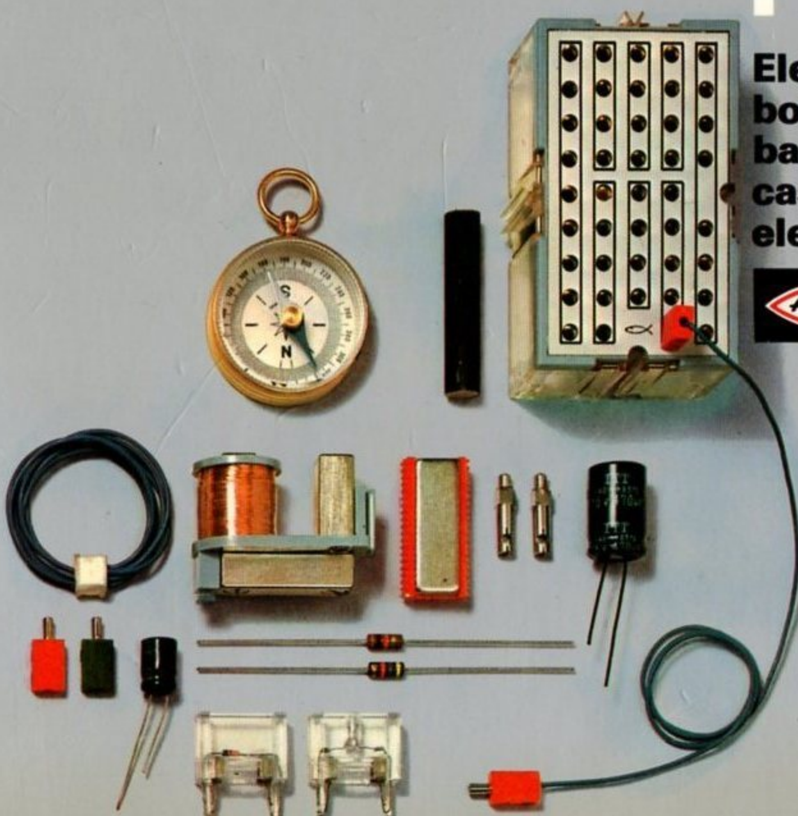
fischertechnik®

hobbylabor 1



Elektronik-Grundkasten Gleichstromkreis
boîte de base électronique circuit à courant continu
basic electronic kit DC circuit
cassetta elettronica base circuito a corrente continua
elektronika basisdoos gelijkstroomkring

fischer®

Art.-Nr. 6 **39560** 7

fischertechnik® hobby

Anleitungsbuch für

hobbylabor 1

Elektronik, der Gleichstromkreis

Stromversorgung:

4 × 1,5-V-Batterien oder
fischertechnik-Netzgerät mot. 4

Versuchsaufbau:

mit fischertechnik 200
oder Baukasten hobby 1

Meßgerät:

Für die Versuche ab der 2. Hälfte
dieses Buches wird zusätzlich ein
Vielfach-Meßgerät empfohlen.

® fischer

„Dieses Gespräch trug dazu bei, daß ich mich wieder etwas intensiver mit Formeln und Lehrsätzen beschäftigte, und dabei merkte ich bald, daß es nichts Praktischeres gibt als die Theorie. Wenn man weiß, nach welchen Regeln sich Kräfte durch Hebel oder Rollen übertragen lassen, so erspart man sich eine Menge von Arbeit. Manches ist durch Herumprobieren einfach nicht zu lösen, doch ein paar Zahlen oder Schaltpläne, auf Papier gekritzelt, führen sofort zum Ziel."

(Aus dem fischertechnik-Buch: „Kleine Erfinder – große Ideen"
von Dr. Herbert W. Franke)

Vorwort

Das neue „hobby-Labor“ soll Ihnen – ergänzend zum „hobby-Programm“, das vorwiegend anwendungstechnisch orientiert ist – nun auch die theoretischen Kenntnisse vermitteln, die zum vertieften Verständnis elektrischer bzw. elektronischer Vorgänge und Zusammenhänge notwendig sind. Hier steht also nicht das Modell, sondern die „Schaltung“ im Vordergrund.

Das hobby-Labor soll Sie Schritt für Schritt in das „Zauberreich“ der Elektronik einführen, ein Gebiet der Physik und der Technik, das unsere Welt tiefgreifender und schneller verändert hat als kaum eine naturwissenschaftliche Entdeckung zuvor.

Das „Anleitungsbuch“ zum hobby-Labor 1 ist recht umfangreich ausgefallen. Das hat mehrere Gründe. Einmal ist das Gebiet des Gleichstromkreises nicht eben klein. Und wenn man etwas richtig erklären will, dann muß man manchmal etwas ausführlicher werden. Schließlich liegt Ihnen ja daran, die Zusammenhänge wirklich zu verstehen. Und gerade die elektrotechnischen *Grundlagen* sind so wichtig für das erfolgreiche Experimentieren mit elektronischen Schaltungen!

Manche Erläuterungen sind kleingedruckt. Deshalb sind sie nicht weniger wichtig. Wenn Sie aber mehr an den praktischen Versuchen interessiert sind, dann ist‘s auch kein Beinbruch, wenn Sie über das Kleingedruckte hinweglesen. Vielleicht schauen Sie später nach, wenn Sie irgend etwas genauer wissen möchten.

Ein weiterer Grund ist der, daß der Text durch viele Bilder „veranschaulicht“ wird. So wird mancher Zusammenhang leichter und schneller als durch viele Worte klar. Zahlreiche Tabellen und Diagramme sind nur als „Vordruck“ eingefügt, in den Sie Ihre eigenen Versuchsergebnisse eintragen können. Auch den freien Raum auf vielen Seiten des Buches können Sie für eigene Notizen benutzen. So wird aus dem Anleitungsbuch mit der Zeit ein „Experimentier-Journal“, auf das Sie später immer wieder zurückgreifen können.

Schließlich soll Ihnen das Buch auch als „Nachschlagewerk“ bei Ihrem Hobby nützlich sein. Deshalb wurden noch ein Tabellen-Anhang und ein Stichwortverzeichnis angefügt.

Natürlich kann auch in einem so umfangreichen Buch nicht jedes Gebiet in gleicher Weise eingehend behandelt werden. Sie finden deshalb im Anhang ein Verzeichnis einiger ausgewählter, weiterführender Bücher, die sich durch besondere Klarheit der Darstellung auszeichnen.

Wenn es Ihnen Spaß macht, versuchen Sie vielleicht, die im Text gestellten Fragen zu beantworten. Wenn Sie nicht zurechtkommen, so finden Sie die Lösungen im Anhang, sofern sich die Antworten nicht aus dem nachfolgenden Text ergeben.

Die Labor-Baukästen sind so ausgelegt, daß Sie Ihrer Experimentierfreudigkeit keinen Zwang anzutun brauchen. Das neuartige Experimentierfeld gestattet die Verwendung auch von Bauteilen, die Sie sich selbst in jedem einschlägigen Geschäft besorgen können. Es schadet also nichts, wenn einmal ein Widerstand, eine Diode oder ein Transistor „hinübergeht“.

Es ist ein leider sehr verbreitetes Vorurteil, daß alle Theorie grau und trocken sei. Das Gegenteil ist der Fall, wenn man die Sache richtig anpackt! Das wirkliche Verständnis eines Zusammenhangs, einer Funktion, kann genauso ein Erfolgserlebnis sein wie das Funktionieren eines Anwendungsmodells. In diesem Sinne bilden hobby-Programm und hobby-Labor eine sich ergänzende, gegenseitig befruchtende Einheit.

Also: Viel Spaß und Erfolg

Ihr

Artur Fischer

Inhaltsverzeichnis

1 Ihr hobby-Labor

Bevor wir mit der Einführung in die „Geheimnisse“ elektrotechnischer Zusammenhänge beginnen, sollten Sie sich zunächst mit den wichtigsten Bestandteilen Ihres Experimentierkastens vertraut machen.

1.1 Stromversorgung

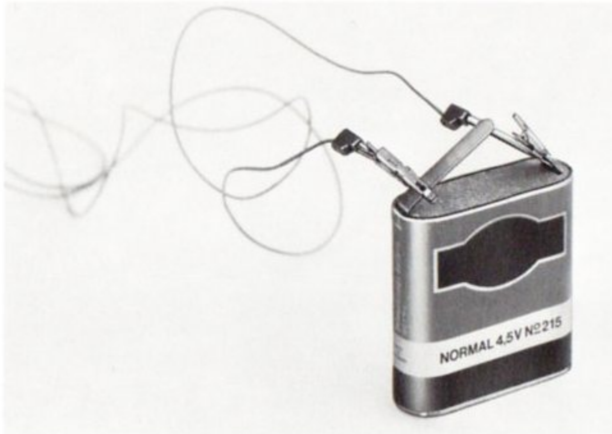
Auch für den einfachsten elektrischen Versuch benötigt man eine elektrische Energiequelle. Sie muß den elektrischen Strom liefern, der durch die Versuchsschaltung fließen soll. Als elektrisches „Kraftwerk“ für unsere Experimente benutzen wir entweder Batterien oder ein fischertechnik-Netzgerät. Eisenbahntrafos oder ähnliches sind nicht geeignet.

Der direkte Anschluß der Experimentierschaltung an eine Netzsteckdose könnte tödliche Folgen haben!

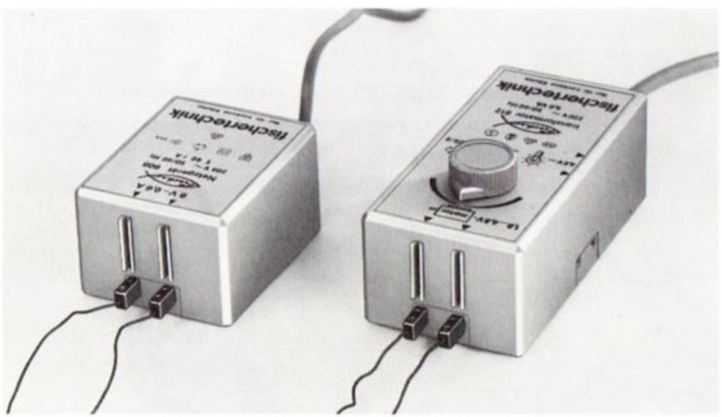
1.1.1 Batterien

Die Besitzer von fischertechnik-Baukästen werden als Energiequelle den Batteriestab mot. 5 (Bild 1.1), der auch im Motorbaukasten mot. 1 enthalten ist, benutzen. Er nimmt 3 Babyzellen zu je 1,5 Volt auf. An seinen Ausgangsbuchsen steht eine Spannung von 4,5 Volt zur Verfügung, die durch einen Schalter umgepolt werden kann.

1.1



1.2



1.3 1.4

Falls Sie keinen Batteriestab besitzen, tut es zunächst auch eine Flachbatterie für Taschenlampen mit 4,5 Volt. Der Anschluß der Kabel erfolgt nach Bild 1.2 mit Hilfe der Krokodilklemmen aus der Kassette Ihres Experimentierkastens.

1.1.2 fischertechnik-Netzgeräte

Vorteilhafter ist die Verwendung eines fischertechnik-Netzgerätes. Beim größeren Netzgerät mot. 4 (Bild 1.4) ist die Gleichspannung mit einem Drehknopf zwischen Null und etwa 7 Volt stufenweise einstellbar. Sie kann durch Links- oder Rechtsdrehen des Drehknopfes umgepolt werden.

Außerdem steht an zwei gesonderten Anschlußbuchsen eine Wechselspannung von etwa 7 Volt zur Verfügung. Diese Buchsen sollten Sie jedoch zunächst nicht benutzen. (Die Wechselspannung kann mit Ihrem Meßgerät auch nicht gemessen werden!)

Das kleinere Netzgerät mot. 8 (Bild 1.3) gibt eine nicht einstellbare Gleichspannug von etwa 7 Volt ab.

Beide Geräte sind gegen Überlastung gesichert; bei Fehlschaltungen kann also nichts passieren. Sie sind nach den Vorschriften des Vereins Deutscher Elektroingenieure (VDE) und den vergleichbaren Vorschriften anderer Länder geprüft. Ihre Handhabung ist völlig gefahrlos, solange mit ihnen in trockenen Räumen gearbeitet wird.

Die Normvorschriften verlangen die Angabe der Betriebsspannung bei „Nenn"-Belastung. Im „Leerlauf", d. h., wenn z. B. nur ein Meßgerät angeschlossen ist, ist die Spannung daher etwas höher als angegeben. Im Kap. 7.3 erfahren Sie die Gründe dafür.

1.1.3 Batterie mit Babyzellen

Wie man aus 3 einzelnen Zellen eine Batterie zusammenstellt, zeigt Bild 1.5. Im Grunde entspricht diese Anordnung dem ft-Batteriestab, jedoch können Sie nach Belieben 1 bis 3 Zellen einsetzen, ja sogar noch eine 4. Zelle hinzufügen.

Damit steht Ihnen wahlweise eine Spannung von 1,5 – 3 – 4,5 – 6 Volt zur Verfügung.

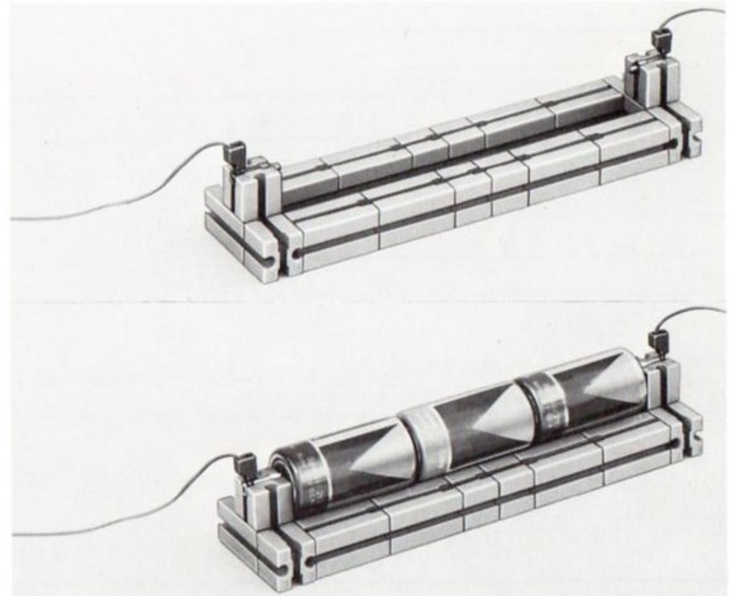
1.2 Das fischertechnik-Meßgerät

1.2.1 Spannungsmessung

Mit dem fischertechnik-Spannungs- und Strommesser kann man z. B. die Spannung einer Batterie oder des Netzgerätes messen. Hierzu benutzen Sie die mit der Maßeinheit der Spannung, dem „Volt" (abgekürzt: V), gekennzeichneten Buchsen. Die eine Buchse ist mit (+), die andere mit (–) gekennzeichnet. Verbinden Sie immer die (+)Buchse mit dem (+)Pol der Stromversorgung und die (–)Buchse mit dem (–)Pol. Benutzen Sie eine Taschenlampenbatterie zur Stromversorgung, so finden Sie das (–)- und das (+)-Zeichen neben der langen bzw. kurzen Anschlußfahne auf der Ummantelung aufgedruckt.

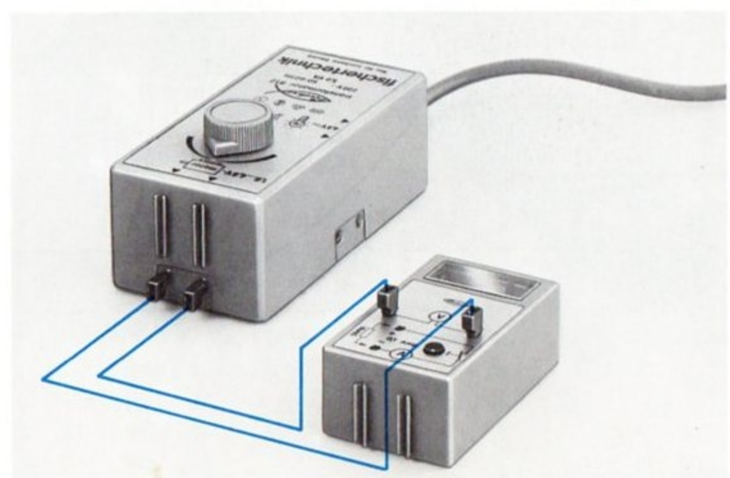
Versuche

Als Besitzer eines Batteriestabes oder eines Netzgerätes werden Sie vielleicht nicht wissen, welche der Buchsen der (+)Pol und welche der (–)Pol ist. Das hängt von der Schalter- bzw. von der Drehknopfstellung ab. Verbinden Sie trotzdem unbesorgt die beiden Buchsen Ihres „Voltmeters" mit den Buchsen des Batteriestabes bzw. des Netzgerätes (Bild 1.6). Ihr Meßgerät ist nämlich unemp-



1.5 ▲

1.6 ▼

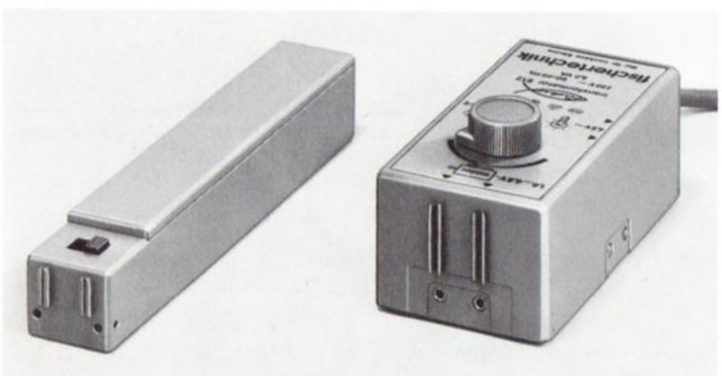


findlich gegen Fehlschaltungen. Es ist dagegen sowie auch gegen „Überlastung“ durch zwei „antiparallel“ geschaltete Dioden geschützt. (Die Erklärung dafür finden Sie im Kap. 11.3 dieses Buches.)

Haben Sie zufällig den (+)Anschluß des Voltmeters mit dem (+)Pol der Stromversorgung (Batteriestab oder Netzgerät) und damit automatisch auch den (–)Anschluß mit dem (–)Pol verbunden, so schlägt der Zeiger des Meßgerätes nach rechts aus. Haben Sie jedoch zufällig den (+)Pol an den mit (–) gekennzeichneten Anschluß des Meßgerätes geschaltet und damit automatisch den (–)Pol an den (+)Anschluß des Meßgerätes, so schlägt der Zeiger nach links aus. Im letzteren Fall stecken Sie die Leitungen am Meßgerät einfach um.

Damit Sie später nicht immer wieder von neuem feststellen müssen, wo der (+)Pol und wo der (–)Pol des Netzgerätes oder des Batteriestabes sind, sollten Sie z.B. mit Hilfe von farbigen Selbstklebeetiketten die Polarität und die dazugehörige Stellung des Ein/Aus-Schalters bzw. des Drehknopfes kennzeichnen. Die Bilder 1.7 und 1.8 zeigen 2 Beispiele.

1.7 1.8



– + – +

1.2.2 Meßbereiche und Meßgenauigkeit

Für die Untersuchung des prinzipiellen Verhaltens elektrischer und elektronischer Schaltungen genügt es meist, die Spannungen und Ströme nur größenordnungsmäßig zu erfassen. Für unsere Zwecke reicht deshalb das Meßgerät des hobby-Labors völlig aus, obwohl es nur einen Spannungs- und nur einen Strommeßbereich hat.

1.2.3 Meßwertablesung

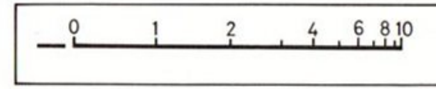
Bevor wir nun in die elektrotechnischen Experimente einsteigen, ganz schnell noch etwas über die Ablesung der „Skala“ Ihres Meßgerätes.

Wie Bild 1.9 zeigt, ist die Skala nicht gleichmäßig unterteilt. Der Anfang ist „gedehnt“, wie der Fachmann sagt. Bild 1.10 zeigt dagegen eine gleichmäßig geteilte Skala; der Fachmann spricht von einer „linearen“ Skala. Die gedehnte Skala hat den Vorteil, daß auch kleine Spannungen unter 1 Volt noch gut abgelesen werden können.

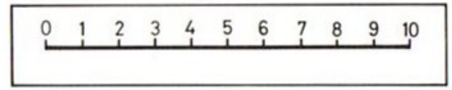
Nur selten wird der Zeiger des Meßgerätes genau auf einem Teilstrich stehen; aber der Zwischenwert läßt sich leicht schätzen.

Wegen der Zusammendrängung der Skala am rechten Ende sind die Zahlen 3, 5, 7, 8 und 9 nicht angegeben. Bild 1.11 zeigt, daß der Wert 0,5 nicht genau in der Mitte zwischen 0 und 1 steht, sondern näher nach 1 hin verschoben ist. Dasselbe gilt für die Werte 1,5; 2,5 usw. Entsprechend sind auch die Werte 0,1 und 0,2 nach rechts verschoben (siehe Bild 1.12).

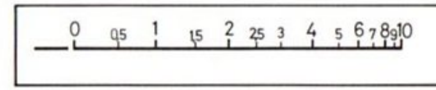
Bei der Spannungsmessung können Sie den angezeigten Wert so nehmen, wie er ist. Das Meßwerk zeigt bei „Vollausschlag“ – das ist, wenn der Zeiger auf den Endwert der Skala zeigt – tatsächlich 10 Volt an.



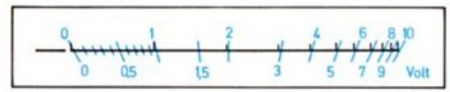
1.9



1.10



1.11



1.12

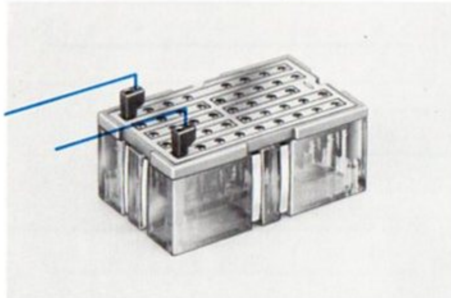
1.2.4 Erste Meßversuche

Messen Sie jetzt bitte einmal die Spannungen aller Ihnen zur Verfügung stehenden neuen und alten Batterien sowie auch die Spannungen, die mit dem Drehknopf am fischertechnik-Netzgerät eingestellt werden können. Tragen Sie die erhaltenen Werte zur späteren Kontrolle in die vorbereitete Tabelle 1.13 ein.

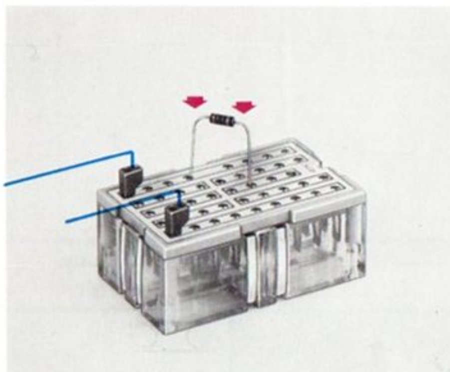
Die Strommessung wird erst im Kap. 1.5 behandelt.

1.13

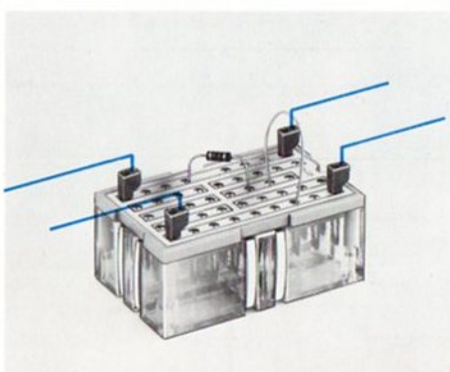
Energiequellen	Spannung in Volt
1. Zelle 2. Zelle neu 3. Zelle	
1. Zelle 2. Zelle alt 3. Zelle	
Flachbatterie, neu Flachbatterie, alt	
ft-Batteriestab	
ft-Netzgerät mot. 4 Stufe 1 Stufe 2 Stufe 3 Stufe 4	



1.14



1.15



1.16

1.3 Das fischertechnik-Experimentierfeld

Dieser Baustein (Bild 1.14) hat es in sich. Er wurde speziell für den leichten und schnellen Auf- und Umbau elektrotechnischer und elektronischer Schaltungen entwickelt. Nachdem man sich einmal mit seinem Prinzip vertraut gemacht hat, ist es sehr einfach, eine damit aufgebaute Schaltung zu ändern oder an den interessierenden Stellen Messungen vorzunehmen.

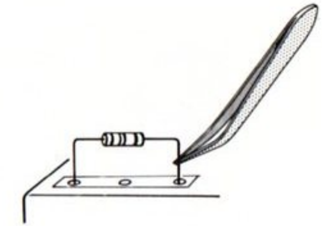
1.3.1 Zweck und Handhabung

Die Buchsen des Experimentierfeldes nehmen nicht nur fischertechnik-Stecker auf – ebensogut können blanker Draht oder die Anschlußdrähte elektrischer und elektronischer Bauelemente eingesteckt werden. Voraussetzung ist nur, daß die Drähte eine gewisse Mindeststeifigkeit besitzen und weit genug eingesteckt werden können (ca. 20 mm). Auf dem Experimentierfeld lassen sich somit einzelne elektrische Bauelemente mechanisch befestigen und zugleich elektrisch miteinander verbinden. Ebenso können Sie später weitere elektrische und elektronische Bauelemente, die Sie in einem geeigneten Spezialgeschäft oder in einer Rundfunk- und Fernsehreparaturwerkstätte gekauft haben, ohne weiteres verwenden.

Von der Unterseite her kann man sehen, wie die Buchsen am Ende zu einem federnden Schlitz ausgebildet sind, der einen sicheren Kontakt der Drähte gewährleistet.

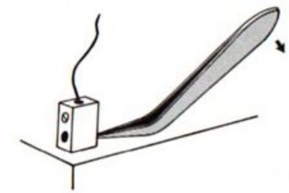
Damit in einer Schaltung mit vielen Bauelementen jeder einzelne Anschluß erreichbar ist, liegt dem Experimentierkasten eine Pinzette bei. Mit ihr können Sie Anschlußdrähte direkt in die Buchsen einführen bzw. herausnehmen (Bild 1.17). Die Pinzette biegen Sie noch ein wenig nach Bild 1.18. Sie erreichen damit eine bessere Klemmwirkung.

Das Herausziehen von Anschlußdrähten und Steckern durch einfaches Ziehen der Bauelemente bzw. Litzen sollten Sie lieber unterlassen, da Sie leicht das Bauelement oder die Litze allein in der Hand halten könnten. Mit den gewinkelten Pinzettenspitzen können Sie zu stramm sitzende Stecker aus einer Buchse „heraushebeln" (siehe Bild 1.19).



1.17

1.18



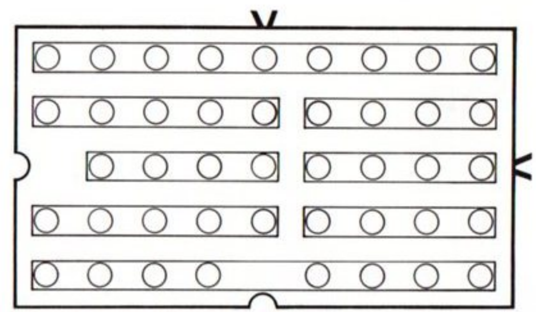
1.19

1.3.2 Buchsenfelder

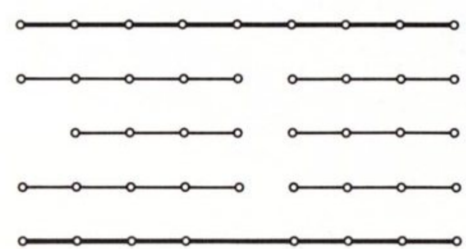
Auf dem Experimentierfeld sind fünf Reihen von Buchsen angeordnet. Einzelne Buchsen sind zu einem „Buchsenfeld" zusammengeschlossen. Von oben erkennt man die Felder an ihrer Umrahmung (Bild 1.20). So sind z.B. die beiden äußeren Reihen durchgehend umrahmt. Das bedeutet, daß die 8 Buchsen des untersten und die 9 Buchsen des obersten Feldes leitend miteinander verbunden sind. In den drei mittleren Reihen dagegen sind pro Reihe zwei Buchsenfelder angeordnet. Sie können die Zusammengehörigkeit der einzelnen Buchsen von der Unterseite des Bausteins her deutlich erkennen.

Das Experimentierfeld ermöglicht auf diese Weise den Aufbau auch komplizierterer Schaltungen. Die Buchsenfelder und die einzelnen Buchsen sind absichtlich nicht bezeichnet, damit Sie volle Freiheit haben, den Versuch so aufzubauen, wie es Ihnen am zweckmäßigsten erscheint. Damit bekommen Sie viel schneller ein Gefühl für eine geschickte Schaltungsanordnung, als wenn Sie nur „stur nach Plan" nachstecken. Trotzdem ist zunächst noch jeweils ein Steckplan mit angegeben. Es gibt jedoch in den meisten Fällen viele andere Möglichkeiten, den Aufbau der Schaltung auf dem Experimentierfeld vorzunehmen.

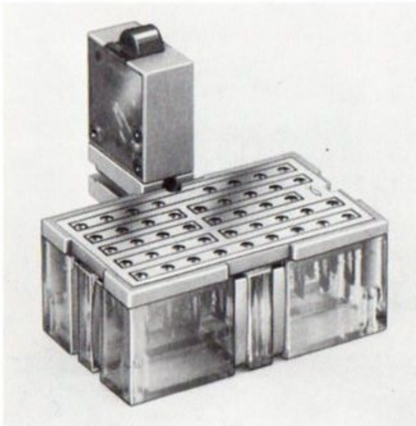
Für die zeichnerische Darstellung des Experimentierfeldes wäre die getreue Wiedergabe der Frontplatte zu umständlich und auch zu unübersichtlich. Deshalb wurde dafür eine einfachere Form gewählt (siehe Bild 1.21). Die Buchsen sind dort durch Ringe dar-



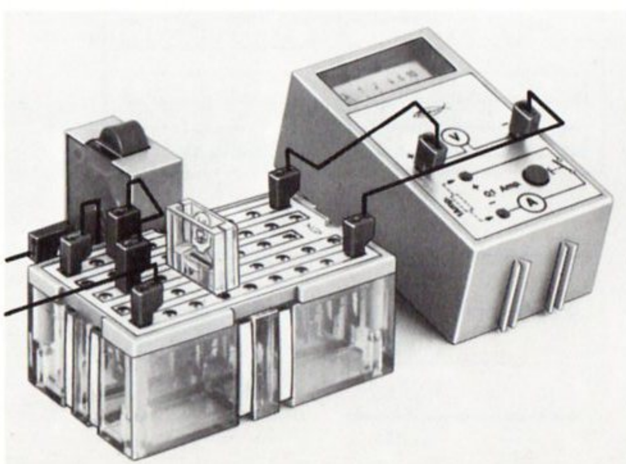
1.20



1.21



1.22



1.23

gestellt und die elektrischen Verbindungen der einzelnen Buchsen durch Striche. Am Ende des Buches ist dieses „Gerüst“ mehrmals abgedruckt. Sie können eigene Schaltentwürfe eintragen, ausschneiden und an der entsprechenden Stelle einkleben.

1.3.3 Einbau in das fischertechnik-System

Die seitlich am Experimentierfeld-Baustein angeordneten Stromleitschienen sind zunächst ohne Bedeutung. Sie werden erst benötigt, wenn das Experimentierfeld später mit fischertechnik-Elektronik-Bausteinen zusammengeschaltet werden soll.

Das Experimentierfeld ist aber selbstverständlich auch mit allen anderen fischertechnik-Bausteinen kombinierbar. Bild 1.22 zeigt z. B., wie der fischertechnik-Taster* aus dem ft-e-m- (= *e*lektro*m*echanik) oder hobby-3-Baukasten mit dem Experimentierfeld zusammengebaut werden kann.

1.3.4 Versuche mit Experimentierfeld und Lämpchen

Ihr hobby-Labor enthält 4 Steckergehäuse, in die bereits kleine Glühlampen eingesetzt sind. (Die Montage von anderen Bauelementen in solche Steckergehäuse wird später beschrieben.) Nun wollen wir zur Erprobung des Experimentierfeldes eine solche Lampe anschalten und die Spannung der Batterie bzw. des Netzgerätes vor und nach dem Anschalten messen.

Bauen Sie bitte zunächst die Schaltung nach Bild 1.23 auf. Den „Stromlaufplan“ einer solchen Schaltung zeigt Ihnen das Bild 1.24.

Die mit einem * versehenen Bauelemente sind auch einzeln in jedem fischertechnik-Service-Geschäft erhältlich (Übersicht am Schluß des Buches).

Als „Stromlaufplan“ bezeichnet man einen Schaltplan, in dem die Bauteile einer Schaltung so miteinander verbunden sind, daß die „Aufgabe“ (Funktion), welche die Bauteile zu erfüllen haben, möglichst klar und deutlich zu erkennen ist.

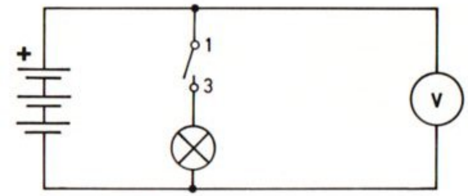
Ein „Steckplan“ (Bild 1.26) dagegen soll zeigen, wie die Bauteile auf dem Experimentierfeld möglichst praktisch angeordnet und miteinander verbunden werden. Stromlauf- und Steckplan stimmen nur selten miteinander überein.

Die genormten Schaltzeichen ersehen Sie aus Bild 1.25. Das Schaltzeichen für das Voltmeter entspricht dem Symbol auf der Frontplatte des Meßgerätes. Sollten Sie keinen ft-Taster besitzen, so stellen Sie die Verbindung zwischen dem freien Anschluß der Lampe und der (+)Leitung durch Stecken eines Kabels her.

Sollen mit demselben Schalter zwei Lampen – in Parallelschaltung – „an Spannung gelegt“ werden, so könnte man die Schaltung nach Bild 1.26 aufbauen. Den dazugehörigen „Stromlaufplan“ zeigt Bild 1.27; während im Bild 1.24 als Stromversorgung noch drei in Reihe geschaltete Zellen eingezeichnet sind, ist im Bild 1.27 die Stromversorgung der Einfachheit halber nur noch durch Angabe von + und – angedeutet.

Vielleicht erweitern Sie die Schaltung noch durch eine dritte Lampe, die parallel zu den beiden anderen geschaltet wird. Für den Anfänger sei erwähnt, daß der fischertechnik-Taster als „Ein-Taster“ (T_E) benutzt werden soll. Das bedeutet also, daß die Lampen bei Druck auf die rote Taste leuchten müssen. Vielleicht zeichnen Sie in den freien Raum unter diesem Abschnitt den Stromlaufplan für die Schaltung mit 3 Lampen ein.

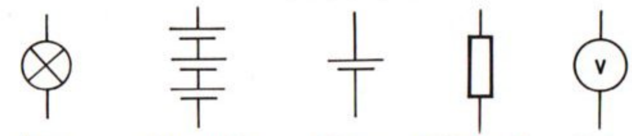
1.24



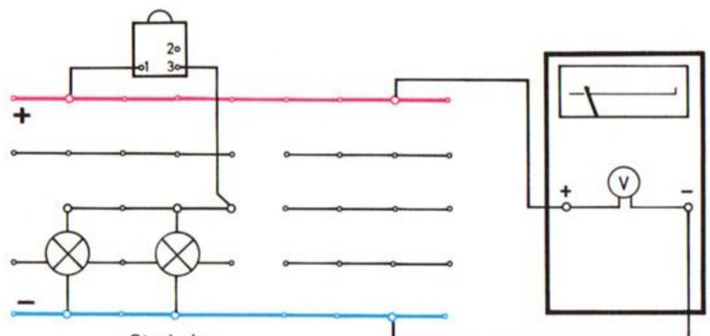
Stromlaufplan

Schaltzeichen

1.25

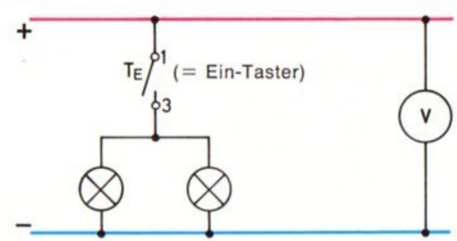


Lampe | 3 Monozellen (= Batterie) | 1 Monozelle 1,5 V | Widerstandsbauelement | Voltmeter



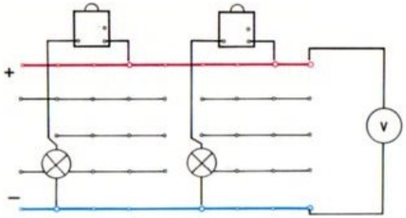
Steckplan

1.26

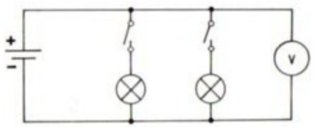


1.27

Sollen 2 Lampen mit je einem getrennten Taster oder Schalter angeschaltet werden können, so können Sie den Steckplan nach Bild 1.28 ausführen. Das Schaltungsprinzip ersehen Sie aus dem Stromlaufplan 1.29.

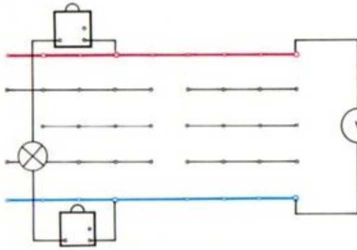


1.28



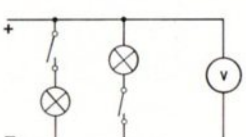
1.29

Wollen Sie aus irgendeinem Grunde auch die Verbindung zwischen der Lampe und der (–)Leitung durch einen Taster oder Schalter unterbrechen, so benutzen Sie die Steckanordnung nach Bild 1.30. Zeichnen Sie bitte den Stromlaufplan in den freien Raum unter diesem Abschnitt ein!



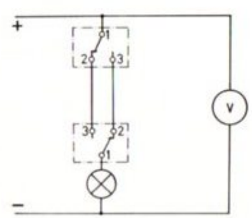
1.30

Wer schon etwas Erfahrung im Lesen von Stromlaufplänen besitzt, sollte die Schaltungen 1.31 und 1.32 mit dem Experimentierfeld verwirklichen. Dem Anfänger wird geraten, diese Versuche später nachzuholen.



1.31

1.32



1.3.5 Plus- und Minus-Sammelschiene

Es empfiehlt sich, als (+)– und als (–)Leitung stets die obere bzw. die untere Buchsenreihe zu benutzen. Die beiden langgezogenen Steckfelder können Sie auch als „Sammelschienen“ bezeichnen. Diese Festlegung erleichtert die Ausführung aller Schaltungen aus den fischertechnik-hobby-Büchern, weil auch dort stets die (+)Leitung oben und die (–)Leitung unten gezeichnet ist.

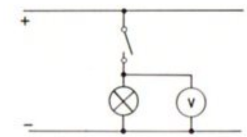
1.4 Versuche mit dem fischertechnik-Meßgerät

1.4.1 Messen einer Spannung

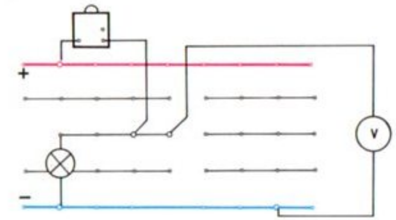
Zum Messen einer Spannung müssen Sie die beiden Anschlüsse (Buchsen) des Spannungsmessers (= Voltmeter) an die Stellen „an"-schalten, an denen die zu messende Spannung zur Verfügung steht. Es erleichtert Ihnen die Arbeit, wenn sie stets sagen: zwischen denen die zu messende Spannung herrscht.

Das Voltmeter muß also „dazugeschaltet" werden. Beim Messen der Spannung einer Batterie oder des Netzgerätes war das noch ganz einfach (siehe Bild 1.6). Etwas Überlegung erfordert die Anschaltung eines Voltmeters, das die Spannung einer Lampe mißt, die ein- und ausgeschaltet werden kann. Sie müssen die beiden Anschlüsse des Voltmeters dann nicht an die Batterie, sondern zu den beiden Anschlüssen der Lampe „dazuschalten". Der Zeiger des Voltmeters wird wunschgemäß nur dann ausschlagen, wenn die Lampe eingeschaltet ist. Bild 1.33 zeigt den Stromlaufplan, Bild 1.34 einen der vielen möglichen Steckpläne. Im Gegensatz dazu steht die Schaltung nach Bild 1.35, bei der das Voltmeter die Spannung der Batterie anzeigt – unabhängig davon, ob die Lampe ein- oder ausgeschaltet ist.

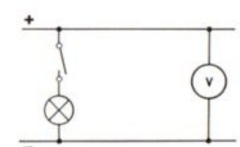
Sie werden sicher an Ihrem Voltmeter beobachten, daß die Spannung der Batterie bzw. des Netzgerätes etwas kleiner wird, wenn Sie eine oder gar mehrere Lampen anschalten. Überzeugen Sie sich bitte davon. Die Gründe hierfür untersuchen wir im Kap. 7.3.



1.33



1.34

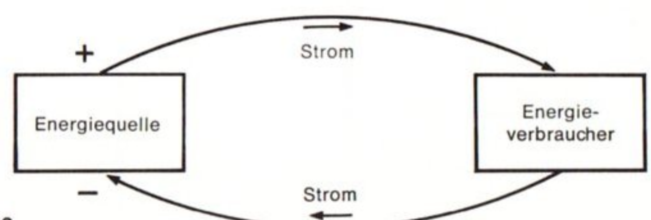


1.35

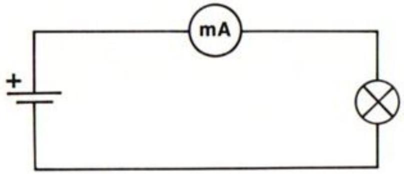
1.4.2 Messen eines Stroms

Nun wollen wir den Strom messen, der durch unsere Lampe fließt.

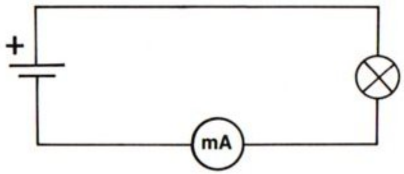
Sie wissen sicher schon, daß der Strom vom (+)Pol der Batterie oder des Stromversorgungsgerätes zur Lampe, durch diese hindurch und dann zum (–)Pol der Batterie fließt. Deshalb nennt man die Zusammenschaltung einer Energiequelle (z. B. Batterie) mit einem oder mehreren Energieverbrauchern (z. B. Lampen) einen elektrischen „Stromkreis" (siehe Bild 1.36).



1.36



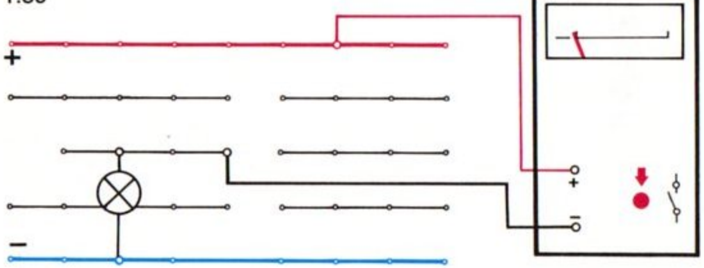
1.37



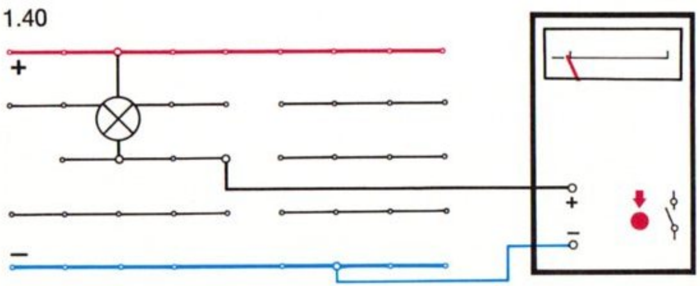
1.38

Bei der Spannungsmessung wird das Meßgerät „dazugeschaltet“; bei der Strommessung wird es dagegen in den Stromkreis „hineingeschaltet“.

1.39



1.40



Prinzip

Den Strom können wir also nur messen, wenn wir in den zu untersuchenden Stromkreis einen Strommesser „hinein“schalten. Das Prinzip zeigen die Bilder 1.37 und 1.38. Im einen Fall liegt der Strommesser zwischen dem (+)Pol der Batterie und der Lampe und im anderen Fall zwischen der Lampe und dem (–)Pol der Batterie. Beide Schaltungen sind gleichwertig.

Der Stromkreis muß dazu an der Stelle, an der das Meßgerät „hinein“geschaltet werden soll, „aufgetrennt“ werden. Diesen Unterschied der Strommessung im Vergleich zur Spannungsmessung sollten Sie sich unbedingt merken.

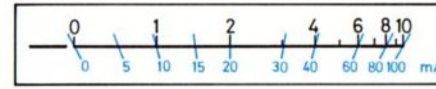
Das fischertechnik-Meßgerät wird zur Strommessung nach Bild 1.39 oder Bild 1.40 in die Leitung geschaltet. Der Unterschied zwischen den beiden Schaltungen ist: In der ersten Schaltung wird die (+)Buchse mit dem (+)Pol der Batterie oder des Netzgerätes verbunden, und der (–)Anschluß des Meßgerätes führt zur Lampe. Im zweiten Fall ist der (–)Anschluß des Meßgerätes mit dem (–)Pol verbunden. Die Lampe ist an dem (+)Anschluß des Meßgerätes angeschlossen. Im umgekehrten Falle würde der Zeiger nach links ausschlagen.

Zunächst schlägt er jedoch gar nicht aus! Dazu müssen Sie nämlich erst den roten Knopf drücken. Der Druck auf diesen Knopf ist eine Sicherheitsmaßnahme, durch die eine dauernde Überlastung des Meßgerätes bei einer Fehlschaltung verhindert wird. (Wir kommen auf die Funktion dieses Tastknopfes noch einmal im Abschn. 6.7.2 zurück.)

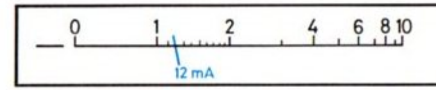
Der Stromkreis ist aber geschlossen, auch wenn der rote Knopf nicht gedrückt wird! Schlägt der Zeiger weit über die „10“ hinaus aus, bitte Schaltung überprüfen. Schlägt er nach links aus, ist die „Polung“ falsch, und (+) und (–) des Meßgerätes müssen vertauscht werden.

Meßbereich 100 mA

1.41



1.42



Wie auf dem Deckschild des Meßgerätes angegeben, fließt bei Vollausschlag des Zeigers ein Strom von 0,1 A (Ampere) = 100 Milliampere (abgekürzt: mA). Damit gilt die im Bild 1.41 zusätzlich angegebene untere Skala. Der oben abgelesene Wert muß mit 10 multipliziert werden. Steht der Zeiger z. B. auf dem Skalenwert 4, so entspricht dies 40 mA. Der Skalenwert 1 entspricht damit 10 mA und ein Ausschlag 1,2 (siehe Bild 1.42) bedeutet, daß in diesem Augenblick 12 mA durch das Meßgerät fließen.

Vielleicht messen Sie nach, ob durch jede Ihrer Lampen etwa gleich viel Strom fließt, und wieviel Strom fließt, wenn Sie zwei Lampen parallel anschalten. Messen Sie bitte auch den Strom, der durch ft-Lampen aus dem e-m-/oder hobby-3-Baukasten fließt.

Für die Besitzer eines ft-Netzgerätes: Betreiben Sie bitte Ihre Glühlampen nicht mit voller Spannung: Sie leuchten dann zwar am hellsten, aber leider nicht lange! Ihre Lebensdauer ist viel länger bei „Schonbetrieb“ mit der kleinsten einstellbaren Spannung.

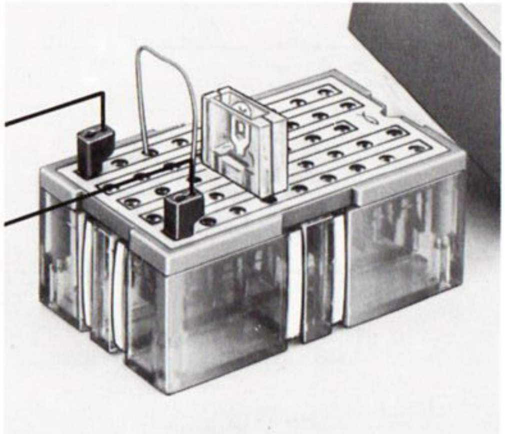
Tragen Sie bitte die gemessenen Werte in die Tabellen 1.43 ein. Die Angabe des Stroms nützt Ihnen für spätere Zwecke allerdings wenig, wenn Sie nicht gleichzeitig die Betriebsspannung messen und eintragen. Ihre Messung muß getrennt vor oder nach der Strommessung vorgenommen werden.

1.43

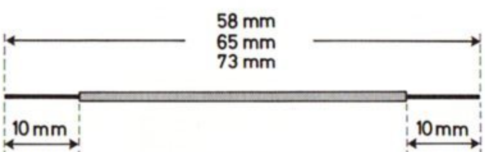
Lampe Nr.	Strom in mA	Spannung in Volt
1		
2		
3		
4		
1 u. 2		
ft-Lämpchen aus e-m-Baukasten		
1		
2		
3		

Meßbereichserweiterung

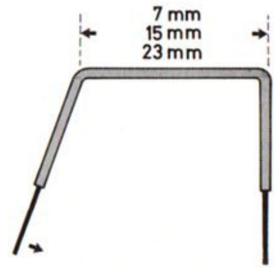
In der angegebenen Schaltung können Ströme, die größer als 100 mA sind, nicht gemessen werden. Wie man den Meßbereich des Strommessers erweitert, wird später noch behandelt (Abschn. 7.6.2).



1.44



1.45



1.46

Rot = Plus (+); Blau = Minus (–)

1.5 Arbeitshilfen

1.5.1 Verbindungsbrücken

Soll gemäß dem vorletzten Abschnitt anschließend an die Strommessung das Meßgerät aus der Schaltung genommen werden, weil z. B. eine Spannung gemessen werden muß, so stecken Sie auf das Experimentierfeld an Stelle der Anschlüsse zum Milliamperemeter eine „Verbindungsbrücke". Dazu benutzen Sie entweder ein kurzes Kabel mit 2 Steckern oder – was bei größeren Schaltungen viel übersichtlicher ist – eine Brücke aus einem der Drähte aus der Kassette des Experimentierkastens (siehe Bild 1.44). Da nur die beiden Drahtenden mit einem Messer abisoliert werden müssen, ist die Herstellung solcher Brücken recht einfach. Durch die Wahl einer geeigneten Farbe ergibt sich eine große Übersichtlichkeit.

Solche Brücken nennt man auch – in nicht ganz eindeutiger Weise – „Kurzschlußbrücken".

Am besten machen Sie sich gleich einen kleinen Vorrat von solchen Drahtbrücken aus dem Kupferdraht mit 0,8 mm Durchmesser. Das Bild 1.45 zeigt die wichtigsten Längen und Bild 1.46, wie die Brükken am besten gebogen werden. Diese stabilen Brücken lassen sich bequem in die Buchsenfedern einführen und auch wieder herausnehmen.

1.5.2 Farbgebung

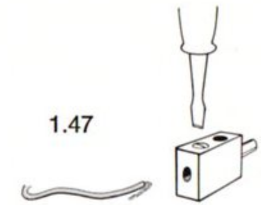
Draht mit blauer Isolierung benutzen Sie immer, wenn eines seiner Enden zur (–)Sammelschiene gesteckt ist. Rote Brücken dienen ausschließlich zur Verbindung mit der (+)Sammelschiene. Alle anderen Farben benutzt man als Brücken zwischen Steckfeldern, soweit diese nicht mit der (+)– oder der (–)Sammelschiene verbunden sind.

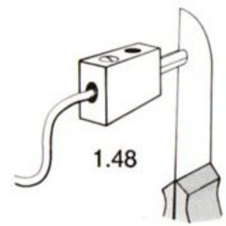
Für die Verbindung vom Experimentierfeld zur Stromversorgung, zum Meßgerät und zu anderen größeren Bauelementen verwendet man zweckmäßigerweise blaue Kabel. Kabel mit roten Steckern sollten Sie ausschließlich für die Leitungen reservieren, die zur (+)Sammelschiene führen.

1.5.3 Steckermontage

Die blauen Kabel dieses hobby-Labors und auch die der hobby-Baukästen müssen sehr flexibel sein. Deshalb benutzt man dafür keine steifen Kupferdrähte, sondern eine „Litze“ mit Kunststoff-ummantelung. Zur Herstellung von Kabeln mit genau angepaßter Länge benötigt man Spreiz-Stecker mit Klemmschrauben nach Bild 1.47. Beim Abisolieren der Litze mit einem Messer (oder einer speziellen Abisolierzange) bitte möglichst keine Einzeldrähtchen mit abschneiden! Die absiolierte Litze wird verdrillt und mit umgelegtem Ende in den Stecker eingeführt. Schrauben nicht zu fest anziehen!

Wenn ein solcher Stecker nicht mehr fest in den Buchsen hält, spreizt man den Stift mit einem Messer etwas auf (Bild 1.48). Spreizstecker und Kabel sind einzeln in jedem ft-Service-Geschäft erhältlich. Ein neu hergestelltes Kabel wird am besten sofort „auf Durchgang“ geprüft. Dazu wird es einfach als Kabel zum Anschluß einer Lampe benutzt.

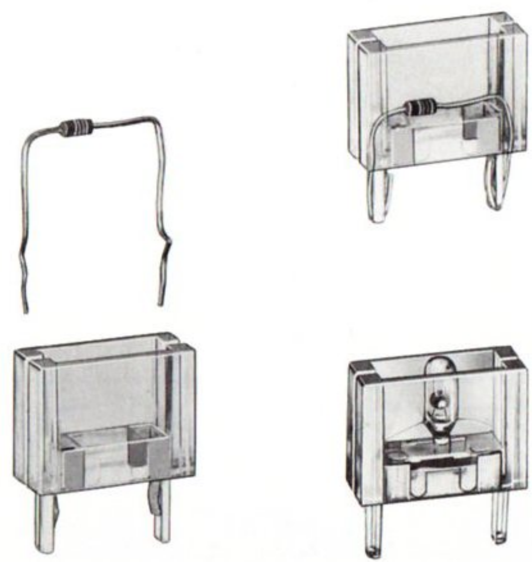

1.47


1.48

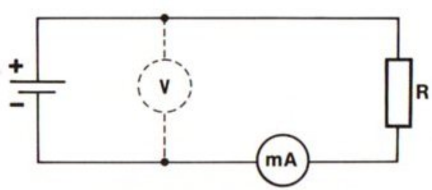
1.5.4 Steckergehäuse

Ihrem hobby-Labor liegen 6 „Steckergehäuse“ bei. Eines davon ist schon mit einer Diode bestückt, die aber erst später benötigt wird. 4 weitere enthalten Glühlämpchen. Sie sind in dem Steckergehäuse montiert, weil die Drahtanschlüsse leicht beschädigt werden könnten. Bild 1.49 zeigt, wie man die Diode bzw. einen Widerstand oder das Glühlämpchen im Steckergehäuse befestigt, falls Sie einmal Ersatz benötigen oder die Steckergehäuse zwischendurch für andere Zwecke verwenden wollen.

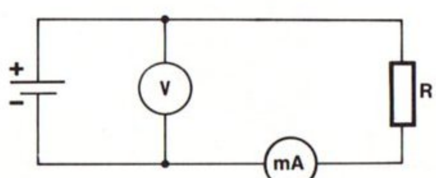
Die Steckergehäuse eignen sich außerdem auch als „Kurzschlußstecker“, wenn später einmal mehrere Experimentierfelder zusammengeschaltet werden sollen. Den Kurzschlußstecker stellt man her, indem man einfach einen blanken Draht statt des Glühlämpchens in das Steckergehäuse einsetzt.


1.49

2.1



2.2



2.3

2 Strom – Spannung – Widerstand

Das sind die drei „Grundgrößen" der Elektrizität. Auch der hobby-Elektroniker muß wissen, was sie zu bedeuten haben und wie sie miteinander verknüpft sind, wenn er Schaltungen wirklich verstehen und erfolgreich aufbauen oder entwerfen will. Sie werden bald merken, daß die angeblich so „trockene" Theorie sehr viel Spaß machen kann, wenn man sie nur richtig anpackt.

2.1 Einfache Messungen an Widerstandsbauelementen

Nun wollen wir auf unserem Experimentierfeld nicht Glühlampen, sondern Widerstandsbauelemente untersuchen, die dem hobby-Labor beigegeben sind (Bild 2.1). Die 10 nebeneinander liegenden Bauelemente sind alle gleich groß. Sie unterscheiden sich äußerlich nur durch verschiedenfarbige Ringe.

Versuch

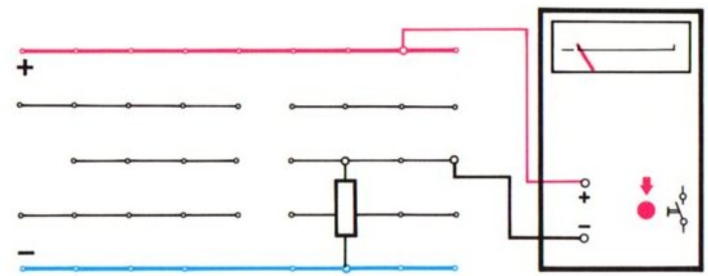
Stecken Sie bitte zuerst das Bauelement mit dem „Farbcode" braun-schwarz-rot-gold auf Ihr Experimentierfeld und messen Sie die angelegte Spannung und den durchfließenden Strom. Damit unser Stromlaufplan nach Bild 2.2 allgemeine Gültigkeit hat, schreiben wir zu dem Bauelement, das durch ein Rechteck symbolisiert wird, nicht den Farbcode, sondern den Buchstaben R (R kommt von dem lateinischen Wort für „Widerstand leisten" = resistere).

In allen Stromlaufplänen ist R „gerade" eingezeichnet, weil das Widerstandsbauelement gemeint ist. Ist jedoch der Widerstandswert gemeint, dann ist *R* ein Formelzeichen und wird „schräg" geschrieben *(R)*.

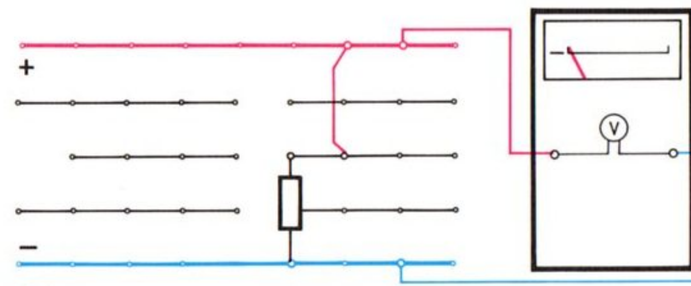
Weil Ihnen nur ein Meßgerät zur Verfügung steht, können Sie Strom und Spannung nicht gleichzeitig messen. Deshalb ist in dem Stromlaufplan das Voltmeter mit seinen Anschlußdrähten nur gestrichelt eingezeichnet. Genausogut ist aber das Schaltbild 2.3, bei dem der Strommesser und der Spannungsmesser fest eingezeichnet sind. Wenn Sie in Zukunft solche Schaltungen sehen, wissen Sie, daß Sie den Strom- und den Spannungsmesser n a c h e i n a n d e r einbauen müssen.

Eine der vielen Aufbaumöglichkeiten der Schaltung für die Strommessung zeigt Bild 2.4. Dann messen Sie nach Bild 2.5 die Spannung. Sie erkennen dort die Brücke, die anstelle des Strommessers in die Schaltung eingesetzt wurde.

Tragen Sie bitte die gefundenen Meßwerte in die nebenstehende Tabelle 2.6 ein. Sie müssen natürlich nicht das gleiche Ergebnis finden, das als Beispiel in der Tabelle links angegeben ist. Nun messen Sie bitte auch die anderen 4 angegebenen Bauelemente. Die restlichen sollten Sie nicht messen; sie könnten nämlich – wie Sie später erfahren werden – Schaden leiden. Auch sollte die Spannung nicht mehr als 6 Volt betragen und für alle Versuche etwa gleich hoch sein.



2.4



2.5

Ergebnis

Obwohl die Bauelemente gleiche Abmessungen haben, unterscheiden sie sich durch unterschiedliche Durchlässigkeit für den elektrischen Strom. Die geringfügigen Schwankungen der Spannung bei den verschiedenen Messungen dürfte wohl kaum die Ursache für die stark unterschiedlichen Ströme durch die einzelnen Bauelemente sein. Also müssen die 5 Bauelemente eine verschiedenartige Materialbeschaffenheit aufweisen. (Daß man bei der Herstellung dieser Körper trotzdem vom gleichen Material ausgeht und die Unterschiede durch einen Trick bei der Bearbeitung erzielt, braucht uns im Augenblick noch nicht zu interessieren.)

Hinweis: Vielleicht haben Sie bemerkt, daß das Bauelement, durch das der größte Strom geflossen ist, warm wurde. Als Besitzer eines mot. 4-Netzgerätes könnten Sie dieses Bauelement bei Betrieb mit voller Spannung auf die Dauer sogar kaputtkriegen! Deshalb nicht mit voller Spannung arbeiten. Die anderen Widerstandsbauelemente des Kastens könnten Sie sehr schnell überhitzen! Deshalb werden wir sie erst später mit einer anderen Methode untersuchen.

2.6

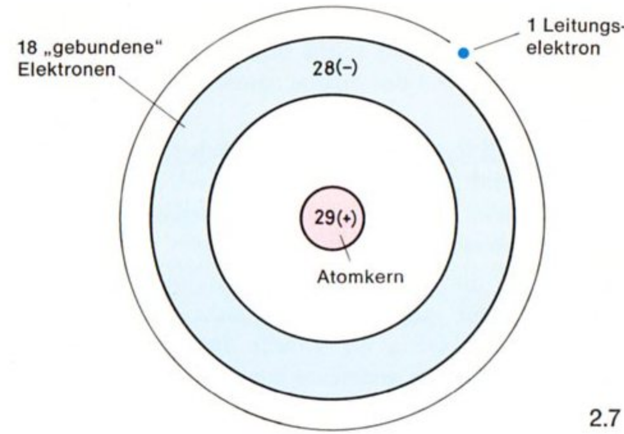
Farbcode	Beispiel		eigene Messung	
	Volt	mA	Volt	mA
br-schw-rot-gold	6,0	6,0		
br-schw-or-gold	6,0	≈ 0,5		
ge-vio-rot-gold	6,0	≈ 1,0		
ge-vio-br-gold	5,9	12,0		
br-schw-br-gold	5,6	50,0		

≈ bedeutet: „ungefähr gleich“

Ergebnis

Fürs erste genügt es zu wissen, daß es Körper gibt, durch die bei „Anlegen einer elektrischen Spannung“ Strom fließt und daß die Stärke dieses Stroms von dem Material des Körpers abhängt.

Bevor wir uns weiteren Untersuchungen zuwenden, soll erklärt werden, was Strom ist und warum er fließt. Weil dies vielleicht nicht alle interessiert und die Kenntnis der Zusammenhänge zum Aufbau weiterer Schaltungen nicht unbedingt nötig ist, ist der folgende Abschnitt „kleingedruckt“.



2.7

2.2 Was ist elektrischer Strom?

Natürlich weiß jedes Kind, daß ein Glühlämpchen brennt, wenn man es an eine Batterie anschließt. Wissen Sie aber auch, was hierbei vor sich geht?

2.2.1 Die Elektronen sind es . . .

Die Erklärung scheint zunächst einfach: So wie ein Fluß in der Landschaft aus Wassertropfen besteht, so besteht der elektrische Strom aus Elektronen.

Schwieriger wird's, wenn man erklären will, was denn nun die Elektronen sind. Und wo fließen sie? Wo kommen sie her? Wie sehen sie aus?

Wir können alle diese Fragen in diesem Buch nicht ausführlich beantworten – da müßte man ein Extrabuch schreiben. Und schließlich wollen Sie ja keine wissenschaftlichen Werke studieren, sondern experimentieren.

Sie wissen sicher schon, daß alle Stoffe, die es auf dieser Welt gibt, aus winzig kleinen Einheiten bestehen, die man Atome nennt. Früher glaubte man, daß sie nicht weiter teilbar seien – eben, weil sie so winzig sind. Heute wissen wir es besser. Auf dem Prinzip der „Kernspaltung“ (nämlich des Atomkerns) beruhen die Atombombe, aber auch die Energiegewinnung durch die Atomkraftwerke.

In Bild 2.7 sehen Sie, wie man sich heute den Aufbau z. B. eines Kupferatoms vorstellt. In Wirklichkeit sieht es vermutlich ganz anders aus – für uns aber genügt diese schematische Darstellung, um das Wesentliche zu erkennen.

In der Mitte sitzt der Kern mit 29 (+)Ladungen. Der Kern ist also „positiv“ geladen.

In großem Abstand umkreisen ihn auf den verschiedensten Bahnen die negativ geladenen Elektronen – und zwar genauso viel, wie der Kern positive Ladungen hat! Jedes Elektron stellt also eine einzige (–)Ladung dar.

Unsere Zeichnung ist nicht maßstabsgerecht: Das Elektron auf der äußersten Bahn, das wir einzeln dargestellt haben, ist viele tausendmal kleiner als der Atomkern. Auch ist der Abstand zwischen Kern und äußerstem Elektron viel, viel größer. Innerhalb eines Atoms ist nämlich eine große Menge „Nichts“!

2.2.2 Die freien Elektronen

Warum wir dieses eine Elektron im Kupferatom extra gezeichnet und die anderen 28 nur als Fläche angedeutet haben, hat folgenden Grund: Das äußerste Elektron hat nämlich besondere Eigenschaften! Während die anderen Elektronen aus bestimmten Gründen fest an den Atomkern gebunden sind, kann sich das äußerste verhältnismäßig leicht aus dem Atomverband herauslösen und sich frei bewegen. Man nennt solche Elektronen deshalb auch „freie“ Elektronen.

2.2.3 Das Metallgitter

Nun noch etwas, was Sie zum Verständnis des Zustandekommens von elektrischem Strom wissen sollten.

Wenn Sie ein Stück blanken Kupferdrahts aus Ihrem Kasten durch ein „Super-Maxi-Ultra-Mikroskop“ (was es leider noch nicht gibt!) betrachten könnten, dann würden Sie erkennen, daß der so fest und kompakt erscheinende Draht in Wirklichkeit ein recht „luftiges“ Gebilde ist.

Bild 2.8 zeigt schematisch, wie man sich den „gitterartigen“ Aufbau von metallischem Kupfer vorzustellen hat. Es ist ein wunderbares geometrisches Gebilde, in dem die winzig kleinen Kupferatome ihren festen Platz haben.

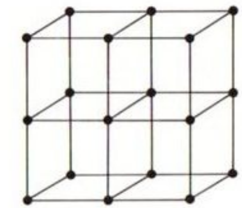
Wenn wir dieses Metallgitter nochmals um etliche tausend Male vergrößern könnten, dann würden wir etwas höchst Merkwürdiges erblicken: Durch das feste Atomgitter flitzen – völlig ungeordnet – noch viel, viel kleinere „Elementarteilchen“ ständig hin und her. Sie kennen diese Teilchen schon: Es sind die „freien“ Elektronen – von jedem Kupferatom genau eins! Weil die Elektronen ja (–)Ladungen darstellen, sind sie im Bild 2.9 blau dargestellt. Warum aber haben die festsitzenden Kupferatome jetzt die Farbe der (+)Ladungen, nämlich Rot?

Ganz einfach: Wenn eine (–)Ladung im Atomverband vom Bild 2.7 fehlt, dann hat natürlich der Kern eine (+)Ladung zuviel, und das Ganze wirkt dann halt positiv!

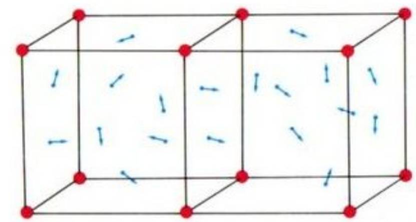
Plus- und Minus-Ladungen ziehen sich – Sie wissen das sicher – so an, wie sich der Nord- und Südpol von Magneten anziehen. Deshalb schwirren die „freien“ Elektronen auch nicht aus dem Draht davon, sondern bleiben hübsch innerhalb des „Gitters“, sozusagen bei ihren „Mutteratomen“.

Jetzt können Sie verstehen, wie es möglich ist, daß sich so winzige Elementarteilchen wie die freien Elektronen durch den Kupferdraht bewegen können. Sie sind es nämlich, die den „elektrischen Strom“ verursachen, wenn es gelingt, sie in einer bestimmten Richtung durch den Draht zu treiben! Denn Elektronen – und das können Sie sich leicht vorstellen –, die sich gegenseitig schubsen und ziellos hin und her flitzen, bilden keinen Strom.

Und weil die freien Elektronen den elektrischen Strom (unter bestimmten Bedingungen, wie wir noch sehen werden) im Draht „weiterleiten“, nennt man sie auch so, wie es im Bild 2.7 angeschrieben ist: „Leitungselektronen“.



2.8



2.9

2.2.4 Maßeinheit und Formelzeichen der Stromstärke

Maßeinheit

Sie wissen aus dem letzten Abschnitt, daß der Stromfluß durch unvorstellbar kleine Elektronen bewirkt wird. Nun kann man so winzige Teilchen natürlich nicht zählen, wenn man den Strom messen will, der durch Glühlämpchen oder durch irgendein anderes Bauelement oder durch ein komplettes Gerät fließt. Ebensowenig zählt man die Wassertropfen, die in Ihrer Wasserleitung durch die Wasseruhr fließen. Man mißt den Durchfluß beim Wasser in „Litern“, beim Strom in „Ampere“. Als Kurzzeichen verwendet man: A.

Abgeleitete Einheiten:

1 A = 1000 mA = 1 000 000 µA
1 mA = 0,001 A = 1000 µA
1 µA = 0,001 mA = 0,000001 A

Ihr Meßinstrument kann maximal (höchstens) eine Stromstärke von 0,1 A = 100 mA messen.

In der Schwachstromtechnik, für die wir uns hier als Vorbereitung für die „Elektronik" interessieren, ist 1 Ampere schon eine recht beachtliche Stromstärke. Deshalb rechnet man dort meistens mit Tausendstel-Teilen von 1 A, mit Milliampere. Das Kurzzeichen: mA.

Oft kommen noch sehr viel kleinere Stromstärken vor, nämlich Tausendstel von mA. Man nennt sie Mikroampere. Kurzzeichen: µA. (µ ist ein griech. Buchstabe und wird „mü" gesprochen.)

Formelzeichen

In der Technik kommt man nicht ohne Rechnung aus. Deshalb benötigt man für den Strom ein „Formelzeichen". Man hat dafür den großen Buchstaben I gewählt. Damit ein Formelzeichen von einer Maßeinheit gut unterschieden werden kann, werden alle Formelzeichen, also auch unser I, „kursiv", d. h. schräg geschrieben. Dagegen wird die Maßeinheit A oder mA mit geraden Buchstaben geschrieben.

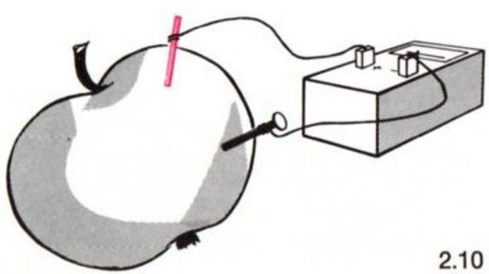
Beispiel: $I = 30$ mA

2.3 Die elektrische Spannung

2.3.1 Eine selbstgemachte Spannungsquelle

Versuch

Nehmen Sie bitte einen Apfel (oder eine Zitrone) und stecken Sie nach Bild 2.10 einen eisernen Nagel und ein Stück blanken Kupferdrahtes hinein. Statt des blanken Kupferdrahtes können Sie ein abisoliertes fischertechnik-Kabel benutzen, bei dem aber unbedingt ein etwa verzinntes Ende abgeschnitten werden muß. Diese beiden „Körper" bezeichnet man als „Elektroden".



2.10

Verbinden Sie nun die Eisenelektrode (Nagel) mit dem (–)Anschluß des Voltmeters und die Kupferelektrode (Kupferdraht) mit dem (+)Anschluß.

Ergebnis

Der Zeiger des Meßgerätes schlägt nach rechts aus und zeigt etwa 0,2 Volt an. Ihr Apfel wirkt also als Spannungsquelle! Sie haben ein einfaches „galvanisches Element", auch „galvanische Zelle" genannt, gebaut. Tragen Sie Ihr Ergebnis in Tabelle 2.11 ein.

Versuch

Stecken Sie die beiden Elektroden in größerem Abstand von einander ein und untersuchen Sie, ob sich dadurch die Spannung ändert.

Sie werden feststellen, daß dies nicht der Fall ist.

Versuch

Probieren Sie statt einer Fe(= Eisen)- und einer Cu(= Kupfer)-Elektrode zwei Eisen-Elektroden, also zwei Nägel, und dann zwei Kupfer-Elektroden.

Der Zeiger schlägt nicht aus. Mit zwei gleichen Elektroden kann nie eine Spannungsquelle erzeugt werden.

Versuchen Sie andere Materialzusammenstellungen und stellen Sie die erzeugte Spannung fest. Dabei sollten Sie unbedingt festhalten, welches Material zum (+)Pol („Anode") und welches zum (–)Pol („Kathode") Ihrer Spannungsquelle wird. Tragen Sie die Ergebnisse bitte in die Tabelle 2.11 ein.

Erklärung

Was Sie nicht sehen können: Die „Apfelsäure" verändert die Oberfläche des Eisens und des Kupfers. Es tritt eine chemische „Reaktion" ein. Nur deshalb schlägt der Zeiger Ihres Meßgerätes aus.

Wenn Sie statt eines Apfels ein Glas reines Leitungswasser nehmen, erhalten Sie keinen Ausschlag, weil Sie zum Bau einer Spannungsquelle nicht nur zwei Elektroden, sondern auch einen sogenannten „Elektrolyten" wie z. B. „Apfelsäure" benötigen. Reines Wasser wirkt aber nicht als Elektrolyt.

2.11

Objekt	Anode	Kathode	Spannung in Volt
Apfel	Kupfer Eisen Kupfer	Eisen Eisen Kupfer	
Zitrone	Kupfer (2-Pf-St.)	Silber (Mark-St.)	
Apfelsine			

Zwischen bestimmten, verschiedenartigen Metallen tritt eine elektrische Spannung auf, wenn sie in einen Elektrolyten eingetaucht werden.

Lebensdauer galvanischer Elemente

Es leuchtet ein, daß die chemische Zusammensetzung des Elektrolyten und das Material der Elektroden die Höhe der erzeugten Spannung bestimmt. So werden z. B. in den meistgekauften galvanischen Elementen, den Monozellen, Babyzellen, Mignonzellen usw., als (+)Elektrode Kohle und als (–)Elektrode Zink benutzt. Als Elektrolyt wird Zinkchlorid verwendet. Der Elektrolyt ist in eine geleeartige Masse eingelagert, so daß auch nach dem Undichtwerden des Zinkbechers kaum Flüssigkeit austreten kann.

Durch die chemische Reaktion im Inneren der Zelle werden nämlich mindestens eine Elektrode und auch der Elektrolyt verändert und allmählich „verbraucht". Bei den genannten Zellen ist es die Zink-Elektrode (der Zinkbecher), die immer dünner wird.

Je größer die Materialoberfläche der beiden Elektroden ist, um so größer ist die Stromstärke, die die Zelle maximal liefern kann. Deshalb kann man mit der dicken „Monozelle" gleichzeitig mehr Lampen zum Leuchten bringen als mit der dünnen „Mignonzelle". Entnimmt man beiden Zellen gleich viel Strom, z. B. durch Anschalten der gleichen Anzahl von gleichen Lampen, so lebt die dicke Monozelle entsprechend länger.

Monozelle

Babyzelle

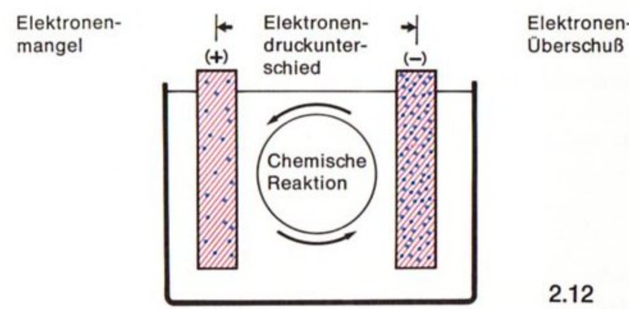
Mignonzelle

2.3.2 Der Elektronendruck

Von allein brennt kein Lämpchen; man muß es erst an eine Spannungsquelle anschließen, die die im Draht und in dem Glühfaden des Lämpchens befindlichen freien Elektronen „auf Trab" bringt.

Wie macht das ein galvanisches Element?

Im Inneren der Zelle laufen chemische Reaktionen ab, die zu kompliziert sind, um sie hier näher zu erklären. Jedenfalls wird chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt. Am (–)Pol der Zelle herrscht ein Überschuß an Elektronen (gegenüber dem (+)Pol). Da ein Ausgleich über das Innere der Zelle praktisch nicht stattfinden kann, entsteht zwischen den beiden Elektroden ein sogenannter „Elektronendruck". Diesen Druckunterschied nennt man „elektrische Spannung". Sie können sie mit Ihrem Meßgerät messen (Bild 2.12).



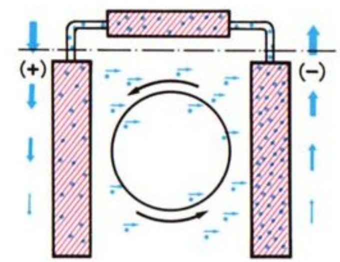
2.12

Ein galvanisches Element kann längere Zeit, bei aufwendigen Konstruktionen sogar mehrere Jahre, gelagert werden.

Schließt man nun eine Glühlampe oder ein anderes Bauelement an, so erfolgt der Ausgleich über den jetzt geschlossenen Stromkreis. Solange das Element noch nicht verbraucht ist, werden die über den Stromkreis abfließenden Elektronen am (–)Pol ständig von innen heraus nachgeliefert. Die Spannung der Batterie bleibt deshalb erhalten (Bild 2.12).

Beim Netzgerät ist das anders. Dort wird die Spannung vom Elektrizitätswerk in großen „Generatoren" erzeugt, so ähnlich wie man die Spannung für eine Fahrradlampe mit einem kleinen Dynamo erzeugt. Sobald Sie mit dem Rad stehenbleiben, ist die Spannung weg und die Lampe erlischt. Auch die Netzspannung bleibt nur aus, wenn die Generatoren im Elektrizitätswerk aus irgendeinem Grund abgeschaltet oder Fernleitungen unterbrochen werden.

2.3.3 In welche Richtung fließt der Strom?



2.13

Aus Ihren Untersuchungen geht noch etwas sehr wichtiges hervor: Zwischen den „Klemmen" einer Energiequelle kann sehr wohl eine Spannung bestehen, ohne daß ein Strom fließt. Dies ist z. B. zwischen den Polen einer Batterie der Fall, an die nichts angeschlossen ist.

Ohne Spannung von einer Energiequelle kann jedoch niemals ein Strom fließen.

Auf Grund der modernen physikalischen Forschungsergebnisse ist es ganz klar, daß der Elektronenstrom im äußeren Stromkreis, also durch die an eine Batterie oder das Netzgerät angeschlossenen Bauelemente vom (–)Pol der Batterie zum (+)Pol fließt. Diese Stromrichtung nennt man „physikalische Stromrichtung" (Bild 2.13).

Der Elektronenstrom fließt außerhalb der Batterie vom (–) Pol zum (+) Pol. Innerhalb der Batterie fließt er vom (+)– zum (–)Pol. (Siehe Bild 2.13)

Leider war unseren Vorfahren, die ja auch bereits mit dem elektrischen Strom arbeiteten, dieser Zusammenhang noch nicht bekannt. Deshalb legte man damals willkürlich fest, daß der elektrische Strom vom (+)Pol zum (–)Pol fließen soll. Bestimmte technische Vorgänge, auf die wir hier nicht näher eingehen wollen, gaben für diese Meinung recht anschauliche Unterlagen. Diese Stromrichtung nennt man „konventionelle (= herkömmliche) Stromrichtung". In der Elektrotechnik arbeitet man heute noch mit dieser Festsetzung. Alle Berechnungen und Schaltungsbesprechungen gründen sich darauf. Deshalb müssen auch wir mit der „konventionellen Stromrichtung" arbeiten, obwohl wir es eigentlich besser wissen.

(Statt „konventioneller" Stromrichtung wird häufig noch von der „technischen" Stromrichtung gesprochen.)

Physikalische Stromrichtung:
Von (–) nach (+)
Konventionelle Stromrichtung:
Von (+) nach (–)

Um Verwechslungen zu vermeiden, wollen wir aber folgendes verabreden: Wir sprechen von „Elektronenstrom", wenn die physikalische Stromrichtung gemeint ist. Ist dagegen vom elektrischen Strom oder einfach vom „Strom" die Rede, so denken wir dabei immer an die konventionelle Stromrichtung.

Elektronenstrom =
physikalische Stromrichtung
Strom = konventionelle Stromrichtung

Abgeleitete Einheiten:

1 Volt = 1000 mV = 1 000 000 μV
1 kV = 1000 V
1 mV = 0,001 V = 1000 μV

Ihr Meßgerät kann max. 10 Volt messen.

2.3.4 Einheit und Formelzeichen der Spannung

Die Einheit der Spannung ist das „Volt"; abgekürzt: V.

Der Hochspannungstechniker rechnet meist mit dem Tausendfachen eines Volt, mit Kilovolt, abgekürzt kV. In der Nachrichtentechnik benutzt man auch eine kleinere Einheit als 1 Volt, nämlich das Millivolt, abgekürzt mV. Die nochmals um den Faktor 1000 kleinere Einheit nennt man Mikrovolt, abgekürzt μV. Die Messung so kleiner Spannungen ist meist recht problematisch; für unsere Zwecke kommen wir mit Millivolt aus.

Als Formelzeichen für die Spannung benutzt man ein schräggestelltes *U*.

So könnte man z. B. die Spannungsangabe einer Batterie folgendermaßen beschreiben: $U_{Bat} = 4{,}5$ V.

2.4 Der elektrische Widerstand

2.4.1 Leiter und Nichtleiter

Der Unterschied zwischen Leiter und Nichtleiter ist leicht einzusehen, wenn Sie die vorigen Abschnitte verstanden haben.

Ein „Leiter" leitet den elektrischen Strom gut, weil er viele „freie" Elektronen dafür zur Verfügung hat und weil er so „gebaut" ist, daß sich diese gut durch sein „Gefüge" hindurch bewegen können.

Ein „Nichtleiter" ist ein Material, das so verzwickt in seinem Aufbau ist, daß sich die wenigen „freien" Elektronen, die er besitzt, nur mit Mühe durch ihn hindurchquälen können.

Zu den guten „Leitern“ gehören viele Metalle, wie z. B. Silber, Kupfer, Aluminium, Zink usw., und auch Metall-Legierungen.

Zu den „Nichtleitern“ gehören fast alle Kunststoffe, Porzellan, Glas, keramische Massen sowie auch viele natürliche Materialien wie z. B. trockenes Holz.

Nichtleitende Stoffe benutzt man zur Isolierung von Stromleitungen, die sich gegenseitig nicht berühren dürfen. Deswegen hat der Kupferdraht in Ihrem hobby-Labor eine Schutzhülle aus verschiedenfarbigem Kunststoff. Wenn Sie eine leitende Verbindung herstellen wollen, so müssen Sie den Draht bzw. die flexible Litze erst „abisolieren“.

Zwischen „leitend“ und „nichtleitend“ gibt es aber viele Übergänge: Es gibt auch „schwer leitende“ Stoffe wie z. B. eine Spezial-Kohle, die deshalb für „Widerstandsbauelemente“, wie Sie sie für Ihre Versuche schon verwendet haben, eingesetzt wird. Wir kommen darauf noch zurück.

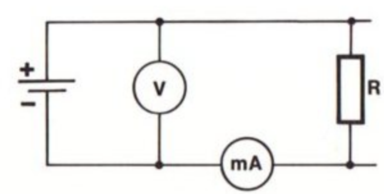
Von den sogenannten „Halbleitern“ wollen wir jetzt noch nicht sprechen. Ein wenig wird davon erst im 11. Kapitel dieses Buches die Rede sein.

Die Leitfähigkeit eines Stoffes ist abhängig von der Anzahl freier Elektronen, die für die Stromleitung zur Verfügung stehen.

2.4.2 Weitere Messungen an Widerstandsbauelementen

Kommen wir zurück auf die Messung der Ströme, die durch die 5 ausgewählten Widerstandsbauelemente fließen (siehe Abschnitt 2.1 und Bild 2.14). Vorausgesetzt, daß im geschlossenen Stromkreis eine Spannungsquelle vorhanden ist, fließt mehr oder weniger Strom in Abhängigkeit von einem noch nicht näher untersuchten unterschiedlichen Verhalten der verschiedenen Bauelemente. Das wollen wir nun nachholen.

2.14



2.15

Versuch Nr.	Farbcode R in Ω	Spannung in Volt	Stromstärke in mA
1	br-schw-br-gold	$U_1 =$	$I_1 =$
2	$= R_A$ (... Ω)	$U_2 =$	$I_2 =$
3		$U_3 =$	$I_3 =$
4	ge-vio-or-gold	$U_4 =$	$I_4 =$
5	$= R_B$ (... Ω)	$U_5 =$	$I_5 =$
6		$U_6 =$	$I_6 =$

Im allgemeinen stehen Indices tiefer als der zugehörige Buchstabe. Wegen des besseren Satzbildes stehen sie in diesem Buch auf gleicher Höhe.

Versuch

Zunächst überprüfen wir, ob und gegebenenfalls wie sich die Stromstärke bei Verwendung ein und desselben Bauelements ändert, wenn wir es nacheinander an Spannungsquellen mit verschieden hoher Spannung anschalten. Die Besitzer eines ft-Netzgerätes drehen dazu einfach den Drehknopf. Übersichtlicher wird der Versuch, wenn Sie aus Ihrem Batteriestab die drei Batterien herausnehmen und nach Bild 1.5 eine Spannungsquelle mit drei Zellen bauen (siehe Abschn. 1.1.3).

Nun messen Sie bitte für die 3 verschiedenen Spannungen, die Sie von dieser Spannungsquelle „abnehmen" können, die Ströme, die durch das Bauelement mit dem Farbcode braun-schwarz-braun-gold fließen. Die Besitzer eines Netzgerätes machen diese Untersuchung auch noch am Bauelement mit dem Farbcode gelb-violett-orange-gold.

Damit wir die einzelnen Messungen später schnell ansprechen können, versehen wir, wie dies in der Technik üblich ist, die Formelzeichen U (für Spannung) und I (für Strom) mit einem sogenannten „Index" (siehe Tabelle 2.15). Die Ergebnisse des ersten Versuchs wollen wir mit U_1 und I_1 bezeichnen. Zur Kennzeichnung der Werte des zweiten Versuchs wählen wir die Indexziffer 2. Wir bezeichnen also die Spannung beim zweiten Versuch mit U_2 und die Stromstärke mit I_2. Mit Hilfe dieser Indices (= Mehrzahl von Index) erspart man sich die mühsame Beschreibung, ob die Werte vom ersten, zweiten oder dritten Versuch gemeint sind. Wollten wir die beiden Widerstandsbauelemente ebenfalls in abgekürzter Schreibweise darstellen, so dürfen wir dazu aber nicht mehr die Indices 1 und 2 benutzen. Wir könnten z. B. das eine Widerstandsbauelement mit dem Index A und das zweite mit dem Index B kennzeichnen.

Auswertung

Nun wollen wir die Messung auswerten, denn dafür haben wir sie ja durchgeführt. Zunächst stellen wir fest, ob vielleicht zwischen der angelegten Spannung und dem Strom ein einfacher Zusammenhang besteht.

Ganz allgemein überprüft man z. B., ob bei Ansteigen der einen Größe (z. B. der Spannung) die andere Größe (hier die Stromstärke) fällt oder sinkt oder gleichbleibt. Beim Vergleich der Zahlen des ersten Versuchs (im Beispiel $U_1 = 1{,}5$ V und $I_1 = 14$ mA) mit den Zahlen des zweiten Versuchs (im Beispiel $U_2 = 2{,}9$ V und $I_2 = 28$ mA) ist leicht zu erkennen, daß die Stromstärke um denselben Faktor (Mal-Faktor) steigt, um den die Spannung erhöht worden ist.

Beim Vergleich der Versuche 1 und 2 verdoppeln sich die Batteriespannung und die Stromstärke. Beim Vergleich der Versuche 3 und 1 (bzw. 6 und 4) stellt man eine Verdreifachung von U und I fest. In der Mathematik nennt man ein solches Verhalten der beiden zu vergleichenden Größen ein „proportionales" Verhalten. Das mathematische Zeichen dafür ist ein „$\sim$" : $U \sim I$. Allgemein wird ein solcher oder ähnlicher Zusammenhang als „Funktion" bezeichnet. Der Fachmann sagt: „Der Strom ist eine Funktion der Spannung".

Anwendung

Das elektrische Verhalten eines jeden Bauelements, z. B. des mit den Farbringen braun-schwarz-braun-gold gekennzeichneten Widerstandsbauelements, läßt sich damit eindeutig festlegen. Man braucht nur den Wert U der Spannung, die an die Anschlüsse gelegt wurde, durch die Stromstärke I des Stroms, der durchfließt, zu dividieren. Den so erhaltenen Wert nennt man den „elektrischen Widerstand" des Bauelements.

2.4.3 Einheit und Formelzeichen des Widerstandes

Das F o r m e l z e i c h e n für den elektrischen Widerstand kennen wir schon: Es ist ein schräggestelltes R. Das vorher Gesagte schreibt man als Formel:

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

Nun brauchen wir noch die E i n h e i t für den elektrischen Widerstand: Es ist das „Ohm". Das Kurzzeichen ist der griechische Großbuchstabe Ω (Omega). Es wird zu Ehren des Physikers Simon Ohm (1789–1854) so genannt.

Der Begriff „Widerstand" ist doppeldeutig

Vielleicht ist ihnen aufgefallen, daß in diesem Buch die kleinen Bauelemente meistens als Widerstandsbauelemente bezeichnet sind. Der in der Technik Erfahrene benutzt sehr häufig einfachheitshalber dafür das Wort: Widerstand. Wenn Sie also den Begriff „Widerstand" lesen, müssen Sie sich darüber klar sein, ob der Widerstands w e r t in Ohm oder Kiloohm oder ob ein Widerstands b a u e l e m e n t gemeint ist. Im Englischen ist diese Unterscheidung leichter: Dort heißt der Widerstandskörper „resistor" und der Widerstandswert „resistance".

Für einen nicht veränderlichen Widerstand bleibt das Verhältnis von angelegter Spannung zum durchfließenden Strom stets gleich.

Abgeleitete Einheiten:

1000 Ω = 1 kΩ (Kiloohm)

1 000 000 Ω = 1 MΩ (Megaohm, meist auch Megohm)

$$\textbf{Widerstand} = \frac{\textbf{Spannung}}{\textbf{Strom}}$$

Die 3 Formen des Ohm'schen Gesetzes

1. $R = \dfrac{U}{I}$; $\Omega = \dfrac{V}{A}$
2. $U = R \cdot I$; $V = \Omega \cdot A$
3. $I = \dfrac{U}{R}$; $A = \dfrac{V}{\Omega}$

2.16

Bauelement	Spannung U in V	Strom I in mA	Widerstandswert R in Ω
Schichtwiderstand			
....			
....			
....			
....			
....			
Glühlampe hobby-Labor			
....			
....			
Glühlampe aus e-m			
Spule			

2.5 Das Gesetz des Simon Ohm

2.5.1 Allgemeines

Die „Verknüpfung" von Spannung, Strom und Widerstand haben Sie sozusagen ganz von selbst im vorigen Abschnitt herausgefunden. Als erster hat sie Simon Ohm schon vor über 100 Jahren mathematisch formuliert. (Unter Verknüpfung versteht man den mathematischen Zusammenhang zwischen 2 oder mehr physikalischen Größen, z. B. den genannten 3 Größen Spannung, Strom und Widerstand.) Nebenstehend sind die 3 Formen des Ohm'schen Gesetzes mit den entsprechenden Einheiten angeschrieben.

Am leichtesten behalten Sie die Form $U = R \cdot I$ im Gedächtnis. Sie könnten dabei nämlich als Merkhilfe an den Schweizer Kanton „Uri" denken. Diese Gleichung können Sie dann ja ohne weiteres in die jeweils benötigte Form umwandeln.

Mit Hilfe der 3 Formen des Ohm'schen Gesetzes ist es möglich, bei Kenntnis von zwei Größen die unbekannte dritte Größe auszurechnen.

2.5.2 Bestimmung von Widerstandswerten

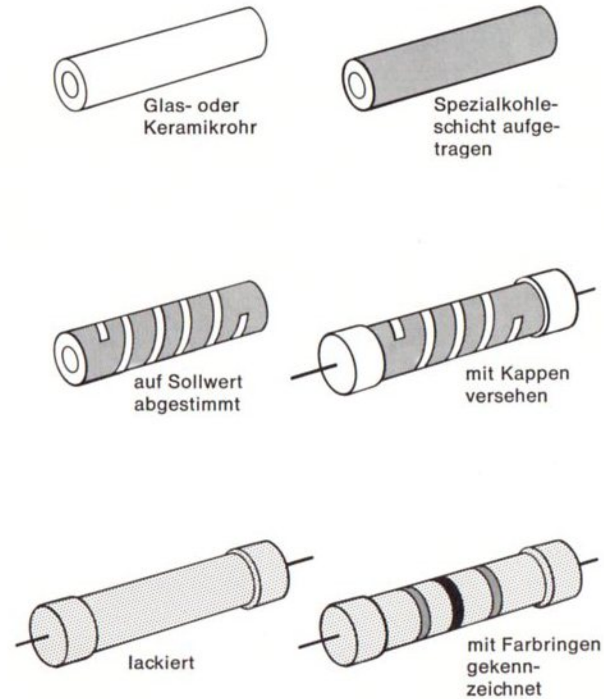
Das Ohm'sche Gesetze können Sie nun z. B. zur Berechnung der Widerstandswerte von Glühlampen und Widerstandsbauelementen benutzen, die Sie schon einmal gemessen haben (siehe Abschn. 2.4.3).

Versuch

Falls Sie die Messungen nicht von den schon ausgefüllten Tabellen übertragen wollen, können Sie alle in der Tabelle 2.16 angegebenen Bauelemente messen. Die Widerstandsbauelemente wollen wir in Zukunft „Schichtwiderstände" nennen. Die Begründung folgt im nächsten Abschnitt.

2.6 Aufbau eines Schichtwiderstandes

In größeren Rundfunk-, Fernseh- und sonstigen elektronischen Geräten sind bis zu 100 Widerstandsbauteile oder sogar noch mehr eingebaut. Sie haben die manigfaltigsten Aufgaben zu erfüllen. Die meisten davon sind im Prinzip so gebaut, wie es im Bild 2.17 dargestellt ist. Auf einen Glas- oder Keramikkörper wird eine Schicht aus Spezialkohle aufgetragen. Nach Trocknung schneidet eine Spezialfräsmaschine diese Schicht spiralförmig an. Die Länge und der Steigungswinkel der Spirale bestimmen den Wert des sich ergebenden elektrischen Widerstandswertes. Nun werden die Anschlußdrähte befestigt; dann wird der Körper noch zum Schutz vor Beschädigung (in manchen Fällen) mit Kappen und einer starken isolierenden Deckschicht versehen und der Farbcode aufgetragen.



2.17

2.7 Der Farbcode

2.7.1 Der Widerstandswert

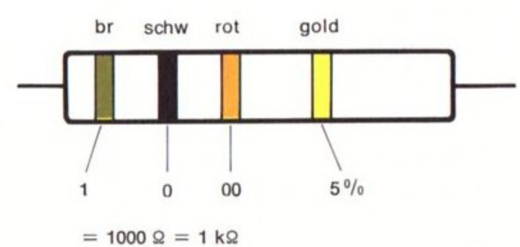
Schichtwiderstände könnten theoretisch mit jedem beliebigen Widerstandswert hergestellt werden. Man hat sich jedoch international auf bestimmte praktische Werte geeinigt. Die meist gebräuchliche Reihe ist folgende:

1,5 – 2,2 – 3,3 – 4,7 – 6,8 – 10 [Ω; kΩ; MΩ]

Eine Tabelle der feiner gestuften Reihen finden Sie im Anhang.

Es gibt auch Widerstände, bei denen der Widerstandswert und die Toleranz aufgedruckt sind. Widerstände mit Farbringen haben jedoch den Vorteil, daß die Werte auch eines schon eingebauten Widerstandes ohne weiteres abgelesen werden können.

Der erste und der zweite Farbring kennzeichnen je eine Ziffer; der dritte Farbring gibt die Anzahl der dahinterstehenden Nullen an. Bild 2.18 gibt ein Beispiel.

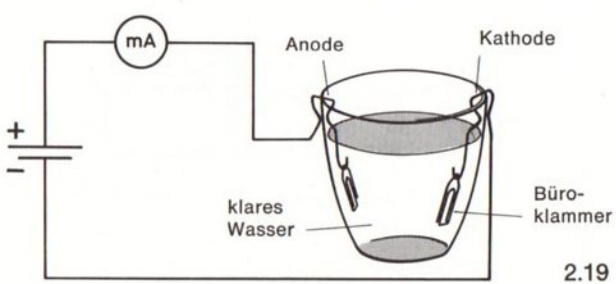


2.18

2.7.2 Die Toleranzangabe

Aus Fertigungsgründen – solche Widerstände werden nämlich am laufenden Band zu Millionen hergestellt – kann man den gewünschten Widerstandswert nicht genau einhalten. Deshalb darf er bis zu einem bestimmten Prozentsatz nach oben oder unten vom sogenannten „Sollwert" abweichen. Der Sollwert ist der Wert, den Sie auf Grund der Ringe ermitteln können. Die genaue Abweichung vom Sollwert kann natürlich nicht angegeben werden; man nennt dies den „Toleranzbereich" (vom lat. tolerare = dulden).

Auskunft über den Toleranzbereich, in dem der wirkliche, d. h. der Ist-Widerstandswert, den Sie messen können, liegt, gibt der letzte Farbring. Dies ist der Ring, der vom Anschlußdraht den größeren Abstand hat (siehe Farbcode am Schluß des Buches).



2.19

Die Schichtwiderstände Ihres hobby-Labors haben einen goldenen Ring. Dies bedeutet einen Toleranzbereich von ± 5 % vom Sollwert.

Für den 100-Ω-Widerstand (Farbcode: braun-schwarz-braun-gold) gilt also folgendes: 5 % von 100 Ω sind 5 Ω. Der Ist-Widerstandswert darf demnach um 5 Ω vom Soll-Widerstandswert 100 Ω nach unten oder oben maximal abweichen. Der tatsächliche Widerstandswert muß also zwischen 95 Ω und 105 Ω liegen.

Widerstände mit 1 % oder weniger Abweichung gelten als „Präzisionswiderstände". Sie sind recht teuer und werden nur in Sonderfällen verwendet, z. B. für genaue Meßinstrumente. Meist begnügt man sich mit Widerständen der Toleranzklasse ± 5 und ± 10 %. Diese haben einen goldenen bzw. einen silbernen Ring.

2.8 Der Widerstand als Materialeigenschaft

2.8.1 Ein Versuch mit Wasser

Bauen Sie bitte die Versuchsanordnung nach Bild 2.19 auf. Als Spannungsquelle benutzen Sie entweder den Batteriestab oder das Netzgerät mot. 4, wobei Sie die kleinste Spannung einstellen. Für die beiden Elektroden schneiden Sie je 15 cm blauen und roten Draht ab und versehen das Ende mit einem grünen bzw. mit einem roten Stecker. Das freie Ende des Drahtes wird nach dem Abisolieren zu einem Haken umgebogen. Daran hängen Sie je eine Büroklammer. Damit die Entfernung zwischen den beiden Elektroden gleich bleibt, befestigen Sie am besten die Haken am Glasrand mit einer Büroklammer. Sollten Sie gerade kein durchsichtiges Glasgefäß zur Hand haben, können Sie auch eine Porzellan- oder Kunststofftasse benutzen. Blechgefäße sind jedoch nicht geeignet. Das Glasgefäß sollte einen Durchmesser von etwa 5 cm haben.

