungsbereich. Ein A steht für eine **Allzweckdiode**, ein B für eine **Kapazitätsdiode** und ein Z für eine **Zenerdiode**.

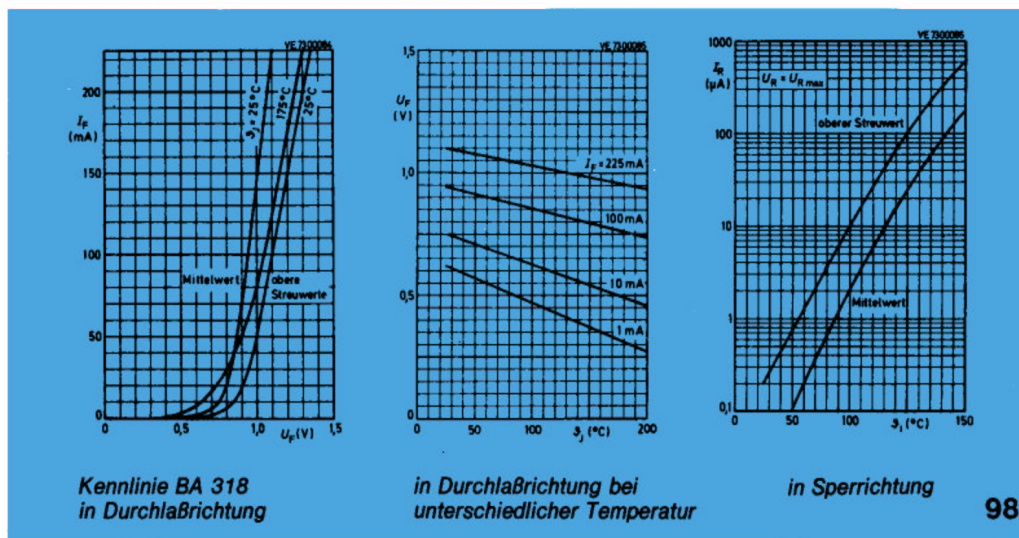


Mit der Schaltung Abb. 97 soll die Kennlinie für die Diode BA 318 in Sperrichtung aufgenommen werden. Es findet der Aufbau der vorigen Schaltung Verwendung, nur die Diode muß umgepolt werden, so daß ihre Katode am Pluspol der Batterie liegt. Wie in Schaltung nach Abb. 94 wird auch hier die Spannung schrittweise erhöht und der zugehörige Strom gemessen.

Es fällt auf, daß kein nachweisbarer Strom in Sperrichtung fließt. Es fließt aber doch ein nur mit sehr empfindlichen Geräten meßbarer **Reststrom** I_R oder **Sperrstrom**. Er kommt durch die Eigenleitung im Kristall zustande.

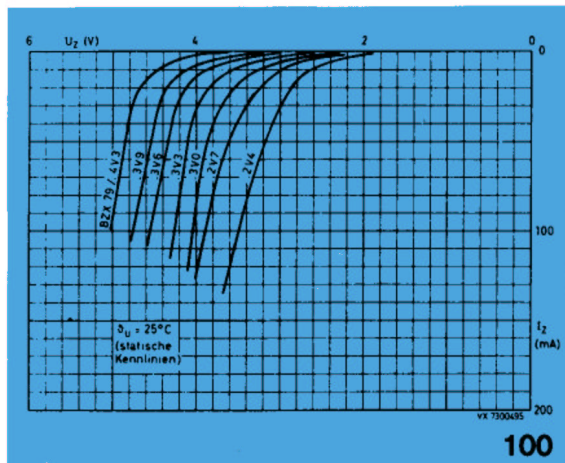
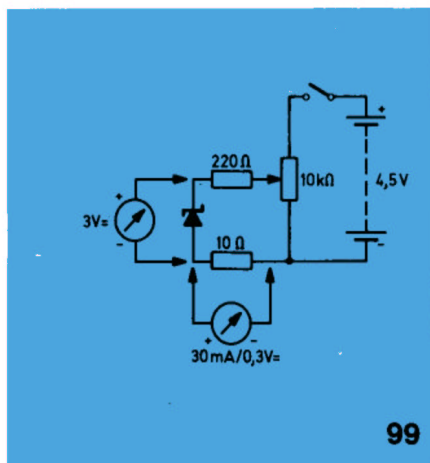
Erhöht man die Spannung an einer in Sperrichtung geschalteten Diode weiter, so ist ab einer für die Diode typischen **Durchbruchsspannung** ein plötzlicher und sehr steiler Stromanstieg meßbar. Wenn man den Sperrstrom nicht begrenzt, wird die Diode zerstört. Deshalb ist zu vermeiden, daß die Durchbruchsspannung erreicht wird.

Nachfolgend ist die gesamte Kennlinie für die Diode BA 318 aufgeführt, wie sie vom Hersteller, der Firma Philips, angegeben ist (Abb. 98).



Bei speziellen Dioden wird aber gerade mit der Durchbruchsspannung gearbeitet. Solche Dioden heißen nach dem Erfinder **Zenerdioden**.

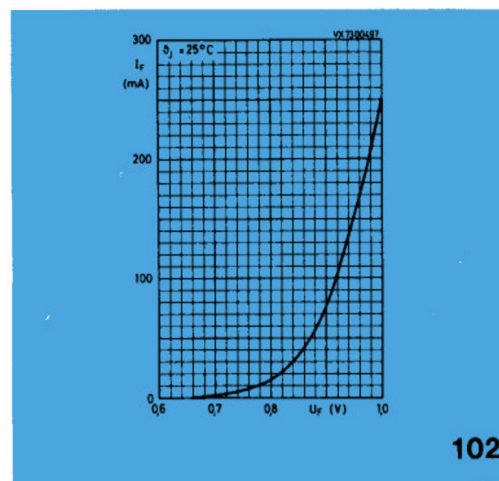
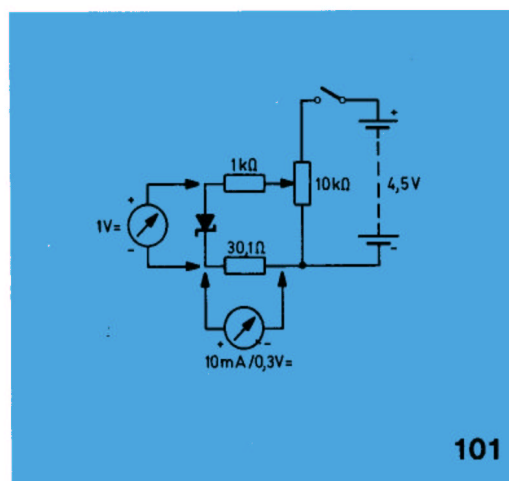
Schaltsymbole der Zehnerdiode:



Schaltet man nach Abb. 99 die Zenerdiode BZX 79 C2V7 in Sperrichtung – die mit einem Ring gekennzeichnete Katode liegt an + der Spannungsquelle – mit einem Widerstand in Reihe in einen Stromkreis, dann fließt so lange kein Strom durch die Diode hindurch, bis die Durchbruchsspannung erreicht ist. Daß Meßgerät (Meßbereich 3 V) zeigt an, daß die Spannung beim Regeln des Potentiometers zunächst stark ansteigt. Bei etwa 2,7 V ist die Durchbruchsspannung dieser Zenerdiode erreicht. Selbst beim weiteren Verändern der Potentiometerstellung bleibt die Spannung an der Zenerdiode nahezu konstant.

Aus der vom Hersteller angegebenen Kennlinie (Abb. 100) für die Zenerdiode BZX 70 C2V7 (Kurve 2V7) läßt sich ablesen, daß die Spannung U_Z für einen Strom I_Z von 10 mA bis 100 mA nahezu konstant bleibt.

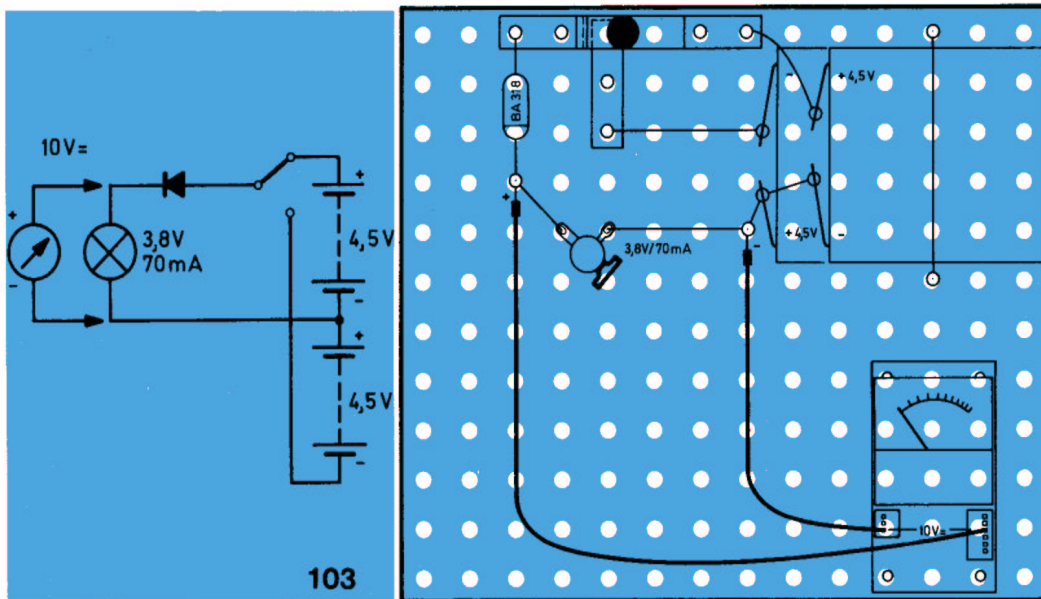
Allerdings muß der Strom durch einen Widerstand so begrenzt werden, daß er innerhalb des vom Hersteller zugelassenen Wertes bleibt, da sonst auch dieser Diodentyp zerstört wird. Die Zenerdiode wird deshalb zur Stabilisierung von Spannungen eingesetzt.



In Durchlaßrichtung (Abb. 101) verhält sie sich wie eine normale Diode. Dies zeigt auch die Kennlinie nach Abb. 102.

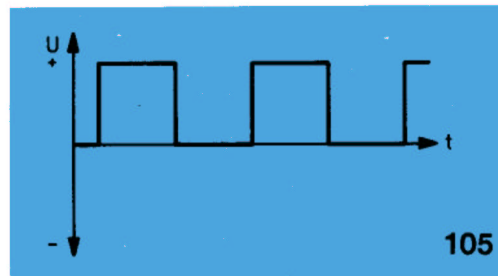
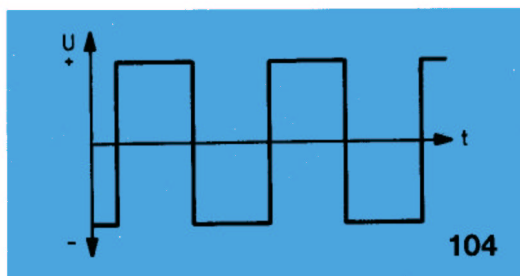
Die wichtigste Anwendungsmöglichkeit der Halbleiterdiode ist die der Gleichrichtung von Spannungen und Strömen. Mit der Schaltung Abb. 103 soll das Verhalten der Diode bei Wechselspannungen untersucht werden. Durch Betätigen des Umschalters wird eine Wechselspannung mit rechteckförmigem Kurvenverlauf erzielt. Das Meßinstrument (Meßbereich 10 V) zeigt den Spannungsverlauf an der Glühlampe an.

Durch das Umschalten liegt wechselweise der Pluspol der einen und der Minuspol der anderen Batterie am Katodenanschluß der Diode. In dem Augenblick, in dem der Minuspol an der Katode liegt, ist die Diode in Durchlaßrichtung geschaltet. Es fließt also ein Strom hindurch. Der Stromfluß wird durch das Aufleuchten der Glühlampe bewiesen. Das Meßinstrument zeigt eine Spannung von ca. 3,8 V an.



Nach dem Betätigen des Umschalters liegt der Pluspol der Batterie an der Kathode der Diode, die damit in Sperrrichtung geschaltet ist. Die Glühlampe leuchtet nicht, das Meßgerät zeigt keine Spannung an.

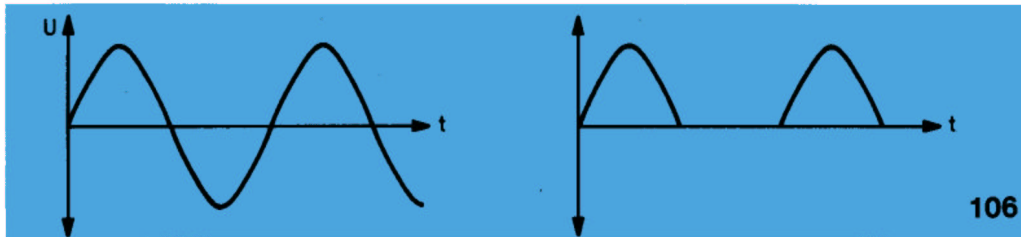
Betrachtet man zunächst den Spannungsverlauf durch das Umschalten vor der Diode, so entsteht folgender Kurvenverlauf (Abb. 104):



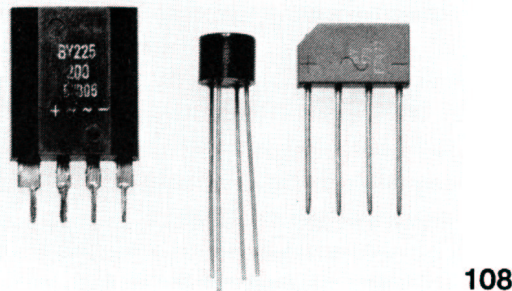
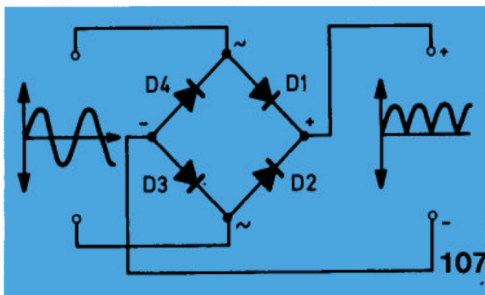
Entsprechend der Wirkungsweise der Diode fließt nur ein Strom, wenn sie in Durchlaßrichtung im Stromkreis liegt. Bei entgegengesetzter Polarität aber sperrt die Diode, und es fließt kein Strom. Dadurch ergibt sich der Spannungsverlauf nach Abb. 105.

Da jetzt nur noch eine Polarität der Spannung vorhanden ist, spricht man von gleichgerichteter Wechselspannung oder **pulsierender Gleichspannung**. Eine solche Umwandlung von Wechselspannungen in Gleichspannungen nennt man **Gleichrichtung**.

In elektronischen Geräten, die an das Leitungsnetz angeschlossen werden sollen, muß die sinusförmige Wechselspannung ebenfalls gleichgerichtet werden. Mit einer Gleichrichterdiode wie in Schaltung Abb. 103 ergibt sich der Spannungsverlauf nach Abb. 106.



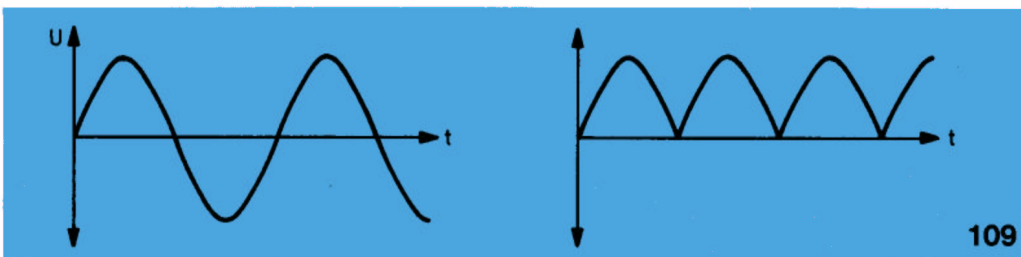
Nutzt man aber nur die eine Halbwelle der Wechselspannung aus – das nennt man **Einweggleichrichtung** – so arbeitet der Gleichrichter unwirtschaftlich. Durch eine spezielle Schaltung von 4 Halbleiterdioden erzielt man eine **Brücken-** oder **Zweiweggleichrichtung** (Abb. 107):



Betrachtet man diese Brückenschaltung in der Annahme, daß die positive Halbwelle des Wechselstroms am oberen Anschluß liegt, dann leiten die Dioden, D_1 und D_3 , D_2 und D_4 sperren. Liegt später die negative Halbwelle am oberen Anschluß, dann leiten D_2 und D_4 , D_1 und D_3 sperren. Die Polung am Ausgang des Gleichrichters ändert sich aber nicht.

Aus der Darstellung des Spannungsverlaufs erkennt man, daß die positive und die negative Halbwelle des Wechselstroms ausgenutzt wird (Abb. 109).

Solche Brückengleichrichter sind heute in einem Gehäuse untergebracht und besitzen häufig nur die Größe eines Transistors (Abb. 108).

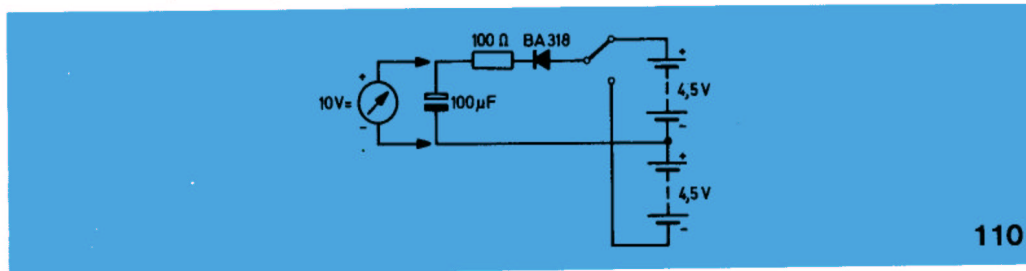


Die mit einem Brückengleichrichter erzeugte Spannung ist für manche elektronische Geräte noch nicht geeignet, da sie zu sehr schwankt und z. B. aus Lautsprechern noch ein Brummen ertönt. Durch einen Elektrolyt-Kondensator, der in Reihe mit einem Widerstand im Stromkreis liegt, erzeugt man eine **Glättung**.

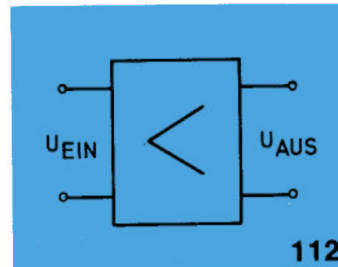
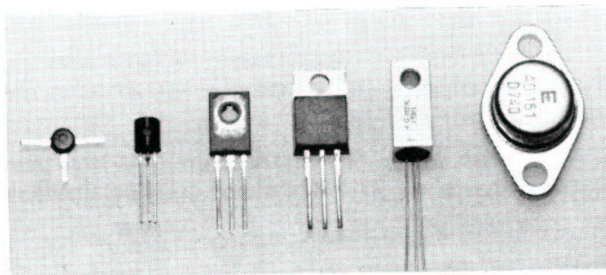
Nach Abb. 110 liegt das Meßgerät (Meßbereich 10 V) parallel zum Elektrolyt-Kondensator. Beim Umschalten stellt man am Meßgerät fest, daß sich der Kondensator langsam auflädt und die Spannung langsam ansteigt bis zu einem Höchstwert. Liegt

dann die Diode in Sperrichtung im Stromkreis, entlädt sich der Kondensator, und die Spannung fällt wieder ab.

Je schneller das Umschalten erfolgt, desto weniger entlädt sich der Kondensator. Dadurch fällt die Spannung nicht mehr ab, sondern sie steigt allmählich annähernd auf Batteriespannung an.



Erst im Jahre 1948 wurde beim Experimentieren mit mehreren Halbleiterschichten entdeckt, daß sich der Widerstand, wenn er sich in der einen Grenzschicht ändert, der anderen ändert. Die amerikanischen Wissenschaftler, die diese Entdeckung machten, sprachen vom „Transfer resistor“ was etwa bedeutet „Übertragung von Widerstandsänderungen“. Daraus entstand das Kunstwort **Transistor** (Abb. 111).



Alle Anwendungsgebiete des Transistors aufzählen zu wollen, ist sehr schwierig. So unterschiedlich die Bereiche auch sein mögen, in denen Transistoren verwendet werden – ihre Funktionen lassen sich auf im wesentlichen zwei Bereiche zurückführen: Der Transistor wird hauptsächlich als **Schalter** oder als **Verstärker** eingesetzt.

Die Aufgabe eines Schalters ist bekannt: Es sollen damit Stromkreise geschlossen bzw. geöffnet werden. Im Gegensatz zu mechanischen Schaltern jedoch erfüllt der Transistor diese Aufgabe nahezu verzögerungsfrei, und darüber hinaus nutzen keine Kontakte ab, wie z. B. bei einem Relais.

Zunächst soll aber die Verstärkerfunktion des Transistors erläutert werden ohne Kenntnis von seinem Aufbau. Jeder Verstärker – das ist bekannt vom Plattenspieler oder Sprachverstärker – besitzt einen Eingang und einen Ausgang (Abb. 112). Legt man an seinen Eingang eine Spannung U_{EIN} , erhält man am Ausgang eine Spannung U_{AUS} . Ist die Ausgangsspannung größer als die Eingangsspannung, so spricht man von einem **Spannungsverstärker**. Der Verstärkungsfaktor V_U kann errechnet werden nach:

$$V_U = \frac{U_{\text{AUS}}}{U_{\text{EIN}}}$$

Ist also die Ausgangsspannung viermal so groß wie die Eingangsspannung, so ist der Spannungsverstärkungsfaktor $V_U = 4$.

Fließt nach dem Anlegen der Eingangsspannung ein Eingangsstrom I_{Ein} , so mißt man am Ausgang den Ausgangsstrom I_{Aus} . Ist der Ausgangsstrom größer als der Eingangsstrom, spricht man von einem **Stromverstärker**. Der Stromverstärkungsfaktor B errechnet sich analog zum Spannungsverstärkungsfaktor nach:

$$B = \frac{I_{\text{Aus}}}{I_{\text{Ein}}}$$

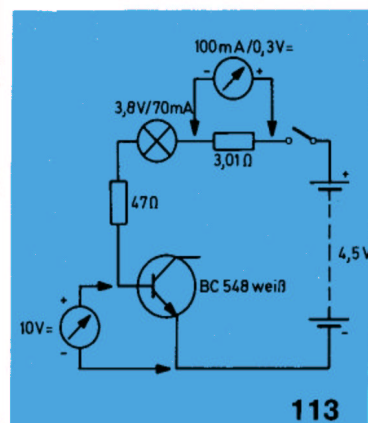
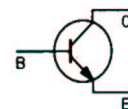
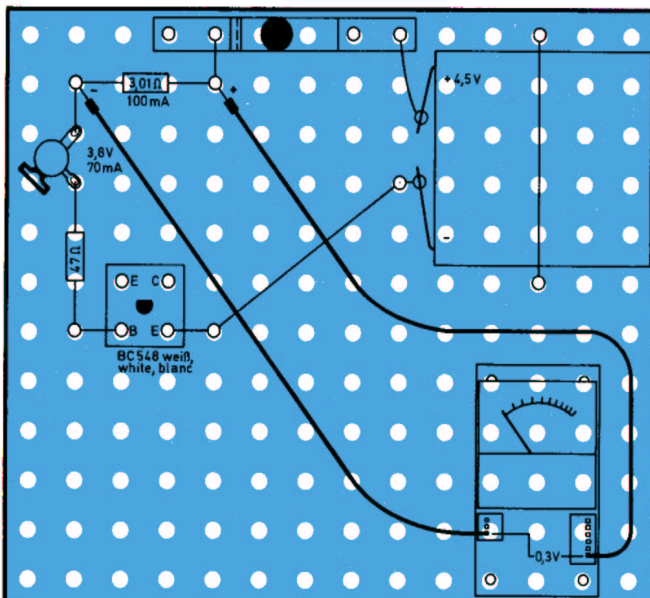
Das Produkt aus Eingangsspannung U_{Ein} und Eingangsstrom I_{Ein} ergibt nach der Formel

$$P = U \cdot I$$

die Leistung am Eingang P_{Ein} . Entsprechend läßt sich die Leistung am Ausgang P_{Aus} errechnen. Wenn nun die Ausgangsleistung größer als die Leistung am Eingang ist, so spricht man von einer **Leistungsverstärkung**. Der Verstärkungsfaktor V_P errechnet sich wie folgt:

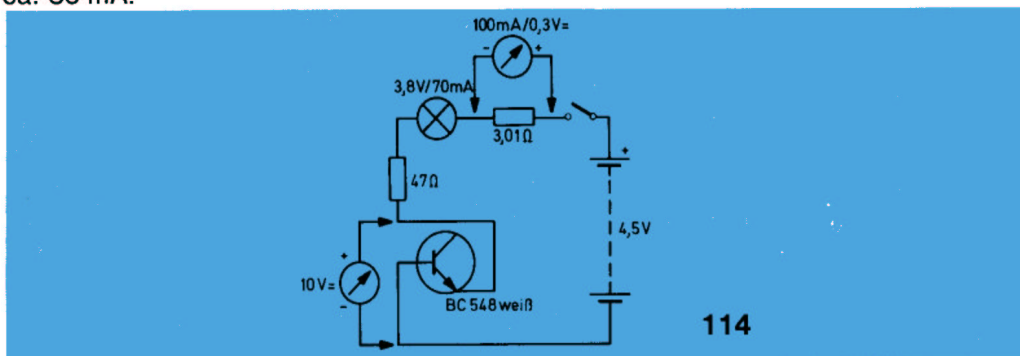
$$V_P = \frac{P_{\text{Aus}}}{P_{\text{Ein}}}$$

In den folgenden Versuchsaufbauten soll untersucht werden, wie Transistoren Schalter- und Verstärkerfunktionen übernehmen können. Dazu wird zunächst der Transistor untersucht, der auf ein weißes Trägerplättchen gelötet ist. Er führt die Bezeichnung BC 548 oder BC 238. Seine drei Anschlüsse sind mit den Schlitzen im Trägerplättchen leitend verbunden, und die Bezeichnung der Anschlüsse ist auf der Oberseite aufgedruckt. Es bedeuten **B** = **Basis**, **C** = **Kollektor** und **E** = **Emitter**. Im Schaltsymbol des Transistors sind die Abkürzungen angegeben:



Nach Abb. 113 und 114 soll das Verhalten des Transistors untersucht werden, wenn die Basis und der Kollektor in einen Stromkreis geschaltet werden. Der Widerstand dient als Strombegrenzer und schützt den Transistor vor Zerstörung durch zu große Ströme. Parallel zum Transistor liegt das Meßgerät (Meßbereich 10 V). Wenn ein Stromfluß durch die Lampe erkennbar ist, wird das Meßgerät als Amperemeter (Meßbereich 100 mA, Shunt $3,01\Omega$) in den Stromkreis geschaltet.

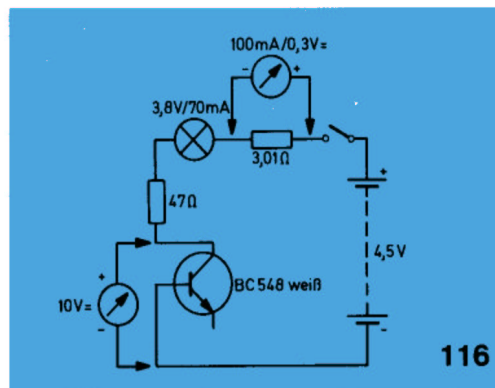
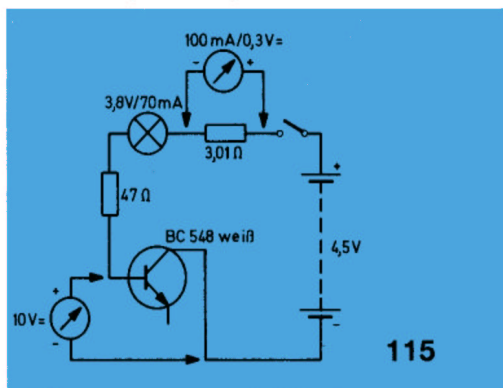
Nach Abb. 113 – die Basis des Transistors liegt am Pluspol, der Emmitter am Minuspol der Batterie – leuchtet die Glühlampe schwach. Das Voltmeter parallel zum Transistor zeigt einen Spannungsabfall von ca. 1 V, das Amperemeter einen Strom von ca. 35 mA.



Beim Umpolen der Batterieanschlüsse nach Abb. 114 – Minuspol zur Basis, Pluspol zum Emmitter – leuchtet die Glühlampe nicht. Das Voltmeter parallel zum Transistor zeigt die Batteriespannung an.

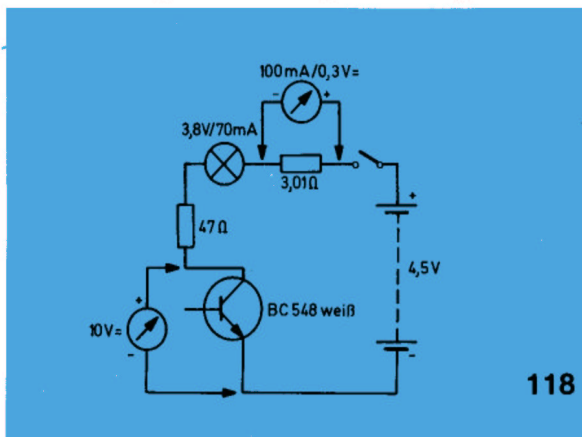
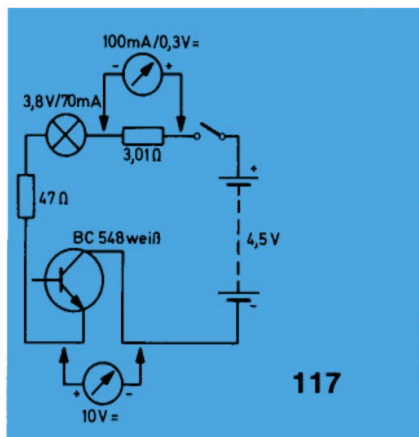
Bei diesen beiden Schaltungen verhalten sich die Transistoranschlüsse B und E wie eine Diode: In der einen Richtung fließt Strom, in der anderen nicht.

Nach den Abb. 115 und 116 soll untersucht werden, wie die Anschlüsse B und C des Transistors im Stromkreis wirken. Bei der ersten Schaltung 115 liegt wieder die Basis zum Pluspol, der Kollektor zum Minuspol. Mit dem Voltmeter (Meßbereich 10 V) wird der Spannungsabfall am Transistor gemessen, wenn die Glühlampe leuchtet, schaltet man das Amperemeter (Meßbereich 100 mA, Shunt $3,01\Omega$) in den Stromkreis. Danach polt man nach Abb. 116 wieder die Batterieanschlüsse um und mißt die Spannung am Transistor.



Liegt die Basis zum Pluspol der Batterie, fließt ein Strom von ca. 35 mA durch den Transistor, und am Transistor fällt eine Spannung von ca. 1 V ab. Bei umgekehrter Polung ist der Transistor gesperrt – es fällt die Betriebsspannung ab.

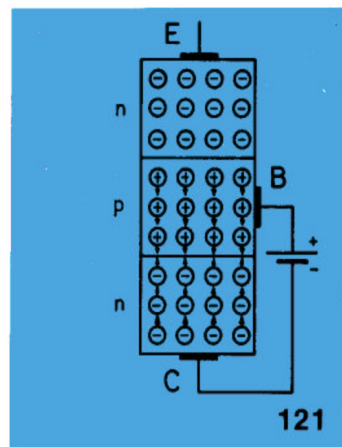
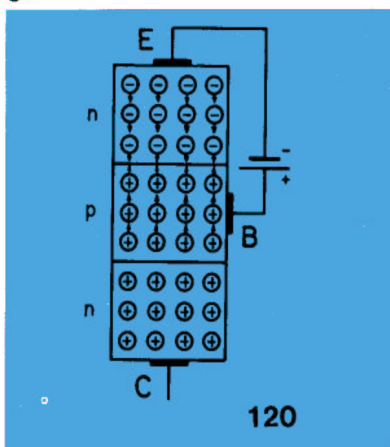
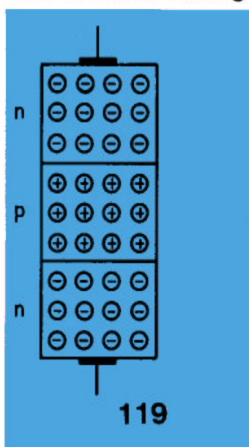
Auch die beiden Pole Basis und Kollektor des Transistors verhalten sich im Stromkreis wie eine Diode mit einer Durchlaßrichtung und einer Sperrichtung.



Zum Abschluß soll das Verhalten des Transistors untersucht werden, wenn die Anschlüsse C und E angeschlossen sind. Nach Abb. 117 ist der Pluspol der Batterie mit dem Emitter und der Minuspol über den Widerstand und die Lampe mit dem Kollektor verbunden. Danach werden die Anschlüsse nach Abb. 118 vertauscht. In beiden Fällen liegt das Voltmeter (Meßbereich 10 V) parallel zum Transistor.

Bei diesen Schaltungen leuchtet die Glühlampe nicht. Es fließt also kein Strom durch den Transistor vom Kollektor zum Emitter und umgekehrt. Das Voltmeter zeigt in jedem Fall die Batteriespannung an.

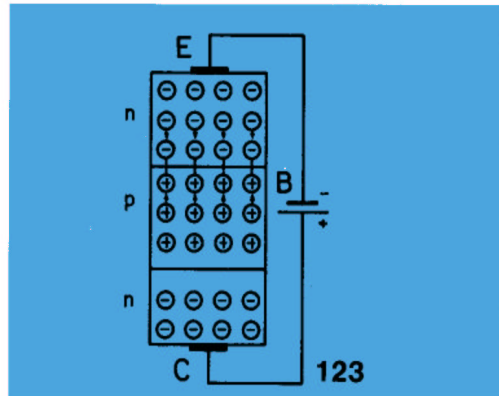
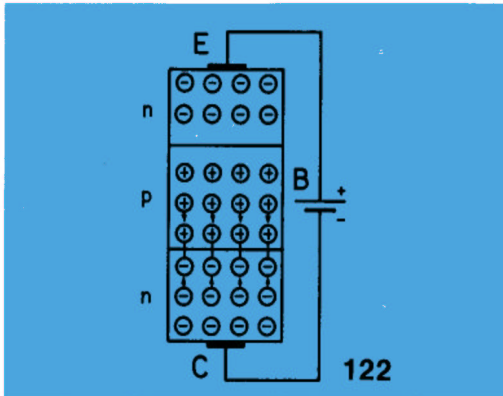
Die Wirkungsweise eines Transistors kann nur erklärt werden, wenn man sich wieder mit dem Aufbau von Halbleiterkristallen befaßt. Im Gegensatz zur Diode mit einem Übergang von einer n-leitenden zur p-leitenden Schicht besitzt ein Transistor zwei solcher Übergänge.



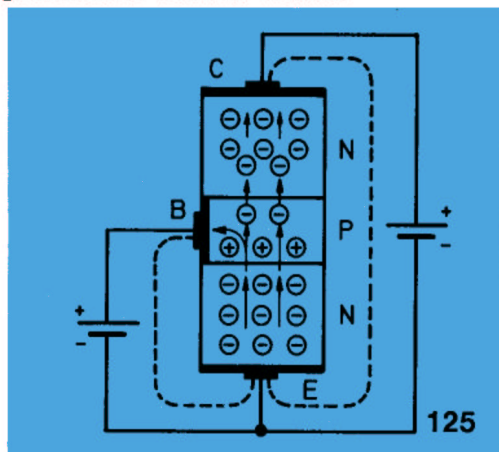
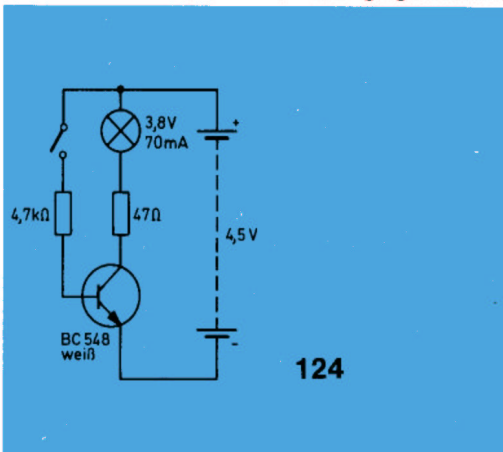
Man erkennt in der Abb. 119, daß zwischen zwei n-leitenden Bereichen ein p-leitender liegt. Die n-Bereiche sind der Kollektor und der Emitter, der p-Bereich ist die Basis. Schließt man nun wie in Abb. 113 und 114 die Basis und den Emitter in einen Stromkreis, dann kann nur ein Strom fließen, wenn die Basis zum positiven Pol der Spannungsquelle liegt (Abb. 120). Andernfalls vergrößert sich die Sperrschicht, und der pn-Übergang sperrt.

Derselbe Vorgang im Halbleiter spielt sich ab, wenn wie in Abb. 115 und Abb. 116, die Basis und der Kollektor des Transistors in den Stromkreis geschaltet werden. Es findet wiederum nur dann ein Stromfluß statt, wenn die Basis eine positive Spannung erhält (Abb. 121).

Daß beim Anschluß des Kollektors und des Emitters in den Stromkreis in beiden Richtungen kein Stromfluß möglich ist, läßt sich erklären nach Abb. 122, Abb. 123:



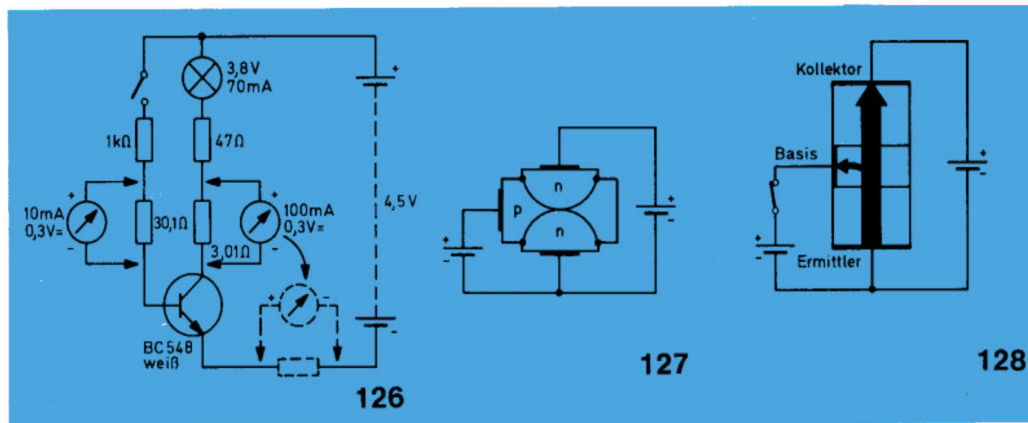
Je nach der Polung der Batterieanschlüsse sperrt entweder die obere oder die untere Grenzschicht, so daß kein Strom hindurchfließen kann. Man kann sagen, daß ein Transistor sich wie zwei gegensinnig geschaltete Dioden verhält.



Die Funktion des Transistors wird dann deutlich, wenn alle drei Anschlüsse gleichzeitig mit Spannungsquellen verbunden sind. Aus der Abb. 124 ist zu erkennen, daß die Basis und der Kollektor zum positiven Pol, der Emitter zum negativen Pol der Spannungsquelle liegen. Vor der Basis liegt ein Widerstand zur Strombegrenzung.

Nach dem Anschluß der Batterie leuchtet die Lampe zunächst nicht. Das ist nach den vorhergehenden Versuchen und Erläuterungen auch nicht zu erwarten. Erst wenn der Schalter betätigt wird, also ein Strom durch die Basis fließt, leuchtet die Lampe auf. Es muß dann also auch ein Strom durch den Kollektor fließen. Bei dieser Schaltung spielen sich an den Grenzschichten im Transistor gleichzeitig mehrere Vorgänge ab, die nacheinander betrachtet werden sollen:

Wird der Schalter vor der Basis geschlossen, so fließt ein Elektronenstrom vom Minuspol der Batterie durch den Emitter in die Basisschicht. Die positiven Löcher in der Basisschicht rekombinieren mit den Elektronen. Da aber die Basis nur wenige tausendstel Millimeter dünn ist, dringen die Elektronen durch bis zur Basis-Kollektor-Grenzschicht. Dort wirkt bereits die positive Kollektorspannung, so daß die Elektronen durch die Kollektorschicht zum positiven Pol der Spannungsquelle wandern. Es sind also bei dieser Schaltung des Transistors zwei Stromkreise erkennbar: Der **Emitter-Basis-Stromkreis** und der **Emitter-Kollektor-Stromkreis** (Abb. 125).