Schalten Sie nun ein und lesen Sie den Strom ab (roten Knopf drücken!), der durch das Milliamperemeter und damit auch durch das Wasser fließt; denn Sie wissen ja, die Stromstärke kann im Wasser keinen anderen Wert als der Strom im Meßgerät haben. Tragen Sie bitte das Ergebnis in die Tabelle 2.20 ein.

Fügen Sie nun zum Wasser gewöhnliches Kochsalz hinzu. Zuerst nur wenig, dann immer mehr. Damit das Kochsalz sich im Wasser auflösen und gleichmäßig verteilen kann, vergessen Sie bitte das Rühren nicht. Schon durch Zugabe von ganz wenig Salz wird sich der Ausschlag ganz beträchtlich erhöhen. Fügen Sie nun soviel Salz hinzu, daß etwa 60 mA Strom fließen.

Damit Sie nicht jedesmal den Taster des Meßgerätes drücken müssen, können Sie mit Hilfe eines ft-Federgelenksteins und anderer ft-Grundbausteine die Taste ständig niederdrücken.

2.20

Versuch Nr.	U in V	Elektrodenabstand in cm	Salzzugabe	I in mA	R errechn. in Ω	G errechn. in S

Wie man den G-Wert in der letzten Spalte ausrechnet, erfahren Sie im nächsten Abschnitt.

Ergebnis

1. Durch klares Wasser fließt ein verhältnismäßig kleiner Strom. Wasser „leitet“ den Strom also nicht sehr gut.
2. Wird Wasser mit Kochsalz versetzt, steigt das Stromleitvermögen an.

Schlußfolgerung

Auf Grund der Kenntnis des Ohm'schen Gesetzes können Sie jetzt sagen: Der Widerstand des Wassers nimmt mit steigendem Kochsalzgehalt stark ab. Das gleiche geschieht, wenn Sie statt Kochsalz etwas Zitronensaft oder Seifenlauge zugeben.

Auch der elektrische Widerstand der menschlichen Haut wird stark verkleinert, wenn sie mit Wasser benetzt ist. Dies ist besonders dann der Fall, wenn das Wasser Waschmittel, Seife oder sonstige Zusätze enthält, wie das in Küche und Badezimmer fast immer der Fall ist. Darum kann es lebensgefährlich sein, wenn man in der Badewanne mit Geräten in Berührung kommt, die an das Lichtnetz angeschlossen sind! Man soll auch keinen Schalter mit nassen Händen betätigen. Das Experimentieren neben oder gar in der Badewanne kann lebensgefährlich werden, auch mit dem sonst völlig sicheren ft-Netzgerät!

2.8.2 Leitwert und Widerstandswert

Bei Flüssigkeiten rechnet man in der Technik nicht gerne mit dem Widerstandswert, sondern lieber mit dem „reziproken" (= umgekehrten) Wert, dem Leitwert. Das Formelzeichen ist „G" und die Maßeinheit ist das „Siemens", abgekürzt „S". Damit ergibt sich die Formel:

$$G = \frac{1}{R}; \qquad S = \frac{1}{\Omega}$$

Setzt man für R nach dem Ohm'schen Gesetz $U : I$ ein, dann folgt

$$G = I : U; \qquad S = A : V$$

Bestimmen Sie nun bitte den Widerstands- und den Leitwert des mit Kochsalz versetztem Wasser. Die berechneten Werte tragen Sie in die Tabelle 2.20 ein.

Überprüfen Sie, ob der Leitwert ansteigt oder abfällt, wenn Sie den Abstand der Elektroden verkleinern.

Ergebnis

Sie haben bei diesem Versuch gesehen, daß der Widerstand des Wassers zwischen den beiden Elektroden davon abhängt, wie groß der Abstand zwischen diesen ist. Vielleicht verringern Sie auch einmal den Wasserinhalt des Gefäßes so stark, daß die Elektroden nur noch zum Teil benetzt sind. In diesem Fall werden Sie ein Ansteigen des Widerstandes und damit eine Verkleinerung des Leitwertes der Versuchsanordnung feststellen.

2.8.3 Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit

Sie erhielten unterschiedliche Werte, je nach dem, wie groß der Abstand der Elektroden war; und ebenso bestand eine Abhängigkeit von dem Querschnitt Ihrer Versuchsanordnung. (Denn wenn das Gefäß nur zum Teil gefüllt ist, ist der Querschnitt der Flüssigkeitssäule zwischen den beiden Elektroden kleiner als bei vollem Gefäß.)

Techniker unterhalten sich nicht gern mit so ungenauen Angaben. Deshalb gibt man in der Technik den Widerstand eines Materials, z. B. einer Kohleschicht oder einer Flüssigkeit, so an, daß die gerade vorhandenen Materialabmessungen nicht berücksichtigt werden müssen. So wird z. B. der Widerstand von Kupfer als Widerstandswert eines Kupferdrahtes angegeben, der 1 m Länge und 1 mm Querschnitt hat. Diesen Wert nennt man den „spezifischen Widerstand" von Kupfer.

Er hat als Formelzeichen den griechischen Kleinbuchstaben „ϱ" (sprich rho). Seine Maßeinheit ist: $\Omega \cdot mm^2/m$.

$$R = \frac{\varrho \cdot l}{A}\ (\Omega)$$

A = Querschnittsfläche $r^2\,\pi$ in mm^2
l = Drahtlänge in mm

Man kann z. B. errechnen, daß ein Kupferdraht von 90 m Länge und 0,15 mm Durchmesser mit einem spezifischen Widerstand von $\varrho = 0{,}02$ einen Widerstandswert von 100 Ω hat. Das entspricht etwa dem Widerstandswert des Elektromagneten im Experimentierkasten. Sie dürfen daraus schließen, daß auf diesen Elektromagneten etwa 90 m Kupferdraht (d = 0,15 mm) gewickelt sind.

Ein Eisendraht von 1 m Länge und einem Querschnitt von 1 mm^2 hat dagegen einen Widerstandswert von etwa 0,1 Ω. Der spezifische Widerstand von Eisen ist damit $\varrho = 0{,}1\ \Omega \cdot \frac{mm^2}{m}$

Frage

Wie groß wäre der tatsächliche Widerstandswert R des Elektromagneten, wenn er statt mit Kupfer mit Eisendraht derselben Dicke gewickelt worden wäre?

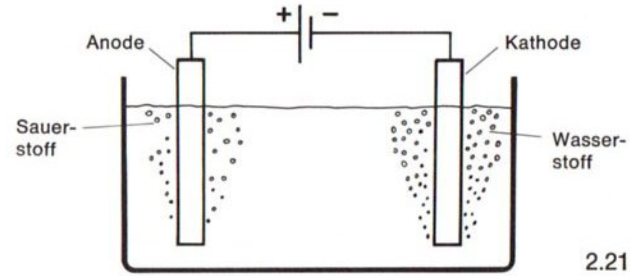
Für manche Zwecke, vor allem bei Verwendung von Flüssigkeiten, rechnet man lieber mit der „Leitfähigkeit". Man kann sie als den Kehrwert (Reziprokwert) des spezifischen Widerstandes berechnen. Das Formelzeichen ist der griechische Kleinbuchstabe $\varkappa$ (sprich kappa). Die Maßeinheit ist $m / \Omega \cdot mm^2$.

2.9 Chemische Wirkung des elektrischen Stroms

Bei dem Versuch mit Wasser und Kochsalz haben Sie nebenbei auch die chemische Wirkung des Stroms kennengelernt. Sie haben sicher beobachtet, daß an den beiden Elektroden feine Gasbläschen entstehen und nach oben steigen (Bild 2.21).

Das Wasser wird beim Stromdurchgang nämlich in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff zerlegt. An der Kathode (mit dem (–)Pol verbunden) wird genau doppelt so viel Wasserstoff frei wie Sauerstoff an der Anode (mit dem (+)Pol verbunden). Das Wassermolekül H_2O enthält nämlich 2 Wasserstoffatome und 1 Sauerstoffatom.

Daneben spielt – besonders nach der Zugabe von Kochsalz – noch eine Menge Chemie eine Rolle. Was da alles passiert, ist viel zu kompliziert, als daß die chemischen Vorgänge hier erklärt werden könnten. Lassen Sie aber den Vorgang der Wasserzersetzung, den man „Elektrolyse" nennt, spaßeshalber eine Stunde lang laufen. Wenn das Trinkwasser zusätzlich gechlort ist, dann gibt das nämlich eine sagenhafte Brühe!



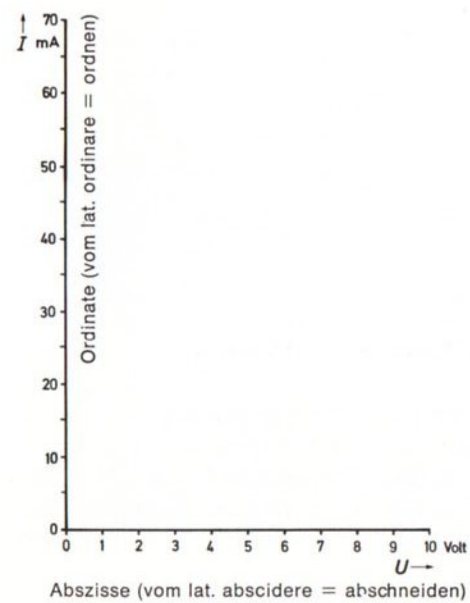
2.21

2.10 Das Strom/Spannungs-Diagramm

Man kann das Ohm'sche Gesetz nicht nur als „Formel" bzw. als „Gleichung" schreiben, man kann es auch zeichnerisch (grafisch) darstellen. Eine solche Zeichnung nennt der Fachmann „Diagramm". Das wollen wir an einem Beispiel „durchspielen".

2.10.1 Das Koordinatennetz

Im Bild 2.22 ist das „Gerüst" eines solchen Diagramms gezeichnet. Es besitzt eine waagerechte und eine senkrechte „Achse" (man nennt die waagerechte Achse „Abszisse" und die senkrechte die „Ordinate"). Weil die beiden Achsen zueinander senkrecht stehen, nennt man das Ganze ein rechtwinkliges „Achsensystem". Beide Achsen sind mit einer Maßskala versehen.

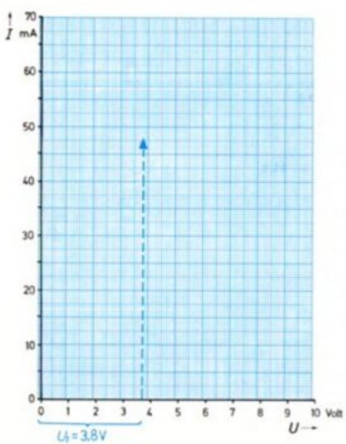


2.22

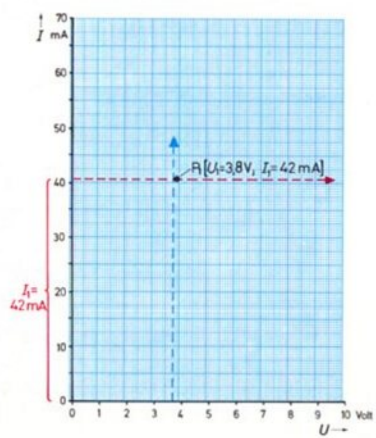
2.23

Versuch Nr.	R Sollwert in Ω	U in V	I in mA
1		$U_1 =$	$I_1 =$
2	100	$U_2 =$	$I_2 =$
3		$U_3 =$	$I_3 =$
errechnet		$U = 5$	$I_{th} = 50$

2.24



2.25



In unserem Beispiel ist die waagerechte Achse mit einer Volt-Skala und die senkrechte Achse mit einer Stromstärken-Skala ausgestattet. Bei der Spannungsskala entspricht 1 Volt einer Strecke von 5 mm. Abgekürzt schreibt man dafür: 5 mm ≙ 1 V. Für die Stromstärke wurde ein anderer Maßstab gewählt: 1 cm ≙ 10 mA.

„Zusammengehören" heißt lat. „coordinare". Die zusammengehörigen Werte nennt der Fachmann darum „Strom-" bzw. „Spannungskoordinaten". Das Achsensystem auf dem die zugehörigen Werte abgelesen werden, heißt deswegen „Koordinatensystem".

Versuch

In dieses „Koordinatensystem" wollen wir nun die Ergebnisse eintragen, die wir bei der Messung eines Schichtwiderstandes gefunden haben. Messen Sie bitte den 100-Ω-Widerstand (Farbcode . . . .) nochmals mit 3 verschiedenen Spannungen oder benutzen Sie die früher erhaltenen Ergebnisse. Wählen Sie bitte die 3 Spannungen so, daß die erste möglichst klein und die dritte möglichst groß ist. Bei Spannungen über 4 V sollten Sie jedoch darauf achten, daß nur kurzzeitig Strom fließt, weil sonst das Widerstandsbauteil unzulässig hoch erwärmt würde.

Konstruktion

Die gemessenen Werte (Tabelle 2.23) müssen Sie nun in das vorbereitete Diagramm 2.26 auf Seite 35 einsetzen.

Dabei gehen Sie am besten so vor:

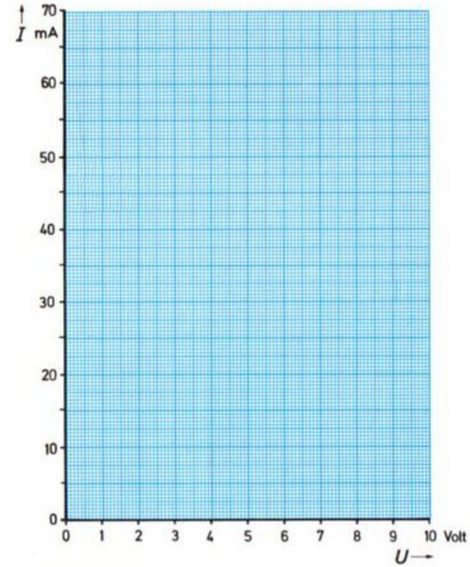
(a) Sie suchen auf der „Spannungsskala" (Abszisse) den gemessenen Wert von z. B. U_1 = 3,8 V auf und errichten in diesem Punkt eine senkrechte Linie, wie es im Bild 2.24 dargestellt ist.

(b) Als nächstes suchen Sie den gemessenen Stromwert von z. B. 42 mA auf der Stromskala (Ordinate) auf und ziehen von hier aus eine waagerechte Linie, wie im Bild 2.25, nach rechts.

(c) Wo sich beide Linien schneiden, erhalten Sie den Punkt P_1 mit den „zugehörigen" Werten von U_1 und I_1, die in den eckigen Klammern stehen.

Jetzt tragen Sie bitte nach diesem einfachen Verfahren auch Ihre Meßwerte 1 bis 3 in das Diagramm 2.26 ein und ermitteln so die Punkte P_1, P_2 und P_3.

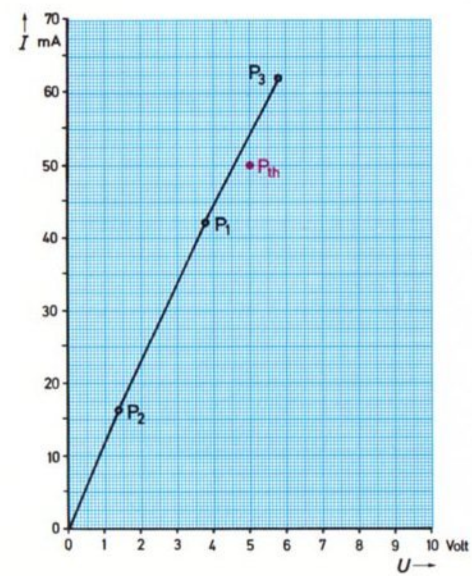
Im Bild 2.27 sehen Sie die Werte, die beim Abfassen des Buches ermittelt wurden. Ihre Werte können natürlich davon abweichen.



2.26

2.10.2 Die Widerstandsgerade

Und nun verbinden Sie bitte die 3 Punkte $P_1 - P_2 - P_3$ und verlängern den gewonnenen Linienzug bis zum Nullpunkt des Koordinatensystems. Für das Beispiel ergibt sich damit das Bild 2.27. Auch die von Ihnen gezeichnete Verbindungslinie wird so ähnlich aussehen, aber wohl ebensowenig eine ganz gerade Linie darstellen.



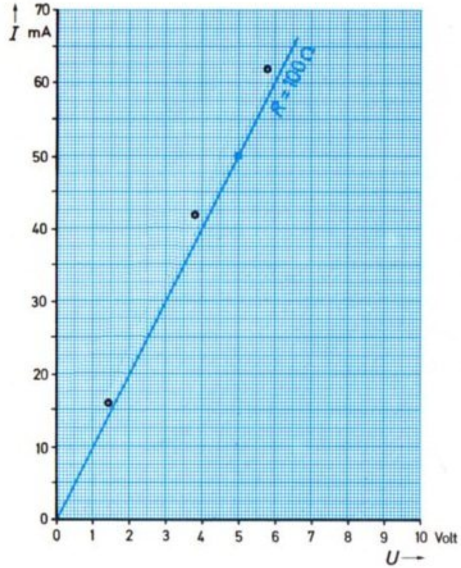
2.27

Untersuchung

Nun wollen wir untersuchen, ob diese Linie theoretisch eine Gerade sein müßte oder nicht: Rechnen wir für den Soll-Wert 100 Ω des gewählten Schichtwiderstandes einmal den Strom zu einer beliebigen angelegten Spannung aus, der durch den Widerstand fließen muß. Das Ohm'sche Gesetz hilft uns, wenn wir es in eine geeignete Form umwandeln. Gesucht ist die Stromstärke I; bekannt ist die angelegte Spannung U und der Widerstandswert R. Wir benutzen dafür die Form

$$I = \frac{U}{R}, \text{ also } \mathrm{A} = \frac{\mathrm{V}}{\Omega}$$

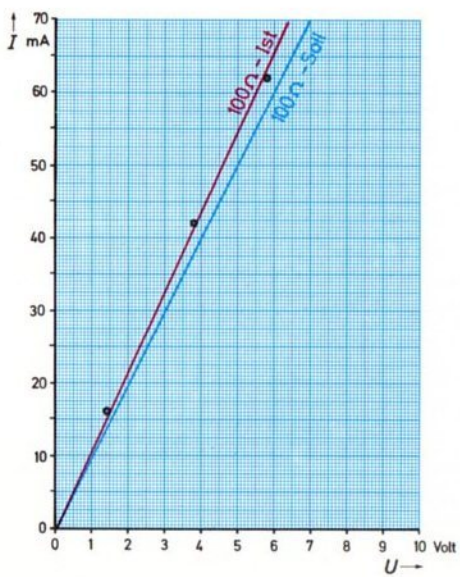
und erhalten für 5 V und 100 Ω eine Stromstärke I von $^5/_{100}$ = 0,05 A = 50 mA. Die Spannung 5 V und die Stromstärke 50 mA tragen Sie in das Diagramm 2.26 ein. Den erhaltenen Punkt wollen wir als P_{th} bezeichnen, d. h. den „theoretischen" Punkt. Er wird nicht genau auf der durch Messungen ermittelten Linie liegen, aber nicht weit davon entfernt sein.



2.28

Hätten Sie nicht 5 V, sondern 0 V in die Gleichung eingesetzt, so ergäbe sich die Stromstärke 0 mA. Das hätten Sie auch ohne Rechnung gewußt, denn wo keine Spannung angelegt wird, kann auch kein Strom fließen! D. h. aber mit anderen Worten für unsere „Widerstandsgerade": Sie muß auf alle Fälle durch den Null-Punkt ($U = 0$; $I = 0$) gehen.

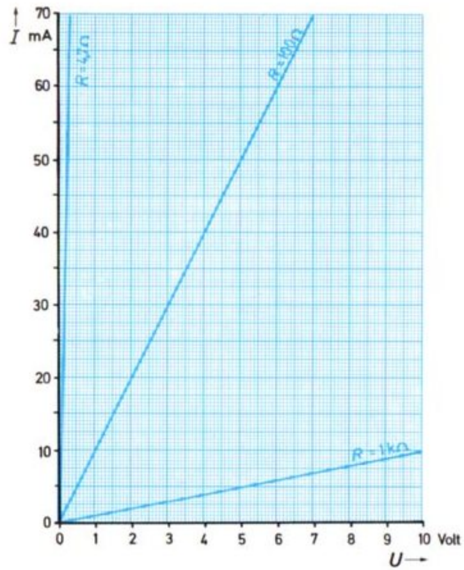
Sie können noch weitere Punkte für beliebig gewählte Spannungen errechnen und eintragen. Notwendig ist dies aber nicht, denn diese Punkte müssen alle genau auf der „Geraden" (= geraden, nicht gekrümmten Linie) liegen, die Sie zwischen dem Null-Punkt und dem vorher ermittelten Punkt P_{th} ziehen können. Bild 2.28 zeigt die Widerstandsgerade für genau 100 Ω.



2.29

2.10.3 Ausmitteln der gefundenen Werte

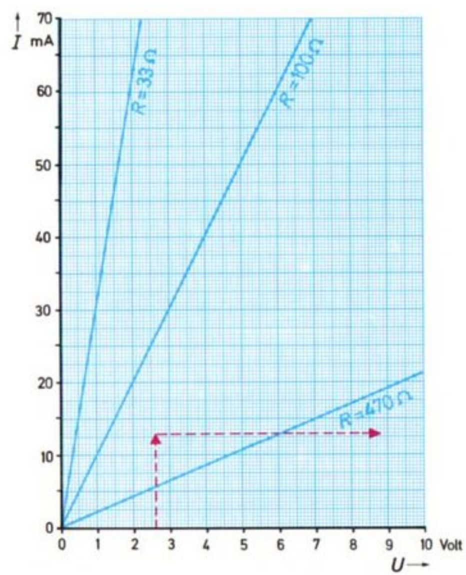
Die durch Messung ermittelten Punkte für den 100-Ω-Widerstand liegen nun leider nicht auf unserer theoretischen Widerstandsgeraden. Dies ist auf Ablesefehler, Eichfehler des Meßgerätes oder auf Toleranzen der Widerstandswerte zurückzuführen. Wir müssen also die erhaltene krumme Linie (exakt: den gebrochenen Linienzug) des Diagramms durch eine vollkommene Gerade ersetzen. Für das gewählte Beispiel zeigt dies das Bild 2.29. Auch die von Ihnen erhaltenen Meßpunkte $P_1 - P_2 - P_3$ ermöglichen das Ziehen einer echten Geraden. Sie wird auf alle Fälle durch den Null-Punkt gehen. Berücksichtigen Sie bitte diejenige der 3 Messungen für $P_1 - P_2 - P_3$ am meisten, bei der Sie auf Grund der Lage des Zeigers im Skalenfeld den Wert am genauesten ablesen konnten. Vielleicht zeichnen Sie diese (echte) Gerade in das Bild 2.26 ein.



2.30

Das erhaltene Diagramm heißt nach den Achsen: Strom/Spannungs-Diagramm. Zeichnen Sie bitte zusätzlich in dieses Diagramm die Widerstandsgerade für den Schichtwiderstand mit dem Wert von 470 Ω (Farbcode . . . .). Mitteln Sie auch hier wieder zwischen den gefundenen Meßwerten, so daß sich eine richtige gerade Linie ergibt. Diese Linie muß auch hier nicht durch den Punkt gehen, der sich mit Hilfe des Sollwerts des Widerstandes berechnen läßt. (Der Sollwert ist genau 470 Ω.)

In das Bild 2.30 sind bereits die Widerstandsgeraden für drei der dem Kasten beiliegenden Schichtwiderstände (Sollwerte) eingetragen; es sind dies die Geraden für 1 kΩ, 100 Ω und 4,7 Ω. Ergänzen Sie bitte die Widerstandsgeraden für die nicht eingezeichneten Sollwerte.



2.31

2.10.4 Anwendung des Strom/Spannungs-Diagramms

Aus einem Strom/Spannungs-Diagramm kann man für jede eingetragene Widerstandsgerade entnehmen, bei welcher Spannung wieviel Strom durch das betreffende Widerstandsbauelement fließen wird. Ist also eine bestimmte Schaltungsaufgabe zu lösen, so kann man mit einem solchen Diagramm schnell den passenden Widerstand ermitteln. Wieviel Strom fließt z. B. durch den 470-Ω-Widerstand, wenn er an eine Spannungsquelle mit 6,2 V angeschaltet wird? Bild 2.31 zeigt, wie Sie vorgehen müssen, wenn Sie den Wert aus diesem Diagramm entnehmen wollen. Sie zeichnen eine Hilfslinie (im Bild rot) von dem gegebenen Wert auf der Spannungsskala (6,2 V) senkrecht nach oben bis zur Widerstandsgeraden 470 Ω und von dort eine weitere genau waagerecht bis zur Stromskala. Lesen Sie das Ergebnis ab; im Beispiel sind es 13,2 mA.

Die Widerstandsgerade in einem Strom/Spannungs-Diagramm verläuft um so flacher, je größer der Widerstandswert bzw. je kleiner der Leitwert des betreffenden Bauelements ist.

Man nennt den Koordinatenschnittpunkt 6,2 V / 13,2 mA auch den „Arbeitspunkt", in dem bei diesem Beispiel der 470-Ω-Widerstand „arbeitet" oder „betrieben" wird.

Ebensogut können Sie aus diesem Diagramm die Spannung ermitteln, die z. B. an einem 33-Ω-Widerstand angelegt werden muß, damit durch ihn 30 mA fließen. Versuchen Sie es. Wie groß ist die Stromstärke in einem 100-Ω-Widerstand, wenn an ihn eine Spannung von 3,0 V angelegt wird?

Die Bedeutung dieses Diagramms wird Ihnen nach der Durcharbeitung des nächsten Kapitels noch viel klarer werden. Fürs erste genügt es, wenn Sie sich den nebenstehenden Sachverhalt gut einprägen.

3 Elektrische Leistung und Arbeit

Eine Energiequelle gibt Leistung ab, ein Verbraucher nimmt Leistung auf. Was das zu bedeuten hat, und wie elektrische Leistung und Arbeit miteinander zusammenhängen – das wollen wir nun in diesem Kapitel untersuchen.

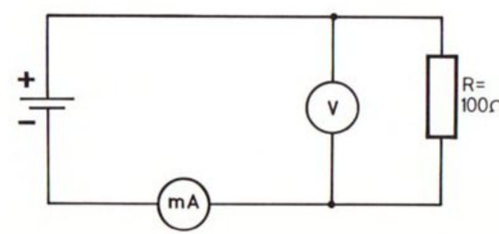
3.1 Die Wärmewirkung des elektrischen Stroms

1. Versuch

Schalten Sie bitte nach Bild 3.1 den 100-Ω-Schichtwiderstand (Farbcode . . . .) an eine 4,5-V-Batterie oder an das auf die kleinste Spannung eingestellte Netzgerät. Berühren Sie bitte den Widerstandskörper alle 2 bis 3 Sekunden kurz mit dem Zeigefinger. Nach etwa 10 Sekunden werden Sie merken, daß sich der Körper etwas erwärmt hat. Nach weiteren 20 Sekunden wird er gut handwarm sein und diesen Zustand so lange behalten, bis Sie abschalten. Der elektrische Strom, der durch den Widerstandskörper fließt, erzeugt also in diesem eine gewisse Wärme. Weil dieser Körper eine „Masse" besitzt, dauert es einige Zeit, bis sich ein konstanter (= gleichbleibender) Wärmezustand einstellt.

Nun wiederholen Sie bitte diesen Versuch mit dem 470-Ω-Widerstand (Farbcode . . . .). Jetzt kommt keine fühlbare Erwärmung mehr zustande.

Machen Sie den gleichen Versuch mit dem 10-Ω-Widerstand (Farbcode . . . .). Achtung! Er wird schon nach kurzer Zeit sehr heiß. Trennen Sie die Spannungsquelle schleunigst ab!



3.1

Es genügt nicht, wenn Sie nur den Taster des Strommessers loslassen. Wie Sie wissen, fließt ja trotzdem Strom weiter, auch wenn der Zeiger nicht ausschlägt. Sie müssen den Widerstand aus der Schaltung entfernen oder die Leitung unterbrechen; der Techniker sagt: „den Stromkreis auftrennen".

Ergebnis

Auf Grund dieses Versuchs wissen Sie nun folgendes sicher: Schaltet man ein Widerstandsbauteil an eine Spannung, so wird es um so wärmer, je kleiner sein Widerstandswert ist, d. h. je größer die Stromstärke ist, von der er durchflossen wird.

2. Versuch

Untersuchen Sie an einem dafür geeigneten Bauteil, z. B. dem 100-Ω-Schichtwiderstand (Farbcode . . . . . .), ob die Höhe der angelegten Spannung Einfluß auf die entstehende Wärme hat.

Wer kein Netzgerät besitzt, arbeitet der Reihe nach mit einer Batteriespannung von 1,5 – 3 – 4,5 V. Der Besitzer eines Netzgerätes wird nacheinander die „kleinste“, eine „mittlere“ und die „größte“ Drehknopfstellung des Netzgerätes wählen und dabei die Wärmewirkung wie beim letzten Versuch mit den Fingern beurteilen.

Achten Sie bitte darauf, daß der Widerstand zwischen 2 Versuchen immer wieder abkühlen kann.

Ergebnis

Wie erwartet, wird unser Widerstand bei Anlegen der höchsten Spannung am wärmsten!

Schlußfolgerung

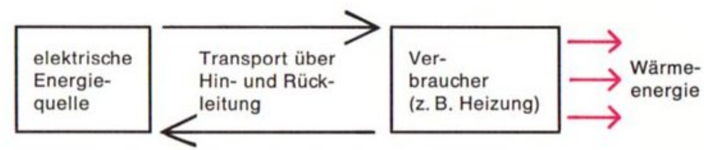
Aus dem vorigen Versuch ergab sich, daß die Erwärmung eines Widerstandsbauelements mit der Stromstärke ansteigt. Dieser Versuch hat gezeigt, daß es sich mit der Spannung und der Erwärmung genau so verhält.

Das kann auch gar nicht anders sein, da ja die Stromstärke nach dem Ohm'schen Gesetz proportional zur Spannung ansteigt, vorausgesetzt, daß der Widerstandswert des Bauelements nicht verändert wird.

Im Kap. 3.3 werden wir den genauen Zusammenhang zwischen Leistung, Spannung und Strom kennenlernen.

Die entstehende Wärme ist eine von vielen „Energieformen“. Da jedoch keine Energie aus dem Nichts entstehen kann, muß sie irgendwoher kommen. Sie wissen es schon: Sie wird aus elektrischer Energie gewonnen. Diese stellt die Batterie oder das Netzgerät zur Verfügung. Sie wird mit Hilfe des elektrischen Stroms über die Leitungen zum Widerstandskörper transportiert und dort in Wärme umgesetzt (Bild 3.2).

3.2



In der Technik, z. B. bei Haushaltsgeräten, macht man ausgiebig Gebrauch davon. Der Elektroherd, der Heizofen und das Bügeleisen sind typische Beispiele. In elektrischen Schaltungen zur Nachrichtenübermittlung, z. B. Rundfunkgeräten, Fernsehen, Telefonen usw., ist diese Wärmewirkung jedoch unerwünscht. Sie ist eine Nebenerscheinung, die man notgedrungen in Kauf nehmen muß.

Der elektrische Strom bringt die Glühwendel einer Glühlampe zum Leuchten. Er zerlegt Wasser in seine Bestandteile. Der letzte Versuch hat gezeigt, daß der Strom auch eine Wärmewirkung hat. Kurz: Der Strom kann etwas „leisten“.

3.2 „Leistung" und „Arbeit" im Sprachgebrauch

Die Wörter „leisten" und „Leistung" sind im Sprachgebrauch mehrdeutig. So sagt man z. B.: Am Sonntag habe ich viel geleistet: Ich bin auf einen 2000 m hohen Berg geklettert. Aber am Sonntag vorher war meine Leistung vielleicht noch größer: Ich bin 30 km gewandert. Ein 100-m-Lauf in 10,3 s ist zwar kein Weltrekord, aber eine sehr gute Leistung. Oder: Mein Auto leistet 80 PS.

Vorsicht! Gemeint ist in jedem Fall etwas anderes. Bei den meisten Angaben hat man sogar etwas weggelassen, was für die genaue Bestimmung unerläßlich ist.

Leistung und Arbeit gehören irgendwie zusammen. Aber wie? Ebenso wie der Begriff Leistung ist auch der Begriff „Arbeit" im Sprachgebrauch ziemlich verschwommen. Man sagt z. B.: Das – heute meist nicht mehr nötige – Tragen eines Kohleneimers aus dem Keller in die Wohnung sei eine schwere Arbeit gewesen. Dagegen sei Büroarbeit eine leichtere Arbeit. Und dies wird behauptet, auch wenn das Kohlenschleppen nur 5 Minuten und die Büroarbeit 8 Stunden dauert. Da wollen wir uns doch lieber der technischen Definition der Leistung und der Arbeit bedienen.

3.3 Die elektrische Leistung

Die elektrische Leistung, die z. B. ein Schichtwiderstand aufnimmt, ist bestimmt durch das Produkt aus der Spannung, die an diesen Widerstand angelegt wird, und dem Strom, der durch ihn fließt.

Das Formelzeichen der Leistung ist „*P*", die Abkürzung für das englische Wort: power. Es wird, wie jedes Formelzeichen, schräg (= kursiv) geschrieben.

Seine Maßeinheit ist das „Watt" (zu Ehren des englischen Physikers James Watt, 1736–1819). Abkürzung „W".

$$P = U \cdot I; \quad \mathrm{W} = \mathrm{V} \cdot \mathrm{A}$$

Ein Körper nimmt eine elektrische Leistung von 1 Watt auf, wenn er bei einer angelegten Spannung von 1 V von einem Strom mit der Stärke von 1 A durchflossen wird.

Je nachdem, ob man nach dem Ohmschen Gesetz U durch $I \cdot R$ oder I durch U/R ersetzt, ergeben sich die beiden anderen Formen der Leistungsgleichung:

$$P = I^2 \cdot R \quad \text{oder} \quad P = \frac{U^2}{R}$$

3.3

Versuch Nr.	R (Sollw.) in Ω	U in V	I		P in W
			in mA	in A	
1 2 3	470				
4 5 6	100				
7 8 9	10				

Vielleicht wiederholen Sie nun die vorhin nur zur Orientierung gemachten Versuche (Abschn. 3.1) nochmals und ermitteln die Leistung, die die einzelnen Widerstände bei den verschiedenen Spannungen aufgenommen haben. Tabelle 3.3 erleichtert Ihnen die Arbeit.

Ein Heizkörper und natürlich auch unser Schichtwiderstand nehmen elektrische Leistung auf, solange der elektrische Strom durch sie hindurchfließt. Sobald der Strom abgeschaltet wird, ist die Leistungsaufnahme beendet. Jedoch gibt der durch die Leistungsaufnahme erwärmte Körper die Wärme je nach der Größe seines Wärmespeichervermögens an die Umgebung mit mehr oder weniger großer Verzögerung wieder ab.

Wir merken uns:

1. Elektrische Leistung kann von der Energiequelle zum Energieverbraucher nur dann transportiert werden, wenn der elektrische Stromkreis geschlossen ist.
2. Die vom Stromversorgungsgerät abzugebende Leistung ist um so höher, je kleiner der Wert des angeschalteten Widerstandes ist.
3. Das Stromversorgungsgerät muß so viel elektrische Leistung abgeben können, wie das angeschlossene Gerät oder Bauelement an Leistung aufzunehmen vermag. Falls die Verbindungsleitungen ebenfalls elektrische Leistung aufnehmen (was nicht erwünscht, aber oft nicht zu vermeiden ist), muß diese zusätzlich vom Stromversorgungsgerät geliefert werden.

Fragen

1. Welche Glühlampe nimmt mehr elektrische Leistung auf, eine 100-W- oder eine 0,1-kW-Lampe? (Zugegeben, die letzte Darstellung ist etwas ungewöhnlich.)
2. Wieviel Strom fließt durch sie hindurch, wenn sie an 220 V angeschaltet ist? Und wieviel, wenn sie an 110 V angeschaltet wird?
3. Wie groß ist die Leistungsaufnahme in letzterem Fall? Rechnen Sie bitte nach, dann begreifen Sie, warum diese Lampe bei Betrieb mit 110 V nur ganz „armselig" leuchten kann.

3.4 Die elektrische Arbeit

Ein Schichtwiderstand mit 470 Ω gibt während einer bestimmten Einschaltzeit, z. B. während einer Stunde, weniger Wärme ab als ein gleichlang angeschalteter Schichtwiderstand von 100 Ω, vorausgesetzt, beide sind an die gleiche Spannungsquelle angeschaltet. Da beide gleiche Abmessungen haben, aber unterschiedlich heiß werden, wird der heißere sicher mehr Wärme abgeben. Wie sieht es aber aus, wenn der 470-Ω-Widerstand während einer ganzen Stunde, der 100-Ω-Widerstand aber nur 10 Minuten lang eingeschaltet ist? Welcher der beiden gibt mehr Wärme ab? Schätzen Sie zunächst einmal. Die exakte Antwort werden Sie gleich selbst geben können.

Die abgegebene Gesamtwärmemenge des einen und des anderen Widerstandes entspricht dem in der angegebenen Zeit aufgenommenen „elektrischen Energieverbrauch". (Das klingt etwas ungewohnt, aber physikalisch entspricht die elektrische Arbeit genau dem elektrischen Energieverbrauch. Da der Begriff „Arbeit" im täglichen Sprachgebrauch jedoch recht vieldeutig ist, verwenden Sie vielleicht statt dessen lieber den Begriff des elektrischen Energieverbrauchs.) Man errechnet ihn, indem man die aufgenommene elektrische Leistung (gemessen in Watt) mit der Zeit (in Sekunden) multipliziert, während der der Widerstand eingeschaltet ist. Die „Arbeit" ist also das Produkt der aufgenommenen elektrischen Leistung und der Einschaltzeit.

Die elektrische Arbeit (= Energieverbrauch) ist gleich dem Produkt aus der aufgenommenen Leistung und der Zeit, während der der Verbraucher angeschaltet ist.

Das F o r m e l z e i c h e n für die elektrische Arbeit ist „W" (vom engl. Wort „work"). Es wird kursiv geschrieben; ebenso das Formelzeichen für die Zeit: „t" (vom lat. „tempus" = Zeit). Es gilt also:

$$W = P \cdot t$$

Die E i n h e i t der elektrischen Arbeit ist demnach die „Wattsekunde" (W · s = Wattsekunde).

In der Wärmetechnik und bei der Erzeugung von elektrischer Energie rechnet man nicht mit Watt, sondern mit Kilowatt oder mit Megawatt. Dem Elektroniker dagegen ist 1 Watt häufig ein zu großer Wert. Er rechnet mit dem tausendsten Teil davon: mit Milliwatt; abgekürzt: mW.

Abgeleitete Einheiten für die elektrische Leistung:

1 kW = 1 000 W
1 MW = 1 000 kW = 1 000 000 W
1 mW = 0,001 W

Würde man die elektrische Arbeit, die ein Heizofen im Laufe des Winters aufnimmt (Energieverbrauch) und als Wärme wieder abgibt, in Ws angeben, kommt man auf eine überwältigend hohe Zahl. Wenn Sie gerade nichts Besseres zu tun haben, können Sie zum Spaß einmal die elektrische Arbeit in Ws ausrechnen, die ein Heizkörper für eine Spannung von 220 V bei einer Stromaufnahme von 10 A und einer täglichen Betriebszeit von 10 Stunden in 5 Monaten aufnimmt!

Für solche Zwecke benutzt man die Einheit: kWh (sprich: Ka – We – Ha) (h = Abkürzung für „Stunde" vom engl. „hour"). Dies ist auch die Einheit, mit der das Elektrizitätswerk mit Ihnen abrechnet; denn bezahlen müssen Sie nicht die elektrische Leistung, sondern die elektrische Arbeit, die Ihnen das Elektrizitätswerk geliefert hat.

Abgeleitete Einheiten für die elektrische Arbeit:

1 kWh = 1 000 Wh =
= 1 000 W · 3 600 s =
= 3 600 000 Ws
1 MWh = 1 000 kWh

3.4

R in Ω	U in V	P in W	t in s	W in Ws	W in Wh
100	4,5		600		
470	4,5		3600		

$$W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t\,;\; I = \frac{U}{R}$$

$$W = \frac{U \cdot U \cdot t}{R} = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

Leistung ist gleich Arbeit pro Zeiteinheit.

Berechnen Sie nun bitte die elektrische Arbeit, die ein 100-Ω-Widerstand in 10 min = 600 s aufnimmt und diejenige, die der 470-Ω-Widerstand in 1 Stunde = 3600 s aufnimmt (Tabelle 3.4). Gehen Sie davon aus, daß beide Widerstände an 4,5 V angeschaltet sind. Sie können entweder zunächst den Strom berechnen, der bei dieser Spannung durch die Widerstände fließt und daraus das Produkt von $U \cdot I$, also die elektrische Leistung, berechnen. Eleganter ist es aber, die Gleichung für die elektrische Arbeit nach nebenstehender Ableitung umzuwandeln und zu schreiben:

$$W = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

Sehen Sie bitte nach (oder fragen Sie), wie teuer Ihr Elektrizitätswerk sich die gelieferte elektrische Arbeit (den elektrischen Energieverbrauch) bezahlen läßt; denn außer einer Grundgebühr für die Bereitstellung eines elektrischen Anschlusses und des Kilowattstundenzählers zahlen Sie nur die gelieferte Arbeit = Energieverbrauch. (Das oft gehörte Wort „Arbeitsleistung" ist im physikalischen Sinne eine unverständliche Sache.)

Frage

Was schätzen Sie, was Sie bei einem Tarif von 10 Pf pro kWh bezahlen müssen, wenn eine 220 V/100 W-Glühlampe 10 Stunden lang angeschaltet ist:

(a) 1 Pf (b) 10 Pf (c) 1 DM?

Nochmals: Was ist Leistung?

Machen wir einen kurzen Rücksprung von der Arbeit zur Leistung. Durch Umformen der Gleichung für die Arbeit

$$W = P \cdot t \text{ in die Form } P = \frac{W}{t}$$

wird Ihnen klar, daß die Leistung nichts anderes ist als die Arbeit (= Energieverbrauch), die pro Zeiteinheit (s) vollbracht wird.

Ein Mann, der in 1 Stunde 20 Säcke vom Keller in das Erdgeschoß trägt, leistet also mehr als einer, der dazu 1 Stunde und 30 Minuten benötigt. Beide haben jedoch dieselbe Arbeit verrichtet.

Wie Sie am letzten Beispiel gesehen haben, gehört zum Leistungsvergleich unbedingt auch eine Aussage über die Zeit, in der eine Arbeit verrichtet wird – und zwar eine vergleichbare Arbeit! In unserem Beispiel handelt es sich um das Schleppen von 20 Säcken.

Zu Beginn dieses Kapitels war von jemandem die Rede, der an einem Sonntag auf einen 2000 m hohen Berg geklettert, an einem anderen Sonntag 30 km gewandert war. In beiden Fällen wurde von einer „Leistung" gesprochen. Als Zeitmaßstab ist nun „ein Sonntag" etwas zu ungenau. Man sollte schon die Anzahl der Stunden kennen. Aber es kommt noch etwas hinzu: Der Schwierigkeitsgrad muß angegeben werden, wenn beurteilt werden soll, an welchem Sonntag die größere Leistung erbracht wurde! Waren bei der Bergtour sehr harte Kletterpartien zu überwinden – dann war die zu verrichtende Arbeit unter Umständen sehr viel schwieriger, als 30 km in ebenem Gelände zu wandern. Der Leistungsbegriff ist im Alltagsleben deshalb so „unscharf", weil es kaum möglich ist, den Schwierigkeitsgrad einer „Arbeit" exakt zu ermitteln. Denken Sie an den vielen Ärger, wenn es um die „Einstufung" einer „Tätigkeit" bei der Lohnfestsetzung geht.

Wir wollen dieses Thema hier abbrechen – es ließe sich lange darüber diskutieren, ob sich auch im menschlichen Leben die „Leistung" so einfach definieren läßt wie der technische Leistungs- und Arbeitsbegriff.

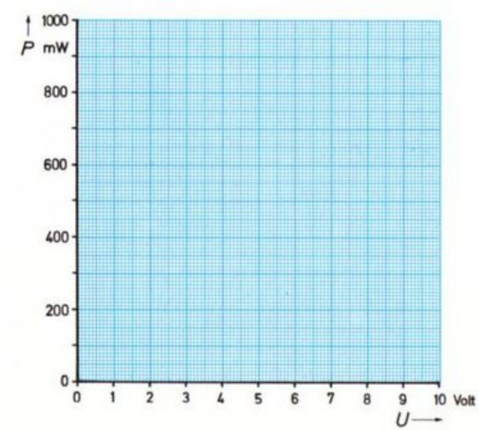
3.5 Das Leistungs/Spannungs-Diagramm eines Widerstandes

Wie groß ist die elektrische Leistung, die ein Schichtwiderstand mit einem Sollwert (= Nennwert) von 100 Ω aufnimmt? Sie errechnen für jede Spannung einen anderen Wert! Ändert man den Widerstandswert, so muß man erneut rechnen. Oft ist es einfacher, für mehrere Widerstände gemeinsam ein Leistungs/Spannungs-Diagramm zu erstellen und so den gesuchten Wert grafisch zu ermitteln. Das Diagramm ist ähnlich aufgebaut wie das Strom/Spannungs-Diagramm, das im Abschnitt 2.10 behandelt wurde.

Konstruktion

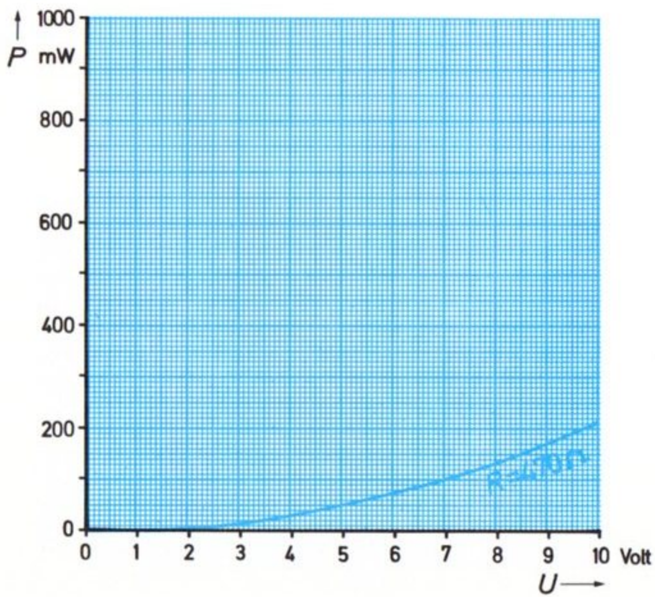
Zur Erstellung des Koordinatensystems wählen wir als Spannungsmaßstab 1 V ≙ 5 mm. Für unsere Untersuchungen wählen wir als Leistungsmaßstab 200 mW ≙ 1 cm. Bild 3.5 zeigt das Ko-

3.5



3.6

R in Ω	U in V	I in mA	P in mW
100	1	10	10
	2	20	40
	3	30	90
	4	40	160
	5	50	250
	6	60	360
	7	70	490
470	1	2,1	2
	2	4,2	8
	3	6,3	19
	4	8,5	34
	5	10,6	53
	6	12,8	77
	7	14,9	104
	8	17,0	136



3.7

ordinatensystem. Zunächst zeichnen wir die Kurve für den 100-Ω-Widerstand. Die errechneten Werte sind bereits in die Tabelle 3.6 eingetragen; Sie brauchen nur noch die Übertragung in das Diagramm vorzunehmen, also die Leistungskurve für den 100-Ω-Widerstand zu konstruieren. Tragen Sie die Spannungen mit den zugehörigen errechneten Werten in das Bild 3.7 ein. Es entspricht genau dem Koordinatengerüst von 3.5, jedoch ist die Kurve für den 470-Ω-Widerstand schon eingezeichnet. Auch Ihre Kurve für den 100-Ω-Widerstand wird nicht geradlinig verlaufen, sondern stark gekrümmt sein. Die Ursache: Die Leistung P nimmt mit dem Quadrat der Spannung zu. Sie kennen die diesem Zusammenhang zugrunde liegende Formel bereits – sie wurde auf Seite 41 abgeleitet:

$$P = U^2 \cdot \frac{1}{R} \text{ [W]}$$

Berechnen Sie bitte noch die Werte für $R = 33\ \Omega$ und konstruieren Sie die Kurve auch für diesen Widerstand im Bild 3.7.

Die Leistung nimmt mit dem Quadrat der Spannung zu.

Anwendung

Aus dem Diagramm läßt sich nun ohne weitere Rechnung entnehmen, welche elektrische Leistung der 100-Ω- und der 470-Ω-Widerstand aufnehmen, wenn man sie an eine beliebige Spannung zwischen 0 und 10 V legt. Umgekehrt können Sie aus dem Diagramm auch entnehmen, welche Spannung Sie an einen vorhandenen Widerstand anlegen müssen, damit er eine bestimmte Leistung aufnimmt.

Wie hoch muß z. B. die Spannung gewählt werden, damit der 100-Ω-Widerstand genau 250 mW als Wärme abgibt? Mit welcher Spannung muß ein Bauelement mit einem Widerstandswert von 33 Ω betrieben werden, wenn es die gleiche Energieleistung von 250 mW aufnehmen und als Wärme wieder abgeben soll? Und bei welchen Bedingungen ist der 470-Ω-Widerstand für diese Aufgabe geeignet? Tragen Sie Ihre Ergebnisse in die Tabelle 3.8 ein.

3.8

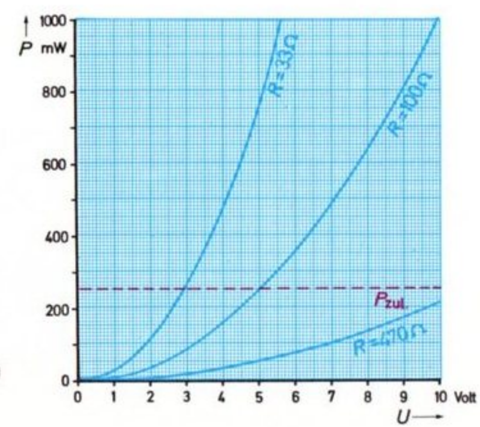
R in Ω	P in mW	U in V
33	250	
100	250	
470	250	

3.6 Die maximale Belastbarkeit

3.6.1 Berechnung der zulässigen Spannung

Sie wissen: Je größer die elektrische Leistung ist, die ein Bauelement gerade aufnimmt, um so mehr Wärme entsteht. Ist der „Körper" groß genug, so daß die entstehende Wärme gut abgeleitet werden kann, dann braucht man sich darum nicht weiter zu kümmern. Ist der Körper aber so klein, daß er über die zulässige Grenze erwärmt wird, so wird er zerstört. Deshalb gibt es für jeden Körper einen Grenzwert, bis zu dem er erwärmt werden darf. Für die folgende Betrachtung wollen wir zunächst von einer kurzzeitigen Erwärmung absehen und den Dauerzustand betrachten. Da die Wärme durch Umwandlung elektrischer Energie entsteht, ist die elektrische Leistung, die das Bauelement dauernd aufnehmen darf, begrenzt. Diese Leistungsgrenze nennt man „maximale Belastbarkeit".

Die Schichtwiderstände des hobby-Labors dürfen – mit Ausnahme der 4,7-Ω-, 10-Ω- und 33-Ω-Widerstände, die für eine maximale Belastbarkeit von 1 W ausgelegt sind – mit höchstens 0,25 W = 250 mW „belastet" werden. In dem Leistungs/Spannungs-Diagramm nach Bild 3.7 können Sie die zulässige maximale Leistung von 250 mW als waagerechten roten Strich eintragen. Sie müssen dann ein Bild wie 3.9 erhalten. Der Bereich oberhalb die-



3.9

ses roten Striches ist für Widerstände dieser Belastungsklasse sozusagen ein „verbotener Bereich“. Das bedeutet aber auch, daß die Spannung, die an den Widerstand angelegt wird, eine bestimmte Höhe nicht übersteigen darf. Sie dürfen also an die Widerstände nur Spannungen anlegen, bei denen der Betrieb im erlaubten Leistungsbereich bleibt.

Diese dem Widerstand maximal zumutbare Belastung erhält das Formelzeichen: P_{zul} (in Worten: P zulässig).

Damit Sie eine Vorstellung davon bekommen, welche Temperatur ein Widerstandsbauelement annimmt, wenn es eine Leistung von 0,25 W aufnimmt, machen wir einen speziellen Versuch.

Versuch

Aus dem Leistungs/Spannungs-Diagramm entnehmen wir, daß die Spannung für den 100-Ω-Widerstand 5 V sein muß, wenn die Leistungsaufnahme des Widerstandes 0,25 W beträgt.

Sollten Sie nicht das Diagramm zu Hilfe nehmen, sondern den Wert selbst ausrechnen wollen, so müßten Sie die Leistungsformel noch etwas umwandeln:

$$P = U^2 : R \qquad U^2 = P \cdot R$$

$$U = \sqrt{P \cdot R}$$

für unser Beispiel ergibt sich daraus:

$$U_{zul} = \sqrt{0{,}25\ \mathrm{W} \cdot 100\ \Omega} = \sqrt{25} = 5\ \mathrm{V}$$

Stellen Sie nun bitte unter Kontrolle des Spannungsmessers die Spannung von 5 V am Netzgerät genau ein, und fühlen Sie mit dem Finger die Temperatur am Widerstandskörper ab. Sie haben damit für die Zukunft ein Fingerspitzengefühl bekommen, wie heiß der Widerstandskörper höchstens werden darf.

An dieser Stelle muß vermerkt werden, daß die maximale Belastbarkeit, in diesem Fall 0,25 W, stets nur dann als Grenzwert gilt, wenn das entsprechende Bauelement frei steht.

Sollte das Bauelement so eingebaut sei, daß die Wärme nicht abströmen kann, so ist die Belastbarkeit entsprechend geringer. Kurzzeitig kann ein Schichtwiderstand jedoch auch ein wenig überbelastet werden.

3.6.2 Die Leistungshyperbel im Strom/Spannungs-Diagramm

Wer viel mit der Berechnung von Schaltungen zu tun hat, will nicht ständig immer mit den gleichen Formeln rechnen. Er zieht das Arbeiten mit Diagrammen vor. Für die Berechnung von Widerständen könnte er z. B. mit dem Strom/Spannungs-Diagramm nach Bild 2.30 und mit dem Leistungs/Spannungs-Diagramm nach Bild 3.9 arbeiten. Einfacher wird das Arbeiten jedoch, wenn man diese beiden Diagramme zu einem einzigen vereint. Man erweitert also das Strom/Spannungs-Diagramm. Dann kann man daraus nicht nur entnehmen, wie groß die Stromstärke ist, die durch einen gegebenen Widerstand bei Anlegen einer bestimmten Spannung fließt, sondern auch, welche elektrische Leistung dieser Widerstand unter diesen Arbeitsbedingungen (Spannung und Strom) aufnimmt. Man kann aus dem Diagramm deren Größe abschätzen oder (durch ein einfaches Verfahren) genau ermitteln. Die genaue Ermittlung interessiert allerdings nur in den seltensten Fällen; es genügt zu wissen, ob die Leistungsaufnahme beim gewählten Arbeitspunkt unterhalb der maximal zulässigen Belastung bleibt oder nicht. Ist dies der Fall, dann ist die Schaltung o. k.

Konstruktion

Wie konstruiert man nun eine solche „Parameterkurve für die Leistung“? (Der Begriff „Parameter“ bedeutet soviel wie „Für den Fall, daß ...“. In unserem Beispiel: „Für den Fall, daß P = 250 mW ist, ergeben sich für Strom und Spannung aus dem Diagramm ...“.)

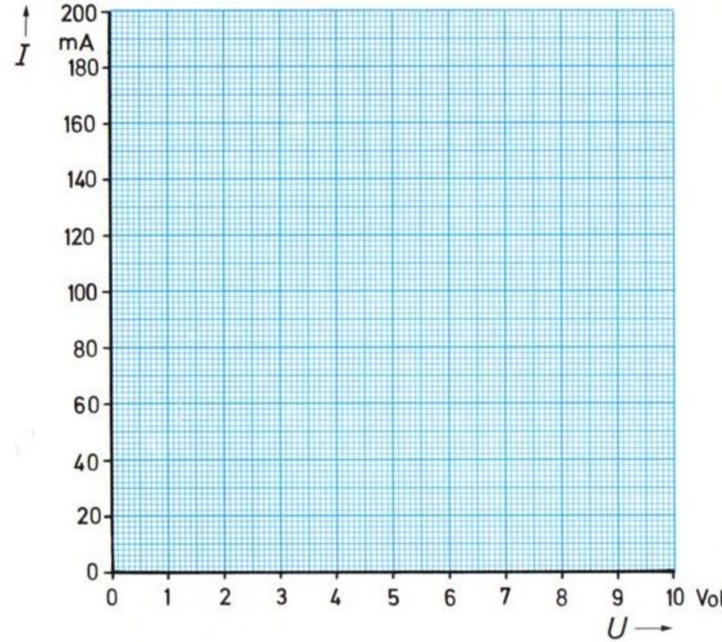
Zunächst schreibt man das Leistungsgesetz in einer anderen Form an: $I = P : U$

Der Mathematiker sagt dazu: Die Leistungsgleichung wird nach I aufgelöst. Nun rechnen wir für eine bestimmte Leistung P als Parameter, sagen wir für 0,25 W, zu einigen beliebigen Spannungswerten U die Stromstärke I aus. Weil Sie „beliebige“ Werte für U nehmen dürfen, wählen Sie natürlich Werte, mit denen einfach zu rechnen ist.

Als ersten Wert wählen wir vielleicht 0,25 Volt. Dann ist nach der genannten Formel die dazugehörige Stromstärke 1 A. Die Wahl dieses Wertes ist aber nicht sehr glücklich, denn die Stromstärke von 1 A kommt in unserem Strom/Spannungs-Diagramm nicht vor – sie ist zu hoch. Deshalb wählen wir andere Span-

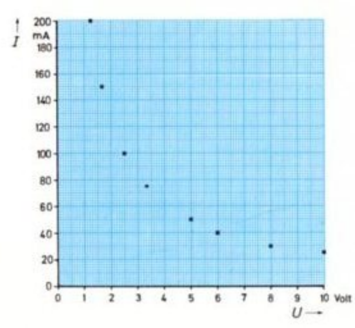
3.10

P in W	U in V	I in A	I in mA
0,25	1,00	0,25	250
	1,25	0,20	200
	1,67	0,15	150
	2,50	0,10	100
	3,33	0,075	75
	5,00	0,05	50
	6,00	0,04	40
	8,00	0,03	30
	10,00	0,025	25
0,50	2,50	0,20	200
	3,33	0,15	150
	5,00	0,10	100
	6,00	0,08	80
	8,00	0,06	60
	10,00	0,05	50
1,00			

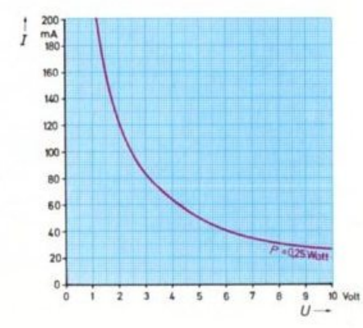


3.11

3.12



3.13



nungswerte. Für 2 V ergibt sich z. B. eine Stromstärke von 0,125 A. Weitere Werte sind in der Tabelle 3.10 eingetragen.

Diese Werte übertragen Sie nun als Koordinatenwerte in das Strom/Spannungs-Koordinatennetz nach Bild 3.11. Bezeichnen Sie die erhaltenen Schnittpunkte für die Spannungs- und Stromwerte mit P_1 bis P_9. Vergleichen Sie bitte Ihr Ergebnis mit dem Bild 3.12. Es muß übereinstimmen.

Da diese Koordinatenpunkte alle das Produkt $U \cdot I = 0{,}25$ W darstellen, dürfen wir sie miteinander verbinden. Natürlich werden Sie die Punkte nicht durch gerade Striche miteinander verbinden. (Es besteht ja kein Grund zu der Annahme, daß die zu erwartende Kurve gerade an den von Ihnen frei gewählten

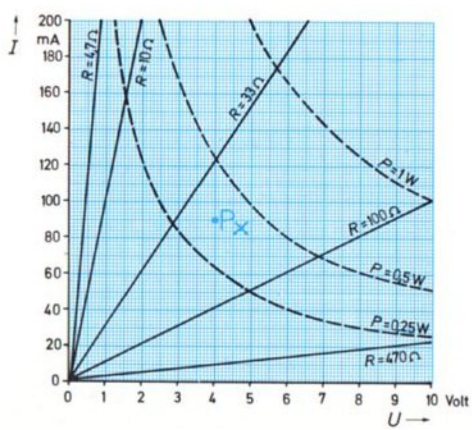
Punkten jeweils einen Knick machen muß.) Sie werden also eine Kurve ziehen, in die die gezeichneten Punkte genau passen. Die gewonnene Kurve nennt man die 0,25-W-**Leistungshyperbel**. In Bild 3.13 ist sie als rote Linie dargestellt. Auf den Nachweis, daß diese Kurve mathematisch eine „Hyperbel" darstellt, sei hier verzichtet.

Alle Strom- und Spannungswerte, deren Produkt 0,25 W ergibt, müssen auf der erhaltenen Kurve liegen, falls Sie in dieses Diagramm eingetragen werden. Alle Strom- und Spannungswerte, deren Produkt größer als 0,25 W ist, müssen in diesem Diagramm rechts, alle Strom- und Spannungswerte, deren Produkt kleiner als 0,25 W ist, müssen links von dieser Kurve liegen.

Prüfen Sie, ob ein 50-Ω-Widerstand, der an 5 V angelegt wird, also an eine Energiequelle mit 5 V Spannung angeschaltet wird, weniger als 250 mW aufnimmt. Berechnen Sie zuerst, welche Stromstärke durch den 50-Ω-Widerstand in diesem Fall fließt. Ist die Leistungsaufnahme kleiner als 0,25 W, so darf ein 0,25-W-Widerstand benutzt werden. Ist dies nicht der Fall, dann muß die nächst höher belastbare Type (0,5-W-Widerstand) benutzt werden.

Vielleicht prüfen Sie auch, ob für einen 2-kΩ-Widerstand, der an 6 V gelegt wird und durch den . . . mA fließen, eine 0,25-W-Type genommen werden darf.

Zeichnen Sie nun bitte selbst in das Diagramm 3.11 zusätzlich zur 0,25-W-Kurve noch die 0,5-W- und die 1-W-Leistungshyperbel ein. Sie finden in der Tabelle 3.10 zur Erleichterung Ihrer Arbeit für eine Leistungsaufnahme von 0,5 W einige Strom- und Spannungswerte. Die Konstruktion der 1-W-Kurve dürfte Ihnen nicht schwerfallen. In die entsprechende Spalte der genannten Tabelle müssen Sie allerdings selbst passende Werte für die Spannung (oder für den Strom) eintragen.



3.14

Anwendung

Nun können Sie auch für einen Widerstand, dessen Strom- und Spannungskoordinaten bekannt sind, z. B. für den in Bild 3.14 blau eingetragenen Koordinatenpunkt P_x mit den Koodinaten 4 V und 90 mA, dessen wirkliche Leistungsaufnahme aus der Lage zu den von Ihnen gezeichneten Leistungshyperbeln abschätzen.

Beispiel: Der blau eingezeichnete Punkt liegt ziemlich genau zwischen der 0,25-W- und der 0,5-W-Leistungshyperbel. Seine Leistungsaufnahme wird deshalb etwa 0,37 W betragen. Was ergibt die Rechnung?

Welche elektrische Leistung nimmt ein Widerstand auf, durch den bei einer angelegten Spannung von 7 V ein Strom von 14 mA fließt? Schätzen Sie bitte selbst ab und prüfen Sie durch Rechnung.

Nun tragen Sie in das Strom/Spannungs-Diagramm 3.11 mit den Leistungsparametern für 1/4, 1/2 und 1 Watt noch die Widerstandsgeraden für 4,7 Ω – 10 Ω – 33 Ω – 470 Ω – 100 Ω ein. Wie man die Widerstandsgeraden konstruiert, haben Sie ja im Abschnitt 2.10 kennengelernt. Vergleichen Sie bitte Ihr Ergebnis mit dem Bild 3.14. Es müßte übereinstimmen. Aus dem nun vervollständigten Strom/Spannungs-Diagramm können Sie mit etwas Übung sehr schnell ermitteln, ob ein Widerstand mit einer maximal zulässigen Belastung von 0,25 W mit der von Ihnen gewählten Spannung betrieben werden darf. Ist dies nicht der Fall, müssen Sie einen Widerstand mit einer höheren Belastbarkeit einsetzen oder sich für eine kleinere Spannung entscheiden.

Frage

Bei welcher Spannung können Sie den 4,7-Ω-, den 10-Ω- oder den 33-Ω-Widerstand betreiben, ohne daß die maximale Belastbarkeit von 1 W überschritten wird?

Das Strom/Spannungs-Diagramm mit verschiedenen Widerstandsgeraden und Leistungshyperbeln wurde deswegen so eingehend behandelt, weil Sie solchen und ähnlichen Diagrammen in der Elektronik immer wieder begegnen werden. Bei Halbleiterbauelementen, z. B. Dioden und Transistoren, sind die Parameter jedoch meist nicht einfache Geraden oder Hyperbeln. Wegen der Kompliziertheit der Zusammenhänge sind diese Kurven mathematisch nicht leicht oder gar nicht zu berechnen. Deshalb greift man dort zur grafischen Darstellung. Das Strom/Spannungs-Diagramm mit den Widerstandsgeraden und den Leistungshyperbeln ist ein guter „Einstieg" in diese Technik.

4 Die Reihenschaltung von Widerständen

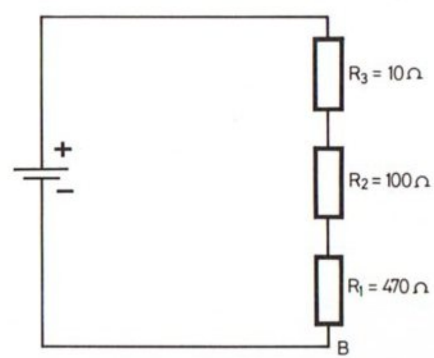
Nun haben Sie die Verknüpfung zwischen den 3 wichtigsten elektrischen Größen in der Form des Ohm'schen Gesetzes und der Leistungsgleichungen an sehr einfachen Schaltungen kennen und verstehen gelernt. In einer größeren Schaltung wirken aber viele Bauelemente zusammen. Ihr Zusammenspiel hat der Physiker Robert Kirchhoff (1824–1887) in mathematischer Form dargestellt. Wir begnügen uns mit einfachen Versuchen und wollen jetzt das wichtigste dieser Gesetze für die Reihenschaltung kennenlernen.

4.1 Allgemeines

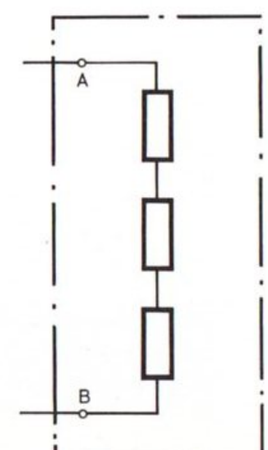
Wie Sie wissen, werden hintereinander geschaltete Widerstände als „Reihenschaltung“ bezeichnet. Mit ihr wollen wir uns zuerst befassen. Es gibt eine Menge darüber zu sagen – die Reihenschaltung wird in der Praxis und vor allem in elektronischen Schaltungen immer und immer wieder angewendet. Machen wir's also wie jeder vernünftige Mensch, der einen großen Kuchen verzehren will: Er teilt ihn ein in kleinere bekömmliche Stücke.

Betrachten Sie bitte das Bild 4.1. Der dargestellte Stromkreis enthält nun ein „aktives“ Bauelement sowie drei „passive“ Bauelemente. Das aktive Bauelement ist die Batterie (oder das Netzgerät), die passiven Bauelemente sind die Schichtwiderstände.

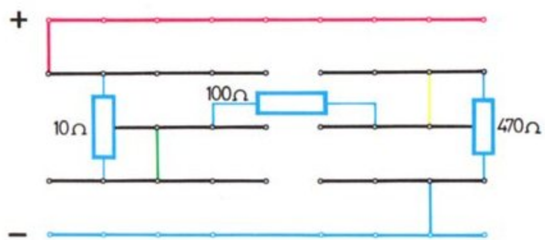
Wir müssen uns überlegen, wie wir die Schaltung betrachten wollen. Wenn z. B. die Energiequelle „sehen“ könnte, dann würde sie nur ein Kästchen (black box = „schwarzer Kasten“ nennen es die Amerikaner) mit zwei Anschlüssen „erblicken“ (Bild 4.2). Der



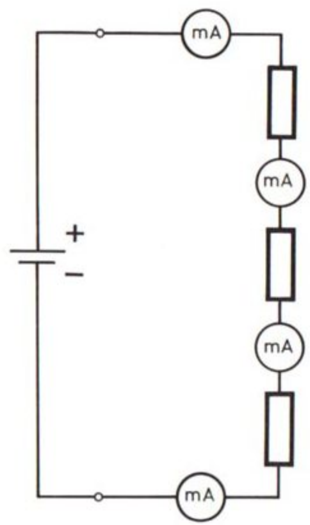
4.1



4.2



4.3



4.4

In einer Reihenschaltung ist die Stärke des sie durchfließenden Stroms an allen Punkten gleich groß.

Elektrotechniker und der Elektroniker sagt dazu „Zweipol". Bei dieser Betrachtung von der Energiequelle her interessiert nur, wieviel Strom an dem einen Anschluß des Zweipols in die Schaltung hinein- und am anderen Anschluß wieder herausfließt (es kann ja kein Strom verloren gehen).

Von dieser Warte aus betrachtet, bietet unsere Reihenschaltung nichts Neues. Wir können mit den schon bekannten Methoden Strom und Spannung messen und daraus Widerstand und Leistungsaufnahme der „black box" berechnen.

Jetzt wollen wir uns aber das Innere der „black box" einmal näher ansehen, von der wir ja wissen, daß sie eine Reihenschaltung von Widerständen enthält.

4.2 Der Strom in einer Reihenschaltung

Versuch

Bauen Sie nun bitte die Schaltung 4.1 auf. Bild 4.3 zeigt eine der vielen Möglichkeiten, wie man die Schaltung verwirklichen kann.

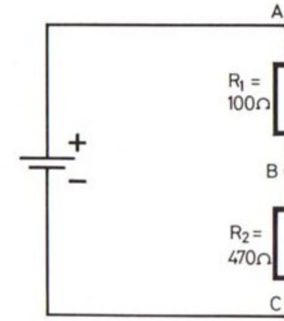
Überlegen Sie nun bitte, ob die Stärke des Stroms, der der Reihe nach durch die Widerstände $R_1 - R_2 - R_3$ fließt, an allen Punkten der Schaltung gleich groß ist. Wer nicht felsenfest davon überzeugt ist, sollte mit dem Strommesser an den in Bild 4.4 gezeigten Stellen nachmessen. Damit Sie leicht messen können, sind im Steckplan 4.3 schon 4 „Brücken" eingesetzt, an deren Stelle Sie den Strommesser in die Leitung schalten können.

Ergebnis

Der Strom fließt durch alle Widerstände mit derselben Stärke.

4.3 Teilspannungen und Gesamtspannung

Damit wir die weitere Untersuchung eines solchen „Zweipols“ nicht unnötig erschweren, ändern wir die Schaltung durch Herausnahme des kleinsten Widerstandes. Damit ergibt sich die Schaltung nach Bild 4.5. Denn was für drei Widerstände gilt, muß im Prinzip auch für zwei Widerstände gelten. Diesen Grundsatz zur Vereinfachung sollten Sie bei der Untersuchung unbekannter Zusammenhänge stets berücksichtigen.



4.5

Versuch

Schalten Sie diesen Zweipol an die Energiequelle und messen Sie die Spannung an seinem „Eingang“. Diese Spannung ist natürlich nichts anderes als die Batteriespannung (oder Netzgerätespannung). Wir nennen sie: U. Tragen Sie Ihren Meßwert in die Tabelle 4.6 ein.

Bei einer Reihenschaltung können Sie aber auch noch andere Spannungen messen! Sie werden z. B. einen Ausschlag des Meßgerätes erhalten, wenn Sie das Voltmeter an den Punkt A und an den Punkt B, also an die Enden des 100-Ω-Widerstandes anschalten. Tragen Sie den Wert in die Tabelle ein. Vermerken Sie bitte auch, wo der (-)Anschluß des Spannungsmessers angeschaltet werden mußte, damit der Zeiger nach rechts ausschlug. Anschließend bestimmen Sie die Spannung zwischen den Punkten B und C. Auch hier interessiert wieder, wo der (–)Anschluß des Spannungsmessers angeschlossen werden mußte.

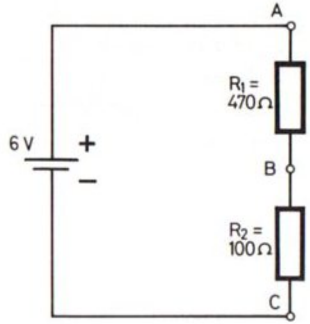
Die beiden zuletzt gemessenen Spannungen nennt man „**Teilspannungen**“. In der Technikersprache sagt man auch, daß zwischen zwei Punkten der Schaltung eine Spannung „herrscht“ oder „steht“ oder „ansteht“ oder „abfällt“ oder „auftritt“.

Wiederholen Sie nun die Messungen mit einer anderen Batteriespannung, z. B. mit 3 oder mit 6 V. Tragen Sie die gefundenen Werte als Versuch 2 in die Tabelle 4.6 ein. Dann wechseln Sie die

4.6

Versuch Nr.	Spannungen			(–)Anschluß d. Voltmeters an Punkt	Summe der Teilspannungen $U_1 + U_2$ in V
	gesamt an A–C $= U$ in V	Teilspannungen			
		an A-B $= U_1$ in V	an B-C $= U_2$ in V		
1					
2					

$R_1 = 100\ \Omega$; $R_2 = 470\ \Omega$

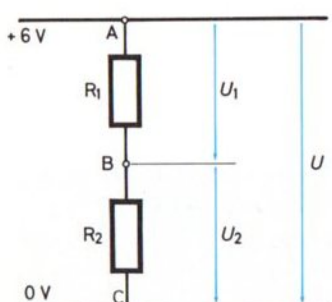


4.7

4.8

Versuch Nr.	Spannungen gesamt an A–C $= U$ in V	Teilspannungen an A-B $= U_1$ in V	an B-C $= U_2$ in V	(–)Anschluß d. Voltmeters an Punkt	Summe der Teilspannungen $U_1 + U_2$ in V
1					
2					

$R_1 = 470\ \Omega$; $R_2 = 100\ \Omega$



4.9

beiden Widerstände gegeneinander aus. Der obere Widerstand kommt also nach unten und der untere nach oben (siehe Bild 4.7). Die Meßergebnisse tragen Sie in die Tabelle 4.8 ein.

Ergebnis

Beim Vergleich der Meßwerte werden Sie feststellen, daß die größere der beiden gemessenen Teilspannungen jeweils zum größeren Widerstand (im Sinne von größerem Widerstandswert) gehört. Wir kommen auf diesen Sachverhalt noch näher im Abschnitt 4.5 zurück.

Nun wollen wir die Schaltung ohne die Energiequelle zeichnen, etwa nach Bild 4.9. Die Spannung, die Sie an den Enden des Widerstandes R_1, kurz gesagt: „an R_1", gemessen haben, bezeichnen wir mit U_1. Zur Messung mußte der (–)Anschluß des Voltmeters an Punkt B geschaltet werden. Die Spannung, die Sie am Widerstand R_2 gemessen haben, wollen wie U_2 nennen. Zur Messung mußten Sie den (–)Anschluß des Voltmeters an Punkt C legen. Alle diese Informationen stecken schon im Bild 4.9 drin; denn die drei genannten Spannungen sind dort als „Spannungspfeile" eingezeichnet. Die Pfeilspitze zeigt stets zu dem Punkt hin, an den Sie den (–)Anschluß des Spannungsmessers legen müssen.

In Bild 4.9 ist die (+)Leitung und die (–)Leitung anders, als bisher gewohnt, gekennzeichnet. An der „Leitung", an die der (–)Pol der Batterie anzuschließen ist, stehen „0 V". Die andere, die an den (+)Pol angeschlossen werden soll, ist mit „+ 6 V" gekennzeichnet. (Wer mit 4,5-V-Batterien arbeitet, müßte diesen Wert an die obere Leitung schreiben; wer mit Netzgerät arbeitet, jedoch einen anderen Wert bis maximal 9 V. Wir einigen uns auf einen mittleren Wert von 6 V). Diese für Sie vielleicht neue Darstellung sagt aber nichts anderes als Bild 4.7 aus!

Es ist leicht einzusehen, daß die Teilspannungen zusammen nicht kleiner, aber auch nicht größer sein können als die angelegte Gesamtspannung. Denn ebensowenig, wie Ströme unterwegs verschwinden können, kann auch Spannung nicht plötzlich abhanden oder hinzu kommen.

Sie können sich davon überzeugen, wenn Sie die Summe der beiden Teilspannungen U_1 und U_2 bilden. Das Ergebnis tragen Sie in die rechte freie Spalte der Tabellen 4.6 und 4.8 ein.

Sie sehen: Die Summe der Teilspannungen ist gleich der „Gesamtspannung“, wie wir bei dieser Betrachtungsweise die Spannung zwischen den Anschlüssen A und C benennen wollen. (Vorher hatten wir sie als „angelegte“ Spannung bezeichnet.) Falls die Summe von U_1 und U_2 nicht genau der Gesamtspannung U entspricht, so ist dies auf Ungenauigkeiten des Voltmeters und auch auf Fehler bei der Ablesung des Zeigerausschlags zurückzuführen.

Als Formel schreibt man das Ergebnis unserer Versuche:

$$U = U_1 + U_2$$

Bei einer Reihenschaltung ist die Summe der Teilspannungen gleich der angelegten Gesamtspannung.

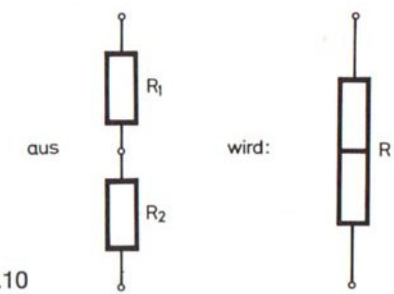
4.4 Der Gesamtwiderstand

Wie groß ist der Gesamtwiderstand der beiden in Reihe geschalteten Teilwiderstände 470 Ω und 100 Ω? Was meinen Sie?

Die Sache ist ganz einfach, wenn Sie sich das Ende des einen Widerstandes direkt mit dem Anfang des anderen Widerstandes zusammengebaut denken, wie es im Bild 4.10 dargestellt ist.

Der Gesamtwiderstand R ist die Summe der Teilwiderstände R_1 und R_2. Als Formel geschrieben:

$$R = R_1 + R_2$$



4.10

Der Gesamtwiderstand einer Reihenschaltung ist gleich der Summe der Teilwiderstände.

Versuch

Es fällt Ihnen sicher nicht schwer, diese Behauptung experimentell nachzuprüfen. Schalten Sie zwei Widerstandsbauelemente, deren Widerstandswerte Sie annähernd kennen, in Reihe. Messen Sie die

Es gilt:

$U = U_1 + U_2$

und

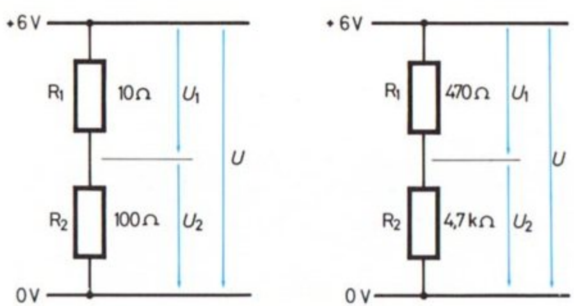
$I = I_1 = I_2$

Setzt man nach dem Ohm'schen Gesetz für $U = I \cdot R$ und $U_1 = I \cdot R_1$ sowie $U_2 = I \cdot R_2$, dann kann man nach der 1. Gleichung auch schreiben:

$I \cdot R = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 = I (R_1 + R_2)$

Beide Seiten der Gleichung können durch I dividiert werden. Dann ist

$R = R_1 + R_2$



4.11

angelegte Gesamtspannung und die durch die ganze Schaltung fließende Stromstärke I. Rechnen Sie nach dem Ohm'schen Gesetz den Gesamtwiderstand aus. Prüfen Sie auch bitte die vier möglichen Kombinationen, die mit je zwei Widerständen von 100 Ω und 470 Ω möglich sind. Entwerfen Sie dazu eine Tabelle, in die Sie Ihre Meßergebnisse und die errechneten Werte eintragen können.

Nebenstehend ist die Formel des Gesamtwiderstandswertes einer Reihenschaltung für mathematisch Interessierte noch einmal abgeleitet.

4.5 Verhältnis von Teilspannungen und Teilwiderständen

Um zu verstehen, worauf es ankommt, machen wir am besten einige Versuche.

Versuch

Bild 4.11 zeigt zwei Reihenschaltungen, an denen Sie Messungen durchführen sollten – und zwar nur die Spannungen U, U_1 und U_2. Die Meßwerte tragen Sie in die Tabelle 4.12 ein.

Nun bilden Sie für jeden Versuch das Verhältnis der Teilspannungen $U_1 : U_2$ und das Verhältnis der Widerstände $R_1 : R_2$. Die Ergebnisse tragen Sie in die Tabelle ein.

Genauso berechnen Sie das Verhältnis der Teilspannung U_1 zur Gesamtspannung U bzw. des Teilwiderstandes R_1 zum Gesamtwiderstand R. Und als letztes bestimmen Sie das Spannungs- und das Widerstandsverhältnis für die zweite Teilspannung und die Gesamtspannung.

Ergebnis

Ihre Messungen werden in erster Näherung bestätigen:

1. Das Verhältnis zwischen zwei Teilspannungen ist gleich dem Verhältnis der dazugehörigen Widerstände.
2. Es spielt dabei keine Rolle, wie groß die Widerstände für sich sind. Nur auf ihr Verhältnis zueinander kommt es an! (Bei beiden Versuchen ist das Verhältnis 1:10.)
3. Teilspannung und Gesamtspannung verhalten sich genau wie Teilwiderstand und Gesamtwiderstand. (In unseren Beispielen jeweils wie 1:11.)

Als Formel ausgedrückt erhalten wir:

$$U : U_1 : U_2 = R : R_1 : R_2$$

4.12

Versuch		1	2
R_1 in Ω		10	470
R_2 in Ω		100	4700
R in Ω	errechnet		
U_1 in V			
U_2 in V			
U in V	gemessen		
	errechnet		
$U_1 : U_2$			
$R_1 : R_2$			
$U_1 : U$			
$R_1 : R$			
$U_2 : U$			
$R_2 : U$			

4.6 Drei und mehr Widerstände in Reihe

Grundsätzlich nichts Neues ist zu erwarten, wenn wir nicht zwei, sondern drei oder noch mehr Widerstände in Reihe schalten. Den Gesamtwiderstand R einer Reihenschaltung mit beliebig vielen Widerständen mit den Werten R_1, R_2, R_3 usw. entspricht der Summe der Einzelwerte. Die Formel für den Gesamtwiderstand R beliebig vieler in Reihe geschalteter Widerstände lautet:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \ldots$$

Hat man nur drei Widerstände in Reihe geschaltet, so endet die Formel eben mit dem Glied R_3.

In einer Reihenschaltung verhalten sich die Teilspannungen wie die Werte der Teilwiderstände – und die Teilspannungen zur Gesamtspannung wie die Werte der Einzelwiderstände zum Wert des Gesamtwiderstandes.

Die Gesamtspannung setzt sich aus so vielen Teilen zusammen, wie Widerstände in Reihe geschaltet sind. Die Formel für beliebig viele Teilspannungen schreibt man so:

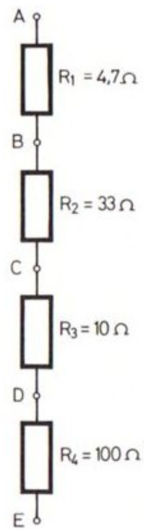
$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + \ldots$$

Hat man nur drei Widerstände, so endet die Formel eben mit U_3.

Den Strom, der durch die Widerstände fließt, kann man nach dem Ohm'schen Gesetz aus der angelegten Gesamtspannung U und dem Gesamtwiderstand errechnen.

Interessiert das Verhältnis aller oder einzelner Teilspannungen zueinander oder das Verhältnis einer Teilspannung zur Gesamtspannung, so benutzt man die Formel:

$$U : U_1 : U_2 : U_3 : U_4 : \ldots = R : R_1 : R_2 : R_3 : R_4 : \ldots$$



4.13

Fragen

Dazu einige Beispiele. Errechnen Sie zunächst den Gesamtwiderstand R der Widerstandsreihenschaltung nach Bild 4.13. Wie groß ist die am Widerstand $R_3 = 10\ \Omega$ entstehende Teilspannung U_3, wenn an den Zweipol, also an die Anschlüsse A und E eine Spannung von 6 V angelegt wird? Wieviel Strom fließt durch den Widerstand R_2 und wieviel durch den Widerstand R_4 und wieviel in der Leitung zwischen Netzgerät (bzw. Batterie) und dem Zweipol? An welche Punkte müssen Sie ein Voltmeter anschalten, wenn Sie die Teilspannung U_3 messen wollen?

Überprüfen Sie Ihre Rechenergebnisse durch entsprechende Messungen.

Ermitteln Sie das Verhältnis der Teilspannung U_1 zur Gesamtspannung U, zuerst durch Rechnung und dann durch Messung. Gilt dieses Verhältnis auch, wenn Sie eine höhere Gesamtspannung anlegen?

Die Antworten auf die im Text gestellten Fragen finden Sie im Anhang.

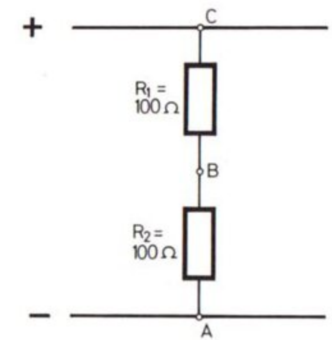
4.7 Elektrisches Potential und Potentialdifferenz

Versuch

Bauen Sie bitte die Schaltung nach Bild 4.14 auf. Da wir keine Ströme messen werden, brauchen Sie beim Aufbau der Schaltung auf dem Experimentierfeld keine besonderen Maßnahmen vorzusehen.

Wenn Sie die Batteriespannung (oder Netzgerätspannung) nach den Angaben des Bildes 4.14 gepolt haben und damit die (+)Sammelschiene des Experimentierfeldes mit dem (+)Pol der Batterie verbunden haben, muß bei der Messung der Gesamtspannung der (–)Anschluß des Voltmeters mit der (–)Sammelschiene (=Punkt A) verbunden werden.

Messen Sie bitte zuerst die Gesamtspannung, also die Spannung zwischen den Punkten A und C und tragen Sie das Ergebnis in die Tabelle 4.15 ein. Anschließend messen Sie die Teilspannung zwischen den Punkten B und C und danach die Teilspannung zwischen den Punkten A und B.



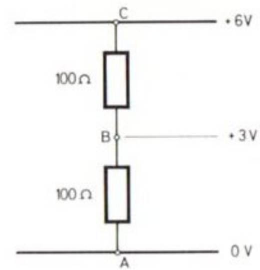
4.14

4.15

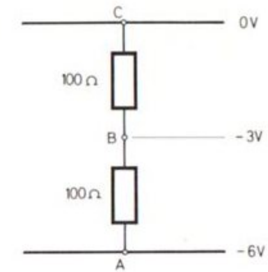
$U_{A\text{-}C}$ in V	$U_{B\text{-}C}$ in V	$U_{B\text{-}A}$ in V

Eine Frage: Haben Sie bei der Messung von $U_{A\text{-}B}$ gemerkt, daß Sie den (–)Anschluß des Spannungsmessers nicht wie bei der vorausgehenden Messung an B, sondern an den Punkt A anschließen müssen? War das der Fall, so haben Sie das Wichtigste des folgenden Abschnitts bereits begriffen! Trotzdem sollten Sie die nächsten Seiten nicht überschlagen, denn die folgende Betrachtung ist ganz wichtig für später, vor allem für das Verständnis von logischen Schaltungen mit elektronischen Bauelementen.

Betrachten wir die elektrischen Beziehungen zwischen den Punkten A–B–C untereinander. Messen wir die Spannung $U_{B\text{-}C}$, so müssen wir den (–)Anschluß des Voltmeters an den Punkt B schalten. Messen wir aber $U_{B\text{-}A}$ (oder $U_{A\text{-}B}$), so muß der (+)Anschluß des Spannungsmessers an den Punkt B gelegt werden, weil ja der (–)Anschluß des Spannungsmessers an A geschaltet werden muß, wenn der Zeiger nach rechts ausschlagen soll.



4.16



4.17

Zur Erklärung dieser Notwendigkeit benutzt der Elektroniker die Begriffe: „Potential“ und „Potentialdifferenz“.

Zunächst legt man – ganz willkürlich, jedoch zur Erklärung der zu beschreibenden Schaltung möglichst zweckmäßig – das „Null-Potential“ fest. Man sagt dazu auch: Man legt den Nullpunkt der Schaltung fest. Für die meisten Schaltungen bestimmt man entweder die (–)Schiene oder die (+)Schiene als den Punkt, der „Nullpotential“ führt. (Das Wort Potential kommt vom lat. „potesse“, was so viel wie „können“ oder „vermögen“ bedeutet.) Wir wählen die (–)Schiene und schreiben deshalb in das Bild 4.16 an diese „0 V“. Steht Ihnen eine 6-V-Spannungsquelle zur Verfügung, dann schreiben Sie an die (+)Schiene „+ 6 V“.

Nun wollen wir einmal den Punkt C betrachten. Dort haben wir an die Sammelschiene +6 V angeschrieben. Sein „Potential“ ist nämlich gegenüber dem Punkt A „positiv“, denn der Punkt A hat ja das Potential 0 V.

Ganz allgemein können wir also sagen, daß der Meßpunkt einer Schaltung, an den wir bei der Spannungsmessung den (+)Anschluß des Voltmeters schalten müssen, ein „positives Potential“ gegenüber demjenigen Punkt hat, an den der (–)Anschluß des Voltmeters angeschaltet werden muß. Daraus folgt logischerweise, daß der andere Punkt, in unserem Beispiel der Punkt A, negatives Potential gegenüber dem Punkt C führt.

(Im Sprachgebrauch sagt man statt des exakten Ausdrucks: „A führt gegenüber dem Punkt C negatives Potential“ oft: „Der Punkt A ist negativ gegenüber dem Punkt C“ oder „A ist negativer als C“.)

In unserem Beispiel ist die Differenz der beiden Potentiale, die „Potentialdifferenz“, genau 6 V. Das Wort Potentialdifferenz sagt also im Grunde nichts anderes aus als der Begriff „Spannung“.

Der Punkt C hat in unserem Beispiel auch ein höheres positives Potential als der Punkt B, der ja in bezug auf die 0-Schiene ein (+)Potential von 3 V hat. Damit ist – kurz gesagt – in dieser Schaltung der Punkt C positiv gegenüber dem Punkt B. Man kann auch sagen, der Punkt C ist positiver als der Punkt B. Die Potentialdifferenz zwischen den Punkten B und C beträgt: + 6 V – (+ 3 V) = 3 V.

Der Punkt B liegt also, was sein Potential betrifft, zwischen dem Punkt A und dem Punkt B. Damit führt der Punkt B also gegenüber dem Punkt A ein positives Potential, gegenüber dem Punkt C jedoch ein negatives Potential! Diesen Sachverhalt sollten Sie genau durchdenken. Wir stoßen nämlich immer wieder auf solche „Potentialprobleme“. Die Potentialdifferenzen jedoch, d. h. die Spannung zwischen den Punkten A und B und die Spannung zwischen den Punkten B und C, betragen jeweils genau 3 V.

Ebensogut, wie wir die (–)Sammelschiene willkürlich mit dem Potential 0 gekennzeichnet haben, können wir auch der (+)Schiene das Potential 0 V „zuordnen“ (Bild 4.17). Damit erhält die (–)Schiene automatisch das Potential – 6 V und der Punkt B das Potential – 3 V. An der Potentialdifferenz ändert sich jedoch nichts:

$$0 - (-3\ V) = +\ 3\ V$$

und

$$-3\ V - (-6\ V) = -3\ V + 6\ V = +\ 3\ V!$$

Wir könnten sogar dem Punkt B wie im Bild 4.18 das Potential 0 V zuschreiben. Dann hätte die (+)Schiene das Potential +3 V und die (–)Schiene das Potential –3 V! Zwischen der (+)Schiene und der (–)Schiene wäre dann die Potentialdifferenz aber trotzdem wieder 6 V, denn

$$+3\text{ V} - (-3\text{ V}) = +3\text{ V} + 3\text{ V} = 6\text{ V!}$$

Sie sehen, man kann die Dinge von den verschiedensten Seiten her ansehen. Je nach Zweckmäßigkeit wird man die eine oder die andere Art anwenden.

Zugegeben, der letzte Abschnitt war etwas knifflig. Vielleicht kommt Ihnen das Ganze auch etwas zu theoretisch vor – Sie werden aber sehr bald selber merken, daß Potentiale, vor allem in der Elektronik, eine ganz wichtige Rolle spielen.

Man kommt ganz scheußlich ins Schleudern, wenn man die „Sache mit den Potentialen“ nicht begriffen hat. Das Thema soll deshalb durch ein paar Beispiele ergänzt werden.

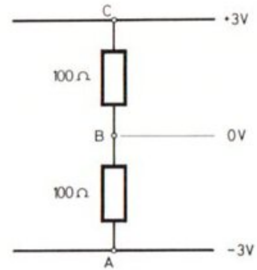
Versuche

Wir schalten drei Widerstände in Reihe und untersuchen das Potential, auf denen die einzelnen Anschlußpunkte A–B–C–D liegen. Bild 4.19 zeigt Ihnen das Prinzip.

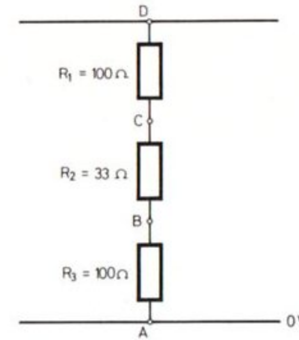
Die (–)Sammelschiene erklären wir zum Nullpunkt der Schaltung; sie führt also das Potential 0 V.

Messen Sie bitte alle überhaupt meßbaren Spannungen und tragen Sie die gemessenen Werte in eine selbst entworfene Tabelle ein. Es sind insgesamt 5 verschiedene Spannungen meßbar. Zur Festlegung der Potentiale benötigen Sie jedoch nur drei Messungen. Die beiden anderen Messungen dienen nur zur Kontrolle. Damit Sie Ihre Werte mit der Lösung in Bild 4.20 vergleichen können, sollte die Gesamtspannung etwa 6 V sein. Mit dem Netzgerät können Sie diesen Wert annähernd einstellen; andernfalls benutzen Sie vier Zellen.

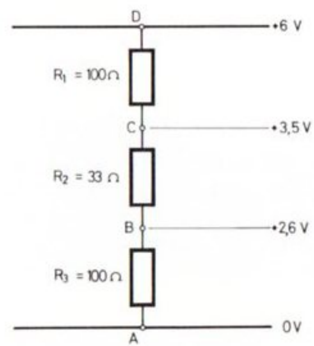
Schreiben Sie im Bild 4.19 die gefundenen Potentialwerte an und vergleichen es mit dem Bild 4.20.



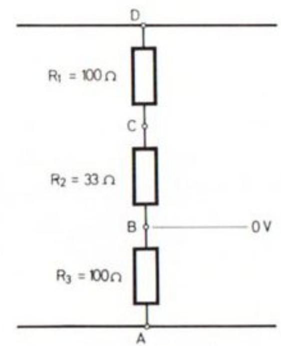
4.18



4.19



4.20



4.21

Zur Abwechslung bestimmen wir nun, daß nicht der Punkt A, sondern der Punkt B Nullpotential führen soll. Tragen Sie die sich jetzt ergebenden Potentialwerte in das Bild 4.21 ein.

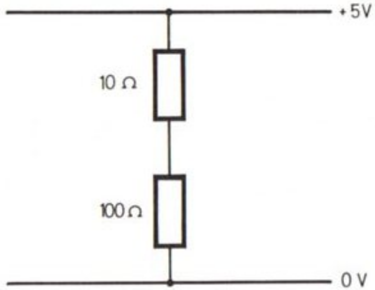
Frage

Welche Werte ergeben sich, wenn Sie den 33-Ω-Widerstand gegen einen 470-Ω-Widerstand austauschen und das Nullpotential dem Punkt C zuordnen?

4.8 Die Leistungsaufteilung in der Reihenschaltung

Versuch

Wir schalten nach Bild 4.22 einen Widerstand mit kleinem Ohm wert, z. B. den 10-Ω-Schichtwiderstand, in Reihe mit einem Widerstand mit höherem Ohmwert, z. B. dem 100-Ω-Schichtwiderstand, und schalten diesen Zweipol an eine Spannungsquelle mit 5 V. Welcher der beiden Widerstände wird nun wärmer, der „nieder-“ oder der „hochohmige“ Widerstand? (Sie wissen sicher noch: Schaltet man jeden der beiden Widerstände einzeln an diese Spannung, so wird der 100-Ω-Widerstand handwarm, während der 10-Ω-Widerstand bei Dauerbetrieb wegen Überhitzung schnell zerstört würde. Also Vorsicht beim Ausprobieren der Schaltung.)



4.22

Ergebnis

Nur den Anfänger wird es überraschen, daß der 10-Ω-Widerstand überhaupt nicht warm wird; denn er hat nicht daran gedacht, daß am 10-Ω-Widerstand ja nur eine Spannung von etwa 0,5 V „ansteht“. Etwa 90 % der Gesamtspannung treten am 100-Ω-Widerstand auf.

Vielleicht rechnen und messen Sie die Stromstärke im Stromkreis nach und bestimmen die elektrische Leistung in Watt, die jeder der einzelnen Widerstände aufnimmt.

Interessant ist die allgemeingültige Formel, mit der wir das Verhältnis der Leistungsaufnahme von verschiedenen Widerständen bestimmen können. Da sich die Teilleistung P_1 aus $U_1 \cdot I$ und die Teilleistung P_2 aus $U_2 \cdot I$ berechnen läßt, entspricht das Verhältnis der beiden Teilleistungen dem Verhältnis der beiden Teilspannungen. Dasselbe gilt für das Verhältnis jeder einzelnen Teilleistung zur Gesamtleistung. Da sich jedoch die Teilspannungen wie die Teilwiderstände verhalten, darf man schreiben:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$$

und

$$P : P_1 : P_2 : P_3 : \dots = R : R_1 : R_2 : R_3 : \dots$$

In einer Reihenschaltung addieren sich die von den Teilwiderständen aufgenommenen Leistungen zur Gesamtleistung.

In einer Reihenschaltung verhalten sich die von den Teilwiderständen aufgenommenen Leistungen wie deren Widerstandswerte.

Frage

Wie groß sind die Gesamtleistung und die Teilleistungen für eine Reihenschaltung von 100 Ω – 10 Ω – 33 Ω, wenn diese an eine Spannungsquelle mit 7 V angeschaltet wird. Ist diese Schaltung überhaupt zulässig, wenn Ihnen nur 250-mW-Schichtwiderstände zur Verfügung stehen? Wie sieht es aus, wenn diese Schaltung mit 9 V betrieben werden soll?

4.9 Anwendungen der Reihenschaltung

4.9.1 Zusammensetzen von Widerständen

Benötigt man für irgendeine Schaltung einen Widerstand mit einem Wert, der nicht in der genormten Wertreihe enthalten ist, so setzt man ihn aus einzelnen Teilwiderständen zusammen. So kann man z. B. mit den Schichtwiderständen Ihres hobby-Labors einen Widerstand mit dem Wert von etwa 150 Ω dadurch gewinnen, daß man folgende Werte in Reihe schaltet: 100 Ω + 33 Ω + 10 Ω + 4,7 Ω. Bitte messen Sie diese Kombination nach. Ihr Ergebnis muß nicht genau 147,7 Ω ergeben, weil einmal die Genauigkeit Ihres Meßgerätes nicht sehr groß ist, und weil zum anderen jeder der Widerstandswerte innerhalb der Toleranz von ± 5 % vom Sollwert abweichen kann.

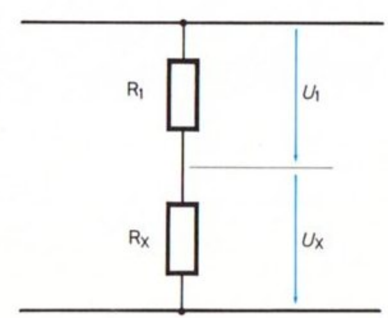
Durch Reihenschaltung von Widerstandsbauteilen ergeben sich größere Widerstandswerte.

Benötigt man jedoch Meßwiderstände, die sehr genau stimmen müssen, so nimmt man normale Widerstände mit einer Toleranz von 5 oder 10 % und gleicht sie durch Reihenschaltung mit einem kleinen einstellbaren Widerstand (der Fachmann nennt solche Bauteile „Trimmer") bei gleichzeitiger Messung des Gesamtwiderstandes ab. (Abgleichen = auf Sollwert einstellen.)

Wie können Sie einen Widerstand von etwa 1,5 kΩ aus Ihren Schichtwiderständen zusammensetzen? Und wie einen Widerstand von etwa 15 kΩ?

4.9.2 Widerstandsbestimmung

Die einfachste Widerstandsbestimmung geschieht durch die Ermittlung von U und I und die Ausrechnung von R nach dem Ohm'schen Gesetz. Hat man keinen oder keinen passenden Strommesser zur Verfügung, oder will man eine bestehende Schaltung nicht auftrennen, um einen Strommesser einzuschalten, so arbeitet man mit der Schaltung nach Bild 4.23, also mit der Reihenschaltung des



4.23

unbekannten Widerstandes R_x mit einem bekannten Widerstand R_1. Die Formel, mit der Sie den unbekannten Widerstand errechnen, ist Ihnen schon bekannt. Sie lautet entsprechend:

$$R_1 : R_x = U_1 : U_x$$

Man mißt also nur die Teilspannungen am bekannten und am unbekannten Widerstand und errechnet R_x nach Umwandeln der genannten Formel in die Form:

$$R_x = R_1 \cdot \frac{U_x}{U_1}$$

Versuch

Bestimmen Sie als Beispiel den Wert des Widerstandes der Spule Ihres hobby-Labors. Am genauesten wird die Bestimmung, wenn Sie nach einer ersten orientierenden Messung mit einem beliebigen Widerstand R_1, z. B. mit dem 470-Ω-Widerstand, eine zweite Messung anschließen, bei der der Widerstand R_1 etwa so groß ist wie der unbekannte Widerstand. Haben Sie zuerst z. B. etwa 92 Ω errechnet, dann sollten Sie die Messung mit einem 100-Ω-Widerstand als R_1 wiederholen. Dadurch wird erreicht, daß Anzeigefehler des Spannungsmessers keine große Bedeutung haben.

Diese Art der Widerstandsbestimmung ist deshalb so bequem, weil man einmal von der Höhe der angelegten Spannung unabhängig ist, und weil man zum anderen die Strommessung umgeht: Man spart sich nämlich mit dieser Methode das Herauslöten von Widerständen aus einer fertig verdrahteten Schaltung.

4.9.3 Messungen an Glühlampen

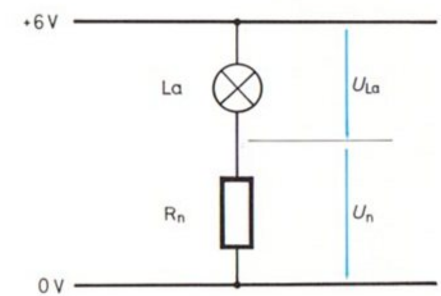
Weil die Widerstandsmeßmethode aus dem letzten Abschnitt so schön funktioniert, wollen wir gleich noch den Widerstand eines Glühlämpchens bestimmen.

Laut Herstellerangabe „zieht“ das Lämpchen bei 6 V einen Strom von 50 mA (Der Fachausdruck „Strom ziehen“ ist sehr anschaulich: Man spürt ordentlich, wie die Elektronen vom (+)Pol abgesaugt werden!) D. h. sein Widerstand R_{La} ist gleich 6 V : 0,05 A = 120 Ω. Dieser Wert gibt jedoch nur einen Anhalt, weil die Lämpchen bei der Herstellung oft recht verschieden ausfallen.

Nun wollen wir untersuchen, ob sich der Widerstand des Lämpchens ändert, wenn wir das Lämpchen mit verschieden hoher Spannung „betreiben“.

Versuch

Bild 4.24 zeigt den Stromlaufplan für diesen Versuch; in die Tabelle 4.25 tragen Sie Ihre Werte ein.



4.24

4.25

R_n in Ω	U_{La} in V	U_n in V	$U_{La}:U_n$	R_{La} in Ω
470				
200				
143				
100				
43				
10				

Der Index „n“ bei R_n soll bedeuten, daß wir verschiedene bekannte Widerstandswerte einsetzen wollen. Sie sind in Spalte 1 der Tabelle 4.25 angegeben. Sie wissen ja, daß die „Zwischenwerte“ aus vorhandenen Widerständen kombiniert werden müssen (Reihenschaltung!). Die gemessenen Teilspannungen U_{La} und U_n tragen Sie in die Spalten 2 und 3 ein; in Spalte 4 kommt der Quotient aus $U_{La} : U_n$; dieser wird mit dem betreffenden Widerstandswert multipliziert und das Ergebnis in Spalte 5 eingetragen. Vielleicht zeichnen Sie mit den Koordinaten ein Diagramm von R in Abhängigkeit von U.

Ergebnis

Das Ergebnis ist einigermaßen verblüffend: Statt eines festen Widerstandswertes, wie er sich für ein „anständiges“ Bauteil gehört, steigt der Lampenwiderstand mit steigender Spannung an.

Schlußfolgerung

Es scheint so, als ob der Widerstand des Lämpchens „spannungsabhängig“ sein könnte?

Diese Schlußfolgerung liegt nahe – sie ist aber nicht ganz richtig. Der Widerstand jeder Glühlampe hängt nämlich von der Temperatur ab. Das, was wir bei unseren Schichtwiderständen möglichst vermeiden müssen, ist bei dem Glühlämpchen gerade erwünscht, nämlich das Heißwerden. Der Wolframdraht erreicht bei voller Leuchtkraft eine Temperatur von etwa 2000° C. Wäre das Glaskölbchen nicht luftleer, so würde sich der Wolframdraht augenblicklich mit dem Luftsauerstoff verbinden, d. h. er würde verbrennen.

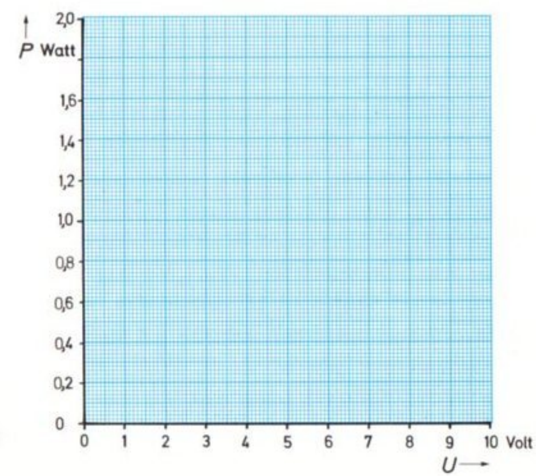
Alle Metalle haben die Eigenschaft, daß ihr Widerstandswert mit der Erwärmung ansteigt. Es gibt jedoch Metallkombinationen, bei denen dies nicht der Fall ist, z. B. bei einer Legierung, die als „Konstantan“ bezeichnet wird.

Es gibt aber auch Halbleiterstoffe, bei denen der Widerstand mit der Erwärmung absinkt. Sie werden sie im hobby-Labor 2 kennenlernen.

Auch die näheren Zusammenhänge zwischen Widerstand und Temperatur werden wir erst dort behandeln, weil Halbleiter-Bauelemente – zum großen Leidwesen aller Elektroniker – sehr „temperaturabhängig“ sind. Bei unseren Experimenten im hobby-Labor 1 spielt die Temperaturabhängigkeit keine so große Rolle.

Bei einer Spannung von 0,2 V fließt zwar schon ein Strom durch das Lämpchen, aber zu sehen ist noch nichts. Bei steigender Spannung erwärmt sich das Wolframdrähtchen immer mehr (Wärmewirkung des Stroms!), bis es schließlich hell glüht. Wird die Spannung zu stark erhöht, dann wird das Kristallgitter des Drähtchens durch den übergroßen Elektronendruck zerstört: es schmilzt, und das Lämpchen ist kaputt.

Wie groß ist die Leistungsaufnahme unserer Glühlämpchen? Aus der „Nennspannung“ und aus dem „Nennstrom“ ist die maximal zulässige Belastung leicht zu errechnen. Vielleicht konstruieren Sie das Leistungs/Spannungs-Diagramm für ein Lämpchen dieses Experimentierbaukastens und für die Lampen aus e-m bzw. hobby 3. Bild 4.26 dient als Gerüst.



4.26

4.9.4 Der Vorwiderstand im Spannungsmesser

Spannungsmessung heißt: Messung des Elektronendrucks. Das wissen wir. Aber wie fängt man's an? Solch ein Druckmesser, wie man ihn für Autoreifen benutzt, dürfte für Elektronen wohl nicht das Richtige sein! Zumal ja der Druck eines f l i e ß e n d e n Stroms gemessen werden muß, der in seiner Stärke möglichst nicht verändert werden sollte! Jedes Meßgerät verbraucht aber ein wenig Energie; es muß ihm also eine Leistung zugeführt werden, sonst könnte der Zeiger nicht ausschlagen. Von nichts kommt nichts!

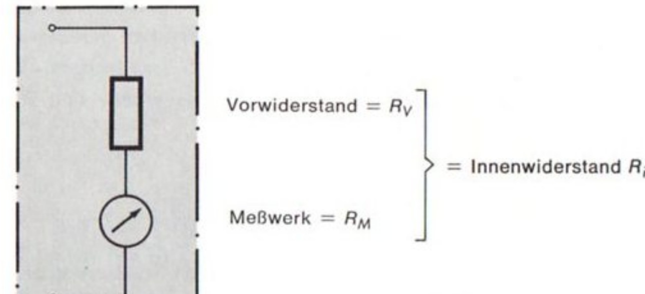
Es muß also ein klein wenig vom Elektronenstrom, dessen Druck gemessen werden soll, für das Voltmeter abgezweigt werden. Ob das einen Einfluß auf die Schaltung hat, werden wir später untersuchen. Jedenfalls steht fest, daß die Spannungsmessung im Grunde eine Strommessung ist.

Wenn man die Anzeigeskala des Meßgerätes entsprechend „in Volt eicht", wie der Fachmann sagt, so ist der durch das Meßgerät fließende Strom ein Maß für die Spannung (= Potentialdifferenz), die zwischen den beiden Punkten herrscht, an die die beiden Anschlüsse des Spannungsmessers angeschlossen sind.

Der Spannungsmesser enthält ein „Meßwerk", dessen Zeiger drehbar gelagert ist. Fließt viel Strom hindurch, so schlägt der Zeiger weit nach rechts, fließt wenig Strom, so schlägt er entsprechend weniger weit aus. Wie der Ausschlag des Zeigers im Meßwerk überhaupt zustande kommt, werden Sie im Kapitel 13 erfahren, wenn wir uns mit den magnetischen Wirkungen des Stroms befassen.

Jedenfalls hat das Meßwerk selbst einen meßbaren elektrischen Widerstand. Eine Messung dieses Widerstandswertes würde ziemlich genau 1500 Ω ergeben. Man bezeichnet ihn als Meßwerkswiderstand; sein Formelzeichen: R_M. „Vollausschlag" des Zeigers, d. h. Ausschlag auf Skalenteil 10, erhält man, wenn durch das Meßwerk ein Strom von 0,333 mA = 333 μA fließt. Sie können nach dem Ohm'schen Gesetz ausrechnen ($U = I \cdot R$), daß dieser Strom fließt, wenn an das Meßwerk selbst eine Spannung von 0,5 V gelegt wird.
Ihr ft-Spannungsmesser mißt aber Spannungen bis zu 10 V! Wie ist das möglich?

Ganz einfach: Mit dem Meßwerk ist nach Bild 4.27 ein Widerstand in Reihe geschaltet. Man nennt ihn „Vorwiderstand" R_V, weil er „vor" das Meßwerk geschaltet ist.



4.27

Spannungsmesser-Gehäuse

Er könnte natürlich genausogut „Nachwiderstand" heißen, denn es ist dem Strom gleichgültig, ob er zuerst durch den Vorwiderstand und dann durch das Meßwerk oder zuerst durch das Meßwerk und dann durch den Vorwiderstand fließt.

Welchen Wert muß nun dieser Vorwiderstand haben?

Es gibt zwei Bestimmungsmethoden. Die erste: Wenn zur Erzielung des Vollausschlages 0,333 mA fließen müssen, dann muß nach dem Ohm'schen Gesetz bei $U = 10$ V der Wert des Gesamtwiderstandes $R = R_M + R_V = 10\ \text{V} : 0{,}000333\ \text{A} = 30\,000\ \Omega$ bzw. 30 kΩ betragen. Dieser Widerstand R wird als „Innenwiderstand" (R_i) bezeichnet. Er setzt sich aus dem Vorwiderstand und dem Meßwerkwiderstand zusammen. Der Wert des Vorwiderstandes selbst ist also:

$$R_V = R - R_M = 30\ \text{k}\Omega - 1{,}5\ \text{k}\Omega = 28{,}5\ \text{k}\Omega$$

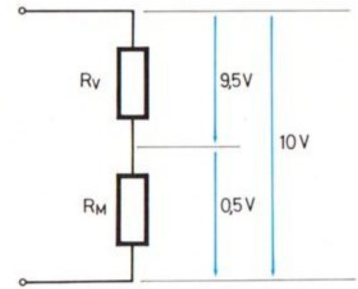
Bei der zweiten Methode betrachtet man die Teilspannungen. Zum Vollausschlag des Meßwerks muß – so wurde gesagt – an seine

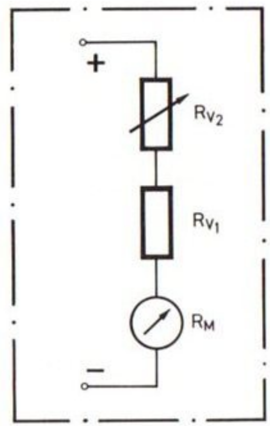
Anschlüsse eine Spannung von 0,5 V gelegt werden (Bild 4.28). (Beachten Sie, daß nur einer dieser Anschlüsse von außen für Sie zugänglich ist!) Im Bild 4.28 ist das Meßwerk durch den Meßwerkswiderstand R_M dargestellt. Damit ein Vollausschlag bei 10 V zustande kommt, muß an dem vorzuschaltenden Widerstand R_V eine Spannung von 9,5 V anstehen. Die allgemein gültige Gleichung für das Verhältnis von Teilwiderständen und Teilspannungen $R_1 : R_2 = U_1 : U_2$ kann man nun nach Einsetzen von $R_V - R_M - U_V - U_M$ nach R_V hin auflösen (siehe auch Abschn. 4.9.2):

$$R_V = R_M \cdot \frac{U_M}{U_V}$$

In unserem Beispiel muß $R_V = 1{,}5\ \text{k}\Omega \cdot \dfrac{9{,}5\ \text{V}}{0{,}5\ \text{V}} = 1{,}5\ \text{k}\Omega \cdot 19 =$ 28,5 kΩ werden.

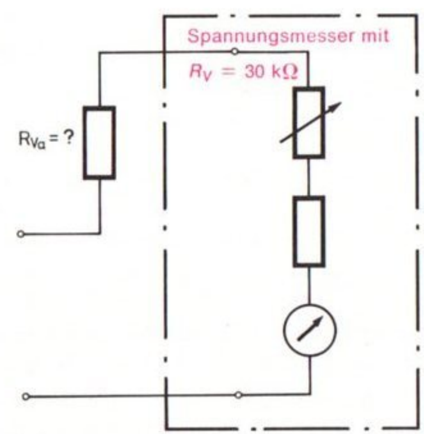
4.28





4.29

In Ihrem Voltmeter ist der 28,5-kΩ-Vorwiderstand nach Bild 4.29 in zwei Schichtwiderstände aufgeteilt. Das hat folgenden Grund: Bei der Herstellung fallen die Meßwerke bezüglich ihres Eigenwiderstandes und des Vollausschlags etwas verschieden aus. Deshalb teilt man den Vorwiderstand auf. Der Festwiderstand R_{V1} ist etwas kleiner als der errechnete theoretische Wert. Der zusätzlich angeschaltete Vorwiderstand R_{V2} wird bei der „Eichung" des Voltmeters „abgeglichen" (siehe Abschn. 4.9.1). Entweder baut man einen veränderbaren Widerstand ein (siehe später) oder man ermittelt diesen Wert durch eine Messung und setzt den richtigen Wert anschließend ein.



4.30

Empfindlichkeit eines Voltmeters

Der Wert des Innenwiderstandes R_i beträgt bei unserem Spannungsmesser rund 30 kΩ bei einem Meßbereich von 10 V. Ein Spannungsmesser, der bei demselben Meßbereich einen Innenwiderstand von nur 10 kΩ hätte, würde während der Messung dreimal soviel Strom aufnehmen wie Ihr Spannungsmesser. Das könnte unter Umständen größere Meßfehler verursachen, wie später noch gezeigt wird. Ein Spannungsmesser mit 100 kΩ Innenwiderstand und 10 V Vollausschlag würde dagegen etwas weniger als ein Drittel des Stroms Ihres Meßgerätes bei demselben Ausschlag „brauchen".

Damit man nun verschiedene Meßgerätetypen miteinander vergleichen kann, gibt man seine „Empfindlichkeit" in Ohm pro 1 V Vollausschlag an. Bei Ihrem Meßgerät mit $Ri = 30$ kΩ und einem Vollausschlag von 10 V errechnet sich die Empfindlichkeit zu 3 kΩ/V. Oder anders ausgedrückt: Sollte Ihr Meßgerät auf einen Vollausschlag von 1 V umgebaut werden, so müßte der Wert seines Innenwiderstandes 3 kΩ betragen.

Frage

Welchen „äußeren" Vorwiderstand R_{Va} (siehe Bild 4.30) müßte Ihrem Spannungsmesser „vorgeschaltet" werden, damit sein Vollausschlag einer Spannung von 20 V entspricht?

4.9.5 Der Spannungsteiler

Für manche Zwecke benötigt man eine Spannungsquelle mit einer Spannung, deren Höhe weder durch eine oder mehrere Zellen und auch nicht mit dem Netzgerät gewonnen werden kann. Dies ist z. B. die Spannung von 1,0 V. Mit Hilfe einer einfachen Reihenschaltung zweier oder mehrerer Widerstände gelingt es, die Spannung einer vorhandenen Spannungsquelle, z. B. einer 4,5-V-Flachbatterie, so „aufzuteilen“, daß an einem der in Reihe geschalteten Widerstände die Teilspannung in der gewünschten Höhe zur Verfügung steht.

Im Beispiel soll am Teilwiderstand R_1 eine Teilspannung U_1 von 1,0 V entstehen. Am zweiten Teilwiderstand muß dementsprechend eine zweite Teilspannung von 3,5 V anstehen. Man löst die allgemeingültige Verhältnisgleichung

$$R_1 : R_2 = U_1 : U_2$$

für unser Beispiel in der bekannten Weise nach R_2 auf:

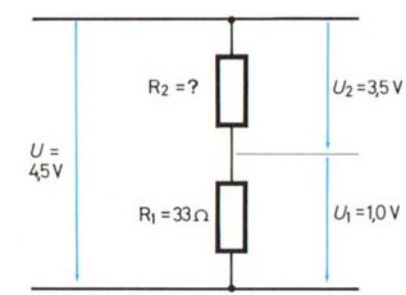
$$R_2 = R_1 \cdot \frac{U_2}{U_1}$$

Versuch

Wählt man für den Widerstand R_1 nach Bild 4.31 den 33 Ω-Schichtwiderstand, so muß $R_2 = 33\ \Omega \cdot \dfrac{3{,}5\ \text{V}}{1{,}0\ \text{V}} = 105\ \Omega$ sein.

Unser Experimentierkasten enthält diesen Wert nicht; deshalb setzen wir ihn aus 100 Ω und 4,7 Ω zusammen. Wegen der zulässigen Abweichungen der wirklichen Werte (= Istwerte) der Schichtwiderstände von den Sollwerten (= Nennwerten) und wegen der Ungenauigkeit der Voltmeteranzeige wäre es Zufall, wenn Ihr Meßgerät genau 1,0 V anzeigen würde.

Mehr über solche „Spannungsteiler“ erfahren Sie im zweiten Teil des folgenden Kapitels.



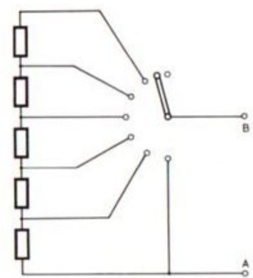
4.31

Frage

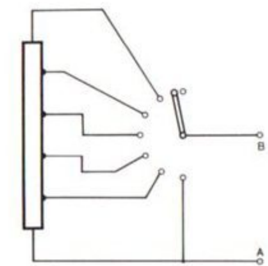
Wie muß der Spannungsteiler aussehen, wenn nicht eine Batterie mit 4,5 V, sondern ein Netzgerät mit $U = 5$ V zur Verfügung steht?

5 Stellwiderstände und Potentiometer

Es gibt nicht nur Widerstände mit festen Werten. In elektronischen Schaltungen spielen auch Widerstandsbauelemente eine große Rolle, deren Wert durch Einstellen verändert werden kann. Deswegen müssen wir uns jetzt ausführlich mit solchen Bauelementen beschäftigen.



5.1



5.2

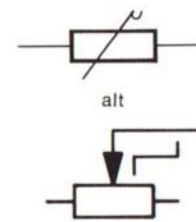
5.1 Widerstand mit Abgriff

Im letzten Abschnitt tauchte bei der Berechnung der Teilwiderstände vielleicht schon der Wunsch nach einem Widerstand auf, dessen Wert einstellbar ist. Solche Widerstände gibt es natürlich. Der Techniker nennt sie „Stellwiderstände“. Das oft dafür gebrauchte Wort „Regelwiderstände“ ist falsch! Gewöhnen Sie sich dieses Wort erst gar nicht an; es bedeutet etwas ganz anderes.

Den einfachsten Stellwiderstand zeigt Bild 5.1. Er besteht aus der Reihenschaltung mehrerer Widerstände, bei der die einzelnen Verbindungspunkte zu einem Drehschalter geführt sind. Dadurch kann je nach Stellung des Schalters zwischen A und B ein verschieden großer Widerstandswert abgegriffen werden. Die Besitzer eines ft-Drehschalters* könnten sich einen solchen Stellwiderstand aufbauen.

* Ein solcher Schalter ist auch einzeln bei Ihrem Service-Händler erhältlich. Er könnte Ihnen auch bei anderen Untersuchungen sehr nützlich sein.


5.3

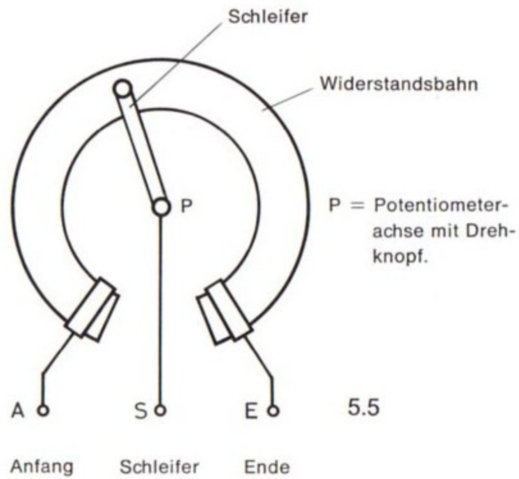


5.4

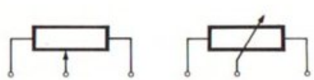
Viel häufiger findet man jedoch eine Ausführung nach Bild 5.2 Ein solcher Stellwiderstand wird z. B. durch Aufwickeln eines Widerstandsdrahtes auf einen runden Keramikstab verwirklicht. Die „Abgriffe“ sind darübergeschobene Blechschellen (Bild 5.3).

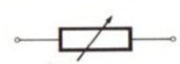
Das alte und das neue Schaltzeichen für beide Arten von Stellwiderständen zeigt Bild 5.4. Man nennt einen solchen Widerstand einen „stufig“ verstellbaren Widerstand. Beide Konstruktionen eignen sich besonders, wenn eine größere elektrische Leistung gewollt oder ungewollt eine Rolle spielt.

In Radio-, Fernseh- und elektronischen Steuergeräten benötigt man jedoch stufenlos verstellbare Widerstände. Im Rundfunkgerät stellt man damit z. B. die Lautstärke ein. Sie beruhen fast ausschließlich auf dem in Bild 5.5 gezeigten Prinzip.



5.5





5.6 (a) veraltet (b) neu

5.7

Bild 5.6 zeigt das alte und das neue Schaltzeichen für ein Potentiometer.

5.2 Der Potentiometerbaustein

Stufenlos verstellbare Widerstände werden als „Potentiometer" bezeichnet – im Fachjargon auch „Poti" genannt. Im Potentiometerbaustein Ihres hobby-Labors sind zwei solche Bauelemente enthalten. Stecken Sie bitte die beiden Drehknöpfe aus Ihrem Experimentierkasten so auf die aus der Frontplatte herausragenden Drehachsen, daß sich der Knopf gut herunterdrücken läßt. Wegen der Anfräsung der Drehachse ist das nur in einer bestimmten Stellung möglich. Sie können also nichts falsch machen.

Die „Einstellnase" am Drehknopf läßt sich jetzt bei jedem Poti zwischen den Teilstrichen 1 und 10 der auf der Frontplatte befindlichen Skalen bewegen. Diese sind der besseren Ablesbarkeit wegen unterhalb des Drehknopfes angebracht. Die Drehrichtung des Knopfes entspricht dem Uhrzeigersinn.

Wie das Bild 5.5 zeigt, kann ein drehbarer Abgriff, den man „Schleifer" nennt, längs einer kreisförmigen Widerstandsbahn verschoben werden. Sie besteht aus einer Kohleschicht, deren Breite und Dicke von dem gewünschten Widerstandswert abhängt. Bei dem einen Poti beträgt er 1 kΩ, beim anderen 10 kΩ. Bei der Beschriftung der Frontplatte ist das Ω-Zeichen (weil selbstverständlich) fortgelassen worden.

Anfang und Ende der jeweiligen Widerstandsbahn sowie das mit der Drehachse verbundene Ende des Schleifers sind mit den Buchsen A, E und S verbunden. Diese sind bei unserem Baustein – im Gegensatz zu Bild 5.5 – oberhalb des Drehknopfes angeordnet. Das hat den Vorteil, daß Ihnen die „Strippen" beim Bedienen des Knopfes nicht im Wege sind.

Die (+)- und (–)Buchsen auf der Frontplatte sind mit den entsprechenden Stromschienen an den Seiten des Bausteins verbunden. Sie werden sich erst bei der Zusammenschaltung mehrerer Bausteine, wie das in den folgenden hobby-Labors häufig vorkommt, als außerordentlich nützlich erweisen. Vorläufig machen wir von den „Pol-Buchsen" noch keinen Gebrauch.

5.2.1 Verwendung als Stellwiderstand

Zunächst wollen wir das Potentiometer als „einstellbaren Widerstand" einsetzen. Dazu werden nur die Buchsen S-A oder E-S verwendet. Wie Sie aus Bild 5.5 entnehmen können, wird durch Drehung des Schleifers S die Strecke der Widerstandsbahn S-A (bzw. E-S) und damit auch deren Widerstandswert verändert. Außerdem erkennen Sie, daß die Widerstandsstrecke S-A und E-S zusammen immer die Gesamtwiderstandsstrecke A-E ergeben müssen.

Man bezeichnet A-E als „Potentiometerwiderstand" und wir wollen ihn mit dem Formelzeichen R_P kennzeichnen. Die Widerstandsstrecke S-A erhält dann entsprechend das Formelzeichen $R_{S\text{-}A}$ und die Widerstandsstrecke E-S das Formelzeichen $R_{E\text{-}S}$. Der Wert von $R_{A\text{-}E}$ beträgt bei unseren Potentiometern rund 1 bzw. 10 kΩ. Die Summe von $R_{S\text{-}A}$ und $R_{E\text{-}S}$ ergibt also bei jeder Stellung des Schleifers einen Wert von $R_P = R_{A\text{-}E} = 1$ bzw. 10 kΩ.

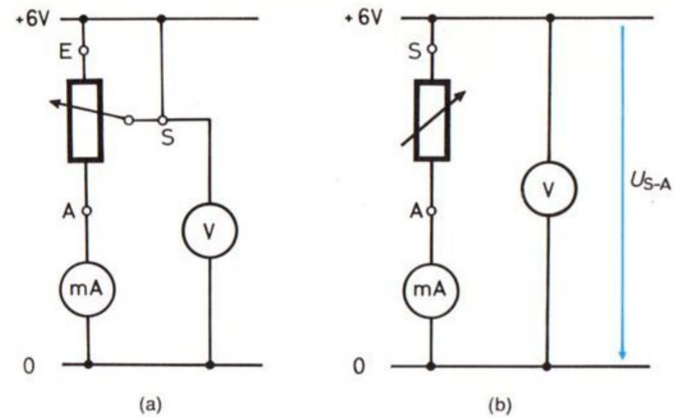
Das Schaltzeichen für einen stetig einstellbaren Widerstand ist im Bild 5.7 angegeben.

Es liegt nahe, die Widerstandswerte, die zu den verschiedenen Teilstrichen der jeweiligen Potentiometerskala gehören, nach der Ihnen schon geläufigen Methode der Strom/Spannungs-Messung zu bestimmen.

1. Versuch

Bild 5.8 zeigt die Meßordnung in 2 verschiedenen Darstellungsweisen, die „elektrisch" dasselbe aussagen. Das Teilbild (b) ist nichts weiter als eine zeichnerische Vereinfachung.

Ihre Ergebnisse für das Poti $P_1 = 1$ kΩ und das Poti $P_2 = 10$ kΩ tragen Sie bitte in die Tabelle 5.9 ein. In der letzten Spalte schreiben Sie den nach dem Ohm'schen Gesetz errechneten Wert der jeweiligen Widerstandsstrecke S-A = $R_{S\text{-}A}$ an.



5.8

5.9

Teilstrich	$U_{S\text{-}A}$ in V		I in mA		$R_{S\text{-}A}$ in Ω bzw. kΩ	
	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

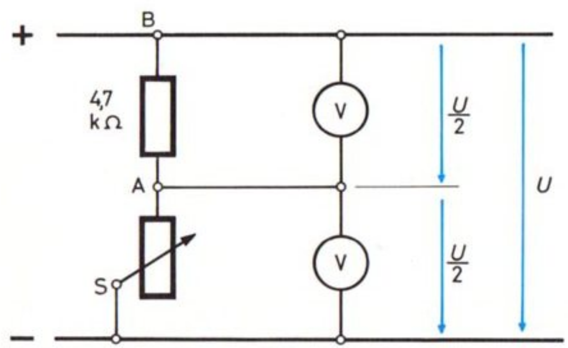
$R_{S\text{-}A} = U_{S\text{-}A} : I$

Ergebnis

Für das 1-kΩ-Poti erhält man mit dieser Methode einigermaßen brauchbare Werte. Sie versagt jedoch beim 10-kΩ-Poti, weil eine genaue Ablesung beim ft-Strommesser wegen der geringen Stromstärken nicht möglich ist. Wir werden deshalb bessere Methoden verwenden müssen. Machen wir gleich einen entsprechenden Vorversuch.

2. Versuch

Wir wollen das 10-kΩ-Poti als Stellwiderstand in Reihe mit einem 4,7-kΩ-Widerstand legen und den Drehknopf so einstellen, daß zwischen den Punkten S und A genau die Hälfte der Gesamtspannung von z. B. 6 V ansteht. Die Schaltung bauen Sie nach Bild 5.10 auf.



5.10

Einen solchen Spannungsteiler, bei dem die Spannung halbiert werden soll, kann man sehr genau herstellen. Durch einen Trick gelingt es, Fehler des Meßwerks auszuschalten: Schalten Sie dazu abwechselnd das Voltmeter an die Punkte S und A bzw. A und B an und drehen Sie solange am Drehknopf, bis beide Meßwerte gleich groß sind. Sie sind auf diese Weise auch von der Höhe der angelegten Spannung unabhängig, weil ja das „Teilerverhältnis" immer gleich bleibt, nämlich 1:1.

Ergebnis

Mit Hilfe dieser Methode, die man als „Spannungshalbierung" oder auch als „Spannungsvergleich" bezeichnen könnte, lassen sich Widerstandswerte auch für andere Drehknopf-Einstellungen bestimmen. Wir werden sie aber erst im Abschnitt 5.3.2 noch weiter ausbauen.

5.2.2 Maximale Belastbarkeit

Überlegen wir jetzt einmal, welche elektrische Leistung der Stellwiderstand $R_{S\text{-}A}$ des 10-kΩ-Poti bei dem letzten Versuch aufgenommen hat. Unter der Voraussetzung, daß Sie eine Spannung von 6 V angelegt haben, ist $U_R = U_{S\text{-}A} = 3$ V (Bild 5.10). Der Stellwiderstand mußte, damit die Spannungshalbierung tatsächlich stattfindet, in der von Ihnen ermittelten Stellung des Drehknopfes genau denselben Widerstandswert haben wie der 4,7-kΩ-Festwiderstand. Damit können wir die nebenstehende Leistungsgleichung anschreiben.

$$P_{S\text{-}A} = U_{S\text{-}A} \cdot I = U_{S\text{-}A} \cdot \frac{U_{S\text{-}A}}{R_{S\text{-}A}} = \frac{U_{S\text{-}A}^2}{R_{S\text{-}A}}$$

$$P_{S\text{-}A} \text{ ist dann: } \frac{9}{4{,}7} \frac{V^2}{k\Omega} \approx 2\,mW$$

Auf Grund der Abmessungen des Potentiometers (im Vergleich zu einem 250-mW-Schichtwiderstand) werden Sie sagen: Eine Belastung dieser Größe kann ihm ohne weiteres zugemutet werden. Stimmt! Das Poti ist sogar bis 0,25 W = 250 mW belastbar!

Nun ersetzen Sie bitte den 4,7-kΩ-Widerstand durch einen 100-Ω-Widerstand und versuchen wie vorher, zwei gleiche Teilspannungen herzustellen.

So sehr Sie sich auch Mühe geben, es geht nicht. Das Poti kann nicht auf 100 Ω eingestellt werden. „Wie gut", werden Sie nach dem Durchlesen des folgenden Abschnitts sagen.

5.2.3 Die Aufgabe des Schutzwiderstandes

Überlegen wir zunächst, wie hoch der Strom in der Kohleschicht des Potis sein darf, wenn das gesamte Poti höchstens eine Belastung von 0,25 W verträgt.

Dazu formt man die Leistungsgleichung $P = I \cdot U$ nach nebenstehender Rechnung in die Gleichung um:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} \qquad I = \sqrt{\frac{250}{10}} \quad \frac{mW}{k\Omega} = \sqrt{25}\,mA = 5\,mA$$

Es darf also höchstens ein Strom von 5 mA durch die Schicht fließen. Das gilt natürlich auch annähernd, wenn das Poti als Stellwiderstand arbeitet und nur ein Teil der Widerstandsbahn vom Strom durchflossen wird. In unserer vorher geplanten Spannungsteilerschaltung mit 2mal 100 Ω hintereinander und einer Betriebsspannung von 6 V würde jedoch ein Strom von $I = 6\,V : 200\,\Omega = 0{,}03\,A = 30\,mA$ fließen. Die Kohleschicht würde also sechsmal so hoch, wie auf die Dauer erlaubt, belastet und dabei mit Sicherheit zerstört werden.

Es gilt:

$P = I \cdot U$ und $U = I \cdot R$

Durch Einsetzen ergibt sich:

$$P = I \cdot I \cdot R = I^2 \cdot R$$

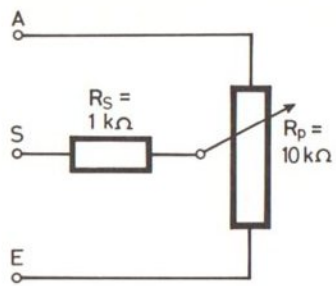
$$I^2 = \frac{P}{R}$$

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

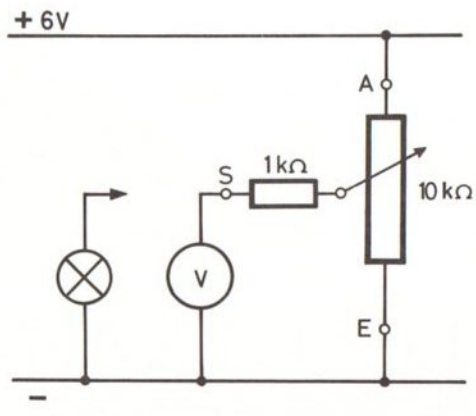
Deshalb ist im fischertechnik-Werk zwischen dem Schleifer und der Buchse S ein „Schutzwiderstand" *Rs* von 1 kΩ eingebaut worden. Das wirkliche Schaltbild des 10-kΩ-Potentiometers sieht also so aus, wie es Bild 5.11 zeigt.

Daher kommt es, daß bei Verwendung des Potis als Stellwiderstand kein kleinerer Widerstandswert als 1 kΩ eingestellt werden kann. Und der größte einstellbare Wert ist nicht 10 kΩ, sondern 11 kΩ.

Entsprechend ist im 1-kΩ-Potentiometer ein Schutzwiderstand *Rs* von 150 Ω eingebaut. Es können daher nur Widerstandswerte zwischen 0,15 und 1,15 kΩ eingestellt werden.



5.11



5.12

5.2.4 Verwendung als Spannungsteiler

Jetzt wollen wir einmal alle 3 Anschlüsse des 10-kΩ-Potentiometers „beschalten", wie es im Bild 5.12 gezeigt ist. Wir verwenden das Poti jetzt als veränderbaren Spannungsteiler.

Versuch

Bauen Sie die Schaltung 5.12 auf und stellen Sie den Drehknopf so ein, daß das Voltmeter 4 V anzeigt.

Fein, werden Sie sagen, jetzt kann ich mit diesem Spannungsteiler meine Glühlämpchen mit einer Spannung betreiben, die kleiner als die Netzgerätespannung ist. Sie leben dann länger. Probieren Sie es aus und schalten Sie das Lämpchen an die Buchsen S und E. (Den gleichen Versuch können Sie auch mit dem 1-kΩ-Poti machen.)

Ergebnis

Das Lämpchen leuchtet nicht! Die Erklärung dürfte nicht schwer sein, wenn Sie überlegen, wie wenig Strom durch das Lämpchen fließen kann. Dieses ganz wichtige Problem wird erst im Abschnitt 8.2 behandelt. Trotzdem müssen wir das Verhalten des Potentiometers in dieser Anwendung als Spannungsteiler noch näher untersuchen. Wir tun das im übernächsten Abschn. 5.4.

5.3 Eichung des Stellwiderstandes

Wir wollen zunächst, wie versprochen, bessere Methoden anwenden, um die zu jedem Teilstrich der Potentiometerskala gehörenden Widerstandswerte zu bestimmen. Mit anderen Worten: Wir wollen unser Poti für die Verwendung als Stellwiderstand „eichen".

5.3.1 Eichung durch Spannungsmessung

Zu diesem Zweck kommen wir auf die Methode zurück, die schon im Abschn. 4.9.2 besprochen wurde, und nach der Sie im Abschn. 4.9.3 das Widerstandsverhalten von Glühlampen in Abhängigkeit von der Spannung untersucht haben.

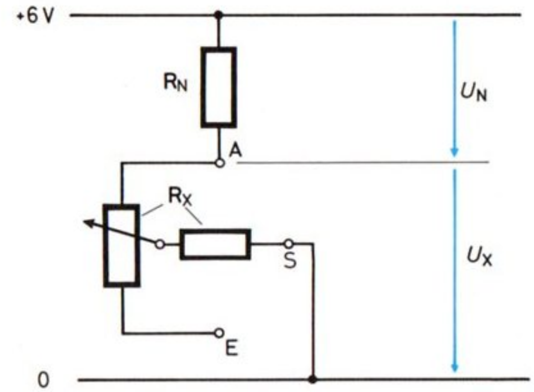
Versuch

Bauen Sie bitte die Meßanordnung nach Bild 5.13 auf. Die Werte für R_N entnehmen Sie der Tabelle 5.14 und verfahren Sie wie im Abschn. 4.9.2.

Die zu jeder Drehknopfeinstellung des Poti P_1 (= 1 kΩ) und P_2 (= 10 kΩ) gehörenden Meßwerte tragen Sie in die Tabelle 5.14 ein. Nach der schon bekannten, unter der Tabelle angeschriebenen Formel berechnen Sie den zu jedem Teilstrich gehörenden Widerstandswert R_x und tragen ihn in die letzte Spalte ein.

Ergebnis

Die Punkte P_1 bis P_{10}, die sich aus den 10 Skalenwert- und Widerstandskoordinaten ergeben, werden in das Diagramm 5.15 einge-



5.13

5.14

Teilstrich	R_N in Ω bzw. kΩ		U_N in V		U_x in V		R_x in Ω bzw. kΩ	
	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2
1	100	1						
2	235	2						
3	335	3						
4	470	4,7						
5	470	4,7						
6	670	5,7						
7	825	6,7						
8	825	7,7						
9	1000	10						
10	1100	11						

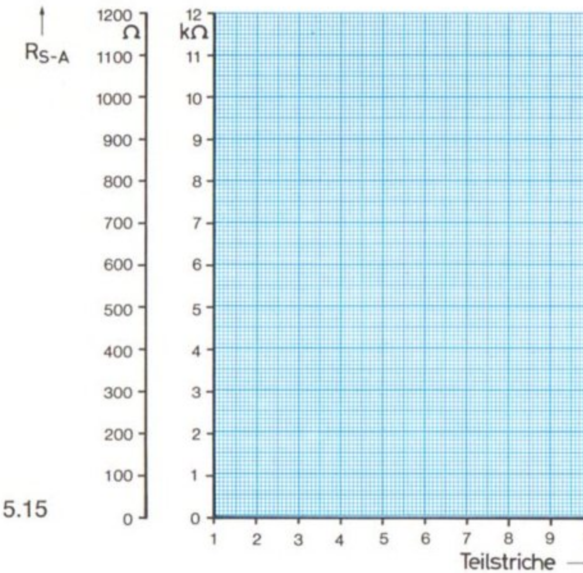
$$R_x = R_N \cdot \frac{U_x}{U_N} = R_{A\text{-}S}$$

tragen. Die Verbindung der Punkte miteinander (bzw. die entsprechende Mittelung) ergibt die „Eichkurve" Ihres Stellwiderstandes R_{A-S}, vermehrt um den Wert des Schutzwiderstandes $R_S = 150\ \Omega$ bzw. 1 kΩ.

Frage

Wie können Sie jetzt die Eichkurve für R_{E-S} konstruieren, ohne eine Messung ausführen zu müssen?

5.15



5.3.2 Eichung durch Spannungsvergleich

Schaltet man nach Bild 5.16 zwei genau gleich große Widerstände R_1 und R_2 in Reihe, so ist die Teilspannung U_1 genauso hoch wie die Teilspannung U_2. Diese Erkenntnis kann man zur genauen Eichung eines Stellwiderstandes benutzen, auch wenn man kein genau arbeitendes Voltmeter zur Verfügung hat. Auch der „absolute" Betrag der Gesamtspannung spielt bei diesem Vergleich keine Rolle; es kommt nur darauf an, daß der Zeigerausschlag bei der Messung der Teilspannung U_1 genauso groß ist wie der bei der Teilspannung U_2.

Mit dieser Methode wollen wir nun nochmals die Eichkurve für das 10-kΩ-Poti aufnehmen.

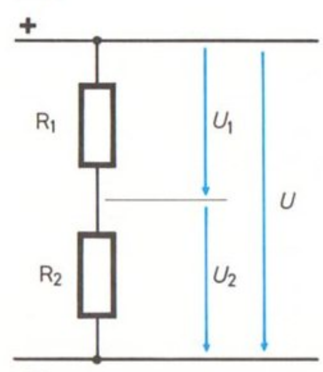
Versuch

Wir benutzen als „Eich-Normal" wieder die Schichtwiderstände des hobby-Labors und nennen sie R_N (Tabelle 5.19).

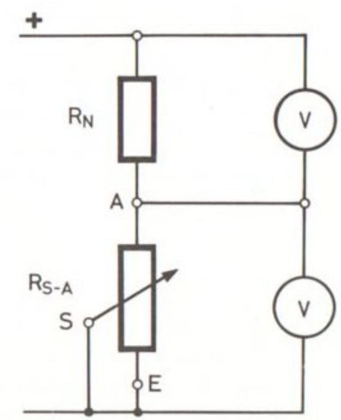
Die Genauigkeit von 5 % vom Nenn-Wert reicht für unsere Zwecke völlig aus.

Bauen Sie die Schaltung 5.17 auf. Die Teilspannungen messen wir nicht mit zwei, sondern nur mit einem Voltmeter. Der „Witz" bei dieser Methode ist ja, daß die sich mit einem Meßgerät ergebenden Meßfehler ausgeschaltet werden. Verändern Sie nun den Stellwiderstand so, daß das Voltmeter für beide Teilspannungen gleiche Werte zeigt. Zur Messung müssen Sie den Spannungsmesser wie beim Versuch 5.10 abwechselnd an die beiden Widerstände schalten.

5.16



5.17

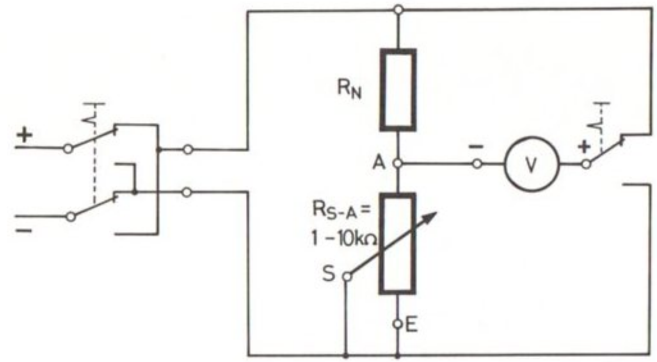


Schneller geht die Messung, wenn Sie nach Bild 5.18 einen ft-Polwendeschalter und einen ft-Taster zu Hilfe nehmen. Den Taster machen Sie mit einem schwergängig eingestellten Gelenkstein zum Umschalter. Schalten Sie bitte Spannungsmesser und Polwendeschalter möglichst gleichzeitig um; der Zeiger des Voltmeters wird dadurch geschont.

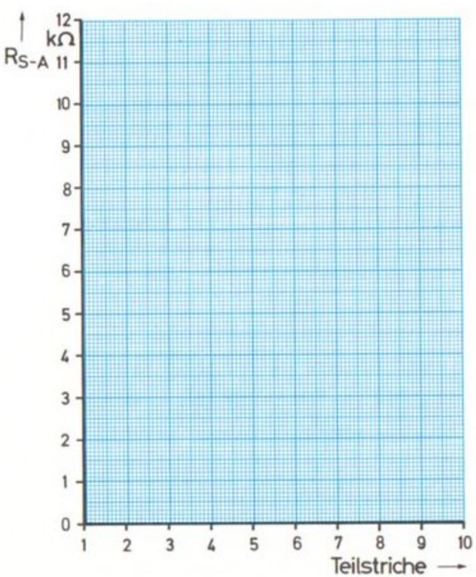
Als „Eichnormal" verwenden Sie der Reihe nach die in der Tabelle 5.19 angegebenen Widerstände.

Konstruktion

Angenommen, Sie hätten für Ihr 2-kΩ-„Normal" (2mal 1 kΩ in Reihe) den „Abgleich" bei der Drehknopfstellung 2,2 erreicht. (Das Wort „Abgleich" sagt, daß bei dieser Stellung des Drehknopfes das Voltmeter für beide Teilspannungen genau gleiche Spannungswerte anzeigt.) Tragen Sie diese Drehknopfstellung in die Tabelle ein. Nach der Ermittlung aller Skalenwerte, bei denen für die verschiedenen Eichnormale Abgleich erzielt werden konnte, zeichnen Sie das neue Eichdiagramm. Das Koordinatennetz 5.20 steht Ihnen dafür zur Verfügung. Dieses Diagramm wird ähnlich dem von Ihnen erstellten Diagramm im Bild 5.15 aussehen.



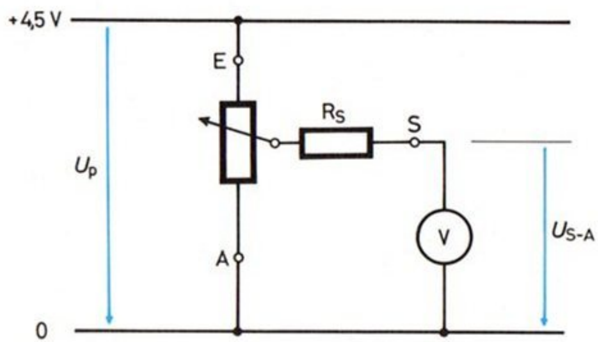
5.18



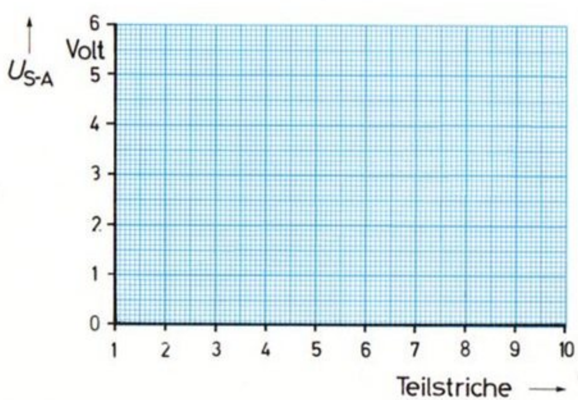
5.20

5.19

Eich-Normal R_N in kΩ	Abgleich bei Teilstrich
1,0	
1,1	
1,2	
1,5	
2,0	
3,0	
4,7	
6,7	
7,7	
10,0	
10,5	
10,8	
11,0	



5.21



5.22

5.4 Das Potentiometer als unbelasteter Spannungsteiler

5.4.1 Das Spannungsteiler-Diagramm für $U_P = 4{,}5$ V

Sie haben Ihr Potentiometer schon in der Schaltung 5.12 als Spannungsteiler verwendet und sicher erfreut festgestellt, daß es, falls es nicht mit einer Glühlampe oder sonstwie stark „belastet" wird, als idealer, weil schnell und fein einstellbarer Spannungsteiler verwendbar ist. Eine der beiden Teilspannungen könnte Ihnen (z. B. im hobby-Labor 2) als „Versuchs-Spannungsquelle" dienen. Sie hätten sicher gern diese Spannung mit dem Drehknopf eingestellt, ohne nach jeder Änderung erneut die Spannung messen zu müssen. Dafür wollen wir nun ein passendes Diagramm erstellen. Aus ihm soll also für jede Spannung zwischen 0 und 4,5 V der einzustellende Teilstrich entnommen werden können. Ebenso soll umgekehrt für jeden beliebig eingestellten Teilstrich die Spannung abgelesen werden können. Die für ein solches Diagramm notwendigen Daten gewinnen Sie durch den folgenden Versuch.

Versuch

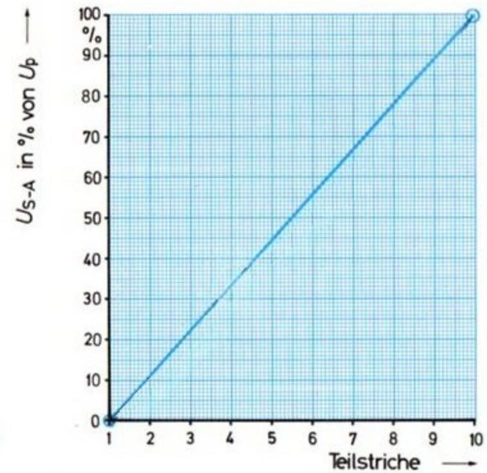
Legen Sie bitte Ihre Potentiometer nacheinander nach Bild 5.21 an die Spannung von 4,5 V und messen Sie für jeden Teilstrich der Potentiometerskala die zugehörige Spannung $U_{S\text{-}A}$. Erstellen Sie bitte eine entsprechende Tabelle.

Aus den erhaltenen Werten konstruieren Sie dann in der bekannten Weise die Kurven, welche das Verhalten der Teilspannung $U_{S\text{-}A}$ in Abhängigkeit von den Teilstrichen beschreiben. Als Gerüst für dieses Diagramm dient Bild 5.22.

Ergebnis

Die Spannung steigt bei beiden Potentiometern proportional mit der Zahl der Teilstriche. Es ergibt sich als Kurve jedesmal eine „Gerade". Das war zu erwarten, da auch die Eichkurven für die Widerstandswerte „Geraden" waren. Daß Ihre Kurven Knicke aufweisen, liegt daran, daß die Linearität der Potis nicht sehr genau ist; außerdem können sich Fehler bei der Drehknopfeinstellung und bei der Ablesung der Spannungswerte auswirken.

Zum gleichen Ergebnis wären Sie allerdings auch durch Rechnung gekommen, wenn Sie sich in Erinnerung rufen, daß sich die Teilspannungen zur Gesamtspannung verhalten wie die Teilwiderstände zum Gesamtwiderstand. Sie sollten diese Rechnung unter Zuhilfenahme der von Ihnen erstellten Eichkurven 5.15 und 5.20, aus denen Sie den zu jedem Teilstrich gehörenden Teilwiderstand entnehmen können, durchführen.



5.23

Frage

Wie Sie festgestellt haben, gehört beim 10-kΩ-Poti wegen des eingebauten Schutzwiderstandes R_S zum Teilstrich 1 ein Widerstandswert von 1 kΩ. Wie kommt es, daß trotzdem bei Drehknopfstellung 1 die Teilspannung $U_{S\text{-}A}$ den Wert Null hat?

5.4.2 Normierung des Spannungsteiler-Diagramms

Nun wäre es schön, wenn Sie ein Diagramm hätten, aus dem Sie die Teilspannung bei jeder denkbaren Gesamtspannung U_p, die Sie an die Anschlüsse E-A eines Potentiometers legen, entnehmen könnten. Das ist möglich, wenn man die Spannungsachse so unterteilt, daß daran die Teilspannung $U_{S\text{-}A}$ in Prozenten von der Gesamtspannung U_P abgelesen werden kann.

Man nennt ein solches Verfahren „Normierung" eines Diagramms (nicht zu verwechseln mit „Normung", was etwas ganz anderes bedeutet!). Durch Normierung erlangt also ein Diagramm, das für einen speziellen Fall angefertigt wurde (in unserem Beispiel für U_P = 4,5 V), allgemeine Gültigkeit.

Wir machen also aus dem speziell für eine Spannung geltenden Spannungsteiler-Diagramm 5.22 ein allgemein für jede Spannung U_p gültiges Diagramm. Benutzen Sie dazu Bild 5.23. Die Achse für die Teilspannung $U_{S\text{-}A}$ ist hier nicht in Volt, sondern in Prozent von der an das Potentiometer angelegten Gesamtspannung U_P unterteilt. Bei einer idealen (d. h. theoretisch richtigen) Kennlinie gehört zu 0 % der Skalenteilstrich 1 und zu 100 % der Skalenteilstrich 10. Diese beiden Werte sind im Bild 5.23 schon eingezeichnet. Die „ideale" Kennlinie ist die gerade Verbindung dieser beiden Punkte.

Betrachten wir zunächst einmal diese ideale Kennlinie: Vielleicht ist Ihnen schon aufgefallen, daß zwischen dem Teilstrich 1 und dem Teilstrich 10 der Potentiometerskala nicht 10, sondern nur 9 „Intervalle" (= Zwischenabschnitte) liegen. Deshalb gehört beispielsweise zum Teilstrich 5 nicht der Wert von 50% von U_P, sondern von etwa 45 %. Wenn Sie also an den Klemmen S-A die Hälfte der an die Klemmen A-E angelegten Spannung abgreifen wollen, so müssen Sie das Potentiometer genau zwischen Teilstrich 5 und Teilstrich 6 einstellen!

Nun wollen wir die tatsächliche Kennlinie Ihres Potentiometers ermitteln. Dazu entnehmen Sie z. B. für die Teilstriche 2 – 4 – 6 – 8 – 10 aus dem Diagramm 5.22 die Teilspannung $U_{S\text{-}A}$. Wir müssen diese Werte nun in Prozent von U_P umrechnen. Man gewinnt den „normierten" Wert von $U_{S\text{-}A}$ durch Division des gemessenen Wertes $U_{S\text{-}A}$ mit der gemessenen Batteriespannung und Multiplikation dieses Wertes mit 100%.

Beispiel: Ist U_P = 4,5 V und $U_{S\text{-}A}$ bei Teilstrich 6 etwa 2,5 V, so ist der normierte Wert von $U_{S\text{-}A}$ bei dieser Stellung $\frac{2{,}5}{4{,}5} \cdot 100\,\% \approx 55\,\%$ von U_P.

Mit den so ermittelten Werten können Sie Ihr normiertes Spannungsteiler-Diagramm zeichnen.

1. Anwendungsbeispiel

Haben Sie an die Buchsen A-E eine Spannung U_P von 6,3 V angelegt und steht Ihr Drehknopf in Stellung 4,6, so steht Ihnen – falls Ihre Kennlinie genau mit der idealen Kennlinie des Bildes 5.23 übereinstimmen sollte – an den Buchsen S-A eine Spannung von 40 % von 6,3 V zur Verfügung. Das sind 2,5 V.

2. Anwendungsbeispiel

Sie legen an die Buchsen A-E eines Potentiometers eine Spannung von 5,8 V an. Für Ihre Zwecke benötigen Sie aber z. B. eine Spannung von 1,8 V. Wie müssen Sie den Drehknopf einstellen? Zur Ermittlung rechnen Sie zunächst einmal den Wert von 1,8 V in Prozent von 5,8 V aus. Sie ermitteln . . . . . %.

Suchen Sie diesen Wert auf der senkrechten Achse und gehen Sie von dort aus waagerecht bis zur Kennlinie. Vom Schnittpunkt dieser gedachten Hilfslinie mit der Kennlinie gehen Sie senkrecht nach unten. Sie erhalten dann die entsprechende Zahl auf der Teilstrich-Skala. Im Beispiel sind es . . . . . Teilstriche.

Ermitteln Sie bitte für einige Ihnen zur Verfügung stehende Spannungsquellen die Einstellung für genau 1 V. Mit dem Spannungsmesser können Sie Ihre Ergebnisse leicht kontrollieren.

Die ermittelten Werte gelten natürlich nur unter der Bedingung, daß der über den Abgriff S fließende Strom „klein genug" und deshalb ohne Einfluß auf die Spannung $U_{S\text{-}A}$ zwischen den Buchsen A und S ist.

5.5 Kennlinienformen

5.5.1 Lineare Kennlinien

Die Maßstäbe für die waagerechte und die senkrechte Koordinatenachse sind bei den bisher erstellten Diagrammen ähnlich einem Metermaß unterteilt. Der Wert „50" liegt zehnmal so weit vom Nullpunkt entfernt wie der Wert „5", und der Wert „20" hat den doppelten Abstand vom Nullpunkt wie der Wert „10". Solche Skalen nennt man „lineare" Skalen.

Scheinbar eine Ausnahme macht die Teilstrichskala Ihres Potentiometerbausteins. Würden Sie jedoch die willkürlich gewählte Skalenteilung von 1 bis 10 durch eine Skalenteilung von 0 bis 9 ersetzen, so erscheint jedem diese Skala linear.

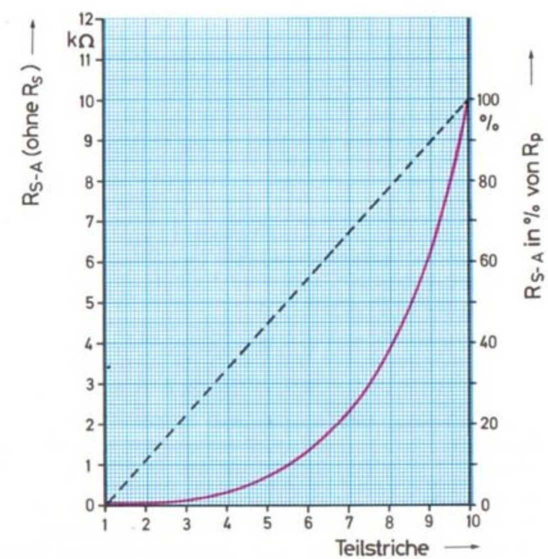
Sie können daraus den Schluß ziehen, daß eine lineare Skala nicht bei 0 beginnen muß; sie kann durch Addition oder Subtraktion eines beliebigen Wertes verschoben werden.

Hat in einem solchen Koordinatensystem mit linearen Maßstäben die Kennlinie die Form einer Geraden, so sagt man: Die Untersuchung hat eine lineare Kennlinie ergeben. Mathematisch entspricht dies einem „proportionalen" oder einem „umgekehrt proportionalen" Verhalten der in Beziehung zueinander gebrachten Eigenschaften. Unser Stellwiderstand hat also in der üblichen Schaltung eine lineare Kennlinie (z. B. Bild 5.15 und 5.20). Der Widerstand zwischen Buchse A und Buchse S ist proportional zur Teilstrich-Skala, allerdings vermehrt um den Wert des Schutzwiderstandes von 1 kΩ. Ebenso verläuft die Kennlinie für die Teilspannung $U_{S\text{-}A}$ in Abhängigkeit von der Teilstrich-Skala des Potentiometers linear.

Sollten die sich ergebenden „Meßpunkte" nicht genau auf einer Geraden liegen, dann liegt das an Ablesefehlern oder an Ungenauigkeiten des Meßgerätes oder des Potis. Wir hatten das ja schon im Abschn. 2.10 besprochen.

5.5.2 Logarithmische Kennlinie

In elektronischen Geräten findet man häufig Potentiometer mit sogenannter „logarithmischer" Kennlinie. Man braucht sie z. B. für die Lautstärkeeinstellung von Rundfunkgeräten. Das Charakteristische einer solchen Kennlinie zeigt Bild 5.24. Die Maßstäbe für die waagerechte und die senkrechte Koordinatenachse

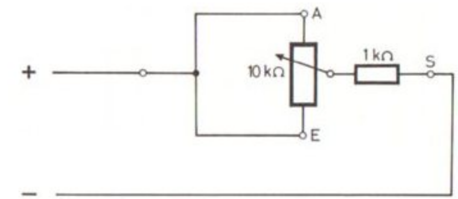


5.24

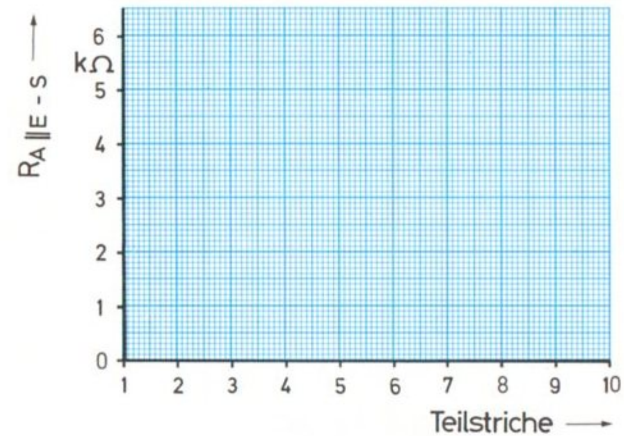
sind auch hier linear geteilt. Auf der waagerechten Achse ist der Skalenwert aufgetragen. Das Potentiometer soll – genau wie das lineare Potentiometer – einen Wert von 10 kΩ zwischen den Anschlüssen A und E haben. Auf der senkrechten Koordinatenachse ist links der Wert des Widerstandes $R_{S\text{-}A}$ zwischen den Anschlüssen A und S aufgetragen (ohne Vorwiderstand), rechts ist das Verhältnis der Teilspannung $U_{S\text{-}A}$ zur Gesamtspannung U_P in Prozent angegeben. Dies gilt natürlich nur für ein praktisch „unbelastetes" Potentiometer.

Die logarithmisch verlaufende Kennlinie ist rot eingezeichnet. Sie sagt aus: Dreht man die Achse eines solchen logarithmischen Potentiometers vom linken Anschlag bis zur Hälfte des vollen Drehwinkels, so würde man zwischen dem Punkt S und A, also am Abgriff, nur ein Zehntel desjenigen Widerstandswertes messen, der sich bei voller Drehung ergibt. (Bei einem Poti mit linearer Kennlinie wäre der Widerstandswert – ohne Schutzwiderstand – bei dieser Einstellung schon auf die Hälfte des Endwertes angestiegen.)

Zum Vergleich ist gestrichelt die Kennlinie für ein lineares Potentiometer eingetragen.



5.25



5.26

5.5.3 Andere Kennlinienformen

Sie haben auch schon andere Kurvenformen kennengelernt, die sich aus bestimmten mathematischen Funktionen ergeben, wie zum Beispiel die „Leistungshyperbel".

Mit Kurven, die einer sogenannten „e-Funktion" folgen, werden Sie im Kap. 12 Bekanntschaft machen.

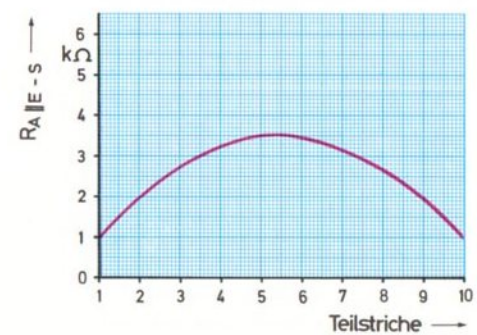
Eine Kennlinie, deren Form mathematisch nur sehr schwer „zu fassen" ist, wird Ihnen im Kap. 11 begegnen. Es ist die Kennlinie einer „Diode".

Bei dem folgenden Versuch ergibt sich eine hochinteressante Kennlinie, die mathematisch ebenfalls nur sehr schwer zu umschreiben ist.

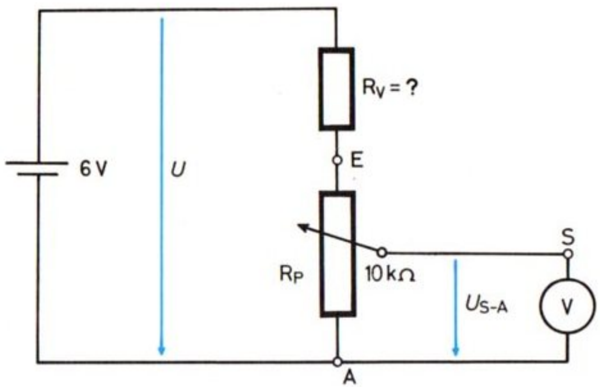
Versuch

Wir untersuchen das Widerstandsverhalten unseres Potentiometers in Abhängigkeit von der Drehknopfstellung in einer sehr eigenwilligen Schaltung, nämlich mit parallel geschalteten Buchsen A und E als dem einen Ende und der Buchse S als dem anderen Ende (siehe Bild 5.25).

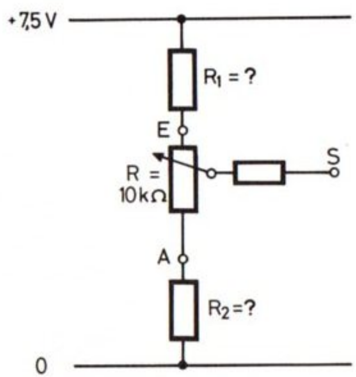
Messen Sie bitte die angelegte Spannung und den durchfließenden Strom für die 10 markierten Stellungen des Drehknopfes und zeichnen Sie die Kennlinie in das Bild 5.26 ein. Sie wird ähnlich gekrümmt verlaufen, wie es Bild 5.27 zeigt.



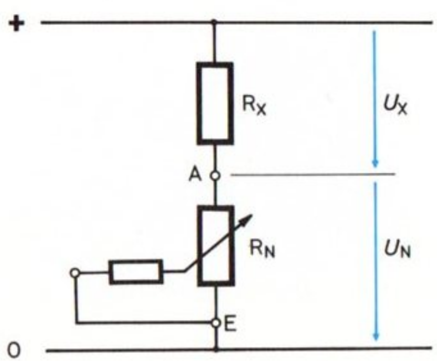
5.27



5.28



5.29



5.30

5.6 Anwendungen

5.6.1 Veränderbarer Spannungsteiler mit Vorwiderstand

Bei der Schaltung des 10-kΩ-Potentiometers als unbelasteter Spannungsteiler im Abschn. 5.4 konnte zwischen den Buchsen A und S die Spannung von 0 bis zur vollen Höhe der angelegten Batteriespannung abgegriffen werden. Bei elektronischen Schaltungen kommt es aber sehr häufig vor, daß eine stufenlos einstellbare Spannung benötigt wird, die aber nie die volle Höhe der zur Verfügung stehenden Gesamtspannung erreichen darf. Nehmen wir einmal an, die Batteriespannung U betrage 6 V, die einstellbare Spannung $U_{S\text{-}A}$ an unserem 10-kΩ-Potentiometer dürfe aber den Wert von 3 V nicht überschreiten. Was ist zu tun?

Nichts einfacher als das: Ein Vorwiderstand R_V muß her! Bild 5.28 zeigt den Schaltplan.

Fragen

Wie groß muß der Wert von R_V sein? Nachdem Sie die „Reihengesetze" nun beherrschen, wird Ihnen die Antwort sicherlich nicht schwer fallen.

Wie müßten Sie die Schaltung ändern, wenn ein Spannungsabgriff nur zwischen 3 und 6 V gewünscht wird? In diesem Fall ist also kein Wert unter 3 Volt einstellbar!

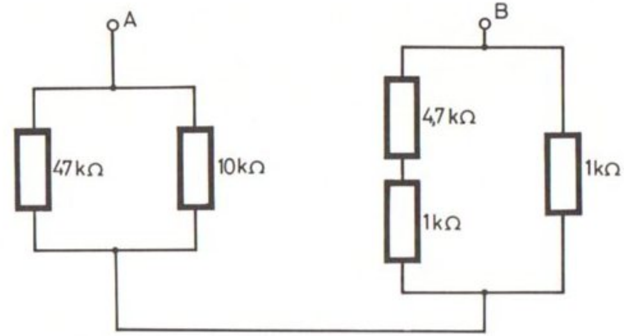
Und wie müßte die Schaltung ausgelegt werden, wenn die Gesamtspannung 7,5 V beträgt und die Teilspannung nur zwischen etwa 1,0 V und rund 6,5 V verändert werden darf?

Das Prinzip einer solchen Schaltung zeigt Bild 5.29. Die Dimensionierung der Bauelemente sollten Sie selbst vornehmen. Wie groß müßten die Werte von R_1 und R_2 sein? An welchen Punkten muß die Spannung abgegriffen werden?

5.6.2 Messung unbekannter Widerstände

Die im Abschn. 5.3.2 besprochene Methode läßt sich auch zur Bestimmung unbekannter Widerstände nach Bild 5.30 verwenden. In diesem Fall schaltet man den unbekannten Widerstand R_x in Reihe mit dem Stellwiderstand und dreht den Drehknopf so lange, bis die beiden Teilspannungen gleich sind. Man kennt also den „Abgleichpunkt“ auf der Skala des Stellwiderstandes. Aus dem schon ermittelten Eichdiagramm 5.20 des Stellwiderstandes entnimmt man den dazugehörigen Widerstandswert. Dieser Wert entspricht dem Widerstandswert des untersuchten Widerstandes. Natürlich gilt eine Einschränkung: Der Wert von R_x darf nicht größer als der maximal, und nicht kleiner als der minimal einstellbare Wert des Stellwiderstandes sein. Mit Ihrem 10-kΩ-Potentiometer können Sie also nur Werte zwischen etwa 1 kΩ und 11 kΩ messen.

Lassen Sie uns diese Methode an einem Beispiel erproben!



5.31

Versuch

Ermitteln Sie nach der soeben besprochenen Methode den Widerstandswert zwischen den Punkten A und B der Widerstandskombination nach Bild 5.31.

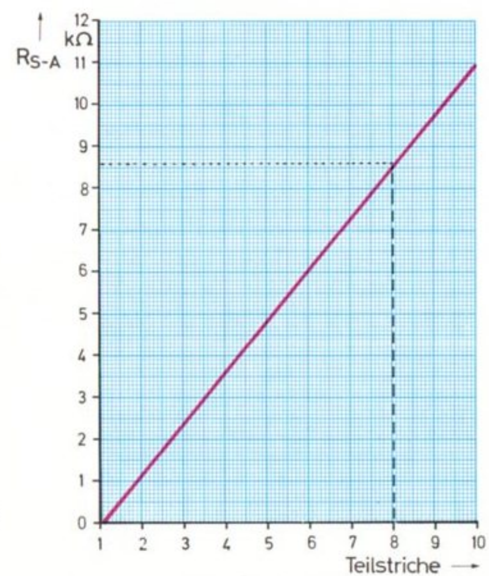
Ergebnis

Angenommen, Sie haben Abgleich erzielt bei dem Skalenwert 8,0 und Ihr Eichdiagramm 5.20 sähe genauso aus wie Bild 5.32. Zunächst suchen Sie auf der waagerechten Koordinatenachse den Skalenwert, den Sie als Ergebnis gefunden haben (im Beispiel 8,0). Von diesem Punkt aus ziehen Sie – zumindest im Geiste – eine genaue senkrechte Linie bis zur roten Eichkurve. (Im Beispiel 5.32 ist sie gestrichelt gezeichnet.)

Der zu diesem Punkt auf der Eichkurve gehörende zweite Koordinatenwert ist der gesuchte Wert der Widerstandskombination.

Mit dem von Ihnen wirklich gefundenen Wert für den Abgleich „gehen“ Sie in das von Ihnen selbst erstellte Eichdiagramm 5.20. Der gefundene Wert wird nicht weit vom Beispiel abweichen.

Ermitteln Sie bitte auf dieselbe Weise den Wert einiger selbst zusammengestellter Widerstandskombinationen.



5.32

6 Parallelschaltung von Widerständen

Die Parallelschaltung haben Sie schon öfter angewendet. Das war z. B. der Fall, als Sie zwei oder noch mehr Glühlampen gleichzeitig an eine Batterie angeschaltet haben (Abschn. 1.3.4). Wir wollen uns im folgenden Kapitel die Zusammenhänge etwas näher ansehen und praktische Anwendungen besprechen.

6.1 Unterschied zwischen Reihen- und Parallelschaltung

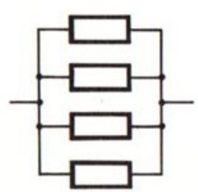
Nachdem Sie nun im Erkennen „elektrischer Zusammenhänge" geübt sind, können wir bei der Betrachtung der Parallelschaltung etwas schneller vorgehen.

Im Bild 6.1 sind eine Parallel- und eine Reihenschaltung nebeneinander gezeichnet. Ganz deutlich geht daraus das Prinzip des „Hintereinander" (a) im Gegensatz zum Prinzip des „Nebeneinander" (b) hervor.

Natürlich dürfen Sie das „Nebeneinander" nicht wörtlich im räumlichen Sinne nehmen. Parallelgeschaltete Widerstände können im Verdrahtungsplan bzw. beim tatsächlichen Versuchsaufbau auch quer zueinander oder hintereinander angeordnet sein, wie dies z. B. in einigen der Bilder 6.2 bis 6.7 der Fall ist.

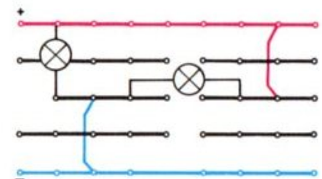
6.1

b) Parallelschaltung

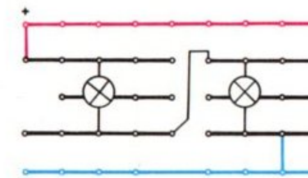


(a) Reihenschaltung

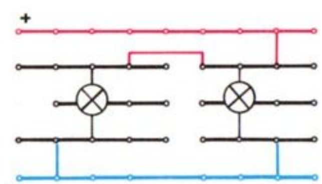
Welcher dieser Steckpläne stellt eine Parallelschaltung dar und welcher eine Reihenschaltung?



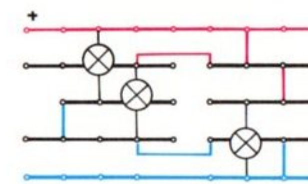
6.2



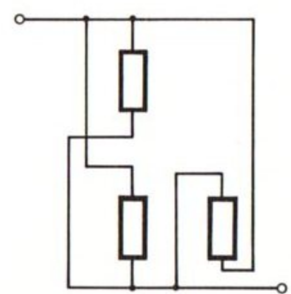
6.3



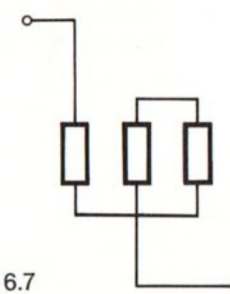
6.4



6.5



6.6



6.7

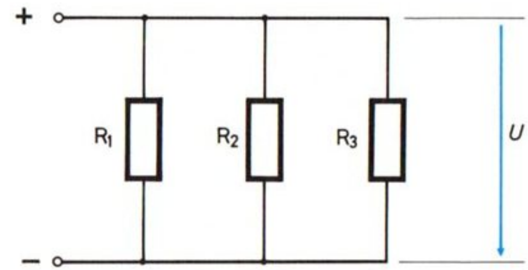
6.2 Die Spannung an einer Parallelschaltung

Im Bild 6.8 wurde der Stromlaufplan vom Bild 6.6 ein wenig umgezeichnet. Sie erkennen ganz deutlich, daß an den Widerständen R_1, R_2 und R_3 die gleiche Spannung U liegt.

Mit anderen Worten: Die Spannung an allen 3 Widerständen ist gleich hoch. Mathematisch heißt das:

$$U = U_1 = U_2 = U_3$$

Sie können diese Behauptung durch einen Versuch nachprüfen.



6.8

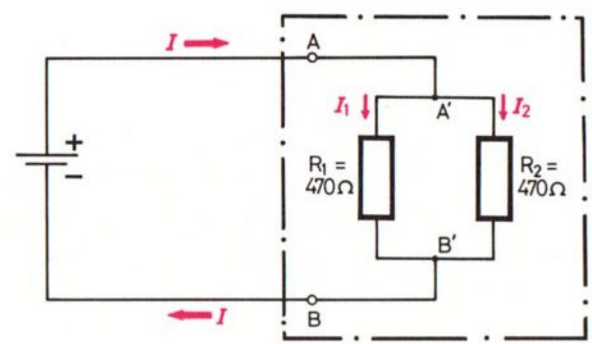
Bei der Parallelschaltung von Widerständen sind die an diesen auftretenden Spannungen alle gleich hoch.

6.3 Teilströme und Gesamtstrom

Beschränken wir unsere Untersuchung zunächst wieder auf den einfachsten Fall, nämlich auf die Parallelschaltung von 2 Widerständen (Bild 6.9).

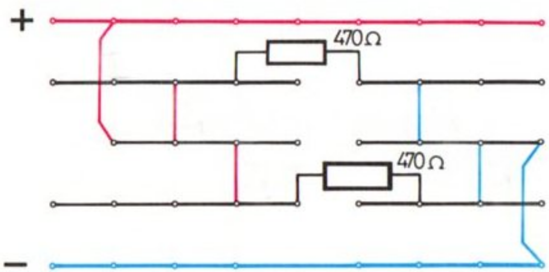
Auch die Parallelschaltung kann man – von der Batterie her gesehen – als „Zweipol“ mit den Anschlüssen A und B ansehen. Sie können den durch diesen Zweipol fließenden Strom I und die angelegte Spannung U messen und daraus den Gesamtwiderstand und die aufgenommene Leistung berechnen. Dies ist grundsätzlich dasselbe wie bei der Reihenschaltung. Sehen wir uns deshalb das Innere des Zweipols an.

Der bei Punkt A in die Schaltung hineinfließende Strom teilt sich im Punkt A' (sprich: A-Strich) in die beiden Teilströme I_1 und I_2. Der Teilstrom I_1 fließt durch den Teilwiderstand R_1 und der Teilstrom I_2 durch den Teilwiderstand R_2. Beide Teilströme vereinigen sich im Punkt B' wieder zum Gesamtstrom I. Dieser fließt über den Anschluß B zur Batterie zurück. Bei der Parallelschaltung findet also eine „Stromverzweigung“ statt. Die Ströme und deren Richtung (von (+) nach (–) fließend gezeichnet) sind als rote Strompfeile in das Bild eingetragen. Man könnte die

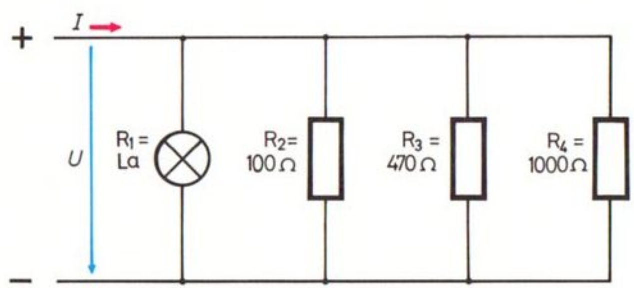


6.9

In einer Parallelschaltung ist die Summe der Teilströme gleich der Stärke des Gesamtstroms.



6.10



6.11

6.12

Versuch Nr.	U in V	I in mA	I_1 in mA	I_2 in mA	I_3 in mA	I_4 in mA
1						
2						
3						

Dicke der Pfeile als Maß für die Stromstärke nehmen. Die Dicke der Pfeile für I_1 und I_2 zusammen muß also die Dicke des Pfeiles I geben, da Strom ja nicht verloren gehen kann. Aus diesem Grund dürfen wir schreiben:

$$I = I_1 + I_2$$

1. und 2. Versuch

Sie werden sich von diesem Gesetz durch Messungen überzeugen wollen. Dazu bauen Sie z. B. die Schaltung 6.9 auf dem Experimentierfeld nach dem Steckplan 6.10 auf. In dieser Anordnung können Sie alle drei Ströme leicht messen. Sie müssen nur den „Strompfad“, in den Sie den Strommesser schalten wollen, auftrennen. Deshalb sind im Steckplan bereits vorsorglich 6 „Brücken“ vorgesehen.

Ersetzen Sie einen 470-Ω-Widerstand durch einen 100-Ω-Widerstand und wiederholen Sie die Messung.

Ergebnis

In beiden Versuchen ist die Summe der Teilströme I_1 und I_2 gleich der Stärke des Gesamtstroms. Hätten Sie nicht zwei, sondern noch mehr Widerstände parallelgeschaltet, so würde sich nichts daran ändern, daß die Summe der Teilströme den Gesamtstrom ergibt.

Sie können also ganz allgemein schreiben:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \ldots\ldots$$

3. Versuch

Überzeugen Sie sich bitte durch Messung der Teilströme nach Schaltung 6.11 und tragen Sie die Werte in Tabelle 6.12 ein. Gilt der oben angeschriebene Zusammenhang auch, wenn Sie den Versuch mit einer höheren Spannung wiederholen?

6.4 Verhältnis von Teilströmen und Teilwiderständen

Die letzten Versuche haben noch etwas anderes gezeigt: In dem Strompfad, in dem der kleinste Widerstandswert der Parallelschaltung eingesetzt ist, fließt der größte Strom; andererseits fließt am wenigsten Strom durch den Widerstand, der den größten Widerstandswert hat.

Untersuchen wir zunächst einmal nur zwei parallelgeschaltete Widerstände nach Bild 6.13. Legt man eine Spannung U an, so fließt durch den Widerstand R_1 der Strom I_1 und durch den Widerstand R_2 der Strom I_2. Nach dem Ohm'schen Gesetz gilt:

$$U = I_1 \cdot R_1 \quad \text{und} \quad U = I_2 \cdot R_2$$

Da in beiden Gleichungen U vorkommt (und auch die gleiche Höhe hat), kann man schreiben:

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$$

Da uns das Verhältnis der beiden Ströme interessiert, stellen wir die Gleichung etwas um; dann ergibt sich:

$$I_1 : I_2 = R_2 : R_1$$

Die Ströme verhalten sich also umgekehrt wie die Widerstände. Diese Gleichung können wir auch noch etwas umformen und schreiben:

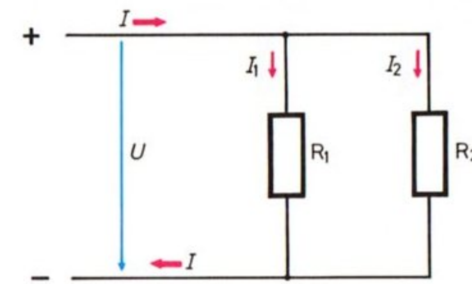
$$I_1 : I_2 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2}$$

Ohne auf die mathematischen Ableitungen einzugehen, sei das Verhältnis der Ströme zu den Widerständen für beliebig viele parallelgeschaltete Widerstände angegeben:

$$I : I_1 : I_2 : I_3 : \ldots = \frac{1}{R} : \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} : \ldots$$

Sie erinnern sich: Statt des reziproken Wertes des Widerstandes, also statt $1/R$, können wir den Leitwert G setzen. Damit geht obige Formel über in:

$$I : I_1 : I_2 : I_3 : \ldots = G : G_1 : G_2 : G_3 : \ldots$$



6.13

In einer Parallelschaltung verhalten sich die Stromstärken wie die Leitwerte oder umgekehrt wie die Widerstandswerte der Teilwiderstände.

6.14

Verhältnis der Teilströme nach den Werten von Tabelle 6.12 (3. Versuch)	
errechnet aus Nennwerten der Widerstände	errechnet aus Meß-ergebnissen
$R_{La} : R_2 =$	$I_2 : I_{La} =$
$R_{La} : R_3 =$	$I_3 : I_{La} =$
$R_{La} : R_4 =$	$I_4 : I_{La} =$
$R_2 : R_3 =$	$I_3 : I_2 =$
$R_2 : R_4 =$	$I_4 : I_2 =$
$R_3 : R_4 =$	$I_4 : I_3 =$
	$I_2 : I =$
	$I_4 : I =$

In einer Parallelschaltung ist der Wert des Gesamtwiderstandes immer kleiner als der kleinste Wert eines Teilwiderstandes.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \left[\text{Hauptnenner: } R_1 \cdot R_2\right]$$

$$\frac{1}{R} = \frac{\dfrac{1 \cdot R_1 \cdot R_2}{R_1} + \dfrac{1 \cdot R_1 \cdot R_2}{R_2}}{R_1 \cdot R_2}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 \cdot R_2} \qquad R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Vielleicht rechnen Sie das Verhältnis der Teilströme in der Parallelschaltung 6.11 anhand der Meßergebnisse aus und vergleichen diese mit dem Verhältnis, das sich aus den Nennwerten (= Sollwerten) der Widerstände ergibt. Die Ergebnisse tragen Sie in die Tabelle 6.14 ein. (Lampen-Nennwiderstand = 120 Ω.)

6.5 Gesamtleitwert und Gesamtwiderstand

Nun interessiert noch die Größe des Gesamtwiderstandes einer Parallelschaltung. Betrachten wir zunächst beliebig viele parallelgeschaltete Widerstände.

Werden bei einer Reihenschaltung die Einzelwiderstandswerte addiert, muß man bei der Parallelschaltung die Leitwerte der einzelnen Bauelemente addieren. Der Gesamtleitwert G ist also:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \ldots$$

Falls Sie lieber mit Widerstandswerten rechnen, ersetzen Sie G durch $\frac{1}{R}$ und benutzen die folgende Formel:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots$$

Daraus folgt aber auch, daß der Wert des Gesamtwiderstandes immer kleiner sein muß als der kleinste Wert eines Teilwiderstandes.

Einfacher wird die Formel, wenn Sie nur mit zwei parallelgeschalteten Widerständen rechnen müssen. Sie ergibt sich nach nebenstehender Ableitung zu:

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

Damit Sie später nicht die Summe der beiden Widerstände über den Bruchstrich – also in den Zähler – schreiben, merken Sie sich vielleicht, daß die Umhüllung der rechten Seite der Gleichung ein Trapez ergibt:

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

6.6 Leistungsaufteilung in der Parallelschaltung

Hierüber brauchen wir nicht viele Worte zu verlieren. Es ist leicht einzusehen, daß die Gesamtleistung gleich der Summe der Teilleistungen ist.

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \ldots$$

Da an jedem der Teilwiderstände die gleiche Spannung anliegt, verhalten sich die Leistungen zueinander wie die Teilströme. Diese verhalten sich jedoch umgekehrt wie die Widerstände; also gilt:

$$P : P_1 : P_2 : P_3 : \ldots = \frac{1}{R} : \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} \ldots$$

In einer Parallelschaltung verhalten sich die von den Teilwiderständen aufgenommenen Leistungen umgekehrt wie deren Widerstandswerte.

Frage

Wenn Sie den 100-Ω- und den 33-Ω-Widerstand in Parallelschaltung an die kleinste Spannung des Netzgerätes schalten: Welcher Widerstand wird wärmer werden? Sicher ist Ihre Antwort richtig! Rechnen Sie nach, wieviel mehr Wärme der 33-Ω-Widerstand abgeben wird als der 100-Ω-Widerstand.

Rechnen Sie bitte nicht erst aus, wieviel Watt jeder einzelne Widerstand aufnimmt, sondern berechnen Sie gleich die Verhältniszahl!

6.7 Anwendungen

6.7.1 Widerstandsverkleinerung

Benötigt man für irgendwelche Zwecke einen Widerstand mit einem in den Normreihen nicht vorhandenen Wert, so kann man diesen meistens durch eine entsprechende Reihenschaltung von Einzelwiderständen, wie wir schon gesehen haben, gewinnen.

Oft ist es aber günstiger, den gewünschten Widerstandswert durch Parallelschalten mehrerer Widerstände zu erreichen. Dies ist besonders dann von Vorteil, wenn in einer Schaltung mit mehreren Widerständen der Wert eines dieser Widerstände vorübergehend verkleinert werden soll.

In einer nicht näher beschriebenen Schaltung ist z. B. ein 100-Ω-Widerstand eingebaut. Sie möchten diesen Wert vorübergehend auf 90 Ω verkleinern, um auszuprobieren, wie die Schaltung dann funktioniert. Die scheinbar einfachste Lösung, nämlich der Austausch gegen eine Reihenschaltung von 47 Ω + 33 Ω + 10 Ω ist nicht möglich, weil Ihnen der 47-Ω-Widerstand nicht zur Verfügung steht. Außerdem wäre der Austausch in einer kompletten Schaltung vielleicht gar nicht so leicht zu bewerkstelligen. Diese Gründe führen zur Überlegung, welcher Widerstandswert dem 100-Ω-Widerstand parallelgeschaltet werden muß, damit sich ein Gesamtwiderstand von 90 Ω ergibt.

Durch Parallelschaltung von Widerstandsbauteilen ergeben sich kleinere Widerstandswerte.

6.15

Eingebauter Widerstand wird R_1 in Ω, kΩ, MΩ	Durch Parallelschaltung von R_2 in Ω, kΩ, MΩ	Zum Gesamtwiderstand R in Ω, kΩ, MΩ
1	$^1/_3 \cdot R_1$	$^1/_4 \cdot R_1$
1	$^1/_4 \cdot R_1$	....
1	$^2/_3 \cdot R_1$	$^2/_5 \cdot R_1$
1	$1{,}0 \cdot R_1$	$0{,}5 \cdot R_1$
1	$1{,}5 \cdot R_1$	$0{,}6 \cdot R_1$
1	$2{,}0 \cdot R_1$	$0{,}67 \cdot R_1$
1	$3{,}0 \cdot R_1$	$\ldots \cdot R_1$
1	$4{,}0 \cdot R_1$	$0{,}80 \cdot R_1$
1	$6{,}0 \cdot R_1$	$\ldots \cdot R_1$
1	$10{,}0 \cdot R_1$	$0{,}91 \cdot R_1$
1	$20 \cdot R_1$	$\ldots \cdot R_1$
1	$50 \cdot R_1$	$\ldots \cdot R_1$
1	$100 \cdot R_1$	$0{,}99 \cdot R_1$
1	$1000 \cdot R_1$	$0{,}999 \cdot R_1$

Die Formel zur Errechnung des gesuchten Parallelwiderstandes R_x gewinnen Sie aus der Umformung der schon bekannten Gleichung für den Gesamtwiderstand:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Wir ersetzen in dieser Gleichung R_2 durch R_x und erhalten:

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R} - \frac{1}{R_1}$$

Daraus wird entsprechend der Ableitung im Abschn. 6.5:

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R}{R_1 - R}$$

Im Beispiel ist der vorhandene Widerstandswert $R_1 = 100\ \Omega$ und der gewünschte neue Widerstand $R = 90\ \Omega$. Damit errechnet sich der gesuchte, parallel zu schaltende Widerstandswert zu:

$$R_x = \frac{100 \cdot 90}{100 - 90} = \frac{9000}{10} = 900\ \Omega$$

Sie können statt 900 Ω auch ohne weiteres 1000 Ω für R_x wählen. Sie können nachrechnen, daß mit $R_1 = 100\ \Omega$ und $R_x = 1000\ \Omega$ der neue Gesamtwiderstand den Wert von 90,9 Ω hat. Der Fehler von 0,9 Ω darf angesichts des gewünschten Wertes von 90 Ω ohne weiteres vernachlässigt werden.

Bei der experimentellen Suche nach der besten Schaltung muß der Elektroniker oft einen in die Schaltung eingebauten Widerstand gegen einen kleineren Widerstand austauschen. Damit er nun nicht jedesmal rechnen muß, wie groß der parallel zu schaltende Widerstand ist, wenn der eingebaute um soundsoviel Prozent verkleinert werden soll, arbeitet er mit Diagrammen. Wir begnügen uns hier mit einem Überblick. Dazu dient die Tabelle 6.15. Den schon vorhandenen Widerstand bezeichnen wir mit R_1, den dazu parallel zu schaltenden mit R_2 und den Gesamtwiderstand mit R.

Die Tabelle ist folgendermaßen entstanden: Ist $R_1 = 1\ \Omega$ und $R_2 = 1 \cdot R_1$, also ebenfalls $= 1\ \Omega$, so wird der Gesamtwiderstand der Parallelschaltung $0{,}5 \cdot R_1 = 0{,}5\ \Omega$. Dasselbe Verhältnis von R_1 und R kommt heraus, wenn R_1 nicht 1 Ω, sondern irgendeinen anderen Wert hat und ein Widerstand mit derselben Größe parallel geschaltet wird. Rechnen Sie nach, wie groß R wird, wenn Sie 2 Widerstände von je 1000 Ω parallel schalten.

Schaltet man zu einem Widerstand R_1 einen Widerstand mit der vierfachen Größe dazu, so wird nach Rechnung der Gesamtwiderstand R zu $0{,}80 \cdot R_1$. Wäre der eingebaute Widerstand z. B. 250 Ω, so würde in diesem Fall 4 · 250

$= 1000\ \Omega$ parallel geschaltet werden. Das Ergebnis wäre $0{,}8 \cdot R_1 = 0{,}8 \cdot 250 = 200\ \Omega$. Ermitteln Sie bitte selbst die in der Tabelle noch fehlenden Werte.

Die nun fertiggestellte Tabelle 6.15 wollen wir nun für den eigentlichen Zweck, nämlich die Ermittlung des Widerstandes R_2 bei gegebenem R_1 und gewünschtem R verwenden.

Beispiele

Soll ein Widerstand z. B. auf die Hälfte verkleinert werden (mathematisch heißt das: $R = 0{,}5 \cdot R_1$), dann muß man ihm laut Tabelle einen Widerstand von $1 \cdot R_1$ parallel schalten. Das bedeutet also: Parallelschaltung eines Widerstandes mit demselben Wert wie der schon eingebaute.

Soll ein Widerstand R_1 um 10 % verkleinert werden, also $R = 0{,}90\ R_1$ sein, so gibt die Tabelle nicht direkt Auskunft; denn Sie finden in der Spalte R den Wert $0{,}90 \cdot R_1$ nicht.

Sie machen keinen großen Fehler, wenn Sie $0{,}91 \cdot R_1$ nehmen. Dazu müssen Sie einen Widerstand von $10 \cdot R_1$ parallelschalten. (Für das Beispiel $R_1 = 100\ \Omega$ haben Sie das schon gemacht. Soll ein 470-Ω-Widerstand um 10 % verkleinert werden, also auf 0,9 seines ursprünglichen Wertes gebracht werden, so müssen Sie ihm $10 \cdot 470 = 4700\ \Omega$ parallelschalten.)

Soll ein Widerstand von 470 Ω um 25 % verkleinert, also auf 75 % seines ursprünglichen Wertes gebracht werden, so muß ihm laut Tabelle ein R_2 von $3 \cdot R_1 = 3 \cdot 470 = 1410\ \Omega$ parallel geschaltet werden. Überzeugen Sie sich vielleicht davon durch Messung.

Fragen

Welchen Widerstand müssen Sie einem 1-kΩ-Widerstand parallelschalten, damit die Parallelschaltung 250 Ω groß wird?

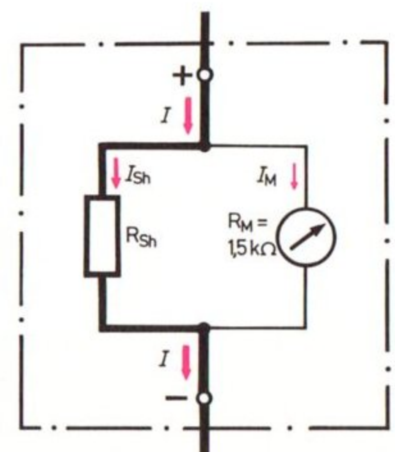
Welchen Widerstand müssen Sie einem 4,7-Ω-Widerstand parallelschalten, damit der Gesamtwiderstand etwa 3,5-kΩ groß wird? Ein Widerstand von 1000 Ω soll auf 750 Ω durch Parallelschalten eines Widerstandes verkleinert werden; welchen Widerstand müssen Sie parallelschalten?

6.7.2 Der Shunt

Es ist Ihnen sicher klar, warum ein Strommesser „in Reihe“ mit dem stromdurchflossenen Bauteil liegen muß.

Durch das Amperemeter sollte der gesamte Strom fließen. Das ist schön und gut – aber dies bedeutet, daß das in den ft-Spannungsmesser eingebaute Meßwerk für Strommessungen nicht benutzt werden kann. Und trotzdem gelingt es mit einem Trick, das Meßwerk des Spannungsmessers, das bei einem Strom von 0,333 mA = 333 μA Vollausschlag hat, als Strommesser mit einem Vollausschlag von 100 mA zu verwenden.

Dieser Trick ist ganz einfach: Man teilt den Strom, der in die (+)Buchse des Strommessers hineinfließt und aus der (–)Buchse wieder herauskommt, in zwei Teilströme auf. Der für den Vollausschlag nicht benötigte Strom wird durch einen Parallelwiderstand am Meßwerk vorbeigeleitet. „Ablenken“, „Weichen stellen“, „teilen“ usw. heißt auf englisch „to shunt“. Deshalb bezeichnet der Fachmann den Widerstand, der den größten Teil des Stroms am empfindlichen Meßwerk vorbeileitet, als „Shunt“ (Aussprache: „Schant“). Sein Formelzeichen sei R_{Sh}. Bild 6.16 zeigt einen solchen Shunt, der parallel zum Meßwerk liegt.



6.16

Schaltet man nun diesen Strommesser in einen Strompfad, und wird auf Grund von Schaltungs- oder Spannungsänderungen der zu der (+)Klemme hinein und aus der (–)Klemme wieder zurückfließende Strom stärker oder schwächer, dann werden auch die Teilströme I_{Sh} und I_M entsprechend stärker oder schwächer. Mithin stellt der durch das Meßwerk fließende Strom I_M ein entsprechend verkleinertes, aber getreues Abbild der Stärke des Gesamtstroms dar.

Wie groß muß nun der Shunt beim ft-Meßgerät sein, wenn der Vollausschlag des Strommessers bei einer Stromstärke von 100 mA erreicht werden soll?