Nach Abb. 126 soll untersucht werden, in welchem Verhältnis die Stromstärken im Basis-Emitter und im Emitter-Kollektor-Stromkreis stehen. Das Meßinstrument wird nacheinander an den angegebenen Stellen in die Stromkreise geschaltet und jeweils nach dem Betätigen des Schalters der Strom gemessen. Der Basisstrom wird mit dem Meßbereich 10 mA, Shunt 30,1Ω, Kollektor- und Emitterstrom mit dem Meßbereich 100 mA, Shunt 3,01Ω, gemessen. Es ergeben sich drei Werte:

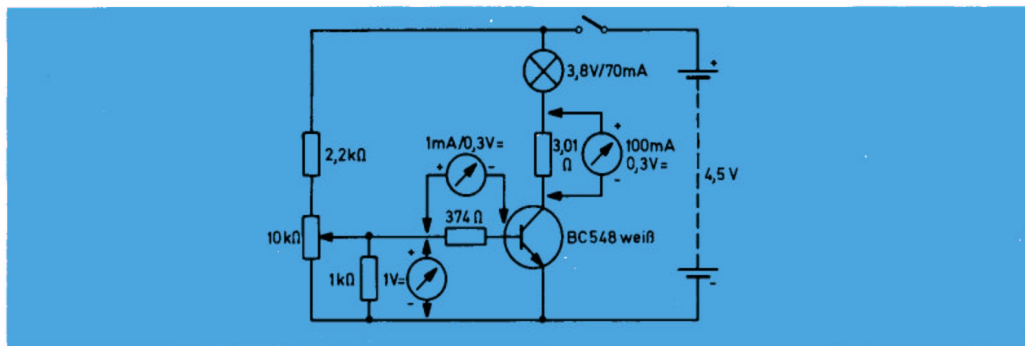
Basisstrom	mA
Emitterstrom	mA
Kollektorstrom	mA

Auffällig an dem Ergebnis ist, daß nach dem Betätigen des Schalters ein sehr kleiner (5 mA) Basisstrom fließt. Trotzdem steuert dieser kleine Strom den sehr viel größeren, durch den Kollektor und Emitter fließt. Der Kollektorstrom beträgt ca. 70 mA, und der Emitterstrom setzt sich aus den beiden Strömen zusammen und erreicht für diese Schaltung ca. 75 mA.

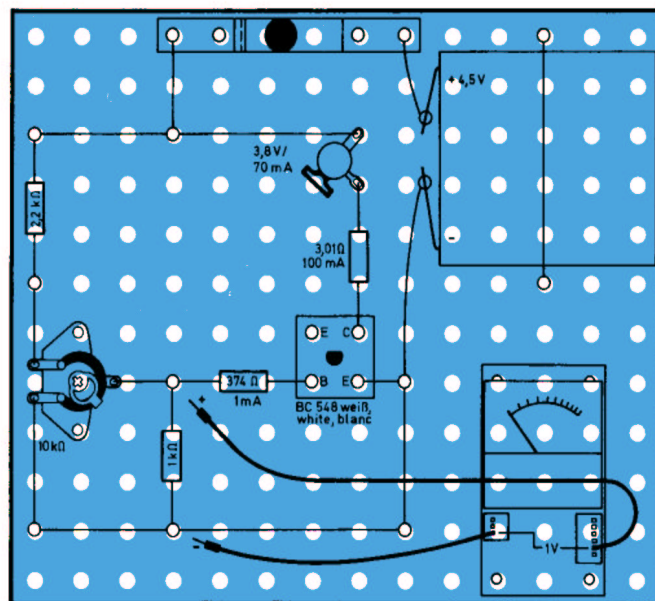
In den schematischen Darstellungen der Schichtenfolge am Transistor sind die drei Schichten jeweils gleich stark gezeichnet. In Wirklichkeit ist aber die mittlere Schicht, die Basis, viel dünner als die übrigen (Abb. 127).

Beim Anschluß der Spannungsquelle fließt ein Elektronenstrom von der unteren n-Schicht durch die Grenzschicht und den p-Bereich zum positiven Anschluß der Batterie. Dabei geraten aber Elektronen auch in die obere Grenzschicht, weil die Abstände sehr klein sind. Sie beeinflussen hier die Ladungen, so daß die positive Batteriespannung wirksam wird. Die Elektronen wandern durch die Sperrschicht hindurch, und damit fließt auch im rechten Stromkreis ein Strom.

Der größte Teil der Elektronen fließt vom Emmitter nicht in die Basis, sondern in die obere Grenzschicht und damit in den Kollektor. Dabei spielen auch die unterschiedlichen Spannungsverhältnisse an Basis und Kollektor eine Rolle. Ein sehr kleiner Strom durch die Basis steuert damit einen viel größeren durch den Kollektor (Abb. 128).



129



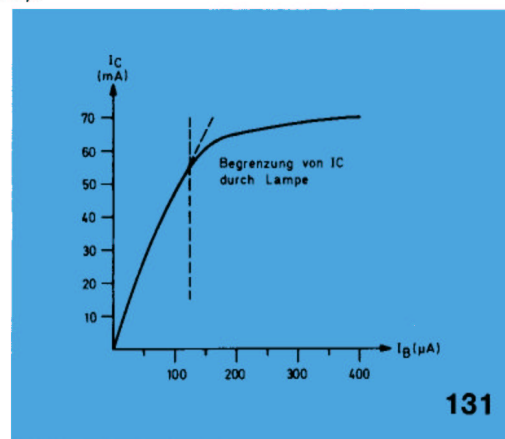
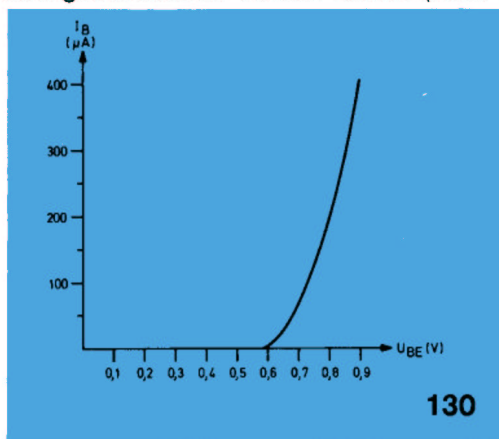
Daß ein Basisstrom nur fließen kann, wenn eine Basisspannung anliegt, ergibt sich aus dem bereits Dargestellten. Die Basisspannung bestimmt die Höhe des Basisstroms, und damit ist auch der Kollektorstrom abhängig von der Basisspannung. Diese Abhängigkeit zwischen Basisspannung und Kollektorstrom soll nach Abb. 129 untersucht werden.

Mit dem Potentiometer wird zunächst die Basisspannung eingestellt und mit dem Meßgerät (Meßbereich 1 V) kontrolliert. In Abständen von 100 mV (0,1 V) – beginnend bei 0,4 Volt – regelt man die Basisspannung ein, mißt dann den zugehörigen Basisstrom und den entsprechenden Kollektorstrom. Die Werte lassen sich in einer Tabelle zusammenfassen:

	Basisspannung (U_B)	Basisstrom (I_B)	Kollektorstrom (I_C)
0,4 Volt			
0,5 Volt			
0,6 Volt			
0,7 Volt			
0,8 Volt			

Die in der Tabelle zusammengetragenen Meßergebnisse lassen sich auch grafisch darstellen. Die Abhängigkeit des Basisstroms von der Basisspannung ist prinzipiell bereits von der Diode her bekannt, denn hier kann man ja von einer Diode in Durchlaßrichtung sprechen. Um überhaupt einen Stromfluß zu erzielen, muß die Antidiffusionsspannung für Silizium überwunden werden. In dem sehr schmalen Bereich zwischen 0,5 V und 0,7 V steigt die Kurve sehr steil an, d. h. eine geringfügige Änderung der Basisspannung erzielt eine große Änderung des Basisstroms. Diese Kennlinie nennt man **Eingangskennlinie** (Abb. 130).

Stellt man die Beziehung zwischen dem Basisstrom I_B und dem Kollektorstrom I_C ebenfalls grafisch dar, dann stellt man fest, daß der Anstieg nahezu linear verläuft, d. h. eine Verdoppelung des Basisstroms zieht eine Verdoppelung des Kollektorstroms nach sich. Über 55 mA tritt jedoch eine Begrenzung des Kollektorstroms durch den Lampenwiderstand ein. Ohne den Arbeitswiderstand würde die Kurve den gestrichelten Verlauf haben (Abb. 131).



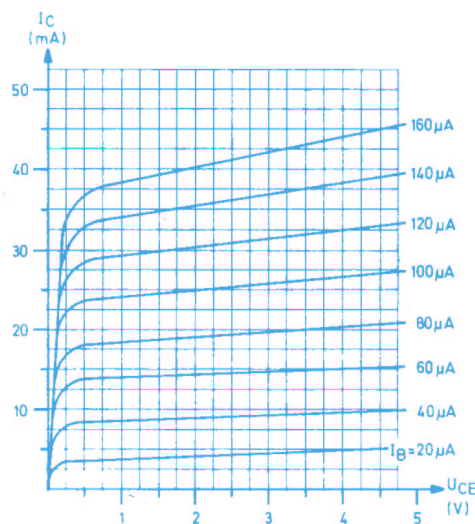
Neben diesen beiden Kennlinien benötigt man für die Verwendung eines Transistors in einer Schaltung die **Ausgangskennlinien**. Die Ausgangskennlinien geben Auskunft über die Anhängigkeit des Kollektorstroms I_C von der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} bei festgelegten Basisströmen. Ein Beispiel: Ein Basisstrom von

$20\mu\text{A}$ wird eingestellt, und bei einer Kollektor-Emitter-Spannung von 2 V mißt man den Kollektorstrom. Dann erhöht man die Kollektor-Emitter-Spannung schrittweise um z. B. 2 V und liest den Kollektorstrom ab.

Mit den aufgenommenen Werten erhält man eine **Kennlinie**. Aus dieser Kennlinie kann man später ohne Messungen ablesen, daß sich der Kollektorstrom bei festem Basisstrom nur sehr geringfügig ändert, wenn die Kollektor-Emitter-Spannung ansteigt.

Nach dieser ersten Kennlinie erhöht man den Basisstrom z. B. auf $40\mu\text{A}$, verändert wieder schrittweise die Kollektor-Emitter-Spannung und mißt den Kollektorstrom. Auch diese Werte setzt man zu einer Kennlinie um.

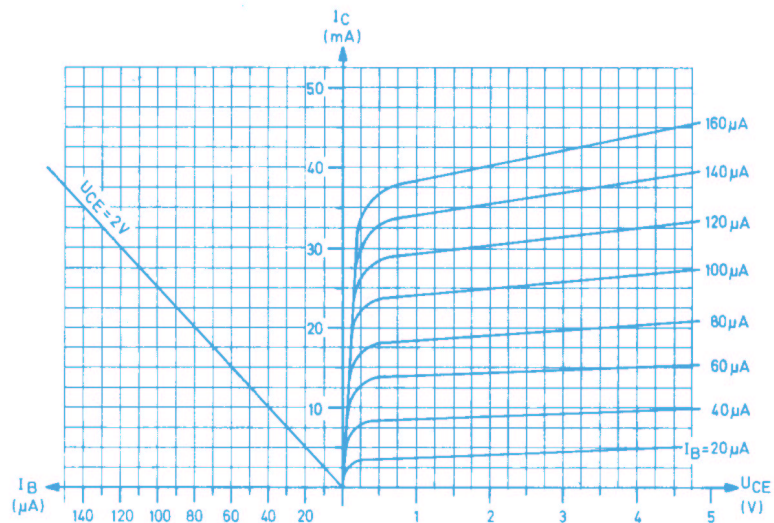
Für jeden veränderten Basisstrom stellt man auf die gleiche Art eine Kennlinie auf und erhält ein ganzes Feld von Ausgangskennlinien (Abb. 132).



132

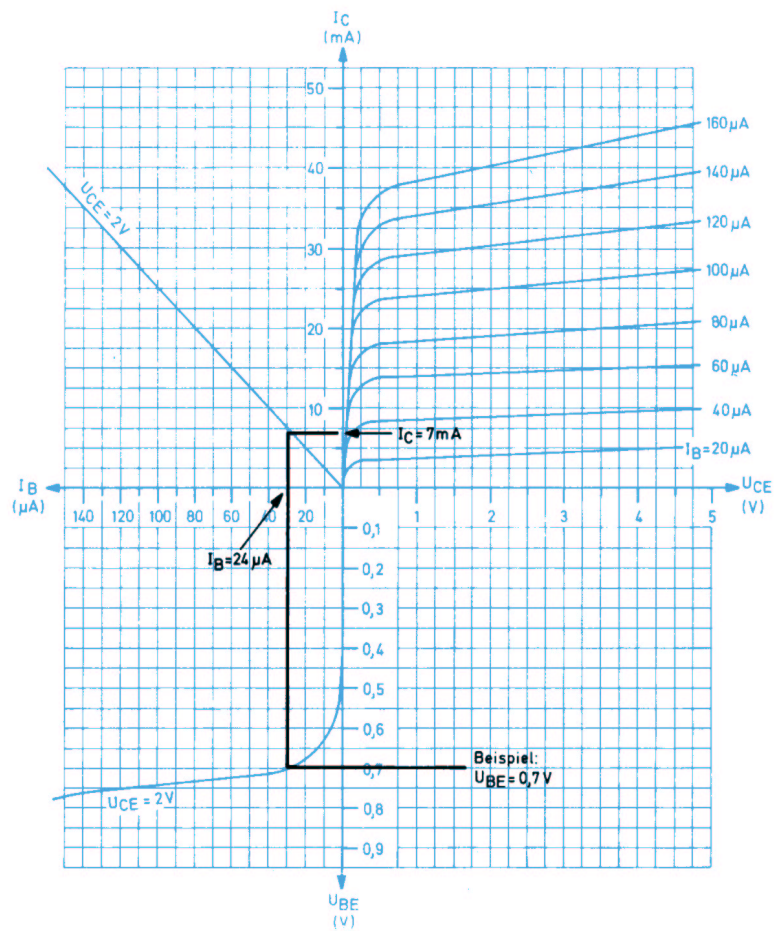
Alle Kennlinien sagen aus, daß für die Höhe des Kollektorstroms nicht so sehr die Kollektor-Emitter-Spannung verantwortlich ist, sondern überwiegend die Höhe des Basisstroms.

Welche Bedeutung haben nun die Kennlinien, die nach den elektrischen Größen gezeichnet wurden? Stellt man sie alle in einem Koordinatensystem dar, dann sind sie eine unerläßliche Hilfe bei der Berechnung von Transistorschaltungen. Dabei geht man folgendermaßen vor: Man klappt die Kennlinie Basisstrom I_B / Kollektorstrom I_C nach links um. Dann kann diese Kennlinie neben dem Ausgangskennlinienfeld liegen, weil sie beide dieselbe Bezugsgröße I_C haben (Abb. 133).



133

Darunter trägt man dann die Eingangskennlinie Basisspannung U_B / Basisstrom I_B ein, wobei wieder die gemeinsame Größe – in diesem Fall I_B – auf einer Achse liegt. Man erhält dann folgende Darstellung (Abb. 134):



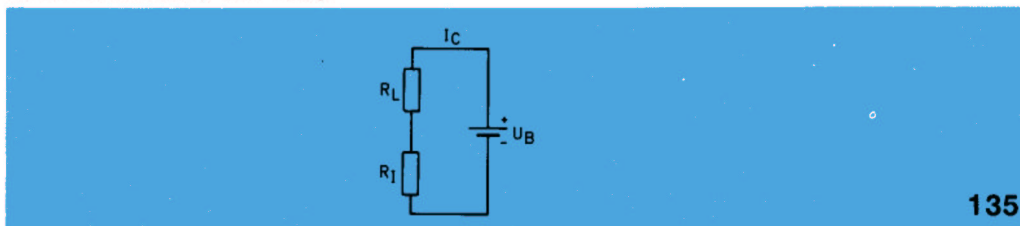
134

Aus diesem Schaubild (Abb. 134) kann man nun mit einem Blick die Zusammenhänge zwischen den Spannungen und Strömen entnehmen.

Ein Beispiel: Am Transistor liegt eine Basisspannung von 0,7 V. Den zugehörigen Basisstrom ermittelt man, wenn man sich von 0,7 V im unteren Teil der senkrechten Achse eine waagerechte Hilfslinie nach links bis zur Kurve denkt. Geht man vom Schnittpunkt dieser Hilfslinie mit der Kurve senkrecht nach oben, liest man den zu dieser Basisspannung gehörenden Basisstrom von ca. $24 \mu\text{A}$ ab. Welchen Kollektorstrom dieser Basisstrom erzeugt, ermittelt man, wenn von $24 \mu\text{A}$ weiter senkrecht nach oben bis zur nächsten Kurve verlängert. Geht man dann waagerecht nach rechts zur senkrechten Achse, kann ein Kollektorstrom von 7 mA abgelesen werden. In gleicher Weise lassen sich die zu anderen Basisspannungen gehörenden Werte ermitteln.

Der Kollektor des Transistors wird mit einem Lastwiderstand R_L belastet, um daran einen Spannungsabfall zu erzeugen. Auch der Transistor hat einen Innenwiderstand R_i . Denn es fließt nur ein bestimmter Strom hindurch, der zum einen vom Batteriestrom, zum anderen von der Kollektor-Emitter-Spannung abhängt.

Ersatzweise kann man diesen Widerstand anstelle des Transistors in einen Stromkreis zeichnen (Abb. 135).



Es liegen also R_L und R_i in Reihe, ihre Werte addieren sich zu einem Gesamtwiderstand. An jedem der Widerstände fällt eine Spannung ab, die von verschiedenen Bedingungen abhängt. Es sollen zwei Extremfälle näher untersucht werden:

1. Nimmt man an, daß bei einer Betriebsspannung von 4,5 V der Transistor gesperrt ist, dann fällt die volle Batteriespannung ab, und der Kollektorstrom I_c ist Null. Diese Bedingungen – $I_c = 0 \text{ mA}$, $U_{CE} = 4,5 \text{ V}$ – werden auf der waagerechten Achse im Koordinatensystem für das Kennlinienfeld eingetragen.
2. Im zweiten Fall soll der Transistor ganz durchgesteuert sein, sein Widerstand beträgt annähernd Null Ohm. Dann fällt fast die gesamte Batteriespannung U_B von 4,5 V an R_L ab. Nimmt man an, daß R_L einen Widerstand von 220Ω hat, so errechnet sich der Kollektorstrom nach dem Ohmschen Gesetz:

$$I_c = \frac{U_B}{R_L}$$

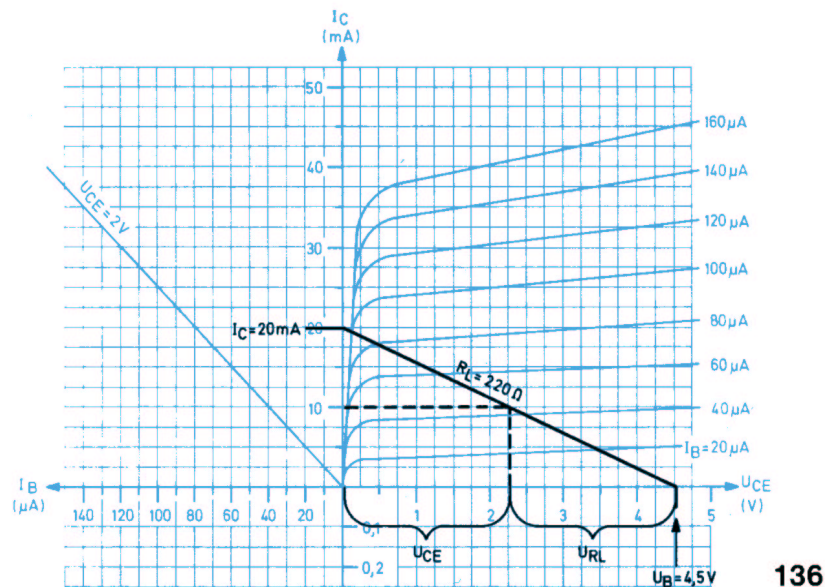
$$I_c = \frac{4,5 \text{ V}}{220 \Omega}$$

$$I_c \approx 0,02 \text{ A}$$

$$I_c \approx 20 \text{ mA}$$

Diese Bedingungen trägt man auf der senkrechten Achse im Koordinatensystem ein.

Da die Kennlinie eines Widerstands eine Gerade ist, werden die beiden gefundenen Werte miteinander verbunden. Man erhält die **Arbeitskennlinie** für den Kollektorwiderstand $R_L = 220 \Omega$ (Abb. 93):



Welche Beziehungen bestehen nun zwischen der Arbeitskennlinie und den Ausgangskennlinien? Angenommen, es wird ein Kollektorstrom I_C von 10 mA gemessen. Wie groß ist dann der Spannungsabfall am Transistor und am Kollektorwiderstand R_L ?

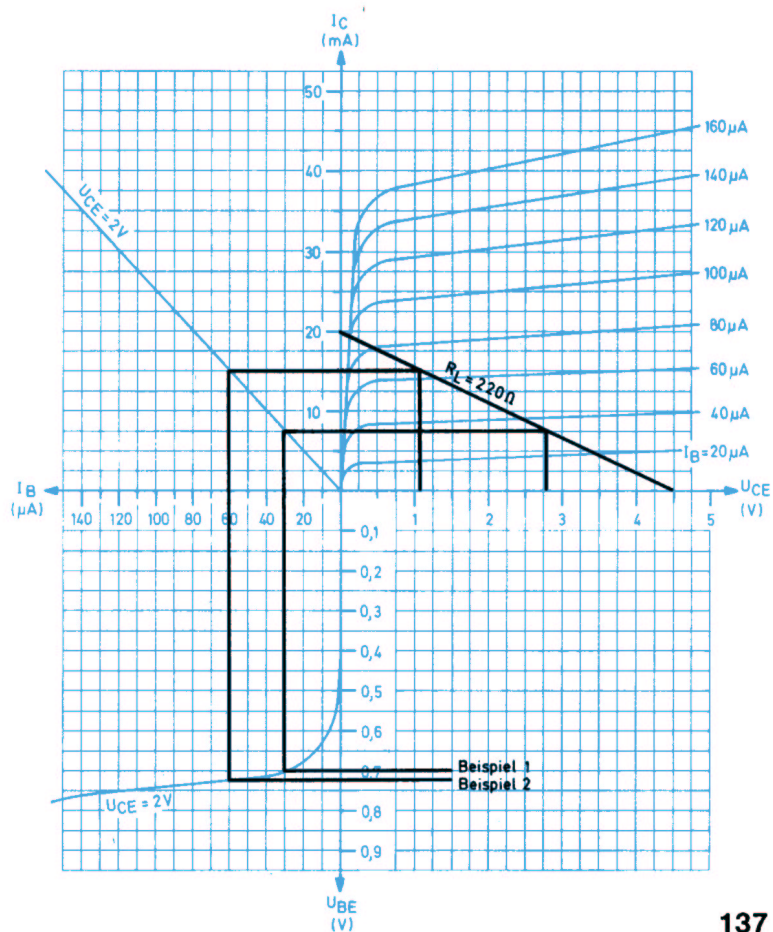
Von $I_C = 10$ mA geht man waagerecht nach rechts bis zur Kennlinie von R_L und dann senkrecht nach unten und liest eine Spannung von ca. 2,3 V ab. Das bedeutet, der Spannungsabfall am Transistor bei einem Strom von 10 mA beträgt 2,3 V. Die restliche Spannung von ca. 2,2 V fällt am Kollektorwiderstand R_L ab.

In Abb. 137 sind sämtliche Kennlinien eines Transistors und die Arbeitskennlinie des Kollektorwiderstands 220Ω angegeben. An zwei Beispielen soll noch einmal der Gebrauch erläutert werden.

Beispiel 1: Eine Basis-Emitter-Spannung U_{BE} von 0,7 V erzeugt einen Basisstrom I_B von $24 \mu A$. Es stellt sich ein Kollektorstrom I_C von 5 mA ein. Die Kollektor-Emitter-Spannung ist dann 2,9 V, der Spannungsabfall an R_L beträgt 1,6 V.

Beispiel 2:

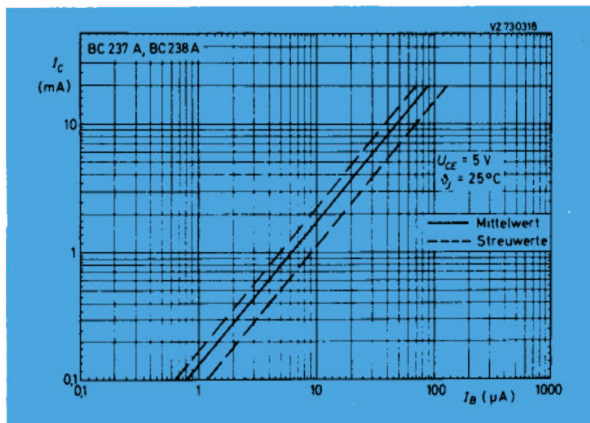
U_{BE}	=	0,72 V
I_B	=	60 μA
I_C	=	14 mA
U_{CE}	=	1,1 V
U_{RL}	=	3,4 V



137

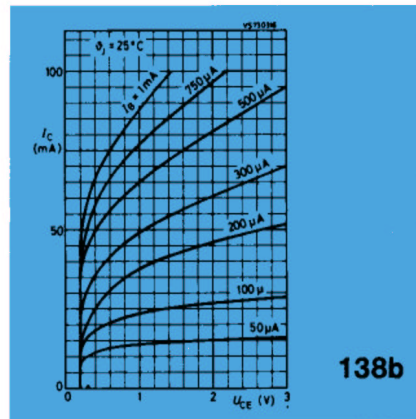
Für die Berechnung einer Transistorschaltung sind sämtliche Kennlinien für diesen betreffenden Transistor eine große Hilfe. Damit nämlich eine Verstärkerschaltung einwandfrei und ohne Verzerrungen arbeitet, müssen die Spannungs- und Stromwerte am Transistor innerhalb der vom Hersteller angegebenen Daten liegen. Für den Transistor BC 548 oder BC 238 liegen folgende Herstellerangaben und Kennlinien (Abb. 138) vor:

Kollektor-Emitterspannung	$U_{CE} = \text{max. } 30 \text{ V}$
Kollektor-Basisspannung	$U_{CB} = \text{max. } 30 \text{ V}$
Kollektorstrom	$I_C = \text{max. } 200 \text{ mA}$
Verlustleistung	$P_{\text{tot}} = \text{max. } 200 \text{ mW}$
Gleichstromverstärkung bei $U_{CE} = 5 \text{ V}$, $I_C = 2 \text{ mA}$	$B = 100 - 600$



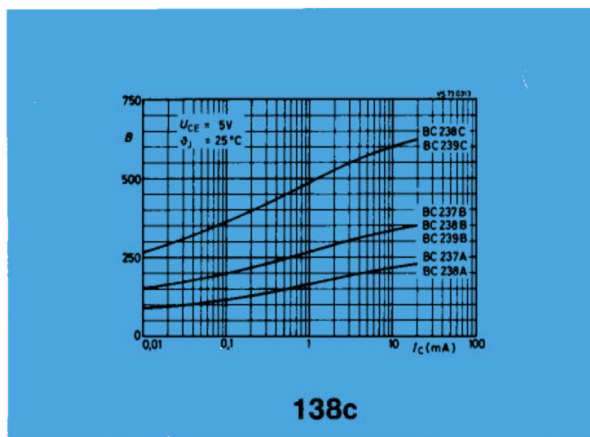
Kollektorstrom I_C in Abhängigkeit vom Basisstrom I_B .

138a



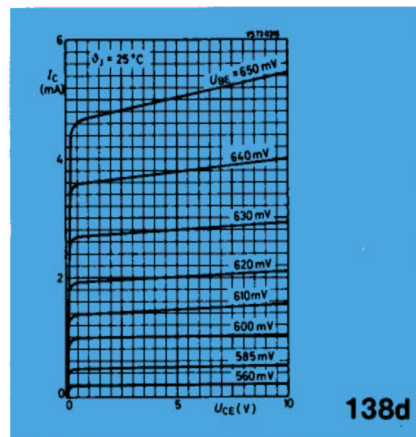
Kollektorstrom I_C in Abhängigkeit von der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} bei unterschiedlichen Basisspannungen U_{BE} .

138b



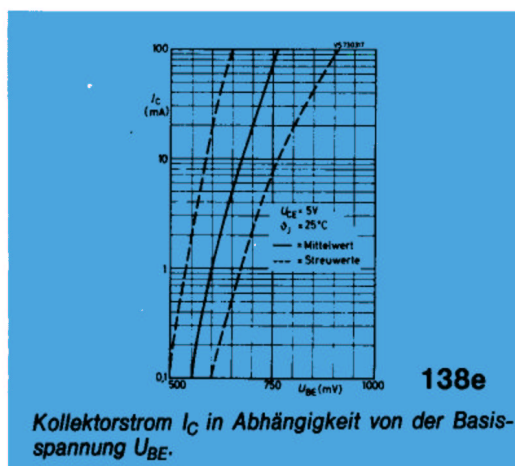
Stromverstärkungsfaktor B in Abhängigkeit vom Kollektorstrom I_C . Der BC 238 streut zwischen den Werten für A und C um den mittleren Wert B.

138c



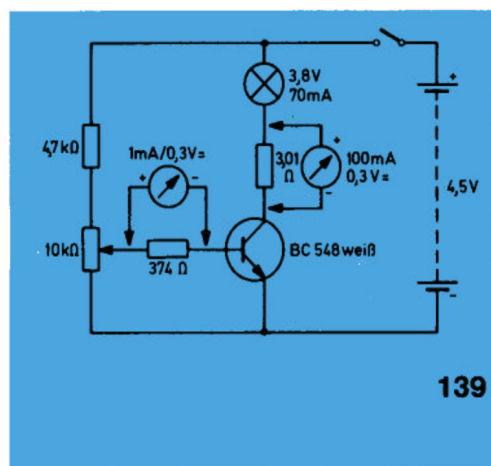
Kollektorstrom I_C in Abhängigkeit von der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} bei unterschiedlichen Basisströmen I_B .

138d



Kollektorstrom I_C in Abhängigkeit von der Basis-Spannung U_{BE} .

138e



139

Mit der Schaltung nach Abb. 139 kann man untersuchen, wie ein Transistor Ströme verstärkt. Dazu mißt man den Kollektorstrom, der sich bei einem bestimmten Basisstrom einstellt. Sodann setzt man Basis- und Kollektorstrom zu einander in Beziehung und ermittelt auf diese Weise die **Stromverstärkung**.

Das Meßgerät (Meßbereich 1 mA, Shunt 374 Ω) wird zunächst in die Basisleitung gelegt. Mit dem Potentiometer stellt man dann einen Basisstrom von 0,5 mA ein. Die Lampe im Kollektorkreis leuchtet.

Nun schaltet man das Meßgerät (Meßbereich 100 mA, Shunt 3,01 Ω) zwischen Kollektor und Lampe und liest den Kollektorstrom ab. Aus den Werten für Basis- und Kollektorstrom errechnet sich die Stromverstärkung wie folgt:

$$B = \frac{I_C}{I_B}$$

Ein Zahlenbeispiel: $B = \frac{70 \text{ mA}}{0,7 \text{ mA}}$

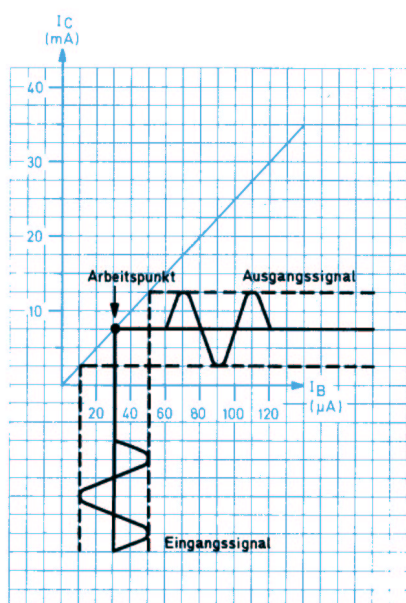
$$B = 100$$

Die in Schaltung nach Abb. 139 ermittelten Werte können davon allerdings erheblich abweichen, da lt. Herstellerangaben der Stromverstärkungsfaktor stark schwankt.

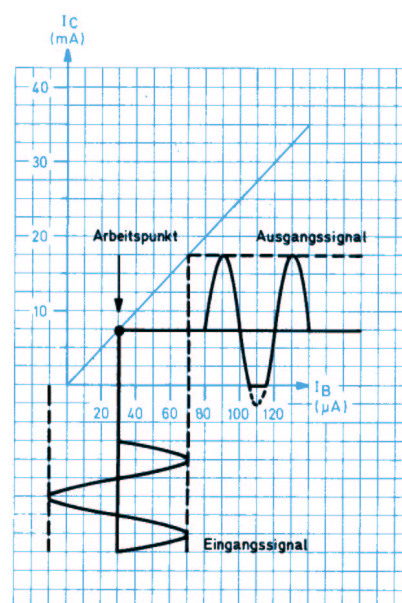
Ändert man den Basisstrom, so ändert sich auch der Kollektorstrom. Stellt man z. B. den Kollektorstrom auf 50 mA ein, so ist auch der Basisstrom geringer. Das bestätigt die Messung, die man vornimmt, indem das Meßgerät (Meßbereich 1 mA) wieder an den Shunt in der Basisleitung des Transistors (Abb. 139) gelegt wird.

Mit dem Basisstrom stellt man einen bestimmten Kollektorstrom ein. Man sagt, der Basisstrom bestimmt den **Arbeitspunkt** des Transistors. Je nach Höhe des Basisstroms kann der Arbeitspunkt hoch oder niedrig eingestellt werden. Dabei gibt es eine optimale Einstellung. Sie ist dann gegeben, wenn der Transistor bei einem geringstmöglichen Kollektorstrom unverzerrt verstärkt.

Die grafische Darstellung in Abb. 140 stellt die Zusammenhänge dar:



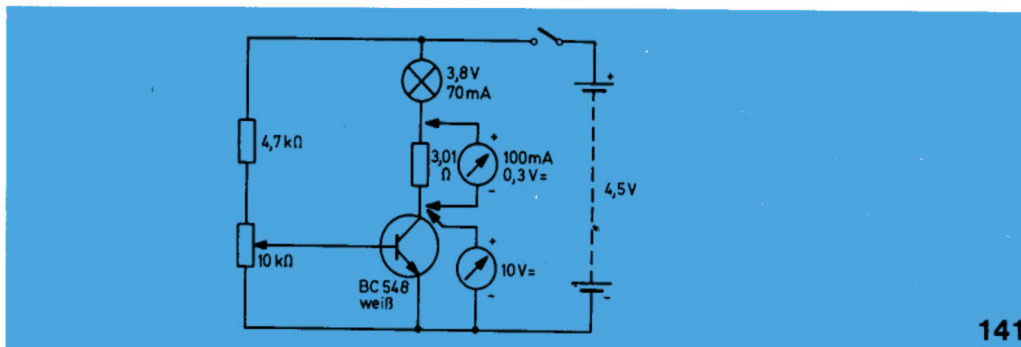
140a



140b

Man erkennt, daß die optimale Einstellung des Arbeitspunktes von der Größe des Eingangssignales abhängt. Je größer es ist, desto mehr muß der Basisstrom angehoben werden. Das läßt sich jedoch nur bis zu einer bestimmten Grenze verwirklichen, die durch die Kennwerte des Transistors bestimmt ist.

Basisstrom, Basisspannung, Kollektorstrom und Kollektorspannung können bei einem Transistor innerhalb eines bestimmten Bereiches schwanken, wobei gewisse Grenzen auf keinen Fall überschritten werden dürfen. So sind in den Datenblättern der Halbleiterhersteller immer die Grenzwerte für I_B , U_{BE} , I_C und U_{CE} angegeben. ein weiterer Grenzwert ist die **Verlustleistung** eines Transistors. Sie beträgt bei dem Transistor BC 548 z. B. 200 mW.



Mit der Schaltung nach Abb. 141 untersucht man die Abhängigkeit von Kollektorspannung und Kollektorstrom bei verschiedenen Arbeitspunkteinstellungen. Dazu schaltet man zunächst das Meßgerät (Meßbereich 100 mA, Shunt 3,01 Ω) in die Kollektorleitung und regelt den Basisstrom so ein, daß die Lampe hell leuchtet. Nun schaltet man das Meßgerät als Voltmeter (Meßbereich 10 V) parallel zum Transistor und mißt so die Kollektorspannung. Der niedrige Wert mag zunächst überraschen. Er ergibt sich aber aus der Spannungsteilung, die durch den Widerstand der Glühlampe und den **Innenwiderstand** R_i des Transistors hervorgerufen wird. Die höhere Spannung liegt an der Glühlampe, am Transistor befindet sich nur ein Rest der Batteriespannung. Man nennt sie Kollektor-Emitter-Restspannung oder auch Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung.

Obwohl durch den Transistor ein hoher Strom fließt, ist seine Verlustleistung (P_{tot}) wegen der sehr niedrigen Kollektor-Emitter-Restspannung ($U_{CE sat}$) gering. Eine Rechnung:

$$\begin{aligned} P_{tot} &= I \cdot U & I_C &= 0,1 \text{ A} \\ P_{tot} &= 0,1 \text{ A} \cdot 0,6 \text{ V} & U_{CE sat} &= 0,6 \text{ V} \\ P_{tot} &= 0,06 \text{ W} \end{aligned}$$

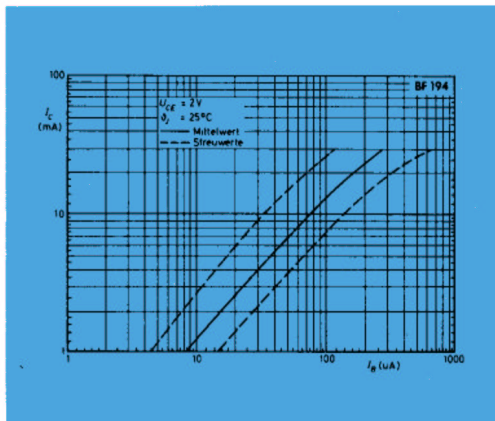
Auch wenn man den Kollektorstrom mit dem Potentiometer noch weiter erhöht, bleibt die Verlustleistung klein, und der Transistor arbeitet betriebssicher. Die Grenze bilden die höchstzulässigen Ströme (Kollektor- und Basisstrom), die durch den Transistor fließen dürfen. Sie werden vom Hersteller angegeben. Für den Transistor BC 548 (238) beträgt der maximale Kollektorstrom 0,2 A.

Die Betriebsdaten sind bei jedem Transistor charakteristisch. Bislang wurde der Nf-Transistor BC 548 (238) untersucht. Die Ergebnisse zeigen andere Werte, wenn man die Messungen nach Abb. 129, 139 und 141 mit dem Hf-Transistor BF 494 wiederholt.

Vergleicht man z. B. das Verhalten von Basisstrom zu Kollektorstrom (Abb. 139), so erkennt man, daß durch den Hf-Transistor BF 494 weniger Kollektorstrom fließt als durch den Transistor BC 548 (238).

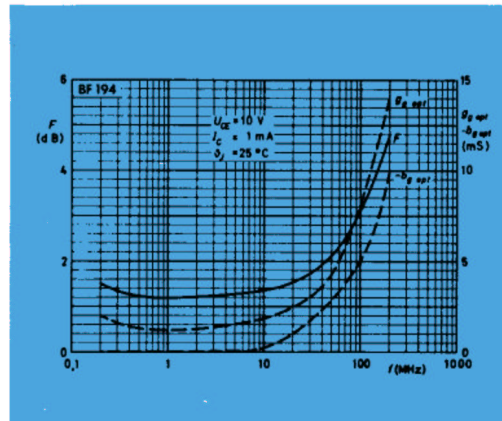
Aus den Kennlinien des BF 494 (entspricht auch BF 194) und des BC 548 erkennt man, daß die Stromverstärkung des Hf-Typs BF 494 geringer ist (Abb. 142).