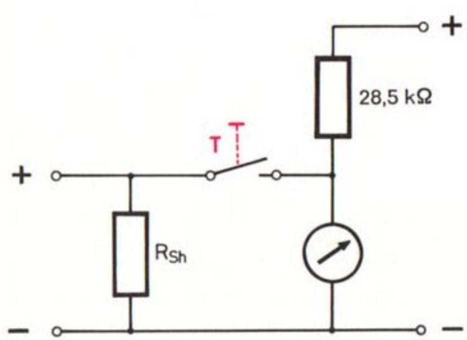
Wie Sie sich vielleicht erinnern, beträgt der Innenwiderstand des Meßwerks R_M etwa 1,5 kΩ, und die maximal für den Endausschlag erforderliche Stromstärke hat einen Wert von 0,333 mA. Der Shunt muß also so groß sein, daß durch ihn bei Vollausschlag ein Strom von 100 mA – 0,333 mA = 99,667 mA hindurchfließt. Die Rechnung ergibt, daß der Shunt dann einen Wert von etwa 5 Ω haben muß:

$$\frac{R_{Sh}}{R_M} = \frac{I_M}{I_{Sh}}; \quad R_{Sh} = R_M \cdot \frac{I_M}{I_{Sh}}$$

$$R_{Sh} = 1{,}5\ \mathrm{k\Omega} \cdot \frac{0{,}333\ \mathrm{mA}}{99{,}6667\ \mathrm{mA}} \approx 5\ \Omega$$

Er wird parallel zu dem Meßwerk geschaltet, wenn Sie die rote Taste drücken. Bild 6.17 zeigt die Schaltung. Dieser Taster ist notwendig, da das Meßgerät ja in Verbindung mit dem 28,5-kΩ-Vorwiderstand auch zur Spannungsmessung eingesetzt wird und dabei der Parallelwiderstand nicht wirksam sein darf. Aus dem Bild 6.17 können Sie auch entnehmen, daß durch das Meßgerät selbst – ohne daß der Zeiger ausschlägt – bei Anschluß des Strommessers bereits ein Strom über den Shunt fließt (siehe Abschn. 3.1).

Aus diesem Bild geht außerdem hervor, daß die (–)Buchse für die Strommessung und die (–)Buchse für die Spannungsmessung zum selben Punkt in der Schaltung führen. Deshalb ist es möglich, bei abwechselnder Strom- und Spannungsmessung mit der Umschaltung eines einzigen „Meßkabels“ auszukommen.



6.17

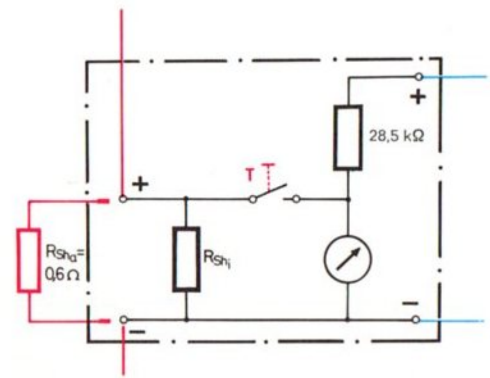
6.7.3 Erweiterung des Strom-Meßbereichs

$$R_{Sh\ ges} = 1500\ \Omega \cdot \frac{0{,}333\ \text{mA}}{999{,}67\ \text{mA}} = 0{,}499\ \Omega$$

Gesamtshunt für 1 A $\approx$ 0,5 Ω

Manchmal kommen Sie mit dem 100-mA-Bereich des Strommessers nicht aus. Sie können jedoch ohne große Schwierigkeiten den Meßbereich dieses Strommessers auf 1 Ampere erweitern. Es ist klar, daß zu diesem Zweck der Shunt geändert werden muß. Er muß nochmals verkleinert werden. Nebenstehend ist ausgerechnet, wie hoch der Wert des neuen Shunts sein muß.

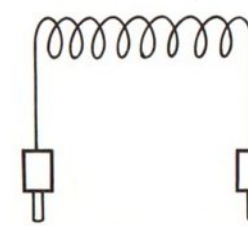
Theoretisch wäre es möglich, den Shunt für 100 mA und für 1 A austauschbar zu konstruieren oder mit einem Schalter – wie bei Meßgeräten mit mehreren Strommeßbereichen – umschaltbar zu machen. Für unsere Zwecke ausreichend ist jedoch die Parallelschaltung eines Zusatzshunts, den wir „Außenshunt" nennen wollen. Er liegt also parallel zum „Innenshunt" von 5 Ω. Wie die nebenstehende Rechnung zeigt, muß der Gesamtshunt etwa 0,5 Ω betragen. Da der Innenshunt etwa 5 Ω beträgt, muß zu ihm parallel ein Widerstand von etwa 0,6 Ω geschaltet werden, wie Sie aus der Tabelle 6.15 entnehmen können.



6.18

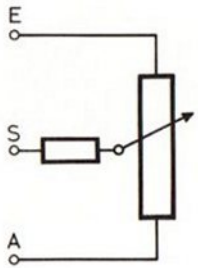
Aus Bild 6.18 erkennen Sie, daß Sie den Außenshunt in die (+)- und (–)Buchsen des Strommessers einstecken müssen. Auf der Frontplatte Ihres Meßgerätes ist deshalb das gestrichelt gezeichnete Schaltzeichen eines Widerstandes angebracht; es trägt die Beschriftung „1 Amp".

Diesen Außenshunt stellen wir selbst her (siehe Bild 6.19). Ihr hobby-Labor enthält in der Kassette einen blanken Draht. Dieses ist ein sogenannter „Widerstandsdraht". Ein Meter davon hat einen Widerstand von 2,45 Ω. Dieser Wert ist also im Vergleich zu einem Kupferdraht von derselben Länge „irrsinnig" hoch. Um den gewünschten Wert von 0,6 Ω herzustellen, brauchen Sie nach nebenstehender Rechnung ein Drahtstück von etwa 25 cm.

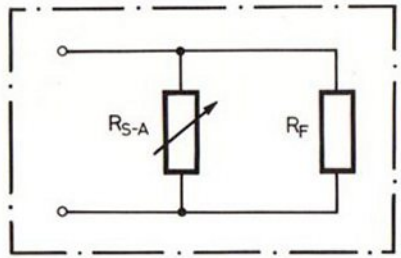

6.19

2,45 Ω ≙ 100 cm
1 Ω ≙ 100 cm : 2,45 = 40,82 cm
0,6 Ω ≙ 0,6 · 40,82 cm = 24,5 cm

Es wird Ihnen nicht schwerfallen, nach den im letzten Abschnitt angegebenen Formeln auch noch einen Shunt für den Meßbereich von 2 A Vollausschlag zu berechnen und herzustellen. Sie sollten die Shunts kennzeichnen; z. B. durch einen kleinen Selbstklebestreifen, auf dem der Meßbereich vermerkt ist.

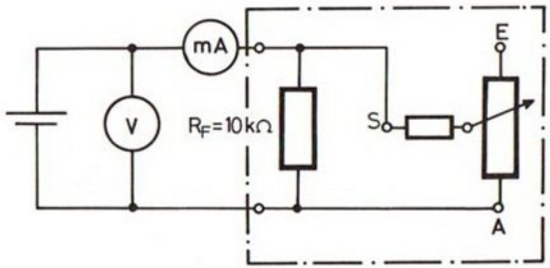


6.20



6.21

$R_{St} = R_{S\text{-}A} \parallel R_F$



6.22

6.23

Drehknopf-stellung	für R_F = 10 kΩ		
	U in V	I in mA	R in kΩ
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

6.7.4 Parallelwiderstand zum Stellwiderstand

Wie Sie die „Potis" Ihres hobby-Labors als Stellwiderstand einsetzen können, haben Sie schon erprobt. Sie können Widerstandswerte zwischen etwa 0,15 kΩ und 1,15 kΩ bzw. zwischen 1 kΩ und 11 kΩ stufenlos einstellen (Bild 6.20).

Nach dem, was Sie eben über die Parallelschaltung gehört haben, liegt nun der Gedanke nahe, den sehr hohen Widerstandswert des 10-kΩ-Potis durch Parallelschalten eines geeigneten Festwiderstandes R_F herabzudrücken – etwa in der Form, wie es in Bild 6.21 dargestellt ist. Dabei wurden der Festwert R_F und der einstellbare Wert $R_{S\text{-}A}$ zum Gesamtwert des Stellwiderstandes R_{St} zusammengefaßt. Sie können diese Parallelschaltung also als Zweipol auffassen und in eine beliebige Schaltung einsetzen.

Versuch

Bauen Sie bitte die Schaltung 6.22 auf, und messen Sie zur Errechnung des Widerstandswertes zunächst Strom- und Spannungswerte bei Links- und bei Rechtsanschlag des Drehknopfes. Die Ergebnisse tragen Sie bitte in die Tabelle 6.23 ein.

Sie können blindlings alle markierten Stellungen des Drehknopfes messen oder vorher überlegen, ob Sie vielleicht mit weniger Werten auskommen: Wenn Sie nämlich der Überzeugung sind, daß die sich ergebende Kurve eine Gerade ist, dann genügt die Messung in Stellung 1 und in Stellung 10. Sind Sie nicht sicher, so messen Sie zusätzlich noch in der Mitte des Einstellbereichs, also in der Stellung 5,5. Liegt dieser Punkt auf der geraden Verbindungslinie zwischen Stellung 1 und Stellung 10, dann stimmt Ihre Annahme. Liegt der Wert für die Stellung 5,5 aber nicht auf der Geraden, so müssen Sie alle 10 Punkte messen. Viel einfacher ist es allerdings, sich durch Rechnung zu überzeugen.

Tragen Sie die Werte aus Tabelle 6.23 in das Diagramm 6.24 ein. Die sich ergebende Kurve stellt das „Eichdiagramm" für das „neue" Poti dar.

Ergebnis

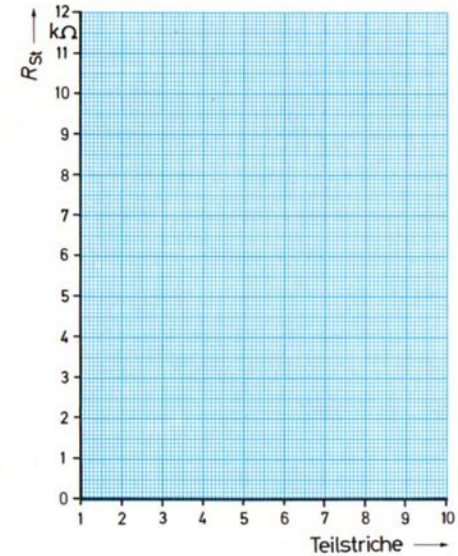
Wie erwartet, wird der Gesamtwiderstand des Stellwiderstandes R_{St} durch Parallelschalten eines Festwiderstandes R_F kleiner.

Schlußfolgerung

Mit Hilfe eines geeigneten Nebenwiderstandes lassen sich die Werte von Stellwiderständen in gewissen Grenzen verkleinern.

Ergänzen Sie bitte Ihr Eichdiagramm durch die Kennlinien für $R_F = 4{,}7\ \text{k}\Omega$ und $R_F = 1\ \text{k}\Omega$. Vergessen Sie nicht, die drei Werte für R_F neben den dazugehörigen Eichkurven zu vermerken. Andernfalls ist das Eichdiagramm für später wertlos, weil Sie die parallel zu schaltenden Widerstände nicht mehr aus der Kurve entnehmen können.

6.24



7 Energiequellen

Was unsere „Energielieferanten“ betrifft, so ist noch manche Frage bis jetzt offen geblieben: Warum sinkt z. B. die Klemmenspannung ab, wenn eine Batterie oder das ft-Netzgerät durch einen „Verbraucher“ mit kleinem Widerstandswert stark belastet wird? Diese und noch andere Probleme wollen wir in diesem Kapitel genauer untersuchen.

7.1 Allgemeines

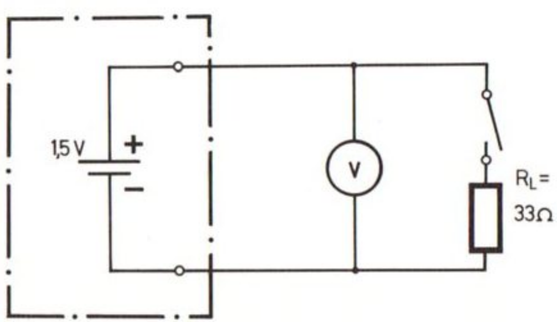
Für die folgenden Versuche sollten Sie sich je eine Mono-, eine Baby- und eine Mignonzelle als Spannungsquelle beschaffen. Wer sich nur auf das Wichtigste beschränken möchte, untersucht nur eine Babyzelle und das Netzgerät.

Falls Ihnen im Augenblick keine Batterien zur Verfügung stehen, gehen Sie zum nächsten Kapitel über und holen diesen Abschnitt alsbald nach. Sollten Sie sich demnächst ein größeres Strom- und Spannungsmeßgerät mit umschaltbaren Meßbereichen, ein sogenanntes „Vielfachmeßgerät“, anschaffen, so empfiehlt es sich, die Untersuchung der Spannungsquellen bis dahin zurückzustellen. Vor dem Kauf dieses Meßgerätes sollten Sie jedoch den Abschnitt „Was ist beim Kauf eines Vielfachmeßgerätes zu beachten?“ im Anhang lesen.

7.2 Orientierende Messungen

Versuch

Bauen Sie die Schaltung 7.1 auf. Wer den eingezeichneten Ein-Taster nicht besitzt, schaltet durch Stecken bzw. Herausnehmen einer Brücke. Als Spannungsquelle benutzen Sie zunächst eine Babyzelle; sie könnte z. B. aus Ihrem ft-Batteriestab entnommen sein.



Babyzelle

7.1

Beobachten Sie den Zeiger des Meßgerätes und schalten Sie abwechselnd den 33-Ω-Widerstand an und ab. Sie werden feststellen, daß der Zeiger etwas weiter ausschlägt, wenn der Widerstand nicht angeschaltet ist. Wie groß ist etwa der Unterschied, in Volt ausgedrückt?

In der Sprache der Techniker sagt man: Wie groß ist der „Spannungsunterschied" (= Unterschied zweier Spannungen) zwischen „Leerlauf" der Batterie und „Belastung" mit 33 Ω? Das Wort „Spannungsunterschied" könnte leicht Anlaß zu Verwechslungen mit „Potentialdifferenz" geben. Deshalb wollen wir gleich das Wort „Spannungsverlust" dafür benutzen. Daß dieser Ausdruck hier berechtigt ist, werden Sie gleich einsehen.

Tragen Sie Ihre Meßergebnisse in die Tabelle 7.2 ein. Dort finden Sie eine Spalte für die „Leerlaufspannung" U_0. Das ist die Spannung, die der Spannungsmesser anzeigt, wenn an die Batterie „Nichts" angeschlossen ist. (Dabei wird natürlich die geringe Belastung durch den Innenwiderstand des Voltmeters von 30 kΩ vernachlässigt.) In die Spalte U_1 tragen Sie die Spannung ein, die Sie bei Belastung der Spannungsquelle mit 33 Ω gefunden haben. In der nächsten Spalte finden Sie den Ausdruck ΔU_1. (Der griechische Großbuchstabe Δ – sprich: Delta – bedeutet „Differenz".) In diese Spalte wird die Differenz der beiden gemessenen Werte $U_0 - U_1$ eingetragen.

Hinweis: Bei unserem ersten Versuch kommt es nicht so sehr auf die genaue Bestimmung der „absoluten" Spannungswerte an – wichtig ist vielmehr die Größe von ΔU_1. Deshalb sollten Sie diesen Wert durch mehrmaliges Betätigen des Tasters in der Schaltung 7.1 so genau wie möglich zu ermitteln suchen.

Ersetzen Sie in der Schaltung den 33-Ω-Widerstand durch den 10-Ω-Widerstand und wiederholen Sie den Versuch. Lassen Sie bitte den 10-Ω-Widerstand nicht länger angeschaltet, als zum Ablesen der Spannung nötig ist! Sie wissen ja, daß er sonst zu heiß werden könnte! Zum Schluß führen Sie die gleichen Messungen (nur ganz kurz!) mit dem 4,7-Ω-Widerstand durch.

7.2

Belastung R_L in Ω:	keine	33		10		4,7	
Quelle	U_0 in V	U_1 in V	ΔU_1 in V	U_2 in V	ΔU_2 in V	U_3 in V	ΔU_3 in V
Baby-zelle alt neu							
Mono-zelle alt neu							
Mignon-zelle alt neu							
Netzgerät Drehknopfstellung: Anfang Mitte Ende							

Ergebnis

Daß der „Spannungsverlust“ ΔU mit steigender Belastung, d. h. mit kleiner werdendem Lastwiderstand R_L, zunimmt, war zu erwarten. Sie kennen diese Erscheinung schon lange! Nur die Betrachtungsweise ist vielleicht neu. Immer, wenn Sie an Ihre Batterie oder Ihr Netzgerät zu einer schon angeschlossenen Glühlampe eine weitere oder gar den Motor parallel schalteten, so ging die Helligkeit der vorher angeschalteten Lampe etwas zurück; die Spannung wurde niedriger.

Sie kennen vielleicht auch schon den Ausdruck im Fachjargon: „Die Spannung geht in die Knie“. Das passiert aber nicht nur bei Batterien und Ihrem Netzgerät; beobachten Sie einmal die Zimmerbeleuchtung, wenn Sie alle Heizplatten des elektrischen Kochherds einschalten!

Wir müssen uns darüber im klaren sein, daß dieses ΔU eigentlich nicht erwünscht ist, denn wer will schon, daß bei zunehmender Belastung, also bei Anschaltung weiterer Lampen, das Licht immer dunkler wird? Deshalb wollen wir ΔU als „Spannungsverlust“ oder als „Verlustspannung“ bezeichnen.

Erweiterung des Versuchs

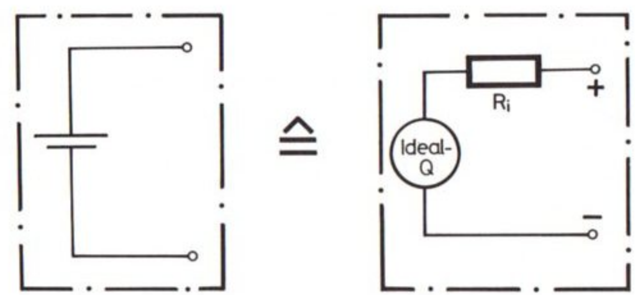
Doch zurück zum eigenen Experiment: Prüfen Sie, ob eine neue Monozelle, die ja wesentlich größer als eine Babyzelle ist, diesen „Fehler“ ebenfalls hat. Was macht die viel kleinere Mignonzelle? Wer sich für diese zum Experiment geradezu herausfordernden Themen noch stärker interessiert, wird in seine Untersuchungen sogar noch die verschiedenen Qualitätsstufen der drei genannten Batteriegrößen miteinbeziehen. Denn es gibt ja einfache, billige Zellen („für Beleuchtungszwecke“) und solche für „Transistorgeräte“ und außerdem noch eine „heavy duty“-Ausführung für „Motorbetrieb“. Auf alle Fälle sollten Sie noch einige (kurze!) Messungen mit $R_L = 4{,}7\ \Omega$ machen.

7.3 Der Innenwiderstand von Quellen

An dieser Stelle sei erinnert, daß wir eine Zelle, eine Batterie und auch das Netzgerät – je nach Anschaulichkeit – abwechselnd: Energiequelle, Spannungsquelle oder Stromquelle genannt haben. Für die folgende Betrachtung sagen wir einfach: „Quelle“.

Wie erklärt sich nun das durch Versuche nachgewiesene Belastungsverhalten aller unserer „Quellen“? (Wir wollen dabei gar nicht auf die chemischen Vorgänge in der Zelle eingehen. Das interessiert vor allem die Elektrochemiker.) Für uns ist ein Verfahren wichtig, mit dem wir das „sonderbare“ Verhalten unserer Quellen bei der Besprechung und Berechnung elektrischer Stromkreise möglichst einfach darstellen können. Wir begnügen uns auch mit einem „Ersatz“, wenn er nur für unsere Zwecke voll geeignet ist.

Ein solches „Ersatzschaltbild“ ist auf der rechten Seite von Bild 7.3 dargestellt.



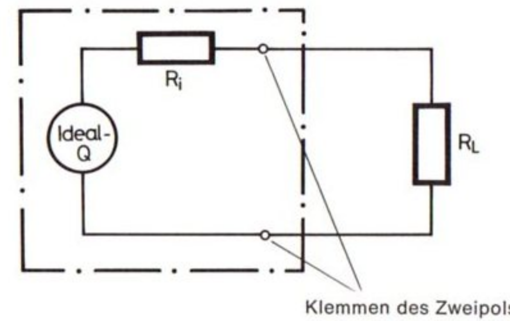
7.3

Man denkt sich eine „ideale“ Quelle (Ideal-Q), die bei jeder beliebigen Belastung stets die gleiche Spannung aufweist. Zu ihr ist ein Widerstand in Reihe geschaltet, der von außen nicht beeinflußt werden kann. Man nennt ihn deshalb den „Innenwiderstand“ R_i der Quelle, oder manchmal auch den „Quellenwiderstand“. Auf alle Fälle ist diese Kombination ein Zweipol. Die Verbindung zwischen der idealen Spannungsquelle und dem Innenwiderstand ist natürlich nicht zugänglich. Sonst hätten wir ja einen Zugriff zu einer „Ideal-Quelle", die es leider nicht gibt.

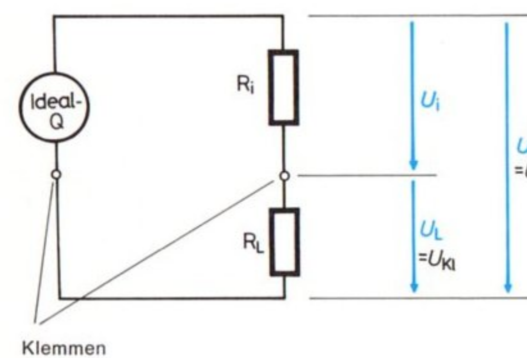
Da ein solcher Zweipol elektrische Energie abgeben kann, bezeichnet man ihn als „aktiven Zweipol". (Im Gegensatz dazu nennt man einen Zweipol, der keine Energie abgeben kann, einen „passiven Zweipol". Darunter fallen alle vor diesem Kapitel besprochenen Zweipole.)

Untersuchen wir unsere „Hypothese" (= Annahme), daß man jede wirkliche Quelle als „ideale Quelle" mit vorgeschaltetem Innenwiderstand darstellen darf, etwas näher. Bauen wir – im Geiste – einen geschlossenen Stromkreis mit einer idealen Quelle, einem Innenwiderstand R_i und einem Belastungswiderstand R_L nach Bild 7.4 auf.

Dieses Bild zeichnen wir in eine uns schon geläufige Form um. Wir erhalten Bild 7.5 und haben damit den schon oft erprobten „Spannungsteiler" vor uns. Die stets gleichbleibende Spannung der idealen Quelle U ist gleich der Summe der beiden Teilspannungen U_i und U_L. Die Spannung U_L ist die einzige Spannung, die wir in diesem Fall tatsächlich messen können, und zwar an den beiden Anschlüssen, die wir bisher als (+)Pol und als (–)Pol der Zelle, der Batterie oder des Netzgerätes kennengelernt haben. Weil man die Last (Lampen, Motore, Widerstände) an diese beiden Anschlüsse „anklemmt", nennt man sie auch „Anschlußklemmen" oder kurz „Klemmen". Die an ihnen zur Verfügung stehende Spannung haben wir U_L genannt. Wir könnten sie genausogut auch „Klemmenspannung" U_{Kl} nennen.



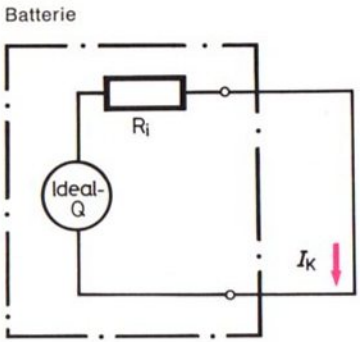
7.4



7.5

Aber was nützt uns der Trick mit dem Innenwiderstand, wenn man nicht weiß, wie hoch die „Spannung der idealen Quelle" ist, werden Sie fragen. Er hilft uns trotzdem! Sie wissen: Das Verhältnis der beiden Teilspannungen U_i und U_L ist dasselbe wie das Verhältnis der Teilwiderstände R_i und R_L.

Aha, werden Sie sich denken! Wenn wir R_L 1000mal oder 100mal so groß wie R_i machen, dann ist die Teilspannung U_i so klein gegenüber U_L, daß sie vernachlässigt werden kann.



7.6

7.7

Quelle		U_o in V	I_k in A	R_i in Ω
Baby-zelle	alt neu			
Mono-zelle	alt neu			
Mignon-zelle	alt neu			
Netz-gerät Drehknopf-stellung	Anfang Mitte Ende			

Richtig! Das ist z. B. der Fall, wenn Sie Ihr Voltmeter statt des Lastwiderstandes R_L an die „Klemmen" der Quelle schalten. Die Spannung, die Ihr Voltmeter anzeigt, ist praktisch die Spannung der „idealen" Spannungsquelle. Sie braucht bei dieser Messung (fast) gar nichts zu leisten; sie läuft im „Leerlauf".

Zur Beschreibung einer „wirklichen" Quelle muß man aber auch noch den Wert des Innenwiderstandes R_i kennen. Wie kann man ihn ermitteln?

Der extreme Fall der „Belastung" unserer Quelle scheint der zu sein, bei dem R_L gleich Null ist, die Quelle also „kurzgeschlossen" wird. Bild 7.6 zeigt das entsprechende Ersatzschaltbild. Jetzt fließt im Stromkreis der größtmögliche Strom, und zwar nur durch R_i. Wenn wir ihn messen, können wir nach dem Ohm'schen Gesetz R_i ausrechnen.

Bevor wir darüber nachdenken, wie wir die Messung vornehmen, sei eine kurze Abschweifung erlaubt: Welche elektrische Leistung liefert unsere Batterie in einer Schaltung nach Bild 7.6? Sie werden es auf Anhieb nicht ohne weiteres glauben: Keine! Sie wissen: Spannung ist da und Strom fließt – warum dann keine Leistung?

Elektrische Leistung wird tatsächlich aufgenommen, aber nur vom Innenwiderstand R_i! Und der ist für uns ja nicht zugänglich. Zwischen den (zugänglichen) Klemmen liegt aber praktisch kein Widerstand, denn wir haben sie ja absichtlich „kurzgeschlossen". Also kann auch keine Spannung zwischen den Klemmen auftreten. Wo aber keine Spannung herrscht, kann auch keine elektrische Leistung aufgenommen und z. B. in Wärmeenergie umgesetzt werden.

Gehen wir nun an die Messung des Kurzschlußstroms I_K. Vielleicht messen Sie einige Ihrer Batterien und das Netzgerät (mit der kleinsten und der größten und einer mittleren Spannung). Vermerken Sie die Werte in der Tabelle 7.7. (Benutzen Sie auf jeden Fall Ihren selbstverfertigten Shunt für den 1-A-Meßbereich!)

Jetzt – so glauben Sie vielleicht – können Sie R_i ganz genau ermitteln. Doch Sie haben eines nicht bedacht: Auch Ihr Strommesser hat einen Innenwiderstand! Dieser beträgt, wenn Sie den 1-A-Bereich benutzen, etwa 0,5 Ω. (Zur genauen Untersuchung müßten Sie sogar noch den Widerstand der Verbindungsleitungen und den Übergangswiderstand von Stecker auf Buchsen usw. berücksichtigen.)

Jedenfalls gibt die durchgeführte Messung der Stromstärke einen ungefähren Anhalt über die wirkliche Größe von R_i, und das genügt uns. Sie sollten R_i ausrechnen, soweit Sie den Kurzschlußstrom messen konnten, und in die Tabelle 7.7 eintragen.

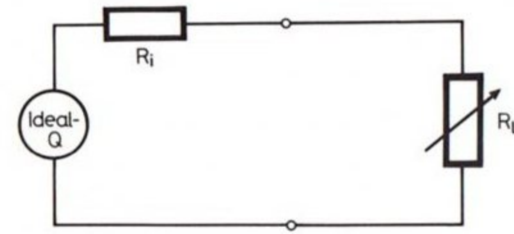
Wer den Wert des Innenwiderstandes ganz genau ermitteln will, müßte nach einer anderen Methode, die Sie bereits im Abschnitt 5.2.1 angewendet hatten, vorgehen. Er schaltet nach Bild 7.8 einen geeigneten veränderbaren Widerstand, dessen Kennlinie bekannt ist, an die Klemmen der Quelle und verändert R_L so lange, bis U_L genau halb so groß ist wie die vorher gemessene Leerlaufspannung U_0. Dann muß R_L so groß sein wie R_i. Für uns hat diese Methode jedoch nur theoretischen Wert, denn unser Stellwiderstand kann nicht kleiner als auf 1 kΩ eingestellt werden. Unsere Batterien haben jedoch – erfreulicherweise – einen Innenwiderstand in der Größenordnung von weniger als 1 Ω bis zu einigen Ohm. Da hilft uns nur eine weniger elegante, aber durchführbare Methode. Rechnen Sie den Wert von R_i aus den Messungen der Tabelle 7.2 nach folgender Formel aus:

$$R_i = R_L \cdot \frac{\Delta U}{U_L}$$

Tragen Sie Ihre Werte in die Tabelle 7.9 ein und bilden Sie den Mittelwert der drei Messungen. Nun haben Sie den Innenwiderstand einiger Energiequellen ermittelt.

Viel wichtiger sind jedoch die durch die Versuche gewonnenen Einsichten, warum man bei Wahl einer ungeeigneten Energiequelle immer Schwierigkeiten mit der „Gleichmäßigkeit“ (=Konstanz) der Spannung bekommen muß, wenn sich während des Versuchs die Größe der Belastung ändert.

Leider haben nur „ideale“ Spannungsquellen den Innenwiderstand $R_i = 0$ – und die gibt es „von Natur aus“ nicht.



7.8

7.9

Belastung R_L in Ω:		33	10	4,7	Mittelwert von R_i in Ω
Quelle		R_i in Ω	R_i in Ω	R_i in Ω	
Babyzelle	alt neu				
Monozelle	alt neu				
Mignonzelle	alt neu				
Netzgerät Drehknopfstellung	Anfang Mitte Ende				

7.4 Spannungsprägung

Es besagt wenig, wenn man sagt: Eine Energiequelle hat einen großen oder einen kleinen Innenwiderstand. Es kommt nämlich stets auf das Verhältnis von Innenwiderstand und Lastwiderstand an.

So hätte eine 6-V-Autobatterie für unsere Versuche einen vernachlässigbar kleinen Innenwiderstand; die Spannung würde bei Änderung der Belastung „eisern stehenbleiben". Für den Betrieb des Fahrzeuganlassers spielt ihr Innenwiderstand jedoch schon eine beträchtliche Rolle. Sie merken das, wenn Sie bei eingeschalteten Scheinwerfern zusätzlich den Anlasser betätigen, besonders wenn die Batterie beim Start des noch kalten Motors noch mehr Energie abgeben muß. Es kommt also nicht auf die „absolute" Größe des Innenwiderstandes, sondern auf die „relative" (= auf andere Werte bezogene) Größe an.

Ist der Innenwiderstand sehr viel kleiner als der Lastwiderstand (in mathematischer Schreibweise: $R_i \ll R_L$), dann wird die Quellenspannung dem Lastwiderstand sozusagen „aufgeprägt". Sie bleibt fast konstant, solange der Lastwiderstand nicht sehr stark verkleinert wird. Man spricht in diesem Fall von einer „Quelle mit eingeprägter Spannung". Das Ganze nennt man „Spannungsprägung".

Mit Hilfe elektronischer Schaltungen gelingt es, Stromversorgungsgeräte zu bauen, deren Klemmenspannung unabhängig von der Belastung ist. Dies gilt aber nur für den auf dem Gerät angegebenen Bereich der Stromentnahme, z. B. zwischen 0 und 3 A. Solche Geräte nennt man „Konstantspannungsquellen" oder einfach „Spannungskonstanthalter".

7.5 Stromprägung

Für manche Zwecke benötigt man jedoch eine Quelle, die sich genau entgegengesetzt wie eine Konstantspannungsquelle verhält: Sie soll stets den gleichen (oder annähernd gleichen) Strom durch eine angeschlossene Schaltung drücken – unabhängig davon, wie sich deren Widerstand ändert. „Wie macht man das nun wieder?" werden Sie fragen.

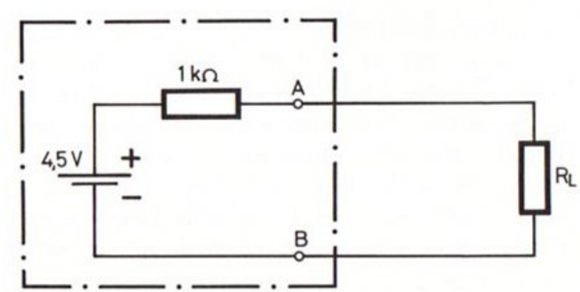
Nun – man erhöht den Innenwiderstand einer vorhandenen Spannungsquelle künstlich, oder man baut mit elektronischen Hilfsmitteln ein Netzgerät, das diese Bedingungen erfüllt.

Das Verhalten einer solchen Quelle können wir aber einmal im Experiment erproben.

Versuch

Als Quelle sollten Sie eine 4,5-V-Batterie oder Ihr Netzgerät (mit der höchsten einstellbaren Spannungsstufe) benutzen. Schalten Sie bitte nach Bild 7.10 den 1-kΩ-Widerstand als „künstlichen" Innenwiderstand. Betrachten Sie die Anschlüsse A und B als die „ Klemmen" Ihres „Stromkonstanters" (= Konstantstromquelle).

Schalten Sie nun an seine Klemmen nacheinander die Schichtwiderstände mit 100 Ω, 33 Ω, 10 Ω und 4,7 Ω, und messen Sie den durchfließenden Strom. Was passiert, wenn Sie Ihren „Stromkonstanter" kurzschließen? Tragen Sie Ihre Meßwerte in eine selbstentworfene Tabelle ein. Die Stromstärke wird in allen Fällen fast gleich sein. Dies ist leicht einzusehen, denn die genannten Widerstandswerte sind praktisch vernachlässigbar klein gegenüber dem „künstlichen" Innenwiderstand R_i des Stromversorgungsgerätes von 1 kΩ.



7.10 „Stromkonstanter"

Wichtig ist Ihre Beobachtung, daß dieses Stromversorgungsgerät „kurzschlußfest" ist; denn bei kurzgeschlossenen Klemmen A-B fließen nur 10 % mehr Strom als bei Belastung mit 100 Ω.

Sicher ist Ihnen nicht entgangen, daß der größte Teil der insgesamt von Ihrer „idealen" Stromquelle abgegebenen Spannung am Innenwiderstand des Gerätes abfällt, während die zwischen den Klemmen A und B auftretende Spannung sehr niedrig ist. (Dies gilt natürlich nur, wenn die Belastungswiderstände klein gegenüber dem Innenwiderstand sind.)

Bei elektronischen „Stromkonstantern" geht man deshalb einen anderen Weg: Man verändert automatisch den Wert des Innenwiderstandes R_i oder die Spannung der „idealen" Quelle in Abhängigkeit von der Größe des angeschalteten Widerstandes. Aber auch hier gilt: Es kommt stets auf das Verhältnis von Innenwiderstand und Lastwiderstand an: Nur wenn R_L wesentlich kleiner als R_i ist, ist die Stromprägung wirksam.

7.6 Welche Energiequelle ist die günstigste?

Für Ihre Experimente hätten Sie natürlich gern eine Energiequelle, die sich ähnlich wie eine Konstantspannungsquelle verhält. Sie könnten dann das Problem der Spannungsänderung bei Änderung der Belastung vergessen.

Wenn man von aufwendigen elektronischen Geräten absieht, käme dann wohl eine 6-V-Autobatterie als beste Spannungsquelle in Frage. Aber was passiert, wenn deren Klemmen oder ein Teil der angeschlossenen Schaltung absichtlich oder unabsichtlich kurzgeschlossen werden? So etwas soll ja auch dem ausgekochtesten Elektroniker gelegentlich passieren. Dann „raucht" es in der Schaltung! Für diese Fälle wäre natürlich eine Konstantstromquelle viel zweckmäßiger, denn bei diesem Typ ist der Kurzschlußstrom – wie unsere Versuche ergeben haben – nicht viel größer als der Strom bei normaler Belastung!

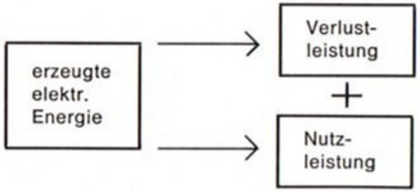
Aus diesem Grunde muß man leider bei der Auswahl der zu verwendenden Energiequelle stets einen Kompromiß zwischen den beiden genannten, sich gegenseitig ausschließenden Forderungen schließen. Man nimmt z. B. für Experimentierzwecke ein Netzgerät, mit dem im Kurzschlußfall noch nicht viel passieren kann, wie z. B. das fischertechnik-Netzgerät. Ebenso sind Mono- und Babyzellen geeignet; Autobatterien dagegen nicht! Dafür hat man den Nachteil „eingehandelt", daß sich die Spannung bei Belastungsänderung ebenfalls ändert.

7.7 Die Verlustleistung einer Energiequelle

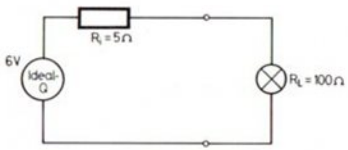
Vielleicht hat Sie bei dem Versuch mit der Stromprägung und vor allem bei der Bestimmung des Kurzschlußstroms von Energiequellen schockiert, daß Ihre Energiequelle gar keine oder eine nur sehr geringe elektrische Leistung nach außen abgegeben hat, obwohl im Stromkreis ein sehr hoher Strom floß. Von der an und für sich hohen Leerlaufspannung U_o an den Klemmen blieb herzlich wenig übrig.

Die sich am Innenwiderstand R_i aufbauende Spannung U_i kann man auch als „Verlustspannung" bezeichnen, denn sie steht ja für den Verbraucher nicht zur Verfügung. Entsprechend kann die elektrische Leistung, die sich aus R_i und der „Verlustspannung" U_i errechnen läßt, als „Verlustleistung" bezeichnet werden. Sie geht im Innern der Batterie oder des Netzgerätes verloren. (Bei der Batterie wird sie nur zum Teil, beim Netzgerät praktisch ganz in Wärme umgesetzt.)

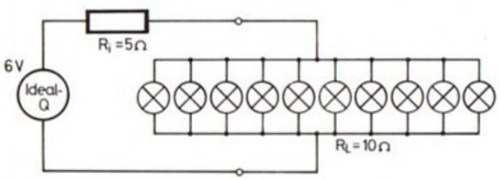
Die von dem Innenwiderstand einer Energiequelle aufgenommene Leistung wird als „Verlustleistung" bezeichnet.



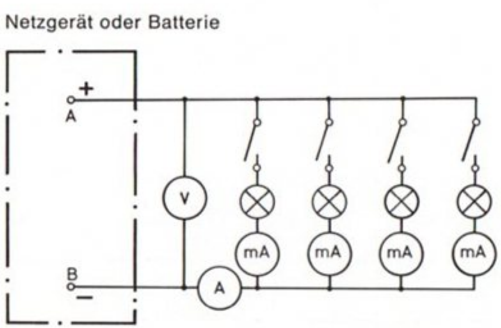
7.11



7.12



7.13



7.14

Elektrische Stromkreise baut man aber nicht dazu auf, damit eine möglichst hohe Verlustleistung entsteht. Soll z. B. mit einer Batterie eine Lampe zum Leuchten gebracht werden, so ist man daran interessiert, daß die elektrische Verlustleistung so klein wie möglich im Vergleich zur elektrischen „Nutzleistung", die in der Lampe in Licht und Wärmeleistung umgesetzt wird, ist. Auch hier interessiert wiederum nicht die absolute Größe der Verlustleistung, sondern das Verhältnis von Verlust- zur Nutzleistung (Bild 7.11).

Betrachten wir diesen Fall einmal näher: Schalten wir einen aktiven Zweipol, z. B. 4 Zellen mit $U_0 = 6$ V und $R_i = 5\ \Omega$, mit einem passiven Zweipol zusammen. Es sind zwei Extremfälle denkbar; beide sind schon besprochen. Entweder ist:

$$R_i \gg R_L \text{ oder } R_i \ll R_L$$

(In Worten: „R_i bedeutend größer als R_L" oder „R_i bedeutend kleiner als R_L".)

Das Bild 7.12 zeigt den ersten Fall. Hier ist die Verlustspannung (0,3 V) klein und kann gegenüber der Klemmenspannung (5,7 V) ohne weiteres vernachlässigt werden. Die „an den Klemmen abgenommene" Nutzleistung $P_N = U_L^2/R_L$ ist in diesem Fall $5{,}7^2 : 100 = 0{,}32$ W. Die Verlustleistung ist dagegen gleich $0{,}3^2 : 5 = 0{,}02$ W.

Schaltet man – in Gedanken nach Bild 7.13 – 10 solche Lampen in Parallelschaltung an die Quelle, so ist deren Gesamtwiderstandswert 10 Ω. Wie hoch ist in diesem Fall die Klemmenspannung? Und wie groß die elektrische Leistung, die die Glühlampen zusammen aufnehmen? Und die Verlustleistung? Sie können ausrechnen, daß dann auf jede der 10 Lampen eine Nutzleistung von nur 0,16 W (gegen 0,32 W bei nur einer angeschalteten Lampe) entfällt. Die Leistungsaufnahme pro Lampe fällt also mit steigender Anzahl von Lampen (siehe auch Kap. 6.6)!

Versuch

Bitte überzeugen Sie sich durch einen Versuch nach Bild 7.14 davon, wie stark die Gesamtnutzleistung zunimmt und die Nutzleistung der einzelnen Lampen abnimmt. Wenn Sie noch einige zusätzliche Lampen aus e-m- oder hobby-3-Baukästen besitzen, sollten Sie auch diese noch dazuschalten.

Sie können sich vielleicht eine Tabelle zum Eintragen der Spannung an den Klemmen A und B sowie der Ströme und der berechneten Nutzleistungen selbst herstellen.

7.8 Widerstandsanpassung

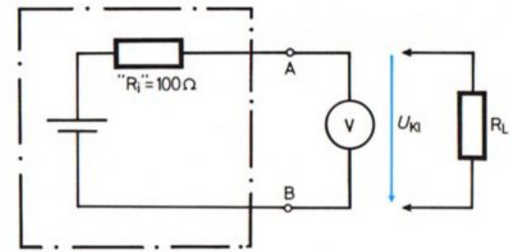
Sie haben sich durch den vorigen Versuch überzeugt, daß zwar die Nutzleistung pro Lampe mit zunehmender Anzahl von Lampen fällt, die Gesamtnutzleistung jedoch mit zunehmender Anzahl von Lampen steigt. Andererseits wissen Sie aber auch, daß die Gesamtnutzleistung zu Null wird, wenn Sie R_L zu 0 machen, also die Klemmen kurzschließen. Daraus ergibt sich folgender Gedankengang: Würde man im Versuch 7.13 immer noch mehr Lampen anschalten, so wird von einer bestimmten, aber zunächst nicht bekannten, Anzahl von Lampen ab die Gesamtnutzleistung nicht mehr zu-, sondern abnehmen. Bei unendlich vielen Lampen, d. h. bei $R_L = 0$, würde überhaupt keine Nutzleistung mehr abgegeben. Wo liegt der Punkt, an dem das Maximum an Leistung aus der Batterie entnommen werden kann? Mit Hilfe eines Tricks können wir diesen Punkt ermitteln.

Versuch

Als für diesen Spezialzweck ideale Spannungsquelle dürfen wir eine Batterie oder das Netzgerät ansehen, wenn wir den Innenwiderstand dieser Quelle künstlich auf etwa 100 Ω vergrößern. Dann fällt nämlich der wirkliche Innenwiderstand von einigen wenigen Ohm nicht mehr ins Gewicht. Bild 7.15 zeigt uns die Anordnung. Der eigentliche Innenwiderstand der Batterie bzw. der des Netzgerätes wurde dabei vernachlässigt und gar nicht eingezeichnet.

Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung U_o. Dann ermitteln Sie für die in der Tabelle 7.16 angegebenen Lastwiderstände R_L die Klemmenspannung U_{Kl} und den Strom I.

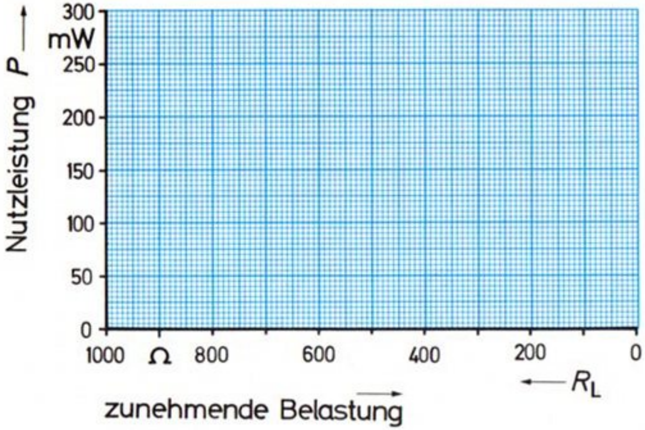
7.15



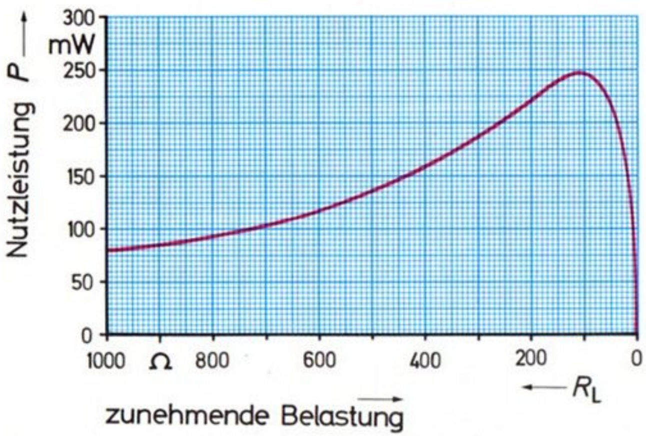
Quelle mit 100-Ω-Innenwiderstand

7.16

R_L in Ω	U_{Kl} in V	I in mA	$P_N = U_{Kl} \cdot I$ in mW
0	$U_o =$	0	0
10			
33 48 (33+10+4,7) 82 (100 ‖ 470) 91 (100 ‖ 1000)			
100			
110 (100+10) 133 (100+33) 200 (100+100) 320 (470 ‖ 1000)			
1000			



7.17



7.18

Nun rechnen Sie die an den Klemmen A und B Ihrer Quelle abgenommene elektrische Nutzleistung P_N, also die Leistungsaufnahme des jeweils angeschlossenen Lastwiderstandes, aus. Diese Werte tragen Sie in das Koordinatennetz 7.17 ein. Sie müssen eine Kurve ähnlich Bild 7.18 erhalten. Die Höhe Ihrer Kurve stimmt mit der Höhe in Bild 7.18 nur dann überein, wenn Sie zufälligerweise eine Leerlaufspannung von 10,0 V gewählt hatten.

Vielleicht zeichnen Sie in das Bild 7.18 die Leistungskurve ein, wenn in Ihrem Versuch eine ideale Spannungsquelle mit $R_i = 0$ zur Verfügung gestanden hätte. (Sie wissen natürlich, daß es diese nicht gibt, und bei Betrachtung dieser idealen Kurve wird Ihnen auch klar, daß es sie nicht geben kann. Denn der Strom müßte bei Kurzschließen der Quelle ja unendlich groß sein.)

Ergebnis

Aus dem Diagramm ersehen Sie, daß die Batterie die höchste Nutzleistung abgibt, wenn der Lastwiderstand genau so groß wie der Innenwiderstand ist. Deshalb nennt man diesen Zustand auch „Widerstandsanpassung". Und das ist das Gleiche wie „Leistungsanpassung".

Diese Betrachtungen werden Ihnen vielleicht wenig sinnvoll erscheinen, denn wer belastet seine Energiequelle schon so stark, daß an den zugänglichen Klemmen nur die halbe Leerlaufspannung zur Verfügung steht! Solange Sie an Glühlampen, Heizkörper u. ä. Geräte denken, stimmt Ihre Überlegung natürlich. In der Elektronik dagegen spielt die Leistungsanpassung oft eine sehr große Rolle. Sie werden mit dieser Ihnen zunächst als recht unsinnig erscheinenden „Widerstandsanpassung" beim hobby-Labor 3 noch ausführlich Bekanntschaft machen.

7.9 Die Alterung von Batterien

Frische Mono- und sonstige Zellen sowie neue Flachbatterien haben im allgemeinen einen kleinen Innenwiderstand. Bei Kurzschluß fließt deshalb ein sehr hoher Kurzschlußstrom I_k, wie Sie schon festgestellt haben. Er kann bei Monozellen für Motorantriebe sogar über 10 A liegen!

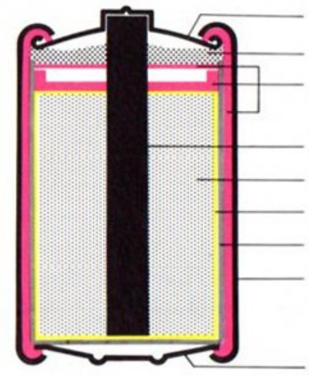
Ganz am Anfang dieses Buches wurde kurz dargelegt, daß die Spannung, welche die freien Elektronen zum Fließen bringt, durch chemische Reaktionen im Innern der Zellen erzeugt wird. Dabei „verbrauchen" sich manche der an den Reaktionen beteiligten Stoffe. Der Widerstand, den die Elektronen auf ihrem Weg durch die Zelle überwinden müssen, wird dabei immer größer.

Mit anderen Worten: Der Innenwiderstand einer Batterie steigt während ihrer ganzen „Lebensdauer" an. (Bei Netzgeräten bleibt er jedoch konstant.) Je länger eine chemische Spannungsquelle „gebraucht", d. h. belastet wurde, um so größer wird ihr Innenwiderstand R_i. (Sollten Sie bereits bei der Messung an Batterien neue und auch bereits gebrauchte Batterien desselben Typs untersucht haben, so können Sie jetzt mit Zahlen aufwarten.) Im „hohen Alter" messen wir an Batterien auch im Leerlauf nur noch eine kleine Spannung.

Den Techniker interessiert nicht so sehr, warum das so ist – er findet sich mit dem Alterungsvorgang ab, versucht aber, das Beste daraus zu machen. Das geht natürlich nur, wenn er weiß, wie sich bei den verschiedenen Batterietypen Spannung und Innenwiderstand im Laufe der Zeit (Alterung) durch Belastung oder allein als Folge der Lagerzeit verhalten. Am liebsten sind ihm Diagramme, aus denen er das Nötigste entnehmen kann.

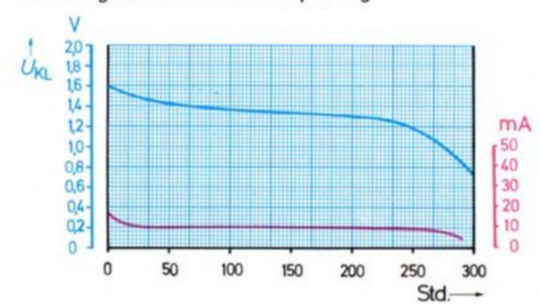
Schauen wir uns einmal solch ein Diagramm an; Bild 7.20 zeigt eines für eine Babyzelle.

An diese Zelle wurde ein Belastungswiderstand von 150 Ω gelegt und die Klemmenspannung sowie der durchfließende Strom laufend gemessen. Falls Sie den Versuch selbst ausführen wollen: Ihre Werte können auch etwas anders ausfallen, als das Bild es zeigt.



7.19

Belastung mit 150 Ω bei 6 Std. pro Tag



7.20

Der Einfachheit halber ist in das Diagramm 7.20 nicht nur der Verlauf der Klemmenspannung „über der Zeit“, sondern auch die Stromstärke eingetragen. („Über der Zeit“ heißt, daß auf der waagerechten Achse des Koordinatensystems die Zeit und auf der senkrechten Achse Spannungs- und Stromwerte aufgetragen sind.) Zur Unterscheidung gilt für die Spannung die blaue Kurve und der blaue Spannungsmaßstab, für die Stromwerte ist die rote Farbe gewählt. Zur leichteren Übersicht ist der Strommaßstab nicht links, sondern rechts angegeben.

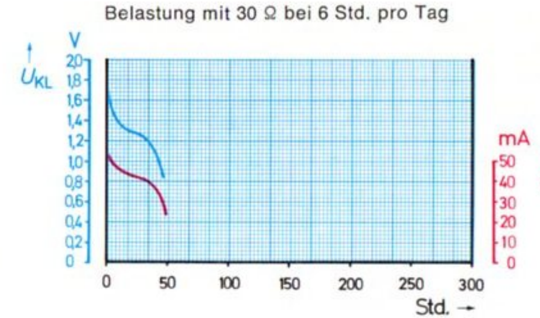
Aus dem kombinierten Spannung/Zeit- und Strom/Zeit-Diagramm ersieht man, daß die Spannung ganz am Anfang der Untersuchung etwas abnimmt und dann über den größten Teil der „Lebensdauer“ der Batterie annähernd konstant bleibt. (Es gibt auch Batterietypen, bei denen diese Konstanz noch viel größer ist.) Auch der Strom bleibt über viele Stunden fast konstant. Dann jedoch nehmen Spannung und Strom schnell ab – die Batterie ist nicht mehr brauchbar.

Die Belastung war bei der Aufnahme des Diagramms 150 Ω; es fließt also verhältnismäßig wenig Strom. Gilt dieses Diagramm auch, wenn der Wert des Lastwiderstandes viel kleiner und damit die Belastung entsprechend höher ist? Diagramm 7.21 gibt uns darüber Auskunft. R_L beträgt jetzt 30 Ω.

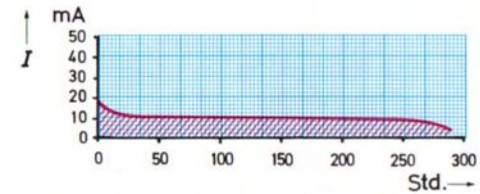
Die Klemmenspannung ist – wie zu erwarten – etwas kleiner, weil die Stromstärke größer und der „Spannungsverlust“ an R_i deshalb höher ist. „Und wie steht es mit der Leistung?“, werden Sie fragen. Gemeint haben Sie aber wohl nicht die elektrische Leistung, also das Produkt aus Spannung und Strom, sondern die „Leistungsfähigkeit“ der Batterie.

Auch das ist noch nicht genau ausgedrückt: Sie wollten – ganz vereinfacht – wissen, ob eine angeschaltete Lampe tatsächlich 10mal so lange leuchtet wie 10 parallel geschaltete Lampen des gleichen Typs. (Exakt ist danach gefragt, ob die elektrische [Nutz-]Arbeit, die die Batterie „verrichten“ kann, in beiden Fällen die gleiche ist.)

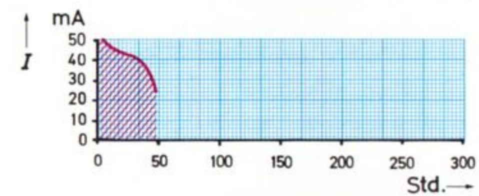
Sie erinnern sich: Die elektrische Arbeit ist das Produkt aus Spannung, Strom und Zeit. Verzichten wir auf die Rechnung, denn die Spannungs- und auch die Stromkurve bilden keine Geraden; die Rechnung wäre also schwierig und zeitraubend. Begnügen wir uns mit dem Produkt aus Strom und Zeit, denn die Spannung ändert sich mit der Größe der Belastung und mit der Lebensdauer noch am wenigsten.



7.21



7.22



7.23

Den Strom mißt man in Ampere (A), die Zeit in Stunden (h). Das Produkt gibt: Amperestunden; abgekürzt „Ah“. Diese Angabe kennen Sie zwar nicht von Monozellen oder Taschenlampenbatterien, wohl aber von Autobatterien.

Bei unserer Babyzelle müssen wir mit kleineren Maßeinheiten arbeiten; statt mit Ah rechnen wir mit Milliamperestunden „mAh“. Und jetzt kommt das Angenehme der Sache: Wir brauchen die Milliamperestunden nicht mühsam auszurechnen; in dem Diagramm sind sie bereits enthalten. Sie sind nämlich jeweils gleich der Fläche unter der Stromkurve. In den Bildern 7.22 und 7.23 sind die beiden Belastungsfälle nochmals dargestellt und zusätzlich die Fläche unter der Stromkurve schraffiert.

Wenn Sie der Vergleich der beiden Flächen interessiert, hier ist das Ergebnis: Bei der stärkeren Belastung gibt die Batterie nur ungefähr 80 % (wovon?) her.

7.10 Batterieprüfung

Auch wenn Sie selbst keinen der besprochenen Versuche durchgeführt haben sollten, ist Ihnen aus dem Text und den Diagrammen klar geworden, daß die „Prüfung“ einer Batterie bei Leerlauf, also lediglich durch Anschalten eines Spannungsmessers, fast nichts aussagt. Zumindest sollte man ein Prüflämpchen benutzen. Wer ganz sicher gehen will, wird die Belastung für Monozellen anders wählen als für Mignonzellen. Im ersten Fall wird er vielleicht 4,7 Ω kurzzeitig anschalten, im zweiten Fall vielleicht 33 Ω.

Sammeln Sie Erfahrungswerte! Tragen Sie die Ergebnisse der Messung an allen neu gekauften Batterien in die Liste 7.24 ein. Sie können übrigens beim Kauf von Batterien blaue Wunder erleben, wenn Sie sie zu Hause auf „Spannung unter Last“ prüfen. Batterien „altern“ nämlich auch, wenn sie gar nicht gebraucht werden. Mancher Ladenhüter, der im Geschäft noch forsch die aufgedruckte Leerlaufspannung „von sich gab“, vielleicht auch noch die Prüfung mit dem Lämpchen überstand, geht unter Last ganz erbärmlich „in die Knie“. Man sollte Batterien genau wie Lebensmittel immer dort kaufen, wo sie nicht zu lange liegen.

Und noch ein Hinweis: Auch die beste Batterie geht einmal hinüber. Dann sollte sie möglichst gleich aus dem Gehäuse, in dem sie gelagert war, entnommen werden. Sonst besteht die Gefahr, daß entweder das Gehäuse durchgefressen wird oder die Batterie von innen her aufquillt und dann nicht mehr entfernt werden kann. Das letztere ist unter Umständen auch der Fall, wenn die Batterien versehentlich längere Zeit kurzgeschlossen bleiben. Wie gesagt, das muß nicht sein, aber es kann vorkommen.

7.24

Batterietyp Kaufdatum	U_0 in V	R_L in Ω	U_{Kl} in V

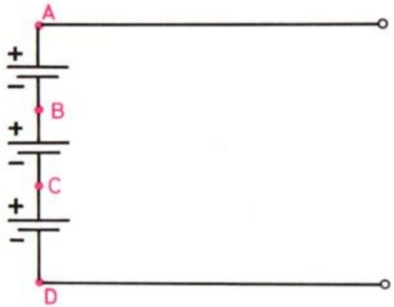
7.11 Zusammenschaltung von Spannungsquellen

7.11.1 Reihenschaltung

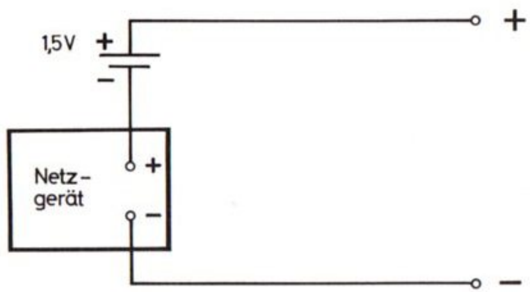
Darüber braucht eigentlich nicht mehr viel gesagt zu werden, denn die Reihenschaltung von Einzelzellen haben Sie schon oft vorgenommen, z. B. beim Einsetzen von Babyzellen in den fischertechnik-Batteriestab (siehe Bild 7.25).

Wichtig war dabei, daß der (+)Pol der ersten Quelle mit dem (–)Pol der nächsten Quelle verbunden wurde. Es mußten also immer (+)Anschlüsse und (–)Anschlüsse „zusammenstoßen".

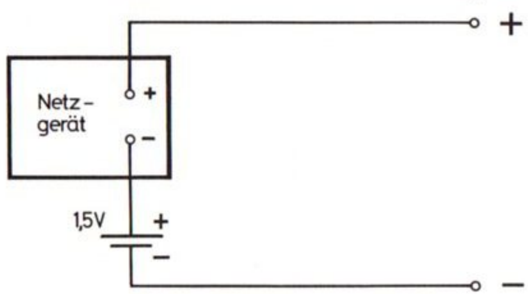
Sie dürfen auch die Gleichspannungsbuchse des Netzgerätes in Reihe zu einer Babyzelle schalten. Wenn Sie die angegebene Regel beachtet haben, erhalten Sie die Schaltung nach Bild 7.26 oder die nach Bild 7.27. Die gemessene Spannung ist auf alle Fälle um 1,5 V höher als die, die Sie am Netzgerät für sich allein messen.



7.25



7.26



7.27

Nur eines dürfen Sie nicht, nämlich die Gleichspannungs- und Wechselspannungsquelle des Netzgerätes in Reihe schalten! (Sie sind im Innern miteinander in einer bestimmten Form „verknüpft", die eine solche Reischaltung nicht verträgt.)

Bei Reihenschaltung von Quellen müssen stets die (+)Pole mit den (–)Polen verbunden werden.

Fragen

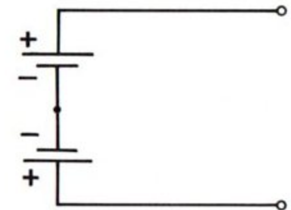
Erinnern Sie sich an das Thema Potential und Potentialdifferenz? Welches Potential (positiv oder negativ) hat der Punkt A in der Schaltung 7.25 gegenüber dem Punkt D, wenn alle Zellen eine Spannung von 1,5 V haben? Wie groß ist die Potentialdifferenz? Wie beurteilt man den Punkt D vom Punkt B aus? Und wie den Punkt B von Punkt C aus?

7.11.2 Gegeneinanderschaltung

Gegeneinanderschaltungen haben Sie sicher auch schon unabsichtlich verwirklicht, wenn Sie eine oder mehrere Zellen „falsch herum“ in den Batteriestab einlegten. (Legen Sie alle „falsch herum“ ein, so hat die Batterie zwar die falsche Polung, aber Sie haben die einzelnen Zellen nicht gegeneinander geschaltet.)

Das Prinzip zeigt Bild 7.28. Welche Spannung werden Sie an den Klemmen messen, wenn Sie zwei 1,5-V-Batterien gegeneinander schalten? Und welche, wenn Sie das Netzgerät und eine 1,5-V-Batterie gegeneinanderschalten? Probieren Sie es ruhig aus, und messen Sie die sich ergebende Spannung. Untersuchen Sie auch die Schaltung 7.29 mit 3 Zellen.

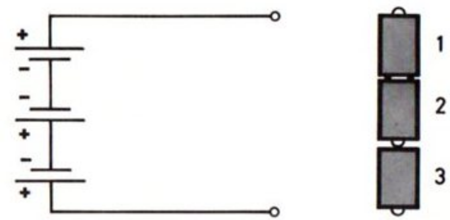
Die Gegeneinanderschaltung ist zwar bei Batterien wenig sinnvoll, aber es gibt Anwendungen für dieses Prinzip.



7.28

Frage

Wo muß übrigens die (+)Buchse des Spannungsmessers in der Schaltung 7.29 angeschlossen werden, wenn das Voltmeter auf Anhieb richtig ausschlagen soll – an den Zentralkontakt der Zelle 1 oder an den der Zelle 3?

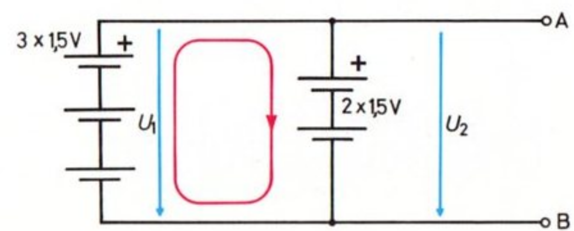


7.29

7.11.3 Parallelschaltung

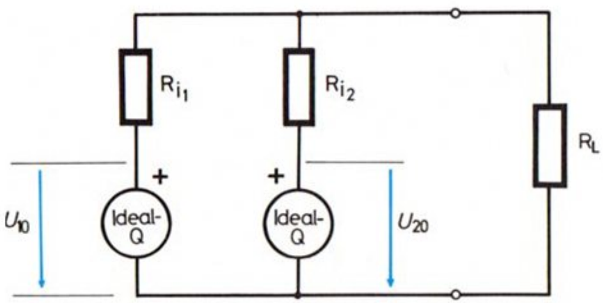
Daß man mit der Parallelschaltung von Quellen mit ungleicher Spannung gewaltiges Unheil anrichten kann, ist Ihnen vielleicht nicht geläufig, aber es ist so! Betrachten Sie bitte das Bild 7.30.

Die Spannung der linken Quelle treibt wegen der Spannungsdifferenz von 1,5 V Strom durch die rechte Quelle! Das hat der Erfinder dieser Fehlschaltung sicher nicht gewollt. Sind R_{i1} und R_{i2} klein, fließt „jede Menge“ Strom, obwohl an die äußeren Klemmen der Parallelschaltung A und B gar nichts angeschlossen ist.

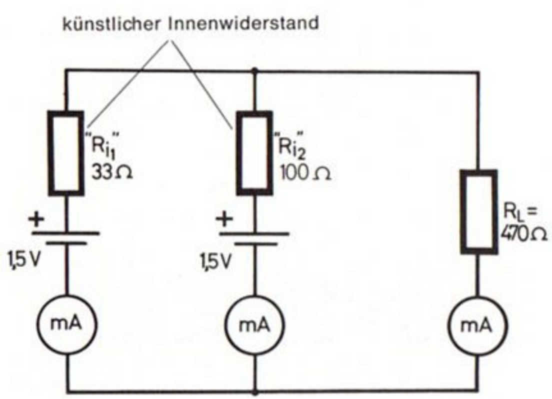


7.30

Batterien dürfen nur dann parallel geschaltet werden, wenn Ihre Leerlaufspannung U_0 genau gleich hoch ist.



7.31



7.32

Haben beide Quellen jedoch gleich hohe Leerlaufspannung, dann dürfen Sie parallelschalten. Vorsichtshalber sollten Sie die Parallelschaltung jedoch „auftrennen“, wenn Sie den Lastwiderstand R_L nach Bild 7.31 abtrennen, denn die Bedingung $U_{10} = U_{20}$ (das heißt nicht U zehn bzw. U zwanzig, sondern U eins-null bzw. U zwei-null und bedeutet U_1 bzw. U_2 im Leerlauf) muß genau eingehalten werden, damit kein Strom fließt. Diese Bedingung ist jedoch bei Batterien unterschiedlichen Alters nie genau erfüllt.

Sind beide Leerlaufspannungen genau gleich hoch, dann verhalten sich die Batterieströme der Batterie 1 und der Batterie 2 zueinander umgekehrt wie die Innenwiderstände R_i. Die „leistungsfähigere“ Batterie (mit dem kleinen Innenwiderstand) trägt mehr zur Lieferung des Gesamtstroms bei als die schwächere (mit dem größeren Innenwiderstand).

Versuch

Überzeugen Sie sich, indem Sie die Schaltung 7.32 verwirklichen. Messen Sie die Ströme.

Hätten Sie Batterien mit kleineren „Innenwiderständen“ gewählt, dann würden Ihre Meßergebnisse ganz falsch sein; denn beim Einschalten des Strommessers in die Leitung schalten Sie ja jeweils einen Widerstand von 5 Ω (beim Meßbereich 100 mA) dazu. Und das würde zu Fehlmessungen führen.

7.12 Das Strom/Spannungs-Diagramm einer Quelle

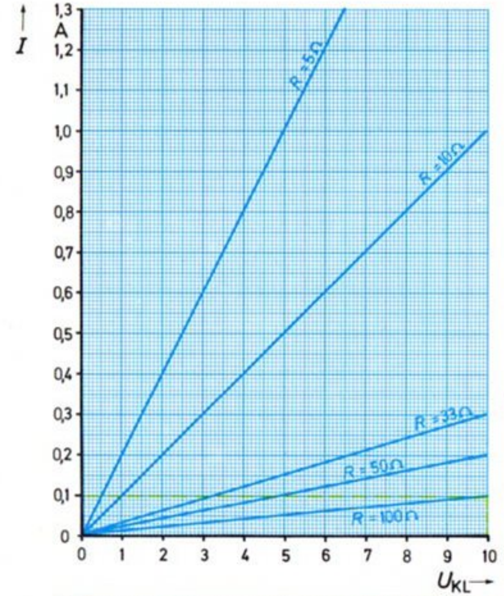
Wer nicht gerne berechnet, wie hoch in einem Stromkreis mit einer idealen Quelle und bekanntem Innenwiderstand (als aktivem Zweipol) einerseits und einem „Verbraucher“, z. B. einem einfachen Lastwiderstand R_L (als passivem Zweipol) andererseits, die an den Klemmen zur Verfügung stehende Spannung ist und welcher Strom dann fließt, arbeitet wieder mit einem Strom/Spannungs-Diagramm. Dieses wollen wir zunächst konstruieren und dann anwenden.

Konstruktion

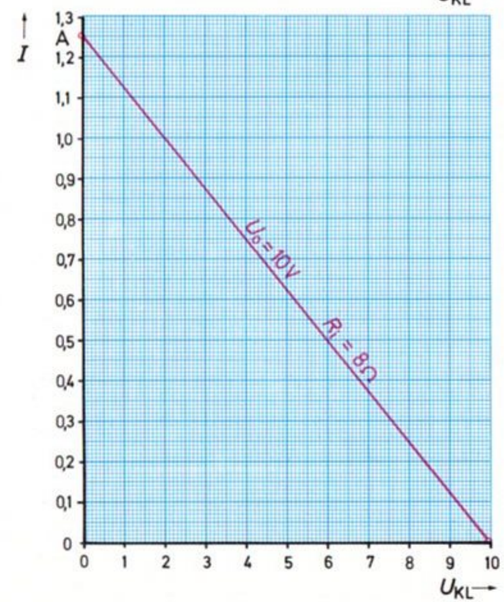
Bild 7.33 zeigt ein vom Abschnitt 2.10.2 bekanntes Strom/Spannungs-Diagramm mit mehreren Widerstandsgeraden. (Der einzige Unterschied: Es ist ein anderer Strommaßstab gewählt.) Jeder dieser durch eine Gerade dargestellten Widerstände könnte als „Verbraucherwiderstand“ an die Quelle angeschaltet werden.

Hätten wir eine ideale Quelle, z. B. eine mit 10 V Spannung, so könnten wir im Schnittpunkt der jeweils zutreffenden Widerstandsgeraden mit der senkrechten Linie, die durch den Punkt 10 V geht, die Stromstärke ablesen. Bild 7.33 zeigt diese Methode. Sie ermitteln z. B. für $R_L = 100\ \Omega$ einen Strom von 100 mA. Wie groß wäre die Stromstärke für $R_L = 33\ \Omega$?

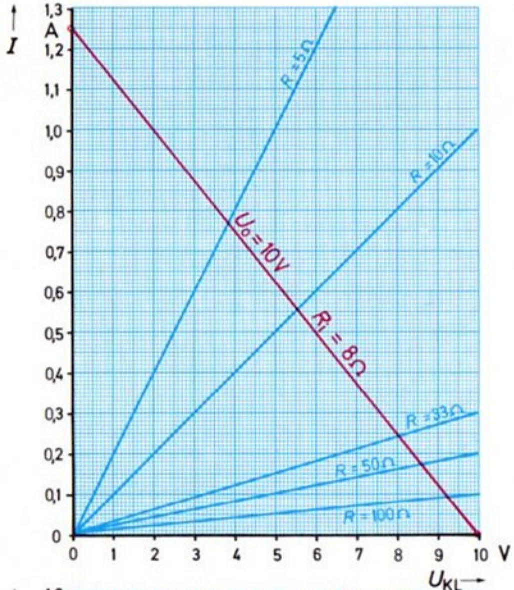
Leider gibt es diese ideale Spannungsquelle nicht. Trotzdem können wir uns helfen! Wir tragen nämlich die Kennlinie für den Innenwiderstand in das Diagramm mit ein und berücksichtigen sie beim Ablesen. Bild 7.34 zeigt, wie das gemacht wird: Nehmen wir an, der Innenwiderstand sei etwa 8 Ω. (Dies trifft annähernd für das ft-Netzgerät zu.) Wir sind in unserem Beispiel davon ausgegangen, daß $U_o = 10$ V ist. Unsere Kennlinie muß also auf alle Fälle durch den Punkt 10 V auf der waagerechten Spannungsachse gehen, wenn kein Strom fließt (also $I = 0$).



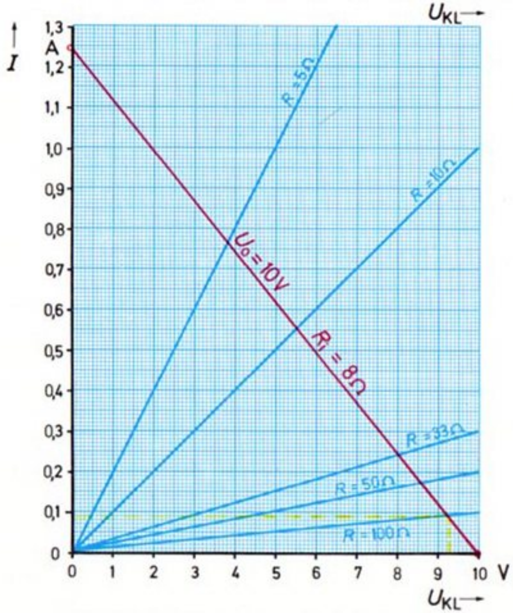
7.33



7.34



7.35



7.36

Der andere zu ermittelnde Punkt, durch den die Kennlinie gehen muß, ist gegeben durch $U_{Kl} = 0$, also bei Kurzschluß der Klemmen. Da wir bei $R_i = 8\ \Omega$ und $U_o = 10$ V einen Kurzschlußstrom von $I_k = 10 : 8 = 1{,}25$ A erhalten, ist der zweite Koordinatenwert des gesuchten Punktes ermittelt. Seine Lage im Strom/Spannungs-Diagramm zeigt Bild 7.34.

Jetzt müssen wir nur noch die beiden ermittelten Punkte miteinander verbinden, um die Kennlinie für den Innenwiderstand der Quelle zu erhalten (Bild 7.34).

Was sagt nun ein solches Diagramm?

Es gibt Auskunft darüber, wie groß die Klemmenspannung U_{Kl} und der Strom im Stromkreis sind, wenn irgendein Belastungswiderstand R_L an die Klemmen angeschaltet wird. Das gezeichnete Diagramm 7.35 kann natürlich nur für eine Batterie oder ein Netzgerät mit $U_o = 10$ V und $R_i = 8\ \Omega$ benutzt werden.

Wir werden auf diese Art der Kennliniendarstellung für einen Spannungsteiler aus Innen- und Lastwiderstand im Kap. 9.5 noch einmal zurückkommen.

Anwendungsbeispiel

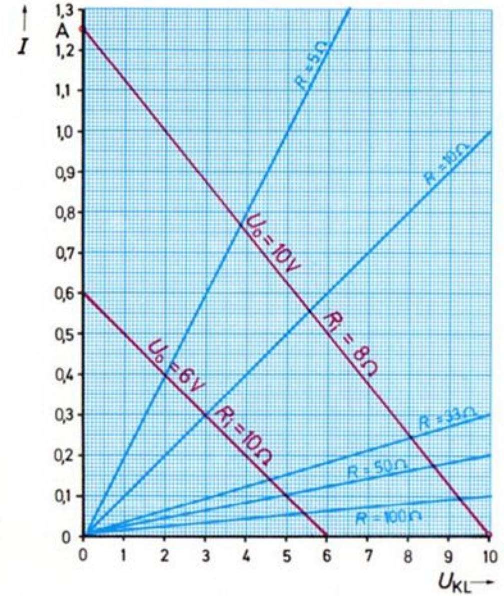
Wie groß ist die Klemmenspannung U_{Kl} und der Strom I, wenn an dieses Netzgerät (in der Drehknopfstellung für $U_o = 10$ V) ein Widerstand von 100 Ω angeschaltet wird? Wie Bild 7.36 zeigt, liegt der „Arbeitspunkt" bei $I = 0{,}093$ A = 93 mA und $U_{Kl} = 9{,}2$ V. Ermitteln Sie bitte den Wert für $R_L = 33\ \Omega$!

Im Bild 7.37 ist zusätzlich zu der schon ermittelten Kennlinie eine weitere für eine Spannungsquelle mit $U_o = 6$ V und $R_i = 10\ \Omega$ eingezeichnet. Sie muß bei $U_{Kl} = 6$ V beginnen und (wegen $R_i = 10\ \Omega$) flacher verlaufen.

Versuch

Ermitteln Sie bitte die Leerlaufspannungen und Kurzschlußströme für einige Drehknopfstellungen Ihres Netzgerätes oder für eine 4,5-V-Batterie aus Babyzellen. Zeichnen Sie damit die Kennlinien des Netzgerätes bzw. dieser Batterie in das Bild 7.37 ein. Ermitteln Sie Klemmenspannung und Strom, wenn Sie an die nun im Verhalten bekannten Stromquellen einen Widerstand von 100 Ω anschalten – einmal durch Messung von Strom und Spannung und zum anderenmal durch Ermittlung der Werte im Kennlinienfeld.

7.37



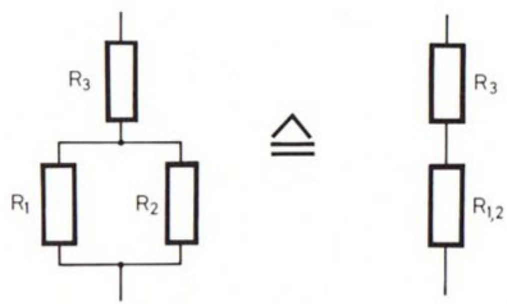
8 Gemischte Schaltungen

Das sind Schaltungen, in denen die Bauelemente sowohl durch Reihen- als auch durch Parallelschaltung miteinander verbunden sind. Sie gehören zum „elektronischen Alltag“ – und deswegen wollen wir ihr elektrisches Verhalten näher untersuchen.

8.1 Parallelschaltung mit Vorwiderstand

Zunächst wollen wir uns einer Widerstandskombination zuwenden, die in der Elektronik eine ganz große Rolle spielt. Es handelt sich um die im Bild 8.1 dargestellte Zusammenschaltung von 3 Widerständen. Sie besteht aus der Parallelschaltung $R_1 \parallel R_2$, die mit R_3 in Reihe liegt.

Fassen wir $R_1 \parallel R_2$ zu einem einzigen Widerstand $R_{1,2}$ (sprich R eins zwei) zusammen, dann ergibt sich der uns schon vertraute Spannungsteiler mit den Widerständen $R_{1,2}$ und R_3. Damit können Sie die Schaltung berechnen, wenn Sie die Parallelschaltung durch einen einzigen Widerstand „ersetzen“. (Ihre Schaltung enthält diesen Widerstand natürlich nicht wirklich.) Dann ergibt sich der Gesamtwiderstand aus der Summe dieses „Ersatzwiderstandes“ und des Vorwiderstandes R_3. Machen wir einige Versuche, um zu sehen, wie sich eine solche Schaltung verhält.



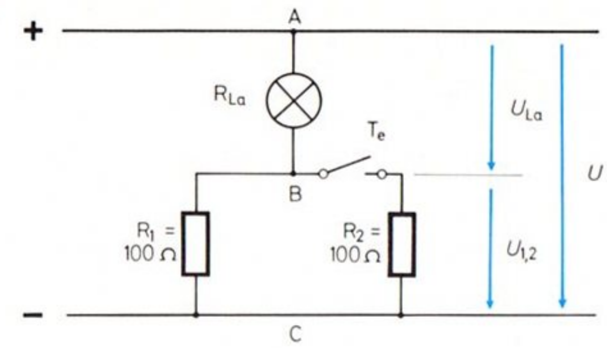
8.1

1. Versuch

Eine Lampe ist nach Bild 8.2 in Reihe mit einem 100-Ω-Schichtwiderstand geschaltet. Über den Ein-Taster T_e kann R_2 zugeschaltet werden. Für R_2 setzen Sie bitte zuerst einen 100-Ω-, danach den 33-Ω-Schichtwiderstand ein. Immer, wenn R_2 durch den Ein-Taster T_e (oder durch „Stecken“) zugeschaltet wird, ändert sich die Helligkeit der Lampe.

Bevor Sie die in Tabelle 8.3 angegebenen Messungen durchführen, sollten Sie sich noch überlegen, ob die Teilspannung zwischen den Punkten B und C ($U_{1,2}$) kleiner oder größer wird, wenn Sie den Taster drücken. Steigt oder fällt U_{La} wenn $R_{1,2}$ kleiner wird? Vielleicht errechnen Sie auch noch die elektrische Leistung, die die Lampe in beiden Fällen aufnimmt und als Licht und Wärme wieder abgibt.

8.2



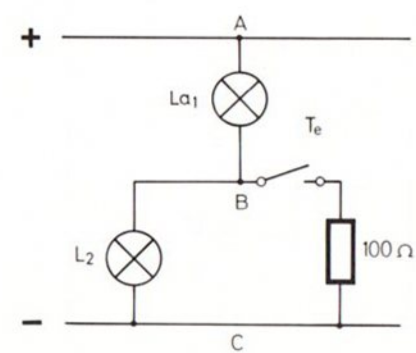
8.3

R_1 in Ω:	100	100	100
R_2 in Ω:	–	100	33
$R_{1,2}$ in Ω:	100	50	24,8
U in V			
$U_{1,2}$ in V			
U_{La} in V			
I in mA			
P_{La} in mW			

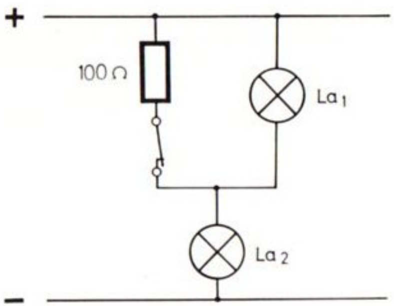
2. Versuch

Bauen Sie die Schaltung 8.4 auf. Überlegen Sie bitte, bevor Sie den Taster T_e drücken, ob nur eine Lampe (welche?) oder ob beide Lampen ihre Helligkeit ändern werden. Kreuzen Sie dann in der „Quiz-Tabelle“ 8.6 an, was Ihrer Meinung nach richtig ist.

Überlegen Sie aber zunächst folgendes: Wird der Wert des Widerstandes zwischen den Schaltungspunkten B und C durch die Zuschaltung von 100 Ω gleichbleiben, größer oder kleiner werden? Angenommen, er wird kleiner: wird damit auch die Teilspannung zwischen B und C kleiner oder wird sie größer? Was macht die Teilspannung an der Lampe La_1, wenn sich die Teilspannung an La_2 ändert? Wird sie größer, wenn die Teilspannung an La_2 größer wird, oder wird sie kleiner?



8.4



8.5

8.6

Bei Druck auf den Taster:		in Schaltung		
		8.4	8.5	8.7
ändert sich nichts				
ändert sich nur La$_1$				
ändert sich nur La$_2$				
ändern sich La$_1$ und La$_2$				
wird La$_1$	dunkler			
	heller			
wird La$_2$	dunkler			
	heller			
leuchtet La$_1$ nicht				
leuchtet La$_2$ nicht				

3. Versuch

Der letzte Versuch hat gezeigt, daß bei Zuschalten eines Parallelwiderstandes zu einer Lampe beide Lampen ihre Helligkeit ändern. Die Lampe La$_1$ muß heller leuchten, die Lampe La$_2$ schwächer. Aber wie ist dies nun in der Schaltung 8.5? Hier wird nämlich ein Aus-Taster verwendet.

Sollten Sie noch keinen ft-Umschalttaster*, der auch als Ein- oder Aus-Taster benutzt werden kann, besitzen, so müssen Sie, anstatt den Aus-Taster zu drücken, einen Anschluß des 100-Ω-Widerstandes aus dem Exeperimentierfeld herausziehen.

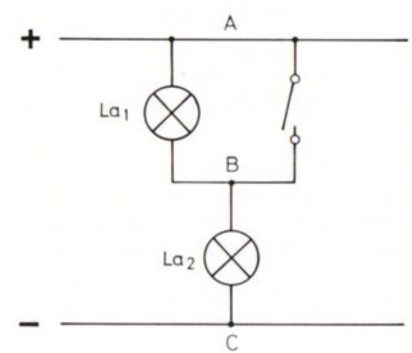
Wird der Aus-Taster gedrückt, also die Leitung unterbrochen, so wird die Parallelschaltung des 100-Ω-Widerstandes zur Lampe La$_1$ aufgehoben. Kreuzen Sie bitte vor dem Versuch die Antwort in Tabelle 8.6 an, die Sie für richtig halten.

---

* Umschalttaster und Polwendeschalter sind in dem Zusatzkasten e-m 3 bei Ihrem Service-Händler gesondert erhältlich.

4. Versuch

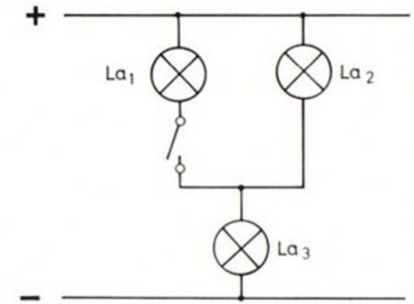
Bauen Sie nun die Schaltung 8.7 auf. Was passiert jetzt bei Druck auf den Ein-Taster? Machen Sie bitte vor dem Einschalten auch hier Ihr Kreuzchen in Tabelle 8.6 und überprüfen Sie dann durch den Versuch, ob Ihre Ansicht richtig war.



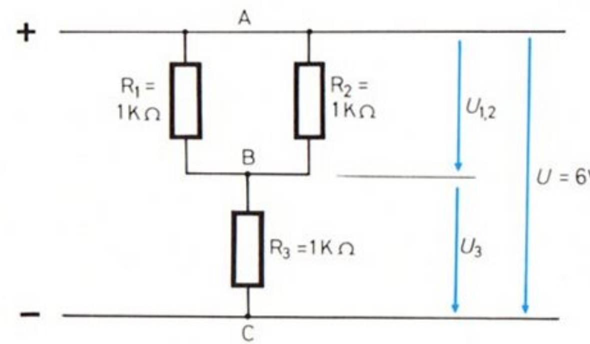
8.7

5. Versuch

Die Schaltung 8.8 besteht nur aus Lämpchen. Solange der Ein-Taster nicht gedrückt wird, sollten die Lampen La2 und La3 etwa gleich hell leuchten – genauso wie bei Schaltung 8.7. (Suchen Sie bitte passende Lämpchen aus.) Nehmen wir an, daß alle drei Lampen einen Widerstand von 100 Ω hätten – was natürlich nicht genau stimmt, wie wir von früher her wissen –, wie teilt sich dann nach Anschalten der drei Lampen die Gesamtspannung auf? Und wie ist die elektrische Gesamtleistung auf die Lampen verteilt? Zur exakten Messung ersetzen Sie die Glühlämpchen besser nach Bild 8.9 durch 1-kΩ-Schichtwiderstände. Deren Widerstandswert ist – im Gegensatz zu den Glühlampen – unabhängig vom durchfließenden Strom.



8.8



8.9

Ergebnis

Die Rechnung ergibt:

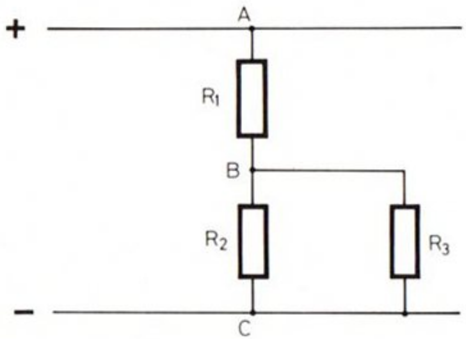
$$R = R_3 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 1000 + \frac{1000 \cdot 1000}{1000 + 1000} =$$
$$= 1000 + 500 = 1500\ \Omega$$

Bei einer Spannung von $U = 6$ V fließt ein Strom

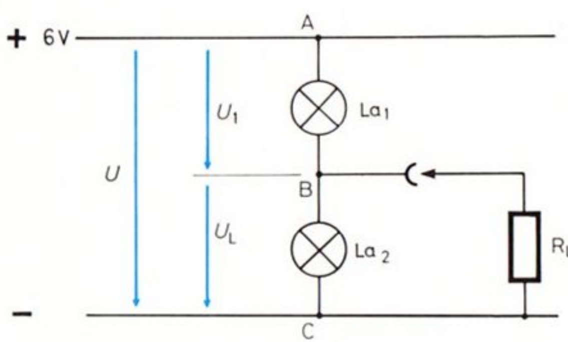
$$I = U : R = 6\ \text{V} : 1500\ \Omega = 0{,}004\ \text{A} = 4\ \text{mA}.$$
$$U_3 : U_{1,2} = R_3 : R_{1,2} = 1000 : 500 = 2 : 1$$

Das heißt, die Spannung an R_3 ist doppelt so hoch wie die an der Parallelschaltung von R_1 und R_2. Die Leistungsaufnahmen von R_3 einerseits und der Parallelschaltung $R_{1,2}$ andererseits verhalten sich wie die Teilspannungen, also wie 2 : 1. Da jeder der beiden Teilwiderstände R_1 und R_2 den gleichen Wert haben und beide zusammen nur die halbe Leistung wie R_3 aufnehmen, nimmt jeder von ihnen nur ein Viertel der Leistung von R_3 auf. Und das, obwohl alle Widerstände gleich groß sind!

Ebensogut können Sie sagen: Die Teilleistung an R_3 beträgt $^2/_3$ der Gesamtleistung, denn die Teilleistung P_3 verhält sich zur Gesamtleistung P wie der Teilwiderstand R_3 zum Gesamtwiderstand R, also wie 1000 : 1500 = 2 : 3. Das restliche Drittel der Gesamtleistung P teilt sich in zwei gleiche Teile, denn $R_1 = R_2$. Damit wird $P_2 = P_3 = {}^1/_6\,P$.



8.10



8.11

8.2 Der belastete Spannungsteiler

8.2.1 Vorversuch

Die zuletzt behandelten Schaltungen können auch als ein Spannungsteiler aufgefaßt werden, an dessen „Abgriff" ein Widerstand angeschaltet ist. Bild 8.10 zeigt dies in allgemeiner Form. Die Teilwiderstände R_1 und R_2 gehören zum Spannungsteiler, während der Widerstand R_3 an den „Abgriff" B–C angeschaltet ist. Beginnen wir diesen Abschnitt mit einem orientierenden Versuch. Der Sinn der Untersuchungen wird Ihnen im wahrsten Sinne des Wortes „einleuchten".

Versuch

Ihre Spannungsquelle (Bild 8.11) sollte mindestens 6 V haben, damit beide Lampen hell leuchten. Diese Gesamtspannung wird durch die beiden in Reihe geschalteten Lampen in etwa zwei gleich hohe Teilspannungen aufgeteilt. Schalten Sie nun bitte nacheinander folgende Widerstände an den „Abgriff" B–C des Spannungsteilers und beobachten Sie, wie sich die Helligkeit der beiden Lampen ändert: 1000 Ω – 470 Ω – 100 Ω – 50 Ω – 33 Ω – 10 Ω – 4,7 Ω.

Ergebnis

Beim Anschalten der größeren Widerstandswerte ändert sich nicht viel. Aber warum leuchtet die Lampe La_2 mit zunehmender Verkleinerung des angeschalteten Widerstandswertes immer weniger hell und die andere Lampe La_1 immer heller?

Das kann offensichtlich nur daran liegen, daß die Spannung an La_2 „in die Knie" geht, wenn man einen „zu kleinen" Widerstand an den Abgriff des Spannungsteilers schaltet. Jetzt muß aber geklärt werden, was in diesem Fall ein „zu kleiner" Widerstand ist.

8.2.2 Spannungsteiler aus Festwiderständen

Versuch

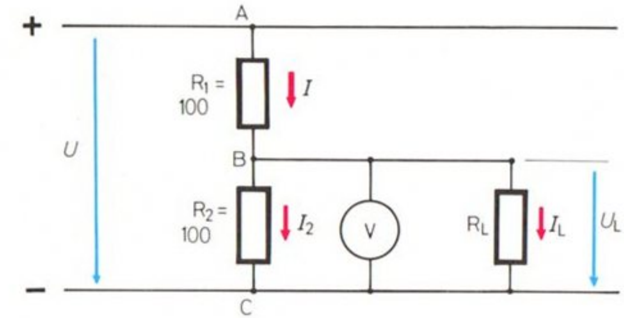
Nun wollen wir den „einleuchtenden" Versuch etwas weiter treiben. Wir ersetzen die beiden Lampen des leuchtenden Spannungsteilers aus Bild 8.11 durch die Reihenschaltung zweier 100-Ω-Widerstände nach Bild 8.12. Da wir jetzt keinen Indikator (= Anzeiger) mehr für den Zustand der Schaltung haben, müssen wir die Spannung U_L am Abgriff und die Gesamtspannung U messen.

Schalten Sie bitte der Reihe nach die in der Tabelle 8.13 angegebenen Widerstände an den Abgriff und messen Sie die Spannung U_L. Aus den in die Tabelle eingetragenen Meßwerten müssen Sie dann noch das Verhältnis $U_L : U$ ausrechnen.

Ergebnis

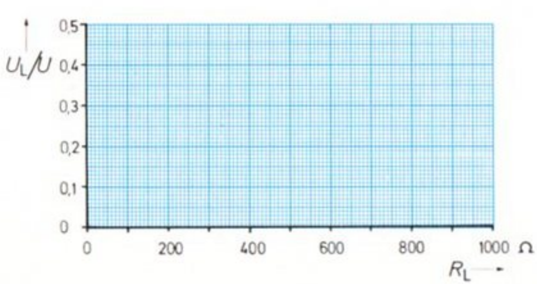
Tragen Sie nun in das Koordinatennetz 8.14 die gefundenen Werte für $U_L : U$ in Abhängigkeit vom Belastungswiderstand R_L ein. Sie werden ein Bild ähnlich 8.15 erhalten, in das die theoretischen Werte eingetragen sind. Aus beiden Diagrammen können Sie entnehmen, wie stark sich die Spannung am Abgriff in Abhängigkeit

8.12



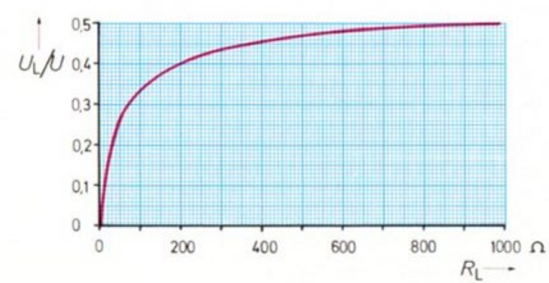
8.13

R_L in Ω	U_L in V	U in V	$U_L : U$
1000			
470			
200 (100+100)			
48 (33+10+4,7)			
33			
10			



8.14

8.15



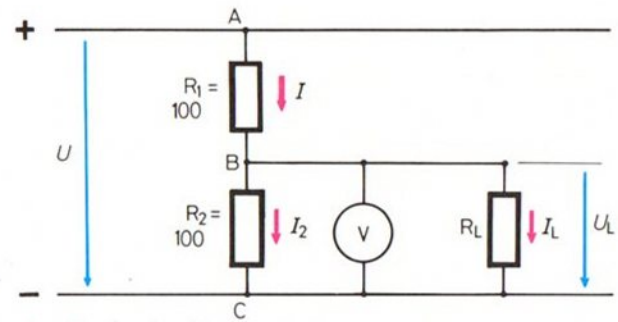
von der Belastung ändert. Wichtig ist für Sie vor allem die Erkenntnis, daß sich die Abgriffsspannung U_L – im Vergleich zur Abgriffsspannung bei Leerlauf des Spannungsteilers – um 10% ändert, wenn eine Last von 1000 Ω angeschaltet wird. Eine Änderung von 10% nimmt man im allgemeinen noch als tragbar hin. (Dies gilt für alle Spannungsteiler, an die keine besonderen Anforderungen gestellt werden.)

Ganz allgemein kann man sagen: Ist der an einen Spannungsteiler angeschaltete Lastwiderstand nicht mindestens 10mal größer als der „belastete“ Teil des Spannungsteilers, so sinkt die Abgriffsspannung so stark ab, daß man auf alle Fälle durch Messung überprüfen muß, ob sie für den beabsichtigten Zweck noch ausreicht.

Die Ströme durch einen belasteten Spannungsteiler

Betrachten Sie zum Schluß des Abschnitts noch die Ströme durch einen belasteten Spannungsteiler (Bild 8.16). Der Strom I, der durch den Widerstand R_1 fließt, teilt sich im Punkt B in die Teilströme I_2 und I_L. (Statt I können Sie auch I_1 schreiben). Sie wissen von der Parallelschaltung her, daß sich die Teilströme umgekehrt verhalten wie die Teilwiderstände. D. h., solange der Belastungswiderstand R_L einen großen Ohmwert gegenüber dem Teilwiderstand R_2 des Spannungsteilers hat, spielt die Stromteilung im Punkt B keine Rolle: Der Teilstrom durch den Belastungswiderstand kann vernachlässigt werden.

Dies gilt jedoch nicht mehr, wenn der Belastungswiderstand R_L in derselben Größenordnung liegt wie der Widerstand R_2, oder einen noch kleineren Widerstandswert hat.



8.16

Welche Folgen hat das nun für die Dimensionierung eines Spannungsteilers? Je kleiner der Wert eines angeschalteten Lastwiderstandes R_L ist, um so mehr Strom fließt durch den Widerstand (Vorwiderstand) R_1. Soll der Spannungsteiler beliebig belastbar sein, also auch der Abgriff kurzgeschlossen werden können, so muß für den Teilwiderstand R_1 ein entsprechend hoch belastbarer Typ, z. B. ein 1-Watt-Typ, verwendet werden.

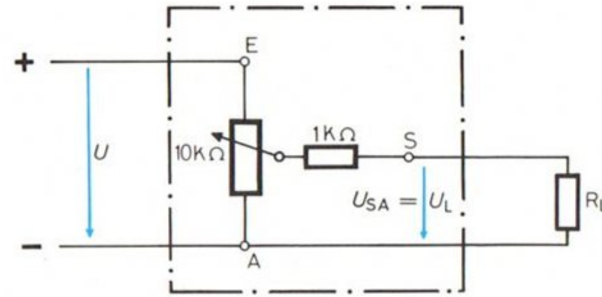
8.2.3 Potentiometer mit Lastwiderstand

Im Kap. 5 wurde schon ausführlich über die Potentiometer des hobby-Labors gesprochen. Jetzt wollen wir untersuchen, wie sich die Spannung am Abgriff des 10-kΩ-Poti ändert, wenn unterschiedliche Lastwiderstände angeschaltet werden. Zu beachten ist wieder, daß vor dem Schleifer S ein Schutzwiderstand von 1 kΩ eingesetzt ist.

Versuch

Bauen Sie bitte die Schaltung nach Bild 8.17 auf. Als Spannungsquelle benutzen Sie eine 4,5-V-Batterie bzw. den ft-Batteriestab.

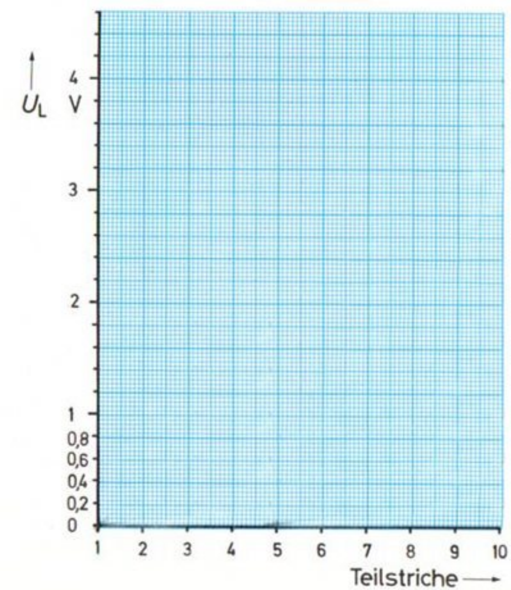
Zunächst messen Sie die Spannung U_{SA} im Leerlauf, d. h. ohne Belastung durch R_L. Die zu jedem Teilstrich der Drehknopfeinstellung gehörende Spannung tragen Sie in die Tabelle 8.18 ein. Dann setzen Sie für R_L nacheinander die in der Tabelle angegebenen Werte ein und notieren die zugehörigen Spannungswerte.