Wegen des kleineren Kollektorstroms beim BF 494 ist auch der Zusammenhang zwischen Kollektorstrom und Kollektor-Emitter-Restspannung ein anderer.



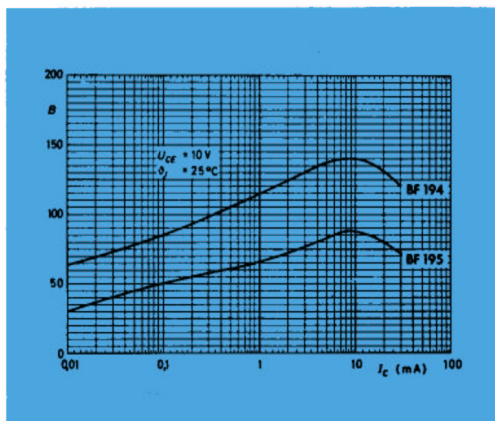
142a

Kollektorstrom I_C in Abhängigkeit vom Basisstrom I_B .



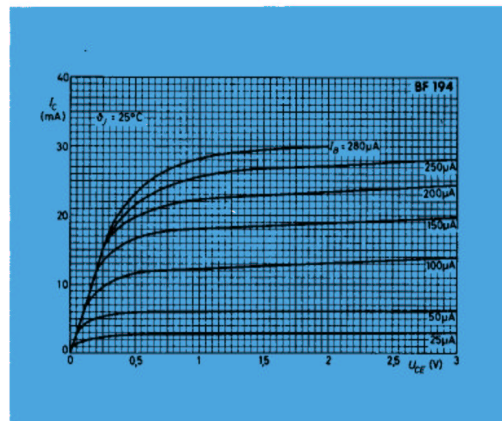
142b

Rauschzahl F in Abhängigkeit von der Frequenz f .



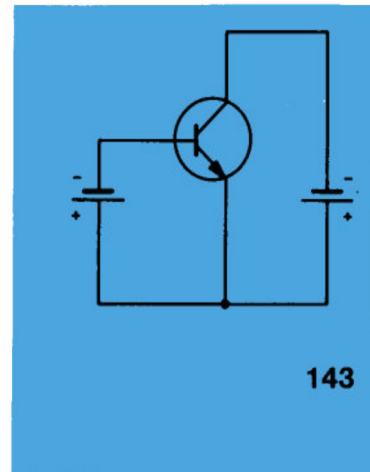
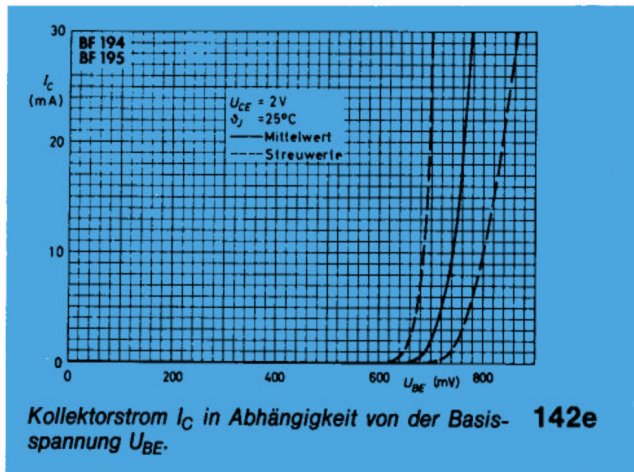
142c

Stromverstärkungsfaktor B in Abhängigkeit vom Kollektorstrom I_C .



142d

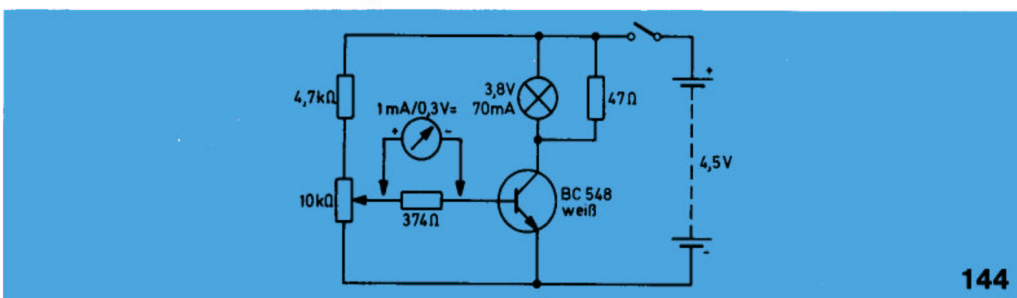
Kollektorstrom I_C in Abhängigkeit von der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} bei unterschiedlichen Basisströmen I_B .



Bei Hf-Transistoren kommt es nämlich nicht so sehr auf hohe Stromverstärkung an, sondern auf andere Eigenschaften. So ist das Rauschverhalten sehr wesentlich. Ein Hf-Transistor, der stark rauscht (hohe Rauschzahl F), deckt schwache Signale mit dem eigenen Rauschen zu. Auch dürfen die Kapazitäten an den Sperrschichten eines Hf-Transistors nur klein sein. Ein hochfrequenter Strom würde anderenfalls durch den Transistor wie durch einen Kondensator fließen und nicht der Steuerung, also einer Verstärkung unterliegen.

Obwohl die bisherigen Transistorschaltungen mit zwei verschiedenen Transistortypen durchgeführt wurden – BC 548 und BF 494 – haben doch beide Transistoren etwas gemeinsam: Die Schichtenfolge des Halbleitermaterials ist in beiden npn. Daneben gibt es noch Transistoren, in denen eine pnp Schichtenfolge vorliegt. Grundsätzlich verhalten sich diese **pnp-Transistoren** ebenso wie npn-Transistoren. Um aber pnp-Transistoren richtig zu betreiben, müssen sie so an die Spannungsquellen angeschlossen werden, daß die Basis zum negativen Pol liegt (Abb. 143).

Die Leitfähigkeit aller Halbleiter ist von der Temperatur abhängig. Bei Dioden und Transistoren weisen die Elektronen bei höherer Temperatur im Kristall eine größere Beweglichkeit auf. Unter dem Einfluß einer konstanten Spannung nimmt darum der Elektronenstrom mit der Temperatur zu.



Mit der Schaltung nach Abb. 144 kann man die **Temperaturabhängigkeit** des Basisstromes eines Transistors zeigen.

Um sie meßtechnisch zu erfassen, legt man zuerst das Instrument als Amperemeter (Meßbereich 1 mA) in die Schaltung. Dabei muß die Polarität des Meßgeräts beachtet werden: Der Pluspol des Meßgerätes liegt am Schleifer des Potentiometers, der Minuspol an der Basis. Die Basisspannung wird mit dem Potentiometer so eingestellt, daß die Lampe im Kollektorkreis hell leuchtet.

Man mißt etwa eine Minute den Basisstrom. Während dieser Zeit ergibt sich keine Änderung des Stromes. Berührt man den Transistor, ist keine Erwärmung festzustellen. Dann wird das Potentiometer soweit zurückgedreht, bis die Lampe im Kollektorkreis mit halber Helligkeit leuchtet.

Man mißt den Strom etwa eine Minute lang und beobachtet eine minimale Zunahme des Basisstromes. Berührt man den Transistor (Vorsicht!) ist eine Erwärmung festzustellen. Sollten Anstieg des Basisstroms und Erwärmung sehr rasch erfolgen, muß sofort abgeschaltet werden, da sonst der Transistor zerstört wird.

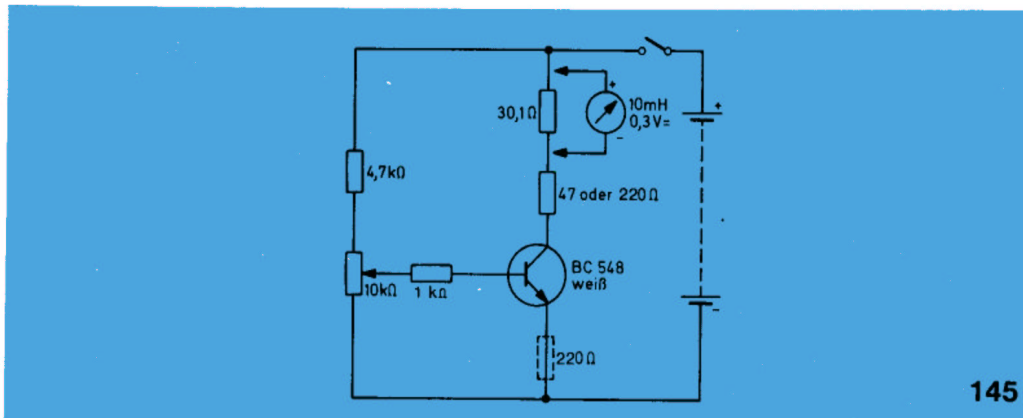
Der Versuch zeigt, daß die Reduzierung der Basisvorspannung einen kleineren Basisstrom bewirkt, ohne daß der Kollektorstrom – angezeigt durch die Helligkeit der Lampe – nennenswert abnimmt. Der kleinere Basisstrom hat lediglich eine Erwärmung des Transistors zur Folge, weil zwischen Kollektor und Emitter eine hohe Spannung abfällt (die Verlustleistung ist größer geworden). Diese Erwärmung zieht aber wieder einen stärkeren Basisstrom nach sich, so daß die Temperatur weiter ansteigt. Stromanstieg und Erwärmung schaukeln sich gegenseitig auf, bis der Transistorkristall schmilzt und damit funktionsunfähig wird.

Deshalb ist zum sicheren Betrieb eines Transistors die genaue Einstellung des Arbeitspunktes wichtig. Beim Vergleich der gemessenen Ströme bei richtiger Einstellung (erste Messung) und beim „Thermischen Run-away“ (engl. Ansteigen des Stromes durch Wärmeeinwirkung), erkennt man die geringe Differenz zwischen sicherer und falscher Einstellung eines Transistors.

Beim Betrieb von Transistoren muß die Verlustleistung als Wärme abgeführt werden. Eine zusätzliche Sicherheit im Betrieb von Transistoren erreicht man durch Kühlfahnen oder **Kühlsterne**, die auf das Transistorgehäuse aufgesetzt werden. Bei Leistungstransistoren mit hohen Strömen verwendet man auch **Kühlkörper** mit Rippen, ähnlich wie beim Zylinder von Motorrädern. Die Wärme wird dadurch besonders wirkungsvoll abgestrahlt, und der Transistor bleibt kalt und stabil.

Neben diesen Maßnahmen der Stabilisierung wendet man auch elektrische an.

Eine stabilisierende Wirkung gegenüber Stromschwankungen durch Temperatureinflüsse wird mit einer **Stromgegenkopplung** erreicht. Dabei wird der Emitterstrom eines Transistors mit dem Basisstrom „gegengekoppelt“. Die Funktion einer solchen Schaltung (Abb. 145) sollen die folgenden Untersuchungen erklären.



145

Zuerst mißt man den Kollektorstrom (Meßbereich 10 mA, Shunt 30,1 Ω). Die Basisvorspannung ist dabei mit dem Potentiometer so eingestellt, daß das Instrument im Kollektorkreis 5 mA anzeigt.

Nach dem Austauschen des Widerstandes von 47 Ω in 220 Ω zwischen Kollektor und Meßgerät kontrolliert man dann erneut den Kollektorstrom. Die Änderung des Stromes ist gering. Fügt man den Widerstand zwischen Emitter und Minusleitung ein, zeigt das Meßgerät einen viel geringeren Strom an.

Obgleich bei beiden Messungen derselbe Widerstand verwendet wurde, macht es einen großen Unterschied, an welcher Stelle des Kollektorstromkreises er sich befindet.

Der Strom, der durch den Widerstand fließt, ruft an ihm einen Spannungsabfall hervor. Die Höhe des Spannungsabfalls errechnet sich nach dem Ohmschen Gesetz: $I = \frac{U}{R}$, folglich $U = I \cdot R$.

Da in der Meßschaltung der Strom auf 5 mA eingestellt wird und der Widerstand 220 Ω beträgt, ergibt sich ein Spannungsabfall von $U = 0,005 \cdot 220$

$$U = 1,1 \text{ V}$$

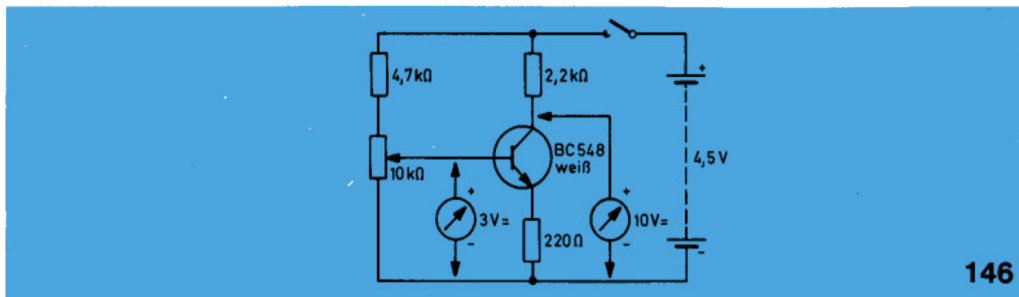
Um den Betrag von 1,1 V wird die Kollektorspannung verringert. Die Folge ist eine kaum merkbare Verminderung des Kollektorstroms.

Liegt der Widerstand in der Emitterzuleitung, müßten an ihm auch etwa 1,1 V abfallen. Da der Strom aber – wie das Instrument anzeigt – erheblich geringer ist, ergibt sich auch ein entsprechend kleinerer Spannungsabfall. Die Spannung zwischen Basis und Emitter wird um den Spannungsabfall am Widerstand $R = 220 \Omega$ kleiner. Die nun niedrigere Spannung zwischen Basis und Emitter verschiebt den Arbeitspunkt des Transistors, so daß ein geringerer Kollektorstrom fließt.

Da der Spannungsabfall am Widerstand in der Emitterzuleitung vom Strom abhängig ist, der im Kollektorkreis fließt, stellt sich bei starken Strömen eine hohe Spannung, bei schwachen eine niedrige ein. Die höhere Spannung am Emitterwiderstand ist aber gleichbedeutend mit einer kleineren Basis-Emitterspannung. Der Arbeitspunkt wird also um so weiter nach unten auf der Kennlinie des Transistors verschoben, wie der Strom zunimmt.

Diesen Effekt bezeichnet man als **Gegenkopplung** oder Stromgegenkopplung. Sie wird in dieser Schaltung durch den Emitterwiderstand bewirkt.

Sehr oft wird ein Transistor als **Spannungsverstärker** eingesetzt. Die Besonderheiten eines solchen Spannungsverstärkers werden mit der nachstehend beschriebenen Meßschaltung nach Abb. 146 untersucht.



Ein Transistor kann nicht auf direkte Weise Spannungen verstärken. Der Transistor ist ein Element, das nur Ströme verstärkt. Um mit ihm Spannungen zu verstärken, bedarf es der Umsetzung von Strömen in Spannungsabfälle an Widerständen, die sich nach dem Ohm'schen Gesetz errechnen. In dieser Schaltung wird die Basisvorspannung zur Spannung am Kollektor in Beziehung gesetzt. Dabei ist diese Kollektorspannung als Differenz zwischen dem Spannungsabfall am Kollektorwiderstand und der Betriebsspannung anzusehen. Zunächst stellt man mit dem Potentiometer die Basisvorspannung so ein, daß das Meßgerät zwischen Minusleitung und Kollektor eine Spannung von 3,5 V anzeigt. Danach wird das Meßgerät zwischen Basis und Minusleitung gelegt und die Basisvorspannung gemessen. Man notiert ihren Wert und stellt eine um 0,1 V höhere Spannung ein. Die Messung der Kollektorspannung ergibt: Sie ist kleiner geworden.

Aus der Differenz der Basis- und Kollektorspannungswerte errechnet sich die Spannungsverstärkung V_U eines Transistors:

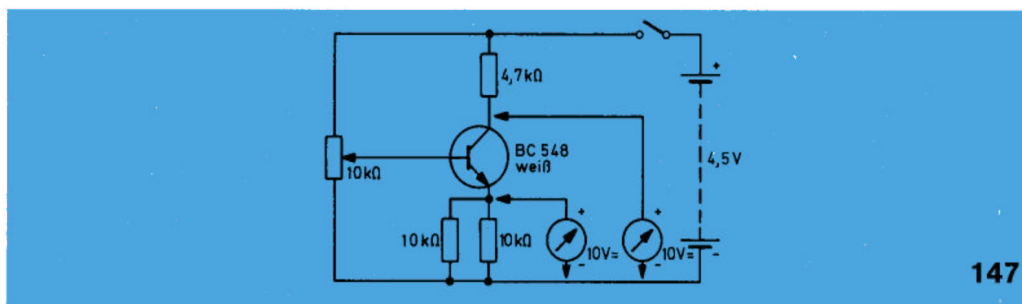
Berechnungsbeispiel:	$U_{C1} = 3,5 \text{ V}$	$V_U = \frac{\Delta U_C}{\Delta U_B}$
	$U_{C2} = 2,5 \text{ V}$	$V_U = \frac{3,25 - 2,5}{0,8 - 0,7}$
	$U_{B1} = 0,7 \text{ V}$	$V_U = \frac{1}{0,1}$
	$U_{B2} = 0,8 \text{ V}$	$V_U = 10$

Dieser ermittelte Wert der Spannungsverstärkung gilt nur in einem bestimmten Bereich. Bei einer Spannung von 0 V an der Basis des Transistors entspricht die Kollektorspannung annähernd der Betriebsspannung. Auch beim Erhöhen der Basisvorspannung stellt sich zunächst keine Änderung der Kollektorspannung ein. Erst von einem bestimmten Wert der Basisvorspannung an setzt eine Verstärkung ein.

Der Transistor ist unterhalb dieser **Schwellschpannung** gesperrt. Beim Festlegen der Basisvorspannung ist also darauf zu achten, daß der Transistor in einem Bereich arbeitet, in dem Änderungen der Basisvorspannung auch entsprechende Änderungen der Kollektorspannung hervorrufen. Dabei muß die mittlere Basisvorspannung so bemessen sein, daß Abweichungen zu positiven oder negativen Werten hin in gleicher Weise verstärkt werden. Diese mittlere Basisvorspannung stellt den Arbeitspunkt des Transistors dar. Seine Einstellung ist entscheidend für die Funktion des Transistors.

In vielen Schaltungen ist es von Bedeutung, daß das verstärkte Ausgangssignal in seiner Polarität dem Eingangssignal entspricht.

In der Fachsprache verwendet man für diesen Sachverhalt den Begriff der gleichen **Phasenlage**. Sie soll in der nachstehenden Verstärkerschaltung nach Abb. 147 untersucht werden. Das Meßgerät wird als Spannungsmesser (Meßbereich 10 V) eingesetzt.



Zum Prüfen der Phasenlage werden die Spannungsänderungen am Emitter und am Kollektor bei einer Änderung der Basisvorspannung untersucht.

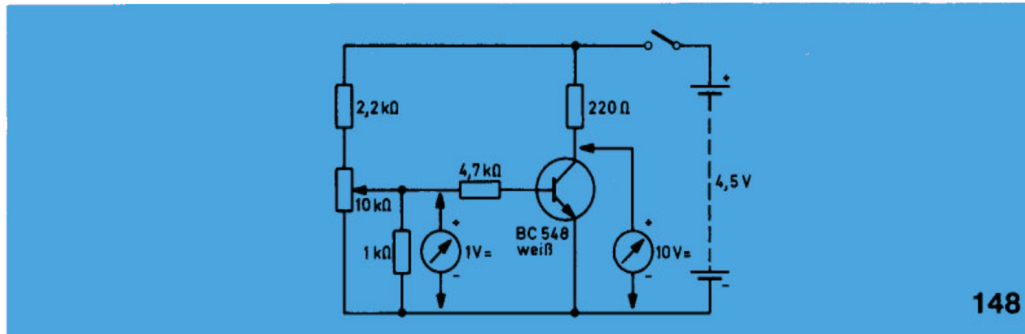
Zunächst wird das Meßgerät zwischen Kollektor und Minusleitung gelegt. Mit dem Potentiometer erhöht oder verringert man die Basisvorspannung und verfolgt dabei, wie sich die Kollektorspannung ändert. Danach wird entsprechend das Verhalten der Emitterspannung untersucht. Dazu schaltet man das Meßgerät zwischen Emitter und Minusleitung. Aus beiden Messungen ergibt sich:

Die Kollektorspannung nimmt ab, wenn die Basisvorspannung ansteigt und umgekehrt. Die Phasenlage der Kollektorspannung entspricht nicht der Basisvorspannung.

Die Emitterspannung nimmt zu, wenn die Basisvorspannung erhöht wird. Emitter- und Basisvorspannung haben also die gleiche Phasenlage.

Die Messungen sagen auch aus, daß die Spannungsverstärkung am Kollektor und am Emitter gleich groß sind. Da die Spannung am Emitter niemals höher sein kann als an der Basis, bleibt die Spannungsverstärkung am Emitter stets kleiner als 1. Man verwendet darum eine solche Schaltung auch nur in besonderen Fällen zur Stromverstärkung. Sie weist einen hohen Eingangs- und niedrige Ausgangswiderstände auf.

Alle Transistorschaltungen lassen sich auf drei Grundtypen zurückführen. Eine davon, die häufig benutzt wird, ist die Emitterschaltung. Ihre Besonderheiten sollen nach Abb. 148 untersucht werden.



Für die Eingangs- und Ausgangsspannung ist der gemeinsame Bezugspunkt der Emitter.

Zum Messen der Verstärkung eines Transistors in **Emitterschaltung** werden nacheinander zwei Spannungen an die Basis gegeben und die entsprechenden Kollektorspannungen bestimmt. Dazu wird das Meßgerät (Meßbereich 1 V) an den Schleiferanschluß des Potentiometers und die Minusleitung gelegt. Man stellt nun einen Spannungswert ein, z. B. 0,6 V, und mißt die Spannung am Kollektor (Meßbereich 10 V). Danach wird das Meßgerät wieder an die Basis geschaltet und eine höhere Spannung eingestellt. Die entsprechende Kollektorspannung wird wieder gemessen.

Setzt man die Differenz der Basisvorspannungen in Beziehung zur Differenz der Kollektorspannungen, erhält man den Verstärkungsfaktor für Spannungen.

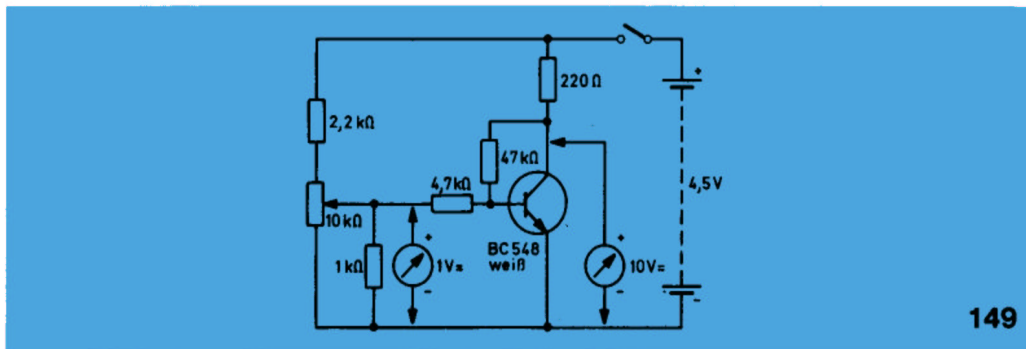
Ein Berechnungsbeispiel:

$$\begin{aligned}
 U_{B2} &= 0,8 \text{ V} & U_{C2} &= 1 \text{ V} & V_U &= \frac{U_{C1} - U_{C2}}{U_{B2} - U_{B1}} \\
 U_{B1} &= 0,6 \text{ V} & U_{C1} &= 4 \text{ V} & V_U &= \frac{4 \text{ V} - 1 \text{ V}}{0,8 \text{ V} - 0,6 \text{ V}} \\
 & & & & V_U &= \frac{3}{0,2} \\
 & & & & V_U &= 15
 \end{aligned}$$

Die Spannungsverstärkung ist in diesem Beispiel 15fach.

Verstärker in Emitterschaltung können auch mit Gegenkopplung betrieben werden. Sie arbeiten stabiler als solche ohne Gegenkopplung.

Die Gegenkopplung bewirkt man z. B. durch einen zusätzlichen Widerstand zwischen Kollektor und Basis oder durch einen Emitterwiderstand.



Um das Verhalten eines gegengekoppelten Verstärkers meßtechnisch zu erfassen, geht man wie bei der vorhergehenden Schaltung vor: Zu einem Wert der Basisvorspannung ermittelt man nach Abb. 149 die dazugehörige Kollektorspannung. Die Differenz von zwei Basis- und Kollektorspannungswerten setzt man wieder zueinander in Beziehung und erhält so die Spannungsverstärkung der Schaltung:

$$\begin{aligned} V_{B1} &= 0,3 \text{ V} \\ V_{B2} &= 0,75 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{C1} &= 4 \text{ V} \\ V_{C2} &= 1 \text{ V} \end{aligned}$$

$$V_U = \frac{V_{C1} - V_{C2}}{V_{B2} - V_{B1}}$$

$$V_U = \frac{4 \text{ V} - 1 \text{ V}}{0,75 \text{ V} - 0,3 \text{ V}}$$

$$V_U = \frac{3}{0,5}$$

$$V_U = 6$$

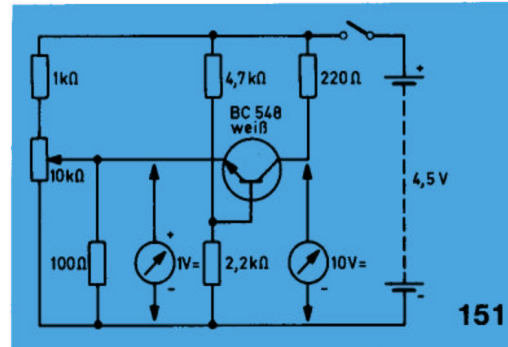
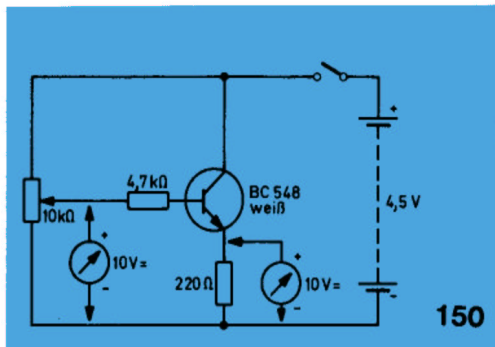
Die Spannungsverstärkung fällt niedriger aus als bei einem Verstärker ohne Gegenkopplung. Aus den Messungen ergibt sich auch, daß, wie schon bei der Schaltung nach Abb. 148, eine Spannungserhöhung an der Basis eine niedrigere Spannung am Kollektor bewirkt. Die Spannungen haben also nicht die gleiche Phasenlage. Man sagt sie sind um 180° gedreht.

Die Basisvorspannung in dieser Schaltung hängt wesentlich vom Widerstand $47 \text{ k}\Omega$ zwischen Basis und Kollektor ab. Über ihn gelangt immer dann eine niedrige Spannung an die Basis, wenn die Kollektorspannung (großer Kollektorstrom) klein ist. Umgekehrt erhöht sich die Basisvorspannung, wenn die Kollektorspannung hoch ist.

Die Kollektorspannung wirkt also der Basisvorspannung entgegen. Diese Gegenkopplung setzt die Verstärkung herab. Den Gewinn an Stabilität der Schaltung muß man also mit einem Verlust an Verstärkung bezahlen.

Eine andere Transistor-Grundschialtung ist die **Kollektorschaltung**. Merkmal dieser Schaltung ist, daß der Kollektor direkt an der Spannungsquelle liegt und das verstärkte Signal am Emitter abgenommen wird.

Zum Ausmessen der Schaltung nach Abb. 150 bestimmt man zu zwei verschiedenen Basisvorspannungen die dazugehörigen Emitterspannungen. Dazu wird das Meßgerät (Meßbereich 10 V) zunächst mit dem Mittelanschluß des Potentiometers



und der Minusleitung verbunden. Man stellt die Spannung mit dem Potentiometer auf 1 V ein und mißt die Spannung zwischen Emitter und Minusleitung (Meßbereich 10 V). Danach legt man das Meßgerät wieder an die Basis, stellt die Spannung auf einen höheren Wert, z. B. 4 V, ein und wiederholt die Messung der Emitterspannung. Die zweite Messung ergibt eine höhere Spannung. Aus den Differenzen der Basis- und Emitterspannungen läßt sich die Verstärkung errechnen.

$U_{B1} =$	$V_U = \frac{U_{E2} - U_{E1}}{U_{B2} - U_{B1}}$
$U_{B2} =$	
$U_{E1} =$	$V_U = \text{---}$
$U_{E2} =$	$V_U =$

Man erkennt, daß die Spannungsverstärkung kleiner als 1 ist. Das Ausgangssignal liegt phasengleich mit dem Eingangssignal.

Eine weitere Verstärkerschaltung, die besonders bei sehr hohen Frequenzen angewendet wird, ist die **Basisschaltung**. Das Signal wird auf den Emitter gegeben und verstärkt am Kollektor abgenommen.

Die Verstärkereigenschaften der Basisschaltung werden durch Vergleich der Signalspannungen am Ein- und Ausgang ermittelt. Man legt nach Abb. 151 die Eingangsspannung durch zwei Meßwerte fest und bestimmt die dazugehörigen Größen der Ausgangsspannung. Ein Signal, das zwischen den beiden festgelegten Werten der Eingangsspannung schwankt, z. B. eine Wechselspannung, wird dann am Ausgang Spannungen hervorrufen, die zwischen den beiden ermittelten Werten liegen. Die beiden Meßwerte stehen also für die Spitzenwerte einer Wechselspannung.

Zum Ermitteln der Signalspannung am Eingang wird das Meßgerät (Meßbereich 10 V) zwischen den Kollektor und die Minusleitung geschaltet. Man stellt mit dem Potentiometer eine Spannung U_C von 1 Volt ein. Dann mißt man die Steuerspannung, indem das Meßgerät (Meßbereich 1 V) zwischen den Emitter und die Minusleitung gelegt wird.

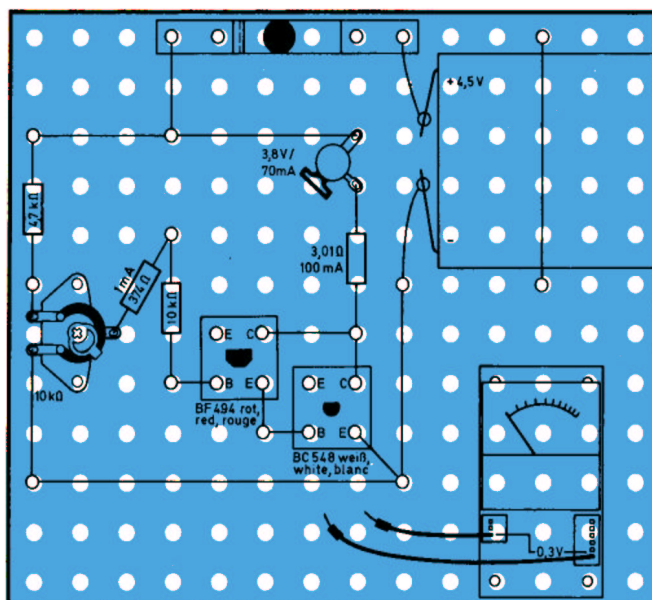
Entsprechend verfährt man bei der zweiten Messung. Zuerst wird mit dem Potentiometer die Kollektorspannung erhöht und gemessen. Dann ermittelt man die dazugehörige Emitterspannung, die sich nun ergeben hat. Aus den Meßdaten ergibt sich die Spannungsverstärkung der Schaltung wie folgt:

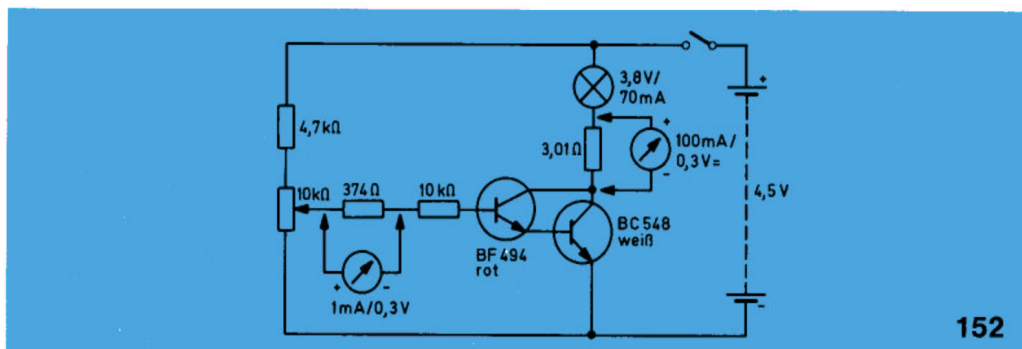
$U_{C1} =$ $U_{C2} =$ $U_{E1} =$ $U_{E2} =$	$V_U = \frac{U_{C2} - U_{C1}}{U_{E2} - U_{E1}}$ $V_U =$ _____ $V_U =$ _____
--	---

Vergleicht man die Spannungsverstärkungen von Emitter-, Kollektor- und Basis-schaltung, erkennt man, daß mit einer Emitterschaltung die höchsten Verstärkungs-faktoren zu erreichen sind.

Wenn es darauf ankommt, sehr hohe Stromverstärkung zu erreichen, wendet man die **Darlington-Schaltung** an. In dieser Schaltung sind zwei Transistoren so miteinander verbunden, daß der eine den Basisstrom des anderen steuert. Der Emitterstrom des ersten Transistors ist gleichzeitig der Basisstrom des zweiten Transistors. In diesem Beispiel werden die Darlington-Schaltung mit zwei getrennten Transistoren aufgebaut. Es gibt aber auch spezielle Darlington-Transistoren. Sie enthalten zwei Transistoren in einem Gehäuse.

Mit den nachstehend beschriebenen Messungen nach Abb. 152 sollen die besonders hohe Stromverstärkung und die Phasenlage von Eingangs- und Ausgangssignal untersucht werden.





Zum Bestimmen der Stromverstärkung schaltet man das Meßgerät (Meßbereich 1 mA, Shunt 374 Ω) zwischen den Mittelschluß des Potentiometers und den Basisvorwiderstand. Mit dem Potentiometer stellt man dann einen möglichst geringen Basisstrom von z. B. 0,05 mA ein.

Man schaltet nun das Meßgerät (Meßbereich 100 mA, Shunt 3,01 Ω) zwischen Glühlampe und Transistor. Der ermittelte Wert, z. B. 50 mA, wird mit dem Basisstrom verglichen und ergibt den Stromverstärkungsfaktor nach folgender Rechnung:

$$B = \frac{I_C}{I_B}$$

In unserem Beispiel: $B = \frac{50 \text{ mA}}{0,05 \text{ mA}}$
 $B = 1000$

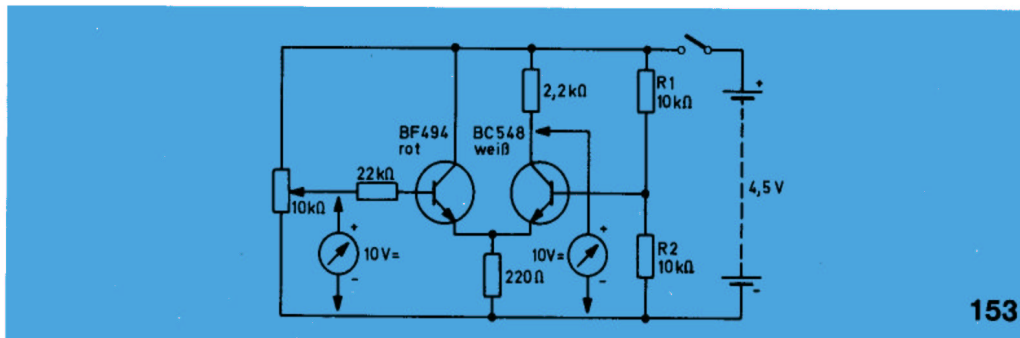
Vergleicht man die Stromverstärkungen von Transistoren und Darlington-Schaltungen, wird deutlich, daß mit der Darlington-Schaltung erheblich höhere Stromverstärkungen erreicht werden. Die Phasenlage des Eingangs- und Ausgangssignals ermittelt man, indem man die Spannung am Kollektor zur Spannung an der Basis in Beziehung setzt.

Dazu wird das Meßgerät (Meßbereich 10 V) zwischen Kollektor und Minusleitung gelegt. Regelt man mit dem Potentiometer die Basissspannung herauf, nimmt die Kollektorspannung ab. Da Transistor und Lampe einen Spannungsteiler bilden, nimmt darum die Spannung an der Lampe zu, und sie leuchtet heller. Basis- und Kollektorspannung sind also nicht phasengleich.

Differenzverstärker werden als Spannungsverstärker eingesetzt. Dabei wird die Eingangsspannung mit einer vorgegebenen, festen Bezugsspannung verglichen. Abweichungen der Eingangsspannung von der Bezugsspannung (Differenz der Spannungen) werden verstärkt und am Ausgang abgenommen.

Zum Verständnis des Differenzverstärkers werden zwei Werte der Eingangsspannung in Beziehung zu den entsprechenden Werten der Ausgangsspannung gesetzt. Im Schaltbild (Abb. 153) erkennt man zwei Transistoren, die über einen gemeinsamen Emittterwiderstand miteinander gekoppelt sind. An die Basis des ersten Transistors (BF 594) wird die Eingangsspannung gelegt, hier mit dem Potentiometer ver-

änderbar. Der zweite Transistor erhält eine feste Basisvorspannung über den Spannungsteiler R_1 / R_2 . Mit dem Potentiometer stellt man die gewünschte Spannung ein, z. B. 2 V. Nun mißt man die Spannung zwischen dem Kollektor des zweiten Transistors und der Minusleitung. Bei einer Eingangsspannung von 3 V wiederholt man die Messung der Kollektorspannung.



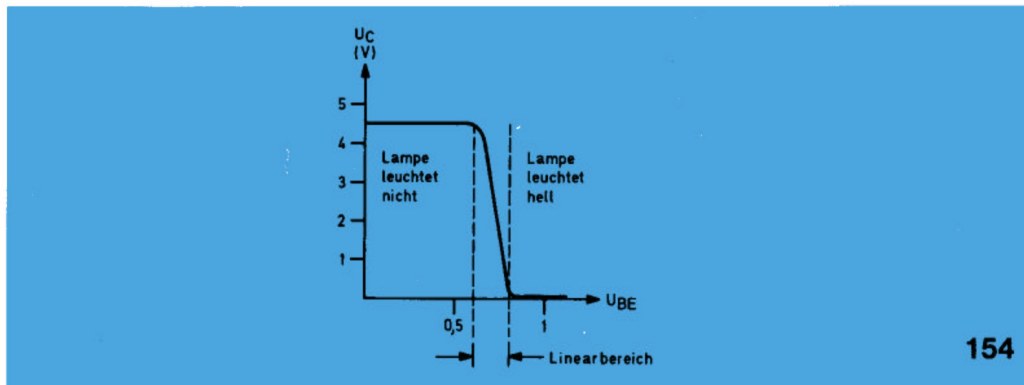
Aus den Werten der Ausgangs- und Eingangsspannungen errechnet sich die Spannungsverstärkung:

$$\begin{array}{ll}
 U_{C1} = & V_U = \frac{U_{C2} - U_{C1}}{U_{E2} - U_{E1}} \\
 U_{C2} = & \\
 U_{E1} = & V_U = \text{---} \\
 U_{E2} = & V_U =
 \end{array}$$

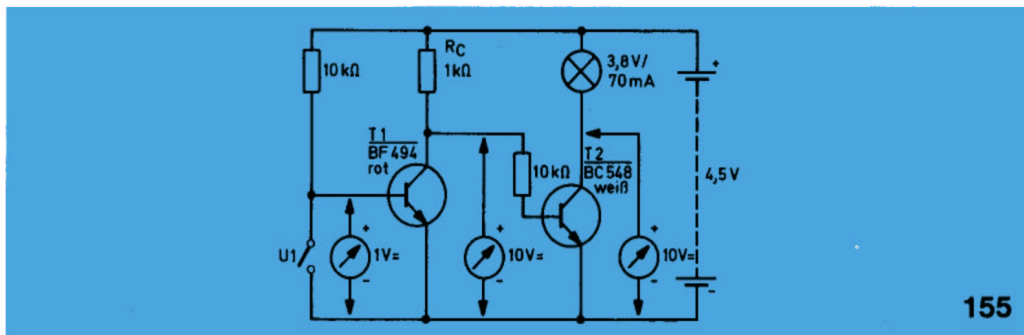
In der Schaltung bewirkt eine erhöhte Eingangsspannung einen stärkeren Kollektorstrom im ersten Transistor. Der stärkere Kollektorstrom fließt auch im Emitter, hier um den Basisstrom größer. In der Emitterzuleitung befindet sich der für beide Transistoren gemeinsame Widerstand. An ihm wird nun ein höherer Spannungsabfall hervorgerufen, der die Emitter-Basisspannung am zweiten Transistor verringert. Sein Kollektorstrom wird also kleiner. Der geringere Strom durch den Transistor bewirkt einen größeren Innenwiderstand. Mit dem Kollektorwiderstand bildet der zweite Transistor einen Spannungsteiler. Am Kollektor stellt sich darum beim nun größeren Innenwiderstand des Transistors auch eine höhere Spannung ein. Die Spannungen am Eingang und Ausgang sind phasengleich.