8.17

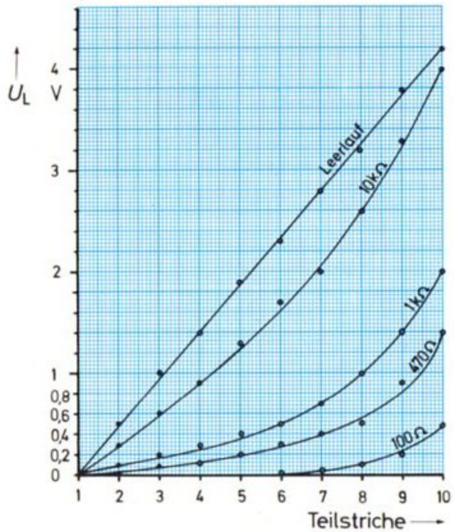
8.18

Skalen-wert	U_{SA} ohne Belastung in V	U_{SA} (in V) bei Belastung mit R_L =			
		100 Ω	470 Ω	1000 Ω	10 000 Ω
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					



8.18 (a)

Die gefundenen Meßwerte können Sie in Abhängigkeit von der Stellung des Drehknopfes in das nebenstehende Koordinaten-Netz 18 (a) eintragen. Es wird ähnlich Bild 8.19 aussehen.



8.19

Ergebnis

Aus dem Diagramm läßt sich folgendes entnehmen: Bei „Leerlauf", d. h. wenn nichts an dem Abgriff angeschlossen ist, erfolgt der Spannungsanstieg U_{SA} „linear" zum Drehwinkel des Stellknopfes. Das hatten Sie schon festgestellt.

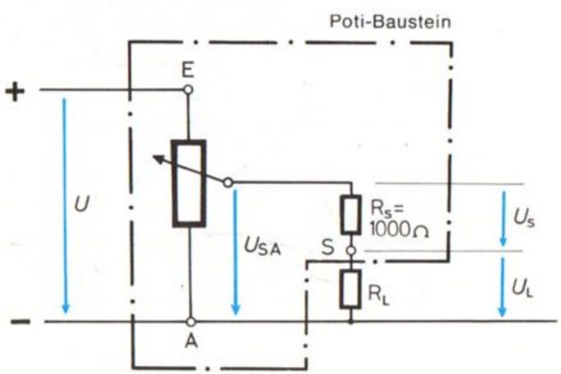
Je größer die Belastung, d. h. je niedriger der Widerstandswert von R_L wird, um so mehr „hängt die Kurve durch"! Im ersten Drittel des Einstellbereichs rührt sich fast nichts. Im zweiten Drittel ist der Anstieg etwas größer – und erst im letzten Drittel steigt die Spannung sehr steil an.

Ihre Ergebnisse können durchaus abweichen; der prinzipielle Kurvenverlauf muß aber so ähnlich sein. Daß die einzelnen Meßpunkte etwas „streuen", schadet nichts – der Kurvenverlauf läßt sich trotzdem gut ermitteln.

Bei einem Potentiometer ist der Spannungsanstieg am Abgriff dann ungefähr linear zum Drehwinkel des Einstellknopfes, wenn der Wert des Lastwiderstandes mindestens gleich dem (oder größer als der) Widerstandswert des Potentiometers ist.

Soll also an einem Poti die abgegriffene Spannung halbwegs gleichmäßig mit der Drehung des Einstellknopfes (dem Drehwinkel) steigen, dann gilt die nebenstehende „Potentiometer-Regel."

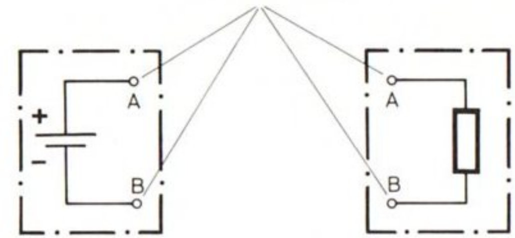
Wenn Sie Lust haben, dann führen Sie die gleiche Untersuchung auch für das 1-kΩ-Potentiometer durch. Sie werden auch hierbei die Gültigkeit der „Potentiometer-Regel" bestätigt finden.



8.20

Daß die abgegriffene Spannung bei höherer Belastung (= kleinerer Wert von R_L) nicht bis zur vollen Höhe der Eingangsspannung ansteigt, liegt am fest eingebauten Schutzwiderstand R_S. Wie Sie aus Bild 8.20 ersehen können, teilt sich die Spannung zwischen Schleifer und Anschluß A in die Teilspannungen U_S und U_L auf.

8.3 Der Spannungsteiler als Vierpol



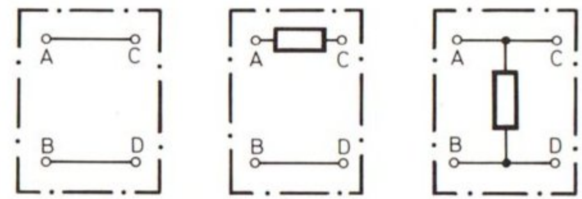
8.21 aktiver Zweipol passiver Zweipol

In früheren Abschnitten haben Sie sogenannte „Zweipole" kennengelernt. Eine Batterie mit einem Innenwiderstand nennen wir einen „aktiven" Zweipol. Eine „black box" mit einem oder mehreren Widerständen, die z. B. an einen aktiven Zweipol angeschlossen wird, nennen wir einen „passiven" Zweipol. Das Bild 8.21 zeigt dies nochmals. Das Merkmal aller Zweipole ist, daß sie „nach außen hin" nur zwei Anschlußklemmen besitzen.

Betrachten wir nun einen Spannungsteiler. Ist das auch ein Zweipol? Sie werden mit Recht sagen: „Nein; denn er hat – von außen betrachtet – drei Anschlüsse, also mehr als zwei ‚Pole'. Die drei Buchsen im Potentiometerbaustein sind ein Beweis dafür!"

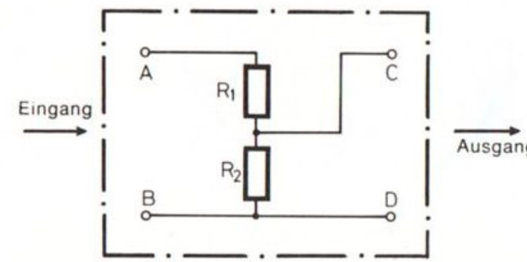
Betrachten wir einmal das Potentiometer oder einen Spannungsteiler aus Festwiderständen als „black box" (= Kästchen mit unbekanntem Inhalt). Schickt man auf der einen Seite elektrische Energie in irgendeiner Form hinein, so kann man auf der anderen Seite der black box wieder elektrische Energie in der gleichen oder in einer anderen Form herausholen.

Im einfachsten Falle könnte solch eine black box aussehen wie eines der Bilder 8.22. Jede von ihnen hat einen „Eingang" (Buchsen A und B) sowie einen „Ausgang" (Buchsen C und D). Und weil das zusammen vier Anschlußklemmen (Anschlußpole) ergibt, nennt man solche Schaltungen „Vierpole".



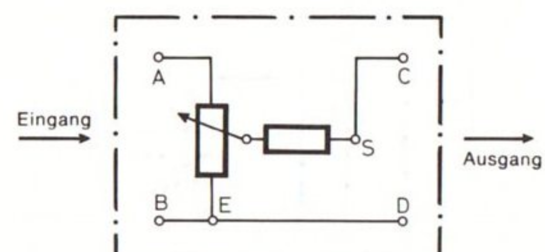
8.22

Eingangsklemmen: A–B; Ausgangsklemmen: C–D

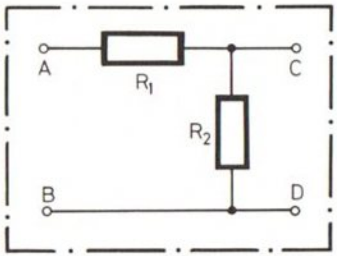


8.23

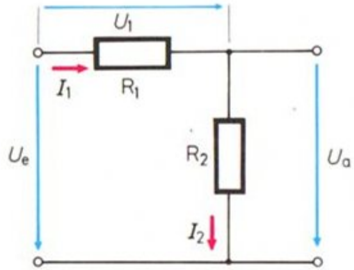
Jeden Spannungsteiler und jedes Potentiometer kann man nun als einen Vierpol mit Eingang und Ausgang wie in den Bildern 8.23 und 8.24 darstellen. Die Buchsen B und D sind darin „durchverbunden". Deshalb kommt man bei unserem Potentiometerbaustein auch mit drei Anschlüssen aus. Im Bild 8.24 ist z. B. die Buchse E sowohl für den Eingang als auch für den Ausgang des Vierpols genutzt.



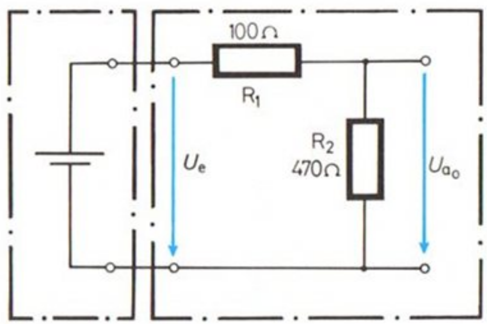
8.24



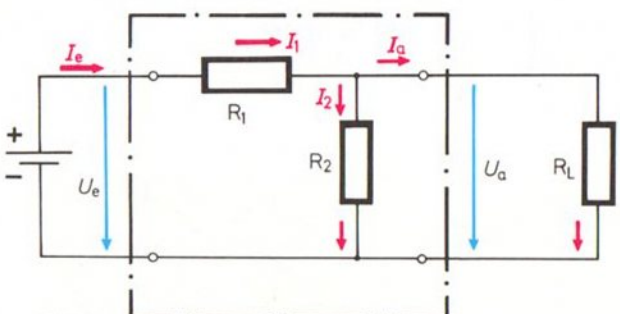
8.25



8.26



8.27



8.28

Fragen

Belasten Sie in Gedanken den Ausgang des Vierpols nach Bild 8.27 mit einem Abschlußwiderstand von 470 Ω. Wie groß ist jetzt die Ausgangsspannung U_a? Bestimmen Sie bitte für diesen Fall auch den Längsstrom. Ist der Querstrom größer oder kleiner oder genauso groß wie der Strom durch den Abschlußwiderstand? Vielleicht rechnen Sie für eine Ihnen zur Verfügung stehende Eingangsspannung die Werte aus und kontrollieren sie durch Messung.

Bild 8.25 zeigt den einfachen Spannungsteiler von Bild 8.23 in einer anderen Darstellung. Zeichnet man in dieses Bild die Spannungs- und Strompfeile ein, so ergibt sich Bild 8.26. Die Spannung, die wir bisher Gesamtspannung nannten, heißt jetzt Eingangsspannung U_e.

Die Teilspannung am Widerstand R_2 nennt man in dieser Darstellung die Ausgangsspannung U_a.

Schaltet man einen solchen Spannungsteiler-Vierpol an eine Spannungsquelle, so erhält man Bild 8.27. In diesem Fall „läuft" der Ausgang des Vierpols „leer" – es ist nichts angeschlossen.

Wissen sollten Sie noch, daß man in einer solchen Schaltung den Widerstand R_1 als L ä n g s widerstand und R_2 als Q u e r widerstand bezeichnet. Entsprechend wird der durch R_1 fließende Strom als „Längsstrom" und der durch R_2 fließende Strom als „Querstrom" bezeichnet.

Vielleicht bauen Sie einen solchen Vierpol mit $R_1 = 100\ \Omega$ und $R_2 = 470\ \Omega$ auf und messen seine Ausgangs-Leerlaufspannung U_{a0}. Da diese Spannung nicht nur von der Größe der beiden Teilwiderstandswerte, sondern auch von der Höhe der angelegten Eingangsspannung U_e abhängt, bestimmt man gleich das Verhältnis von $U_{a0} : U_e$. Ändert man dann in dieser Schaltung aus irgend einem Grund die Eingangsspannung U_e, so kann man ohne Messung sofort die dazugehörige Ausgangs-Leerlaufspannung U_{a0} errechnen:

$$U_{a0} = U_e \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Ein „leerlaufender" Vierpol ist ein Sonderfall. Meist wird an seinen Ausgang irgendein Zweipol (oder vielleicht auch ein weiterer Vierpol) angeschaltet. Bild 8.28 zeigt eine einfache Schaltung. Der Techniker nennt den dazugehörigen Widerstand gerne „Abschluß"-Widerstand oder einfach „Abschluß", weil er die ganze Schaltung – von der Energiequelle her beginnend – „abschließt". Auch die am Anfang des Kapitels besprochene Parallelschaltung mit Vorwiderstand kann man als „Vierpol mit Abschlußwiderstand" darstellen.

8.4 Anwendungen

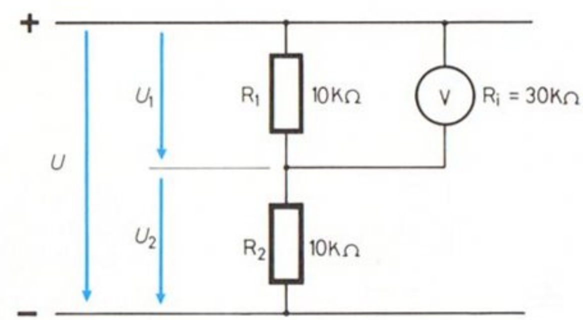
8.4.1 Meßfehler bei Spannungsmessungen

Bei einer Spannungsmessung liegt das Meßinstrument immer parallel zu demjenigen Widerstand, dessen Spannungsabfall gemessen werden soll. Vom Kap. 4.9.4 her wissen Sie, daß das ft-Voltmeter einen Innenwiderstand R_i von rund 30 kΩ besitzt.

Solange der Wert des Widerstandes R_1 (Bild 8.29) sehr klein ist gegenüber R_i, soll uns das nicht weiter kratzen. Die Sache fängt aber an, kritisch zu werden, wenn R_i weniger als 10mal so groß wird wie R_1!

Hängt der Verbraucherwiderstand direkt an der Spannungsquelle, machen Sie keinen Meßfehler. (Warum nicht?) Ist er aber Teil eines Spannungsteilers, wie es in elektronischen Schaltungen dauernd vorkommt, dann ...

Probieren wir's am besten gleich einmal aus!



8.29

Versuch

Bild 8.29 zeigt die Versuchsschaltung mit einem Spannungsteiler aus zwei 10-kΩ-Widerständen. Für R_2 setzen Sie das 10-kΩ-Poti (Buchsen A und E) ein. Messen Sie bitte U und U_1 und U_2. Warum zeigt Ihr Voltmeter bei der Messung von U_1 und U_2 nicht jeweils genau die Hälfte von U?

Nach den in den letzten Abschnitten durchgeführten Untersuchungen werden Sie – mit Recht – den Innenwiderstand des Spannungsmessers dafür verantwortlich machen.

Wie Sie aus nebenstehender Rechnung sehen, entspricht Ihr Meßwert ziemlich genau dem errechneten Wert, wenn der durch die Parallelschaltung $R_1 \parallel R_i$ verursachte Meßfehler berücksichtigt wird.

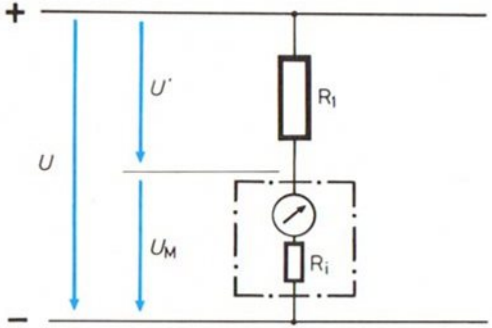
$$R_{1,i} = R_1 \parallel R_i = \frac{R_1 \cdot R_i}{R_1 + R_i} = \frac{300}{40} = 7{,}5\ \text{k}\Omega$$

$$R_{ges} = R_1 + R_{1,i} = 10 + 7{,}5 = 17{,}5\ \text{k}\Omega$$

$$U_1 = U \cdot \frac{R_{1,i}}{R_{ges}} = \text{U} \cdot \frac{7{,}5}{17{,}5} = 0{,}43 \cdot U$$

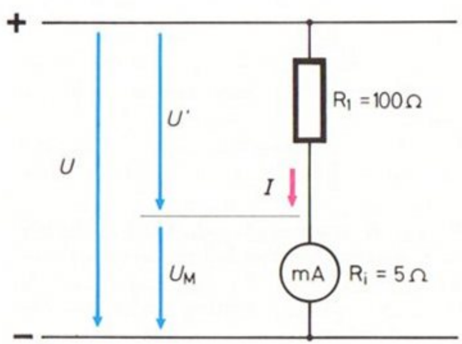
Ist $U = 6$ V, dann messen Sie für U_1 statt 3 V nur 2,6 V!

Bei einer Spannungsmessung sollte der Wert des Voltmeter-Innenwiderstandes mindestens 10mal größer sein als der Wert des Widerstandes, an dem die Spannung gemessen wird!



8.30

Durch Einfügen eines Strommessers in einen „Strompfad" wird die Stromstärke stets kleiner!



8.31

Frage

Ganz grauslich wird der Meßfehler, wenn Sie für R_1 statt 10 kΩ einen Widerstand von 100 kΩ einsetzen! Vielleicht rechnen Sie einmal aus, wie hoch U_1 eigentlich sein müßte und welchen Wert Sie mit Ihrem Meßinstrument tatsächlich messen würden!

Hinweis: Gute Spannungsmesser zur Messung in elektronischen Schaltungen sollten mindestens „20 kΩ pro Volt" Innenwiderstand haben. (Definition: kΩ pro Volt siehe Abschnitt 4.9.4! und A 11 [Seite 282].)

8.4.2 Meßfehler bei Strommessungen

Da wir gerade beim Thema „Meßfehler" sind, soll auch der durch die Reihenschaltung eines Strommessers verursachte Meßfehler besprochen werden.

Auch Strommesser haben, wie im Bild 8.30 nochmals dargestellt, einen Innenwiderstand R_i. Da der Strommesser bei der Strommessung in Reihe zum Meßobjekt in den Strompfad geschaltet werden muß, erscheint – von außen her betrachtet – der Widerstand des Meßobjektes verfälscht. Diese Verfälschung wirkt sich stets als Vergrößerung des Widerstandswertes aus.

Für genaue Messungen muß dies natürlich berücksichtigt werden. Man rechnet dann nicht mit der Spannung U, sondern verkleinert diese um die Teilspannung U_M, die an den Klemmen des Strommessers auftritt. Man errechnet sie als Produkt des gemessenen Stroms I mit dem Innenwiderstand R_i des Strommessers. Dazu benötigt man also die Angabe des Innenwiderstandes der verwendeten Strommesser!

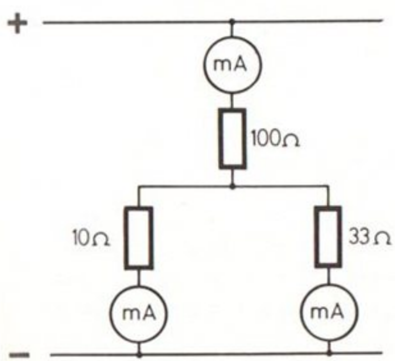
Beispiel

Ihr Meßgerät hat im Meßbereich 100 mA einen Innenwiderstand von 5 Ω (siehe Abschnitt 6.7.2). Messen Sie bitte den Strom in der Schaltung 8.31, also den Strom, der durch den 100-Ω-Widerstand fließt. Von außen her betrachtet, muß der Strom durch einen Widerstand von 100 Ω + 5 Ω = 105 Ω fließen. Hat vor dem Einbau des Milliamperemeters eine Spannung von 6 V an dem Widerstand R_1 gelegen, so vermindert sich diese durch das Einfügen des Strommessers um 5/105 Anteile (ungefähr 5 %) auf etwa 5,7 V. Ebensogut können Sie auch sagen, daß sich die Stromstärke im Strompfad durch die Einschaltung des Strommessers um diesen Betrag, also um etwa 5 %, verringert hat. Für einfache Messungen werden Sie diesen Meßfehler in Kauf nehmen. Für genauere Untersuchungen müssen Sie rechnen.

(Warum gerade 5/105 Anteile? Erinnern Sie sich noch an die Berechnung des Verhältnisses von Teilspannung zur Gesamtspannung auf Grund der bekannten Widerstandswerte? Andernfalls sehen Sie bitte im Abschn. 4.5 nochmals nach.)

Versuch

Bauen Sie die Schaltung 8.32 auf. Im Bild sind drei Strommesser eingezeichnet. Sie besitzen jedoch nur einen und dieser hat einen Innenwiderstand von 5 Ω! Er wird also Ihr Meßergebnis beträchtlich verfälschen, weil ja z. B. bei Erhöhung des 10-Ω-Widerstandes um 5 Ω die Schaltung doch erheblich verändert wird. Es wird während der Messung wesentlich mehr Strom durch den 33-Ω-Widerstand fließen als vor dem Einbau des Meßgerätes. Wenden Sie deshalb folgenden Trick an: Es genügt, wenn Sie zwei von den drei Strömen messen, denn die drei Ströme sind durch die Gleichung $I = I_1 + I_2$ miteinander verknüpft. Überlegen Sie bitte, welche der drei Messungen Sie weglassen, weil sie die falscheste ist.

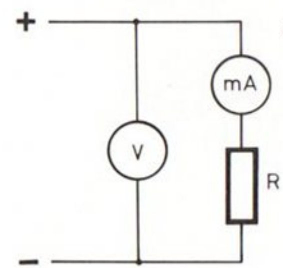


8.32

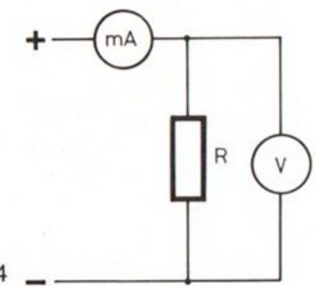
Der Innenwiderstand eines Strommessers darf höchstens 10 % von dem Widerstandswert haben, den der zu untersuchende Strompfad aufweist. Ist er größer als 10 %, dann sollte der gemessene Wert durch Rechnung korrigiert werden.

8.4.3 Spannungs- oder stromrichtige Messung?

Angenommen, Sie könnten gleichzeitig Spannung und Strom messen – würden Sie die Messung von Spannung und Strom lieber nach Bild 8.33 oder nach Bild 8.34 vornehmen? Im ersten Fall (8.33) mißt das Voltmeter die am Strommesser stehende Teilspannung mit; der Strommesser mißt jedoch richtig. Der Fehler wird um so größer, je größer der Innenwiderstand des Strommessers ist.



8.33

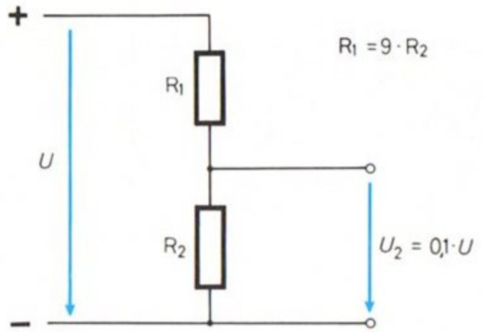


8.34

In der zweiten Schaltung (8.34) mißt der Strommesser auch den Strom, der durch das Voltmeter fließt. Sie müßten also einen Spannungsmesser haben, der einen sehr hohen Innenwiderstand hat.

Die beiden Forderungen nach möglichst ungestörter Messung durch die Meßgeräte widersprechen sich: Einmal soll der Innenwiderstand möglichst klein und im andern Fall möglichst groß sein.

Beim Kauf von Meßgeräten, die sowohl Spannung als auch Strom messen können, also „Vielfachmeßgeräte" sind, muß man sich entscheiden, ob man mehr den hochohmigen Typ für Spannungsmesser oder mehr den niederohmigen Typ für Strommessung bevorzugt. (Lesen Sie bitte hierzu den Abschn. „Was ist beim Kauf eines Vielfachmeßgerätes zu beachten?" im Anhang!)

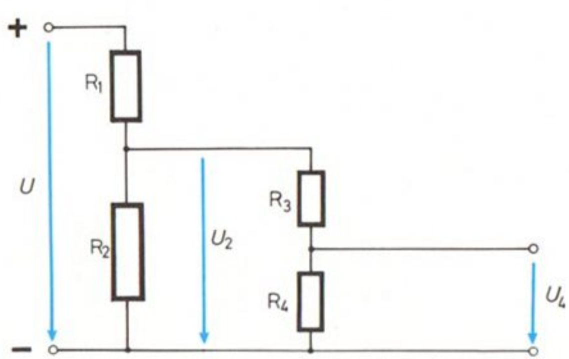


8.35

8.4.4 Dekadische Teilung

Für viele Zwecke braucht man Spannungsquellen mit ganz kleinen Spannungen von einigen zehntel Volt. Die Messung so kleiner Spannungen kann mit den üblichen Spannungsmessern nicht sehr genau vorgenommen werden. Deshalb arbeitet man oft mit höheren Spannungen und schaltet an die Spannungsquelle einen Spannungsteiler, der die Eingangsspannung im Verhältnis 1 : 10 teilt. Eine solche Schaltung nennt man einen „dekadischen Teiler“ (Bild 8.35).

Ist der Widerstand des Teilers klein gegenüber dem Widerstandswert der anzuschaltenden Belastung, so kann man sich die Messung der Teilspannung U_2 ersparen. Es genügt die Messung der Teilereingangsspannung U.



8.36

8.4.5 Kaskadenschaltung

Wie wäre es, wenn wir an den Ausgang eines Spannungsteilers nochmals einen Spannungsteiler anschalten? Bild 8.36 zeigt eine solche Schaltung. R_1 und R_2 gehören zum ersten, die Widerstände R_3 und R_4 zum zweiten Teiler.

Wir wählen die Werte der vier Widerstände so aus, daß der zweite Teiler den ersten Teiler kaum belastet, und den zweiten Teiler lassen wir „leerlaufen“. Dann ist die Sache einfach zu übersehen:
Wie hoch ist nun U_4?

$$U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{und} \quad U_4 = U_2 \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Damit wird $U_4 = U \cdot \dfrac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \dfrac{R_4}{R_3 + R_4}$

Diese Gleichung könnte man zwar noch vereinfachen, aber wir wollen lieber ganz allgemein die Wirkung des zweiten Teilers untersuchen. Dazu bezeichnen wir einfach das Verhältnis des unteren

Widerstandes eines Teilers zum Gesamtwiderstand desselben Teilers als „Teilerverhältnis“ V_t. Dann ergibt sich:

$$V_{t1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_2}{U} \quad \text{und}$$

$$V_{t2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{U_4}{U_2}$$

Damit wird durch Einsetzen in die vorige Gleichung:

$$U_4 = U \cdot V_{t1} \cdot V_{t2}$$

Der in Mathematik wenig Geübte erkennt vielleicht nicht sofort, was diese Gleichung sagt: Bei einer Kaskadenschaltung ist das Gesamtteilerverhältnis nicht etwa die Summe der Einzelteilerverhältnisse, sondern deren Produkt:

$$V_t = V_{t1} \cdot V_{t2}$$

Aus zwei Teilern mit dem Teilerverhältnis 1 : 10 kann man also einen Teiler mit dem Teilerverhältnis 1 : 100 machen! Bild 8.37 zeigt diesen Teiler in einer anderen Darstellung.

Beispiel

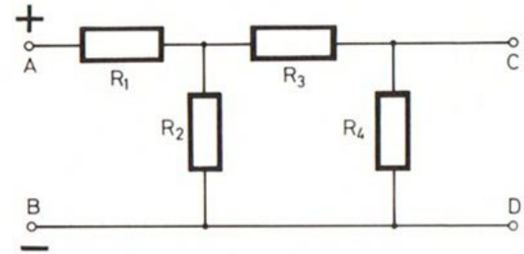
Den ersten Teiler setzten wir aus 90 Ω und 10 Ω zusammen, wobei wir den 90-Ω-Widerstand aus 100 Ω und 1000 Ω (in Parallelschaltung) zusammensetzen. Wie groß ist der Fehler, den wir dabei machen? (Würden wir für R_1 nur den 100-Ω-Widerstand allein verwenden, so wäre das Verhältnis der Teiler nicht 1 : 10, sondern 10 : [100 + 10] = 1 : 11!)

Für den zweiten Teiler brauchen wir nochmals ein Teilerverhältnis 1:10. Damit der zweite Teiler hochohmig gegenüber dem ersten ist, wählen wir die in Bild 8.38 gezeigte Kombination.

Frage

Rechnen Sie bitte das exakte Teilerverhältnis dieses zweiten Teilers aus. Wie groß ist das genaue Teilerverhältnis der gesamten Schaltung?

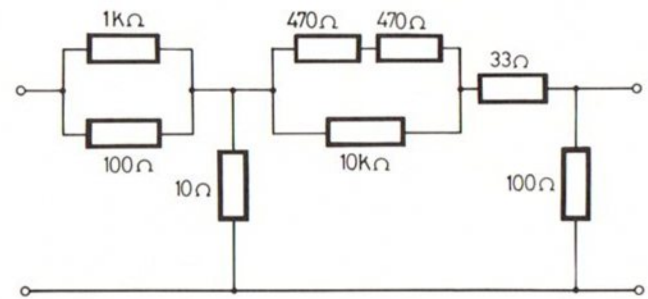
Die „Hintereinanderschaltung“ von stets gleichen Baugruppen, zum Beispiel von Spannungsteilern, nennt man eine „Kaskadenschaltung“. Es können beliebig viele gleiche Gruppen zu einer Kaskade geschaltet werden. Wie viele sind es im Bild 8.39?



$R_1 = 9 \cdot R_2$
$R_3 = 9 \cdot R_4$

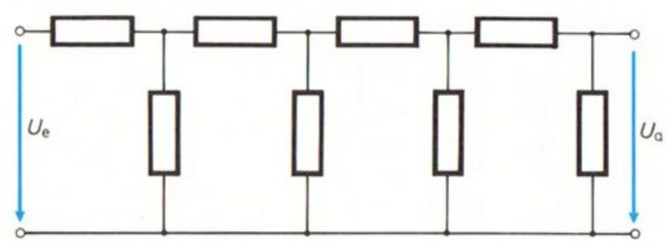
8.37

Das Gesamtteilerverhältnis einer Kaskadenschaltung ist gleich dem Produkt der einzelnen Teilerverhältnisse.

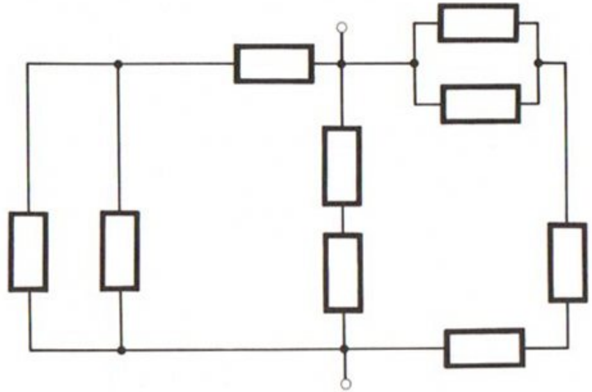


8.38

8.39



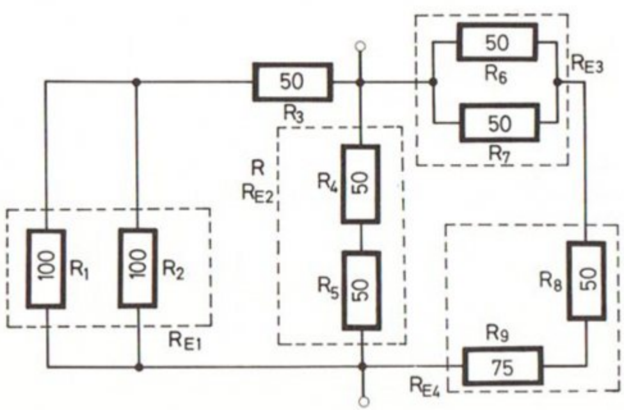
9 Netzwerke



9.1

Die Zusammenschaltung mehrerer Bauteile in Reihen- und in Parallelschaltung bezeichnet man in anschaulicher Weise als „Netzwerk“. Bild 9.1 zeigt ein solches Netzwerk, das aus 9 Widerstandsbauteilen besteht. Es gibt noch wesentlich kompliziertere Schaltungen – man kann ganze verregnete Urlaubstage damit verbringen, Netzwerke zu entwerfen oder aufzulösen. Wir wollen uns zu Beginn dieses Kapitels mit der Auflösung des Netzwerks von Bild 9.1 beschäftigen.

9.1 Schrittweise Auflösung von Netzwerken



9.2

Die Frage lautet: „Wie groß muß der Wert eines Widerstandes sein, der das dargestellte Netzwerk ‚ersetzen‘ kann?“ Man spricht daher von der Berechnung eines „Ersatzwiderstandes“.

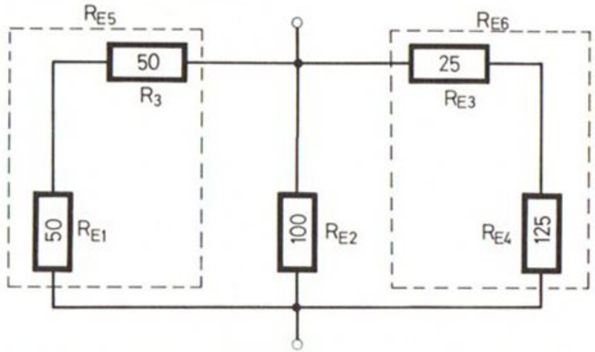
Ein solches Netzwerk löst man schrittweise auf, indem man ganz offensichtliche Reihen- bzw. Parallelwiderstände zusammenfaßt und durch „Teilwiderstände“ ersetzt. Aus Bild 9.2 ersehen Sie, welche Widerstände sich auf Anhieb zu Ersatzwiderständen zusammenfassen lassen (Das Zeichen ∥ bedeutet: „parallel zu“; ein „+“ bedeutet hier entsprechend: „in Reihe mit“):

$$R_{E1} = R_1 \parallel R_2 = \frac{100 \cdot 100}{200} = 50\,\Omega$$

$$R_{E2} = R_4 + R_5 = 100\,\Omega$$

$R_{E3} = R_6 \parallel R_7 = 25\,\Omega$ $\qquad$ $R_{E4} = R_8 + R_9 = 125\,\Omega$

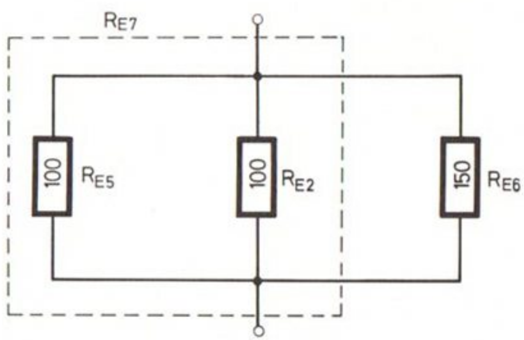
Aus diesen Teilwiderständen entsteht die Schaltung 9.3. Hier kann man wieder zusammenfassen:



9.3

$R_{E5} = R_{E1} + R_3 = 100\ \Omega \quad R_{E6} = R_{E3} + R_{E4} = 150\ \Omega$

Daraus ergibt sich die „Ersatzschaltung" nach Bild 9.4 mit drei parallel geschalteten Widerständen. Davon lassen sich die gleich

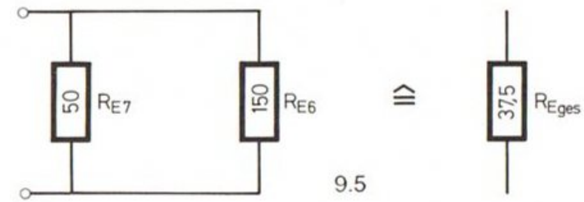


9.4

großen Ersatzwiderstände R_{E5} und R_{E2} ganz leicht zu R_{E7} zusammenfassen, so daß die Parallelschaltung nach Bild 9.5 übrigbleibt.

Der Gesamtersatzwiderstand hat dann den Wert:

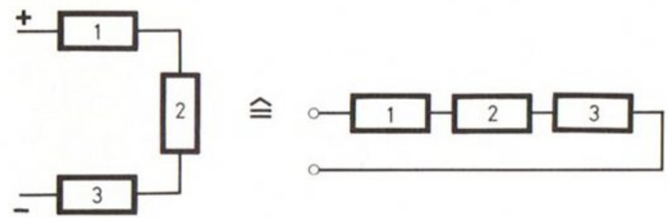
$$R_{Eges} = \frac{50 \cdot 150}{200} = 37{,}5\ \Omega$$



9.5

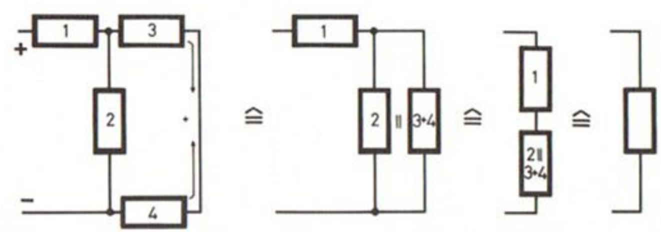
Sie erkennen an diesem Beispiel deutlich die „Technik der vereinfachenden Schritte":

1. Zusammenfassung aller Reihenwiderstände. Das ist immer das Einfachste! Lassen Sie sich nicht verwirren, wenn Reihenwiderstände „über Eck" liegen (siehe Bild 9.6!): Man kann sie am „Draht" zusammenschieben, bis sie „hintereinander" liegen.



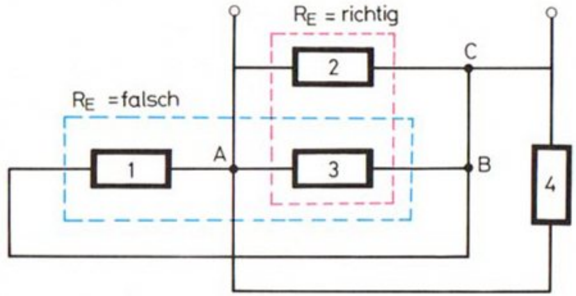
9.6

2. Vorsicht ist immer bei „Knotenpunkten" geboten: Widerstände, zwischen denen ein „Knoten" liegt, können Sie nicht zu einer Reihe zusammenschieben – meistens spinnt sich da etwas „Paralleles" an (Bild 9.7):



9.7

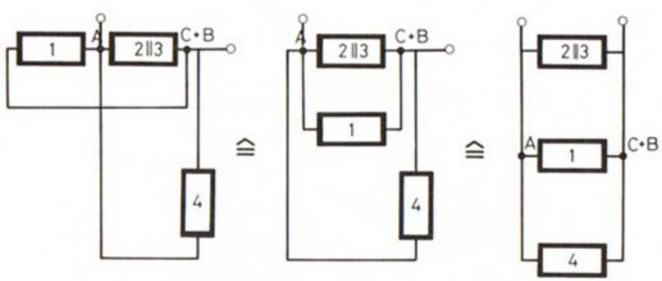
3. Die umrandeten Zusammenfassungen dürfen sich niemals überschneiden! Bild 9.8 zeigt ein Netzwerk, das zwar grafisch sehr hübsch aussieht, „funktional" aber denkbar unübersichtlich ist (milde ausgedrückt!).



9.8

Im Bild 9.8 ist die rot umrandete Zusammenfassung richtig, weil die beiden Widerstände ganz offensichtlich parallel liegen. Die blau umrahmte Zusammenfassung ist falsch, weil 1. ein Knotenpunkt zwischen den beiden Widerständen liegt, und weil 2. sich blaue und rote Umrandung überschneiden.

4. Wenn man das Schaltbild 9.8 in logischer Weise umformt, entsteht ein ganz einfach zu überschauendes Schaltbild (Bild 9.9), nämlich eine simple Parallelschaltung von 3 Widerständen.

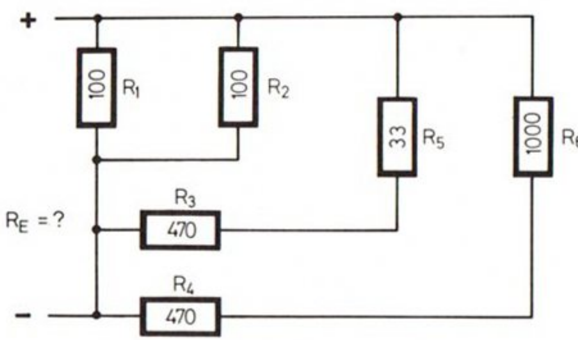


9.9

Wir werden noch oft von der Methode der „funktionalen Umzeichnung" zum Zweck des besseren Verständnisses Gebrauch machen.

Frage

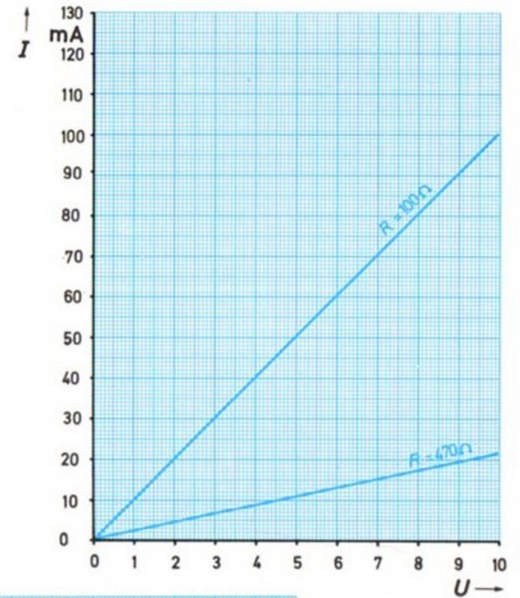
Wenn Sie gern Nüsse knacken – im Bild 9.10 haben wir für Sie eine kleine Nuß bereit; es wird Ihnen sicher keine Schwierigkeiten machen, sie rechnerisch zu knacken. Außerdem können Sie Ihr Ergebnis experimentell überprüfen. Der Kern unserer Nuß enthält nur Widerstände aus Ihrem Baukasten.



9.10

9.2 Grafische Darstellung von Parallelwiderständen

9.11

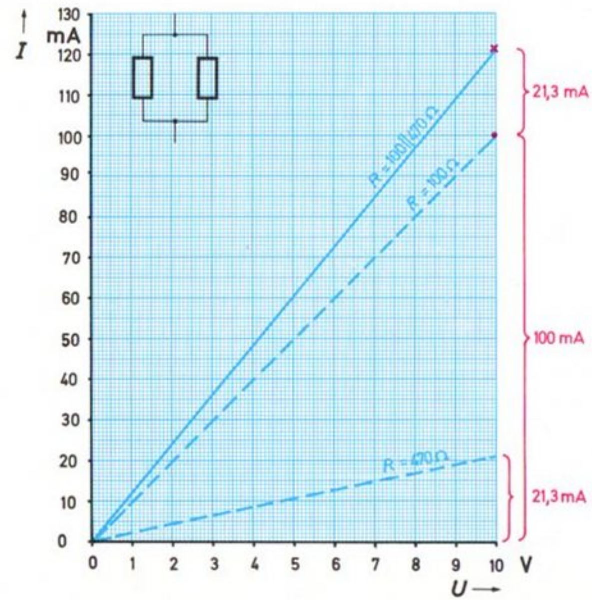


Viele Leute rechnen nicht gern und arbeiten lieber mit Diagrammen. Das Ergebnis ist zwar nicht sehr genau, dafür ist das Verfahren – bei einiger Übung – schneller und einfacher. Die nun folgende Vorstellung grafischer Verfahren soll auch zum besseren Verständnis des zuvor Gesagten beitragen, besonders für Menschen, die durch „Anschauen" einen Zusammenhang besser verstehen als mit Hilfe abstrakter Formeln.

Konstruktion

Im Abschnitt 2.10 haben Sie die Verknüpfung von Strom und Spannung für einen bestimmten Widerstandswert in Form einer grafischen Darstellung kennengelernt. Das Bild 9.11 zeigt Ihnen nochmals das Strom/Spannungs-Diagramm für einen 100-Ω- und für einen 470-Ω-Widerstand. Wie sieht die Kennlinie für die Parallelschaltung von 100 Ω und 470 Ω aus? Sie können den „Ersatzwiderstand" dieser Parallelschaltung ausrechnen: Es ergibt sich genau 82,46 Ω. Nun könnten Sie die neue Kennlinie für 82,46 Ω nach dem schon bekannten Verfahren eintragen. Einfacher ist die grafische Methode:

Da bei der Parallelschaltung die Spannung an R_1 gleich der Spannung an R_2 ist und sich die Teilströme addieren, können Sie auch im Diagramm – für irgendeinen Wert der Spannung – die beiden „Stromstrecken" für R_1 und R_2 addieren. Im Bild 9.12 ist dies für eine Spannung von 10 V durchgeführt. Es bleibt Ihnen überlassen, ob Sie – wie im Bild angedeutet – zur Strecke „100 mA" die Strecke „21,3 mA" hinzufügen oder ob Sie von 21,3 mA ausgehen und die Strecke 100 mA hinzufügen. In beiden Fällen ergibt sich eine Gesamtstrecke (Koordinatenwert) von 121,3 mA. Selbstverständlich hätten Sie die Bestimmung für jeden anderen Spannungswert als für die gewählten 10 V anwenden können.



9.12

1. Anwendungsbeispiel

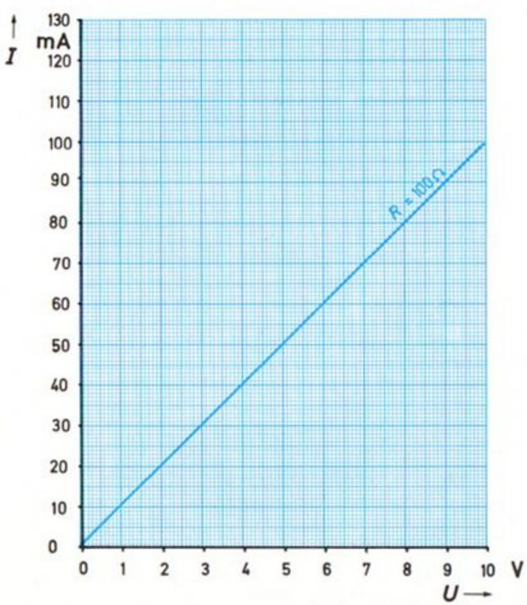
Zeichnen Sie bitte in das Diagramm 9.12 die Widerstandsgerade für die Parallelschaltung von zwei 470-Ω-Widerständen ein.

Vielleicht sind Sie selbst schon darauf gekommen, daß man die einzelnen Stromkoordinaten gar nicht ausrechnen muß; man nimmt sie einfach – am besten für eine Spannung von 10 V – mit dem Zirkel oder dem Lineal aus dem Diagramm 9.11 und überträgt sie in das Diagramm 9.12 – natürlich gleiche Maßstäbe vorausgesetzt!

2. Anwendungsbeispiel

Interessant, weil anschaulich, ist auch die Darstellung der Parallelschaltung von 100 Ω und 1000 Ω oder von 100 Ω und 4,7 kΩ, also die Zusammenschaltung von verhältnismäßig kleinem mit einem großen Widerstandswert.
Zeichnen Sie bitte die Widerstandsgeraden für 1000 Ω und 4700 Ω sowie für 100 ‖ 1000 Ω und 100 ‖ 4700 Ω in das Koordinatennetz 9.13 ein.

Dies ist die „grafische" Bestätigung für die schon gewonnene, nebenstehend formulierte Erkenntnis. Sie sehen, daß die erhaltenen Kennlinien nur wenig von der Ausgangs-Kennlinie abweichen.

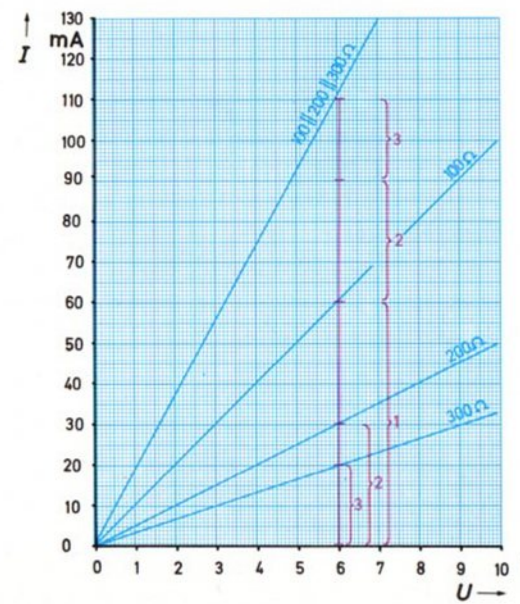


9.13

Bei Parallelschaltung sehr unterschiedlicher Widerstandswerte, wird der niedrigere Wert kaum verändert.

Nach dem beschriebenen Verfahren kann man auch die Kennlinie des Gesamtwiderstandes von 3 oder noch mehr parallel geschalteten Widerständen ermitteln. Bild 9.14 zeigt dies für die Parallelschaltung von 100 Ω ‖ 200 Ω ‖ 300 Ω.

Aus der neuen Kennlinie können Sie z. B. entnehmen, wieviel Strom durch diese Widerstandskombination fließen wird, wenn sie an eine 4,5-V-Batterie geschaltet wird. Es sind ..... mA. Führen Sie bitte die gleiche Untersuchung für die Parallelschaltung von 100 Ω ‖ 100 Ω ‖ 470 Ω durch, und überprüfen Sie durch Messung, ob Theorie und Praxis übereinstimmen.

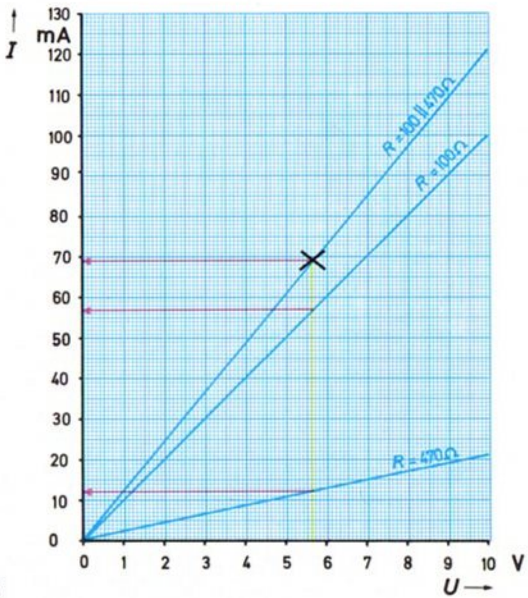


9.14

3. Anwendungsbeispiel

Das Strom/Spannungs-Diagramm mit den Widerstandsgeraden hat noch einen Vorteil: Man kann ohne Rechnung daraus entnehmen, wie groß die Teilströme durch die einzelnen Widerstände der Parallelschaltung bei einer bestimmten Spannung sind.

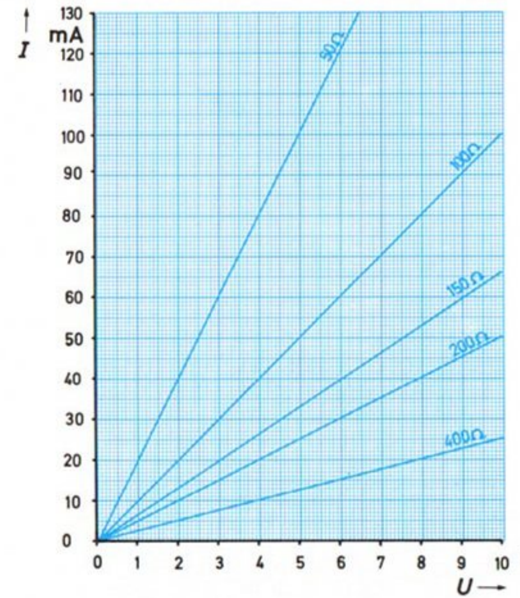
Sie haben z. B. einen 100-Ω- und einen 470-Ω-Widerstand parallel geschaltet. Die Kennlinien zeigt Bild 9.15. Bei einer angelegten Spannung von 5,7 V fließt durch beide zusammen ein Strom von 70 mA. Nach Einzeichnen einer (in Bild 9.15 gelben) senkrechten Hilfslinie durch den „Arbeitspunkt" X (oder Anlegung eines rechten Winkels) können Sie die zu den Schnittpunkten der 100-Ω- bzw. der 470-Ω-Kennlinien gehörenden Teilströme auf der Stromskala ablesen. Im Beispiel sind es 57 mA für den 100-Ω- und 12 mA für den 470-Ω-Widerstand.



9.15

4. Anwendungsbeispiel

Wie groß sind etwa der Gesamtstrom und die Teilströme in einer Parallelschaltung von 50 Ω ‖ 110 Ω ‖ 170 Ω bei einer Spannung von 6,3 V? Zur Lösung dieser Frage benutzen Sie bitte das Diagramm 9.16. Dort sind die Widerstandsgeraden für „runde" Werte eingetragen. Sie brauchen trotzdem die Widerstandsgeraden für 110 Ω und 170 Ω nicht zu berechnen, sondern können sie auch nach Schätzung (im Vergleich zur 100-Ω- und zur 200-Ω-Kennlinie) in das Diagramm eintragen.



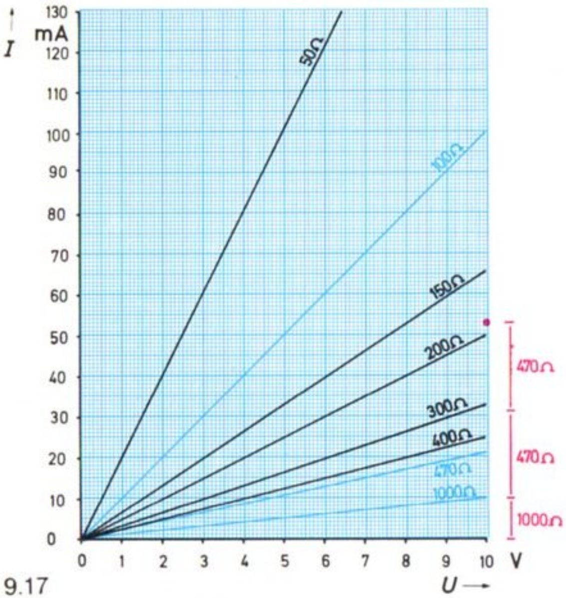
9.16

5. Anwendungsbeispiel

Mit Hilfe eines Strom/Spannungs-Diagramms mit Widerstandsgeraden kann man auch bestimmen, durch welche Parallelschaltung ein benötigter, aber nicht vorhandener Widerstand ersetzt werden kann.

Benötigt wird z. B. ein Widerstand von 190 Ω, den Sie durch Parallelschalten mehrerer Widerstände gewinnen wollen.

Als Arbeitsunterlage steht Ihnen das Bild 9.17 zur Verfügung. Dort finden Sie wieder einige Kennlinien für „runde" Widerstandswerte und – in blauer Farbe – die Kennlinien einiger Widerstände Ihres Experimentierkastens. Der gesuchte Wert von 190 Ω ist auf der 10-V-Linie als roter Punkt angegeben. Sie können die dazugehörige Stromkoordinate z. B. durch zwei Stromstrecken für je 470 Ω und eine Stromstrecke für 1000 Ω zusammensetzen. Prüfen Sie durch Messung oder Rechnung nach, ob diese Überlegung richtig ist.



9.17

Fragen

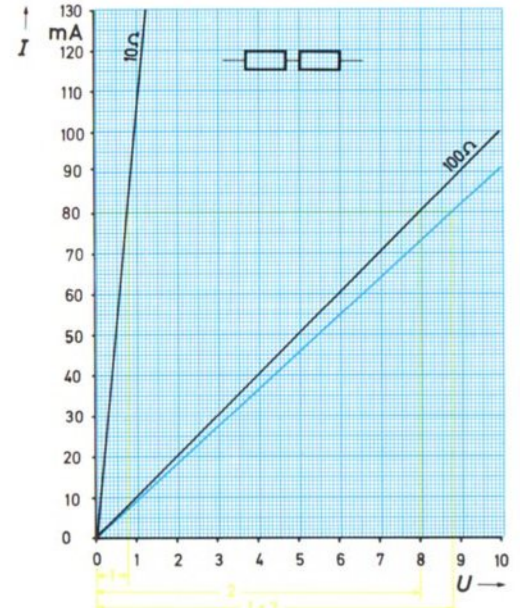
Ermitteln Sie nun bitte auf diese Weise, durch welche Parallelwiderstände ein 60-Ω-Widerstand gewonnen werden kann. Bei dieser Aufgabe arbeiten Sie besser auf der 5-V- statt auf der 10-V-Linie. Wie groß sind die Teilströme, wenn eine Spannung von 9,0 V angelegt wird?

Welchen Ihrer Widerstände müssen Sie einem 470-Ω-Widerstand parallel schalten, damit – gleichbleibende Spannung vorausgesetzt – etwa der sechsfache Strom fließt? (Die Angabe der Spannung ist nicht nötig, weil diese Forderung ja für alle Spannungen gilt.)

Wer sich auf diesem Gebiet nun schon zu Hause fühlt, möge sich überlegen: Welcher Belastbarkeitsklasse (0,25 Watt – 0,5 Watt – 1 Watt) müßte der in der letzten Untersuchung ermittelte Parallelwiderstand angehören, wenn an die Schaltung eine Spannung von 6 V angelegt wird? Welche Spannung darf höchstens angelegt werden, wenn für diesen Widerstand nur ein 0,25-W-Typ zur Verfügung steht?

9.3 Grafische Darstellung von Reihenwiderständen

Die Kennlinie einer Reihenschaltung von Widerständen ermittelt man mit einem ähnlichen Verfahren nach Bild 9.18. Es beruht darauf, daß die Stromstärke durch die Reihenwiderstände überall gleich groß ist.



9.18

Konstruktion

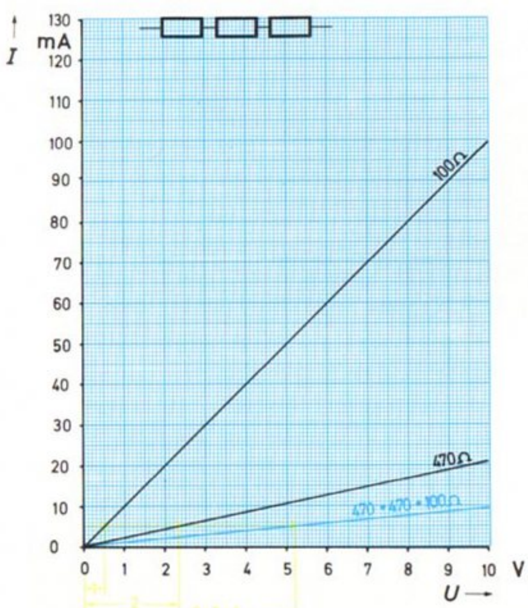
Man addiert für eine beliebig gewählte Stromstärke, z. B. für 80 mA, die „Spannungsstrecken“ der Reihenwiderstände. Die gelb eingezeichnete Strecke 1 ist die „Spannungsstrecke“ für $R_1 = 10\ \Omega$

und die Strecke 2 ist die „Spannungsstrecke“ für $R_2 = 100\ \Omega$. Das Ende der Strecken 1 + 2 ist der Punkt, durch den die Widerstandskennlinie für die Reihenschaltung von 100 Ω und 10 Ω (= 110 Ω) gehen muß. Diese Kennlinie ist im Bild blau eingezeichnet.

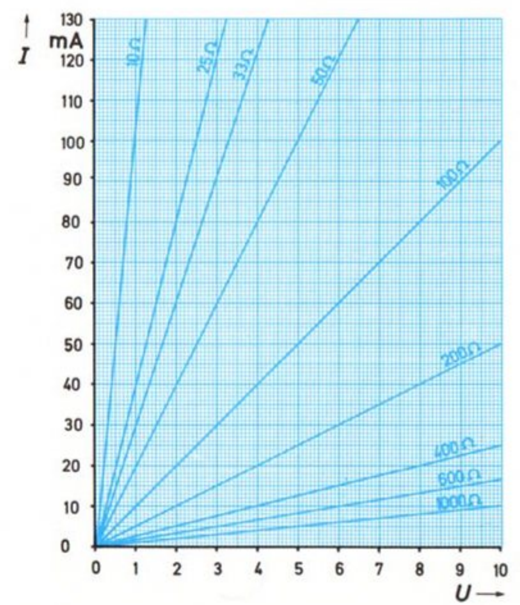
Bild 9.19 zeigt, wie man die Widerstandsgerade für die Reihenschaltung von 100 Ω + 470 Ω + 470 Ω gewinnt. Man addiert z. B. auf der 5-mA-Linie eine Spannungsstrecke für 100 Ω und zwei Spannungsstrecken für 470 Ω. Am Ende der drei Strecken liegt der Punkt, durch den die Kennlinie für die Reihenschaltung gehen muß.

1. Anwendungsbeispiel

Bild 9.20 zeigt Widerstandskennlinien für „runde“ Werte. Ermitteln Sie bitte auf grafischem Wege, welche der Ihnen zur Verfügung stehenden Widerstände in Reihe geschaltet werden müssen, damit ein Gesamtwiderstand von etwa 140 Ω herauskommt. Sie werden sicher sagen: „Für die Ermittlung dieses Wertes brauche ich kein Diagramm, das rechne ich schneller im Kopf aus.“ Das stimmt! Wenn Sie aber wissen wollen, welche Spannung am größeren der beiden Widerstände anliegt, wenn die Reihenschaltung an eine Batterie von 4,5 V oder an das Netzgerät mit 6 V angeschaltet ist, bzw. wieviel Strom in beiden Fällen fließt, dann lohnt es sich schon, die Aufgabe grafisch zu lösen.



9.19

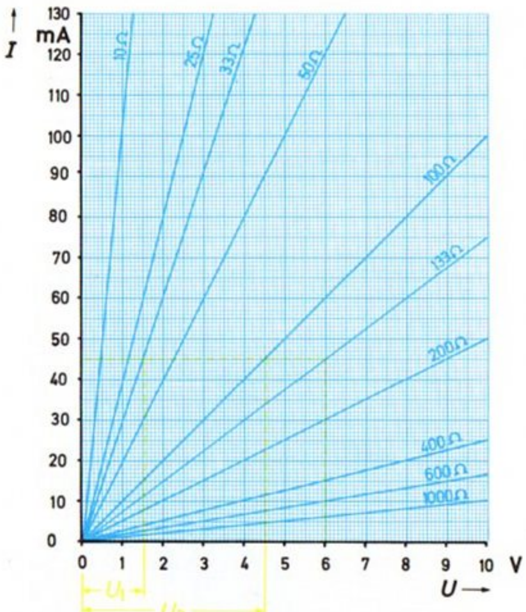


9.20

In Bild 9.21 ist z. B. eine Kombination von 100 Ω + 33 Ω = 133 Ω an eine Spannung U = 6 V angeschaltet. Die Teilspannungen U_1 und U_2 kann man am Spannungsmaßstab ablesen, wenn man von dem Schnittpunkt der 100-Ω- bzw. der 33-Ω-Geraden mit der waagerechten Strom-Hilfslinie senkrecht nach unten geht (gelbe Linien).

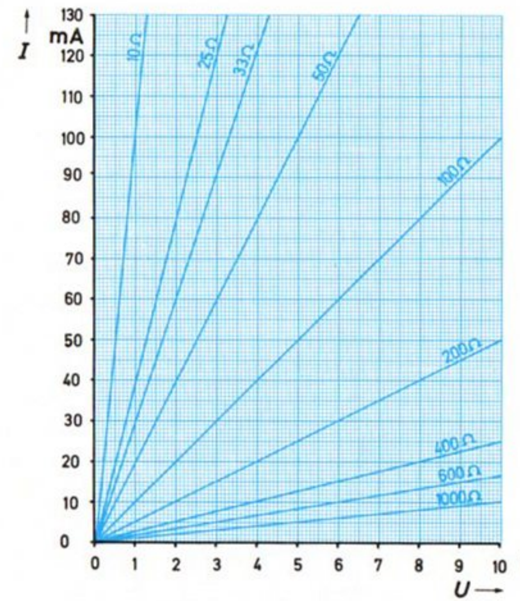
Fragen

Ermitteln Sie bitte auf grafischem Wege (Bild 9.22), welche Stromstärke durch eine Reihenschaltung von 100 Ω + 33 Ω + 100 Ω + 10 Ω fließt, wenn an diese Schaltung eine Spannung von 6 V gelegt wird. Welche Spannung müssen Sie anlegen, damit genau 40 mA im Stromkreis fließen? Wie hoch sind in diesem Fall die einzelnen Teilspannungen?



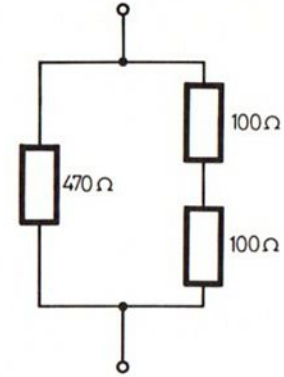
9.21

9.22



9.4 Grafische Darstellung von Netzwerken

Besonders interessant wird die grafische Ermittlungsmethode, wenn man die Reihen- und Parallelschaltung kombiniert, also ein ganzes Netzwerk von Widerständen überschlägig und schnell berechnen will. Bild 9.23 zeigt ein einfaches Netzwerk.



9.23

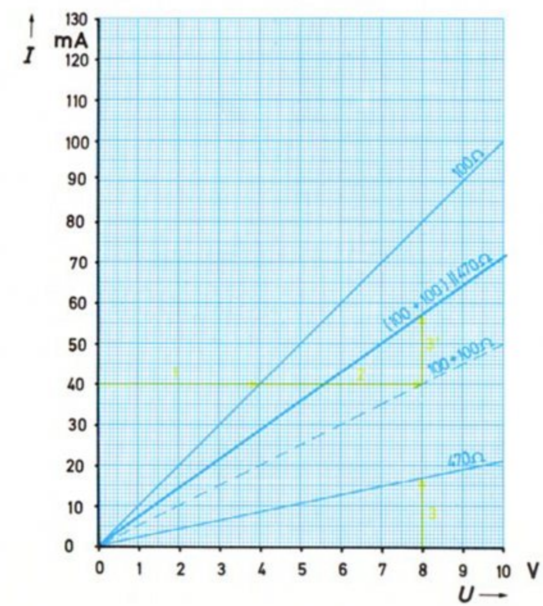
Was meinen Sie: Fließt im linken Strompfad (mit einem Widerstand) mehr Strom als im rechten Strompfad (mit zwei Widerständen)? Zur Beantwortung brauchen Sie natürlich keine Grafik. (Sollten Sie noch nicht ganz sicher in Ihrer Aussage sein, dann messen Sie bitte nach.)

Konstruktion

Diese einfache Schaltung soll uns dazu dienen, die grafische Methode verstehen zu lernen. Zur genauen Betrachtung der Teilströme bei Anlegen an eine beliebige Spannung zwischen 0 und 10 V benötigen wir ein Strom/Spannungs-Diagramm mit den Widerstandsgeraden 470 Ω und 100 Ω nach Bild 9.24.

Zuerst müssen wir natürlich die Reihenschaltung von 2mal 100 Ω vereinfachen, also die Kennlinie des Ersatzwiderstandes bestimmen. Wir verlängern dazu die Spannungsstrecke 1 um die gleich große Spannungsstrecke 2. (Dies führt zu keinem anderen Ergebnis als die vorher etwas umständlicher besprochene Methode der Reihenschaltung.) Durch den Endpunkt der Verlängerungsstrecke 2 müßte die Widerstandsgerade für die Reihenschaltung von 100 Ω + 100 Ω gehen. Da wir an dieser Geraden jedoch nicht interessiert sind, können wir sie ganz weglassen. Im Bild 9.24 ist sie deshalb nur gestrichelt eingezeichnet.

Jetzt schalten wir zu diesem Ersatzwiderstand den 470-Ω-Widerstand parallel. Im Diagramm müssen Sie nur die Strecke 3 (für den 470-Ω-Widerstand) mit einem Zirkel oder Lineal ermitteln und die Strecke an den Endpunkt der Strecke 2 senkrecht nach oben ansetzen. Im Bild erscheint sie als Strecke 3′ (sprich: drei Strich). Wichtig ist, daß Sie die Größe der Strecke 3 genau senkrecht unter dem Endpunkt der Strecke 2 entnehmen. Bei Verschiebung nach links oder rechts würde der Wert zu klein oder zu groß sein.



9.24

Durch den Endpunkt der Strecke 3′ muß die gesuchte Widerstandsgerade für (100 Ω + 100 Ω) ‖ 470 Ω gehen. Im Bild ist diese Linie dick blau eingezeichnet. Aus dem besprochenen Vorgehen ergibt sich die nebenstehende Merkregel.

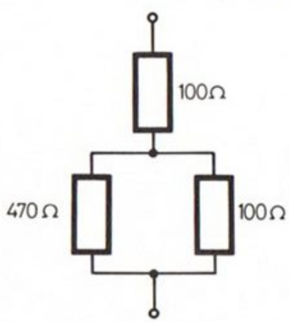
1. Anwendungsbeispiel

Aus dem Diagramm können Sie nun entnehmen, daß bei Anlegen einer Spannung von 6 V die Stärke des Gesamtstroms etwa 43 mA betragen muß. Überzeugen Sie sich durch Messung.

Ermitteln Sie nun bitte nach Bild 9.24 die Stromstärke im linken und rechten Strompfad, wenn Sie eine Spannung von 8,5 V anlegen. Wie hoch sind dann die Teilspannungen an den beiden in Reihe geschalteten Widerständen?

2. Anwendungsbeispiel

Bild 9.25 zeigt Ihnen eine andere Widerstandskombination. Ermitteln Sie, wie groß der Gesamtstrom und die Teilspannungen sowie die Teilströme etwa sind, wenn Sie die Widerstandskombination an eine Ihnen zur Verfügung stehende Spannungsquelle anschalten. Prüfen Sie durch Messung nach. (In diesem Fall müssen Sie zuerst die Parallelschaltung durch einen Ersatzwiderstand darstellen.)



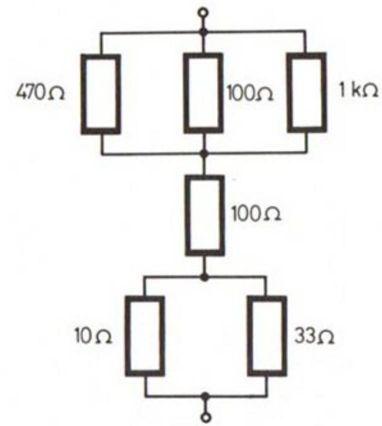
9.25

3. Anwendungsbeispiel

Zeichnen Sie bitte die Kennlinie für den Ersatzwiderstand der Kombination nach Bild 9.26. Ermitteln Sie grafisch die verschiedenen Teilspannungen und -ströme für eine Ihnen zur Verfügung stehende, bekannte Gesamtspannung. Prüfen Sie dann die ermittelten Werte durch Messung nach.

In-Reihe-schalten heißt grafisch: Die Spannungsstrecke nach rechts verlängern.

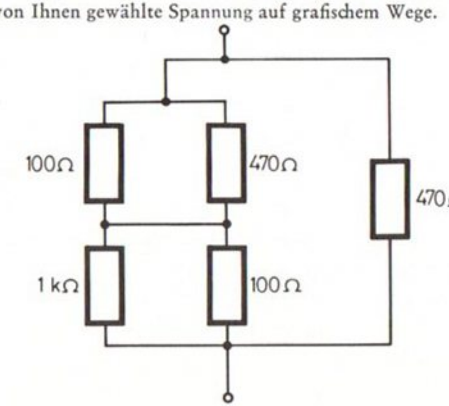
Parallel-schalten heißt grafisch: Die Stromstrecke nach oben verlängern.



9.26

4. Anwendungsbeispiel

Falls es Ihnen Spaß gemacht hat, ermitteln Sie bitte auch noch die Kennlinie für den Ersatzwiderstand der Schaltung 9.27 und bestimmen ebenfalls die Teilströme und Teilspannungen für die von Ihnen gewählte Spannung auf grafischem Wege.



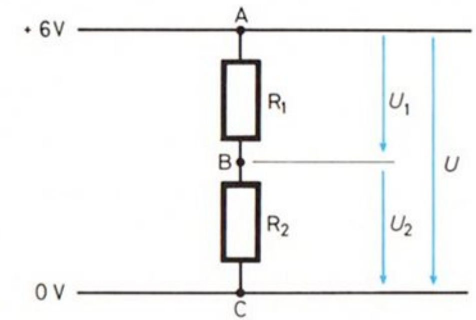
9.27

9.5 Strom/Spannungs-Diagramm des Spannungsteilers

Im Kap. 9.3 haben Sie bereits eine grafische Methode zur Darstellung eines Spannungsteilers kennengelernt, denn jede Reihenschaltung ist ja nichts anderes als ein Spannungsteiler.

Trotzdem wollen wir noch einmal auf die andere Art der Darstellung zurückkommen, die schon vorher im Kap. 7.12 kurz besprochen wurde. Sie beruht darauf, daß man den einen Teil des Spannungsteilers (er kann sich unter Umständen aus mehreren Bauteilen zusammensetzen) als künstlichen „Innenwiderstand" einer ganz bestimmten Spannungsquelle auffaßt, wie es im Bild 7.4 dargestellt ist. Die Umzeichnung dieses Bildes ergab das Bild 7.5, das genau dem Bild 9.28 entspricht.

Legt man an die Anschlüsse A–C dieses Spannungsteilers eine Spannung, z. B. von 6 V, dann steht an den Anschlüssen B–C eine Spannung U_2, deren Höhe von der Größe der Widerstandswerte R_1 und R_2 abhängt. Aus dem Diagramm 9.29 kann man für $U = 6$ V die Teilspannung U_2 (und auch die Teilspannung U_1) für verschiedene Werte von R_1 und R_2 entnehmen. Wie man das macht, werden Sie gleich sehen.

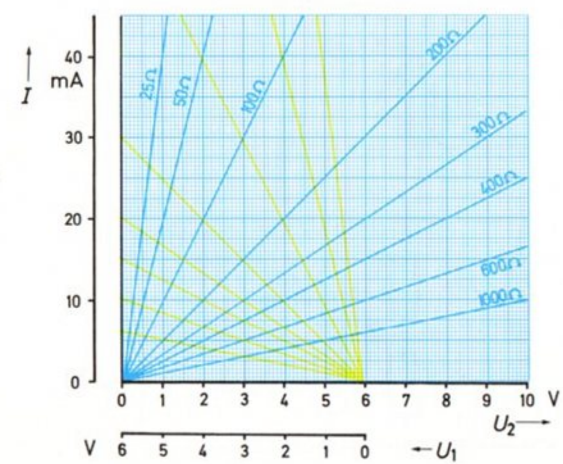


9.28

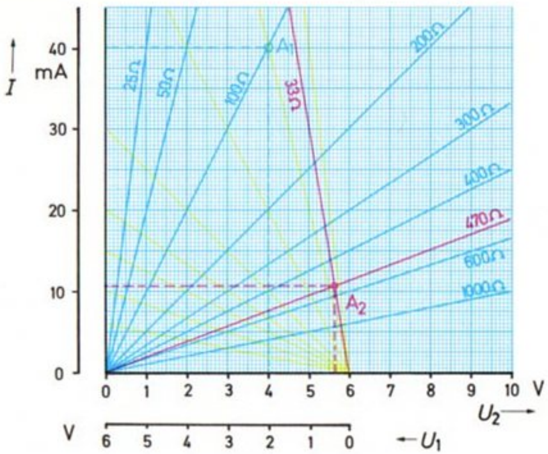
Konstruktion

Die verschiedenen, vom linken Nullpunkt ausgehenden (blauen) Widerstandsgeraden für R_2 sind in der bekannten Weise konstruiert (siehe Abschnitt 2.10).

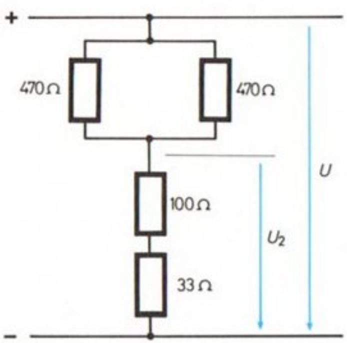
Im „Punkt" 6 V auf der waagerechten Achse sind spiegelbildlich dazu einige (gelb eingezeichnete) Widerstandsgeraden für R_1 eingetragen. Da R_1 als künstlicher Innenwiderstand der 6-V-Spannungsquelle aufgefaßt wird, gelten diese Diagramme nur für diese eine Quelle. Hätte die Betriebsspannung U einen anderen Wert, so müßte der Ausgangspunkt der Spannungsskala verlegt werden. (Die Konstruktion dieser Kennlinien haben Sie schon im Kap. 7.12 kennengelernt.)



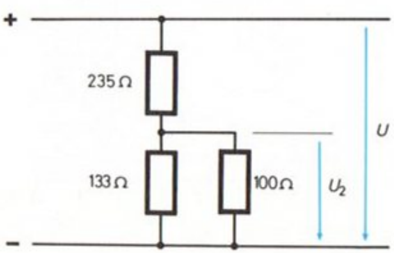
9.29



9.30



9.31



9.32

1. Anwendungsbeispiel

Soll die Teilspannung U_2 bestimmt werden, die sich z. B. für $R_1 = 50\ \Omega$ und $R_2 = 100\ \Omega$ ergibt, so sucht man den Schnittpunkt dieser beiden Widerstandsgeraden. Im Bild 9.30 ist er mit A_1 und blau gekennzeichnet. Der dazugehörige Spannungswert für U_2 wird senkrecht darunter auf der Spannungsskala abgelesen. Wieviel Strom im Stromkreis fließt, liest man auf der Stromskala ab. Im Beispiel ergeben sich für $I = 40$ mA und für $U_2 = 4$ V.

Im Diagramm 9.29 sind nur „runde" Werte von R_1 und R_2 angegeben. Wie man den Arbeitspunkt für beliebige Zwischenwerte von R_1 und R_2 ermittelt, zeigt Bild 9.30 am Beispiel mit $R_1 = 33\ \Omega$ und $R_2 = 470\ \Omega$. Wie groß ist die Teilspannung U_2 und welcher Strom fließt? Die Teilspannung U_1 können Sie am unteren Spannungsmaßstab ablesen. Welchen Wert müssen beide Spannungen zusammen ergeben?

2. Anwendungsbeispiel

Vielleicht konstruieren Sie dasselbe Diagramm für eine Ihnen tatsächlich zur Verfügung stehende Spannung U und ermitteln danach die Werte für den Spannungsteiler nach Bild 9.31.

In diesem Fall könnten Sie sich durch Messung von der Richtigkeit Ihrer Rechnung überzeugen.

3. Anwendungsbeispiel

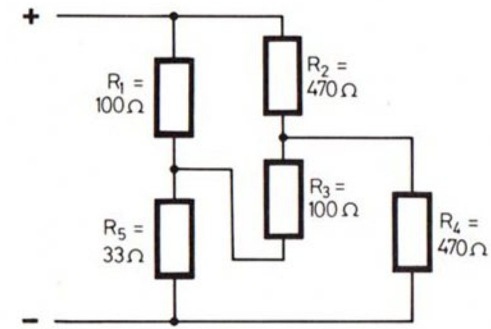
Natürlich gilt das Diagramm auch für einen belasteten Spannungsteiler nach Bild 9.32 bei einer bestimmten Spannung. Sie müssen allerdings in diesem Fall statt R_2 den durch Rechnung oder grafisch ermittelten Ersatzwiderstand für die Parallelschaltung von 133 Ω und 100 Ω zur Bestimmung des „Arbeitspunktes" heranziehen.

Allgemeine Anwendung

Bei elektronischen Schaltungen kommt es häufig vor, daß Halbleiterbauelemente, wie z. B. ein Transistor, mit einem Ohm'schen Widerstand zusammen einen Spannungsteiler bilden. In diesem Fall kann nur diese Art der Darstellung zur Ermittlung des „Arbeitspunktes" angewendet werden, weil die Strom/Spannungs-Kennlinien von Halbleiter-Bauelementen nicht wie die von Ohm'schen Widerständen linear verlaufen, sondern „gekrümmt" sind. Wir werden dieses Thema im „hobby-Labor 2" noch sehr ausführlich behandeln.

9.6 Kirchhoff'sche Regeln

Das Ersatzschaltbild gegenseitig „vernetzter" oder „vermaschter" Stromkreise kann man nicht mehr so einfach bestimmen. Bild 9.33 zeigt ein solches „vermaschtes Netzwerk". Sie können die Größe des Ersatzwiderstandes der ganzen Schaltung natürlich durch Messung der angelegten Spannung und des in das Netzwerk hineinfließenden Stroms bestimmen. Ebenso die Teilströme und Teilspannungen. Wer aber nicht messen, sondern rechnen will, braucht dazu die beiden Gesetze, die erstmals von dem Physiker Kirchhoff (1824–1887) formuliert wurden und daher die „Kirchhoff'schen Regeln" genannt werden.



9.33

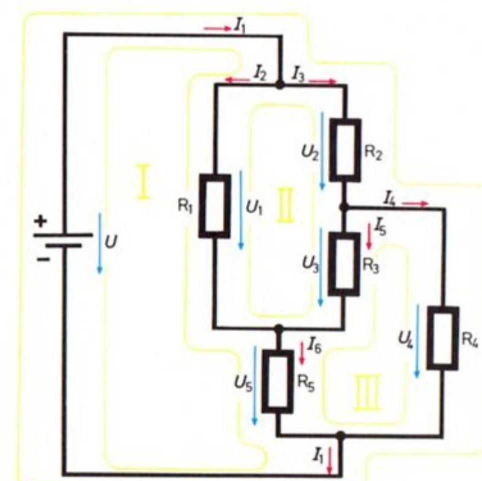
Knotenpunktregel

In jedem Knotenpunkt ist die Summe der ankommenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme.

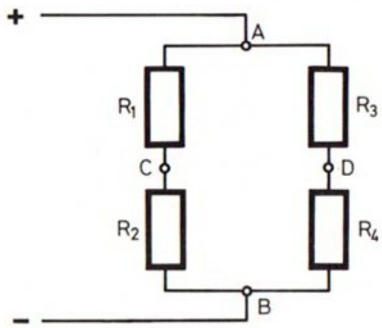
Maschenregel

In jeder Masche ist die Summe der Teilspannungen gleich der Summe der Spannungen der in dieser Masche enthaltenen Spannungsquellen. (Man zählt die Teilspannungen innerhalb einer Masche von einem beliebigen Punkt ausgehend im Gegensinn des Uhrzeigers. In der Masche II z. B. von Bild 9.34 müßte es heißen: $U_1 - U_3 - U_2 = 0$, da die Spannungspfeile von U_2 und U_3 in die entgegengesetzte Richtung zeigen wie die „Zählrichtung".)

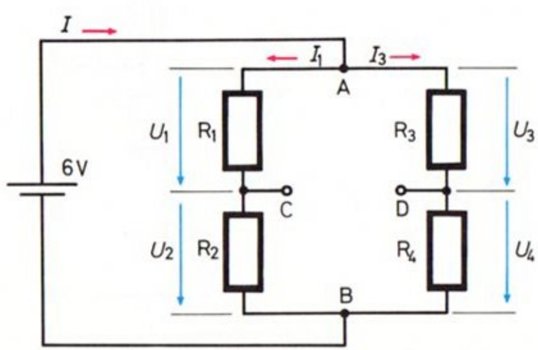
Es würde zu weit führen, die Berechnung hier im einzelnen zu erklären. Nur so viel sei gesagt; Man stellt mathematische Gleichungen auf und benötigt insgesamt eine Gleichung mehr als Unbekannte (im Beispiel I_1 bis I_6) vorhanden sind. Im hobby-Labor 2 kommen wir auf diese Regeln noch einmal zurück.



9.34



10.1



10.2

10 Die Brückenschaltung

Die „Brücke" ist eine in der Elektronik und in der Meßtechnik sehr häufig vorkommende, wichtige Schaltung.

Sie entsteht, wenn 2 einfache Spannungsteiler nach Bild 10.1 parallelgeschaltet werden. Sie ermöglicht bei entsprechender Ausgestaltung sehr genaue Messungen.

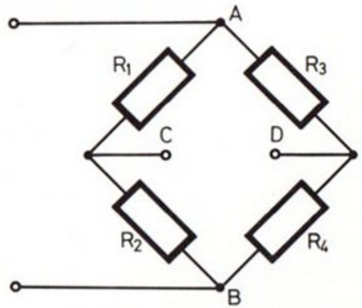
Von den vielen Möglichkeiten wollen wir jetzt nur die nach dem englischen Physiker Charles Wheatstone (1802–1875) benannte Schaltung 10.1 untersuchen – und auch das nur soweit, wie es für das grundsätzliche Verständnis nötig ist. Über die „Brücke" kann man nämlich ganze Bücher schreiben – so vielseitig läßt sie sich anwenden und variieren.

10.1 Aufbau

Wie Bild 10.2 zeigt, ist der Spannungsteiler ($R_1 + R_2$) zu dem Spannungsteiler ($R_3 + R_4$) parallel geschaltet. Die Schaltung besitzt die beiden „Knotenpunkte" A und B sowie die beiden „Arbeitspunkte" C und D. Am Knotenpunkt A teilt sich der Strom I durch die beiden Spannungsteiler in die Teilströme I_1 und I_3. An den Arbeitspunkten C und D wird die anliegende Spannung U in die Teilspannungen U_1, U_2, U_3 und U_4 aufgeteilt.

10.2 Orientierende Versuche

Häufig findet man auch die in Bild 10.3 dargestellte Zeichnungsweise. Die Strecke C-D nennt der Fachmann „Diagonalzweig“ und die Reihenschaltungen der Widerstände R_1 und R_2 einerseits und R_3 und R_4 andererseits die „Brückenzweige“. Jeder der vier Widerstände ist ein „Brückenglied“.



10.3

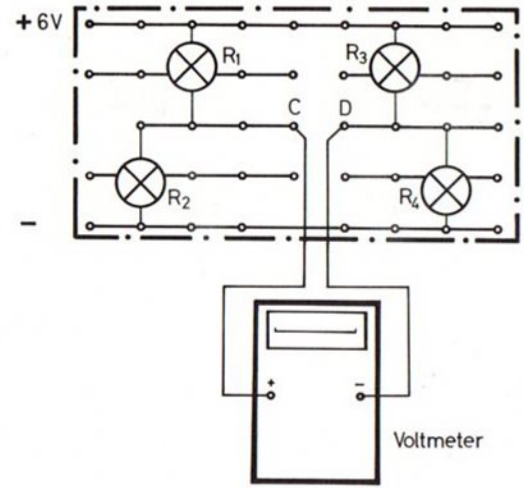
Wir wollen nun untersuchen, wie sich die Schaltung in bezug auf den Diagonalzweig C-D verhält, wenn die Werte der vier Widerstände in einer ganz bestimmten Art in Beziehung zueinander gesetzt werden.

1. Versuch

Bauen Sie bitte die Schaltung 10.2 auf. Als Widerstände benutzen Sie die vier Lampen Ihres hobby-Labors. Bild 10.4 zeigt eine der Steckmöglichkeiten auf dem Experimentierfeld. Ihre Lämpchen werden sicher nicht alle ganz gleich hell leuchten. Messen Sie bitte die Gesamtspannung und alle Teilspannungen sowie vor allem die Spannung zwischen den Punkten C und D nach Bild 10.4. Auch die Teilströme I_1 und I_3 sind von Interesse.

Schalten Sie bitte das (+)Meßkabel zunächst an C, das (–)Meßkabel an D an. D i e s e M e ß a n w e i s u n g g i l t f ü r a l l e f o l g e n d e n V e r s u c h e. Dann tragen Sie die gemessenen Werte in die Tabelle 10.5 ein.

10.4



10.5

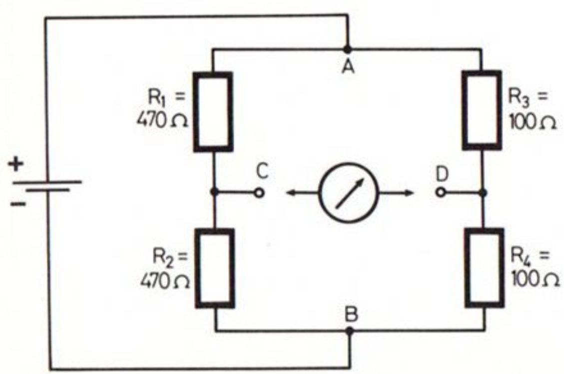
Meßwerte	4 Lampen		$R_1=R_2=470\Omega$ und $R_3=R_4=100\Omega$	$R_1=R_3=470\Omega$ und $R_2=R_4=100\Omega$
	beliebig	La_3 und La_4 vertauscht		
U in V				
U_1 U_2 U_3 U_4 in V				
U_{C-D} in V				
I_1 I_3 in mA				

Eine Bemerkung zur Festlegung des Index C-D (im folgenden kurz CD geschrieben): Die Reihenfolge der Index-Buchstaben wird in der Elektronik nicht beliebig gewählt: An 2. Stelle wird immer derjenige Punkt genannt, auf den das Potential des erstgenannten Punktes „bezogen" werden soll. In unserem Beispiel lautet die Frage: Hat der Punkt C „in bezug auf" den Punkt D positives oder negatives oder gleiches Potential? Dementsprechend erhält U_{CD} ein positives oder ein negatives Vorzeichen, bzw. U_{CD} ist gleich Null.

Sollte der Zeiger Ihres Voltmeters bei der Messung der Spannung U_{CD} nach links ausschlagen, so vertauschen Sie die Meßkabel und tragen den gemessenen Wert – aber mit einem Minus-Zeichen versehen – in die Tabelle ein.

Nun vertauschen Sie bitte Lampe 3 und 4 und messen erneut die Spannung U_{CD}. Jetzt muß der Zeiger nach der entgegengesetzten Richtung wie vorher ausschlagen. Tragen Sie auch diesen Wert in die Tabelle 10.5 ein.

Schlägt der Zeiger bei der ersten Messung z. B. nach rechts bis zum Wert 0,2 V aus, so muß er nach Platztausch von La_3 und La_4 und bei Einhaltung der genannten Regel: (+) an C und (–) an D, nach links ausschlagen. Nach Umpolung der Voltmeter-Meßkabel können Sie den „Betrag" der Spannung ablesen.



10.6

2. Versuch

Auch Sie werden für U_{CD} nur einen kleinen Wert messen, falls die 4 Lampen annähernd gleich hell leuchten. Wie sieht es jedoch aus, wenn Sie eine der 4 Lampen gegen eine Lampe aus dem hobby-3- oder e-m-Baukasten austauschen?

3. Versuch

Der Widerstandswert von Lampen ist, wie wir im Abschn. 4.9.3 gesehen haben, eine unsichere Angelegenheit. Zur genauen Untersuchung ersetzen wir daher die Lämpchen durch Schichtwiderstände nach Bild 10.6. Messen Sie erneut alle Spannungen sowie die Teilströme. Sie werden vielleicht auch hier wieder einen kleinen Ausschlag bei der Messung von U_{CD} feststellen. Bei Vertauschen von R_3 und R_4 oder auch bei Vertauschen von R_1 und R_2 wird der Ausschlag sein „Vorzeichen“ ändern. Auf jeden Fall werden aber die Teilspannungen $U_1 - U_2 - U_3 - U_4$ etwa gleich hoch sein. Die Werte tragen Sie bitte wieder in die Tabelle 10.5 ein.

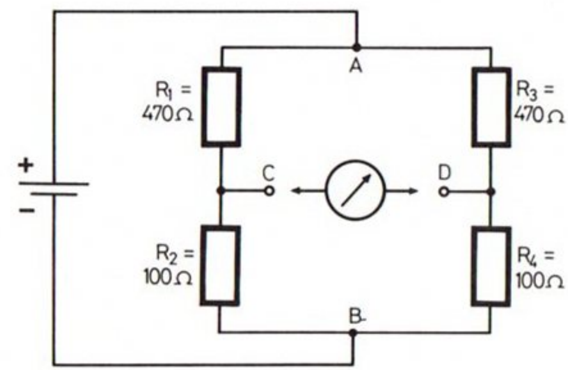
4. Versuch

Nun setzen Sie dieselben Widerstände nach dem Bild 10.7 in die Schaltung ein. Messen Sie bitte die entsprechenden Größen und tragen Sie die Werte in die Tabelle 10.5 ein.

Jetzt ist zwar U_1 ebenso hoch wie U_3 und U_2 so hoch wie U_4, aber das Verhältnis von U_1 zu U_2 ist nicht mehr wie beim 2. Versuch 1:1, sondern etwa 5:1. Dasselbe gilt für U_3 und U_4.

Und trotzdem ist die Spannung U_{CD} wieder nur fast Null. Wenn Sie in dieser Schaltung allerdings R_1 und R_2 vertauschen, erhalten Sie einen Riesenausschlag bei der Messung von U_{CD}.

„Spielen“ Sie bitte ein bißchen mit diesen (oder auch anderen) Widerständen herum und versuchen Sie herauszufinden, wie sich die Widerstandswerte (bzw. die an diesen auftretenden Spannungen) zueinander verhalten müssen, damit U_{CD} gleich (oder fast gleich) Null ist. Vielleicht gelingt es ihnen, bevor Sie die nächsten Seiten gelesen haben.



10.7

10.3 Die abgeglichene Brücke

Eine Brücke ist abgeglichen, wenn die Widerstandsverhältnisse der beiden, die Brücke bildenden Spannungsteiler genau gleich groß sind.

Aus den Versuchen geht hervor, daß U_{CD} immer dann gleich Null ist, wenn das Verhältnis der Widerstände des einen Spannungsteilers genau gleich dem Widerstandsverhältnis des parallel liegenden Spannungsteilers ist. Man sagt dann: Die Brücke ist „abgeglichen".

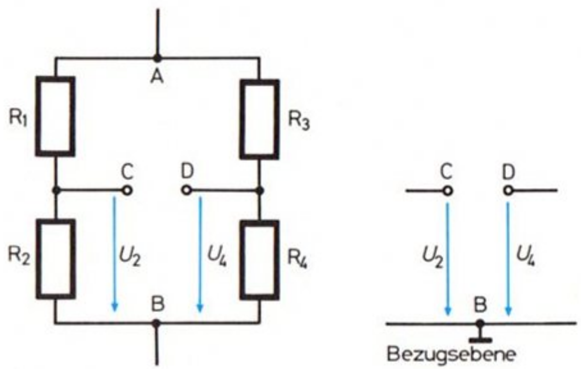
Nun kann man folgende mathematische Beziehung formulieren:

$$\text{wenn} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}, \quad \text{dann ist } U_{CD} = 0$$

In bezug auf die Teilspannungen gilt dann entsprechend:

$$\text{wenn} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_3}{U_4}, \quad \text{dann ist } U_{CD} = 0$$

Wichtig ist, daß eine Brücke auch dann abgeglichen sein kann, wenn sich die Teilströme durch die beiden Spannungsteiler stark unterscheiden, wie aus Tabelle 10.5 hervorgeht. Es kommt eben nicht auf die einzelnen Werte der Widerstände bzw. die Stromstärken, sondern a l l e i n auf das Verhältnis der Widerstandswerte an!



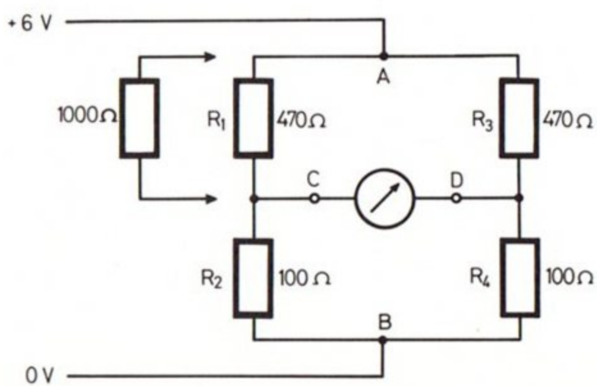
10.8

Hier kommt Ihnen auch das, was im Kapitel 4.7 über die Potentialdifferenz gesagt wurde, zustatten. Zwischen den Punkten C und D tritt immer dann keine Spannung bzw. Potentialdifferenz auf, wenn beide Punkte das gleiche Potential – z. B. vom Punkt B (Bezugsebene!) aus gesehen – haben (Bild 10.8).

Nun müssen wir nur noch überlegen, warum der Zeiger des Meßgerätes in der angegebenen „Polung" (+ an C) bei nicht genau abgeglichener Brücke einmal nach links und ein andermal wieder nach rechts ausschlägt.

Versuch

Bauen Sie bitte nochmals die Schaltung 10.7 auf. Nehmen wir an, die Brücke sei „abgeglichen" (auch wenn sie es nicht genau sein sollte). Verkleinern Sie jetzt bitte nach Bild 10.9 den Widerstands-



10.9

wert des Brückengliedes R_1 durch Parallelschalten eines 1000-Ω-Widerstandes. Was wird dadurch bewirkt? Da R_1 kleiner geworden ist, ist auch U_1 niedriger geworden. Nach den „Spannungsteiler-Regeln" muß U_2 dann entsprechend höher werden. Und das bedeutet, daß das (+)Potential des Punktes C gegenüber der Bezugsebene von B (siehe Bild 10.8) angestiegen ist. Da sich das Potential des Punktes D aber nicht geändert hat, entsteht zwischen den Punkten C und D eine Potentialdifferenz. Der Punkt C wird „positiver" als der Punkt D. Der Zeiger wird daher nach rechts ausschlagen. (Die Brücke ist jetzt „verstimmt".) Überzeugen Sie sich davon.

Ebenfalls nach rechts muß der Zeiger wandern, wenn Sie einen 1000-Ω-Widerstand parallel zu R_4 anschalten, also R_4 verkleinern. In diesem Fall sinkt das (+)Potential des Punktes D in bezug auf B und wird damit kleiner als das (+)Potential von C. Es entsteht wieder eine Potentialdifferenz mit demselben Vorzeichen, da Punkt C dadurch „positiver" als Punkt D geworden ist.

Anders wird die Sache, wenn Sie das Brückenglied R_2 durch Zuschalten von 1000 Ω verkleinern. In diesem Fall sinkt das (+)Potential des Punktes C; er wird also „negativer" als Punkt D. Der Zeiger schlägt nach links aus. Das gleiche geschieht, wenn Sie R_3 verkleinern. Auch davon sollten Sie sich überzeugen.

Die Spannung U_{CD} wird also immer dann mit einem (+)Zeichen versehen (man kann es aber auch als „selbstverständlich" weglassen), wenn der Punkt C gegenüber dem Punkt D („in bezug" auf den Punkt B) ein höheres (+)Potential führt, d. h., wenn C positiver als D ist.

U_{CD} erhält ein (–)Vorzeichen, wenn das (+)Potential kleiner wird als das von Punkt D (natürlich wieder bezogen auf das Potential von B = 0). Dann ist C nämlich „negativer" als D.

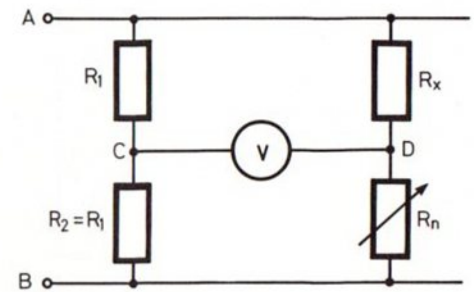
Vielleicht lesen Sie noch einmal das Kap. 4.7 durch, damit Ihnen diese, besonders für spätere elektronische Versuche so außerordentlich wichtigen Zusammenhänge klar werden. Ein Transistor z. B. reagiert ausgesprochen sauer, wenn er mit falschen Potentialen gefüttert wird!

10.4 Anwendungen

10.4.1 Widerstandsbestimmung

Die besprochene Brückenschaltung spielt in der Meßtechnik eine ausschlaggebende Rolle. Deshalb wollen wir sie ausgiebig erproben.

Zur Messung eines unbekannten Widerstandes R_x bauen wir im Geist zunächst die schon bekannte Schaltung nach Bild 10.10 auf. Wir machen R_1 gleich R_2. Den einstellbaren Widerstand, mit dem wir die Brücke abgleichen wollen, nennen wir R_n.