In den vorhergehenden Schaltungen wurde der Transistor als Verstärker untersucht. Ein weiterer Anwendungsbereich ist der **Schalterbetrieb**. Wird er als Schalter eingesetzt, gibt es für den Ein- und Ausgang nur zwei elektrische Zustände. Fließt ein entsprechend großer Basisstrom, ist der Transistor durchgeschaltet, und es fließt ein Kollektorstrom. Fließt kein Basisstrom, tritt auch kein Kollektorstrom auf. Die Spannung am Kollektor entspricht der Batteriespannung. Im Gegensatz dazu treten beim Verstärkerbetrieb sämtliche Zwischenwerte auf. Betätigt man in der Schaltung nach Abb. 141 das Potentiometer, liegt zunächst der Schleifer zum Minuspol der Batterie: Die Lampe leuchtet nicht.

Ab einer bestimmten positiven Basisspannung (Abb. 154) beginnt die Lampe zu leuchten und wird allmählich heller. In diesem Bereich wird der Transistor als Verstärker betrieben (Linearbereich). Ist die maximale Helligkeit erreicht, kann man die Basisspannung weiter steigern, ohne eine Änderung des Kollektorstroms zu erreichen. Dieser Bereich des Transistors wird für die Schaltfunktion angestrebt. Nun ändert sich die Kollektor-Emitter-Spannung nicht mehr. Die Sättigungsspannung des Transistors ist erreicht.



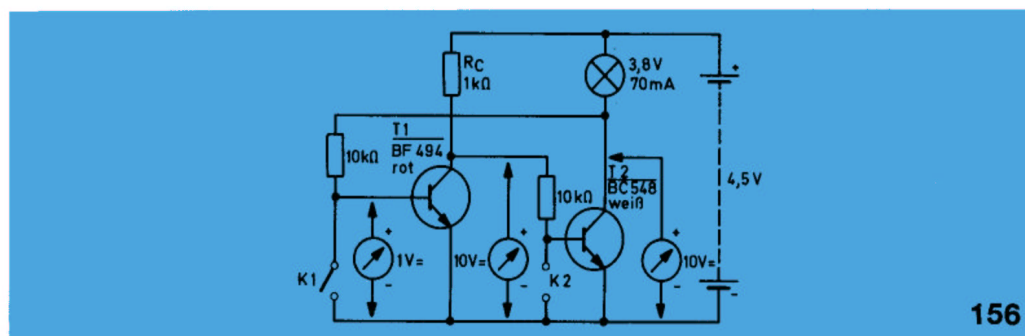
Bei den folgenden Experimenten werden Transistoren als Schalter eingesetzt. Diese Schaltungen nennt man **Kippschaltungen** oder **Multivibratoren**. Dabei werden mehrere Transistoren verwendet, die sich gegenseitig schalten. Einer davon ist der **Bistabile Multivibrator**, auch **Flip-Flop** genannt.



In der Schaltung nach Abbildung 155 sind zwei Transistoren in Reihe geschaltet. Im Kollektorkreis des zweiten Transistors T_2 befindet sich eine Glühlampe als Stromanzeige. Wenn man den Schalter K_1 schließt, erhält die Basis des ersten Transistors T_1 keine positive Belastung mehr, der Transistor sperrt, und es fließt kein Kollektorstrom. Die Spannung am Kollektor von T_1 ist gleich der Betriebsspannung (4,5 V). Sie gelangt über den Widerstand von $10\text{ k}\Omega$ auf die Basis des Transistors T_2 . Der positive Basisstrom schaltet die Kollektor-Emitter-Strecke, und die Lampe leuchtet. Öffnet man den Schalter K_1 , kann ein positiver Basisstrom durch T_1 fließen. Dieser bewirkt, daß T_1 leitet. Die Kollektor-Emitter-Spannung bricht zusammen, so daß die Basis von T_2 über den Widerstand von $10\text{ k}\Omega$ an Minus liegt. Der Transistor T_2 sperrt.

Die nachstehende Aufstellung gibt die Spannungszustände an den beiden Transistoren an:

	$U_{BE} T_1$	$U_{CE} T_1$	$U_{BE} T_2$	$U_{CE} T_2$
K_1 geschlossen	0 V	4,5 V	0,7 V	0 V
K_1 geöffnet	0,7 V	0 V	0 V	4,5 V

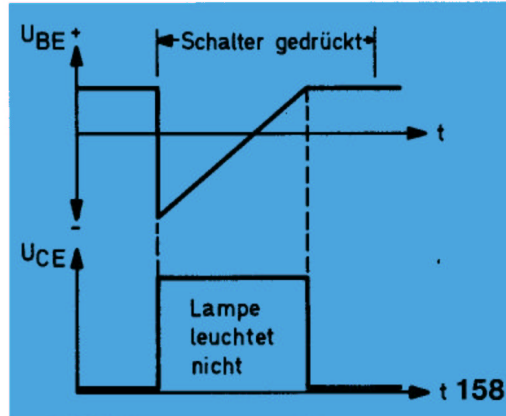
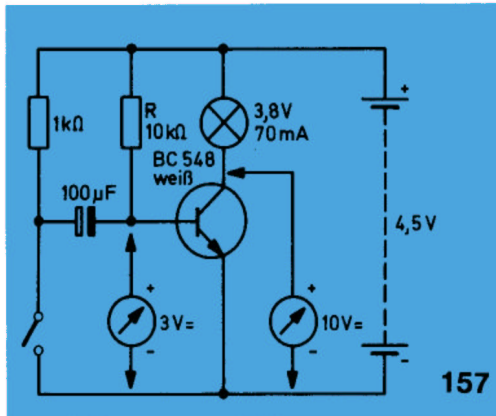


Um die vorhergehende Schaltung zum Flip-Flop zu erweitern, wird sie nach Abb. 156 abgeändert. Wenn man die Batterie angeklemmt hat, kann die Schaltung einen beliebigen Zustand annehmen, d. h. die Lampe leuchtet oder leuchtet nicht. Nimmt man an, daß nach dem Betätigen des Tastschalters K_1 die Glühlampe leuchtet, ist T_2 durchgeschaltet und T_1 sperrt. Überbrückt man kurzfristig den Kontakt K_2 , erlischt die Lampe, weil nun Transistor T_2 keine Basisvorspannung mehr erhält und sperrt. Vom Kollektor gelangt jetzt eine Vorspannung an die Basis von T_1 , so daß er durchschaltet. Die niedrige Kollektorspannung an T_1 gelangt wieder auf die Basis des Transistors T_2 . Obwohl Kontakt K_2 nicht mehr geschlossen ist, bleiben die Spannungszustände in der Schaltung erhalten. Überbrückt man nun kurzzeitig den Kontakt K_1 , erhält der Transistor T_1 keine Vorspannung mehr, so daß er sperrt. Über den Widerstand $10\text{ k}\Omega$ gelangt die hohe Kollektorspannung von T_1 an die Basis von T_2 . Er schaltet durch, und die Lampe leuchtet. Auch diese Spannungszustände bleiben erhalten, obwohl Kontakt K_1 (Tastschalter) nur kurzzeitig überbrückt wurde. Da in dieser Schaltung die beiden möglichen Schaltzustände stabil sind, nennt man sie Bistabiler Multivibrator.

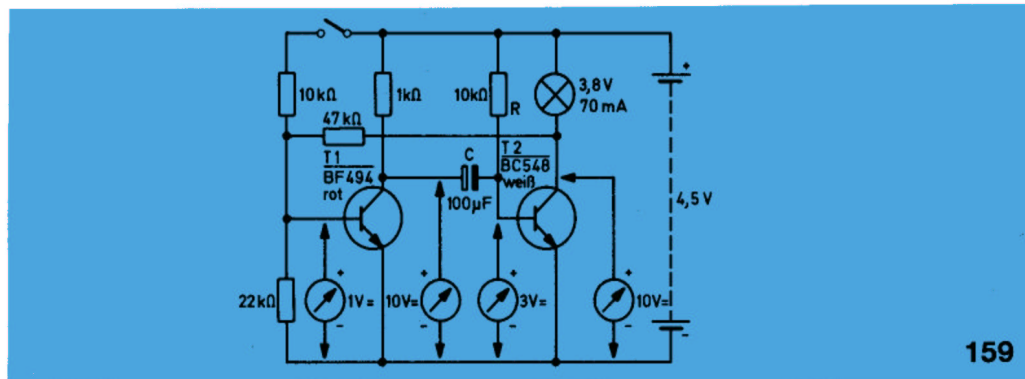
	$U_{BE} T_1$	$U_{CE} T_1$	$U_{BE} T_2$	$U_{CE} T_2$
	0 V	4,5 V	0,7 V	0 V
K_2 kurzzeitig geschlossen	↓ 0,7 V	↓ 0 V	↓ 0 V	↓ 4,5 V
K_1 kurzzeitig geschlossen	↓ 0 V	↓ 4,5 V	↓ 0,7 V	↓ 0 V

Den Kontakt K_2 bezeichnet man als Setz-Eingang, englisch **set**. Kontakt K_1 ist der Löscheingang, englisch **reset**. Ein Bistabiler Multivibrator wird in elektronischen Datenverarbeitungsanlagen als Speicher von Informationen, Zähler und als Teiler eingesetzt.

Eine weitere Kippschaltung ist der **monostabile Multivibrator** oder das Mono-Flop. Es hält einen bestimmten Schaltzustand und kippt dann in die Ausgangslage zurück.

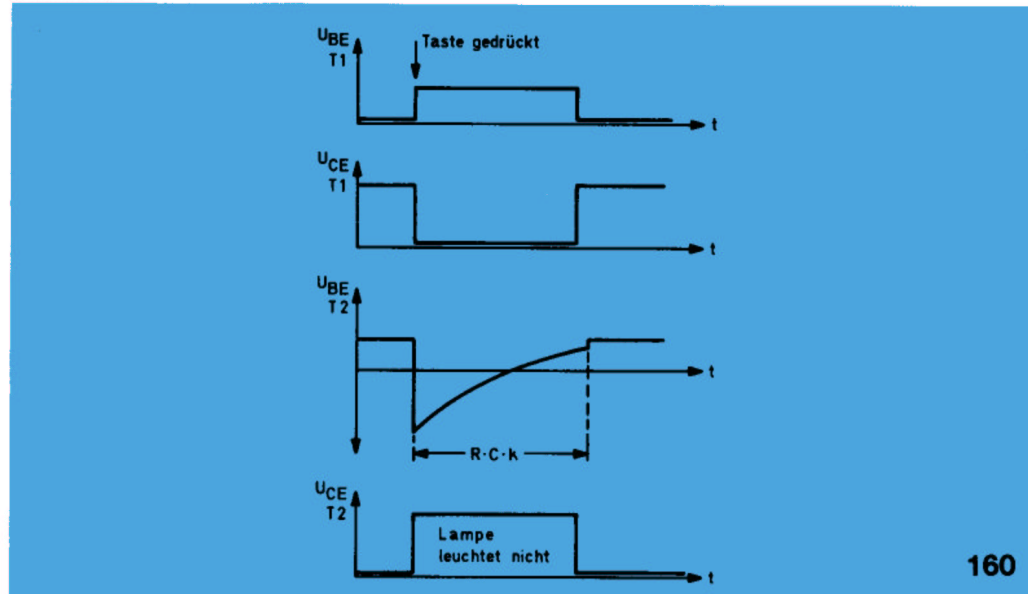


Das entscheidende Element in einer solchen Schaltung ist der Kondensator. Wenn nach Abb. 157 die Batteriespannung angelegt wird, leuchtet die Glühlampe. Betätigt man nun den Tastschalter, lädt sich der Kondensator auf, und die Basis des Transistors wird kurzzeitig gesperrt. Die Lampe erlischt. Über R_1 steigt dann die Spannung am Kondensator wieder an. Der Transistor schaltet erneut durch, die Lampe leuchtet. Eine solche Schaltung nennt man eine Zeitschaltung, die Abb. 158 zeigt die Funktion.



Die Zeitschaltung läßt sich mit einem zweiten Transistor zu einem Mono-Flop erweitern (Abb. 159). Beim Anlegen der Batteriespannung leuchtet die Lampe. Betätigt man den Schalter, gelangt eine Vorspannung auf die Basis von T_1 und der Transistor schaltet durch. An seinem Kollektor liegt eine niedrige Spannung, die den Kondensator C entlädt. T_2 erhält vom Kondensator einen negativen Spannungsstoß, so daß T_2 sperrt, die Lampe erlischt. Die hohe Kollektorspannung von T_2 wird auf die Basis von T_1 zurückgekoppelt. Der Transistor T_1 bleibt damit durchgeschaltet. Der Kon-

densator C wird aber über R wieder aufgeladen. Ist der Ladevorgang beendet, gelangt wieder positive Spannung über R auf die Basis von T₂, und die Lampe leuchtet wieder.



160

Der Widerstand R und der Kondensator C bestimmen, wie lange die Lampe dunkel bleibt. Tauscht man den Kondensator durch einen Elko von 10 μ F aus, leuchtet die Lampe schneller wieder auf. Nimmt man statt des Widerstandes R = 10 k Ω einen von 22 k Ω , ist die Dunkelphase länger. Die Zeitdauer errechnet sich nach der Formel:

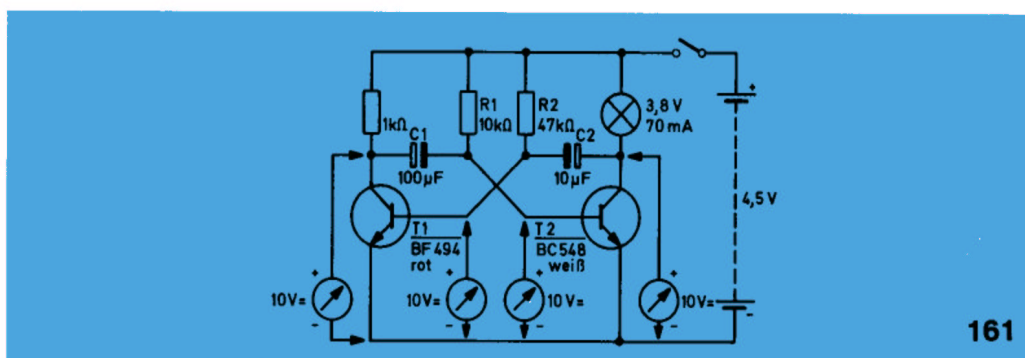
$$t = R \cdot C \cdot k$$

t = Zeit in Sekunden

R = Widerstand in Ohm

C = Kapazität in Farad

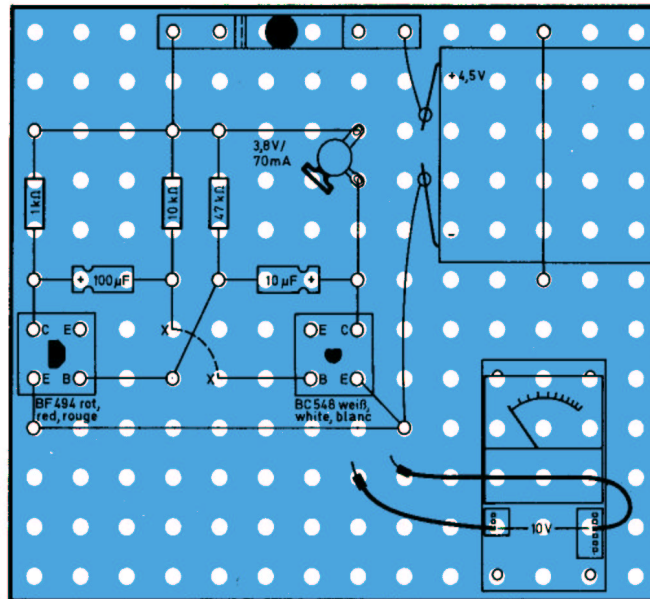
k = Konstante (Schaltungsabhängig, ca. 0,9)



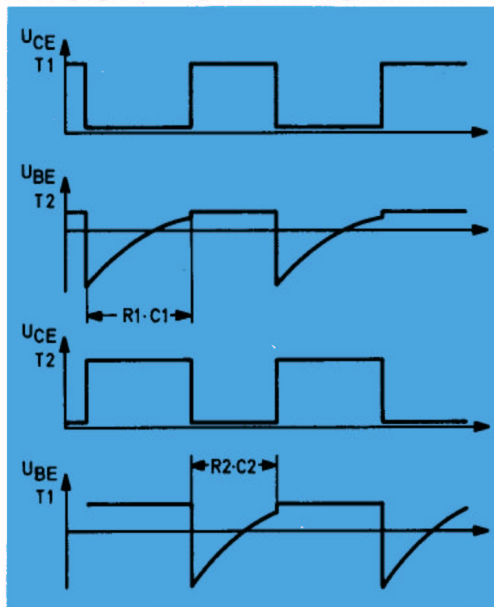
161

Zwischen den Löchern X muß der Schalt draht unter der Grundplatte durchgezogen werden.

161



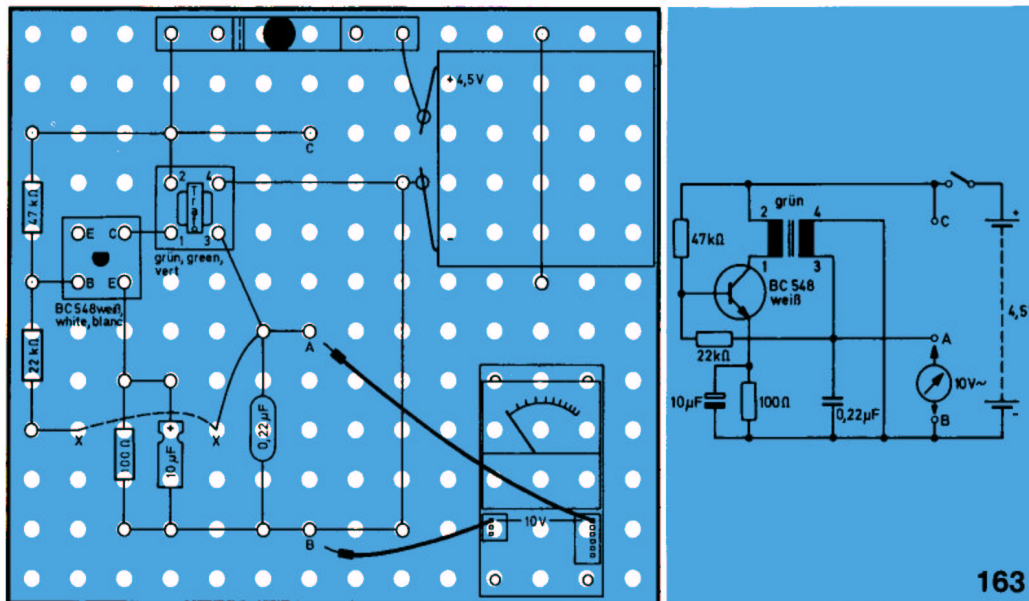
Beim **Astabilen Multivibrator** schalten sich zwei Transistoren wechselseitig ein und aus. In der Schaltung nach Abb. 161 ergeben sich die Spannungen für das Durchschalten der Transistoren durch wechselweises Umladen der Kondensatoren C_1 und C_2 . Nach Anlegen der Batteriespannung schaltet einer der beiden Transistoren, z. B. T_1 , durch. Damit wird der Kondensator C_1 entladen und die Basis von T_2 erhält einen negativen Spannungssstoß. T_2 sperrt, und an seinem Kollektor liegt eine hohe Spannung, die Lampe leuchtet nicht. Der Kondensator C_2 wird geladen, und ein positiver Spannungssstoß gelangt auf die Basis von T_1 . Beide Transistoren halten sich gegenseitig in den angenommenen Schaltzuständen.



Über die Widerstände R_1/R_2 erfolgt aber eine Umladung der beiden Kondensatoren. Sobald die Kondensatoren durch das Aufladen eine bestimmte Spannung erreicht haben, sperrt T_1 und T_2 schaltet durch. Zwischen diesen beiden Zuständen kippt die Schaltung hin und her (Abb. 162).

Die Größe der Kondensatoren und Widerstände bestimmt, wie lange die Schaltzustände andauern.

162



Zwischen den Löchern X muß der Schalt draht unter der Grundplatte durchgezogen werden.

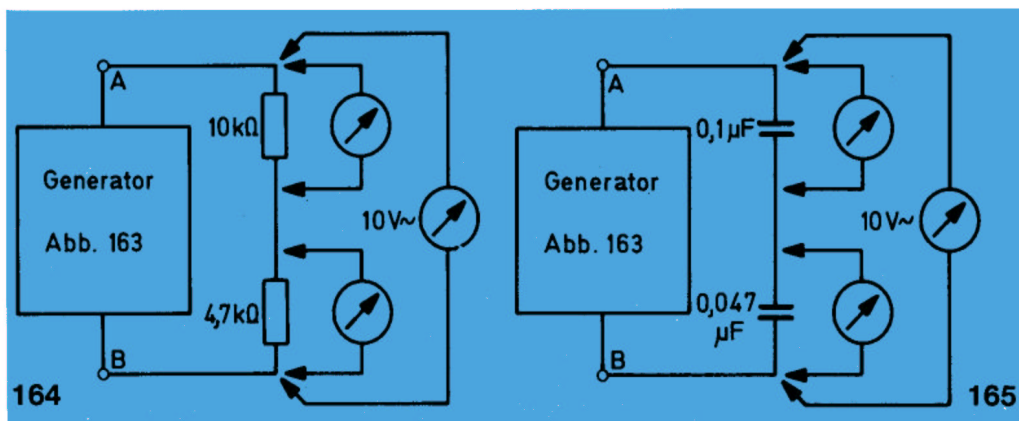
Die Schaltung nach Abb. 163 zeigt einen Schwingungserzeuger, den man auch **Oszillator** oder Generator nennt. Alle Schwingerschaltungen enthalten frequenzbestimmende Bauelemente. Hier sind dies eine Spule des Transformators und der Kondensator $0,22 \mu\text{F}$. Kondensator und Spule bilden zusammen einen **Schwingkreis**. In ihm wechseln das elektrische Feld des Kondensators und das magnetische Feld der Spule auf folgende Weise einander ab: Der geladene Kondensator ($0,22 \mu\text{F}$) entlädt sich über die Spule. Sobald die Spule vom Strom durchflossen wird, baut sich ein magnetisches Feld auf. Das sich ausbreitende Feld induziert einen Strom, der dem Entladestrom des Kondensators entgegengerichtet ist und ihn vermindert. Ist der Kondensator entladen, fließt kein Strom mehr durch die Spule. Ihr Magnetfeld bricht zusammen und induziert nun einen Strom in Richtung des vorher vorhandenen Entladestroms. Dieser lädt den Kondensator wieder auf, allerdings mit umgekehrter Polarität. Fließt kein Induktionsstrom mehr von der Spule in den Kondensator, weil das Magnetfeld nicht mehr besteht, beginnt sich der Kondensator wieder über die Spule zu entladen. Der Vorgang beginnt von neuem.

Laden und Entladen sowie Auf- und Abbau des Magnetfeldes benötigen Zeit. Die Anzahl der Schwingungen (Hin- und Herbewegungen) in einer Sekunde nennt man Frequenz. Sie wird in Hertz (Hz) gemessen, wobei

$$1 \text{ Hz} = \frac{1 \text{ Schwingung}}{1 \text{ s}} \text{ ist.}$$

Um den Schwingvorgang aufrechtzuerhalten, muß immer etwas Energie nachgeliefert werden, weil Spule und Kondensator Verluste aufweisen. Dies geschieht in der Oszillatorschaltung nach Abb. 163 über die Primärspule des Transformators, durch die der Kollektorstrom des Transistors fließt. Wird nun der Transistor an seiner Basis so gesteuert, daß im richtigen Augenblick ein Anstieg des Kollektorstroms bewirkt wird, unterstützt er die Vorgänge im Schwingkreis. Dazu ist es notwendig, die Polarität der Spulen im Transformator zu beachten. Seine Anschlüsse müssen unbedingt so verdrahtet werden wie in der Schaltung angegeben. Verwechselt man sie, erfolgt eine Abschwächung oder Gegenkopplung, und die Schaltung schwingt nicht.

Mit der angegebenen Schaltung stellt sich eine Frequenz von etwa 150 Hz ein. Man kann sie nachweisen, wenn man das Meßgerät (Meßbereich 10 V ~) an den Schwingkreis legt (Klemmen A und B). Beim Anschließen der Batterie muß eine Wechselspannung von ca. 10 V angezeigt werden.



Mit den Schaltungen nach Abb. 164 und Abb. 165 soll untersucht werden, wie sich eine Wechselspannung teilen läßt. Dazu baut man zunächst einen Spannungsteiler mit Widerständen auf. Als Wechselspannungsquelle dient der Generator aus Schaltung *. An den Anschlüssen A und B wird die Wechselspannung abgenommen.

Man mißt mit dem Meßgerät (Meßbereich 10 V ~) zuerst die Gesamtspannung, dann die Teilspannungen an den Widerständen. Die Meßwerte zeigen, daß sich die Spannungen wie die Widerstände verhalten:

$$R_1 : R_2 = U_1 : U_2$$

Wie bei Gleichspannung wird die Gesamtspannung im Verhältnis der Widerstände geteilt (vergleiche Versuch nach Abb. 44). Die Spannungsteilung an Widerständen erfolgt also für Wechsel- und Gleichspannung nach demselben Gesetz.

Wechselspannung kann man aber auch an Kondensatoren teilen. Schaltet man einen Kondensator 0,1 µF mit einem von 0,047 µF in Reihe und legt an sie die Wechselspannung des Generators, zeigt das Meßgerät an jedem Kondensator eine Teilspannung an. Dabei ist die Spannung am Kondensator 0,047 µF höher als am Kondensator 0,1 µF.

Setzt man die Meßergebnisse aus diesem Versuch mit denen aus der Spannungsteilung an Widerständen in Beziehung, ergibt sich, daß der größere Kondensator von $0,1 \mu\text{F}$ einen kleineren **Wechselstromwiderstand** darstellt als der kleinere Kondensator von $0,047 \mu\text{F}$. Die Teilspannungen verhalten sich also umgekehrt wie die Kondensatoren.

$$C_1 : C_2 = U_2 : U_1$$

Andere Untersuchungen haben ergeben, daß der Wechselstromwiderstand eines Kondensators frequenzabhängig ist. Er wird um so kleiner, je höher die Frequenz ist. Mathematisch faßt die nachstehende Formel für den Wechselstromwiderstand eines Kondensators die Abhängigkeiten zusammen:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Für den Wechselstromwiderstand schreibt man als Zeichen ein X. Es entspricht dem R beim Gleichstrom. Der griechische Buchstabe ω (Omega) bezeichnet die Kreisfrequenz. Sie setzt sich aus 2π und der Frequenz zusammen:

$$\omega = 2\pi f$$

Der Wert 2π entspricht dem Kreisumfang, wenn man den Radius = 1 setzt. Die Kreisberechnung kommt mathematisch ins Spiel, weil die Wechselspannung der Sinusfunktion folgt und letztere sich aus der Drehbewegung (= Kreisumfang!) ableitet.

Ein Rechenbeispiel:

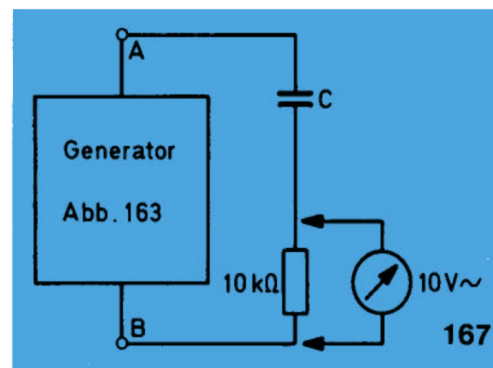
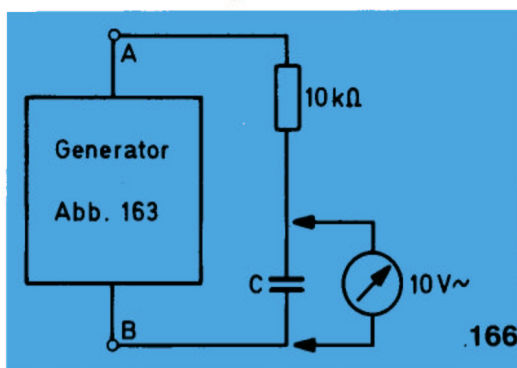
Wie groß ist der Wechselstromwiderstand X_C eines $0,1 \mu\text{F}$ Kondensators bei einer Frequenz $f = 150 \text{ Hz}$?

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 150 \cdot 0,000\,000\,1}$$

$$X_C = \frac{1}{0,000\,094\,2}$$

$$X_C \approx 10\,616 \Omega$$



Widerstand und Kondensator lassen sich nach Abb. 166 auch als Spannungsteiler schalten. Als Wechselspannungserzeuger verwendet man wieder den Generator. Die Teilspannung am Kondensator richtet sich nach der Höhe seines Wechselstromwiderstandes. Für Kondensatoren verschiedener Größe erhält man etwa folgende Meßergebnisse:

$$\begin{aligned} 0,1 \mu F &= 5,5 \text{ V} \\ 0,047 \mu F &= 6,5 \text{ V} \\ \text{ohne C} &= 7 \text{ V} \end{aligned}$$

Man erkennt, daß die Wechselspannung um so kleiner wird, je größer der Wert des Kondensators ist.

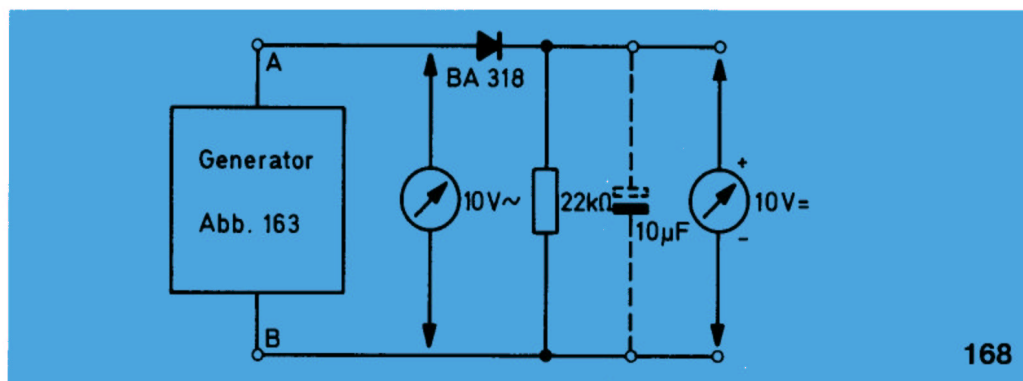
Aus dem vorigen Rechenbeispiel ist bekannt, daß ein $0,2 \mu F$ Kondensator bei 150 Hz einen Wechselstromwiderstand von ca. $10 \text{ k}\Omega$ hat. Das kann man mit dem Voltmeter prüfen, denn es müssen über dem $10 \text{ k}\Omega$ Kohlewiderstand und dem Kondensator C die gleichen Spannungen abfallen.

Solche Spannungen benutzt man als **Siebketten** (Tiefpaß), wenn man Gleichspannungen von überlagerten Wechselspannungen trennen will, da der Kondensator für die Gleichspannungen eine Sperre für Wechselspannungen aber nur einen niederohmigen Widerstand bedeutet.

Entsprechend den Gesetzmäßigkeiten bei der Spannungsteilung erhält man auch nach Abb. 167 verschiedene Meßergebnisse für die Teilspannung am Widerstand. Da der Wechselstromwiderstand sich mit der Größe des Kondensators ändert, stellen sich auch verschiedene Werte ein:

$$\begin{aligned} 10 \mu F &= 6 \text{ V} \\ 0,1 \mu F &= 4 \text{ V} \\ 0,047 \mu F &= 2,5 \text{ V} \end{aligned}$$

Die Meßergebnisse zeigen, daß die Spannung um so kleiner wird, je kleiner der Wert des Kondensators ist. Gleichspannungen und tiefe Frequenzen werden sehr schlecht durchgelassen, weil Kapazitäten einen hohen Widerstand darstellen. Eine solche Schaltung nennt man deshalb auch Hochpaß. Man trennt mit ihr Wechselspannungen von Gleichspannungen.

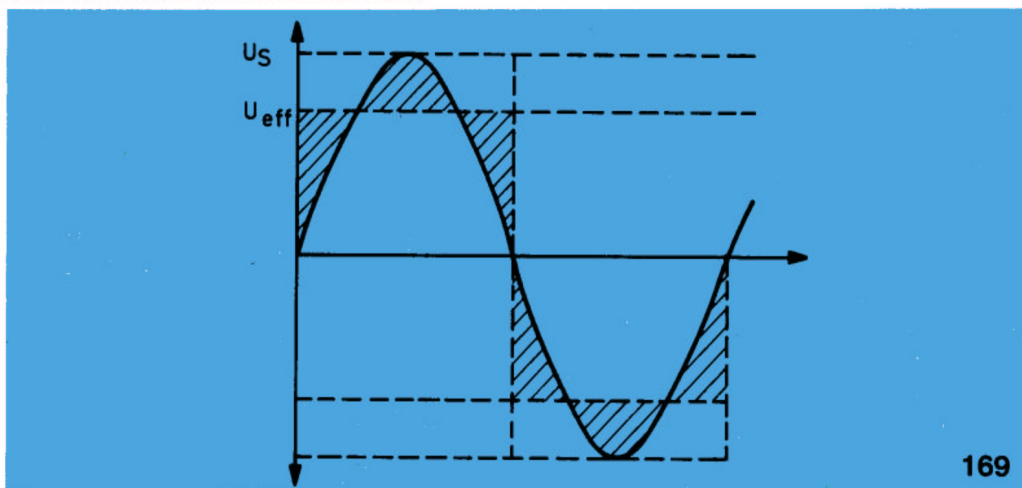


In vielen Schaltungen ist es notwendig, aus einer Wechselspannung eine Gleichspannung zu gewinnen. In Abb. 168 wird gezeigt, wie man dieses mit einer Diode kann. Man mißt zunächst die Wechselspannung (Meßbereich 10 V ~), dann die Gleichspannung (Meßbereich 10 V ~) nach der Diode. Folgende Werte können sich ergeben:

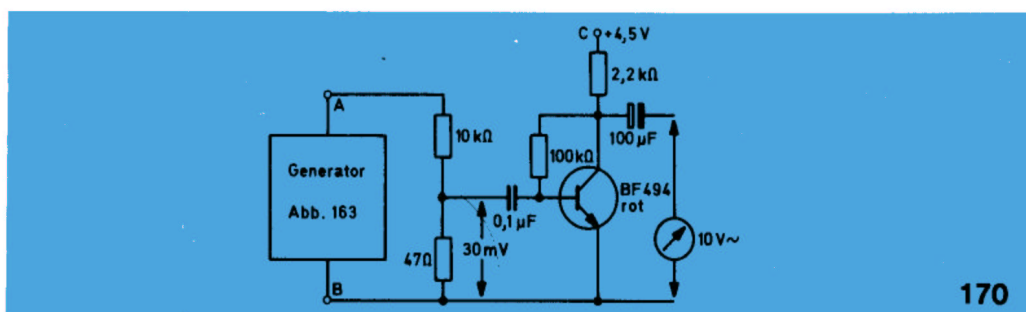
vor der Diode 8 V ~
nach der Diode 4,5 V =

Schaltet man einen Elektrolytkondensator von 10 μF hinzu, so steigt die Gleichspannung auf ca. 8,5 V an. Sie erreicht also einen Wert, der über der Wechselspannung liegt. Um dieses Ergebnis deuten zu können, muß man mehr über den Wechselstrom wissen.

Da der Wechselstrom ständig seine Größe und Richtung ändert, kann man immer nur von Augenblickswerten ausgehen. Um aber auch Aussagen machen zu können, die sich auf längere Zeit beziehen, z. B. die Leistung während einer Stunde, muß man mit dem Mittelwert rechnen.



Man kann sich die Ermittlung des Mittelwertes so vorstellen, daß man von der „Spitze des Berges“ der Wechselspannungskurve Teile abträgt und damit die „Seitentäler“ auffüllt (Abb. 169). Aus der sinusförmigen Halbwelle – die andere Halbwelle verläuft anschließend in umgekehrter Richtung – ist ein Rechteck entstanden. Es enthält die gleiche Fläche. Seine Höhe entspricht dem Mittelwert, auch **Effektivwert** U_{eff} genannt.



Er ist um den Faktor 1,414 kleiner als der Spitzenwert U_s

Meßgeräte zeigen bei Wechselspannungen den Effektivwert an. Da sich der Kondensator (Abb. 168) aber auf den Spitzenwert auflädt, ergibt sich bei Gleichrichtung eine Gleichspannung, die höher ist als der Effektivwert der Wechselspannung. Allerdings ist die Gleichspannung sehr lastabhängig, d. h. je größer Strom in der Schaltung ist, desto mehr wird die Spannung herabgesetzt. Der Kondensator liefert nicht unbegrenzt Energie nach, wenn durch Gleichrichtung ein Halbwechsel des Wechselstromes entfällt.

Wie sich der Transistor bei Wechselspannungen verhält, soll mit dem letzten Versuch geklärt werden, da die Verstärkung von Wechselspannungen in der Nachrichtentechnik und Unterhaltungselektronik von besonderer Bedeutung ist. Mit der Schaltung nach Abb. 170 wird die Wechselspannung vom Generator über den Spannungsteiler mit den Widerständen $10\text{ k}\Omega$ und $47\text{ }\Omega$ herabgesetzt, so daß über den Kondensator $0,1\text{ }\mu\text{F}$ nur eine kleine Wechselspannung von ca. $30\text{ mV}_{\text{eff}}$ auf die Basis des Transistors gelangt. Die Basiswechselspannung steuert den Kollektorstrom. Am Arbeitswiderstand $2,2\text{ k}\Omega$ fällt dann die verstärkte Wechselspannung ab. Sie kann über den Kondensator $10\text{ }\mu\text{F}$ abgenommen werden. Mit der angegebenen Schaltung kann man ca. $1,5\text{ V}_{\text{eff}}$ Ausgangswechselspannung erhalten. Das entspricht einer 50fachen Spannungsverstärkung:

$$V_u = \frac{U_{c\sim}}{U_{B\sim}}$$
$$V_u = \frac{1,5\text{ V}}{0,03\text{ V}}$$
$$V_u = 50$$

Wechselspannungsverstärker werden bei Musikanlagen, Sprachverstärkern, im Rundfunk- und Fernsehempfängern eingesetzt. Sprache und Musik sind nämlich Gemische von verschiedenen Wechselspannungen. Bei ihrer Verstärkung muß man darauf achten, daß sie unverzerrt erfolgt. Der verstärkte Kurvenzug der Wechselspannung am Ausgang muß genau dem der Wechselspannung am Eingang entsprechen. Da diese Bedingung wesentlich von der Einstellung des Arbeitspunktes abhängt, muß man bei der Dimensionierung der Schaltung hierauf besonderen Wert legen.

PHILIPS