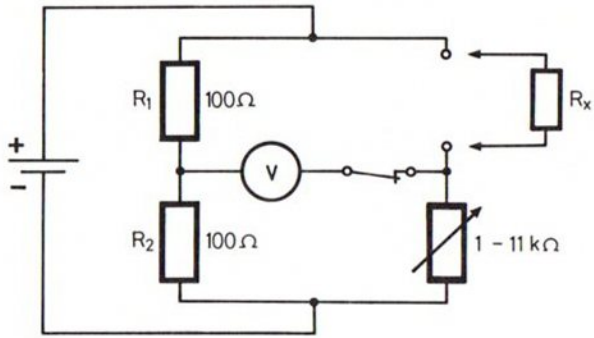
10.10

Wir benutzen dafür unser 10-kΩ-Poti mit den Anschlüssen A und S. Dann gilt für die abgeglichene Brücke:

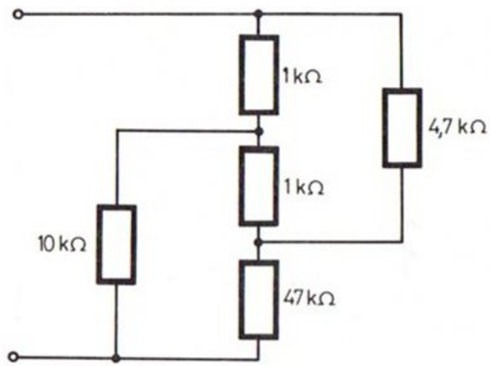
$$R_x = R_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\text{; für } R_1 = R_2 \text{ ist } R_x = R_n \cdot \frac{1}{1}$$

$$R_x = R_n$$

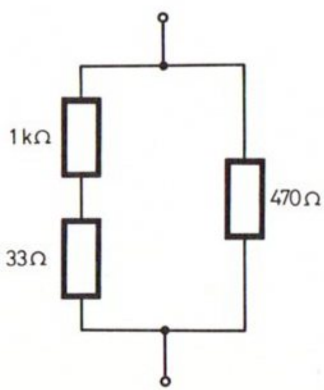
Der gesuchte Wert R_x des unbekannten Widerstandes ist also gleich dem bekannten Wert des Widerstandes R_n – wenn $U_{CD} = 0$ ist. Hat man nun einen „geeichten" Stellwiderstand R_n, dessen genauer Wert auf einer Skala abgelesen werden kann, dann hat man damit auch den genauen Wert des unbekannten Widerstandes.



10.11



10.12



10.13

Die Vorteile einer solchen Meßbrücke liegen einmal darin, daß es gleichgültig ist, wie hoch die angelegte Spannung *U* ist, da ja das Verhältnis der Spannungen nur vom Widerstandsverhältnis abhängt; zum anderen läßt sich ein „Null-Abgleich" mit Meßgeräten, die noch etwas Spielraum links vom Nullpunkt haben, wie Ihr ft-Instrument, sehr exakt durchführen. (Meßwerke, die nur solchen Zwecken dienen, haben den Nullpunkt deswegen in der Mitte der Skala.) An die Güte des Meßwerks werden ebenfalls keine großen Ansprüche gestellt: Null zeigt jedes Instrument ziemlich präzise an. Deshalb hängt die Genauigkeit der Messung lediglich von der Eichgenauigkeit des Stellwiderstandes ab!

1. Versuch

Messen Sie bitte mit einer Brückenschaltung nach Bild 10.11 die in Bild 10.12 gezeigte Widerstandskombination.

Der Aufbau so vieler Widerstände wird ein ziemliches „Gedränge" auf dem Experimentierfeld verursachen. Sie kommen aber zurecht, wenn Sie 2 Widerstandsanschlüsse in eine Buchse stecken, was beim Experimentierfeld erfreulicherweise möglich ist.

Verstellen Sie den Drehknopf des Stellwiderstandes (Poti), bis der Spannungsmesser keinen Ausschlag mehr zeigt. Zur Kontrolle ist ein Austaster in die Leitung geschaltet: Der Abgleich ist vollkommen, wenn der Zeiger beim Drücken und Loslassen der Taste keine Regung mehr zeigt.

Entnehmen Sie den Widerstandswert des Stellwiderstandes in der gefundenen Drehknopfstellung dem von Ihnen erstellten Eichdiagramm 5.15 bzw. 5.20. Dieser Wert entspricht dem Widerstandswert der untersuchten Kombination.

2. Versuch

Bestimmen Sie nun bitte den Widerstandswert der Kombination nach Bild 10.13.

Sie werden feststellen, daß ein Abgleich mit dem 10-kΩ-Poti nicht möglich ist, da es nicht kleiner als auf 1 kΩ gestellt werden kann; die zu untersuchende Widerstandskombination hat aber einen Wert „so um die 300 Ω". Deshalb müssen wir den Meßbereich der

Brücke ändern. Ersetzen Sie bitte den Widerstand $R_2 = 100\ \Omega$ durch einen 1000-Ω-Widerstand. Nun ist das Teilerverhältnis $R_1 : R_2 = 1:10$. Nach Abgleich der Brücke gilt die schon bekannte Formel:

$$R_x = R_n \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

Daraus ergibt sich für $R_2 = 10 \cdot R_1$:

$$R_x = 0{,}1 \cdot R_n$$

Somit erhält man bei diesem Teilerverhältnis von $R_1 : R_2$ einen Meßbereich der Brücke von etwa 100 Ω bis 1100 Ω.

Sollen mit dieser Brücke jedoch Widerstandswerte zwischen 10 kΩ und 110 kΩ bestimmt werden, so wählt man für $R_1 = 1000\ \Omega$ und für $R_2 = 100\ \Omega$. Dann ergibt sich:

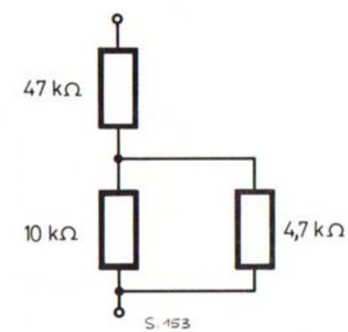
$$R_x = \frac{1000}{100} \cdot R_n = 10 \cdot R_n$$

3. Versuch

Sie können den Widerstandswert der Kombination nach Bild 10.13 auch ermitteln, wenn Sie $R_1 = R_2 = 100\ \Omega$ belassen, aber als Stellwiderstand das 1-kΩ-Poti in die Schaltung von Bild 10.11 einsetzen.

4. Versuch

Ermitteln Sie bitte den Wert der Widerstandskombination von Bild 10.14. Sie sollten den Meßwert durch Rechnung überprüfen!



10.14

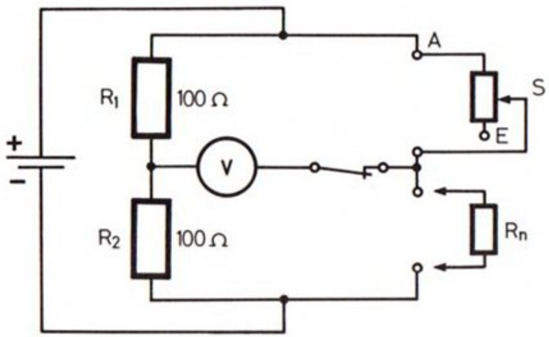
10.4.2 Eichung des Potentiometers in der Brücke

Sie haben Ihr 10-kΩ-Potentiometer schon zweimal geeicht. Sie sollten es jetzt mit der Brücken-Methode noch ein drittes Mal tun, denn ein Vergleich der erhaltenen Eichkurven ist immer interessant. Außerdem lernen Sie die „Mucken“, die fast jedes Poti besitzt, immer genauer kennen.

Versuch

Bauen Sie bitte die Schaltung 10.15 auf und setzen Sie als unbekannten Widerstand R_x die Anschlüsse A-S des 10-kΩ-Potis ein.

Als bekannten Widerstand R_n, also als „Eich-Normal“, benutzen Sie der Reihe nach die in Tabelle 10.16 aufgeführten Widerstandswerte, die Sie z. T., ähnlich wie bei Tabelle 7.16, zusammensetzen müssen.



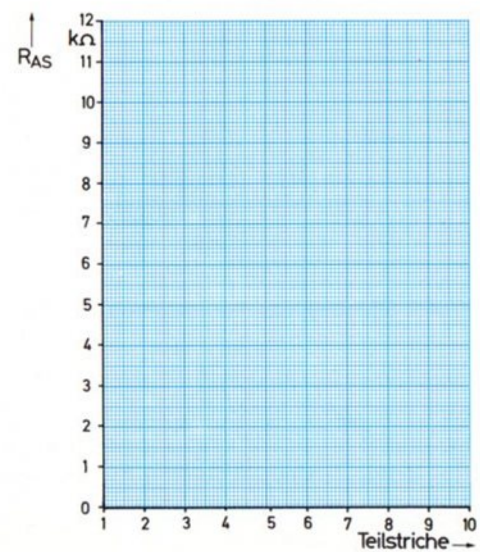
10.15

Gleichen Sie in der bekannten Weise mit dem Drehknopf „auf Null“ ab und tragen Sie die entsprechende Drehknopfstellung in Tabelle 10.16 ein. R_n ist dann gleich R_{AS} plus dem im Bild 10.15 nicht eingezeichneten Schutzwiderstand (R_S) von 1 kΩ. R_{AS} ist demnach gleich R_n – 1 kΩ; die Werte sind schon in der 3. Spalte der Tabelle 10.16 eingetragen. Übertragen Sie nun die Werte von R_{AS} und die ermittelten Skalenwerte in das Eichdiagramm 10.17.

Verbinden Sie bitte die Koordinatenpunkte zur Eichkennlinie. Sie muß nicht unbedingt geradlinig verlaufen und kann (wie die anderen Eichkurven) Knicke aufweisen. Sprünge zwischen einzelnen Werten sollten aber ausgeglichen werden, denn sie sind auf Meßfehler oder auf Ungenauigkeit der verwendeten einfachen „Eichnormale“ zurückzuführen.

10.16

für $R_P = R_{AE} = \ldots$ kΩ				
R_n in kΩ	Abgleich bei Drehknopfstellung	$R_{AS} = R_n - 1$ kΩ in kΩ	$R_{ES} = R_{AE}-R_{AS}$ in kΩ	$V = R_{AS} : R_{SE}$
1,47		0,47		
3,2		2,2		
4,7		3,7		
5,7		4,7		
6,7		5,7		
8,2		7,2		
10		9,0		
11		10,0		

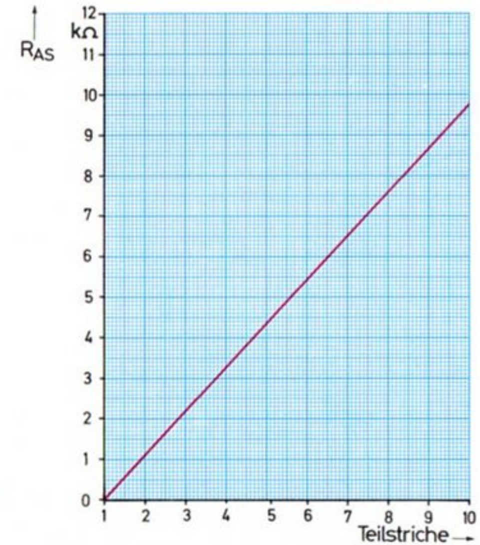


10.17

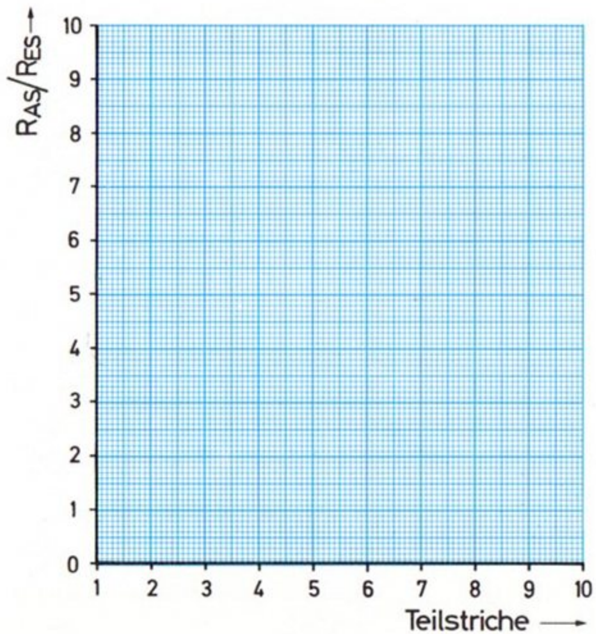
Die von Ihnen gemessenen Werte können von denen im Bild 10.18 ziemlich abweichen. Sie müssen nämlich wissen, daß Kohleschicht-Potis dieser Bauart ausgesprochene Individualisten sind: Manche haben genau den angegebenen Widerstandswert von 10 kΩ, manche haben mehr und andere wieder weniger. Das hier gemessene Poti hat z. B. nur einen Wert von 9,6 kΩ.

Für den Versuch des nachfolgenden Abschnitts benötigen wir nun nicht den wirklichen Widerstandswert des Potentiometers zwischen den Anschlüssen A und S (oder zwischen E und S), sondern das „Teilerverhältnis V“, Verhältnis der Widerstandswerte von R_{AS} zu R_{ES}. Dazu müssen Sie den Gesamtwiderstand des Potentiometers (zwischen A und E) noch ermitteln. Die Differenz von R_{AE} und R_{AS} ergibt die Werte von R_{ES}. Tragen Sie diese bitte noch in die Tabelle 10.16 ein.

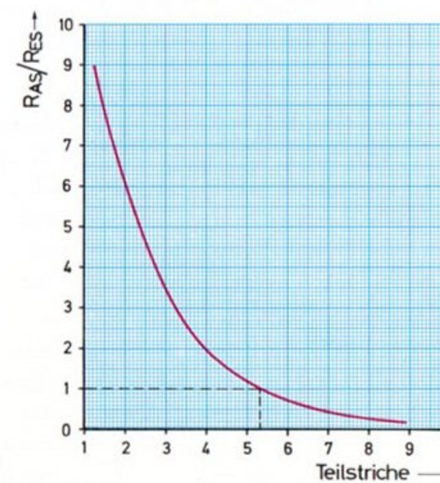
Nun können Sie das Verhältnis $R_{AS} : R_{ES}$ ausrechnen. Nach Eintragung in die Tabelle erstellen Sie das entsprechende Diagramm 10.19. Es wird ähnlich Bild 10.20 aussehen.



10.18

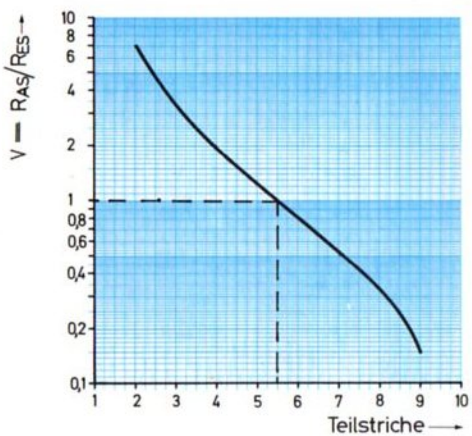


10.19



10.20

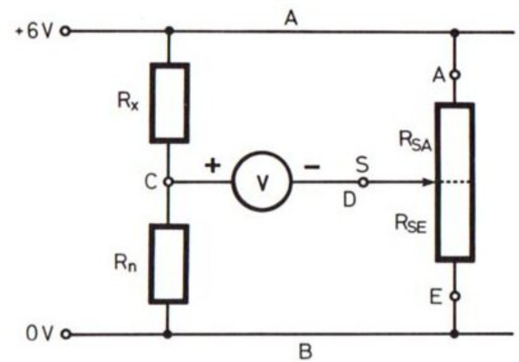
Die Ablesung der Werte für das Teilerverhältnis V = kleiner als 1 ist bei dieser Darstellung sehr ungenau. Deshalb benutzt man dafür besser ein Koordinatennetz mit „nichtlinearer“ Skala für das Teilerverhältnis *V*. Als Beispiel zeigt Bild 10.21 eine „logarithmische“ Unterteilung der *V*-Achse. Sie hat den großen Vorteil, daß auf diese Weise sehr hohe Werte auf einem verhältnismäßig kurzen Achsenabschnitt untergebracht werden können. Vor allem können jetzt die Werte für *V* unterhalb der Mittelstellung des Potis bei 5,5 Skalenteilen ($R_{AS} = R_{ES}$; $V = 1$) im Gegensatz zu Bild 10.20 viel genauer abgelesen werden. Auf die mathematische Erklärung, warum die Kurve im Bild 10.20 jetzt anders verläuft, soll hier verzichtet werden.



10.21

10.4.3 Meßbrücke mit Potentiometer

Da es bei einer Brückenschaltung nur auf das Verhältnis der Widerstände zueinander ankommt, liegt der Gedanke nahe, das sich stets zu einem konstanten Wert ergänzende, jedoch durch den Schleifer veränderbare Widerstandsverhältnis eines Potentiometers für die Meßbrücke auszunutzen. Bild 10.22 zeigt eine solche Anordnung. Der Schutzwiderstand R_S ist weggelassen, weil er ja in dieser Anordnung beim „Abgleich“ der Brücke nicht vom Strom durchflossen wird.



10.22

Versuch

Die Messung eines unbekannten Widerstandes ist jetzt einfach, weil wir ja das Verhältnis der durch den Schleifer des 10-kΩ-Potentiometers gebildeten Teilwiderstände $R_{AS} : R_{SE}$ bei jeder Drehknopfstellung aus dem eben erstellten Diagramm 10.21 entnehmen können. Es gilt:

$$R_x = R_n \cdot \frac{R_{AS}}{R_{SE}}$$

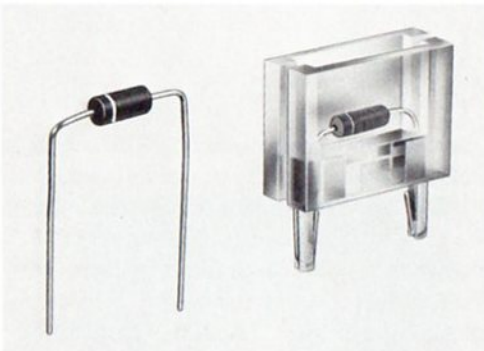
Für den „Vorabgleich" der Brücke wird man für den Widerstand R_n einen Wert wählen, der größenordnungsmäßig dem gesuchten Wert entspricht. Ist der Wert des zu untersuchenden R_x auch nicht annähernd bekannt, so wird man zunächst für R_n vielleicht 1000 Ω wählen. Schlägt der Zeiger in der Schaltung 10.22 (Polarität beachten!) bei einer Mittelstellung des Poti-Drehknopfes nach rechts aus, so ist R_n größer als R_x. Man verkleinert also R_n auf 470 Ω. Schlägt jetzt der Zeiger nach links aus, dann weiß man, daß R_x kleiner als 1000 Ω und größer als 470 Ω ist, also zwischen diesen beiden Werten liegt. (Sollte der Zeiger bei $R_n = 470\ \Omega$ immer noch nach rechts ausschlagen, so wählen Sie für R_n einen Wert von 100 Ω. Zur weiteren Verkleinerung müssen Sie wegen der sonst zu starken thermischen Belastung der Widerstände die Betriebsspannung vermindern.) Haben Sie die Größenordnung von R_x auf diese Weise ungefähr „eingegrenzt", dann gleichen Sie mit Hilfe des Drehknopfes „fein" ab.

Mit dieser Methode können Sie nun Widerstandswerte zwischen 100 Ω und 100 kΩ bestimmen. Versuchen Sie dies mit einigen, leicht durch Rechnung zu kontrollierenden Widerstandskombinationen.

Ergebnis

Dieses Verfahren ist, wie Sie festgestellt haben werden, nicht sehr genau. Das liegt jedoch nur daran, daß unser Potentiometer für diese Zwecke keineswegs ausreicht. In der Praxis verwendet man ausgesprochene Präzisionspotentiometer, deren Widerstandsbahnen nicht aus Kohle bestehen, sondern aus speziellem Widerstandsdraht gewickelt sind. Dazu kommen noch besondere Vorkehrungen, die eine ganz exakte Ablesung des jeweiligen Drehwinkels gestatten.

Dieser Versuch, mit dem wir das große Gebiet „Widerstand im Gleichstromkreis" abschließen wollen, sollte nur dazu dienen, Ihnen das Prinzip einer Meßbrücke zu verdeutlichen. Und wenn man bedenkt, wie wenig genau die Ablesung der Teilstrichwerte am Drehknopf unseres Potentiometers möglich ist und mit welchen Unregelmäßigkeiten der Potentiometerwiderstand selber behaftet ist, dann ist die Meßgenauigkeit doch immer noch recht beachtlich.



11.1

11 Die Diode

Nachdem Sie nun die wichtigsten Zusammenhänge der elektrischen Grundgrößen kennengelernt und im Experiment praktisch ausprobiert haben, wollen wir uns zur Abwechslung einen elektronischen Leckerbissen „zu Gemüte führen“: die Diode.

Es wäre zu früh, jetzt schon die „Theorie der Halbleiter“ zu behandeln – damit werden wir uns im „hobby-Labor 2“ ausführlicher beschäftigen. Wir wollen jetzt vielmehr gleich in die experimentelle Praxis einsteigen.

Die Ihrem hobby-Labor beigegebene Diode ist bereits in einem Steckergehäuse montiert. Sie trägt die Beschriftung 1N 4001, und das eine Ende ist durch einen Ring gekennzeichnet. Die auf dieser Seite aus dem „Körper“ der Diode herausgeführte Elektrode wird als „Kathode“ bezeichnet, d. h., es handelt sich um den (–)Anschluß der Diode (siehe Bild 11.1). Die andere Elektrode ist die „Anode“.

11.1 Ein elektrisches Ventil

11.1.1 Erste Versuche

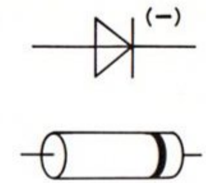
Das Ventil des Auto- oder Fahrradreifens hat die Aufgabe, Luft in der einen Richtung durchzulassen; in der anderen Richtung darf jedoch kein Luftstrom möglich sein. Um festzustellen, ob ähnliches auch für ein elektrisches Ventil gilt, machen Sie am besten gleich einen Versuch.

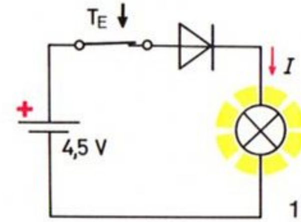
Versuch

Bild 11.2 zeigt das Schaltzeichen einer Diode, in dem der Querstrich vor der Pfeilspitze dem Ring auf dem Diodenkörper entspricht. Die Pfeilspitze zeigt also in die konventionelle Stromrichtung! Bild 11.3 zeigt die einfache Versuchsanordnung. Was tut das Lämpchen, wenn Sie T_E drücken?

Nehmen Sie die Diode aus der Schaltung heraus und setzen Sie sie umgekehrt in die Schaltung wieder ein (Bild 11.4). Was geschieht jetzt bei Tastendruck?

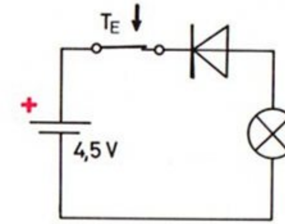
11.2





11.3

11.4



T_E ist in betätigtem Zustand gezeichnet

Ergebnis

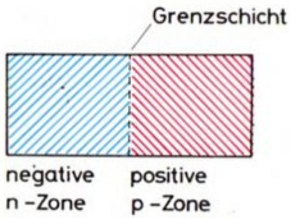
Ganz simpel ausgedrückt: In der einen Richtung läßt die Diode den Strom durch, in der anderen nicht.

Beweis: Das eine Mal brennt das Lämpchen, das andere Mal nicht!

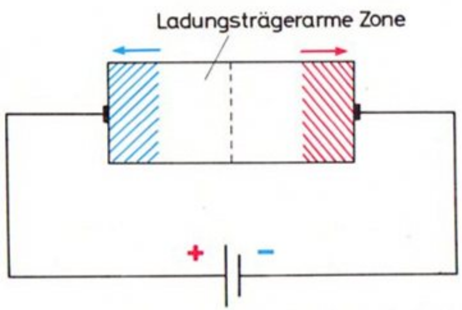
Schlußfolgerung

Die Diode ist ein elektronisches Bauelement, das den Strom nur dann durchläßt, wenn das an seiner Kathode anliegende elektrische Potential negativer ist als das Potential an der Anode. Im umgekehrten Fall „sperrt" die Diode und wirkt wie ein außerordentlich großer Widerstand. Sie wirkt also im elektrischen Stromkreis genau wie ein Luftventil im Autoreifen (Bild 11.5). Im Bild 11.3 ist die Diode in „Flußrichtung"; im Bild 11.4 dagegen in „Sperrichtung" geschaltet.

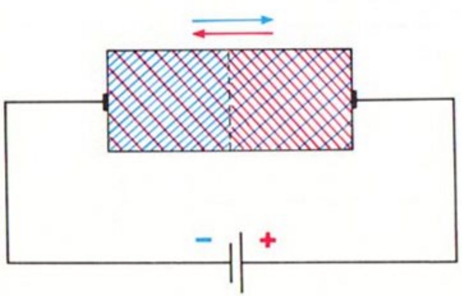
11.5 Durchlaßrichtung Sperrichtung



11.6



11.7



11.8

11.1.2 Ein wenig Theorie

Wie macht die Diode das, wird mancher fragen – und deswegen müssen wir doch ein wenig „darüber sprechen".

In dem Diodenkörper steckt ein sehr kleiner Kristall aus Silizium (chem. Zeichen: Si). Das ist ein nichtmetallisches Element, das jedoch manche Eigenschaften von Metallen hat, z. B. eine gewisse elektrische Leitfähigkeit. Es kommt in vielen chemischen Verbindungen, z. B. in Sand, Quarz und vielen anderen Mineralien vor. Aus solchen Verbindungen wird das Metall gewonnen. Die technologischen Prozesse sind sehr kompliziert, weil das Material für „elektronische Zwecke" frei von Verunreinigungen sein muß.

Völlig reines Silizium leitet den elektrischen Strom jedoch nicht, weil in seinem Kristallgitter nur verschwindend wenig freie Elektronen vorhanden sind. Damit aber aus einem Siliziumkristall eine Diode wird, greift man zu einem raffinierten Trick.

Man „impft" die eine Hälfte des Si-Kristalls mit Atomen eines chemischen Elements, die „bereitwillig" freie Elektronen zur Verfügung stellen. Die andere Hälfte des Si-Kristalls „verunreinigt" man mit Atomen eines chemischen Elements, die leidenschaftlich bemüht sind, freie Elektronen einzufangen. Dadurch entsteht ein höchst merkwürdiger „Elektronen-Zustand", der im Bild 11.6 grob schematisch dargestellt ist: Auf der einen Seite herrscht jetzt Elektronenüberschuß – auf der anderen Elektronenmangel.

In Wirklichkeit ist die Sache wesentlich komplizierter – aber für das Verständnis des „Ventileffekts" reicht diese vereinfachte Darstellung aus.

Was geschieht nun, wenn an ein solches Gebilde eine Spannung angelegt wird?

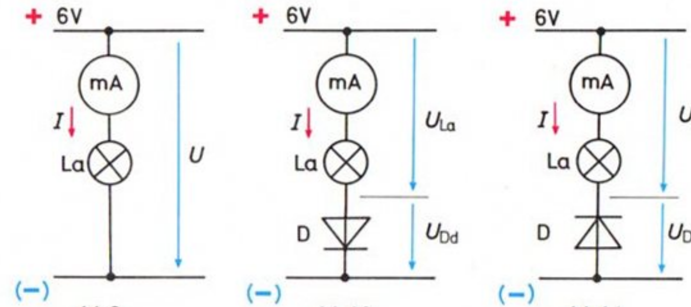
Ganz grob kann man von der Vorstellung ausgehen, daß sich (–)- und (+)-Ladungen genauso „anziehen", wie die Pole eines Magneten. Umgekehrt stoßen sich „gleichnamige" Ladungen ab. Bild 11.7 zeigt, wie der (+)Pol der Batterie die (–)Ladungsträger „anzieht" und der (–)Pol die (+)Ladungsträger. In der Mitte entsteht dadurch eine „ladungsträgerarme" Zone, die wie eine „elektronische Sperre" wirkt: Es kann kein Elektronenstrom hindurchfließen!

Bild 11.8 zeigt, was bei umgekehrter Polung geschieht: Der (–)Pol der Batterie drückt ebenso wie deren (+)Pol die „Ladungsträger" in der Diode aufeinander zu. Hinzu kommt die gegenseitige Anziehung, so daß die Elektronen auf die rechte Diodenseite gelangen und durch sie hindurch zum (+)Pol der Batterie abfließen. Es fließt also jetzt ein starker Elektronenstrom!

Die Diode ist demnach ein „polaritätsabhängiger" Widerstand.

11.1.3 Die Spannung an der Diode

In den Versuchen 11.3 und 11.4 hatten Sie eine Diode mit einem Lämpchen in Reihe geschaltet: Die beiden Bauelemente bilden somit einen Spannungsteiler mit den Teilwiderständen R_{La} und R_D. Ist die Diode in Durchlaßrichtung geschaltet, so sei ihr Widerstand mit R_{Dd} bezeichnet. In Sperr-Richtung nennen wir ihn R_{Ds}.



11.9 11.10 11.11

Versuch

Messen Sie bitte nach Bild 11.9 zunächst den Strom, welcher bei der Ihnen zur Verfügung stehenden Spannung, z. B. 6 Volt, durch die Lampe fließt, und dann nach Bild 11.10 und 11.11:

a) die Gesamtspannung U und den Strom I

b) die Teilspannung U_{La}

c) die Spannung U_{Dd} an der Diode, wenn diese in Durchlaßrichtung geschaltet ist (Bild 11.10)

d) den Strom I, der jetzt durch die Reihenschaltung fließt

e) die Spannung U_{Ds} an der Diode, wenn diese in Sperrrichtung geschaltet ist. (Bild 11.11)

f) den Strom I, der jetzt durch die Reihenschaltung fließt.

Tragen Sie Ihre Werte in die Tabelle 11.12 (3. Spalte) ein.

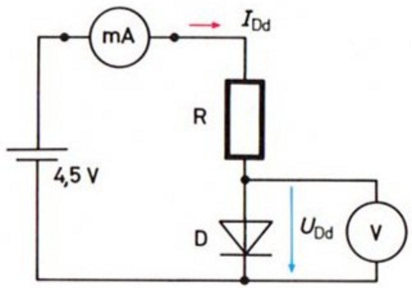
Wie hoch ist der Widerstandswert der Diode in Durchlaßrichtung? Und wie hoch schätzen Sie ihn in Sperrichtung ein?

Wiederholen Sie bitte den Versuch mit 2 und mit 3 parallel geschalteten Lampen (4. und 5. Spalte).

Wird sich der Widerstandswert der Diode in Durchlaßrichtung mit steigender Anzahl von Lampen, und damit bei steigender Stromstärke wenig oder stark ändern? Ihre Meßergebnisse geben Auskunft!

11.12

Versuch nach Bild	Größe	Lampen		
		1	2	3
11.9	U in V I in mA			
11.10	U in V I in mA U_{La} in V U_{Dd} in V			
	R_{Dd} in Ω			
11.11	U in V I in mA U_{La} in V U_{Ds} in V			
	R_{Ds} in Ω			



11.13

11.14

R in Ω	I in mA	U_{Dd} in V	R_{Dd} in Ω
47 000			
10 000			
4 700			
1 000			
470			
235			
100			
50			

$R_{Dd} = U_{Dd} : I$

11.2 Die Dioden-Kennlinie

Sie haben soeben festgestellt, daß die Diode in Flußrichtung einen zwar sehr kleinen, aber doch meßbaren Widerstandswert R_{Dd} besitzt.

Neugierig, wie Elektroniker nun einmal sind, wollen Sie sicher genau wissen, ob dieser Widerstandswert wirklich keine feststehende Größe wie bei Widerstandsbauteilen ist, sondern sich mit der Stärke des durchfließenden Stroms ändert.

Um das herauszufinden, müssen Sie eine Strom/Spannungs-Kennlinie „aufnehmen", die das Widerstandsverhalten einer Diode in Flußrichtung beschreibt. In Sperrichtung ist der Widerstand praktisch unendlich groß, wie Sie ja schon herausgefunden haben. Sonst könnte die Spannung U_{Ds} an der Diode nicht gleich der Gesamtspannung U (Batteriespannung) sein!

Bild 11.13 zeigt die „Meßschaltung", die Sie zur Aufnahme der Kennlinie brauchen.

Es empfiehlt sich, zunächst nur den Strom I für alle in der Tabelle 11.14 angegebenen Widerstandswerte hintereinander zu messen, damit Sie das dauernde Umstecken des Meßgerätes vermeiden.

Dann stecken Sie am Meßgerät um und messen in der gleichen Reihenfolge die Spannung U_{Dd} an der Diode D.

Bevor Sie damit beginnen, sollten Sie ein paarmal die „Eckwerte" der Spannung U_{Dd} für R = 10 000 Ω und R = 50 Ω ablesen. Sie werden feststellen, daß diese etwa zwischen 0,6 und 0,85 V betragen. Dazwischen müssen alle anderen Werte liegen. Der „Spielraum" für den Zeigerausschlag ist also nur gering! Aber mit Ihrem nun schon geschärften Blick werden Sie sicher auch diese kleinen Zeigerausschläge noch erfassen.

Konstruktion der Strom/Spannungs-Kennlinie

Nun übertragen Sie die Strom/Spannungs-Koordinaten in der gewohnten Weise in das vorbereitete Koordinatensystem 11.15 und verbinden die sich ergebenden Punkte miteinander.

Über das „Mitteln" der Werte haben Sie ja schon das Nötigste erfahren (Abschn. 2.10.3).

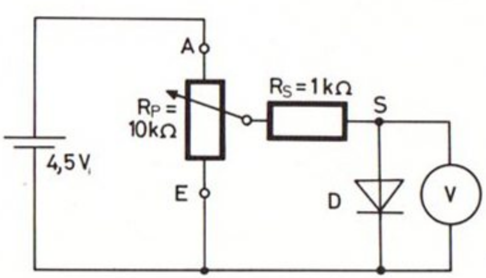
Die von Ihnen konstruierte Kurve wird ähnlich verlaufen wie die schematisch in Bild 11.16 wiedergegebene Kurve.

Was sagt uns das Diagramm?

1. Würde man an unsere Diode eine Spannung legen, die niedriger als etwa 0,7 Volt ist, so fließt kein Strom durch die Diode, obwohl sie in Durchflußrichtung geschaltet ist. Diesen Grenzwert nennt man „Schwellenspannung".
2. Fließt in einem Stromkreis, in den die Diode in Durchlaßrichtung geschaltet ist, Strom, so steht an der Diode je nach Stromstärke eine Spannung zwischen mindestens 0,6 und höchstens 1,1 Volt.

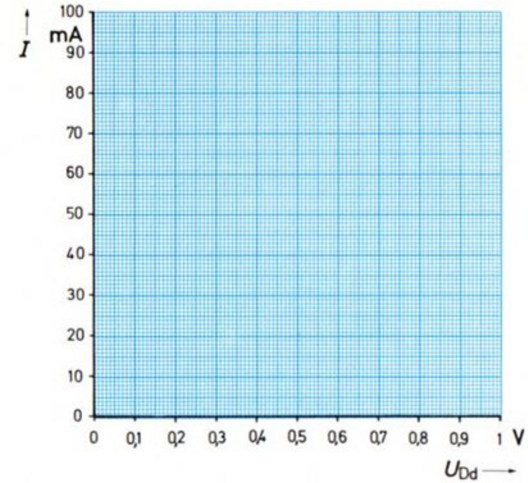
Diese Spannungsangaben gelten nur für Dioden, die so ähnlich wie unser Typ aufgebaut sind. Andere Typen, z. B. Germanium-Dioden, zeigen andere Werte, wie Sie im hobby-Labor 2 noch feststellen werden.

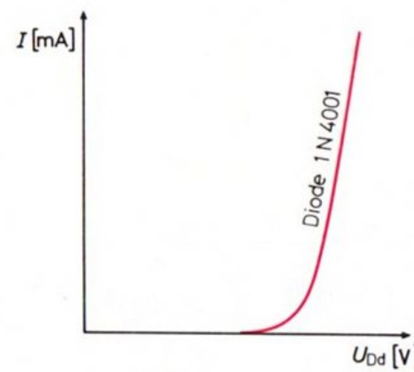
Diese Aussagen können Sie leicht mit der Schaltung 11.17 nachweisen. Probieren Sie die Schaltung auch mit dem 1-kΩ-Poti aus.



11.17

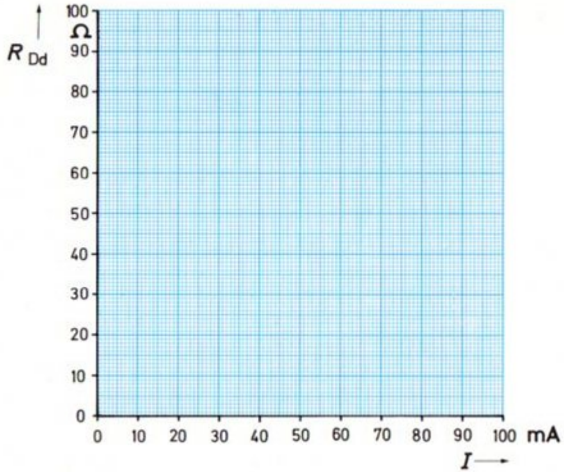
11.15



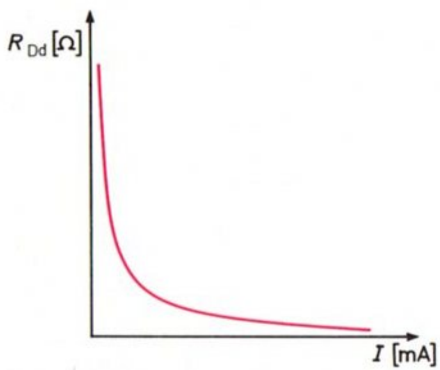


11.16

Die Diode ist ein elektronisches Bauelement, das durch ein polaritätsabhängiges und veränderliches Widerstandsverhalten gekennzeichnet ist.



11.18



11.19

Konstruktion der Widerstands/Strom- Kennlinie

Erfahrene Könner würden das Widerstandsverhalten der Diode in Abhängigkeit von der anliegenden Spannung aus dem *I*/*U*-Diagramm 11.15 bzw. 11.16 entnehmen können. Wir konstruieren uns lieber ein *R*/*I*-Diagramm. Die Widerstandswerte ermitteln Sie bitte durch Rechnung aus der Tabelle 11.14. Tragen Sie die Werte in die letzte Spalte dieser Tabelle und in das Koordinatennetz 11.18 ein. Sie werden eine ähnliche Kurve wie die im Bild 11.19 erhalten.

Was besagt dieses Diagramm?

1. Die Diode hat auch in Durchflußrichtung einen großen „Innenwiderstand", solange wenig Strom (weniger als 1 mA) fließt.
2. Steigert man die Stromstärke geringfügig, so fällt der Innenwiderstand schnell.
3. Es gibt einen Übergangsbereich (Knickbereich der Kurve), in dem der Innenwiderstand mit steigender Stromstärke immer weniger stark fällt.
4. Im Bereich großer Stromstärken ist die Widerstandsabnahme mit steigendem Strom nur sehr gering.

Dieses „Widerstandsverhalten" ist typisch für eine Diode! Im einzelnen mögen die Werte verschiedener Diodentypen voneinander abweichen – das „Bild" bleibt aber ungefähr gleich.

11.3 Höchstzulässiger Strom und maximale Belastbarkeit

Die selbstaufgenommenen Diagramme zeigen die Diodenkennlinie bis zu einer Stromstärke von etwa 100 mA. Sicherlich möchten Sie nun wissen, wie sieht's bei höheren Stromstärken aus?

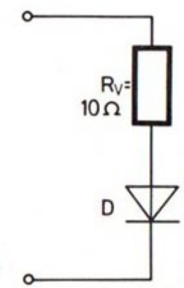
Auch Dioden können nicht beliebig viel Strom „durchlassen". Denn sie werden warm! Die aus dem Produkt von U_{Dd} und I leicht zu errechnende, in der Diode als Wärme in Erscheinung tretende elektrische „Verlustleistung" darf einen bestimmten, für jeden Typ spezifischen Wert nicht übersteigen. Die Angabe der maximal zulässigen Verlustleistung ist aber wenig zweckmäßig. Man gibt lieber die maximal zulässige Stromstärke an! Andernfalls müßte man zur Errechnung dieses Kennwertes die Verlustleistungskennlinien studieren!

Es gibt Dioden für „Starkstrom", die etliche Ampere verkraften können – andere „passen" schon bei 250 mA. Bei unserer Diode beträgt die höchstzulässige Stromstärke I_{max} bei Dauerbelastung 1 A; die dann an der Diode abfallende Spannung liegt nach Angabe des Herstellers unter dem Wert von 1,1 V.

Sie sehen, unsere Diode 1N 4001 kann schon allerhand vertragen! Trotzdem muß man aufpassen. Der innere Widerstand der Diode bei Höchstbelastung beträgt etwa 1 V : 1 A = 1 Ω. Würden Sie die Diode z. B. direkt an die Klemmen einer Batterie legen, dann würde die Batterie praktisch kurzgeschlossen. Die Stromstärke wäre so hoch, daß die Diode sehr schnell zerstört würde.

11.4 Schutzwiderstand für Dioden

Deshalb wird vor eine in Flußrichtung betriebenen Diode sicherheitshalber ein Vorwiderstand geschaltet. Dessen Wert soll etwa so hoch sein, wie der Quotient aus anliegender Batteriespannung und zulässigem Dioden-Höchststrom: $R_V = U : I_{Dmax}$. Wenn Sie bei unserer Diode für den Vorwiderstand einen Wert von 10 Ω wählen, dann kann ihr nichts passieren (Bild 11.20).



11.20

$$\textbf{Dioden-Schutzwiderstand} = \frac{\textbf{Angelegte Spannung}}{\textbf{höchstzulässiger Strom}}$$

11.5 Anwendungen

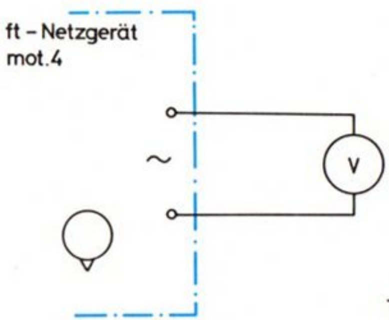
Wir wollen jetzt einige Versuche machen, bei denen Sie verschiedene Anwendungsmöglichkeiten einer Diode kennenlernen.

11.5.1 Die Gleichrichtung einer Wechselspannung

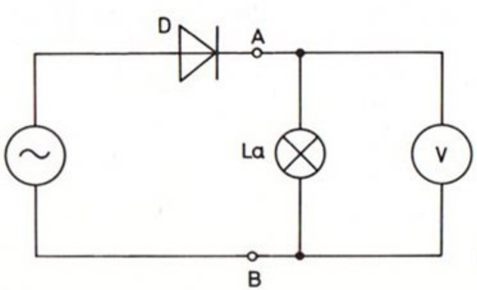
Eine der wichtigsten Anwendungen von Dioden ist die „Gleichrichtung“ von Wechselstrom. Wir wollen das einmal ausprobieren, ohne tiefschürfend in die Wechselstromtheorie einzusteigen. Allerdings müssen Sie dazu das „ft-Netzgerät mot 4“ besitzen.

An seinen seitlich herausgeführten Anschlußbuchsen steht nämlich eine „Wechselspannung“ von etwa 6,8 V (bei Nennbelastung) zur Verfügung. Wenn Sie nach Bild 11.21 diese Wechselspannung mit Ihrem Voltmeter messen wollen, werden Sie enttäuscht werden: Ihr Meßgerät zeigt nichts an. Das kommt daher, daß der Wechselstrom seine Richtung 100mal in der Sekunde ändert. Mit anderen Worten: Der Strom fließt in einem Wechselstromkreis $^1/_{100}$ Sek. lang von (+) nach (–) und in der nächsten $^1/_{100}$ Sek. von (–) nach (+). Bei der Schnelligkeit, mit der dieser Wechsel vor sich geht, kann das Meßgerät nicht mehr mit – der Zeiger bleibt einfach stehen.

Nach dem, was über die Ventilwirkung der Diode gesagt wurde, müßte sie aber – je nach Polung – den Strom in der einen Richtung durchlassen und in der anderen sperren. Wir wollen das gleich ausprobieren.



11.21



11.22

Versuch

Schalten Sie nach Bild 11.22 eine Diode und ein Lämpchen in Reihe an die Wechselspannung des Netzgerätes.

Anstelle der Andeutung eines Netzgerätes ist das Schaltzeichen für „Wechselspannungsquelle“ eingesetzt, weil unsere Überlegungen allgemein für Wechselspannung gelten.

Wird das Lämpchen leuchten? Wird es auch leuchten, wenn die Diode mit entgegengesetzte Polung (= Anschlüsse vertauscht) eingesetzt wird?

Ergebnis

Bezieht man die Diode in die Wechselspannungsquelle mit ein, so erhält man eine „Gleichspannungsquelle“. Ihre Anschlüsse sind in Bild 11.22 mit A und B gekennzeichnet. Wo ist der Pluspol? Das Voltmeter gibt Ihnen Auskunft!

Setzen Sie bitte die Diode andersherum (= mit vertauschten Anschlüssen) in den Stromkreis, ohne Ihr Voltmeter ebenfalls umzupolen. Dann muß der Zeiger nach der anderen Seite ausschlagen. Stimmt's?

Weil bei dieser Schaltung der Strom nur in einer Richtung von der Diode durchgelassen wird, spricht man von einer Einweggleichrichtung. Im Kap. 12.8 kommen wir wieder auf dieses Thema zurück.

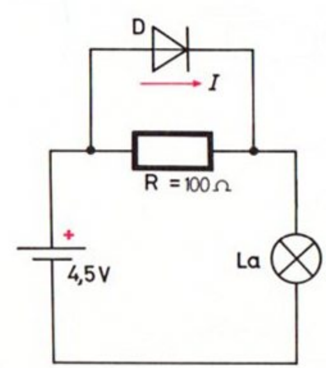
11.5.2 Polaritätsabhängige Schaltungen

Das sind Schaltungen, die u. a. bei Steuerungsaufgaben in der Technik Anwendung finden. So soll z. B. ein Gleichstrom-Motor in der einen Drehrichtung schnell, in der anderen aber langsam laufen. Eine solche Aufgabe kann mit Hilfe von Dioden sehr elegant gelöst werden.

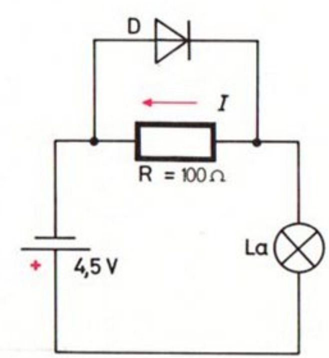
1. Versuch

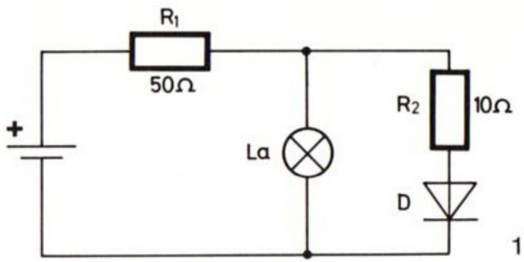
Wir können für unseren Versuch den Motor durch ein Lämpchen ersetzen. Was werden Sie beobachten, wenn die Diode in Durchlaßrichtung geschaltet ist (Bild 11.23)? Und was geschieht, wenn Sie die „Spannungsquelle umpolen“, also mit vertauschten Klemmen anschalten? Die Diode wird damit in Sperrichtung betrieben, wie es die Schaltung 11.24 zeigt.

11.23

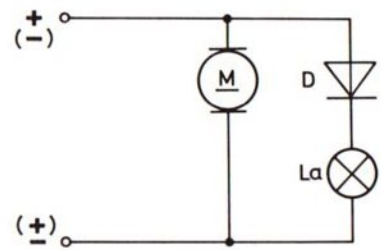


11.24

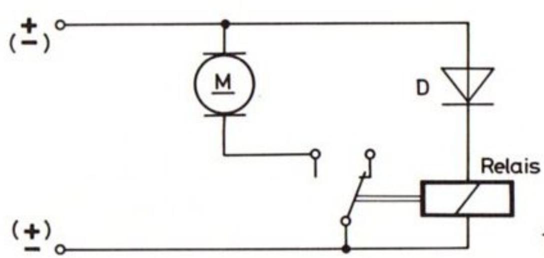




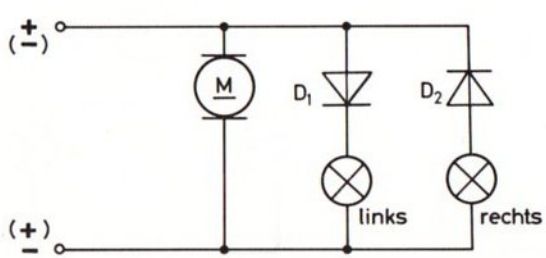
11.25



11.26



11.27



11.28

Ergebnis

Liegt die Diode in Flußrichtung, dann ist der Widerstand klein und es fließt der weitaus größte Teil des Stroms durch die „geöffnete“ Diode. Die Teilspannung an der Diode ist klein gegenüber der Teilspannung am Lämpchen: Es leuchtet hell.

Wird die Diode jedoch in Sperrichtung betrieben, dann ist ihr Widerstand so hoch, daß der Strom ausschließlich durch den Widerstand R fließen muß, der deswegen als „Vorwiderstand“ zum Lämpchen wirkt. Die Teilspannung an D ∥ R ist groß; das Lämpchen leuchtet bedeutend schwächer.

2. Versuch

Bauen Sie die Schaltung 12.23 nach Bild 11.25 um und probieren Sie bitte aus, wie sich jetzt die Helligkeit des Lämpchens ändert, wenn Sie die (+)- und (–)Anschlüsse der Spannungsquelle miteinander vertauschen.

Ergebnis

In dieser Schaltung liegt die Reihenschaltung (D + R_2) parallel zum Lämpchen. Der Effekt ist aus denselben Gründen genau umgekehrt wie beim vorigen Versuch: „La“ brennt heller, wenn die Diode in Sperrichtung gepolt ist.

Versuche für Besitzer des „fl-hobby“-3-Baukastens

Darf sich ein Motor in einer Modellanlage z. B. nur nach links drehen, so kann man nach Bild 11.26 eine Alarmschaltung bauen, deren Lampe aufleuchtet, wenn sich der Motor in der falschen Richtung dreht.

Wer sich in der Schaltungstechnik auskennt, kann sogar mit einer Relaisschaltung verhindern, daß der Motor zum Laufen kommt, wenn das Netzgerät verkehrt angeschaltet wird. Das Relais zieht nur an und schaltet damit den Motor ein, wenn die Diode Strom durchläßt (Bild 11.27).

Wer 2 Dioden besitzen sollte, kann durch 2 Lampen signalisieren, ob ein Motor links- oder rechtsdrehend läuft. Bild 11.28 zeigt die Schaltung.

11.5.3 Schutzwirkung einer Diode

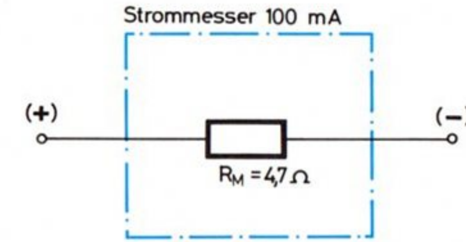
In der Praxis macht man zum Schutz von Meßwerken in Meßgeräten sehr häufig von der Tatsache Gebrauch, daß die Diode unterhalb der „Schwellenspannung“ (bei unserer Diode etwa bei 0,7 V, wie Sie bereits festgestellt hatten) einen sehr großen Widerstand darstellt und daß ihr Widerstand erst bei steigender Spannung kleiner wird.

Wir wollen sehen, wie das funktioniert.

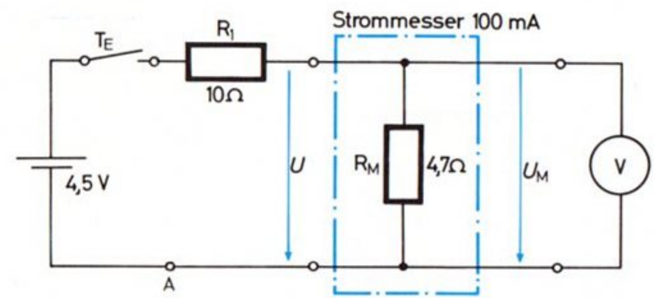
Im Bild 11.29 ist das Meßwerk eines Strommessers durch einen 4,7-Ω-Widerstand dargestellt. Wir wollen ihn R_M nennen. Nehmen wir einmal an, das „Meßgerät“ sei so ausgelegt, daß Vollausschlag bei 100 mA entsteht. Wir errechnen, daß dann eine Spannung von etwa 0,5 Volt zwischen den Anschlußbuchsen gemessen wird.

Jetzt soll – natürlich aus Versehen! – dieses „simulierte“ (= künstlich dargestellte) mA-Meter in eine Schaltung nach Bild 11.30 eingesetzt worden sein. Wie Sie leicht nachrechnen können, wären durch den Strommesser fast 500 mA geflossen, d. h., das Meßwerk wäre etwa 5fach überlastet worden! Überprüfen Sie bitte diese Annahme durch den folgenden Versuch!

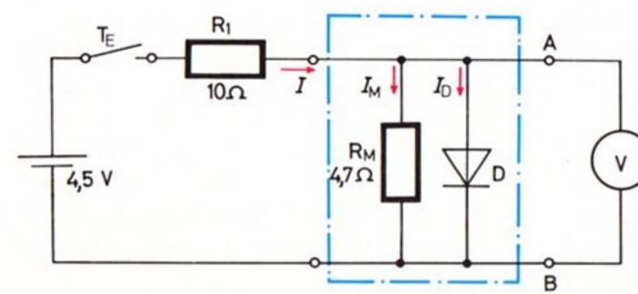
11.29



11.30



11.31



1. Versuch

a) Messen Sie bitte zunächst die Stromstärke in der Schaltung 11.30 mit Ihrem ft-Strommesser (1-Amp.-Meßbereich nach Abschn. 6.7.2). Es fließt wesentlich mehr Strom als die für das „simulierte Meßgerät" max. zulässigen 100 mA! Hätten Sie ein „ungeschütztes" 100-mA-Meßgerät statt des simulierten Strommessers eingesetzt – es wäre vielleicht schon „hinüber". (Jetzt wird Ihnen sicher e i n e r der vielen Vorteile einer „Simulation" klar!)

   Nach der Herausnahme des ft-Strommessers aus der Schaltung überzeugen Sie sich bitte durch Nachmessen der Klemmenspannung am simulierten 100-mA-Strommesser (Klemmen A-B) von der Höhe der anliegenden Spannung.

b) Setzen Sie nun eine „Schutzdiode" nach Bild 11.31 parallel zum Meßwerk ein. Wiederholen Sie die Messungen.

   Ergebnis

   Obwohl durch den 10-Ω-Widerstand soviel Strom wie vorher fließt, liegt die Teilspannung am „simulierten Meßgerät" nur knapp über der zulässigen Spannung von 0,5 Volt. Das bedeutet, daß der gefährliche „Überstrom" durch die Diode am Meßwerk vorbeigeführt wurde.

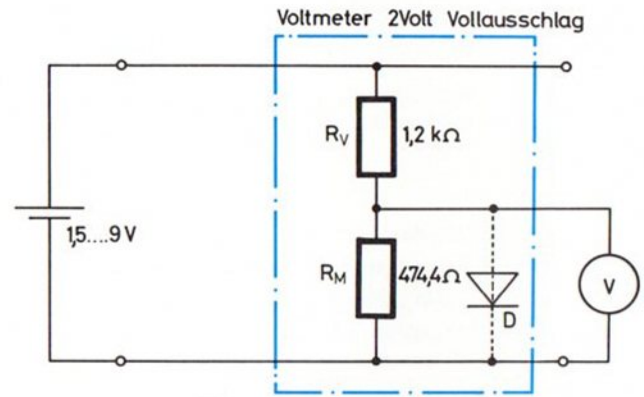
2. Versuch

Machen wir noch einen ähnlichen Versuch mit einem Spannungsmesser, dessen Vollausschlag bei 2 Volt liegen soll. Die Meßwerte des Voltmeters „simulieren" wir durch den Widerstand R_M von 474,7 Ω (470 Ω + 4,7 Ω) und den Vorwiderstand R_V = 1,2 kΩ (= 1 kΩ + 100 Ω + 100 Ω). (Wer nicht mit so viel Widerständen hantieren will, kann auch für R_V 1 kΩ und für R_M 470 Ω einsetzen.) Bild 11.32 zeigt die Versuchsschaltung zur Überlastungsprüfung des Voltmeters. Die Diode bauen wir zunächst noch nicht ein.

a) Steigern Sie nach Tabelle 11.33 die Spannung U von 1,5 auf 9,0 Volt und messen Sie die Teilspannung U_M am „Meßwerk" R_M. (Definitionsgemäß wäre das simulierte Meßgerät bei einer Spannung über 2 V überlastet.) Wenn Sie statt Batterien das „ft-Netzgerät mot 4" benutzen, müssen Sie in der 1. Spalte natürlich die entsprechenden Werte einsetzen.)

b) Setzen Sie nun zum Schutz des „Meßwerks" R_M – genau wie im vorigen Versuch – die Diode ein (im Bild 11.32 gestrichelt angedeutet) und messen erneut U und U_M.

11.32



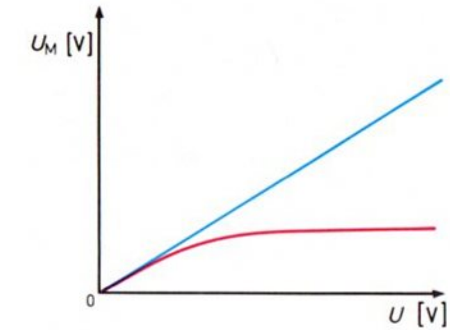
11.33

U in V	U_M in V ohne Diode	U_M in V mit Diode
1,5		
3,0		
4,5		
6,0		
9,0		

Ergebnis

Sie haben die Schutzwirkung der Diode direkt vor Augen, wenn Sie sich mit den gemessenen Werten ein Diagramm erstellen. Es muß sich ein ähnlicher Kurvenverlauf ergeben wie im Bild 11.34.

11.34



blau: ohne Diode

rot: mit Diode

Schlußfolgerung

Solange die Spannung U_M am Meßwerk die „Schwellenspannung“ von etwa 0,7 V nicht überschreitet, wirkt die Diode wie ein sehr großer Widerstand und beeinflußt deshalb das Meßgerät nicht. Sowie aber dieser Spannungswert an R_M, und damit auch an der Diode, überschritten wird, sinkt deren Widerstand sehr schnell ab – „die Diode wird leitend“, sagt der Fachmann.

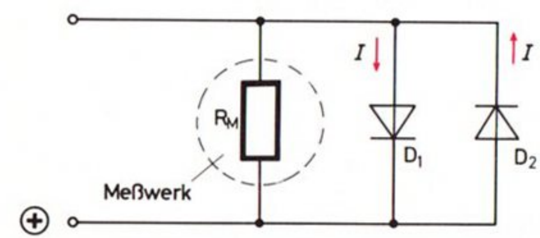
Wie Sie aus der von Ihnen aufgenommenen Kennlinie ersehen, kann deshalb die Spannung am Meßwerk einen ungefährlichen Höchstwert nicht überschreiten. Dioden in dieser Schaltungsfunktion nennt man deshalb „Schutzdioden“.

Antiparallelschaltung

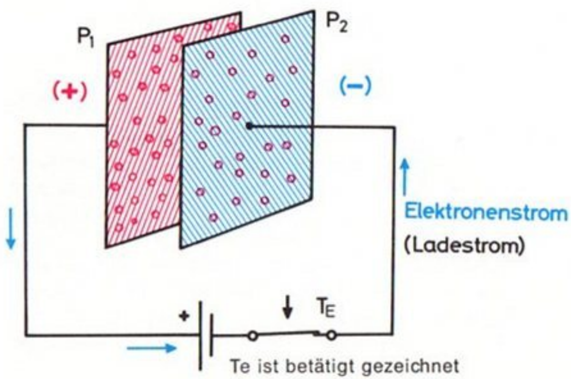
Jetzt könnten Sie mit Recht einwerfen: Alles ganz schön und gut! Was aber, wenn jemand das Meßwerk mit falscher Polung anschließt? Dann ist doch der Schutz durch die Diode, die jetzt in Sperrichtung in der Schaltung liegt, für die Katz'!?

Genau aus diesem Grunde legt man 2 Dioden parallel zum Meßwerk – und zwar in gegensinniger Richtung (Bild 11.35). „Gegen“ heißt auf lat. „anti“ – und daher der Name „Antiparallelschaltung“. Auf diese Weise ist eine von beiden Dioden immer in „Alarmbereitschaft“ (d. h. in Flußrichtung gepolt), um gefährliche Ströme vom Meßwerk abzulenken – egal, von welcher Seite her die Gefahr droht. Auch in Ihrem Meßgerät liegen wie im Bild 11.34 Dioden vom Typ 1N 4001 in Antiparallelschaltung zum Meßwerk.

11.35



Trotzdem sollten Sie mit Überlastungen sparsam sein, denn die Dioden verhindern zwar eine Zerstörung der empfindlichen Bauteile des Meßwerks durch zuviel Strom – sie können aber nicht verhindern, daß der Zeiger kräftig gegen den Endausschlag schlägt, wenn Sie „zuviel Saft auf der Leitung“ haben, wie man im Fachjargon sagt. Auch mechanische Beschädigungen machen ein Meßinstrument unbrauchbar! Dies gilt zwar weniger für das robuste ft-Meßgerät als für hochempfindliche Universal-Meßgeräte mit mehreren Skalen für die umschaltbaren Meßbereiche. Die dafür notwendigen langen Zeiger sind mechanisch besonders anfällig!



12.1

12 Der Kondensator im Gleichstromkreis

Kaum eine Schaltung der Elektronik kommt ohne das Bauelement „Kondensator“ aus: In der Radio-, Fernseh- und Nachrichtentechnik, in der Datenverarbeitung und bei Rechenmaschinen, in der Steuer- und Regeltechnik – überall werden Kondensatoren in den verschiedensten Bauarten für sehr unterschiedliche Zwecke eingesetzt. Wir wollen deshalb in diesem Kapitel etwas eingehender untersuchen, was es mit diesem wichtigen und unentbehrlichen Bauelement auf sich hat.

12.1 Der Elektronenspeicher

12.1.1 Das Kondensatorprinzip

Das Wort „Kondensator“ ist abgeleitet vom lat. „condensare = verdichten, zusammendrängen“: Ein sehr anschaulicher Begriff, wenn man weiß, was vor sich geht, wenn an zwei Metallplatten eine elektrische Spannung angelegt wird, wie es im Bild 12.1 dargestellt ist.

Wird nämlich der Taster T_E geschlossen, so werden augenblicklich freie Elektronen von der Platte P_1 „abgesaugt“; auf die Platte P_2 dagegen werden freie Elektronen durch die Batteriespannung heraufgedrückt. Dieser Vorgang der „Elektronenverschiebung“ dauert so lange, bis die Platte P_2 „wegen Überfüllung geschlossen“ ist und keine Elektronen mehr aufnehmen kann.

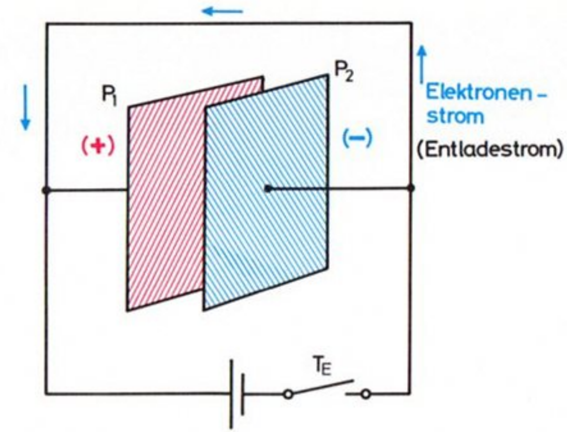
Daraus folgt, daß beim Schließen des Tasters kurzzeitig ein Elektronenstrom (physikalische Stromrichtung!) fließen muß. Man nennt ihn den „Ladestrom“.

Auf P_2 besteht jetzt Elektronenüberschuß – auf P_1 Elektronenmangel. Wie Sie wissen, ist ein solcher Zustand gleichbedeutend mit elektrischer Spannung: Zwischen den Platten P_1 und P_2 herrscht die Spannung U_C (Kondensatorspannung). Es leuchtet ein, daß $U_C = U_{Bat}$ sein muß, wenn keine Elektronenbewegung mehr stattfindet.

Läßt man T_E los, dann wird der Stromkreis unterbrochen, und der Spannungszustand ist sozusagen „eingefroren": Der Elektronendruck kann sich nicht ausgleichen, weil dies durch den Isolator Luft zwischen den Platten und die Leitungsunterbrechung bei T_E verhindert wird. Der auf der Platte P_2 zusammengedrängte Elektronenüberschuß wird „gespeichert", wie der Fachmann sagt.

Werden jetzt die beiden Platten z. B. durch den Draht im Bild 12.2 leitend miteinander verbunden, dann gleicht sich der Elektronendruck zwischen P_2 und P_1 sehr schnell wieder aus: Es fließt ein Elektronenstrom von P_1 nach P_2. Weil die „Ladung" (wir erklären das gleich genauer) jetzt von der Platte P_2 abfließt, bezeichnet man diesen Strom als „Entladestrom". Nach Beendigung des Vorgangs ist die Spannung zwischen den Platten natürlich verschwunden – beide sind ja jetzt wieder elektrisch neutral.

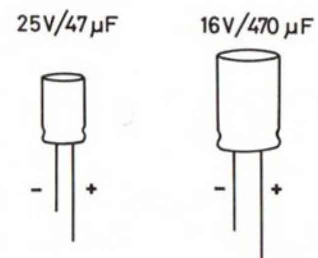
12.2



12.1.2 Die Kondensatoren im hobby-Labor

Die in Ihrem hobby-Labor befindlichen Kondensatoren sehen natürlich völlig anders aus als das „Plattenmodell", von dem wir ausgegangen sind. Aber prinzipiell entsprechen auch diese Bauelemente dem Modell. Wie das praktisch aussieht, erfahren Sie im Kap. 12.12.

Wenn Sie die 3 Kondensatoren (Bild 12.3) einmal näher anschauen, dann stellen Sie fest, daß die Bauteile verschieden lange „Beine" haben und daß die Anschlüsse mit einem (+) und einem (–) gekennzeichnet sind: Das lange Bein ist (+), das kurze (–).

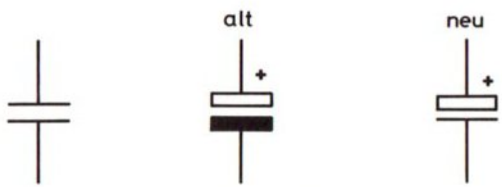


12.3

Elektrolytkondensatoren müssen polrichtig angeschlossen werden:

(+)Anschluß an (+)Potential

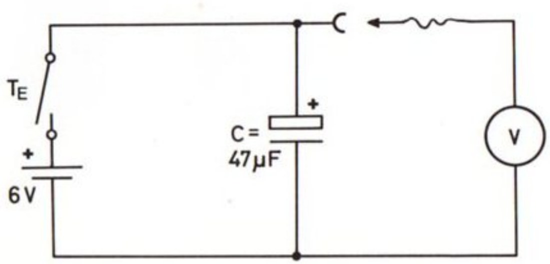
(–)Anschluß an (–)Potential



12.4

(a) ungepolte Kondensatoren

(b) Elektrolyt-kondensatoren



12.5

Diese Bauart wird als „Elektrolytkondensator" bezeichnet und unterscheidet sich von anderen Kondensatoren durch eben diese Polung. Die „Elkos" (so werden sie im Fachjargon kurz genannt) müssen immer „polrichtig" angeschlossen werden – sonst sind sie bald hinüber!

Der Aufdruck 25 V/47 µF auf dem kleineren Bauelement besagt, daß dieser Kondensator höchstens eine Spannung von 25 V verträgt und ein Fassungsvermögen (der Fachmann spricht von „Kapazität") von 47 Mikrofarad (Betonung: Farád) besitzt.

Die beiden großen Kondensatoren vermögen das 10fache zu fassen. Sie können aber nur höchstens 16 V vertragen, ohne beschädigt zu werden (siehe Abschn. 12.12.3).

Bild 12.4 zeigt (a) das Schaltzeichen für „ungepolte" Kondensatoren, wobei die beiden parallelen Striche das Plattenpaar des Kondensatormodells symbolisieren, und (b) das alte sowie das neue, der internationalen Normung angepaßte Schaltzeichen für Elektrolytkondensatoren.

12.1.3 Erste Versuche

Hinweis für Besitzer eines hochwertigen Meßgerätes: Sie sollten für die in diesem Kapitel behandelten Versuche stets zuerst das relativ unempfindliche Meßgerät dieses Experimentierbaukastens benutzen. Beim Experimentieren mit geladenen größeren Kondensatoren wurde schon manches hochempfindliche Meßgerät ins Jenseits befördert (nach dem etwas abgewandelten Sprichwort: „Berühre nie ein C zum Scherz, denn es könnte geladen sein!").

1. Versuch

Bild 12.5 zeigt die Schaltung. Achten Sie auf die Polung des Kondensators! Benutzen Sie bitte für die folgenden Versuche nicht das Netzgerät, sondern Batterien als Spannungsquelle – den Grund erfahren Sie später.

Sollte sich der Kondensator nicht glatt in die Buchsenklemmen des Experimentierfelds einsetzen bzw. herausnehmen lassen, dann drücken oder ziehen Sie bitte nicht am Kondensatorkörper, sondern fassen die Anschlußdrähte mit der Pinzette.

Drücken Sie bitte den Ein-Taster T_E einige Sekunden lang. In dieser Zeit wird eine Spannung von etwa 6 V an den 47-µF-Kondensator gelegt; er kann sich „aufladen".

Warten Sie nun etwa 10 Sekunden und tippen Sie dann ganz kurz mit dem (+)Meßkabel des Voltmeters an den (+)Anschluß des Kondensators. Beobachten Sie dabei den Zeiger des Meßgerätes. Nach weiteren 10 Sekunden tippen Sie wieder kurz an. Der Zeiger muß nochmals ausschlagen.

Wiederholen Sie das kurzzeitige Anschalten des Voltmeters noch einige Male. Sie sehen, daß der Zeiger jedesmal etwas weniger ausschlägt.

Laden Sie bitte den Kondensator durch erneutes Drücken des Tasters wieder auf. Nach Loslassen des Tasters schließen Sie das Voltmeter diesmal fest an. Der zunächst große Zeigerausschlag geht schnell auf Null zurück.

Ersetzen Sie den 47-µF-Kondensator durch einen 470-µF-Kondensator und wiederholen Sie den Versuch. Geht jetzt der Zeigerausschlag genauso schnell auf Null zurück wie beim 47-µF-Kondensator?

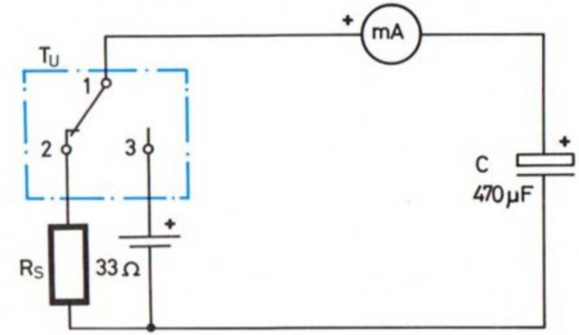
Schlußfolgerung

1. Da die Spannung U_C am Kondensator nach Abtrennen der Batteriespannung nicht wie bei einem Widerstandsbauteil sofort verschwindet, ist bewiesen, daß der Kondensator Elektronen (= Ladungen) zu speichern vermag.
2. Die Tatsache, daß die Spannung U_C beim Anschalten des Voltmeters absinkt, läßt darauf schließen, daß sich der Elektronendruck über den Innenwiderstand des Meßgerätes ausgleicht.
3. Daß dieser Ausgleich verschieden schnell vor sich geht, scheint offenbar mit der Größe der Kapazität des Kondensators zusammenzuhängen.

Wir können diesen Zusammenhang durch den nächsten Versuch bestätigen, wenn wir statt der Spannung U_C den Strom I untersuchen.

2. Versuch

Bauen Sie bitte die Schaltung nach Bild 12.6 auf, wobei der ft-Taster als „Umschalt-Taster" T_U benutzt wird. (Der Schutzwiderstand R_S verhindert, daß der Kondensator beim Entladen kurzgeschlossen wird, was bei Elkos vermieden werden soll!).



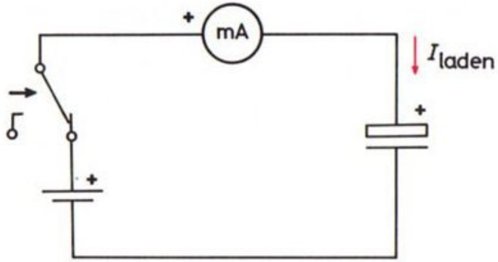
12.6

Achten Sie wieder auf die richtige Polung des Kondensators und vergessen Sie nicht, daß zur Strommessung der rote Knopf des mA-Meters gedrückt werden muß.

Sobald Sie den Taster T_U betätigen und damit den Kondensator an Spannung legen, schlägt der Zeiger etwas nach rechts aus. Es floß also kurzzeitig Strom! Da der Kondensator schon nach kurzer Zeit aufgeladen war, ging der Zeigerausschlag schnell auf Null zurück. Es fließt also nach dem sog. „Aufladen des Kondensators" kein Strom mehr und das, obwohl die ganze Spannung am Kondensator anliegt!

Läßt man den Taster los, so wird der Kondensator von der Spannungsquelle abgetrennt und an den Widerstand R_S gelegt. In diesem Augenblick erfolgt ein Ausschlag nach links. Nach kurzer Zeit geht der Zeigerausschlag auf Null zurück; ein Zeichen dafür, daß kein Strom mehr fließt. Würden Sie jetzt die Spannung am Kondensator messen – sie wäre auf 0 Volt zurückgegangen.

Ersetzen Sie nun bitte den 47-µF- durch einen 470-µF-Kondensator und wiederholen Sie den Versuch. Jetzt schlägt der Zeiger weiter aus; es fließt also mehr Strom als vorher. Doch auch jetzt ist der Stromfluß beim Auf- und beim Entladen schnell beendet!



Der Taster ist betätigt gezeichnet

12.6 (a)

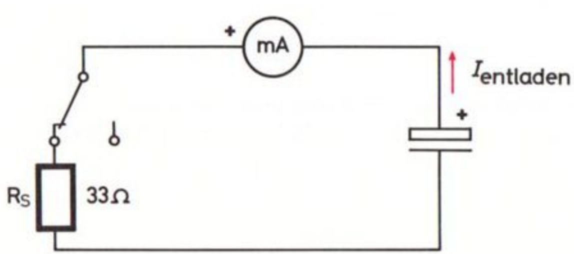
1. Wird der Kondensator durch Tasterdruck nach Bild 12.6 (a) an Spannung gelegt, so erfolgt ein Stromstoß (Zeigerausschlag nach rechts). Das aber bedeutet nichts anderes, als daß Elektronen in einer bestimmten Richtung bewegt werden. Da jedes Elektron eine „negative Elementarladung" trägt (siehe Abschn. 2.21), bezeichnet man Elektronen auch als „Ladungsträger". Es werden also „Ladungen" in der im Bild 12.6 (a) eingezeichneten Richtung (konv. Stromrichtung!) bewegt. Diesen Strom nannten wir „Ladestrom".

2. Es ist nun nicht schwer einzusehen, daß auf einer größeren „Kondensatorplatte" (wenn wir bei unserem Plattenmodell vom Bild 12.1 bleiben) eine größere Anzahl von Elementarladungen Platz haben als auf einer kleineren. Das heißt aber, daß ein stärkerer Strom fließen muß, wenn ein größerer Kondensator in derselben Zeit aufgefüllt werden soll wie ein kleiner Kondensator. So erklärt sich zwanglos, daß der Zeiger bei C = 47 µF weniger und bei 470 µF mehr ausschlägt.

3. Da das Auffüllen des Kondensators natürlich auch eine gewisse Zeit braucht (wir werden dieses Thema später noch ausführlich behandeln), ist auch verständlich, daß das Absinken der Spannung beim Versuch zuvor beim kleineren Kondensator schneller vor sich ging als beim größeren.

4. Durch Loslassen des Tasterknopfes wurde der Kondensator von der Batteriespannung abgetrennt, und gleichzeitig wurden die Kondensatoranschlüsse über R_S miteinander verbunden. Bild 12.6 (b) macht deutlich, daß jetzt – bewirkt durch den schon erwähnten Elektronendruckausgleich – ein Strom in umgekehrter Richtung fließt, der anschaulicherweise als „Entladestrom" bezeichnet wurde. Der Zeiger des Strommessers schlug infolgedessen nach links aus.

   Was Dauer und Stärke des Entladestroms betrifft, so gilt natürlich das Gleiche, was vom Ladestrom gesagt wurde.



12.6 (b)

12.1.4 Die Ladungsmenge

In jedem geschlossenen Stromkreis werden elektrische Ladungen transportiert. Als Ladungsträger wirken die Elektronen in der Leitung. Fließt ein gleichbleibender Strom von 1 Ampere, so wird pro Sekunde eine bestimmte Ladungsmenge transportiert. Fließt der Strom mit einer gleichbleibenden Stärke von 1 Ampere 3 Sek. lang, so wird die dreifache Ladungsmenge transportiert.

Das Formelzeichen für die Ladungsmenge ist „Q" (von Quantität = Menge).

Als Maßeinheit wurde zu Ehren des französischen Physikers Charles A. de Coulomb (1736–1806) das „Coulomb" festgelegt; Abkürzung „C" – häufig aber auch „Coul", um Verwechslungen mit dem Formelzeichen für die Kapazität zu vermeiden.

Jetzt können wir den Zusammenhang zwischen Ladungsmenge, Strom und Zeit auch als Formel anschreiben:

$$Q = I \cdot t \text{ (1 Coul = 1A} \cdot \text{1s = 1 Amperesekunde)}$$

Interessehalber sei vermerkt, daß 1 Coul der Menge von etwa $6{,}3 \cdot 10^{18}$ (= 6,3 Trillionen) Ladungsträgern (= Elektronen) entspricht. Eine ganze Menge, diese „Menge", nicht wahr?!

Sie erinnern sich (Kap. 7.9), daß das Produkt $I \cdot t$ bei der Beschreibung des gespeicherten Energieinhalts von Akkumulatoren und Batterien eine Rolle spielte. Dort benutzten wir aber nicht die Einheit Coulomb, sondern die größere Einheit Amperestunden (1 Amperestunde = 3600 Coul). Die gespeicherte Energie (= elektrische Arbeit) erhält man durch Multiplikation der Amperestunden mit der Spannung des Akkus bzw. der Batterie.

Die Ladungsmenge ist der Stromstärke und der Zeit proportional.

Wie wir gesehen haben, vermag ein Kondensator Ladungen zu „speichern". Sein „Speicher-" oder „Fassungsvermögen" wird durch die Größe seiner „Kapazität" ausgedrückt: Ein Kondensator mit großer Kapazität kann eine größere Menge von Elementarladungen – kurz: eine größere Ladung – aufnehmen als ein Kondensator mit kleiner Kapazität.

Zwischen Kondensator und Batterie besteht aber ein ganz entscheidender Unterschied: Unsere Versuche haben ergeben, daß das Entladen eines Kondensators – im Gegensatz zur Batterie – nicht mit gleichmäßiger Stromstärke vor sich geht, sondern daß Spannung und Stromstärke je nach „Fassungsvermögen" mehr oder weniger schnell absinken. Das kommt daher, daß in der Batterie laufend elektrische Energie „nachgeschoben wird", während dies beim Kondensator nicht der Fall ist. Er ist eben nur ein Energiespeicher und kein Energieerzeuger – obwohl er für die relativ kurze Entladungszeit auch wie ein solcher wirken mag.

12.1.5 Formelzeichen und Maßeinheit der Kapazität

Das Formelzeichen der Kapazität eines Kondensators ist „C" (vom lat. „capacitas" = Fassungsvermögen).

Als Maßeinheit wurde zu Ehren des englischen Physikers und Chemikers Michael Faraday (1791–1867) das „Farad" festgelegt; Abkürzung „F".

Ein Kondensator hat die Kapazität „1 Farad", wenn er bei einer angelegten Spannung von 1 V eine Ladungsmenge von 1 Coul aufnimmt.

Diesen Sachverhalt kann man ganz allgemein formulieren und sagen: Die Kapazität eines Kondensators ist die Fähigkeit, Ladungsmengen (Q) pro Volt aufzunehmen:

$$C = \frac{Q}{U}$$

$1\ \mu F = 1$ Mikrofarad
(1 Millionstel Farad)
$1\ nF = 0{,}001\ \mu F = 1$ Nanofarad
(1 Milliardstel Farad)
$1\ pF = 0{,}001\ nF = 0{,}000\,001\ \mu F =$
1 Picofarad
(1 Billionstel Farad)
(über die Vorsilben „Nano, Pico" siehe Anhang)

Die im folgenden abgeleitete Maßeinheit für die Kapazität erleichtert Ihnen das Verständnis der auf Seite 191 behandelten wichtigen Größe der „Zeitkonstanten."

Setzen wir in diese Gleichung die vorher besprochene Beziehung $Q = I \cdot t$ ein, dann erhalten wir:

$$C = \frac{I \cdot t}{U}$$

Setzen wir in diese Formel die entsprechenden Maßeinheiten ein, dann ergibt sich die wichtige Beziehung:

$$F = \frac{A \cdot s}{V} \text{(Amperesekunde pro Volt)}$$

Für die Praxis ist 1 F jedoch viel zu groß, und man benutzt daher die nebenstehenden, abgeleiteten Einheiten.

12.1.6 Der Energie-Inhalt eines geladenen Kondensators

Vom Kapitel 3.4 her wissen Sie, daß „Arbeit" und „Energie" bzw. „Energieverbrauch" physikalisch dasselbe sind. Beide haben als Formelzeichen „*W*" und als Maßeinheit die Wattsekunde (W · s).

Die Formel für den Energieverbrauch (bzw. die elektrische Arbeit) lautete:

$$W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t \text{ (in Ws)}$$

Wenn ein Kondensator aufgeladen ist, dann hat er die zum Aufladen aufgewendete elektrische Energie gespeichert. Bei der Entladung gibt er diese Energie wieder ab, die nun eine Arbeit verrichten, z. B. ein Lämpchen zum Aufglühen bringen kann.

Es ist leicht einzusehen, daß die gespeicherte Energie proportional zum Fassungsvermögen des Kondensators, also der Kapazität *C*, sein muß. Ebenso spielt die Spannung eine wichtige Rolle. Sie geht – wie bei einem Widerstand (siehe Kap. 3.4) – mit dem Quadrat in die Energiegleichung ein. Dazu kommt noch der Faktor $1/2$. Auf die mathematische Ableitung der Formel sei hier verzichtet.

Die Gleichung für den Energieinhalt eines geladenen Kondensators lautet demnach:

$$W = \frac{1}{2} U^2 \cdot C \quad \text{(in Wattsekunden) } (U \text{ in V; } C \text{ in F})$$

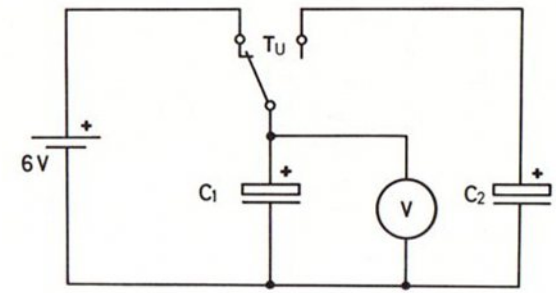
Schließt man also einen Kondensator an eine Spannungsquelle, so entnimmt er dieser um so mehr elektrische Energie, je größer seine Kapazität und je höher die angelegte Spannung ist. Wird der aufgeladene Kondensator bei der Entladung als „Generator" (= Energieerzeuger) benutzt, dann gibt er (theoretisch) genau so viel Energie wieder ab, wie er vorher aufgenommen hat.

Versuch

Zum Nachweis, daß die Größe der Kapazität tatsächlich Einfluß auf die Menge der gespeicherten Energie hat, bauen Sie bitte den Versuch nach Bild 12.7 auf. Verwenden Sie zunächst für C_1 einen 470-µF-Kondensator. Den Kondensator C_2 müssen Sie vor dem Einsetzen in die Schaltung vorsichtshalber durch Kurzschließen vollständig entladen, damit er keine „Restladung" mehr besitzt. Das muß für diesen Versuch unbedingt vermieden werden.

Wählen Sie für C_2 zunächst ebenfalls einen 470-µF-Kondensator. Sobald Sie den Taster T_u drücken, wird der Kondensator C_1 von der Spannungsquelle abgeschaltet und an C_2 gelegt. C_2 wird nun von C_1 aufgeladen. Messen Sie die Spannung an C_1 – und auch die an C_2 – vor und nach dem Umschalten. Vergessen Sie nicht, vor jedem neuen Versuch C_2 durch Überbrücken mit 33 Ω vollständig zu entladen.

Wird die Spannung mehr oder weniger absinken, wenn Sie den Versuch mit 47 µF für C_2 wiederholen? Und wie sieht es aus, wenn Sie für C_1 47 µF und für C_2 470 µF einsetzen?



12.7

Ergebnis

C_1 wird bei keiner Schaltung vollständig entladen, sondern der „Ladungsaustausch" erfolgt nur solange, bis an beiden Kondensatoren die gleiche Spannung steht.

Bei gleich großen Kondensatoren sinkt die Spannung auf die Hälfte ab.

Ist $C_1 = 470$ µF und $C_2 = 47$ µF, dann sinkt die Spannung nur relativ wenig, da C_2 von C_1 nur wenig Energie „übernehmen" kann.

Ist dagegen $C_1 = 47$ µF und $C_2 = 470$ µF, dann sinkt die Spannung bis unter 1 Volt ab, da die geringe von C_1 gespeicherte Ladungsmenge fast ganz von dem viel größeren C_2 aufgenommen wird.

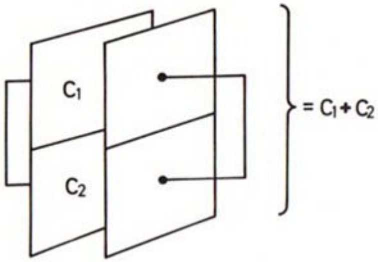
Falls es Ihnen Spaß macht, können Sie auch den zuerst als „Ladekondensator" benutzten Kondensator aus der Schaltung herausnehmen, durch Kurzschließen über 33 Ω vollständig entladen und als erneut zu ladenden Kondensator verwenden. Das Spiel läßt sich sehr oft wiederholen.

Schlußfolgerung

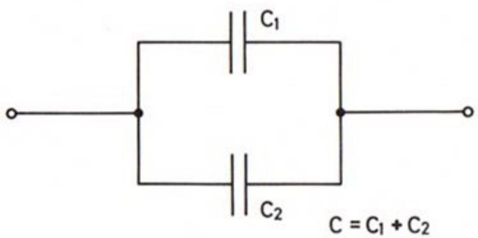
Die Aufnahme und Abgabe der von einem Kondensator gespeicherten Energie verhält sich proportional zur Kapazität des Kondensators.

12.2 Zusammenschaltung von Kondensatoren

Wir wollen jetzt untersuchen, wie sich Spannungen und Ströme verhalten, wenn man Kondensatoren zusammenschaltet.



12.8



12.9

12.2.1 Parallelschaltung

Betrachten wir zuerst die Parallelschaltung von Kondensatoren, weil dies in der elektronischen Praxis häufiger vorkommt. Sie erkennen aus Bild 12.8 ohne weiteres, daß sich bei Paralleschaltung eine Vergrößerung der Platten durch Addition ergibt.

Gesamtkapazität

Eine Plattenvergrößerung bedeutet aber, daß mehr Ladung aufgenommen (bzw. beim Entladen wieder abgegeben) werden kann. Kurz: Die Kapazitäten von parallel geschalteten Kondensatoren addieren sich zur Gesamtkapazität. Bild 12.9 zeigt das eigentliche Schaltbild.

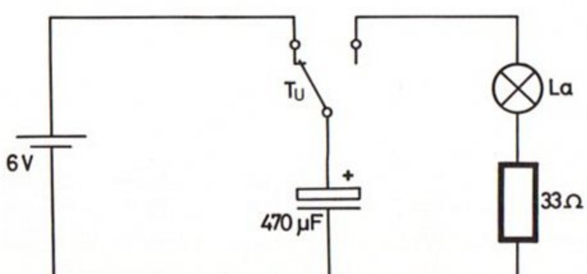
Bei Parallelschaltung von Kondensatoren addieren sich die Einzelkapazitäten zur Gesamtkapazität.

Die Formel für diesen Sachverhalt lautet demnach:

$$C = C_1 + C_2 + \ldots$$

Nun wollen wir die Richtigkeit der Formel durch einen kurzen Versuch überprüfen.

Versuch

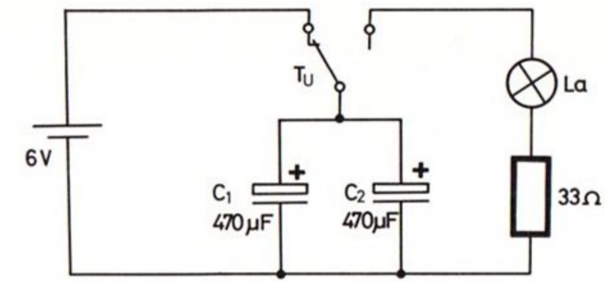


12.10

Nach Bild 12.10 wird der 470-µF-Kondensator bei nicht gedrücktem Umschalt-Taster T_u aufgeladen. Bei Druck des Tasters verbinden Sie das Lämpchen mit dem (+)Anschluß von C.

Der Kondensator wird entladen. Beobachten Sie bitte, wie hell und wie lange das Lämpchen aufleuchtet. Wiederholen Sie dazu den Versuch mehrmals.

Nun schalten Sie nach Bild 12.11 den zweiten 470-µF-Kondensator C_2 parallel zu C_1 und wiederholen den Versuch. Wie hell und wie lange leuchtet das Lämpchen jetzt?



12.11

Schlußfolgerung

Wenn das Lämpchen bei der Parallelschaltung der beiden Kondensatoren heller und länger aufleuchtet, muß es mehr Energie erhalten haben. Die Kapazität der beiden parallel geschalteten Kondensatoren muß also größer sein als die eines einzigen Kondensators. Da durch die Parallelschaltung der beiden 470-µF-Kondensatoren eine „Ersatzkapazität" von 940 µF entsteht, ist das Speichervermögen der Parallelschaltung doppelt so groß wie das eines einzelnen Kondensators.

Welche Gesamtkapazität ergibt sich durch Parallelschaltung von 47 µF und 470 µF?

Strom- und Kapazitätsverhältnis

Beim Ladevorgang einer Parallelschaltung von Kondensatoren fließt zum größeren Kondensator (mit dem größeren C-Wert) mehr Ladung als zum kleineren. Bei der Entladung gibt der größere natürlich auch mehr Ladung ab, wie Sie bereits festgestellt haben. Setzt man voraus, daß die beiden parallelgeschalteten Kondensatoren gleich schnell aufgeladen werden, so fließt im Zweig mit dem größeren Kondensator stets mehr Strom als im Zweig mit dem kleineren Kondensator. Es gilt also der nebenstehende Zusammenhang, der als Formel folgendermaßen angeschrieben werden kann:

$$I : I_1 : I_2 \ldots = C : C_1 : C_2 : \ldots$$

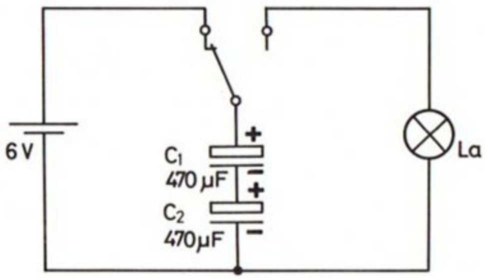
Bei Kondensatoren ist es also anders als bei Widerständen: Dort verhielten sich ja die Teilströme bei Parallelschaltung umgekehrt proportional zu den Widerstandswerten.

Beiden Schaltungen ist aber wieder gemeinsam, daß sich die Teilströme zum Gesamtstrom addieren: $I_1 + I_2 = I$.

Fast schon selbstverständlich wird Ihnen erscheinen, daß sich die Energie-Inhalte parallelgeschalteter Kondensatoren ebenfalls wie deren Kapazitäten verhalten:

$$W : W_1 : W_2 \ldots = \ldots = C : C_1 : C_2 \ldots$$

Bei der Parallelschaltung von Kondensatoren verhalten sich die Lade- bzw. Entladeströme wie die Kapazitätswerte.



12.12

Bei der Reihenschaltung von Kondensatoren ist die sich ergebende Gesamtkapazität kleiner als die kleinste Teilkapazität.

12.2.2 Reihenschaltung

Gesamtkapazität

Nach dem, was eben über Kondensatoren und weiter vorher von Widerständen gesagt wurde, werden Sie mit Recht vermuten, daß die Gesamtkapazität bei einer Reihenschaltung von Kondensatoren kleiner sein wird als die kleinste Einzelkapazität.

1. Versuch

Ihre Vermutung wird bestätigt, wenn Sie den zweiten 470-µF-Kondensator C_2 jetzt nach Bild 12.12 in Reihe zu C_1 legen. Das Lämpchen leuchtet nun ganz schwach oder vielleicht gar nicht mehr auf, wenn es vom Entladestrom durchflossen wird. Das gilt sogar, obwohl der 33-Ω-Vorwiderstand (Bild 12.11) nicht verwendet wird.

Die Formel für die Gesamtkapazität von zwei in Reihe geschalteten Kondensatoren ergibt sich (ganz ähnlich wie bei 2 parallelgeschalteten Widerständen) zu:

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

Wir haben durch Reihenschaltung der beiden 470-µF-Kondensatoren also eine Gesamtkapazität von nur 235 µF erhalten. Wie groß ist die Gesamtkapazität, wenn Sie 470 µF und 47 µF in Reihe schalten?

Spannungs- und Kapazitätsverhältnis

Wichtig bei der Reihenschaltung von Kondensatoren ist die Frage, wie hoch die Teilspannungen U_1 und U_2 an C_1 und C_2 sein werden. Ermitteln Sie am folgenden Versuch ungefähr die Größenordnung.

2. Versuch

Schalten Sie bitte nach Bild 12.13 den 470-µF- und 47-µF-Kondensator in Reihe und legen diese Reihenschaltung an eine Spannungsquelle von 4,5 Volt. Messen Sie zunächst nur die Gesamtspannung U. Zur Messung der Teilspannung U_1 und U_2 dürfen Sie das Voltmeter erst anlegen, nachdem Sie den Taster T_E wieder losgelassen haben! (Andernfalls ergibt sich ein falsches Meßergebnis, weil ein Teil des Stroms an C_1 bzw. C_2 vorbeigeleitet wird.) Tragen Sie die Ergebnisse und das entsprechende Teilerverhältnis in die Tabelle 12.14 ein.

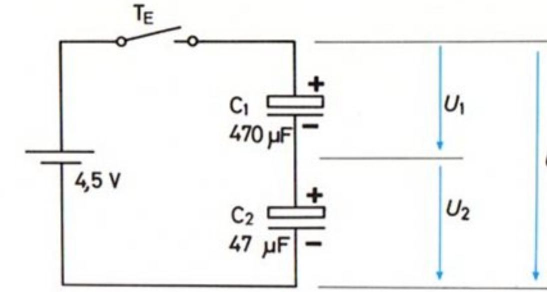
Diese werden in etwa die folgende Verhältnisgleichung bestätigen:

$$U : U_1 : U_2 = \frac{1}{C} : \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2}$$

Die aufgrund der Kapazitätsangaben errechneten Werte tragen Sie in die letzte Spalte der Tabelle ein.

(Wieder verhalten sich Kondensatoren genau umgekehrt wie Widerstände!)

12.13



12.14

U in V	U_1 in V	U_2 in V	$U_1 : U_2$ gemessen	$U_1 : U_2$ gerechnet

Ergebnis

Am Kondensator mit der kleineren Kapazität tritt demnach die höhere, am Kondensator mit der größeren Kapazität die niedrigere Teilspannung auf. Beide Teilspannungen müssen sich jedoch zur angelegten Gesamtspannung addieren. Sie können jetzt die Spannungen U_1 und U_2 auch berechnen und mit den gemessenen Werten vergleichen (Tabelle 12.14).

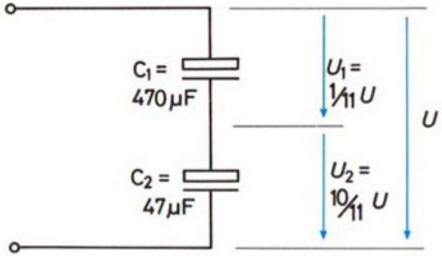
Die Kapazitäten von in Reihe geschalteten Kondensatoren verhalten sich umgekehrt wie die an ihnen auftretenden Teilspannungen.

Energieaufteilung

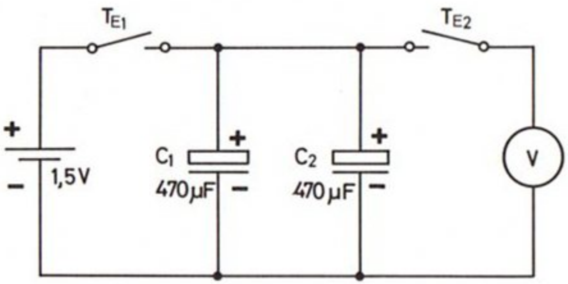
Wie verhalten sich nun die Energien, die in den Kondensatoren der Reihenschaltung gespeichert sind?

Entsprechend der bei Parallelschaltung aufgestellten Gleichung gilt bei Reihenschaltung:

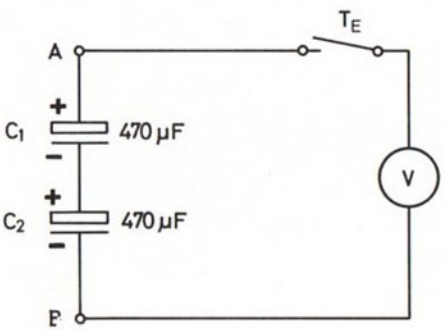
$$W : W_1 : W_2 = \frac{1}{C} : \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2}$$



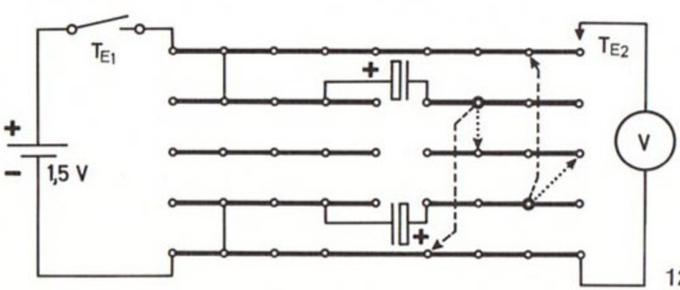
12.15



12.16



12.17



12.18

Frage

Welche Energie kann die Reihenschaltung eines 470-µF- und eines 47-µF-Kondensators bei Anschalten an 6 V speichern? Wie hoch ist die von jedem Kondensator gespeicherte Energie? Bild 12.15 zeigt die Spannungsverhältnisse.

12.3 Spannungsverdoppelung durch Kondensatorschaltungen

1. Versuch

Bild 12.16 zeigt, wie man in bekannter Art 2 Kondensatoren in Parallelschaltung auflädt. Ihre Spannungsquelle sollte für diesen Versuch etwa 1,5 V haben. Die Besitzer eines Netzgerätes verkleinern dessen Spannung durch einen Spannungsteiler mit (470 Ω + 100 Ω).

Bei Druck auf den Taster T_E werden die beiden Kondensatoren auf 1,5 V aufgeladen. Das Voltmeter darf nicht dauernd angeschaltet sein, weil sich sonst die Kondensatoren über dessen Innenwiderstand nach Loslassen des Tasters T_E wieder entladen würden.

Schalten Sie nun die beiden Kondensatoren in Reihe. Damit Sie die Umschaltung schnell und bequem vornehmen können, arbeiten Sie am besten nach dem Steckplan 21.18: Mit den gestrichelten Verbindungen verwirklichen Sie die Parallelschaltung 12.16 und mit den punktierten die Reihenschaltung 12.17. Achten Sie unbedingt auf die Polarität. Die Spannung an den in Reihe geschalteten Kondensatoren beträgt 3 V, also die doppelte Spannung, die die Spannungsquelle zum Laden der Kondensatoren hatte!

Überzeugen Sie sich bitte von dieser verblüffenden Möglichkeit, kurzzeitig eine Spannungsquelle mit hoher Spannung zu erhalten. Würde man viele solche Kondensatoren in Reihe schalten, so könnte man tatsächlich eine „Blitzentladung“ simulieren. Dieses

Prinzip wendet man z. B. bei der Prüfung von Höchstspannungsgeräten an. Allerdings benutzt man dort andere Kondensatoren.

Was ändert sich, wenn Sie den einen 470-μF- durch einen 47-μF-Kondensator ersetzen? Wird Ihr Voltmeter dann auch noch die doppelte Spannung anzeigen? Sinkt jetzt die Spannung schneller ab, wenn Sie das Voltmeter anschalten, weil die gespeicherte Energie viel kleiner ist als bei zwei 470-μF-Kondensatoren?

2. Versuch

Wiederholen Sie den ganzen Versuch in etwas geänderter Form. Die Spannungsquelle soll jetzt 4 bis 5 V haben, auf keinen Fall aber mehr. Bild 12.19 zeigt die beiden Schaltungen.

Entladen Sie nach Abtrennen der Spannungsquelle zuerst die beiden parallelgeschalteten Kondensatoren über ein Lämpchen und beobachten Sie dabei die Helligkeit des Entlade-Lichtblitzes. Laden Sie erneut und schalten Sie jetzt die beiden aufgeladenen Kondensatoren in Reihe. Entladen Sie wieder über das Lämpchen. Es wird viel heller leuchten – und das, obwohl die gespeicherte Energie in den beiden Kondensatoren bei der Parallelschaltung genauso groß ist wie die bei der Reihenschaltung! Das liegt eben an der doppelt so hohen Spannung zu Beginn der Entladung bei Reihenschaltung.

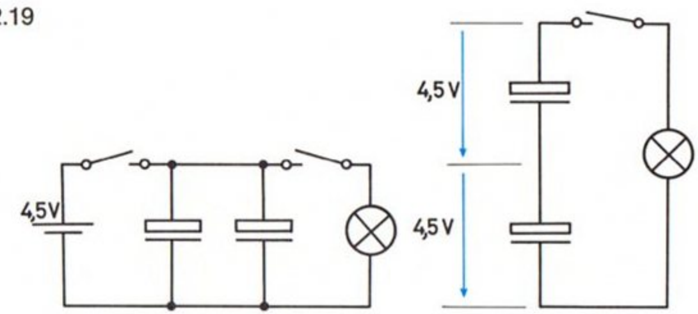
Einen weiteren Grund – die veränderte „Zeitkonstante" – werden Sie noch kennenlernen.

3. Versuch

Laden Sie bitte die beiden 470-μF-Kondensatoren in Parallelschaltung auf und zwar mit der höchsten Ihnen zur Verfügung stehenden Spannung. Und nun schalten Sie die beiden Kondensatoren in Reihe und schließen die Reihenschaltung über zwei Steckerspitzen oder zwei blanke Kupferdrähte kurz. Sie werden einen beachtlichen Funken erzeugen. Vergleichen Sie den Funken mit dem, den Sie bei der Parallelschaltung der beiden Kondensatoren erzielen können.

Allerdings sollten Sie diesen Versuch nicht öfter wiederholen, weil der bei Kurzschlußentladung momentan auftretende Spitzenstrom so stark ist, daß die Kondensatoren darunter leiden könnten.

12.19



Würden Sie die schlagartige Entladung dieser „vollaufgetankten" Reihenschaltung über ein Glühlämpchen vor sich gehen lassen, könnte es sein, daß dieses schon beim ersten Mal seinen Geist aufgibt. Sie können „Ihres Erfolges" ganz sicher sein, wenn Sie für den Versuch ein Taschenlampen-Birnchen vom Typ 3,8 V/0,07 A verwenden. Der sechsfachen „Überspannung" ist das arme Ding nicht gewachsen.

12.4 Laden und Entladen über einen Widerstand

12.4.1 Allgemeine Betrachtungen und Vorversuch

Schon bei den ersten Kondensator-Versuchen ist Ihnen sicher aufgefallen, daß – und das ist ganz wichtig – die „Spannungsänderung" beim Kondensator mit der kleineren Kapazität (47 µF) schneller verlief als beim Kondensator mit der größeren Kapazität (470 µF).

Zum ersten Mal sind Sie nun in diesem Buch sehr deutlich auf die Dimension der Zeit gestoßen. Die Tatsache, daß der Kondensator ein Bauelement ist, das die Zeit mit „ins Spiel" bringt, ist von geradezu fundamentaler Bedeutung für sehr viele elektronische Schaltungen, mit denen wir uns im „hobby-Labor 3" noch ganz ausführlich beschäftigen werden.

Man kann das auch so ausdrücken: Während des Lade- und Entladevorgangs eines Kondensators ändert sich die Höhe der Spannung „mit der Zeit". Da die Spannungsänderung aber entsprechend dem Auf- oder Entladungsvorgang bei einem Kodensator verläuft, gibt sie Auskunft über den „Ladezustand" dieses Bauelements.

Wir wollen diesen Zusammenhang genauer untersuchen, denn – wie schon gesagt – er ist von grundlegender Bedeutung für die meisten Erzeugnisse der „industriellen Elektronik", wie z. B. Rechenmaschinen, Computer, Zeitgebereinrichtungen in der Regel- und Steuertechnik usw.

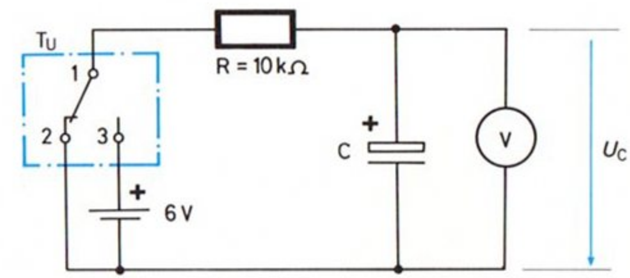
Bei den ersten Versuchen ging das Laden und Entladen so schnell vor sich, daß Sie lediglich die Tatsache eines solchen Vorgangs beobachten, aber nichts über den Verlauf aussagen konnten. Zur genaueren Untersuchung müssen wir diesen Lade- und Entladevorgang verlangsamen. Das geschieht am besten durch Zwischenschalten eines Widerstandes. Machen wir gleich einen Versuch!

Vorversuch

Bild 12.20 zeigt die Schaltung. Wie beim Versuch 12.6 benutzen wir den ft-Taster als Umschalt-Taster, dessen Funktion bereits in den Bildern 12.6 (a) und 12.6 (b) dargestellt wurde. (Achten Sie bitte auf richtige Polung des Kondensators!)

Neu ist bei diesem Experiment, daß der Kondensator *C* mit einem hohen Widerstandswert in Reihe liegt. Die Reihenfolge, in der die verschiedenen Werte von *C* in die Schaltung eingesetzt werden sollen, entnehmen Sie der Tabelle 12.21.

12.20



12.21

Versuch Nr.	*C* in µF	*R* in kΩ
1	47	10
2	470	10
3	940	10

Überlegen Sie bitte, wie hoch in dieser Schaltung mit fest angeschaltetem Voltmeter die Spannung am Kondensator höchstens werden kann, wenn der Kondensator voll aufgeladen ist.

Dieser Wert ergibt sich zwar beim Versuch von selbst – Sie können ihn aber schon vorher ausrechnen, wenn Sie berücksichtigen, daß nicht nur der Kondensator, sondern auch das zu diesem parallel liegende Voltmeter mit *R* in Reihe liegt. Und den Innenwiderstand des Voltmeters kennen Sie ja. (Stichwort: Spannungsteiler!).

Wir wollen jetzt aber noch keine genaueren Werte ermitteln – es genügt zunächst, wenn Sie die Änderung der Spannung U_C während des Lade- und Entladevorgangs beobachten, sobald Sie den Taster T_U drücken bzw. loslassen.

Ergebnis

Durch den Einbau des 10-kΩ-Widerstandes wird eine genaue Beobachtung der Spannungsänderung ermöglicht. Die Vorgänge gehen nun mit überschaubarer Geschwindigkeit vor sich.

Die Spannung steigt bzw. fällt zu Anfang des Lade- bzw. Entladevorgangs schneller als an dessen Ende.

Jetzt läßt sich auch deutlich feststellen, daß die Dauer des Lade- und Entladevorgangs von der Größe der Kapazität des Kondensators abhängt.

Schlußfolgerung

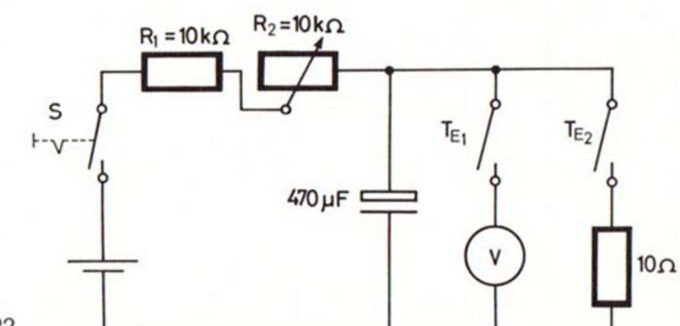
1. Der Wert von U_{Cmax} ist in dieser Schaltung vom Widerstand R abhängig, weil R und R_i des Voltmeters zusammen einen Spannungsteiler bilden. Wäre kein Voltmeter angeschaltet, dann würde U_C den Wert von U_{Bat} erreichen.
2. Die unterschiedliche Schnelligkeit der Spannungsänderung – erst schnell, dann immer langsamer – läßt den Schluß zu, daß der Ladestrom ebenfalls mit unterschiedlicher Geschwindigkeit zu- bzw. abnimmt. Wie Strom und Spannung bei der Kondensatorauf- bzw. -entladung zusammenhängen, müßte noch näher untersucht werden. Das wollen wir auch im nächsten Abschnitt tun.
3. Was nun die Abhängigkeit der Lade- bzw. Entladedauer von der Größe der Kapazität eines Kondensators betrifft, so hat dieser Versuch die Ergebinsse der vorhergehenden Experimente vollauf bestätigt.
4. Die Dauer der beobachteten Vorgänge verlängert sich auch deshalb, weil die Stromstärke mit zunehmendem Widerstandswert immer kleiner wird, d. h. es wird pro Sekunde eine wesentlich kleinere Ladungsmenge bewegt. Und da dauert es halt länger, bis der Kondensator aufgefüllt ist.

12.4.2 Der Ladevorgang

Die Aussage: „Die Änderung der Spannung U_C am Kondensator erfolgt zuerst schneller und wird dann immer langsamer" muß jetzt „präzisiert" werden. Wir wollen es genau wissen und nehmen daher eine Kennlinie auf, die das Verhalten von U_C in Abhängigkeit von der Zeit t beschreibt.

Versuch

Bauen Sie bitte die Meßschaltung 12.22 auf. Als „Ladewiderstand" wirkt ein 10-kΩ-Schichtwiderstand und – in Reihe dazu geschaltet – das 10-kΩ-Potentiometer. Stellen Sie den Drehknopf so ein, daß der Ladewiderstand $R_1 + R_2$ etwa 20 kΩ beträgt. (Sie können das Poti auch zwischen den Anschlüssen A und E benutzen.) Mit dieser Schaltung wird nun ermittelt, wie schnell die Spannung U_C am Kondensator ansteigt.



12.22

12.23

Messung von	t in s	U_C in V			Summe $U_{C\,1\text{-}3}$ in V	Summe : 3 $= U_{C\,mittel}$ in V
		1	2	3		
Beispiel: U_{10}	*10*	*1,6*	*1,8*	*1,7*	*5,1*	*1,7*
U_{10}	10					
U_{20}	20					
U_{30}	30					
U_{40}	40					
U_{60}	60					

Um beim Laden nicht dauernd einen Taster drücken zu müssen, verwenden Sie am besten zum Einschalten den ft-Polwendeschalter* (oder einen ft-Taster mit schwergängig gemachtem Gelenkstein oder einfach einen Kabelstecker).

Als Spannungsquelle sollten Sie – wenn irgend möglich – kein Netzgerät, sondern eine Batterie verwenden. Wegen der günstigeren Ablesemöglichkeiten am Voltmeter sollte die Spannung höchstens 3 bis 4 V betragen.

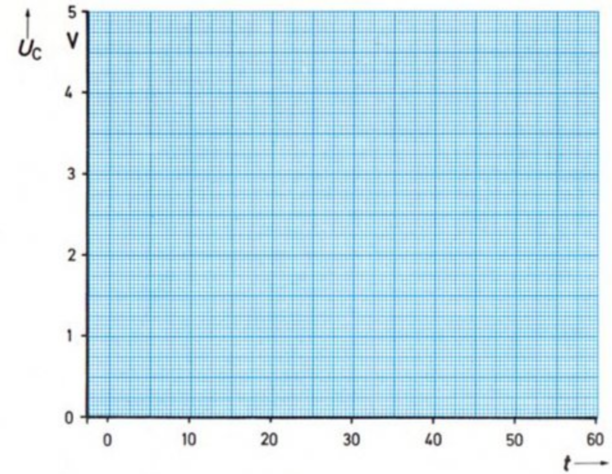
Es gibt nun mehrere Möglichkeiten der Messung. Sie können alle 10 Sekunden das Voltmeter kurz anschalten, wobei ein freundlicher Mitmensch die Werte abliest und in die Tabelle 12.23 einträgt. (Da ein Mensch nur zwei Hände hat, kann man diese Art der Messung kaum allein schaffen.) Der Wert U_{10} ist der gemessene Wert nach 10 Sekunden; U_{20} ist der Wert nach 20 Sekunden usw.

Arbeiten Sie lieber allein oder legen Sie Wert auf Ausschaltung des Fehlers, der durch kurzzeitiges Anschalten des Voltmeters zwangsläufig entstehen muß, dann schalten Sie nach 9 Sekunden das Voltmeter an, lesen nach 1 s ab und tragen den Wert selbst in die Tabelle ein. Dann schalten Sie die Batterie ab und entladen den Kondensator (mindestens 3 Sekunden lang) über den 10-Ω-Widerstand. Nun wiederholen Sie den Versuch; jedoch schalten Sie das Voltmeter zur Messung der Spannung erst nach 19 s an. Eine Sekunde später müssen Sie den Wert schon ablesen. Da Sie zwischenzeitlich das Voltmeter nicht angeschaltet haben, erhalten Sie einen exakten Wert für die Zeit $t = 20$ Sekunden. Nach erneuter Entladung des Kondensators ermitteln Sie auf dieselbe Weise die Spannung nach einer Einschaltzeit von 30 s. Sie werden feststellen, daß sich ab einer Einschaltzeit von etwa 60 s keine wesentliche Erhöhung der Spannung mehr feststellen läßt.

Die erste Meßreihe wiederholen Sie vorsichtshalber noch zweimal, denn eine einzige Messung ist in solchen Fällen mit zu vielen Unsicherheiten behaftet. Man benutzt deshalb den Mittelwert aus drei Meßreihen. Addieren Sie bitte die für jede Zeiteinheit gefundenen drei Werte und tragen Sie die Summe in die „Summenspalte" der Tabelle 12.23 ein. Dann teilen Sie die Summe durch 3 und erhalten so den „arithmetischen Mittelwert", wie der Fachausdruck lautet. Diesen schreiben Sie in die letzte Spalte der Tabelle ein.

* Diesen Schalter erhalten Sie zusammen mit dem ft-Umschalt-Taster und den zugehörigen Kabeln und Steckern als fertige Packung „e-m 3" bei Ihrem ft-Service-Händler.

Die so gemittelten Meßwerte tragen Sie nun in das vorbereitete Diagrammnetz 12.24 ein und verbinden die Meßpunkte miteinander. Ihre Kurve wird wahrscheinlich von der in Bild 12.25 als Beispiel dargestellten stark abweichen. Trotzdem wird sich auch bei Ihren Ergebnissen ein ähnlicher Kurvenverlauf ergeben.

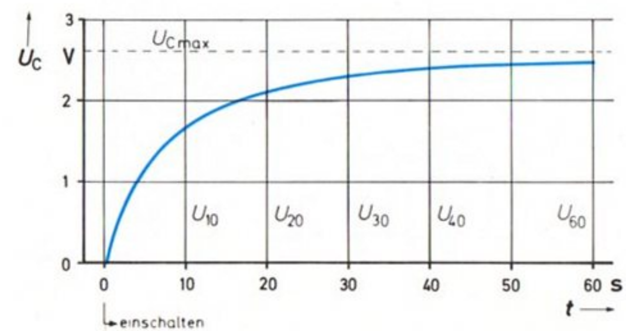


12.24

Was sagt dieses Diagramm nun aus?

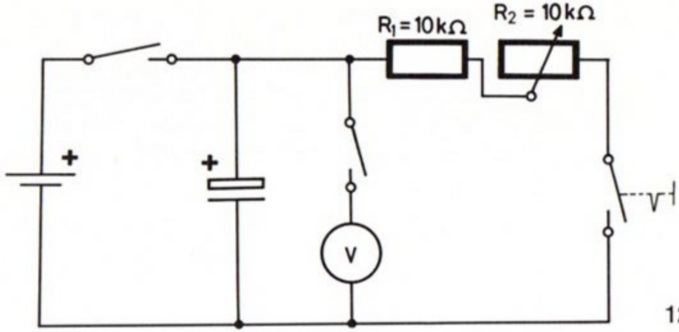
1. Zunächst verblüfft, daß schon innerhalb der ersten 10 s über die Hälfte der maximal erreichbaren Höhe der Spannung am Kondensator aufgetreten ist. Bei der Beobachtung des Voltmeterzeigers war das nicht ohne weiteres zu erkennen.

   Sollte dies nicht der Fall sein, so versuchen Sie es mit dem zweiten 470-µF-Kondensator. Die Anschaltung an die höchste, Ihnen zur Verfügung stehende Spannung (aber höchstens 15 V!) hilft, wenn der Kondensator – bedingt durch längere Nichtbenutzung – „nachformiert" werden muß. (Was man unter „Formierung" versteht, ist auf Seite 215 erklärt.)

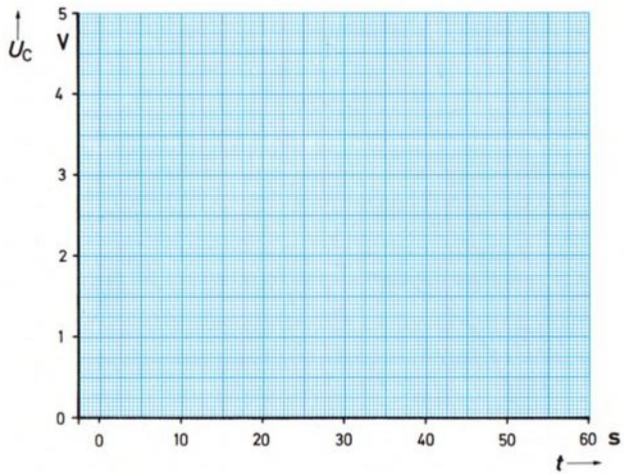


12.25

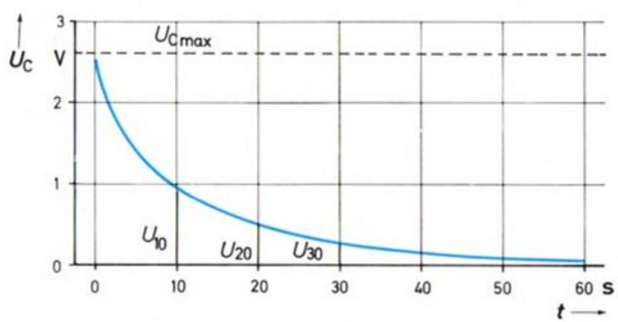
2. Die Spannung am Kondensator muß – weil der Kondensator vor Beginn der 1. Messung vollkommen entladen war – von 0 Volt aus ansteigen. Das bedeutet, daß der Kondensator zu Beginn des Ladevorgangs für einen Moment wie ein Kurzschluß wirkt. Das erklärt den kurzen, heftigen Zeigerausschlag beim Versuch 12.6.
3. Nach einer bestimmten Zeit ist der „Ladungstransport" beendet, d. h. es fließt kein Strom mehr, und die Spannung am Kondensator hat ihren höchsten Wert erreicht. Jetzt wirkt der Kondensator wie ein unendlich großer Widerstand, bzw. wie eine Unterbrechung des Stromkreises.



12.26



12.27



12.28

12.4.3 Der Entladevorgang

Mit der Schaltung 12.26 können Sie, wenn Sie Lust haben, die Entladekurve des Kondensators über einen 20-kΩ-Widerstand aufnehmen. Die dazugehörige Tabelle können Sie ähnlich der Tabelle 12.23 selbst erstellen. Auch hier ist es zweckmäßig, wieder den Mittelwert aus 3 Meßreihen zu bilden. Ihre Meßwerte sollten Sie in das vorbereitet Koordinatennetz 12.27 eintragen. Die daraus zu konstruierende Entladekurve wird im Prinzip der des Bildes 12.28 entsprechen. Auch sie scheint dem gleichen Gesetz zu folgen, nach dem die „Ladekurve" verläuft. Das wird ganz deutlich, wenn Sie die Entladekurve auf transparentes Papier übertragen und dann mit der Ladekurve zur Deckung bringen.

Bevor wir in der Behandlung des Kondensators weitergehen, sollen noch einmal die wichtigsten der gewonnenen Erkenntnisse zusammengefaßt werden.

Zusammenfassung

1. Zu Beginn der Ladung wirkt der Kondensator einen Moment lang wie ein „Kurzschluß"; dann verhält er sich so ähnlich wie ein stromdurchflossener Widerstand, dessen Wert mehr oder weniger schnell ansteigt; nach beendeter Ladung wirkt er wie eine „Leitungsunterbrechung". (Das gilt allerdings nur für den Gleichstromkreis. Bei Wechselstrom ist das anders, wie wir noch sehen werden.)
2. Der aufgeladene Kondensator wirkt dagegen wie eine Energiequelle mit einem mehr oder weniger großen „Energieinhalt", den sie an einen Verbraucher (Widerstand, Lämpchen usw.) abgeben kann.
3. Bei beiden Vorgängen fließt ein Strom: der Lade- bzw. der Entladestrom. Die Ströme fließen in entgegengesetzter Richtung.
4. Die Spannung U_C am Kondensator wechselt jedoch die Polarität (Richtung) nicht! Sie ist nichts anderes als ein „Maß" für den Elektronendruck zwischen den Kondensatorplatten!
5. Beide Vorgänge benötigen eine ganz bestimmte Zeitspanne. Außerdem verlaufen sie zeitlich nicht „gleichmäßig" (= linear), sondern folgen einer „nichtlinearen Funktion", von der im Abschn. 12.5.4 noch kurz die Rede sein wird.

12.5 Die Zeitkonstante des RC-Gliedes

12.5.1 Allgemeines

Die Reihenschaltung eines Kondensators mit einem Widerstand bezeichnet man kurz als „*RC*-Glied“. Diese „Schalteinheit“ spielt eine ganz große Rolle – sowohl in der „Gleichstrom“- als auch in der „Wechselstromelektronik“ (Nachrichtentechnik, Radio, Fernsehen usw.). Deshalb müssen wir uns noch ein wenig damit befassen, denn das Verständnis vieler elektronischer Schaltungen ist ohne genaue Kenntnis des Verhaltens eines *RC*-Gliedes nicht möglich.

Ein *RC*-Glied wird vor allem durch seine „Zeitkonstante“ charakterisiert, für die als Formelzeichen der griech. Kleinbuchstabe τ (sprich: tau) festgelegt wurde. Diese Zeitkonstante ist gleich dem Produkt aus R und C.

Als Formelzeichen sollte τ schräg geschrieben werden. Aus drucktechnischen Gründen geschieht dies häufig nicht, zumal viele griechische Buchstaben nicht als Maßeinheit verwendet werden.

Als Formel geschrieben lautet die wichtige Bezeichnung für die Zeitkonstante:

$$\tau = R \cdot C \text{ (in Sekunden)}$$

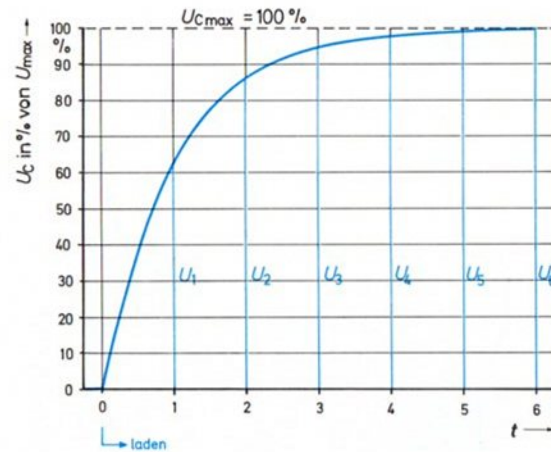
wobei R in Ohm und C in Farad angegeben werden. (Leichter rechnet es sich, wenn man für R Megaohm (MΩ) und für C Mikrofarad (μF) einsetzt. Auch dann erhält man τ in Sekunden.)

Wie kommts – werden Sie vielleicht fragen –, daß das Produkt aus „Widerstand“ und „Kapazität“ ausgerechnet eine „Zeit“ ergibt? Zur Beantwortung dieser Frage setzen wir für die Einheit Ω nach dem Ohm'schen Gesetz V/A und für F die auf Seite 178 abgeleitete Einheit A · s / V ein. Dann ergibt sich:

$$\Omega \cdot \mathrm{F} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}} \cdot \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{V}} \cdot \mathrm{s} = \mathrm{s}$$

12.5.2 Die theoretische Ladekurve

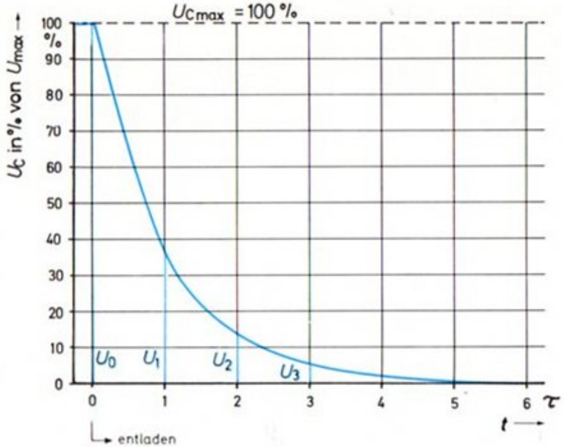
Es läßt sich mathematisch nachweisen, daß die Zeitkonstante diejenige Zeitspanne beim Laden eines Kondensators ist, in welcher die Spannung U_C am Kondensator vom Anfangswert, (z. B. von 0 V) auf 63 % der maximal erreichbaren Spannung U_{max} (z. B. der angelegten Batteriespannung) angestiegen ist. Im Bild 12.29 ist diese Spannung mit U_1 bezeichnet.



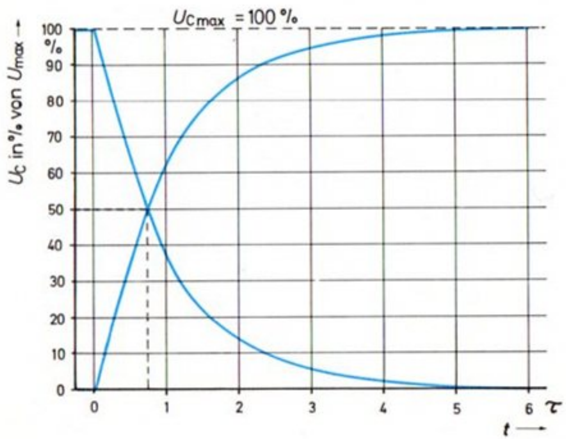
12.29

Nehmen wir an, die Zeitspanne vom Einschalten der Batterie und damit vom Zeitpunkt, in dem U_C gleich Null ist, bis zur Erreichung von 63 % der Batteriespannung betrage zufälligerweise 8 s. Wie hoch ist dann die Kondensatorspannung nach weiteren 8 s, also nach einer Zeitspanne von insgesamt 2 τ? Die Spannung steigt wieder um 63 % an, und zwar um 63 % von der Differenz zwischen U_1 und U_{max}. Sie beträgt 100 – 63 = 37 % der maximal erreichbaren Spannung. Nach 2 · 8 = 16 Sekunden (= 2 τ) ist die Spannung am Kondensator damit auf 63 % + (63 % von 37 %) = 63 % + 23,3 % = 86,3 % der maximal erreichbaren Spannung angestiegen. Sie sehen, das Tempo des Spannungsanstiegs hat sich in der Zeit von der 8. bis zur 16. Sekunde bedeutend verlangsamt.

Innerhalb der nächsten (dritten) Zeitspanne τ steigt die Spannung am Kondensator erneut um 63 % der verbleibenden „Restspannung“. Nach einer Gesamtzeit von 3 · 8 = 24 Sekunden steigt die Spannung auf 86,3 + (0,63 · 13,7) = 86,3 + 8,6 = 94,9 % des Höchstwertes. Diesen Wert nennen wir U_3. Es fehlen also nach 3 τ (im Beispiel nach 24 s) nur noch etwa 5 % von der maximal erreichbaren Spannung.



12.30



12.31

Auf dieselbe Weise kann man die Werte von U_4, der Spannung nach insgesamt 4τ, zu 98,1 % von U_{max} berechnen. Nach 5 τ ist die Kondensatorspannung U_5 auf 99,3 % der maximal erzielbaren Spannung angestiegen.

Da nach jedem weiteren τ die Spannung erneut um 63 % der Differenz ansteigt, wird zwar der Höchstwert von U_{max} theoretisch niemals erreicht; praktisch aber kann man sagen, daß der Kondensator nach der Zeit t = 5 τ voll aufgeladen ist.

Nach einer Zeitspanne von 5 Zeitkonstanten ist der Kondensator eines RC-Gliedes praktisch voll auf- bzw. entladen.

Technisch interessant ist noch die Zeitspanne, in der der Kondensator auf die Hälfte der maximal erzielbaren Spannung aufgeladen ist. Dies ist, wie man aus der Kurve 12.29 entnehmen kann, bei etwa ²/₃ τ erreicht. (In unserem Beispiel wäre das nach etwa 5,3 Sekunden der Fall.)

Interessehalber sei hier folgendes kurz eingeschoben: Wenn das *RC*-Glied an eine Energiequelle angeschlossen würde, die einen von der Spannung unabhängigen, stets gleichbleibenden Strom (Konstantstromquelle) „liefern" könnte – mit elektronischen Schaltungen kann man so etwas annähernd verwirklichen –, dann würde der Kondensator „linear", d. h. gleichmäßig schnell, aufgeladen. Und die Zeit, die er dafür braucht, ist genau gleich 1 τ!

12.5.3 Die theoretische Entladekurve

Demselben mathematischen Prinzip folgt auch die *U*-Kurve bei der Entladung (Bild 12.30).

Nach t = 1 τ ist die Spannung *U* von praktisch U_{max} auf 37 % von U_{max} abgesunken. Im Bild 12.30 ist dieser Wert mit U_1 bezeichnet.

Zur Zeit t = 2 τ ist *U* auf 13,7 % des Ausgangswertes abgesunken ($U_2 = 37 - 37 \cdot 0{,}63 = 13{,}7$ %).

So ergeben sich die Werte für $U_3 = 5{,}1$ %; $U_4 = 1{,}9$ % und $U_5 = 0{,}7$ %. Für die Praxis gilt der Kondensator nach einer Zeit von 5 τ als entladen.

Im Bild 12.31 sind die Bilder 12.29 und 12.30 zusammengesetzt. Sie erkennen auch aus diesem Spannungs/Zeit-Diagramm, daß ein Kondensator nach der Zeit von etwa ²/₃ τ auf die Hälfte (= 50 %) auf- bzw. entladen ist.

Nach der Zeitspanne von ²/₃ τ ist der Kondensator eines RC-Gliedes zur Hälfte auf- bzw. entladen.

12.5.4 Was ist eine e-Funktion?

Eine „Funktion" (s. Seite 27), die auf dem eben geschilderten Prinzip beruht, wird als „e-Funktion" oder auch als „Exponentialfunktion" bezeichnet. Wir können darauf nicht näher eingehen, weil das ins mathematische „Abseits" führen würde.

Nur soviel sei gesagt: In einer solchen Funktion spielt die Zahl „e", die von dem Mathematiker Leonhard Euler (1707–1783) abgeleitet wurde, die entscheidende Rolle. Sie hat den Wert: $e = 2{,}71828\ldots$

Weil sehr viele natürliche Wachstumsvorgänge nach solchen e-Funktionen verlaufen, wird die Zahl e auch als „natürliche Zahl" oder auch als „Naturkonstante" bezeichnet.

12.5.5 Bestimmung von Zeitkonstanten

1. Versuch

1. Setzen Sie bitte in die Schaltung nach Bild 12.22 nacheinander die in Tabelle 12.32 aufgeführten Werte für R und C ein.
Bestimmen Sie für jedes RC-Glied die jeweils erreichbare U_{Cmax} (siehe Vorversuch 12.20) für $U_{Bat} = 3$ V und tragen Sie die Werte in Tabelle 12.32 ein.

2. Dann messen Sie die Zeit t, die vergeht, bis C auf die *Hälfte* von U_{Cmax} aufgeladen ist; sie ist gleich $^2/_3\ \tau$ des betreffenden RC-Gliedes (Spalte 5). Zu Ihrer Orientierung sind einige bei Abfassung des Buches aufgenommene Ladekurven im Bild 12.33 wiedergegeben.

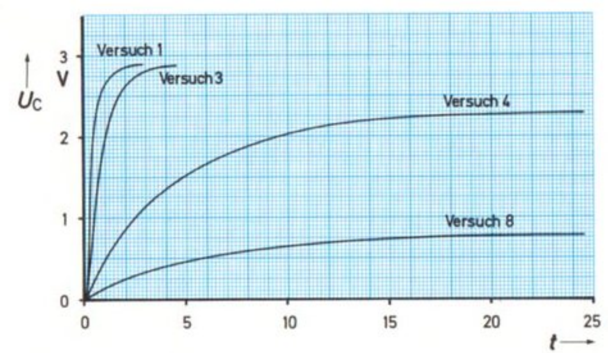
3. Aus dem gemessenen Wert von t können Sie die Zeitkonstante jedes RC-Gliedes berechnen: $\tau = {}^3/_2\ t$ (letzte Spalte).

4. Nach der Formel $C = \tau/R$ können Sie nun den tatsächlichen Wert (Ist-Wert) Ihrer Kondensatoren berechnen (Tabelle 12.34). Es ist durchaus möglich, daß die von Ihnen ermittelten Werte erheblich vom aufgedruckten Soll-Wert abweichen, da Elektrolytkondensatoren Toleranzen bis zu + 30 %, –10 % aufweisen können. Dann sollten Sie den betreffenden Elko entsprechend kennzeichnen.

2. Versuch (Wichtig!)
Untersuchen Sie, ob die Zeitkonstante für ein RC-Glied bei verschieden hohen Spannungen gleich bleibt – oder ob sie sich ändert!

12.32

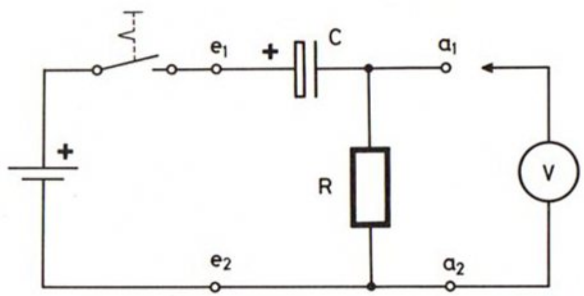
Versuch Nr.	R in kΩ	C in µF (Soll)	U_{Cmax} in V	t in s gemessen	τ in s berechn.
1		470 (C_1)			
2	1	470 (C_2)			
3		940			
4		470 (C_1)			
5	10	470 (C_2)			
6		940			
7		47			
8	47	470 (C_1)			
9		470 (C_2)			
10	68	47			



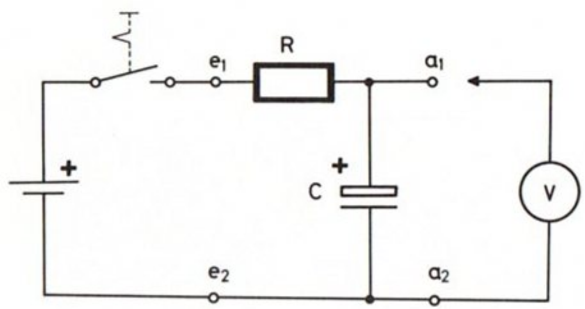
12.33

12.34

C in µF (Soll)	C in µF (Ist)
47	
470 (C_1)	
470 (C_2)	



12.35



12.36

12.6 Das RC-Glied als Vierpol

12.6.1 Der Kondensator als Quer- oder Längsglied

Einen Kondensator und einen Widerstand können Sie nach Bild 12.35 oder nach Bild 12.36 in Reihe schalten.

Die Zeitkonstante beider Schaltungen ist gleich, da Sie in beiden Fällen einen 470-µF- und einen 10-kΩ-Widerstand verwenden. Der Ladestrom wird in beiden Schaltungen ebenfalls gleich groß sein.

Versuch

Betrachten wir nun jede Schaltung als „Vierpol" mit den Eingangsbuchsen e_1 und e_2 sowie den Ausgangsbuchsen a_1 und a_2. Bauen Sie bitte der Reihe nach beide Schaltungen auf und prüfen Sie durch Messung nach, in welcher der beiden Schaltungen das Voltmeter sofort nach dem Einschalten volle Spannung anzeigt und bei welcher dies erst nach der vollständigen Aufladung des Kondensators der Fall ist.

Ergebnis

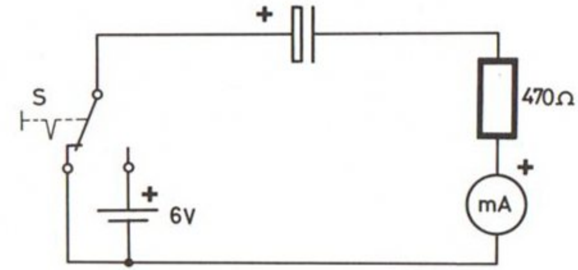
Sie sehen, es kommt also sehr darauf an, ob man in einem solchen Vierpol den Widerstand oder den Kondensator als „Längsglied" bzw. als „Querglied" benutzt. In der Schaltung 12.35 ist der Kondensator als Längsglied und der Widerstand als Querglied eingesetzt. In der Schaltung 12.36 ist es gerade umgekehrt.

Wird der Widerstand als Querglied verwendet, so ist die Spannung an ihm zu Beginn der Aufladung des Kondensators so hoch wie die Batteriespannung. Sie sinkt mit zunehmender Aufladung des Kondensators und wird zu Null, wenn er vollständig aufgeladen ist. Zur Messung können Sie das Voltmeter angeschaltet lassen, wenn Sie bei der Berechnung der Zeitkonstante berücksichtigen, daß der Ladewiderstand R (im Beispiel 10 kΩ) durch die Parallelschaltung des Innenwiderstandes des Meßgerätes (30 kΩ) entsprechend verkleinert wird (im Beispiel auf 7,5 kΩ).

12.6.2 Das RC-Glied als Spannungsteiler

1. Versuch

Bauen Sie bitte die Schaltung nach Bild 12.37 auf. Achten Sie dabei auf die angegebene Polung von Batterie, Kondensator ($C = 940\ \mu F$) und Strommesser. In der gezeichneten Stellung des Schalters S ist der Kondensator über den 470-Ω-Widerstand entladen. Betätigen Sie den Schalter, so wird der Kondensator aufgeladen; der Zeiger des Milliamperemeters wird deshalb kurz nach rechts ausschlagen. Bevor Sie nun durch Umschalten von S den Kondensator wieder entladen, überlegen Sie, in welcher Richtung der Zeiger des Strommessers beim Entladen ausschlagen wird. (Vielleicht erinnern Sie sich noch an den Versuch 12.6?)

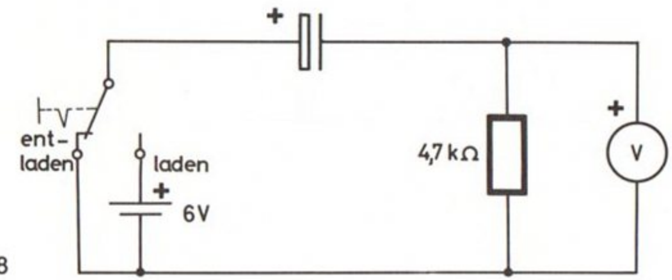


12.37

2. Versuch

Nun wollen wir die Spannung am Lade/Entlade-Widerstand untersuchen. Dazu bauen Sie die Schaltung 12.38 auf. Damit der Vorgang besser zu übersehen ist als beim letzten Versuch, benutzen wir als Lade/Entlade-Widerstand einen 4,7-kΩ-Widerstand.

Nachdem Sie den Schalter auf „Laden" gestellt haben, wird das Voltmeter sofort voll ausschlagen. Langsam geht der Zeiger auf 0 V zurück. Nach welcher Seite muß der Zeiger ausschlagen, wenn Sie den Schalter auf „Entladen" stellen? (Benutzen Sie kein hochempfindliches Meßgerät!)



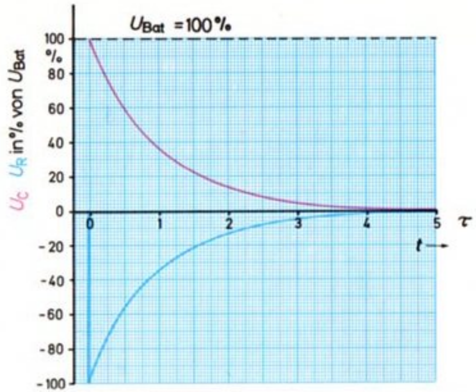
12.38

Ergebnis

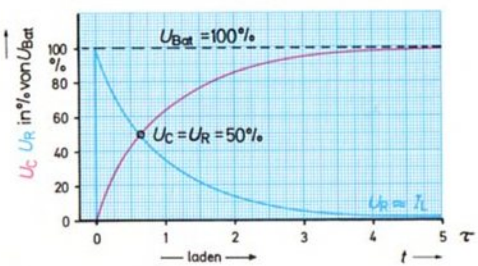
Das Voltmeter schlägt in die entgegengesetzte Richtung aus wie beim Aufladen!

Schlußfolgerung

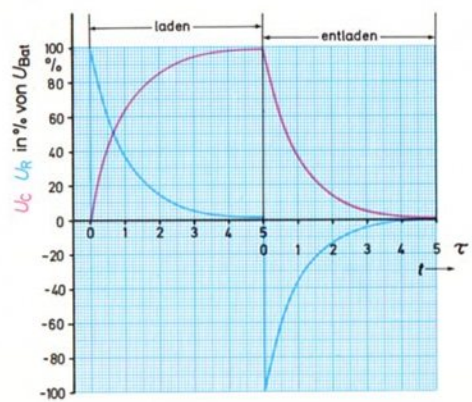
Die Polarität der Spannung am Widerstand eines *RC*-Gliedes gibt also Auskunft darüber, ob der Kondensator gerade geladen oder entladen wird. Eine Auskunft darüber, ob der Kondensator voll



12.39



12.40



12.41

aufgeladen oder ganz leer ist, erhalten Sie allerdings nicht. In beiden Fällen muß das Voltmeter „nichts" anzeigen.

Wer Spaß am Aufnehmen von Kurven hat, wird diese für den Lade- und für den Entlade-Vorgang aufzeichnen. Wer es eilig hat, sollte wenigstens den τ-Wert dieser Schaltung für die Auf- und für die Entladung ermitteln. (Nach $^2/_3$ τ ist $U_R = {}^1/_2\ U_{Bat}$.). Muß der Wert von τ für die Aufladung und die Entladung gleich groß sein?

Ihr Lade/Entlade-Diagramm muß so ähnlich aussehen wie Bild 12.39. In diesem Diagramm ist die Spannungskurve für den Entladevorgang unterhalb der Null-Linie gezeichnet. Diese Art der Darstellung wählt man, wenn der Polaritätswechsel der Spannung am Widerstand dargestellt werden soll.

Darunter finden Sie in Bild 12.40 das Diagramm für die Spannung am Kondensator. Diese hat, wie Sie bereits im Kap. 12.4 festgestellt hatten, nur positive Werte!

In den beiden Diagrammen finden Sie die Spannung am Widerstand und am Kondensator nicht in Volt, sondern in Prozenten der Batteriespannung angegeben. Diese „Normierung" der Spannungen auf die Batteriespannung hat den Vorteil, daß die Kurve für jede beliebige Spannung gilt. Auch die Zeit-Achse ist normiert: Es ist nämlich nicht die Zeit in Sekunden angegeben, sondern in Einheiten der Zeitkonstanten τ. Daher gilt dieses Diagramm auch für jeden beliebigen *RC*-Wert.

Während des Ladevorgangs ist die Summe von U_R und U_C so hoch wie die angelegte Batteriespannung U_{Bat}. Sollten Sie zu dem von Ihnen gezeichneten Diagramm von U_R auch noch das Diagramm für U_C zeichnen wollen, so brauchen Sie U_C nicht zu messen. Sie können nämlich die Spannung aus folgender Gleichung ausrechnen:

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

Während des Entladevorgangs ist die (+)Spannung am Kondensator so hoch wie die (–)Spannung am Widerstand.

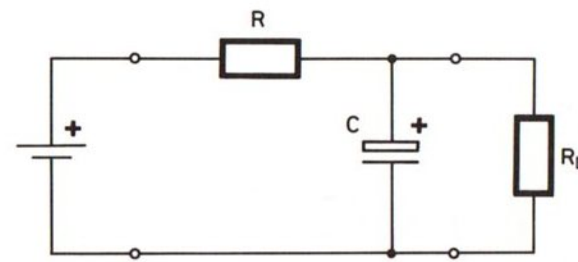
Bild 12.41 zeigt die beiden Spannungskurven zusammen in einem Diagramm. Auch hier erkennen Sie ganz deutlich, daß die Summe $U_R + U_C$ zu jedem Zeitpunkt den Wert von U_{Bat} ergibt. Das heißt: Widerstand und Kondensator bilden zusammen einen Spannungsteiler.

Beim Übergang vom Laden zum Entladen des Kondensators eines RC-Gliedes wechselt die Spannung am Widerstand ihre Polarität, während die Spannung am Kondensator die Polarität beibehält.

12.6.3 Das belastete RC-Glied

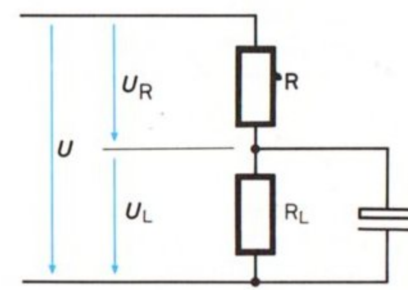
Den Fall, daß parallel zum Widerstand eines *RC*-Gliedes ein anderer Widerstand als „Belastung" geschaltet ist, brauchen wir nicht weiter zu untersuchen. Es verkleinert sich einfach der Wert der Zeitkonstanten des *RC*-Gliedes.

Schaltet man jedoch parallel zum Kondensator einen Widerstand nach Bild 12.42, so sieht die Sache anders aus. Nur wenn der Wert von R_L bedeutend größer als der von R ist, dürfen Sie die Schaltung noch als einfaches *RC*-Glied behandeln. Jedoch schon bei der Anschaltung eines Meßgerätes könnte es Schwierigkeiten geben. Deshalb haben wir ja auch in Abschn. 12.4.2 ein relativ zeitraubendes Verfahren zur Messung von U_C angewandt.



12.42

Für den Fall, daß der Belastungswiderstand nicht vernachlässigt werden darf, betrachten wir die Schaltung 12.42 besser in einer anderen Form nach Bild 12.43. Es ist jetzt leichter zu erkennen, daß wir einen Spannungsteiler aus 2 Widerständen vor uns haben, zu dessen einem Widerstand ein Kondensator parallel geschaltet ist. Sofort nach dem Anschalten des belasteten Spannungsteilers an die Spannungsquelle ist – wie gewohnt – zunächst die Spannung U_C am Kondensator gleich Null, d. h. er wirkt als Kurzschluß. Nach Beendigung des Ladevorgangs wirkt C wie ein unendlich großer Widerstand; er ist sozusagen gar nicht mehr da. Wirksam ist nur die Spannungsteilung an R und R_L. Sie hatten das ja bereits im Vorversuch 12.20 festgestellt, als das Voltmeter parallel zum Kondensator und in Reihe mit dem Widerstand R lag.



12.43

Wie aber verhält es sich jetzt mit der Zeitkonstanten τ? Wird die Aufladung schneller oder langsamer als ohne Belastung des Kondensators mit einem Widerstand vorsichgehen?

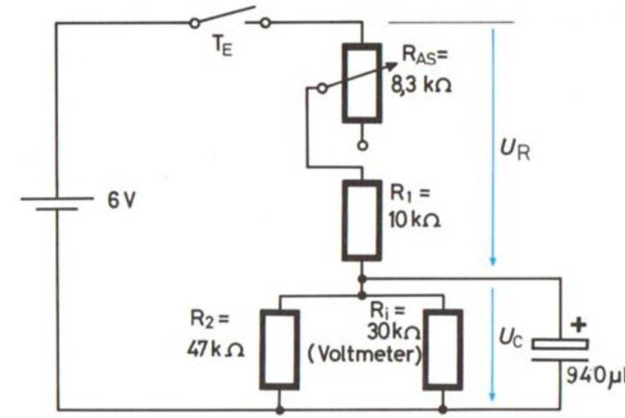
Probieren wirs aus!

Versuch

Bauen Sie bitte die Schaltung nach Bild 12.44 auf. Sie entspricht dem Bild 12.43. Das *RC*-Glied besteht aus dem Widerstand R (Reihenschaltung: R_{AS} = 8,3 kΩ + R_1 = 10 kΩ; $R = R_{AS} + R_1$ = 18,3 kΩ) und der Kapazität C = 940 µF (470 µF ∥ 470 µF). Die Zeitkonstante τ dieses *RC*-Gliedes beträgt $R \cdot C$ = 0,0183 MΩ · 940 µF = 17,2 Sek.

„Belastet" wird das *RC*-Glied durch den Lastwiderstand R_L, der sich durch die Parallelschaltung von R_2 = 47 kΩ und R_i des Voltmeters = 30 kΩ zu 18,3 kΩ ergibt. Die Widerstände R und R_L haben also beide den Wert von 18,3 kΩ. Die Spannungen U_R und $U_L = U_C$ müssen nach Aufladung von C demnach gleich hoch sein: Für U = 6 V ist $U_R = U_C$ = 3 V.

Die Einbeziehung des Voltmeters in den Lastwiderstand hat den Vorteil, daß Sie den Wert von U_C direkt ablesen können; die Messung wird jetzt durch das Meßgerät nicht beeinflußt.



12.44

Legen Sie bitte die Schaltung an die Batteriespannung U, warten ab, bis sich C aufgeladen hat und stellen mit Hilfe des Drehknopfes am Poti den Wert von R_{AS} so ein, daß das Voltmeter genau $^1/_2$ U anzeigt; dann ist $R = R_L$. Danach entladen Sie die Kondensatoren durch Überbrücken mit dem 33-Ω-Widerstand.

Theoretisch müßte die Spannung am Kondensator nach 1 Zeitkonstanten τ = 17,2 Sek. auf 63 % von 3 V = 1,9 V angestiegen sein. Messen Sie bitte die Zeit, die vergeht, bis U_C nach Drücken des Tasters T_E von 0 auf 1,9 Volt angestiegen ist. Führen Sie diese Messung 3mal aus und bilden dann in der gewohnten Weise den Mittelwert. Bestimmen Sie dann die Zeit, die vergeht, bis U_C von 0 auf 3 V angestiegen ist.

Zum Schluß des Versuches messen Sie die Zeit, die vergeht, bis U_C nach Loslassen von T_E von 3 V auf 37 % von 3 V = 1,1 V abgefallen ist. Vergleichen Sie diese Zeit mit der errechneten Zeitkonstanten τ = 17,2 Sek.

Ergebnis

Die Aufladung erfolgt schneller, als nach der vorher errechneten Zeitkonstanten zu erwarten ist. Die Entladung über $R_L = R_2 \parallel R_i$ verläuft jedoch in der durch die Zeitkonstante bestimmten Geschwindigkeit.

Schlußfolgerung

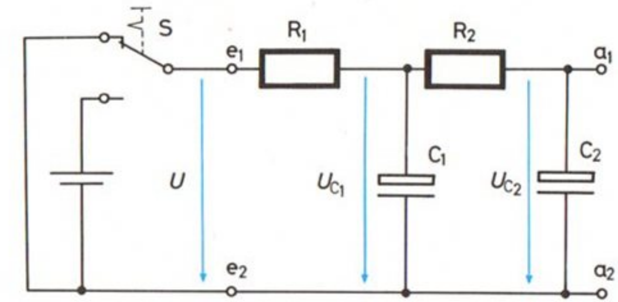
Durch Belastung des Kondensators eines *RC*-Gliedes wird der Aufladevorgang verkürzt, da ja die maximal erreichbare Höhe von U_C vom Spannungsteiler-Verhältnis $R : R_L$ abhängt. Je kleiner der Wert des Lastwiderstandes R_L wird, um so mehr wird die „Wirksamkeit" des Kondensators aufgehoben. (Sie können sich davon überzeugen, wenn Sie für R_2 den Wert von 1 kΩ statt 47 kΩ einsetzen.) Die Schaltung wird zum einfachen Spannungsteiler aus Widerständen.

Wird die Schaltung nach voller Aufladung von C von der Batteriespannung abgetrennt, dann entlädt sich der Kondensator nur über R_L, mit dem er jetzt ja in Reihe liegt. R spielt bei diesem Vorgang überhaupt keine Rolle mehr. Die Geschwindigkeit, mit der die Entladung erfolgt, wird allein von der Zeitkonstanten $\tau = R_L \cdot C$ bestimmt.

12.7 RC-Kaskaden

Schaltet man parallel zum Querglied einer *RC*-Schaltung nochmals ein *RC*-Glied, so erhält man eine *RC*-„Kaskade" nach Bild 12.45 (a). Diese Vierpoldarstellung sagt dasselbe aus wie Bild 12.45 (b).

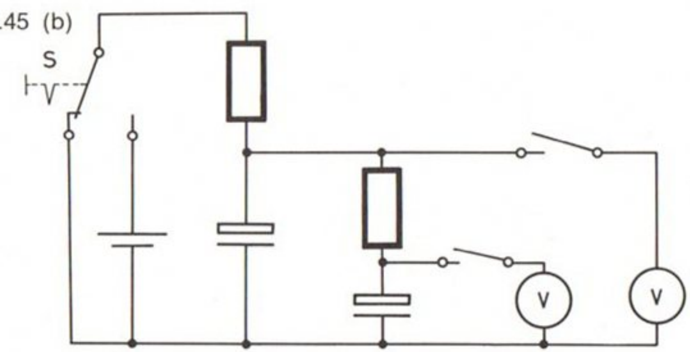
12.45 (a)



1. Versuch

Bauen Sie bitte die Schaltung mit $R_1 = R_2 = 10$ kΩ und $C_1 = C_2 = 470$ µF auf. Als Batteriespannung wählen Sie vielleicht 3 Volt. Ermitteln Sie nach der bewährten Methode durch kurzzeitiges Anschalten des Voltmeters die Zeitkonstante dieser Kaskade oder – noch besser – nehmen Sie das ganze U_{C2}/Zeit-Diagramm auf.

12.45 (b)



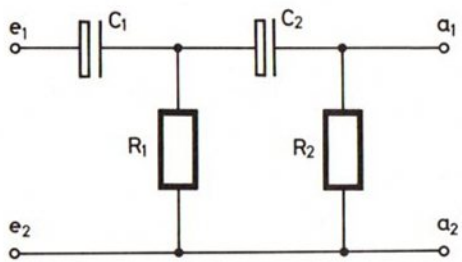
Ergebnis

Die erzielte starke Verlängerung des Aufladeprozesses von C_2 gegenüber einer einfachen *RC*-Schaltung erklärt sich durch das „Kaskadenprinzip". Es muß erst C_1 bis zu einem gewissen Grad aufgeladen sein, damit auch ein merklicher Ladestrom über C_2 fließen kann. Der Kondensator C_2 lädt sich also sozusagen nach einer e-Funktion von einer e-Funktion auf.

Solche Kaskadenschaltungen werden z. B. angewendet, wenn man lange Schaltverzögerungen erreichen will.

Sind beide Kondensatoren voll aufgeladen, dann muß auch bei dieser Schaltung U_{C2} so hoch wie U_{Bat} sein. Dies gilt natürlich nur, wenn die Kaskade nicht durch irgendeinen Widerstand (z. B. durch das fest angeschaltete Voltmeter!) belastet wird.

Wenn Sie für R_1 jedoch das Voltmeter mit $R_i = 30$ kΩ und für R_2 den 47-kΩ-Widerstand in die Schaltung 12.45 (b) einsetzen, dann haben Sie eine „Eieruhr": Es dauert etwa 3 min, bis U_C etwa gleich U_{Bat} geworden ist. Sie erkennen das daran, daß der Zeiger des hier als Strommesser geschalteten Voltmeters auf Null angekommen ist. Sollten Sie vielleicht viel Zeit (und noch Lust dazu) haben, dann können Sie die Kaskade um ein 3. Glied mit dem 47-µF-Kondensator und dem 4,7-kΩ-Widerstand erweitern – die Zeit reicht dann sogar für ein hartes Ei!



12.46

2. Versuch

Welcher der beiden gleich großen Kondensatoren der Schaltung 12.45 (b) wird bei der Entladung durch Umlegen des Schalters S zuerst „leer"? Verfolgen Sie bitte durch kurzes Antippen mit Ihrem Voltmeter die Spannung an C_1 und an C_2.

Welche Änderungen treten ein, wenn die Kapazität von C_1 statt 470 µF nur 47 µF groß ist? Und was geschieht, wenn Sie den 47-µF-Kondensator als C_2 einsetzen?

3. Versuch

Untersuchen Sie jetzt einmal, wie sich die Spannungen an den Bauelementen einer Kaskadenschaltung nach Bild 12.46, also bei Vertauschung von *C* und *R*, beim Ladevorgang verhalten.

Vorsicht! Bitte die Entladung nicht nach Bild 12.45 vornehmen, sondern jeden Kondensator aus der Schaltung entnehmen und für sich kurzschließen. Beim Entladen nach Bild 12.45 würde nämlich der Kondensator C_2 vom Kondensator C_1 aufgeladen, aber mit verkehrter Polung! Und das nehmen Elektrolytkondensatoren ausgesprochen übel! Nur wenn Sie diese Schaltung mit einer kleinen Batteriespannung unter 3 Volt erproben, dürfen Sie die Entladung nach Bild 12.45 vornehmen.

Ergebnis

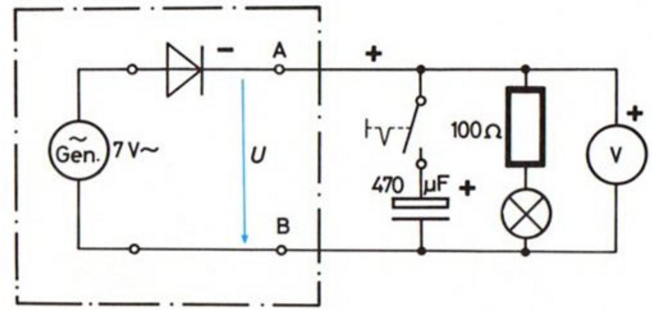
Am Ende des Ladevorgangs ist in der Schaltung 12.46 nur der Kondensator C_1 aufgeladen; der andere Kondensator ist leer! Das gilt jedoch nicht für die Zeit des Ladevorgangs selbst.

12.8 Der Lade- bzw. Glättungskondensator

Im Kapitel 11 haben Sie gesehen, wie man aus einer Wechselspannungsquelle (z. B. dem seitlichen Anschluß des Netzgerätes mot. 4) mit Hilfe einer Diode eine „Gleichspannungsquelle" machen kann.

1. Versuch

Schalten Sie bitte nach Bild 12.47 ein Glühlämpchen (zum Schutz in Reihe mit einem 100-Ω-Widerstand) an eine solche Gleichspannungsquelle. Sie werden eine Spannung von etwa 3 V messen, solange Sie den Kondensator nicht dazuschalten. Das Lämpchen wird schwach leuchten. Schalten Sie aber den Kondensator dazu, so leuchtet das Lämpchen sofort heller und das Voltmeter zeigt etwa 8 V an! Wie ist das möglich? (Obwohl die folgende Erklärung klein gedruckt ist, sollten Sie den Text trotzdem aufmerksam lesen, denn er ist für die folgenden Kapitel ebenso wichtig wie für das „hobby-Labor 2"!)

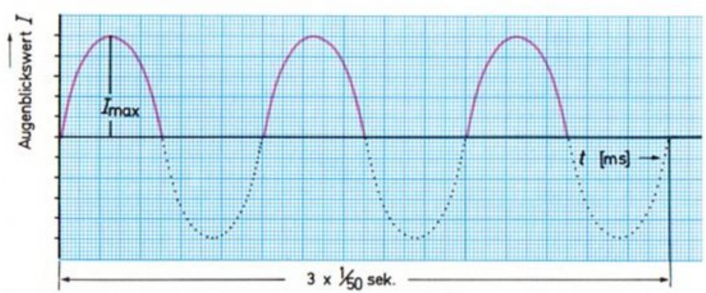


12.47

Bild 12.48 zeigt den zeitlichen Verlauf des Stroms im Stromkreis mit eingebauter Diode, aber noch nicht angeschaltetem Kondensator. In diesem Strom/Zeit-Diagramm ist auf der waagerechten Achse genau wie bei den zuletzt behandelten *RC*-Untersuchungen die Zeit aufgetragen; der Maßstab ist jedoch anders: 1,3 cm ≙ 10 Millisekunden (abgekürzt: ms), also dem hundertsten Teil einer Sekunde. Das Diagramm zeigt, wie sich die Stromstärke während einer Zeitspanne von 60 ms, also innerhalb von 3/50 s ändert. Diese Zeit ist im Vergleich zu den vorher erstellten Strom/Zeit- oder den Spannungs/Zeit-Diagrammen sehr kurz. Jedoch ändert sich dadurch nichts am Prinzip. Neu ist lediglich, daß in diesem Diagramm ein sich ständig wiederholender Vorgang wiedergegeben wird.

Im Beispiel sind 3 „Perioden" bzw. „Zyklen" (sich genau wiederholende Kurvenabschnitte) dargestellt. Als Formelzeichen für eine Periode steht der Buchstabe *T*. Als Frequenz *f* bezeichnet man die Anzahl der Perioden pro Sekunde:
$f = 1/T$ (in Hz = Hertz).

Aus dem Bild 12.48 können Sie entnehmen, daß in unserem Stromkreis mit der Diode nur während der Hälfte der Zeit ein Strom fließt und daß außerdem die Stromstärke während dieser Zeitspanne nicht gleichmäßig groß ist. Sie schwankt zwischen Null und dem Höchstwert I_{max}. (Hätten Sie die Diode nicht in den Stromkreis geschaltet, so würde der Strom in der Pause zwischen zwei „Halbwellen" in der entgegengesetzten Richtung fließen. Die punktierten Linien deuten diesen Sachverhalt an.)



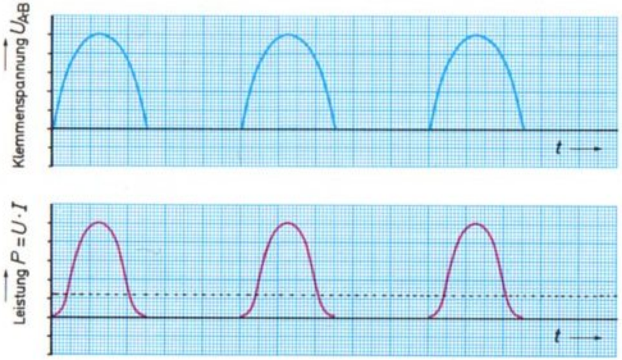
12.48

1 Periode

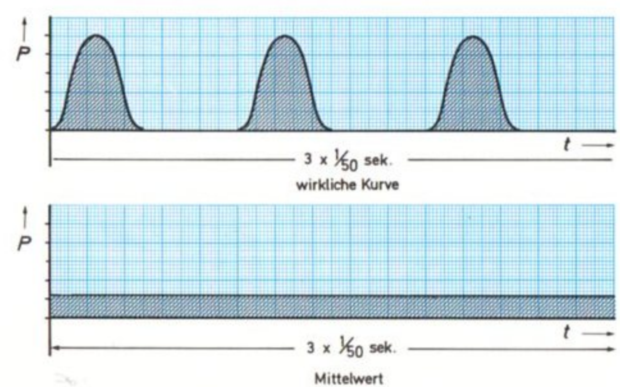
T = 20 ms

Das zum Strom/Zeit-Diagramm gehörende Spannungs/Zeit-Diagramm und das Leistungs/Zeit-Diagramm finden Sie im Bild 12.49. (Nebenbei sei vermerkt, daß diese Diagramme nur gelten, wenn Sie statt der im Schaltbild gezeichneten Glühlampe einen Lastwiderstand verwenden, dessen Wert konstant bleibt. Sie wissen ja, daß unsere Glühlampen ihren Widerstandswert ändern.)

Nach jeder „Halbwelle" – so nennt der Techniker den im Bild 12.48 voll ausgezogenen Teil der Kurve – kommt eine „Pause", in der kein Strom fließt, dann tritt natürlich auch keine Spannung an den Punkten A und B (Bild 12.47) auf, und ebensowenig wird eine Leistung geliefert. Die Pause ist genauso lang wie die Zeit, in der Strom fließt. Interessant für die Berechnung der Leistung, die z. B. in dem angeschlossenen Widerstand in Wärme oder in der Lampe in Licht und Wärme umgewandelt wird, ist der „Mittelwert" von Spannung und Strom.



12.49



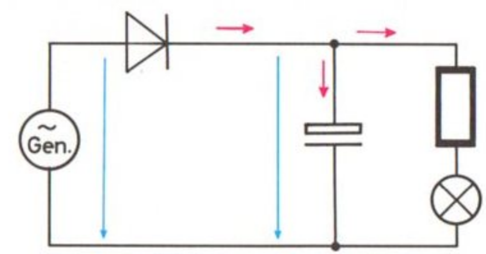
12.50

Im Bild 12.49 ist der Mittelwert für die Leistung punktiert eingezeichnet. Die Fläche zwischen der Stromkurve und der t-Achse und die Fläche zwischen der Mittelwertsgeraden und der t-Achse müssen gleich groß sein. Bild 12.50 zeigt die beiden Flächen in getrennter Darstellung zum Vergleich.

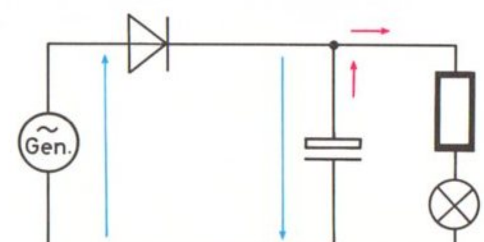
Was bewirkt nun das Anschalten des 470-µF-Kondensators in der Schaltung 12.51? In dem Augenblick, in dem durch die Diode Strom fließen kann (Teilbild [a]), wird von der Quelle zusätzlich zu der Energie für die Lampe auch noch Energie zum Aufladen des Kondensators geliefert. Exakt ausgedrückt: Solange die Spannung am Kondensator kleiner als die Spannung U ist, fließt zusätzlich zum Strom durch die Lampe auch noch ein Ladestrom über die Gleichrichter-Diode.

Kann jedoch kein Strom über die Diode fließen (Teilbild [b]), weil die Wechselspannung gerade die entgegengesetzte Polarität hat, so entlädt sich der vorher aufgeladene Kondensator während dieser „Lieferpause" über die Lampe und gibt seine Energie an sie ab. Der Kondensator wird in dieser Schaltung „Lade"- oder auch „Glättungskondensator" genannt (weil er die Halbwellen sozusagen glättet).

12.51 (a)

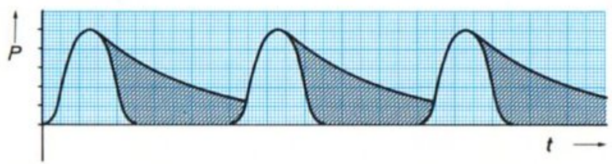


12.51 (b)



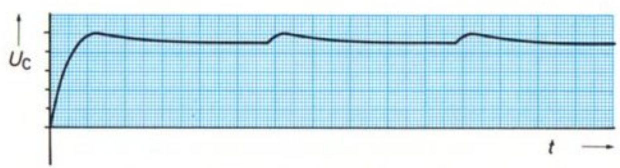
Im Leistungs/Zeit-Diagramm für die Lampe (Bild 12.52) ist diese zusätzliche, vom Kondensator der Lampe zur Verfügung gestellte Leistung schraffiert eingetragen. Der Mittelwert der insgesamt an die Lampe abgegebenen Leistung wird dadurch größer, wie Sie am helleren Leuchten der Lampe festgestellt haben.

Wir interessieren uns aber – nicht nur aus meßtechnischen Gründen – mehr für den zeitlichen Verlauf der Spannung U_C. Die Spannungskurve (Bild 12.53) entspricht ungefähr der Leistungskurve. Ist der Kondensator „groß genug", so sinkt die Spannung zwischen den Spitzen der Halbwelle praktisch kaum ab, wie Sie aus dem Bild 12.54 ersehen können.



12.52

12.53



12.54

Nun müssen wir noch klären, welche Kapazität der Ladekondensator haben muß, damit er – wie wir gerade vereinfacht sagten – „groß genug" ist. Die Antwort kann nur lauten: Das hängt vom Verwendungszweck ab.

Es leuchtet ein, daß es auf die Zeitkonstante des Ladekondensators C und des Lastwiderstandes R_L ankommt, wenn der zeitliche Abstand zwischen zwei Spannungsspitzen gegeben ist. Darf z. B. die Spannung U_C in der Zeit zwischen dem Auftreten zweier Spannungsspitzen auf 37 % des Höchstwertes absinken, so kann τ geringfügig kleiner sein als diese Zeitspanne. In unserem Fall (mit Netzfrequenz 50 Hz und einer Diode) beträgt die Zeit T zwischen zwei Spannungsspitzen 1/50 Sek. = 20 ms.

Darf die Spannung in dieser Zeit aber nur um wenige Prozent absinken, so muß eine entsprechend hohe Zeitkonstante her! Sie wird am zweckmäßigsten durch eine größere Kapazität C erreicht. Deshalb hat z. B. der Kondensator im ft-Gleichrichter-Baustein* von „hobby 4" eine Kapazität von 2200 µF!

Die Erhöhung der gleichgerichteten Spannung durch Anschaltung eines Kondensators ist der Grund, warum für die bisherigen Versuche nicht ein ft-Netzgerät, sondern Batterien verwendet werden sollten. Das Meßgerät hätte sonst stets andere Werte angezeigt.

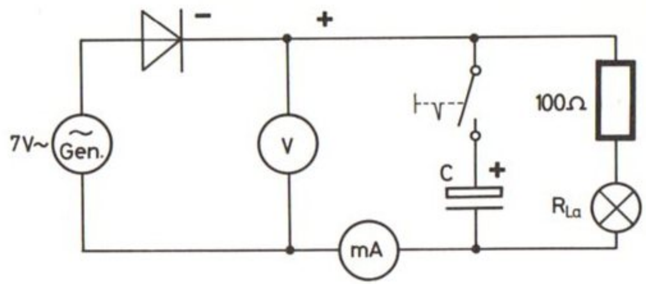
Übrigens: Die im Bild 12.54 erkennbare, noch verbliebene Spannungsschwankung nennt man auch die „Restwelligkeit" einer Gleichspannung. Und weil man diese, von der „Netzfrequenz" (die „Frequenz" ist ein Maß für die Schnelligkeit, mit der die „Perioden" aufeinander folgen) bestimmte Restwelligkeit unter gewissen Bedingungen als „Brummton" hörbar machen kann (im Kap. 14 werden wir das auch einmal tun), nennt man die Restwelligkeit auch „Brummspannung" oder kurz auch den „Netzbrumm". Und was für den „Gilb" bei den Gardinen, das gilt auch für den „Brumm" bei der Gleichspannung: Er muß raus!

Für diesen Zweck wurde der eben erwähnte ft-Gleichrichter-Baustein geschaffen.

Nun wieder zur Praxis!

---

* Sie können den Gleichrichter-Baustein auch einzeln bei Ihrem Spielwaren-Fachhändler erhalten.



12.55

2. Versuch

Messen Sie bitte die Stromstärke und die Spannung der Schaltung 12.55 ohne und mit angeschaltetem Ladekondensator. Benutzen Sie als Ladekondensator 47 – 470 – 940 µF. Bei welcher dieser Kapazitäten wird die Wirkung am größten sein?

Am besten entwerfen Sie eine Tabelle, in die Sie die Meßwerte eintragen und für später festhalten.

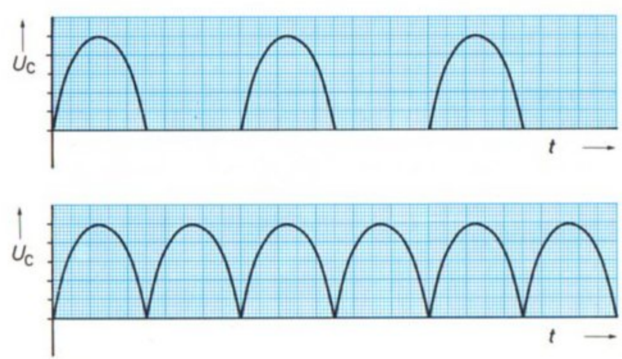
Genügt in dieser Schaltung bereits ein 470-µF-Kondensator für normale Zwecke? Sie können dies bejahen, wenn das Zuschalten des zweiten 470-µF-Kondensators keinen Zuwachs an Helligkeit, Spannung und Stromstärke mehr bringt.

Genügt ein 47-µF-Kondensator, wenn als „Last" nur das Voltmeter (R_i = 30 kΩ) angeschaltet ist?

3. Versuch

Wiederholen Sie nun bitte die Glättungsversuche am Gleichspannungsausgang des Netzgerätes. Sie werden feststellen, daß die Lampe bei Anschalten eines 470-µF-Ladekondensators etwa genauso hell brennt wie beim Anschalten an die Buchsen A-B nach Bild 12.47. Das heißt, daß die Spitzenspannung in beiden Fällen etwa gleich hoch sein muß. Wenn Sie aber die Spannung ohne Ladekondensator messen, so ist sie fast doppelt so hoch wie beim Versuch nach Bild 12.47.

Das liegt daran, daß die Gleichspannung des Netzgerätes nicht mit Hilfe einer einzigen Diode, sondern mit Hilfe von 4 Dioden gewonnen wird. Mit dieser Schaltung wird erreicht, daß die Zwischenräume zwischen zwei Halbwellen ausgefüllt werden. Bild 12.56 zeigt den Effekt der Gleichrichtung mit einer Diode (Einweg-Gleichrichtung) und mit 4 Dioden (Zweiweg-Gleichrichtung). Mit dem „hobby-Labor 2" werden Sie diese Zweiweg-Gleichrichtung selbst ausführen können.

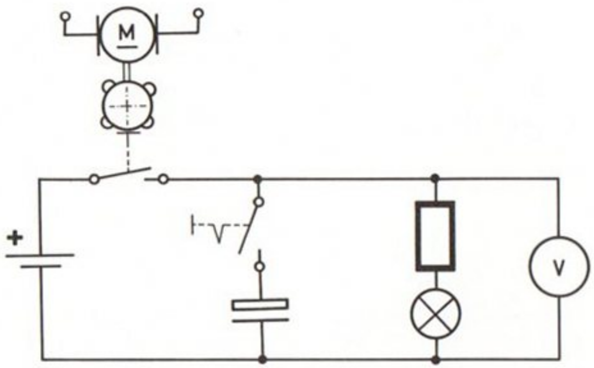


12.56

Verwendet man als Spannungsquelle eine Batterie, so sind die Kondensatoren natürlich überflüssig, denn eine Batterie „liefert" ja eine ideale Gleichspannung.

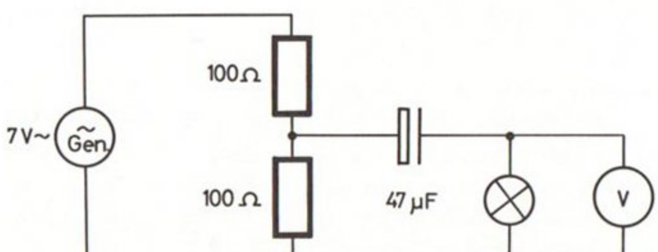
4. Versuch

Wer einen fischertechnik-Motor und Nockenscheiben besitzt, kann sich einen „Motor-Taster“ bauen; wer nur einen ft-Taster zur Verfügung hat, schaltet von Hand nach Bild 12.57 eine Lampe mit Schutzwiderstand ständig ein und aus. Das Voltmeter wird, wenn die Schaltvorgänge schnell vor sich gehen (mindestens 3mal pro Sekunde), annähernd einen Mittelwert anzeigen.



12.57

Durch Zuschalten von Ladekondensatoren kann man – ähnlich wie bei den letzten Versuchen mit gleichgerichteten 50-Hz-Strömen – die Unterbrechung des Stroms praktisch eliminieren.



12.58

12.9 Der Kondensator als Wechselstromwiderstand

Wie wir gesehen haben, wirkt ein Kondensator im Gleichstromkreis zu Beginn der Aufladung wie ein Kurzschluß. Wenn die Aufladung beendet ist, dann wirkt er wie ein unendlich großer Widerstand. Ein solches Verhalten ist schon merkwürdig genug. Ebenso sonderbar ist, daß ein Kondensator den Wechselstrom „passieren“ läßt. Ein Schicht- oder Drahtwiderstand dagegen, kurz alles, was wir bis jetzt als „Widerstand“ bezeichnet haben (außer der Magnetspule), verhält sich im Wechselstromkreis genauso wie im Gleichstromkreis. Um diesen Unterschied zum Ausdruck zu bringen, nennt man alle dem Ohm'schen Gesetz $U = I \cdot R$ gehorchenden Widerstände: „Ohm'sche Widerstände“ (oder auch „Wirkwiderstände“). Beim Kondensator spricht man dagegen von einem „kapazitiven“ Widerstand („Blindwiderstand“), den er im Wechselstromkreis besitzt.

Wir können aber hier nicht weiter darauf eingehen, sondern wollen uns anhand von 2 Versuchen von der Tatsache der Wechselstromdurchlässigkeit des Kondensators überzeugen. Das ist allerdings nur möglich, wenn Sie das „ft-Netzgerät mot 4“ besitzen.

1. Versuch

Bauen Sie bitte die Schaltung 12.58 auf. (Da man an die üblichen Elektrolytkondensatoren im Dauerbetrieb nur eine Wechselspannung anlegen darf, die wesentlich kleiner ist als die zulässige Betriebsgleichspannung, arbeiten wir mit einem Spannungsteiler von 2mal 100 Ω.) Auf die Polung des Kondensators brauchen Sie diesmal nicht zu achten, da er ja an eine Wechselspannung geschaltet wird.

Ergebnis

Das Lämpchen leuchtet schwach, obwohl das Voltmeter nichts anzeigt! Also muß der Kondensator „irgendwie“ Strom durchlassen. Sie können auch sagen: Der 47-µF-Kondensator und die Lampe bilden einen Spannungsteiler.

2. *Versuch*

Ersetzen Sie nun den 47-µF-Kondensator durch den 470-µF-Kondensator. Jetzt leuchtet das Lämpchen geringfügig heller.

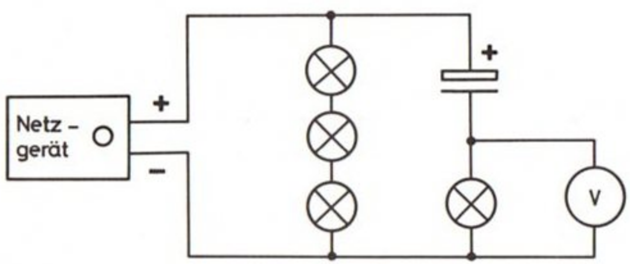
Schlußfolgerung

Das ist ein Zeichen, daß der Wechselstromwiderstand des 47-µF-Kondensators größer ist als der des 470-µF-Kondensators. Wenn Sie den 470-µF-Kondensator durch ein Kabel überbrücken, ändert sich die Helligkeit des Lämpchens nicht. Sie können daraus schließen, daß der Wert des Wechselstromwiderstandes des 470-µF-Kondensators bedeutend kleiner als der der Lampe ist.

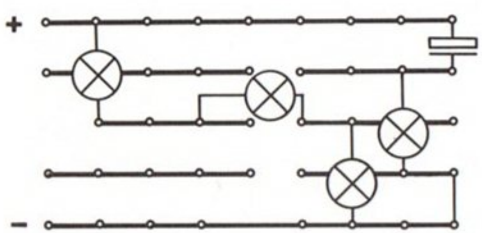
Wer mit dem Wechselstrom schon etwas Bescheid weiß, der kann sich mit der Formel:

$$X_C = \frac{1}{2\,\pi \cdot f \cdot C}\ (\Omega)$$

den Wechselstromwiderstand der Kapazität ausrechnen. Für f ist die Frequenz in Hertz zu setzen; die Größe der Kapazität muß in Farad eingesetzt werden; π ist gleich 3,14. Der 470-µF-Kondensator hat 0,00047 F. Sie können errechnen, daß sich bei 50 Hz ein Widerstandswert für Wechselstrom von etwa 7 Ω ergibt.



12.59



12.60

3. *Versuch*

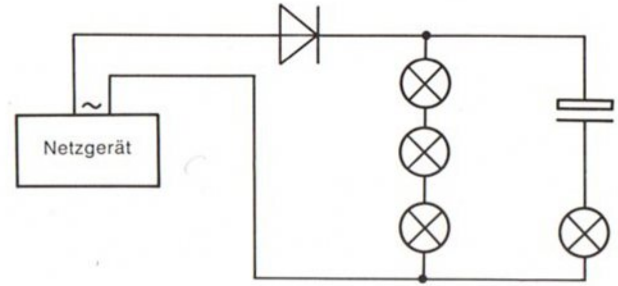
Bauen Sie bitte die Schaltung nach Bild 12.59 und Steckbild 12.60 auf und schalten Sie diese an den G l e i c h spannungsausgang des Netzgerätes.

Ergebnis

Überraschenderweise brennt auch das Lämpchen „hinter" dem Kondensator! Da dies keine Zauberei ist, muß das Netzgerät neben dem Gleichstrom auch noch Wechselstrom liefern. Aus dem Vergleich der Lampenhelligkeiten können Sie ganz grob schätzen, daß die Wechselspannung an der Lampe vielleicht 1/4 so hoch ist wie die Gleichspannung am Netzgerät.

4. Versuch

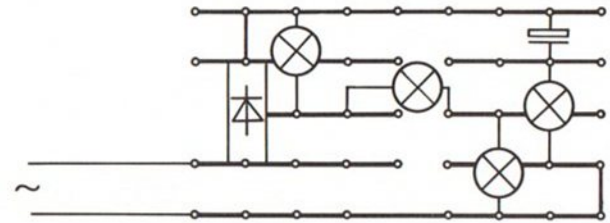
Nun untersuchen wir, ob diese Erscheinung bei Einweg-Gleichrichtung genauso auftritt wie bei Zweiweg-Gleichrichtung. Letztere haben wir beim vorigen Versuch bereits erprobt; sie ist ja in das Netzgerät eingebaut. Zur Einweg-Gleichrichtung bauen Sie die Schaltung nach Bild 12.61 und Steckbild 12.62 auf.



12.61

Ergebnis

Das Lämpchen „hinter" dem Kondensator, das nur vom Wechselstrom durchflossen wird, brennt jetzt sogar etwas heller als jedes der drei anderen! Der Wechselspannungsanteil (und damit auch der Wechselstromanteil) ist bei der Einweg-Gleichrichtung also wesentlich höher als bei der Zweiweg-Gleichrichtung. Sie können ihn auf Grund der Helligkeit der Lampen auf über 30% schätzen.



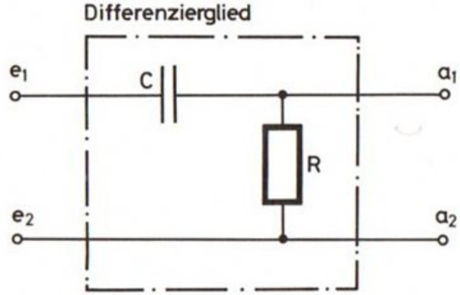
12.62

Schlußfolgerung

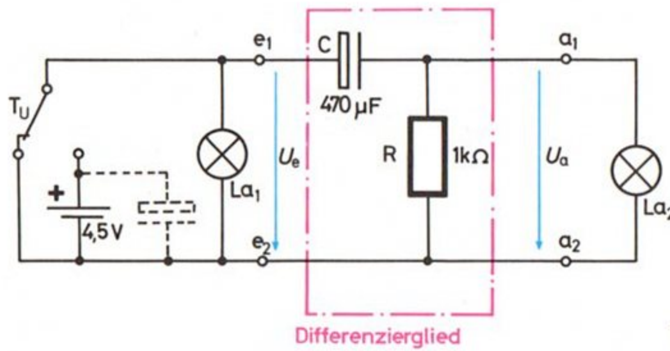
Der Kondensator C_1 wirkt in dieser und in der Schaltung 12.59 wie eine „Stromweiche": Für den Gleichstromanteil stellt er einen sehr hohen Widerstand dar, so daß dieser lieber durch den linken Stromzweig fließt. Der Wechselstromanteil geht jedoch lieber durch den rechten Zweig, da der Kondensator für ihn praktisch keinen Widerstand darstellt und die eine Lampe in diesem Zweig nur 1/3 des Widerstandswertes von den drei in Reihe geschalteten Lampen des linken Zweiges hat.

Nun, Sie wissen ja, wie man dem „Brumm" den Garaus macht. Legen Sie Ihren zweiten 470-μF-Kondensator parallel zur Energiequelle – und schon ist der Spuk vorbei. (Bei der Einweg-Gleichrichtung müssen Sie den Kondensator natürlich „hinter" der Diode anschalten.)

Man kann den gleichgerichteten, aber noch nicht geglätteten Wechselstrom auch als eine Art Mischung aus Gleich- und Wechselstrom auffassen. Der Fachmann spricht von einem „Wechselstromanteil" (das ist die „Brummspannung"), den der gleichgerichtete Strom noch hat. Bei Zweiweg-Gleichrichtung ist er kleiner als bei Einweg-Gleichrichtung. Daß der „Brumm" eine echte Wechselspannung ist, erkennen Sie auch daran, daß Ihr Voltmeter nichts anzeigt, obwohl die Lampe leuchtet. Es würde aber zu weit führen, wenn wir näher auf dieses Thema eingehen wollten.



12.63



12.64

12.10 Das Differenzierglied

Eine Vierpolschaltung nach Bild 12.63 kennen Sie schon. Es ist ein *RC*-Glied mit dem Eingang $e_1 - e_2$ und dem Ausgang $a_1 - a_2$. Jetzt wollen wir diesen Vierpol in einer speziellen Eigenschaft untersuchen. Wir verwenden ihn als „Differenzierglied".

Der Begriff „differenzieren" wurde von der höheren Mathematik übernommen, nämlich von der Differentialrechnung. Das soll uns aber nicht weiter kümmern; es genügt, wenn wir dem allgemeinen Sprachgebrauch folgen und unter „differenzieren" soviel wie „auseinander halten", „trennen", „unterscheiden" verstehen.

1. Versuch

Bauen Sie bitte die Schaltung 12.64 auf. Statt der 4,5-V-Batterie können Sie auch das Netzgerät benutzen; jedoch muß dann ein Glättungskondensator von 470 μF angeschaltet werden. Im Schaltbild ist er gestrichelt eingezeichnet. Zur Schonung der Lampen sollten Sie die kleinste einstellbare Spannung benutzen. Mit dem Taster T_u kann wahlweise eine Batterie angeschaltet oder der Eingang kurzgeschlossen werden. Das Lämpchen La_1 zeigt die Schalterstellung von T_u an. An den Ausgang ist als Abschluß das Lämpchen La_2 geschaltet. Wie verhalten sich La_1 und La_2 beim Betätigen des Tasters und was geschieht, wenn sie den 1-kΩ-Widerstand aus der Schaltung herausnehmen?

Ergebnis

Solange der Taster T_u gedrückt wird, leuchtet das Lämpchen La_1. Das Lämpchen La_2 blitzt jedoch nur kurzzeitig beim Niederdrücken des Tasters („eintasten") und beim Loslassen des Tasters („austasten") auf.

In dieser Schaltung kann der 1-kΩ-Widerstand entfernt werden, da das Geschehen im Stromkreis nur von dem Lampenwiderstand (etwa 100 Ω) und nicht von dem 1-kΩ-Widerstand bestimmt wird (siehe Kap. 9.2!).

Warum das Lämpchen La_2 nur im Augenblick des Ein- und des Ausschaltens aufleuchtet, ist Ihnen ja auf Grund der Versuche mit *RC*-Gliedern klar. Daß eine Vergrößerung von *C* oder *R* die Zeitdauer des Lade- und des Entladevorgangs beeinflußt, ist Ihnen auch schon bekannt. Ersetzen Sie bitte den 470-µF-Kondensator durch einen mit der Kapazität von 47 µF. Probieren Sie auch die Parallelschaltung der beiden 470-µF-Kondensatoren. Wird sich dadurch die Helligkeit der Lampe La_1 ändern? Und wie ist es mit dem Aufblitzen der Lampe La_2? Überzeugen Sie sich, daß Ihre Annahme richtig ist.

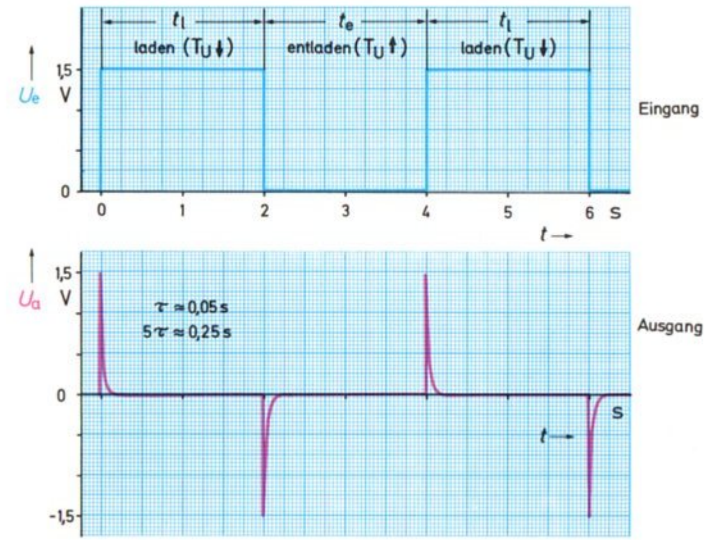
Das „Differenzieren“ besteht also darin, daß sich eine Änderung des Zustandes am Eingang der Schaltung am Ausgang wie ein kurzer Impuls auswirkt. Sieht man von der Anzeige durch das Lämpchen ab, kann man sogar aus der Stromrichtung und der Polarität der Ausgangsspannung erkennen, ob am Eingang gerade ein- oder gerade ausgeschaltet worden ist. Auf diese Weise hat man also aus einem Dauersignal, z. B. dem Signal: „eingeschaltet“ oder dem Signal „ausgeschaltet“ ein „Impulssignal“ gewonnen.

Wozu braucht man nun ein solches Differenzierglied? Überall dort, wo es nicht auf den Schaltungszustand selbst ankommt, sondern wo die Ä n d e r u n g eines Schaltungszustandes angezeigt werden soll. Dabei ist es gleichgültig, ob dieser Impuls am Ausgang des Differenziergliedes nur zum Aufleuchten eines Lämpchens führt oder ob er in irgendeiner angeschlossenen Schaltung weiter verarbeitet wird.

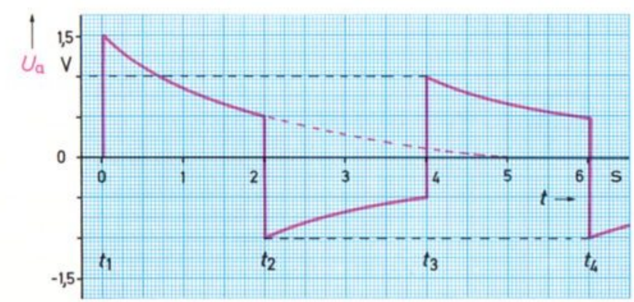
Die Form des Impulses am Ausgang des Differenziergliedes wird durch die Werte des Kondensators und des Widerstandes des *RC*-Gliedes bestimmt. (Allenfalls muß der an den Ausgang angeschlossene Widerstand dem querliegenden Widerstand des *RC*-Gliedes hinzugerechnet werden.) Ist die Zeitkonstante des *RC*-Gliedes klein, ist der Impuls kurz; ist die Zeitkonstante dagegen lang, so wird auch der Impuls nur langsam abklingen. Nehmen Sie das Lämpchen La_2 aus der Schaltung 12.64 heraus und setzen Sie für *R* die Werte von 1 kΩ – 10 kΩ – 30 kΩ (Voltmeter) ein. Überzeugen Sie sich durch Beobachtungen der Spannungsänderung am Ausgang, daß der Impuls verschieden lang „abklingt“.

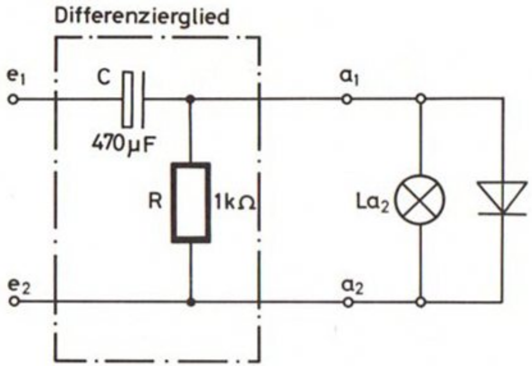
Durch vorzeitiges Loslassen des Tasters T_U können Sie bei einem großen Wert der Zeitkonstanten das Ausgangssignal „abkürzen“. Ist die Zeitkonstante des *RC*-Gliedes jedoch klein genug, so wird Ihnen dies nicht gelingen. In diesem Fall sind die Impulse kürzer als die Zeit zwischen zwei Betätigungen (Drücken) des Tasters. Aus dem Bild 12.65 können Sie entnehmen, wie sich die Betätigung des Eingangstasters am Ausgang des Differenziergliedes mit sehr kleinem τ auswirkt. Das Bild 12.66 dagegen gilt für ein Differenzierglied mit großer Zeitkonstante.

12.65



12.66





12.67

2. Versuch

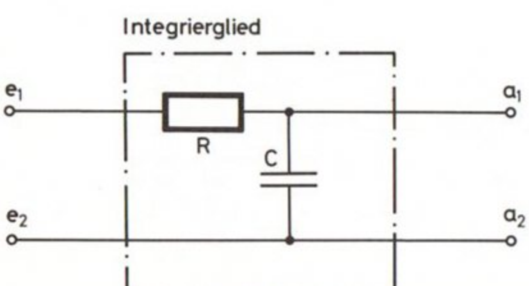
Schalten Sie bitte in der Schaltung nach Bild 12.64 parallel zur Lampe La2 eine Diode. Je nach deren Polung wird entweder nur das Drücken oder das Loslassen des Tasters am Ausgang wirksam. Wählen Sie bitte die Polung der Diode zunächst so, daß nur das Niederdrücken des Tasters am Eingang (= Batterie anschalten) am Ausgang des Differenziergliedes zu einem Impuls führt. Ist die Schaltung 12.67 für diese Aufgabe richtig ausgelegt?

12.11 Das Integrierglied

Werden *R* und *C* eines Differenziergliedes gegeneinander vertauscht, so daß jetzt der Widerstand „längs" liegt, dann wird ein solches *RC*-Glied (Bild 12.68) als „Integrierglied" bezeichnet. Die Ausgangsspannung U_a wird am Kondensator abgenommen: U_a ist also beim Integrierglied gleich U_C.

Der Begriff „Integrier"glied kommt von der „Integralrechnung". Das ist ebenso wie die Differentialrechnung höhere Mathematik, auf die wir hier nicht eingehen wollen. Uns genügt, wenn wir dem allgemeinen Sprachgebrauch folgen, nach dem „integrieren" soviel bedeutet wie „angleichen" oder „zusammenfassen".

Den Spannungsverlauf am Kondensator und sein Zustandekommen haben Sie ja schon gründlich studiert. Jetzt wollen wir aber untersuchen, was am Ausgang a1 – a2 eines Integriergliedes geschieht, wenn man mehrmals hintereinander kurze Spannungsimpulse – z. B. durch kurzes Anschalten an eine Batterie – an den Eingang e1 – e2 gibt (Eingangsimpulse).

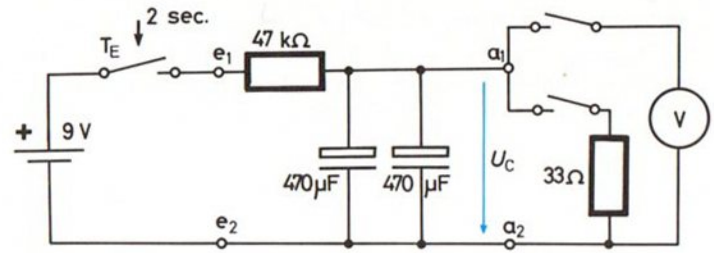


12.68

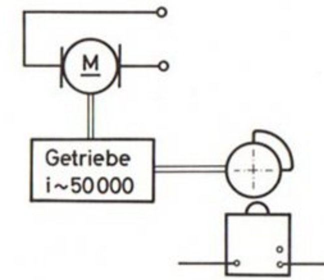
12.11.1 Das unbelastete Integrierglied

Zunächst wollen wir sehen, wie sich ein solches *RC*-Glied verhält, wenn kein Verbraucher (oder aber ein Verbraucher mit außerordentlich hohem Widerstandswert) am Ausgang angeschaltet ist. Sie dürfen also Ihr Meßgerät, dessen Innenwiderstand den relativ niedrigen Wert von 30 kΩ hat, während des folgenden Versuches nicht angeschaltet lassen: Der Kondensator würde sich immer dann, wenn die Batterie vorübergehend abgetrennt wird, (d. h. während jeder „Impulspause") über das Voltmeter geringfügig entladen und damit das Ergebnis verfälschen. Außerdem würde $U_C = U_a$ nur einen bestimmten Wert von U_{Cmax} erreichen, da R und R_i in dieser Schaltung einen Spannungsteiler miteinander bilden würden.

Wir wollen jetzt nachprüfen, wie sich der Anstieg von U_a in Abhängigkeit von verschiedenartigen Eingangsimpulsen verhält.



12.69



12.70

1. Versuch (Eichung des Integriergliedes)

Bauen Sie bitte die Schaltung nach Bild 12.69 auf. Prüfen Sie zunächst in der gewohnten Weise, wie hoch die Spannung am Ausgang höchstens ansteigen kann. Nach Entladung des Kondensators über einen 33-Ω-Widerstand beginnt der eigentliche Versuch.

Drücken Sie den Taster T_E jedesmal z. B. 2 Sekunden lang.

(Mit Hilfe von fischertechnik-Baukästen können Sie diese Tastung nach Bild 12.70 automatisch vornehmen.) Es kommt weder bei der Handbetätigung noch bei dem automatischen Zeitgeber darauf an, daß die Einschaltzeit gerade 2 Sekunden beträgt. W i c h t i g ist lediglich, daß die in beliebigen Abständen aufeinander folgenden Tastimpulse möglichst genau gleich lang sind.

Messen Sie bitte nach je zwei Tastimpulsen ganz kurz die Spannung am Kondensator und tragen Sie die gefundenen Werte in die Tabellen 12.71 ein. Wiederholen Sie die Tastimpulse so lange, bis die Spannung U_C etwa halb so hoch ist wie die vorher ermittelte maximale Spannung U_{Cmax}.

12.71

$U_{Cmax} = \ldots$ V

Zahl der Tastimpulse:	2	4	6	8	10
U_c in V:					
Zahl der Tastimpulse:	12	14	16	18	20
U_c in V:					
Zahl der Tastimpulse:	22	24	26	28	30
U_c in V:					

Zeichnen Sie nun in das Koordinatennetz 12.72 die Spannung U_C in Abhängigkeit von der Anzahl der 2-Sekunden-Impulse ein. Dieses Diagramm verwenden wir für den nächsten Versuch als Eichdiagramm. Deshalb sollten Sie diese Messungen unbedingt durchführen!

2. Versuch

„Löschen" Sie bitte durch Kurzschließen der beiden Kondensatoren über den 33-Ω-Widerstand das vorher bei der Eichung des Integriergliedes gefundene „Ergebnis". Jetzt geben Sie beliebig viele (jedoch nicht mehr als beim ersten Versuch) 2-Sekunden-Tastimpulse an den Eingang des Integriergliedes.

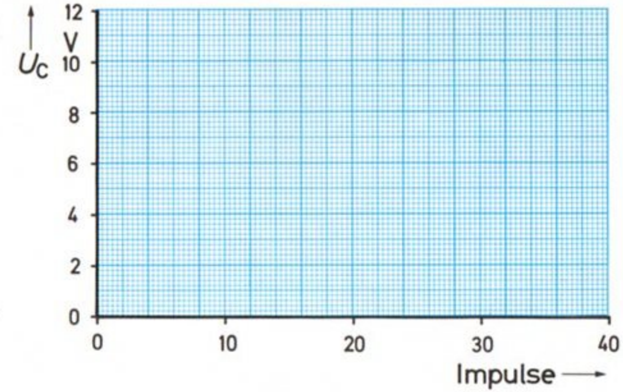
Es ist gleichgültig, wie lang die Pausen zwischen den einzelnen Impulsen sind. Da Sie jedoch keine speziell für solche Zwecke gebauten Kondensatortypen benutzen, sollte wegen der geringfügigen „Selbstentladung" der Elektrolytkondensatoren die zwischen Beginn und Ende des Versuchs liegende Zeitspanne nicht allzu groß sein. Wichtig ist, daß die Impulsdauer genau so lang wie bei der Eichung ist (z. B. 2 Sekunden).

Nach Beendigung der Impulseingabe messen Sie die Spannung U_C. Aus der Eichkurve können Sie nun für diese Spannung die Anzahl der gegebenen 2-Sekunden-Impulse entnehmen.

Der Meßfehler, d. h. die Differenz zwischen der ermittelten Impulszahl und der von Ihnen wirklich eingegebenen Impulse – gleiche Impulslänge bei der Eichung und bei dem jetzigen Versuch vorausgesetzt – dürfte nicht über 10 % liegen.

„Löschen" Sie bitte das Ergebnis wie vorher durch Überbrücken der Kondensatoren und wiederholen Sie diese Versuche mit anderen Impulszahlen.

12.72



3. Versuch

Nach Löschung des letzten Ergebnisses geben Sie doppelt oder halb so lange Impulse an den Eingang wie vorher. Sie sollten also etwa 4 oder 1 Sekunde Dauer haben. Die Ermittlung der gegebenen Impulse dürfte leicht sein; Sie müssen nur die aus dem Eichdiagramm ermittelte Impulszahl durch 2 dividieren oder mit 2 multiplizieren. Die gegebenen Impulse hatten ja eine doppelt oder halb so lange Impulsdauer wie vorher.

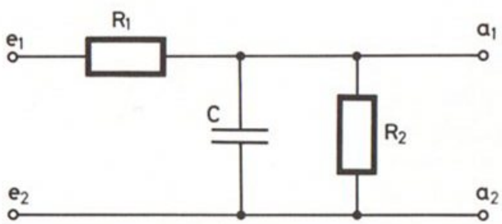
Wiederholen Sie diesen Versuch mit Impulsen von längerer oder kürzerer, aber auf alle Fälle stets gleichbleibender und bekannter Impulsdauer. Sie werden nach entsprechender Umrechnung aus dem Diagramm die wirklich gegebene Impulszahl stets annähernd ermitteln können.

12.11.2 Das belastete Integrierglied

Die bisher erprobten Schaltungen hatten den Nachteil, daß der Kondensator nach einer bestimmten Anzahl von Impulsen auf alle Fälle „voll" ist. Weitere nachfolgende Impulse werden nicht mehr erfaßt. Aus Gründen der Genauigkeit sollte man zu zählen aufhören, wenn U_C etwa so hoch wie die halbe Batteriespannung geworden ist. Der Grund dafür wird Ihnen klar, wenn Sie noch einmal das Diagramm im Bild 12.25 betrachten: Nur in der ersten „Halbzeit" steigt die Kurve ungefähr proportional zur Spannung an.

Versuch

In der Schaltung 12.73 wird der Kondensator während jeder Impulspause am Eingang über den Widerstand R_2 etwas entladen.



12.73

Geht die Entladung langsamer vor sich als die durch die Tastimpulse bewirkte Aufladung, dann kann man viel mehr Impulse zählen als mit den vorher erprobten Schaltungen. Der Nachteil: Dauert die Pause zwischen zwei Impulsen zu lang, so ist der Kondensator vollständig entladen. Das Integrierglied hat in diesem Fall sein „Gedächtnis" verloren und beginnt, mit dem nächsten Impuls wieder von Null an zu zählen. Deshalb eignen sich solche Zählschaltungen nur für Anwendungen mit annähernd gleichbleibender Impulsfolge bei einer günstigen „Einstellung" der Zeitkonstanten (z. B. für die Drehzahlmessung).

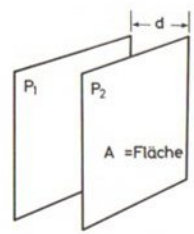
12.12 Der Aufbau von Kondensatoren

12.12.1 Die Kapazität als Eigenschaft des Bauelements

Wir haben die Kapazität C eines Kondensators bisher sozusagen immer als feststehende „elektrische Größe" betrachtet. Nun wollen wir aber zum Schluß dieses Kapitels noch den Zusammenhang zwischen der Kapazität und den Abmessungen sowie den Eigenschaften des Materials, aus dem der Kondensator besteht, betrachten. Diesen Zusammenhang beschreibt die Formel:

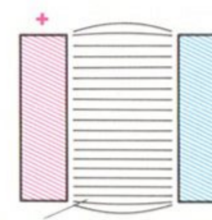
$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d}$$

Die Größe „ε" (griech. Kleinbuchstabe „epsilon") wird im nächsten Abschnitt kurz erläutert. Was unter den Größen A und d zu verstehen ist, geht aus Bild 12.74, unserem alten „Modell", hervor.



12.74

12.75



Daß die Kapazität proportional der Fläche der Kondensatorplatten sein muß, haben wir schon gesehen. Das ist der Grund dafür, daß der 470-µF-Kondensator auch rein äußerlich größer ist als der 47-µF-Kondensator. Neu für uns ist, daß auch der Plattenabstand d eine Rolle spielt – und zwar ist die Kapazität um so größer, je näher die Platten zusammenstehen, d. h. je kleiner der Wert von d ist.

Das kommt daher, daß zwischen den Platten eines aufgeladenen Kondensators „Kräfte" wirksam sind, die sich aus der Anziehung ungleichnamiger elektrischer Ladungen ergeben. Im Bild 12.75 sind diese Anziehungskräfte durch sogenannte „Kraftlinien“ symbolisch dargestellt. Der Fachmann spricht von einem „elektrischen Feld“, das sich zwischen den Platten eines geladenen Kodensators „ausbildet“ oder „aufbaut“.

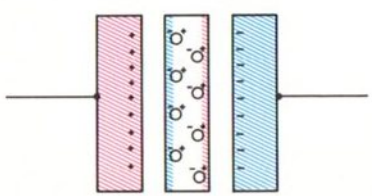
Je kleiner nun der Plattenabstand d ist, um so stärker ist die „Feldwirkung“, und um so mehr Elektronen können auf die negative Platte „gezogen“ werden. Das bedeutet also: Je kleiner der Plattenabstand, um so größer die Kapazität eines Kondensators.

12.12.2 Das Dielektrikum

Bleibt noch die Größe „ε“. Man nennt sie „Dielektrizitätskonstante“. Sie bezeichnet eine höchst merkwürdige Eigenschaft von bestimmten „Isolierstoffen“, die man zwischen die Kondensatorplatten bringt, um die Kapazität des Kondensators zu erhöhen. Einen solchen Isolierstoff nennt der Fachmann „Dielektrikum“ (= Stoff ohne merkliche elektrische Leitfähigkeit).

Zunächst hat das Dielektrikum die Aufgabe, die Kondensatorflächen elektrisch von einander zu trennen, auch wenn man sie stark zusammenpreßt. Wir haben ja schon festgestellt, daß die Kapazität um so größer wird, je geringer der Abstand zwischen den Kondensatorflächen wird.

Es kommt aber noch ein Effekt hinzu: Wird nämlich ein geeignetes Dielektrikum der Wirkung eines elektrischen Feldes ausgesetzt, dann reagieren die „Moleküle“ des Dielektrikums so, wie es Bild 12.76 ganz grob schematisch darstellt: Sie drehen ihre „Minus-Seite“ zur positiven, bzw. ihre „Plus-Seite“ zur negativen Kondensatorplatte hin. Der Fachmann sagt, jedes dieser Moleküle sei ein „Dipol“, also „ein Ding mit 2 Polen“.



12.76

Durch diese „Orientierung“ der Moleküle erhält ein Kondensator mit einem guten Dielektrikum ein größeres Fassungsvermögen, d. h. eine größere Kapazität, da die Dipole eine zusätzliche Anziehungs- bzw. Abstoßungskraft auf die Elektronen ausüben.

Wir wollen hier nicht weiter auf diese an sich hochinteressanten physikalischen Vorgänge eingehen. Es sei nur noch vermerkt, daß man die für ein bestimmtes Material typische „Dielektrizitätskonstante“ als Vergleichszahl zu der Dielektrizitätskonstanten von Luft angibt.

12.12.3 Die Spannungsfestigkeit

Die sogenannte „Spannungsfestigkeit“ ist genau so wichtig, wie die Angabe der Kapazität. Sie gibt an, wie hoch die an einen Kondensator gelegte Spannung sein darf, ohne daß er beschädigt wird.

Wird nämlich der „Elektronendruck“ auf den Kondensatorflächen zu groß, dann „durchschlagen“ die Elektronen das Dielektrikum – es gibt einen „Funken“ (der Fachmann spricht von einem „Durchschlag“), der die Kondensatorflächen und auch das Dielektrikum zerstören kann. Dabei „knallt“ es recht vernehmlich – und der Kondensator war einmal ein solcher gewesen!

Die Spannungsfestigkeit ist bei unseren Kondensatoren mit 16 V für den 470-µF- und mit 25 V für den 47-µF-Kondensator angegeben. So hohe Spannungen kommen in unserem hobby-Labor nicht vor; wir brauchen deshalb nicht weiter darauf zu achten.

12.12.4 Kondensatortypen

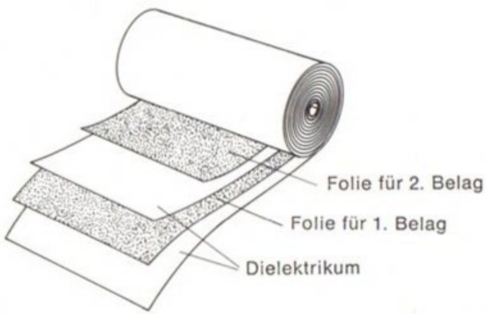
Davon gibt es eine große Zahl, weil Kondensatoren für die verschiedensten Zwecke und in den unterschiedlichsten Größen eingesetzt werden. Wir wollen uns Einzelheiten ersparen und nur ganz kurz und schematisch die wichtigsten Typenarten besprechen.

Keramikkondensatoren

Das Dielektrikum besteht aus Spezialkeramikmassen, auf die von beiden Seiten die als Kondensator wirkenden „Metallbeläge" aufgebracht werden. Man stellt sie mit Kapazitäten von einigen Picofarad bis zu einigen Nanofarad her.

Wickelkondensatoren

Das Aufbauprinzip dieses Kondensatortyps zeigt Bild 12.77. Durch die „Wickelei" erzielt man große Kondensatorflächen und damit auch größere Kapazitäten.



12.77

Das Dielektrikum kann aus hauchdünnen Folien bestehen, so daß der Abstand der Kondensatorbeläge außerordentlich klein wird, was ja ebenfalls zur Vergrößerung der Kapazität beiträgt. In diese Gruppe gehören auch Metallpapier-Kondensatoren. Nach dieser Methode werden die meisten Kondensatoren von 1 nF bis zu einigen µF hergestellt.

Elektrolytkondensatoren

Auch diesen, für uns sehr wichtigen Kondensatortyp gibt es in vielerlei Varianten. Allerdings gibt es heute keine Kondensatoren mit einem wirklich flüssigen Elektrolyten mehr.

Aluminium-Elektrolytkondensatoren

Diese Kondensatoren werden heute ebenfalls „gewickelt". Der eine „Kondensatorbelag" besteht aus einer sehr dünnen Alu-Folie. Der andere „Belag" wird durch ein saugfähiges Material dargestellt, das mit der Elektrolytflüssigkeit getränkt ist.

„Und wo bleibt das Dielektrikum?", werden Sie fragen.

Das ist der große Trick beim „Elko": Wird die (+)Elektrode (bei unseren Kondensatoren das lange „Bein") an (+)Potential und die (–)Elektrode an (–)Potential gelegt, dann bildet sich auf der Alu-Folie eine hauchdünne, aber sehr stabile Oxidschicht, die gute dielektrische Eigenschaften besitzt. (Diesen Vorgang nennt man „Formieren". Die Formierung nimmt bereits der Hersteller vor.)

Das ist der Grund, warum Elkos „gepolt" sind und immer polrichtig angeschlossen werden müssen.

Werden sie nämlich falsch gepolt, dann wird die Oxidschicht abgebaut und es fließt ein sehr starker Kurzschlußstrom, der den Kondensator unweigerlich zerstört. (Bei großen Elkos kann auch Gasbildung auftreten, die den Elko auseinandertreibt.) Bei Spannungen bis höchstens 3 V kann eine Falschpolung allerdings noch vertragen werden. Was darüber ist, ist vom Übel.

Elkos können wegen der extrem dünnen, als Dielektrikum wirkenden Oxidschicht Kapazitäten bis zu vielen Tausend µF aufweisen; trotzdem können die Abmessungen der Bauelemente verhältnismäßig klein gehalten werden. Man setzt sie hauptsächlich als Glättungskondensatoren ein. Aber auch in „Zeitgliedern", wo es auf sehr große Zeitkonstanten ankommt, finden sie Verwendung.

Nachteil aller Elkos: Es besteht die Gefahr des „Alterns", das durch Eintrocknen oder Veränderung des Elektrolyten bewirkt wird. Es kann durchaus vorkommen, daß sich die Kapazitätswerte eines Elkos mit der Zeit derart verändern, daß die Schaltung nicht mehr funktioniert. Im Neuzustand darf die wirkliche Kapazität vom aufgedruckten Sollwert um höchstens + 30 % nach oben und um – 10 % nach unten schwanken.

Nachteilig ist auch, daß die Oxidschicht kein sehr „idealer" Isolator ist. Daher findet nach dem Abtrennen der Spannungsquelle eine Art Selbstentladung statt, weil Elektronen durch die Oxidschicht hindurchwandern können. Sie können diesen Sachverhalt nachprüfen, wenn Sie einen Ihrer Elkos aufladen, 1 oder 2 Stunden stehen lassen und dann die noch anstehende Spannung kurz nachmessen.

Es gibt auch „ungepolte" („bipolare") Elektrolyt-Kondensatoren, bei denen die Polung keine Rolle spielt. Sie werden lediglich für Spezialzwecke (z. B. für Blitzgeräte) verwendet.

Tantal-Elektrolytkondensatoren

Neuerdings wird als Anode statt Aluminium der Werkstoff Tantal eingesetzt. Das sich beim Anlegen einer Spannung bildende Tantalpentoxid hat eine wesentlich größere Dielektrizitätskonstante als Aluminiumoxid. Deswegen können Tantal-Elkos kleinere Abmessungen für denselben Kapazitätswert haben als Aluminium-Elkos.

Drehkondensatoren

Dies sind Kondensatoren, deren Kapazitätswert verändert werden kann. Wir gehen hier nicht näher auf diesen Typ ein, da er ausschließlich in der Rundfunktechnik verwendet wird.

13 Die Spule im Gleichstromkreis

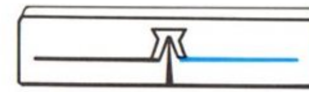
Ein großer Teil der elektrischen Energie, die auf unserer Erde „verbraucht“ wird, wird über magnetische Wirkungen umgesetzt. So wird praktisch alle elektrische Energie nach dem Dynamo-Prinzip aus anderen Energieformen gewonnen. Beim Dynamo spielen nämlich elektromagnetische Vorgänge eine wesentliche Rolle. Auch der Elektromotor läuft auf Grund der magnetischen Wirkung des elektrischen Stroms.

Den „Gleichstrom“-Elektroniker berührt die magnetische Wirkung des elektrischen Stroms und die Beeinflussung des elektrischen Stroms durch Magnetismus weniger häufig als den Elektromaschinenbauer, jedoch oft genug, als daß er sich nicht mit den Grundlagen des Magnetismus und des Elektromagnetismus beschäftigen müßte. (Für den „Wechselstrom“-Elektroniker gehören die Wechselwirkungen des elektromagnetischen Feldes jedoch zum täglichen Brot.)

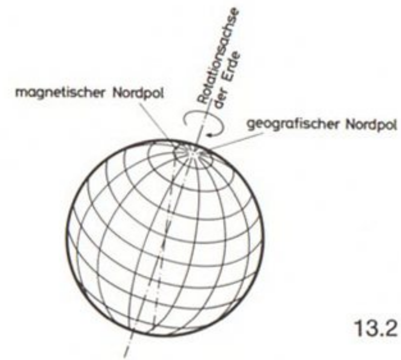
13.1 Das magnetische Feld

13.1.1 Das Magnetfeld unserer Erde

Ihr Experimentierkasten enthält einen einfachen Kompaß. Die Kompaßnadel ist ein in seinem Schwerpunkt auf einer Stahlspitze gelagertes Stahlblech (Bild 13.1). Die Spitze des blau eingefärbten Teils dieser Nadel zeigt – wie allgemein bekannt – in Nordrichtung, die weiß eingefärbte Spitze in Richtung Süden. Das Material des Kompaßzeigers ist natürlich nicht zufällig gewählt: Es besteht aus hochwertigem legierten Stahl und wird vom Hersteller zusätzlich „magnetisiert". Was das ist, werden Sie im nächsten Abschnitt kennenlernen.



13.1



13.2

Versuch

Stellen Sie den Kompaß für diese Untersuchung weit entfernt von dem Dauermagneten in Ihrem Kasten auf; auch sollten keine größeren Gegenstände aus Eisen in seiner Nähe sein.

Das blaue Ende der Kompaßnadel zeigt wie gesagt nach Norden – aber nicht zum „geografischen" Nordpol, sondern in eine Gegend, die in der Nähe davon liegt. Man nennt sie den „magnetischen" Nordpol (Bild 13.2).

Bild 13.3 zeigt, wie Sie den Kompaß nach dem ersten Einschwingen der Magnetnadel drehen müssen, damit die 360°-Winkelskala die vier Himmelsrichtungen genau anzeigt. Die „Mißweisung" – das ist die Differenz zwischen den Richtungen zum magnetischen und zum geografischen Nordpol – beträgt etwa 11°.

Das andere (weiße) Ende der Kompaßnadel zeigt zum magnetischen Südpol unserer Erde.

13.3

Man weiß seit langer Zeit, daß es weder einen magnetischen Nordpol noch einen magnetischen Südpol für sich allein geben kann! Es gehören immer zwei entgegengesetzte Pole zusammen – auch wenn die Entfernung zwischen ihnen, wie bei den Polen der Erde, sehr groß ist.

Ebenso ist bei der Magnetisierung der Kompaßnadel nicht etwa nur ein (blau gekennzeichneter) Nordpol entstanden – der Südpol am anderen Ende der Nadel gehört zwangsläufig dazu. Man hat also stets ein „Magnetsystem" mit einem Nord- und einem Südpol.

Diese wichtige Erkenntnis müssen Sie sich stets vor Augen halten, weil man in der Technik oft nur die Wirkung in der Nähe des einen Pols untersucht und beschreibt und man dann leicht den Eindruck gewinnen kann, der andere Pol sei gar nicht vorhanden. Es ist fast immer irgendein Trick dabei, wenn die Wirkung des anderen Pols vernachlässigt werden darf.

13.1.2 Der Dauermagnet

Ihr Experimentierkasten enthält außer der Kompaßnadel noch ein Bauelement mit Nord- und Südpol: Es ist der stabförmige Dauermagnet (Bild 13.4). Im Prinzip unterscheidet er sich nicht von der

13.4

Magnetnadel; er ist jedoch größer und viel „kräftiger". Er zieht ohne weiteres Eisenteile aus einigen Zentimeter Entfernung an, wovon Sie sich leicht überzeugen können.

1. Versuch

Prüfen Sie bitte, welche Bauteile Ihres Experimentierkastens vom Magneten angezogen werden und welche nicht. Untersuchen Sie insbesondere: Lampen, Widerstände, Potentiometer, Pinzette, ft-Stecker, Kondensatoren, Spule, Eisenkern für die Spule, Magnetanker usw. Tragen Sie Ihre Ergebnisse in die Tabelle 13.5 ein.

Elektrische Meßgeräte sollten Sie jedoch auf keinen Fall prüfen!

13.5

Material	wird angezogen	wird nicht angezogen
....		
....		
....		
....		
....		
....		
....		
....		

2. Versuch

Hängt man den Dauermagneten frei drehbar auf, so wird das eine Ende nach Norden und das andere nach Süden zeigen. Die Anordnung ist ja nichts anderes als ein einfacher Kompaß. Bild 13.6 zeigt, wie man mit fischertechnik-Bauelementen eine drehbare Aufhängung bauen kann. Ganz gleich, wie Sie die Aufhängung drehen, das eine Stabende zeigt immer nach Norden.

Auch bei diesem Versuch ist es wichtig, daß sich kein anderer Magnet oder größere Eisenteile in der Nähe befinden; denn Ihr Stabmagnet zieht ja, wie Sie gesehen haben, Eisenteile an bzw. wird, da er frei aufgehängt ist, von ihnen angezogen!

Der Fachmann sagt: Es würde dann eine sogenannte Fremdkomponente „überlagert", welche die erdmagnetische Wirkung beeinflußt, sie sogar völlig abschirmen kann. Sie können sich davon überzeugen, wenn Sie z. B. den Eisenkern der Spule in die Nähe des Stabmagneten bringen. (Ist der Faden, an dem der Magnet hängt, zu kurz oder zu steif, so stört auch die bei der Drehung der Aufhängung entstehende Torsion (= Verdrehung) des Fadens.)

Nun wollen wir im Hinblick auf weitere Versuche den „Nordpol" unseres Dauermagneten kennzeichnen. Markieren Sie bitte das Ende Ihres Stabmagneten, das nach Norden zeigt.

13.6

13.1.3 Nord- und Südpole

Versuch

Nähern Sie bitte dem Kompaß von der Seite her nach Bild 13.7 (a) den soeben ermittelten Nordpol des Stabmagneten. Der Nordpol (blauer Teil der Nadel) wird ausweichen, während der Südpol

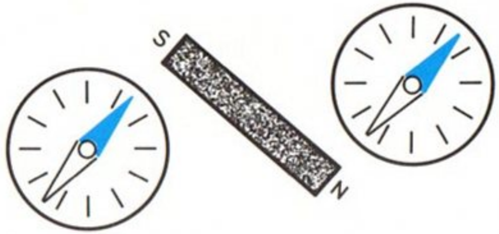
13.7 (a)

(weißer Teil der Nadel) angezogen wird. Welcher Teil der Nadel wird angezogen, wenn Sie den Stabmagneten umkehren? Die Wirkung ist, wie Sie sehen können, unabhängig davon, aus welcher Richtung her Sie den Dauermagneten nähern.

Schlußfolgerung

Das Ergebnis zeigt deutlich, daß sich gleichnamige Pole abstoßen und ungleichnamige Pole anziehen! Also haben unsere „Altvorderen" einen Fehler begangen, als Sie den Teil der Magnetnadel, der von der Gegend um Grönland angezogen wird, genauso nannten wie den Nordpol unserer Erde. Einer von Ihnen muß ein Südpol sein!

Gleichnamige Pole stoßen sich ab; ungleichnamige ziehen sich an.



13.7 (b)

Als man zu dieser Erkenntnis kam, hat man festgelegt: Der blaue Teil unserer Kompaßnadel und der genannte Pol der Erde sind beides „Nordpole“, jedoch hat der Nordpol der Erde die Wirkung eines magnetischen Südpols!

Bild 13.7 (b) zeigt, daß sich die Pole genau an den Enden des Magneten befinden.

13.1.4 Kraftlinien

Ebenso wie wir beim Kondensator ein „Feld“, und zwar ein elektrisches Feld, zwischen der auf (+)Potential und der auf (–)Potential gebrachten Kondensatorplatte annehmen können, dürfen wir ein Feld zwischen zwei magnetischen Polen entgegengesetzter Polarität vermuten. Dieses Feld nennt man „magnetisches Feld“. Im Gegensatz zum elektrischen Feld können Sie das magnetische Feld mit den Ihnen zur Verfügung stehenden Mitteln leicht nachweisen.

13.8

Achten Sie bei diesen und allen folgenden „Eisenpulverversuchen“ darauf, daß der Stabmagnet nicht direkt mit dem Pulver in Berührung kommt! Es ist ein abendfüllendes Geschäft, das Pulver vom Magneten wieder herunter zu bekommen.

1. Versuch

Zum Nachweis des magnetischen Feldes benutzen wir Eisenpulver. Wird dieses in das „Kraftfeld“ zwischen dem Nord- und dem Südpol eines Magneten gebracht, so ordnen sich die Teilchen längs den sogenannten „Kraftlinien“ zwischen den beiden Polen an.

Streuen Sie bitte Eisenpulver (aus dem kleinen Beutel in der Kassette) auf eine transparente Platte, z. B. auf die Vertiefung des transparenten Deckels Ihres Experimentierkastens nach Bild 13.8. Die Späne sollen möglichst gleichmäßig verteilt sein. Vielleicht benutzen Sie zum Verteilen eine „Schütte“ aus kräftigem Papier; aber mit einem Salzstreuer geht es auch. Bitte zunächst lieber zuwenig als zu viele Späne auflegen!

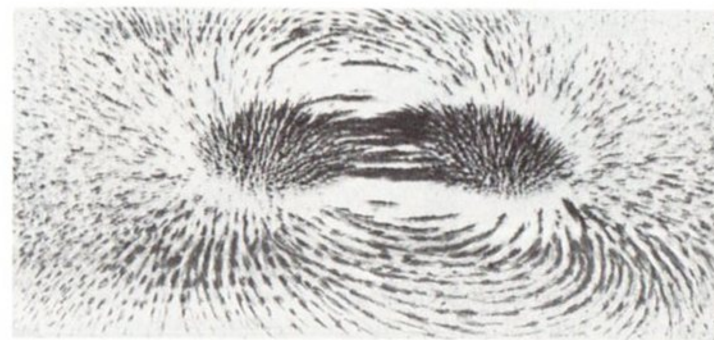
Nun nähern Sie die Platte mit dem Pulver – genau von oben – dem Magneten zunächst nur auf eine Entfernung von etwa 5 bis 10 mm. Bild 13.9 zeigt, wie Sie den Abstand zwischen Platte und Magnet mit Hilfe einiger fischertechnik-Bausteine konstant halten können. Die ft-Bausteine aus Kunststoff haben keinen Einfluß, weil sie „nichtmagnetisch" sind. (Die kleinen Metallstifte, welche die schwarzen Nocken im Baustein festhalten, stören unsere orientierenden Versuche nicht.)

Nun klopfen Sie bitte mit dem Finger einige Male leicht auf die Platte. Die Späne ordnen sich! Es entsteht ein Bild, ähnlich wie Bild 13.10. Zur besseren Betrachtung ist unter die transparente Platte ein weißes Papier gelegt.

13.9

Wie entstand das „Eisenpulver-Bild"?

Jedes Eisenteilchen wird bei der Annäherung an den Dauermagneten selbst zu einem kleinen Magneten mit Nord- und Südpol. Da sich ungleichnamige Pole zweier Magneten anziehen, bilden sich schnell Eisenpulver-Ketten, wenn beim Klopfen die Späne auf der Platte etwas hüpfen. In den kurzen Augenblicken, in denen sie dabei in der Luft schweben, ordnen sich die Ketten. Die Ketten geben die Richtung der „Kraftlinien" zwischen dem Nord- und dem Südpol an.



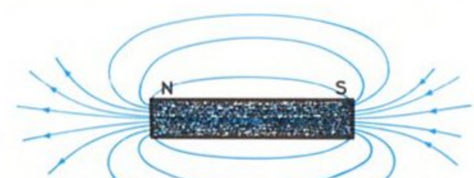
13.10

Nun legen Sie vorsichtig die Platte mit dem geordneten Pulver direkt auf den Magneten. Beachten Sie dabei, daß die Pole des Dauermagneten etwa an der gleichen Stelle wirken wie beim Versuch vorher.

Die Eisenteilchen werden sich über dem Magneten zu größerer Dichte ordnen. Am Prinzip der Ordnung ändert sich nichts; lediglich die magnetischen Kräfte sind größer geworden, so daß die Teilchen sich mehr zu den Magnetpolen hin bewegen.

Bild 13.11 zeigt schematisch, wie das „Kraftlinienfeld" bei einem Stabmagneten verläuft.

Das Bild ist natürlich nur ein „Schnittbild" längs der Mittellinie des Dauermagneten. Das von Ihnen mit Hilfe des Eisenpulvers ermittelte Bild der Kraftlinien wurde zwar in einer Ebene gewonnen, die nicht durch die Mittellinie des Magneten verläuft – jedoch sind die Unterschiede für unsere Zwecke ohne Bedeutung.



13.11

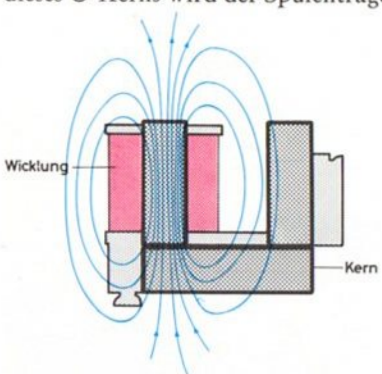
2. Versuch

Wenn man den Stabmagneten senkrecht von unten her an die Platte mit dem Eisenpulver heranführt, gehen die Kraftlinien, wie Sie feststellen können, strahlenförmig auseinander.

13.1.5 Der Elektromagnet

Elektromagnete unterscheiden sich von Dauermagneten in erster Linie dadurch, daß die magnetische Wirkung nur solange anhält, wie Strom durch den Elektromagneten fließt.

Sehen wir uns die Einzelteile eines Elektromagneten einmal an (Bild 13.12). Er besitzt einen U-förmigen Eisenkern, der in drei Einzelteile zerlegt werden kann. Auf die beiden äußeren Schenkel dieses U-Kerns wird der Spulenträger aus Kunststoff aufgesteckt.



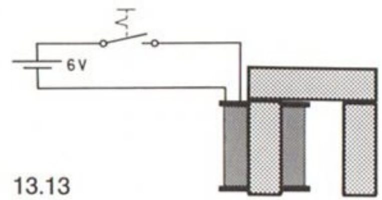
13.12

Auf der einen Seite des Spulenträgers ist ein Wickelkörper angesetzt, der die Spulenwicklung aufnimmt. Auf den Wickelkörper sind etwa 1500 Windungen Kupferdraht mit 0,15 mm Durchmesser aufgewickelt. Die einzelnen Windungen sind gegenseitig dadurch isoliert, daß der Kupferdraht bei der Herstellung mit einer dünnen Lackschicht (im Tauch-Durchlauf-Verfahren) versehen wurde. (Einen solchen Draht nennt man deshalb Kupfer-Lack-Draht; abgekürzt: CuL-Draht.)

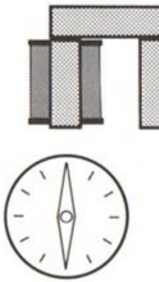
Die Wicklung ist durch eine transparente Folie geschützt. Die Enden des Kupferdrahtes sind an zwei Buchsen angelötet. Zum Einbau in das fischertechnik-System besitzt der Spulenkörper zwei „Nocken".

Versuch

Bauen Sie nun bitte die Schaltung 13.13 auf. Sobald Sie eingeschaltet haben, können Sie an die Pole des Elektromagneten Nägel, ft-Achsen, die Ankerplatte und andere Teile aus Eisen anhängen.



13.13



13.14

Prüfen Sie bitte, ob die magnetische Wirkung beider „Schenkel" gleich groß ist. Sind beide Schenkel Nordpole oder beide Pole Südpole oder ist einer davon ein Nordpol und der andere ein Südpol? Spielt die Polarität der angelegten Spannung eine Rolle?

Mit Hilfe der Kompaßnadel können Sie nach Bild 13.14 schnell Ihre Meinung überprüfen. (Wir kommen darauf später zurück.)

Ergebnis

Sobald Sie den Strom ausschalten, fallen schwere Eisenteile ab. Leichte Eisenteile „kleben" nach dem Ausschalten des Stroms am Eisenkern der Spule. Diesen Effekt werden wir später ebenfalls noch genauer untersuchen. Sobald Sie diese Teile jedoch mit sanfter Gewalt entfernt haben, können sie nicht mehr angehängt werden, ohne daß der Strom erneut eingeschaltet wird.

Weil unser Magnet Eisenteile heben kann, nennt man ihn einen „Hubmagneten". Das Schaltbild dafür zeigt Bild 13.15.

13.15

13.2 Der magnetische Kreis

13.2.1 Die Polschuhe

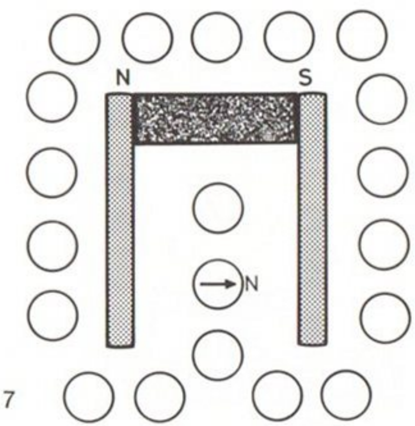
1. Versuch

Schließen Sie bitte nach Bild 13.16 an die Planflächen des Nord- und des Südpols Ihres Dauermagneten je eine ft-Achse 60 (oder einen dicken Nagel) an. Legen Sie die ganze Anordnung flach auf den Tisch.

Nun suchen Sie mit Hilfe Ihrer Kompaßnadel die Polarität und die Richtung der Kraftlinien des Magnetfeldes ab. Legen Sie dazu den Kompaß der Reihe nach an die im Bild 13.17 angegebenen Stellen und zeichnen Sie den Pol der Kompaßnadel (N oder S), der von dem Magneten und seinen „Polschuhen" angezogen wird, sowie die Richtung der Nadel als Pfeil in das Bild ein. Ein Beispiel ist bereits eingetragen.

Wichtig ist auch zu wissen, wie sich das magnetische Feld zwischen den beiden angesetzten Stäben, den „Polschuhen", ausgebildet hat.

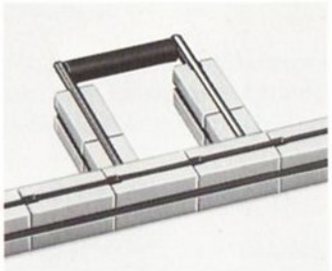
13.16



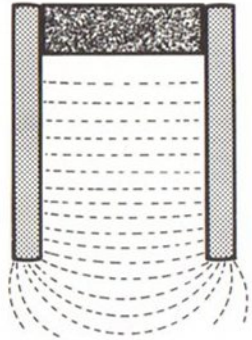
13.17

In diesem Fall sind die Polschuhe die einfache Verlängerung des Nord- und des Südpols. Die Polschuhe müssen aber nicht unbedingt die Form eines geraden Stabes haben. Man wird sie entsprechend dem gewünschten Zweck ausbilden.

Die Kompaßnadel steht immer in der Richtung der Kraftlinien.



13.18



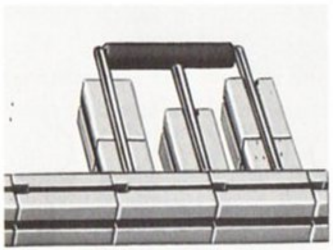
13.19

2. Versuch

Nun wollen wir mit Hilfe von Eisenpulver untersuchen, wie die Kraftlinien zwischen den beiden Polschuhen verlaufen. Welche Richtung die Eisenspäne haben werden, wissen Sie ja bereits, denn das hat die Kompaßnadel schon beim vorigen Versuch angezeigt.

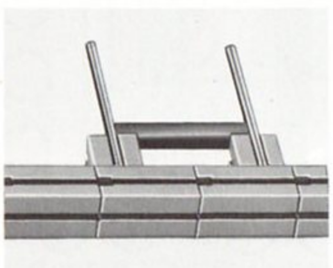
Bringen Sie auf den transparenten Deckel des Experimentierkastens wieder Eisenpulver in möglichst gleichmäßiger „Unordnung". Den Magneten und die beiden Polschuhe können Sie z. B. nach Bild 13.18 in Bausteine fassen.

Sie werden ein ähnliches Kraftlinienbild erhalten, wie es im Bild 13.19 dargestellt ist. Daraus geht klar hervor, daß die Kraftlinien zwischen den beiden Polschuhen parallel verlaufen. Sie haben damit das Prinzip des Hufeisenmagneten nachgebildet. Bei diesem Dauermagnet-Typ sind die beiden Schenkel natürlich nicht aus runden Stäben, sondern der ganze Magnet ist aus einem Stück hergestellt.



13.20

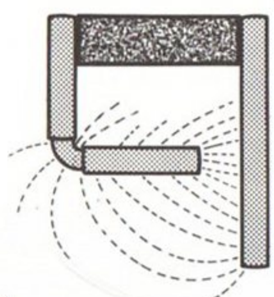
Legen Sie bitte in die Mitte dieses „Hufeisenmagneten" nach Bild 13.20 ein Stück Eisen und beobachten Sie die dadurch entstehende Veränderung des Kraftlinienfeldes.



13.21

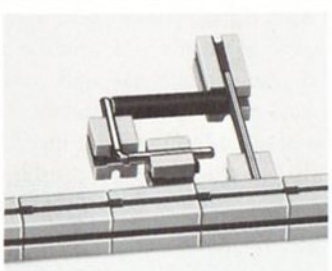
Nun verändern Sie die Polschuhe nach Bild 13.21. Tragen Sie das Ergebnis Ihrer Untersuchung als Kraftlinien in das Bild ein.

13.23



3. Versuch

Ersetzen Sie jetzt einen der geraden Polschuhe durch einen abgewinkelten Polschuh (ft-Winkelachse) nach Bild 13.22. Zeichnen Sie bitte das sich ergebende Kraftlinienfeld in das Bild ein.



13.22

Kraftlinien, die zum eigentlichen Zweck des Magneten nichts beizutragen vermögen, nennt man „Streulinien". Alle zusammen bilden das Streufeld. Daß Kraftlinien auch an „geschwächten" Stellen eines Polschuhs austreten, können Sie am Bild 13.23 erkennen, in dem das Kraftlinienbild an einer ft-Winkelachse dargestellt ist. Deutlich sind die „Streukraftlinien" zu sehen.

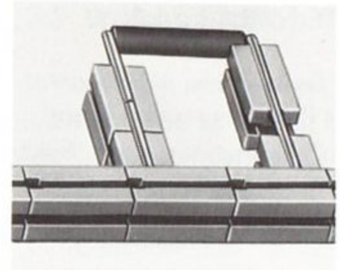
4. Versuch

Jetzt setzen Sie den linken Polschuh aus zwei Teilen zusammen, am besten aus zwei ft-Achsen 30. Als rechten Polschuh verwenden Sie nach Bild 13.24 eine Achse 60. (Auch mit abgeschnittenen Nägeln gleicher Stärke läßt sich der Versuch durchführen.)

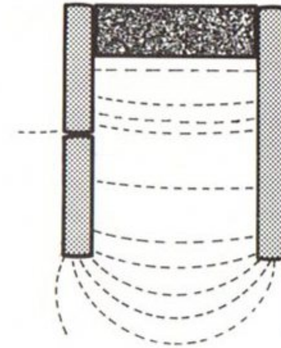
Untersuchen Sie die Stoßquelle des linken Polschuhs mit Hilfe von Eisenpulver. Sie werden ein ähnliches Bild erhalten wie Bild 13.25 und an der Stoßstelle eine „Störung" des Kraftlinienfeldes beobachten. Man hat den Eindruck, an dieser Stelle treten Kraftlinien aus dem Polschuh aus.

Es wird Ihnen sicher klar sein, daß an der Stoßstelle umso weniger Kraftlinien austreten, je besser die beiden Teile zusammengefügt sind; genau ausgedrückt: Je weniger der Querschnitt des Eisens an der Übergangsstelle geschwächt ist. Dies ist z. B. auch der Grund, warum man den Hufeisenmagneten aus einem Stück fertigt. Es treten dann keine Stoßstellen auf.

Noch eines ist Ihnen bei den bisherigen Versuchen sicher aufgefallen: Je stärker die magnetische Kraftwirkung ist, weil z. B. Sie die Eisenteilchen näher an die Magnete bzw. Polschuhe herangebracht haben, umso besser sind die Eisenpulverketten ausgerichtet, oder anders ausgedrückt: umso mehr Kraftlinien bilden sich aus. Sie können also annehmen, daß mit zunehmender Stärke des Magneten mehr Kraftlinien vorhanden sind.



13.24



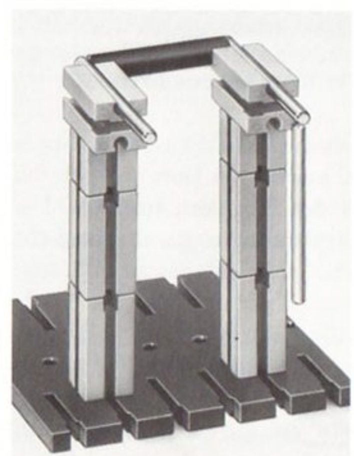
13.25

5. Versuch

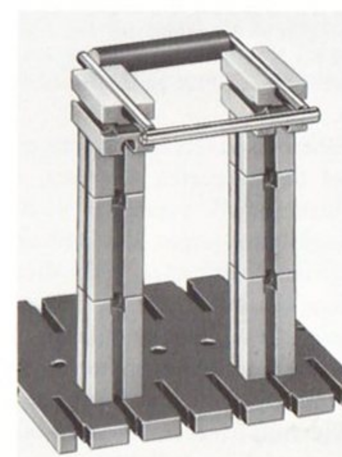
Hängen Sie bitte nach Bild 13.26 an das freie Ende eines Polschuhes des improvisierten Hufeisenmagneten eine ft-Achse 60 und bestimmen (oder schätzen) Sie die Kraft, mit der die Achse vom Polschuh festgehalten wird, d. h. die „magnetische Haltekraft".

Ist zu erwarten, daß die magnetische Haltekraft doppelt so groß wird, wenn die Achse gleichzeitig beide Polschuhe berührt, wie es Bild 13.27 zeigt? (Sie können die Haltekraft mit Hilfe von ft-Bausteinen oder der ft-Federwaage bestimmen.)

13.26



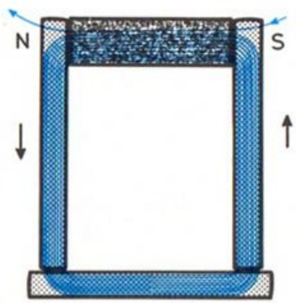
13.27



13.2.2 Der geschlossene magnetische Kreis

Woher kommt es, daß die Haltekraft des Magneten so hoch geworden ist, nachdem Sie die Achse an beide Polschuhe angelegt haben?

Durch die Verbindung der beiden Polschuhe mit einem Stück Eisen verläuft der „magnetische Kreis“ vollständig in Eisen. Man arbeitet zur Erklärung dieser ganz wichtigen Erscheinung ähnlich wie beim elektrischen Stromkreis mit einem „magnetischen Kreis“ nach Bild 13.28.



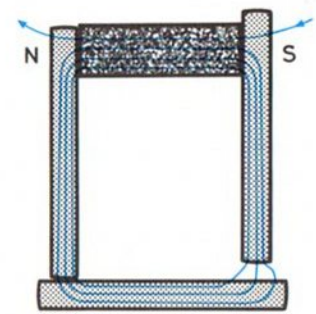
13.28

Genauso wie beim elektrischen Stromkreis kein Strom unterwegs verloren gehen kann, ist es unmöglich, daß eine magnetische Kraftlinie irgendwo endet. Wenn Sie das in einem Bild so gezeichnet sehen, dann hat der Zeichner nur nicht genügend Platz gehabt, um den vollständigen Verlauf dieser Linie darzustellen.

Geht man davon aus, daß die magnetischen Kraftlinien beim Nordpol des Magneten austreten, dann müssen sie beim Südpol des Magneten alle zusammen wieder in den Magneten eintreten. Die Kraftlinien zeigen die Bahnen an, auf denen der magnetische „Strom fließt“. Man nennt diesen aber nicht „Magnetstrom“, sondern bezeichnet ihn als „magnetischen Fluß“ (obwohl die Kraftlinien natürlich nicht „fließen“ wie der elektrische Strom). Ähnlich wie beim elektrischen Stromkreis und beim elektrischen Widerstand ist der magnetische Fluß um so größer, je kleiner der „magnetische Widerstand“ der verschiedenen „Teile“ ist, die einen magnetischen Kreis miteinander bilden.

Genauso wie es eine für ein Material typische elektrische Leitfähigkeit gibt, so hat jeder Stoff auch eine charakteristische magnetische Leitfähigkeit. Man bezeichnet sie als „Permeabilität“. Darüber und auch über andere Größen des magnetischen Feldes wird noch im Abschn. 13.4.4 gesprochen. Jetzt sei nur erwähnt, daß der „magnetische Fluß“, das ist die Anzahl der Feldlinien im Eisen des Magneten, mit dem griech. Großbuchstaben Φ (Phi) als Formelzeichen bezeichnet und in der Einheit „Weber“ (Wb) gemessen wird.

Ist der elektrische Gleichstromkreis geöffnet, dann fließt kein Strom. Beim magnetischen Kreis dagegen wirkt z. B. die Luft an

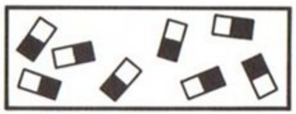


13.29

einer Unterbrechungsstelle des Eisenringes nicht als unendlich großer Widerstand! Beim magnetischen Kreis ist sogar oft eine „Luftstrecke“ einkalkuliert (Bild 13.29). Jedoch können wesentlich weniger Kraftlinien aus dem Magneten am Nordpol aus- und am Südpol wieder eintreten. Das ist der Grund, warum die Haltekraft des Magneten so klein ist, wenn das zu haltende Eisenteil nur **einen** Polschuh berührt. (Mehr über den „Luftspalt“ erfahren Sie im Abschn. 13.4.5.)

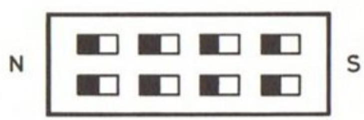
Eisen hat – im Vergleich zu Gasen, Flüssigkeiten und allen „nichtmagnetischen" Metallen und nichtmetallischen Feststoffen – einen sehr kleinen magnetischen Widerstand, d. h. eine große „Permeabilität". Dasselbe gilt auch für Nickel und Kobalt.

Man weiß, daß die Moleküle dieser als Magnetwerkstoffe geeigneten Metalle winzige Magnete darstellen, die als „magnetische Dipole" bezeichnet werden. Diese lagern ungeordnet innerhalb der Gitterstruktur des Metalls, so lange kein magnetisches Feld von außen „angelegt" wird (Bild 13.30 [a]). Bringt man aber



13.30 (a)

das Metall mit den ungeordneten Dipolen in das Kraftlinienfeld eines starken Magneten, so dreht sich ein großer Teil der Dipole wie eine Kompaßnadel in Richtung der Kraftlinien; sie richten sich parallel zueinander aus, wobei die Nordpole der einzelnen Dipole zum Südpol des von außen wirkenden Magneten zeigen (Bild 13.30 [b]). Ist das angelegte Magnetfeld klein, so dreht sich nur ein



13.30 (b)

Teil der Dipole in die Orientierungsrichtung. (Es ist mit Hilfe elektronischer Versuchsanordnungen sogar möglich, dieses „Umspringen" der Dipole hörbar zu machen!)

Bei manchen Eisensorten geht die vollständige Orientierung aller Moleküle schon in einem relativ schwachen, bei anderen jedoch nur in einem starken Magnetfeld vor sich.

Allen Eisensorten ist jedoch eines gemeinsam: Es können nicht mehr Dipole ausgerichtet werden als vorhanden sind. Moleküle, die keine Dipole sind, können überhaupt nicht orientiert werden. Es gibt also für jede Eisenlegierung eine „magnetische Sättigung". Die Anzahl der Kraftlinien kann über diesen Grenzwert hinaus durch keinen noch so starken Magneten erhöht werden!

13.3 Welche Stoffe sind magnetisierbar?

Sie haben bereits untersucht, welche der Ihnen leicht zugänglichen Materialien vom Magneten angezogen werden und welche nicht. Bei den Stoffen, die angezogen werden, muß man noch unterscheiden zwischen solchen, die dadurch selbst zu Magneten werden und solchen, die nach dem Abtrennen vom Magneten ihren Magnetismus wieder verlieren.

13.3.1 Nichtmagnetische Stoffe

Nicht angezogen werden von einem Magneten alle Nichtmetalle und von den Metallen z. B. Aluminium, Kupfer, Zinn, Zink, Messing. Ihre Moleküle besitzen keinen „Dipol-Charakter". Bringt man solche Stoffe in das Kraftlinienfeld eines Magneten, so ändert sich das Kraftlinienfeld dadurch nicht.

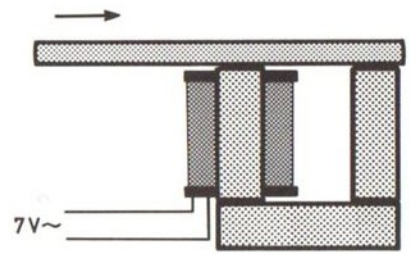
Vollständigkeitshalber sei hier angefügt, daß es auch Stoffe gibt, bei deren Einführung in ein magnetisches Kraftlinienfeld sich die Anzahl der Kraftlinien vermindert! Diese Stoffe bewirken also genau das Entgegengesetzte wie Eisen. Man nennt diese Gruppe „diamagnetische Stoffe". (Hierzu gehört z. B. Wismut.)

13.3.2 Ferromagnetische Werkstoffe

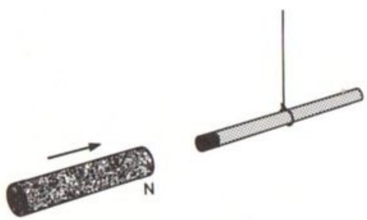
Die Bezeichnung „ferro-" bedeutet, daß sich die in diese Gruppe einzuordnenden Stoffe ähnlich wie Eisen (lat. „ferrum") verhalten. Da uns vor allem Eisen und seine Legierungen interessiert, wollen wir im nächsten Versuch die Wirkung des magnetischen Feldes auf Eisen untersuchen.

13.31

Der Wechselstrom kehrt 100mal in der Sekunde seine Richtung um. Die Dipole in der ft-Achse werden deswegen eben so oft „umgedreht". Wird die Achse langsam vom E-Magneten entfernt, so wird jede Neumagnetisierung (1 pro $^1/_{100}$ s) schwächer als die vorhergehende, so daß die „Ausrichtung" bei genügender Entfernung verloren geht. Damit ist der Metallstab entmagnetisiert.



13.32



13.33

1. Versuch

Wir hängen den zu untersuchenden Körper, z. B. eine ft-Achse 60 (oder einen Nagel), an einem Faden auf. Wer fischertechnik besitzt, baut sich die Vorrichtung nach Bild 13.31.

Kennzeichnen Sie bitte das eine Ende dieses Stabes z. B. mit einem Ring aus Selbstklebeband. Vor Beginn des eigentlichen Versuchs müssen Sie noch den Stab von zufällig vorhandenem Magnetismus befreien, ihn „entmagnetisieren". Dazu schalten Sie Ihre Magnetspule nach Einsetzen des U-Eisenkerns an die Wechselspannung Ihres Netzgerätes. Nun schieben Sie nach Bild 13.32 langsam den Stab (ft-Achse 60 oder einen Nagel) an den beiden Polschuhen in Pfeilrichtung entlang und entfernen ihn langsam in der gleichen Richtung. Mit der Kompaßnadel können Sie anschließend nachprüfen, ob der Stab entmagnetisiert ist. Die Nadel darf ihre Lage bei Annäherung an ein beliebiges Ende des Stabes nicht ändern. Tut sie es trotzdem, so muß die „Wechselstrom-Entmagnetisierung" nochmals wiederholt werden.

Hängen Sie nun den Stab an einem Faden auf (heften Sie die „Lagerung" mit etwas tesa-Film fest) und nähern Sie ganz vorsichtig den Nordpol Ihres Stabmagneten dem markierten Ende des Stabes. Beachten Sie dabei die in Bild 13.33 angegebene Richtung. Halten Sie bitte einen Finger vor die Planfläche des Magneten, so daß der aufgehängte Stab nicht mit dem Dauermagneten selbst in Berührung kommen kann, wenn er bei genügender Annäherung angezogen werden sollte.

2. Versuch

Nun wiederholen Sie den Versuch mit dem Südpol des Stabmagneten. Auch jetzt soll der sich nähernde Stab den Magneten nicht berühren.

Ergebnis

Der Stab wird mit dem markierten Ende vom Stabmagneten angezogen – gleichgültig, ob man den N- oder den S-Pol des Magneten annähert. Prüft man nach Wegnahme des Stabmagneten die „magnetische Wirkung“ des Stabes mit Hilfe der Kompaßnadel, so wird man einen schwachen Ausschlag feststellen. Der Stab wurde also durch den Einfluß des starken magnetischen Feldes des Stabmagneten ebenfalls schwach magnetisch. Wo ist beim 1. und 2. Versuch ein N-Pol entstanden?

3. Versuch

Nun berühren wir mit dem Nordpol des Dauermagneten absichtlich das gekennzeichnete Ende des Stabes. Nach der Trennung von Stab und Magnet ist der Stab selbst zu einem recht beachtlichen Magneten geworden! Ist das berührte Ende zu einem Nord- oder zu einem Südpol geworden? Zum Nachweis benutzen Sie wieder die Kompaßnadel.

Danach nähern Sie den Südpol des Dauermagneten ganz vorsichtig aus der in Bild 13.33 angegebenen Richtung dem vorher berührten, markierten Stabende. Wichtig ist, daß Sie das ganz langsam machen. Da dieses Stabende bei der „Magnetisierung durch Berührung“ jetzt zum s t a r k e n Südpol geworden ist, muß es sich wegdrehen. Denn gleichnamige Pole stoßen sich ab. Das andere Ende des Stabes wird dagegen angezogen.

4. Versuch

Jetzt nähern Sie bitte den Südpol des Dauermagneten relativ schnell dem markierten Stabende: Der Stab hat jetzt nicht genügend Zeit, sich zu drehen – er wird „ummagnetisiert“! Nach der Trennung von Stab und Magnet ist das markierte Stabende zum Nordpol geworden, wie Sie mit der Kompaßnadel feststellen können.

Schlußfolgerung

Nach dem, was Sie im Abschnitt 13.2.2 über den Kraftlinienverlauf erfahren haben, ist klar, daß die Magnetisierung des Metallstabes bei „Berührung“ sehr viel stärker sein muß, als bei Annäherung ohne Berührung.

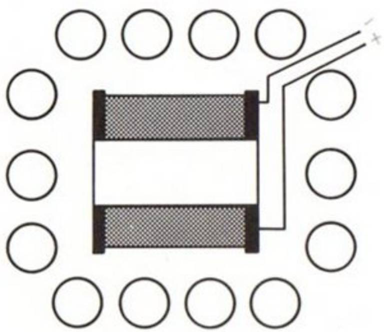
13.3.3 Weich- und hartmagnetisches Material

Ferromagnetisches Material kann man in zwei große Gruppen einteilen: Material, bei dem die Ausrichtung der Dipol-Moleküle beim Magnetisieren „einfriert“, nennt man „hartmagnetisch“. Dies ist der Fall bei einem Material, das nach der Trennung vom „Erregermagneten“ seinen Magnetismus in fast voller Stärke beibehält.

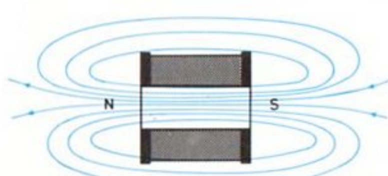
Im Gegensatz dazu nennt man alle Stoffe, bei denen zwar bei der Magnetisierung selbst eine Ausrichtung der Dipole stattfindet, bei denen aber nach Wegnahme des Erregermagneten die Ausrichtung vollständig oder fast vollständig rückgängig gemacht wird, „weichmagnetisch“. Solche Werkstoffe werden z. B. für den Bau von Elektromagneten verwendet. Die nach Wegnahme des Erregermagneten oft noch verbleibende Magnetkraft wird als „Restmagnetismus“ bezeichnet. Er ist meist unerwünscht!

13.3.4 Der Restmagnetismus

Es gibt zwar Eisensorten, die praktisch keinen „Restmagnetismus“ behalten, wenn sie vom Magneten getrennt werden – jedoch sind sie sehr teuer und meist schlecht zu bearbeiten (drehen, bohren usw.). Man hilft sich in der Technik deshalb mit einfachen Tricks. Besonders unangenehm macht sich der Restmagnetismus beim Elektromagneten bemerkbar. Dort geht nach dem Abschalten des Stroms die Haltekraft des Magneten nicht auf „Null“ zurück. Der angezogene Eisenstab „klebt“ an dem oder an den Polschuhen, wie man sagt. Durch Auftragen einer Lackschicht oder Aufkleber einer Folie auf die Polschuhe schafft man Abhilfe, wie Sie leicht feststellen können. Wir kommen auf den Restmagnetismus im Abschn. 13.4.6 noch einmal zurück.



13.34



13.35

13.4 Das elektromagnetische Feld

13.4.1 Vorversuch

Schalten Sie bitte die Magnetspule – ohne Eisenkern – an eine Gleichspannungsquelle und untersuchen Sie mit Hilfe der Kompaßnadel, ob magnetische Kraftlinien entstanden sind. Bild 13.34 zeigt Ihnen einige Stellungen, in die Sie den Kompaß bringen müssen. Halten Sie im Bild fest, in welcher Richtung der (blaue) Nordpol des Zeigers jeweils zeigt. Zeichnen Sie im Bild auch ein, welche der beiden Spulenanschlüsse Sie mit dem (+)Pol der Spannungsquelle verbunden haben.

Drehen Sie die Stromflußrichtung in der Spule durch Vertauschen von (+) und (–) um. Was zeigt jetzt die Kompaßnadel in den eingezeichneten Lagen an?

Sie haben in beiden Fällen eine magnetische Wirkung auf die Magnetnadel beobachtet. Je nach Polarität der angelegten Spannung entsteht an einem Ende der Spule ein Nord- oder ein Südpol. Bild 13.35 zeigt den Kraftlinienverlauf, den Sie mit mehreren Messungen nacheinander festgestellt haben, im Zusammenhang auf. Das Bild ist ein „rotationssymmetrisches“ Schnittbild.

Die Kompaßnadel muß jeweils genau in der Richtung der gezeichneten Kraftlinien stehen.

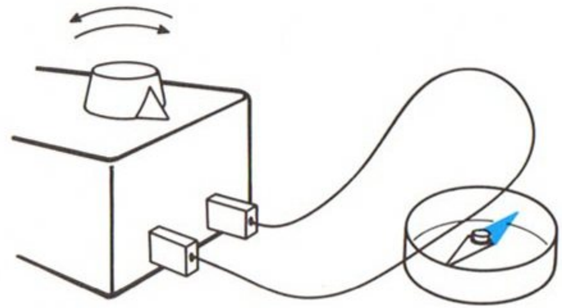
Der Versuch beweist also, daß der Strom ein magnetisches Feld erzeugt und das ohne Anwesenheit von Eisen! Untersuchen wir die Sache vom Prinzip her.

13.4.2 Das Magnetfeld um den Stromleiter

13.36

Der dänische Physiker Oerstedt hat als erster entdeckt, daß sich rund um jeden stromdurchflossenen Leiter, also auch um einen einfachen Draht, ein Magnetfeld „aufbaut".

Bild 13.36 zeigt, wie die magnetischen Feldlinien um jedes Stückchen des Leiters verlaufen. Die Feldlinien müssen Sie sich als geschlossene Ringe vorstellen, denn eine Feldlinie kann ja nicht irgendwo enden, wie Sie schon vom Dauermagneten her wissen. Im ganzen gesehen, umgeben die magnetischen Feldlinien den Leiter wie eine Röhre.

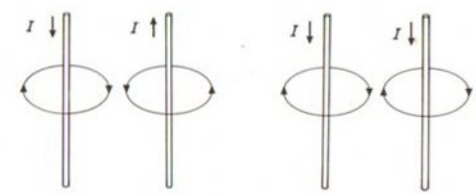


13.37

1. Versuch

Das entstehende magnetische Feld können wir folgendermaßen nachweisen: Legen Sie, wie in Bild 13.37 gezeigt, einen Draht parallel zur Kompaßnadel. Sobald Sie Strom in genügender Stärke, z. B. durch kurzzeitiges Anschließen des Drahtes an die Gleichspannungsbuchsen des Netzgerätes, durch den Leiter fließen lassen, dreht sich die Magnetnadel weg.

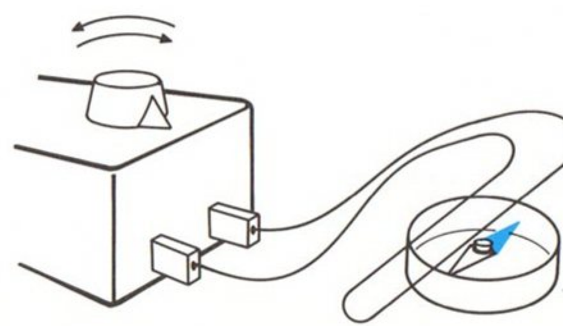
Was geschieht nun, wenn Sie zwei stromdurchflossene Leiter auf die Kompaßnadel einwirken lassen? Wir müssen, wie Bild 13.38 zeigt, unterscheiden zwischen: Die beiden Leiter werden in entgegengesetzter Richtung vom Strom durchflossen – und: Beide Leiter werden in gleicher Richtung vom Strom durchflossen. Was wird sich ergeben?



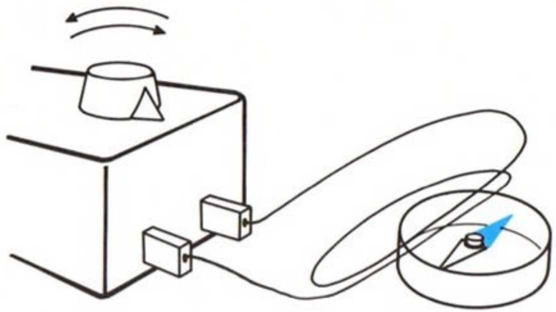
13.38

2. Versuch

Prüfen wir zunächst nach, was geschieht, wenn die beiden Leiter vom Strom in entgegengesetzter Richtung durchflossen werden. Bild 13.39 zeigt die Anordnung, in der Sie den Draht an der Magnetnadel vorbeiführen müssen.



13.39



13.40

3. Versuch

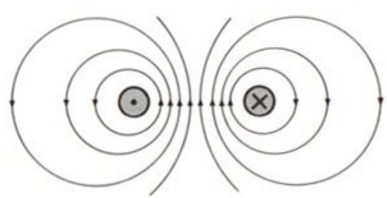
Bild 13.40 zeigt, wie Sie erreichen, daß die Ströme in den beiden benachbarten Drähten in gleicher Richtung fließen. Im Grunde genommen wickeln Sie den Draht zu einer „Spule“ mit 2 Windungen.

Ergebnis

Sie werden feststellen, daß die Kompaßnadel bei entgegengesetzter Stromrichtung nicht ausschlägt, wogegen der Ausschlag bei gleicher Stromrichtung in beiden Drähten etwa doppelt so groß ist.

Schlußfolgerung

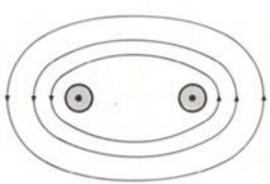
Wenn um stromdurchflossene Leiter ein Magnetfeld entsteht, dann bedeutet dies auch, daß sich benachbarte Leiter kräftemäßig beeinflussen müssen! Werden sie von entgegengesetzten Strömen durchflossen, dann müssen sie sich gegenseitig abstoßen. Mit Eisenpulver läßt sich nachweisen (Bild 13.41), daß sich die beiden um die Leiter entstehenden Magnetfelder gegenseitig zu verdrängen suchen.



13.41

Das Schnittbild eines Leiters, der von unten her vom Strom durchflossen wird (Strom von (+) nach (–) fließend) wird als Kreis mit einer Pfeilspitze (Punkt) dargestellt (Bild 13.41). Das Schnittbild eines Leiters, bei dem der Strom von oben her in das Schnittbild hineinfließt, wird als Kreis mit einem gefiederten Pfeilende (Kreuz) dargestellt.

Werden umgekehrt 2 benachbarte Leiter von Strom in gleicher Richtung durchflossen, so ziehen sich die Leiter gegenseitig an. Bild 13.42 zeigt, daß sich die Kraftlinien sozusagen gegenseitig „verstärken“ und gemeinsam um beide Leiter herum verlaufen.

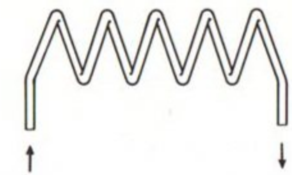


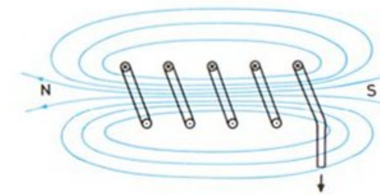
13.42

Die abstoßenden oder anziehenden Kräfte zwischen stromführenden Leitern stören beim Bau von Geräten der Nachrichtentechnik im allgemeinen nicht; sie sind aber zu beachten beim Bau von starken Sendern und Maschinen, wie z. B. von Generatoren und Motoren.

Eine Spule besteht aus mehreren, nebeneinander auf einem Kern aufgewickelten Windungen. Die Spule kann eine oder viele solcher „Lagen“ haben. Betrachtet man eine einlagige stromdurchflossene Spule (Bild 13.43) und zeichnet nach dem gerade kennengelernten Verfahren die Feldlinien in das Schnittbild dieser Spule ein, so erhält man einen Kraftlinienverlauf nach Bild 13.44. Sie erkennen, daß sich die um jeden einzelnen Leiter entstehenden Magnetfelder zu einem Gesamtmagnetfeld ergänzen. Man hat nun durch Übereinkunft festgelegt, daß die Feldlinien am Nordpol eines Magneten austreten und am Südpol wieder eintreten. So ergibt sich die Richtung, in der man die Pfeile der Feldlinien um den einzelnen Leiter zeichnen muß: Die Feldlinien verlaufen im Uhrzeigersinn, wenn man in die Richtung des Stromflusses (konventionelle Stromrichtung!) blickt. So sind auch die Pfeile in den Bildern 13.41 und 13.42 eingezeichnet.

13.43





13.44

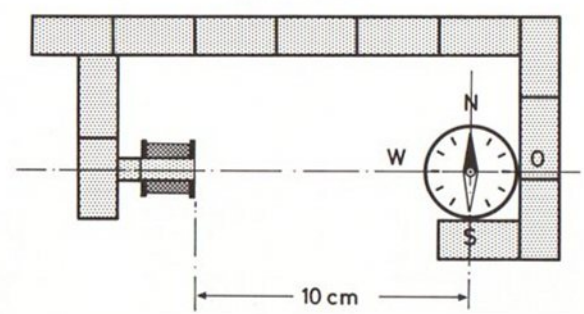
13.4.3 Die Wirkung von Eisen in einer Spule

Sie haben im letzten Abschnitt 13.4.2 gesehen, daß – nach dem Motto: „Ein Einzelner vermag wenig, viele dagegen viel“ – viele Windungen ein bedeutend stärkeres Magnetfeld als eine einzelne Windung ergeben. Es gibt noch eine weitere Möglichkeit, die Magnetkraft einer Spule zu erhöhen: Man setzt in den Hohlraum der Spule ein Stück Eisen.

Zum Nachweis der Größe des Magnetfeldes benützen wir den Kompaß. Man erkennt am stärkeren Ausschlag der Kompaßnadel, daß das Magnetfeld größer geworden ist.

Versuch

Bauen Sie bitte nach Bild 13.45 im Abstand von 10 cm vor der Spule den Kompaß auf. Drehen Sie die ganze Anordnung so, daß die in die Nord-Süd-Richtung zeigende Kompaßnadel genau senkrecht zur Spulenachse steht.



13.45

13.46

Spulenkern	Winkel zwischen N und Kompaßnadel in °
eisenlos	
ft-Achse 30	
Eisen 22 x 8 x 8 (vom Magneten)	
Kern nach 13.47	
Kern nach 13.48	
U-Kern nach 13.49	
geschlossener Eisenkern nach 13.50	

Achten Sie darauf, daß bei allen folgenden Versuchen stets die gleiche Spannungsquelle benutzt wird, z. B. das Netzgerät mit ganz nach rechts gestelltem Drehknopf und mit einem 470-µF-Kondensator als Glättungskondensator. Es fließt dann stets die gleiche Stromstärke durch die Spule.

Zunächst verwenden wir kein Eisen in der Spule. Schalten Sie bitte ein. Die Nadel schlägt etwas aus. Tragen Sie den Ausschlag in die Tabelle 13.46 ein.

Nun schieben Sie einen kurzen Eisenstab, z. B eine fischertechnik-Achse 30 in die Spule und messen erneut. Der Ausschlag ist nun viel größer.

Wiederholen Sie den Versuch mit einem Eisen 22×8×8 mm (vom U-Eisenkern abschrauben!). Hat die Vergrößerung des Eisenquerschnitts etwas gebracht?

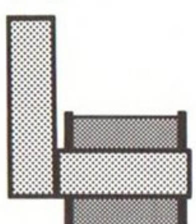
Und nun bauen Sie an den Eisenkern vorn noch einen Polschuh an (siehe Bild 13.47). Bestätigt der Versuch Ihre Erwartungen? (Achtung: Sie müssen dabei die Magnetnadel um 8 mm weiter entfernen, weil der Polschuh 8 mm „aufträgt".)

Wiederholen Sie bitte den Versuch noch einmal mit dem Polschuh auf der Rückseite des Kerns nach Bild 13.48 und dann noch einmal mit zwei Polschuhen, entsprechend dem Bild 13.49. (Der Kompaß muß jetzt wieder 8 mm näher heran!)

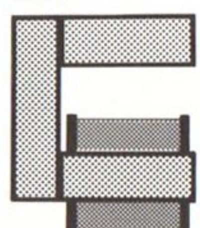
Und dann schließen Sie nach Bild 13.50 den magnetischen Eisenkreis durch die Ankerplatte (Bild 13.51) des Experimentierkastens.

13.47

13.48



13.49



13.50

13.51

Ergebnis

Sie haben sicher bei Ihren Versuchen zunehmend eine beträchtliche Steigerung der magnetischen Kraft der Spule festgestellt. Das Eisen hat also bewirkt, daß mehr Feldlinien (Kraftlinien) aus dem Nordpol der Spule aus- und beim Südpol wieder eintreten. Beim vorletzten Versuch mit dem offenen U-Kern haben Sie wegen der „Rückführung" der Kraftlinien des zweiten Pols in die Ebene des ersten Pols sicher die größte magnetische Kraft gemessen.

Durch Aufsetzen der Ankerplatte beim letzten Versuch ging die magnetische Wirkung am Meßort jedoch etwas zurück! Wir wissen aber, daß die Anzahl der Kraftlinien größer wird, wenn der Eisenkreis ganz geschlossen ist. Warum zeigt unser „Meßgerät" jedoch weniger an?

Ganz einfach: Wir messen mit unserem „Meßgerät" ja nicht die Anzahl der Kraftlinien im Eisen, sondern diejenige, die als Streukraftlinien durch den Meßort (= Aufstellungsort des Kompasses) gehen! Damit ist also der Nachweis geführt, daß das „Streufeld" kleiner wird, wenn der magnetische Kreis ganz in Eisen verlaufen kann.

13.4.4 Einige wichtige magnetische Größen

Zur Berechnung von Spulen oder Elektromagneten braucht man verschiedene magnetische Größen, die hier aber nur kurz aufgeführt werden sollen. Die exakte Berechnung eines „magnetischen Kreises" wollen wir nicht vornehmen.

Der magnetische Fluß

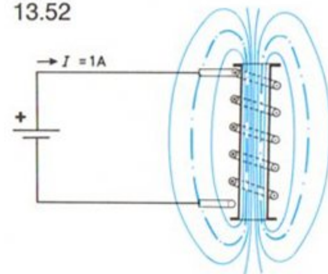
Wir hatten diese Größe schon im Abschn. 13.2.2 kennengelernt. Der „magnetische Fluß" Φ gibt die Zahl der Kraft- oder Feldlinien an und wird in „Weber" (Kurzzeichen: Wb) gemessen. Man hat festgelegt: 1 Wb = 10^8 Feldlinien (= 100 Millionen Feldlinien!). (Früher galt als Einheit das „Maxwell" [M] = 1 Feldlinie. 1 Wb = 10^8 M.)

Die Durchflutung

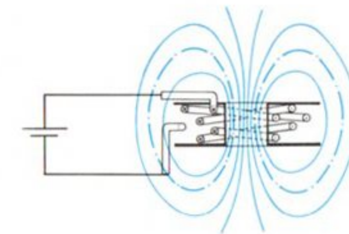
Bild 13.52 zeigt eine Spule mit 5 Windungen, die nebeneinander („einlagig") aufgewickelt sind. Es ist verständlich, daß die magnetische Kraft dieser Spule mit der Windungszahl W (Formelzeichen: N) bzw. mit der Stromstärke I, die durch die Spule fließt, zunehmen wird. Das Produkt aus Stromstärke und Windungszahl wird als „Durchflutung" bezeichnet. Das Formelzeichen ist der griech. Großbuchstabe Θ (sprich: Theta).

$$\Theta = I \cdot N \text{ (A} \cdot \text{W = Amperewindungen)}$$

13.52



13.53



Die magnetische Feldstärke

Bild 13.53 zeigt eine Spule mit derselben Durchflutung wie die im Bild 13.52, aber mit einem anderen „Aufbau": Sie ist „mehrlagig" gewickelt und deshalb kürzer. Damit ist auch die „mittlere" Feldlinienlänge" (Formelzeichen l; Einheit: m) kürzer geworden. Das bedeutet aber, daß die magnetische Kraftwirkung größer ist als bei der Spule mit einlagigem Aufbau – gleiche Durchflutung vorausgesetzt. Die magnetische Kraftwirkung wird als „Feldstärke" bezeichnet. Mit kurzen mehrlagigen Spulen erreicht man eine höhere Feldstärke als mit langen, einlagigen Spulen.

Das Formelzeichen für die magnetische Feldstärke ist „H". Nach dem eben Gesagten gilt dann:

$$H = \frac{\Theta}{l}$$

Damit ergibt sich als Einheit für die magnetische Feldstärke die „Amperewindung pro Meter": $\frac{\text{AW}}{\text{m}}$

(Früher wurde als Einheit für die Feldstärke das „Oerstedt" [Abkürzung: Oe] benutzt: 1 Oe = 0,8 AW/cm.)

Die magnetische Flußdichte oder magnetische Induktion

Sie ergibt sich als Anzahl der Feldlinien, die den Querschnitt (Formelzeichen A) von 1 m^2 senkrecht „durchstoßen". Da die Anzahl der Feldlinien durch den magnetischen Fluß beschrieben wird, ergibt sich für die magnetische Flußdichte (Formelzeichen: „B"):

$$B = \frac{\Phi}{A} \qquad \frac{Wb}{m^2} = T$$

Die Einheit „Weber pro m^2" wird nach dem Physiker Tesla als „1 Tesla" (Abkürzung „T") bezeichnet.

Andererseits ist die magnetische Flußdichte B proportional zur Feldstärke H. Weiterhin ist die Induktion auch dann größer, wenn das Material dem magnetischen Fluß weniger Widerstand entgegensetzt, d. h. wenn die „magnetische Leitfähigkeit" (Formelzeichen μ; sprich: mü) größer ist. Es gilt demnach auch:

$$B = \mu \cdot H \quad \text{oder} \quad \mu = \frac{B}{H}$$

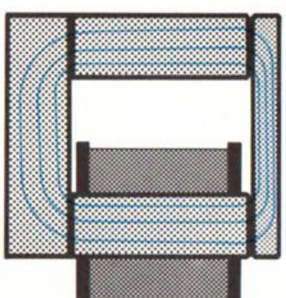
Die Permeabilität

Die magnetische Leitfähigkeit μ wird auch als „Permeabilität" (= Durchlässigkeit) bezeichnet. Sie setzt sich aus 2 Größen zusammen:

$$\mu = \mu_o \cdot \mu_r$$

μ_o wird als „magnetische Feldkonstante" bezeichnet. Die magnetische Flußdichte einer Luftspule (= ohne Kern) beträgt: $B = \mu_o \cdot H$.

μ_r (= relative Permeabilität) ist eine reine Zahl, die angibt, um wieviel sich die Induktion B erhöht, wenn die Feldlinien nicht in Luft, sondern wie im Bild 13.54 z. B. in Eisen verlaufen. μ_r ist also genau eine solche „Materialkonstante" wie die Dielektrizitätskonstante ε_r.



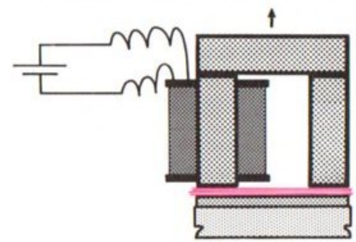
13.54

13.4.5 Der Luftspalt

Das Anzugsvermögen eines Elektromagneten hängt sehr davon ab, wie groß der Abstand des Eisenstückes (z. B. des Ankers eines elektromagnetischen Relais) von den Polschuhen ist. Wir untersuchen deshalb die Abhängigkeit der maximalen Tragfähigkeit des Elektromagneten von der Größe des Luftspaltes. Ebenso untersuchen wir den Einfluß der Spannung.

1. Versuch

Legen Sie bitte nach Bild 13.55 zwischen die Polschuhe des Elektromagneten und die Ankerplatte so viele Lagen dünnes Papier, daß



13.55

der „Anker" beim Hochheben des Elektromagneten „gerade noch" mit angehoben wird. „Gerade noch" heißt, daß der Anker bei einer geringen Vergrößerung des Luftspaltes (durch Zwischenlegen eines weiteren d ü n n e n Papiers) nicht mehr angehoben wird.

Als Spannungsquelle benutzen Sie zunächst die kleinste einstellbare Spannung des Netzgerätes und glätten die Spannung mit einem 470-µF-Kondensator.

Die Besitzer von ft-Bausteinen sollten den Versuch mit dem 3-, 6-, 12-, 24fachen Gewicht des Ankers wiederholen. Dazu müssen Sie nacheinander 2, 5, 11 und 23 Bausteine an die Ankerplatte anbauen. (Ankerplatte und Bausteine 30 haben etwa das gleiche Gewicht.) Bestimmen Sie nun den Luftabstand, bei dem der Anker gerade noch angehoben wird. Die Größe des Luftspalts geben wir in Papierlagen statt in mm an – vorausgesetzt, daß alle Papierstreifen gleich dick sind.

Tragen Sie die gefundenen Werte in die Tabelle 13.56 ein. Für das Gewicht, das der Magnet mit hochnimmt, geben wir einfach die Anzahl der hochgehobenen Bausteine an.

Aus den ermittelten Werten können Sie ein Diagramm in das vorbereitete Koordinatennetz 13.57 einzeichnen. Sie werden ein ähnliches Diagramm wie im Bild 13.58 erhalten.

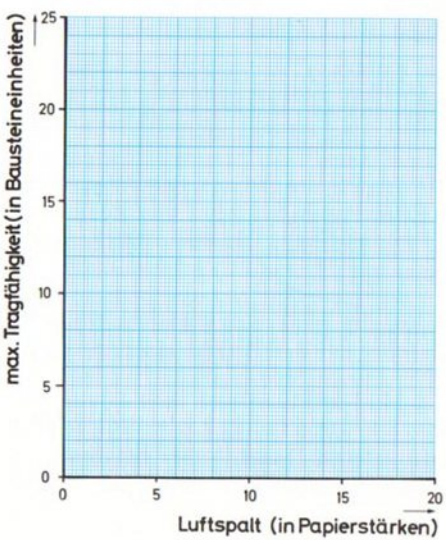
Wiederholen Sie den Versuch mit der maximal einstellbaren Netzgerätspannung. (470-µF-Kondensator nicht vergessen!)

Ergebnis

Aus den Diagrammen können Sie entnehmen, daß die maximale Tragfähigkeit des Magneten sehr stark von der Größe des Luftspalts zwischen den beiden Polschuhen und dem Anker abhängt. Sie erreichen z. B. ohne weiteres die zehnfache Anzugskraft, wenn Sie den Luftspalt halbieren. Auch die Höhe der Betriebsspannung wirkt sich auf die Anzugskraft des Elektromagneten aus.

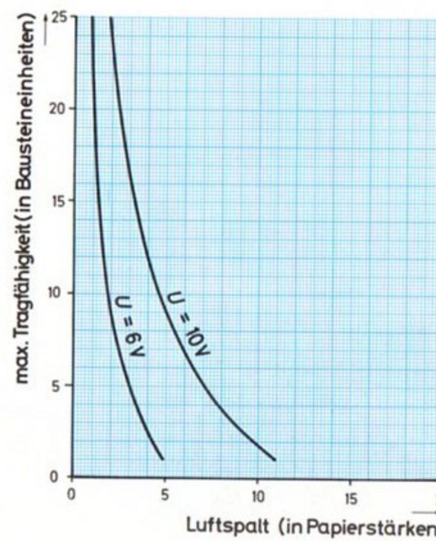
13.56

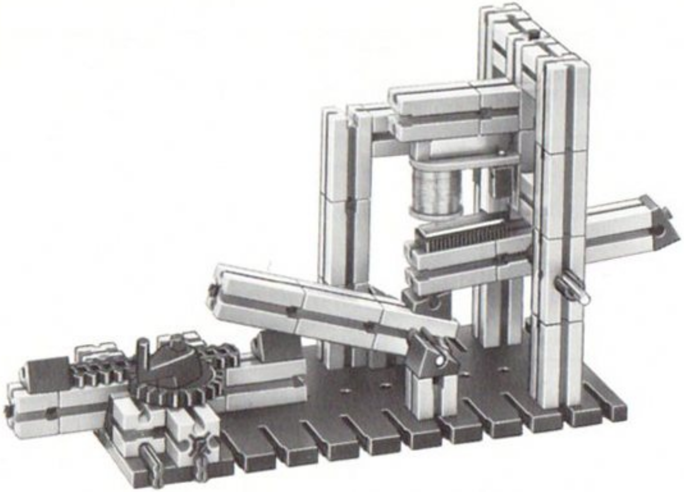
U (geglättet) in V	Gewicht in „Baustein-einheiten“	max. Luftspalt in Papierlagen
	1	
	3	
	6	
	12	
	24	
	1	
	3	
	6	
	12	
	24	



13.57

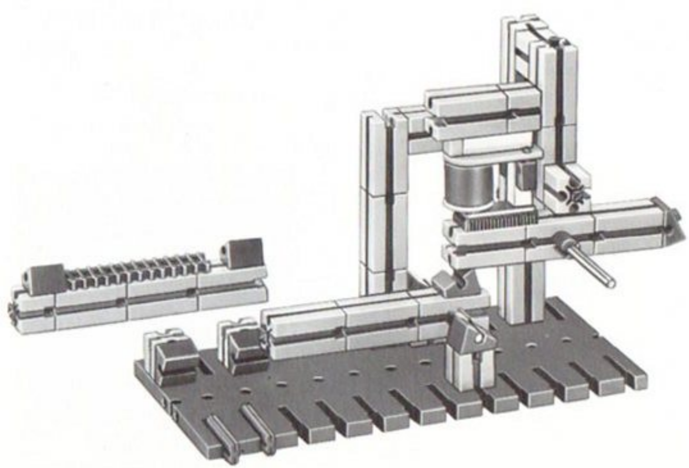
13.58





13.59

13.60



2. Versuch

Wer ft-Bauelemente besitzt, kann zusätzlich mit dem Versuchsaufbau nach Bild 13.59 leicht ermitteln, wie sich ein drehbarer Magnetanker verhält. Bild 13.60 zeigt Ihnen die Baustufe 1 des Gestells für den Magneten und die bewegliche Ankerplatte. Justieren Sie Ankerplatte und Magnet so, daß die Platte die beiden Polschuhe berühren kann. Es darf also bei angezogenem Anker kein Luftspalt zwischen einem der Magnetpole und dem Anker vorhanden sein. Hängen Sie bitte zunächst – wie im Bild – kein Gegengewicht an den freien Arm des zweiarmigen Ankers.

Der Magnet muß das Gewicht des Ankerarmes anziehen, sobald Sie einschalten und der Anker nicht zu weit von den Polschuhen entfernt ist. Den Abstand des Ankers können Sie durch Verschieben der Zahnstange mit Hilfe des Zahnrades verändern.

Bestimmen Sie – mit und ohne Glättungskondensator – für verschiedene Spannungen die Grenzentfernung, bei welcher der Magnet den Anker gerade noch anzieht.

Vertauschen Sie auch bitte die beiden Polschuhe, d. h. machen Sie den Schenkel des U-Eisens, auf dem die Wicklung sitzt, zu dem Polschuh, der näher am Drehpunkt des Ankers sitzt.

Was ändert sich, wenn Sie an den rechten freien Arm des Ankers ein Gegengewicht ansetzen? Zieht nun der Magnet aus größerer oder aus kleinerer Entfernung? Überprüfen Sie Ihre Meinung.

Verändern Sie auch den Drehpunkt des Ankers so, daß er genau unter der äußeren Kante eines Polschuhes zu liegen kommt. In diesem Fall verkleinern Sie den Luftspalt an einem Polschuh; der Magnet müßte also eine größere Leistung abgeben.

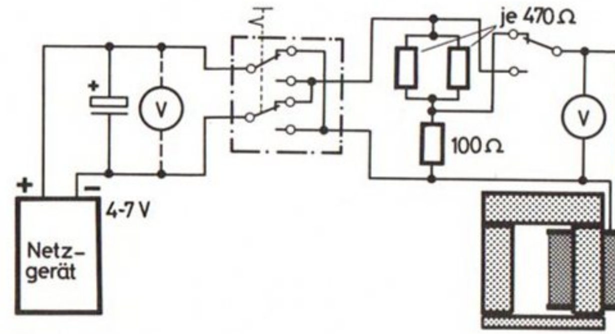
Um ein einwandfreies Abfallen des Ankers zu erreichen, empfiehlt es sich, auf beide Polschuhe (oder auf den Anker) etwas tesa-Film o. ä. zu kleben.

Mit diesem Versuch haben Sie das Prinzip eines der üblichen „Klappanker-Relais“ kennen gelernt. Dieser Anker betätigt beim Anziehen zusätzlich Kontakte, die Stromkreise öffnen oder schließen.

13.4.6 Die Remanenz und die Koerzitivkraft

Nun wollen wir das „Kleben“ der Ankerplatte nach dem Ausschalten des Stroms etwas näher untersuchen. Dazu bauen Sie die Schaltung 13.61 auf. Der Elektromagnet wird z. B. nach Bild 13.62 montiert.

13.61



1. Versuch

Mit dem Polwendeschalter kann die Polarität am Spannungsteiler vertauscht werden. Mit dem Netzgerät können Sie die Höhe der Spannung einstellen, die am Spannungsteiler aus den beiden parallelgeschalteten 470-Ω-Widerständen und dem 100-Ω-Widerstand anliegt. Bei der im Bild 13.61 eingezeichneten „Ruhestellung“ des Tasters liegt die Magnetspule parallel zum 100-Ω-Widerstand; wird der Taster gedrückt, so liegt die Spule an der vollen Betriebsspannung. Mit dem Taster können Sie also die Spannung an der Spule in zwei Stufen ändern und mit dem Netzgerät eine Feineinstellung der Spannung vornehmen. Achten Sie bitte bei der Einstellung des Netzgerätes stets darauf, daß die Polarität mit der des Kondensators übereinstimmt; dieser könnte sonst Schaden leiden. (Statt des Polwendeschalters und des Tasters können Sie natürlich auch mit Kabelvertauschung arbeiten.)

Drehen Sie das Netzgerät zunächst „voll“ auf. Das Voltmeter wird Ihnen in diesem Fall etwa 2 Volt anzeigen. Bei Druck auf den Taster springt die Spannung auf etwa 10 Volt. Bei gedrücktem Taster hängen Sie die Ankerplatte an den E-Magneten.

Jetzt drehen Sie den Drehknopf des Netzgerätes auf 0 zurück: Die Ankerplatte bleibt „kleben“, obwohl kein Strom mehr durch die Spule fließt. Das kommt daher, daß sich beim Ausschalten des Stroms nur ein Teil der vorher ausgerichteten Dipol-Moleküle (siehe Bild 13.30) wieder in eine zufallsbedingte Lage zurückgedreht hat. Es ist also noch ein Rest von Magnetismus vorhanden.

13.62

Sie wissen, daß wir durch Umpolen des Stroms, der durch die Spule fließt, Nordpol und Südpol vertauschen können. Während dieser „Um-Magnetisierung", also der Drehung der Dipol-Moleküle um 180°, müßte es theoretisch einen kurzen Augenblick geben, in dem die Dipol-Moleküle im Eisen ungeordnet sind und damit der Magnetismus verschwunden ist. Versuchen wir es. Polen Sie um!

Versuchen Sie es zuerst mit voller Spannung, also mit dem Drehknopf des Netzgerätes auf Anschlag und gedrücktem Taster. Der Anker fällt nicht ab! Auch dann nicht, wenn Sie den Taster nicht drücken! Der Anker wird erst abfallen, wenn Sie einige Bausteine an die Ankerplatte anhängen und nochmals umpolen.

Erklärung

Die Ummagnetisierung der einzelnen Dipol-Moleküle geht nicht gleichzeitig vor sich. An irgendeiner uns nicht bekannten Stelle zieht der Magnet den Anker schon wieder an, bevor er ihn an den anderen Berührungspunkten losgelassen hat. Hängt man ein größeres Gewicht an den Anker, so reicht die Haltekraft in diesem kurzen Augenblick des Ummagnetisierens jedoch nicht aus und der Anker fällt ab.

2. Versuch

Untersuchen wir die Angelegenheit genauer. Geben Sie wieder volle Spannung an die Spule und drehen Sie anschließend die Spannung auf 0 zurück. Polen Sie um und lassen den Taster los. Steigern Sie die Spannung an der Spule möglichst langsam von 0 auf 2 Volt.

Bei etwas über 1 Volt wird die Ankerplatte abfallen. (Andernfalls müssen Sie parallel zu den zwei 470-Ω-Widerständen 1000 Ω schalten, damit die Spannung an der Spule höher wird. Sollte der Anker schon bei der kleinsten einstellbaren Spannung des Netzgerätes abfallen, so benutzen Sie für die Parallelschaltung einen 470-Ω- und einen 1000-Ω-Widerstand statt 2mal 470 Ω.)

Ergebnis

Das Eisen des aus U-Kern und Ankerplatte bestehenden Eisenkreises wird erst unmagnetisch, wenn eine „Gegenspannung" (=entgegengesetzt gepolte Spannung) von etwas über 1 Volt an die Spule gelegt wird. Erst dann sind die Dipol-Moleküle des Eisens „ungeordnet".

3. Versuch

Zuletzt untersuchen wir noch, ob die Stärke der Magnetisierung vor dem Umpolen einen Einfluß hat.

Dazu schalten wir die Spule wie vorher zuerst an volle Spannung und bestimmen die Größe der Gegenspannung, bei der der Magnetanker abfällt. Anschließend wiederholen wir den Versuch – drehen jedoch den Drehknopf des Netzgerätes zum Magnetisieren nicht bis auf den Endanschlag, sondern nur so weit wie nötig.

Wird der Anker jetzt bei einer anderen „Gegenspannung" als vorher abfallen?

Ergebnis

Der „Restmagnetismus" ist praktisch unabhängig von der „Vorgeschichte" der Magnetisierung! Zur Aufhebung der „Remanenz", wie der Restmagnetismus fachmännisch genannt wird, haben wir in unserem Versuch eine Gegenspannung von etwa 1 Volt an den E-Magneten legen müssen. Dieser Wert bezieht sich auf das Eisen unseres Ankers und unseres U-Kerns; er gilt nur für die spezielle Form unserer Spule. Zur allgemeinen Charakterisierung des Eisenmaterials genügt das aber nicht – wir müßten in Feldstärke-Einheiten umrechnen. Die zur vollständigen Entmagnetisierung ($B = 0$) notwendige, entgegengesetzte Feldstärke nennt der Fachmann „Koerzitivkraft". Wir wollen dieses Thema hiermit abschließen. Wer tiefer in diese Materie eindringen möchte, möge sich in einem der im Anhang angeführten Fachbücher informieren: Stichwort „Hysterese-Schleife".

13.5 Die Spannungsinduktion

In diesem Abschnitt wird erklärt, was in einem Leiter (z. B. in einer Spule) vor sich geht, wenn er durch ein Magnetfeld bewegt wird: es fließt Strom! Auf diesem Prinzip beruht die Stromerzeugung im Dynamo.

13.5.1 Induktion durch Bewegung

Wenden wir das bekannte Prinzip: „Durch fließenden Strom wird ein Magnetfeld erzeugt", nun einmal in umgekehrter Form an. Dann muß bei Bewegung eines Leiters in einem ruhenden Magnetfeld ein Strom durch den Leiter fließen (falls der Leiter Teil eines geschlossenen Stromkreises ist).

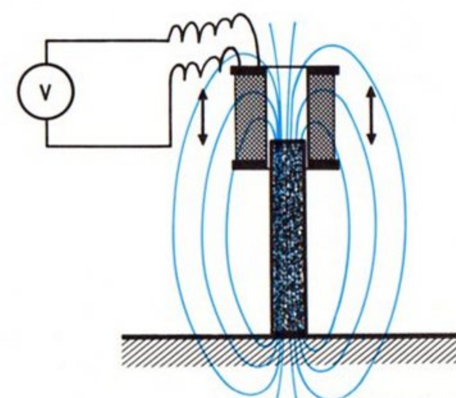
Versuch

Überprüfen Sie diese Behauptung. Bild 13.63 zeigt das „Wie"! Wir benutzen – zum leichteren Nachweis – nicht eine Leiterschleife (eine einzige Windung), sondern die vielen Leiterschleifen einer Spule.

Damit überhaupt Strom fließen kann und angezeigt wird, schließen Sie an die Spule das Spannungsmeßgerät an.

Halten Sie bitte mit einer Hand das eine Ende des Stabmagneten fest und schieben Sie über das andere Ende die Spule. Damit bewegten Sie die Spule im ruhenden Magnetfeld des Stabmagneten (s. Kraftlinien-Bild 13.63).

Je schneller Sie die Bewegungen ausführen, umso stärker schlägt der Zeiger aus. Beobachten Sie, wann der Zeiger ausschlägt. Während der Bewegung? Oder in der Pause zwischen zwei gegenläufigen Bewegungen?



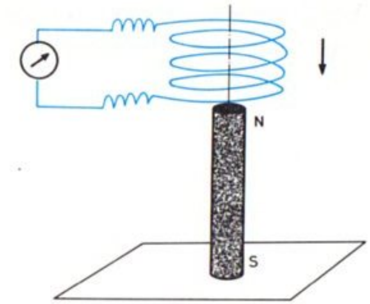
13.63

Schlägt der Zeiger um so weiter aus, je schneller Sie den „Leiter" (= die Spule) bewegen? Welchen Ausschlag erreichen Sie, wenn Sie die Spule – statt um einen der Magnetpole selbst – etwa in der Mitte des Stabes hin und her bewegen?

Wann schlägt der Zeiger nach links aus? Wann nach rechts? Vielleicht vermerken Sie im Bild 13.64, wo der (+)Anschluß des Voltmeters angeschlossen werden muß, damit der Zeiger nach rechts ausschlägt, wenn die Spule mit dem angegebenen Wicklungssinn in Pfeilrichtung auf den Nordpol des Stabmagneten aufgeschoben wird (der Wicklungssinn der Spule entspricht im Bild 13.64 dem Uhrzeigersinn, wenn die Wicklung innen beginnt).

Ist es gleichgültig, ob Sie die Spule bewegen und den Magneten auf dem Tisch festhalten oder umgekehrt?

Was geschieht, wenn Sie Nord- und Südpol des Stabmagneten vertauschen?



13.64

Ergebnis

Wird eine Spule im stationären Magnetfeld bewegt (Stabmagnet fest – Spule beweglich) oder verändert sich das Kraftlinienfeld um eine stationär angeordnete Spule (Spule fest – Stabmagnet beweglich), so fließt im Spulenstromkreis Strom. An den Klemmen der Spule wird eine Spannung gemessen.

Dies gilt auch, wenn Sie keine Spule, sondern nur eine einzige Leiterschleife benutzen. Die dann entstehende Spannung ist allerdings sehr viel kleiner; sie brauchen zum Nachweis ein sehr empfindliches Meßgerät.

Wird die Spule um die Mitte des Magneten von oben nach unten verschoben, so tritt kein Ausschlag auf! Es scheint also darauf anzukommen, daß möglichst viele Kraftlinien während der Bewegung „geschnitten" werden. Dies ist bei Verschiebung in der Mitte des Stabes nicht der Fall, da hier die Spule nur längs der Kraftlinien verschoben werden kann, also keine Kraftlinien „geschnitten" werden.

13.5.2 Die elektromotorische Kraft (EMK)

In der Fachsprache sagt man: Bei einer Relativbewegung zwischen einem Leiter und den Kraftlinien eines magnetischen Feldes wird im Leiter eine Spannung „induziert", die einen Stromfluß hervorruft. Diese Spannung nennt man „elektromotorische Kraft", kurz: *EMK*. Sie haben das Auftreten der *EMK* bei den vorhergehenden Versuchen mit Hilfe des Voltmeters beobachtet.

Wohlgemerkt: Eine *EMK* entsteht nur, solange die Relativbewegung stattfindet. In nichtbewegtem Zustand (= Ruhezustand) ist die $EMK = 0$.

Die Polarität der induzierten Spannung und die Richtung des durch sie bewirkten Stroms ist – wie Sie ebenfalls festgestellt haben – abhängig von der Bewegungsrichtung des Leiters und von der Richtung des Magnetfeldes. Auf diesen Zusammenhang wollen wir jetzt jedoch nicht weiter eingehen.

Das Formelzeichen der *EMK* ist *E*, die Einheit Volt. Es besteht der formelmäßige Zusammenhang:

$$E = B \cdot l \cdot N \cdot v \quad \text{(in Volt)}$$

dabei ist: B die Flußdichte in Tesla
l die Länge des Leiters im magnetischen Feld in m
N die Anzahl der Spulenwindungen
v die Geschwindigkeit der Leiterbewegung in m/s

13.5.3 Induktion durch Änderung des Magnetfeldes

Damit eine *EMK* auftritt, die einen Stromfluß verursacht, ist es nicht notwendig, daß sich die Spule und der in die Spule „getauchte" Magnet gegeneinander bewegen. Der Effekt tritt auch dann ein, wenn das magnetische Feld in der Spule geändert wird. Dies läßt sich leicht überprüfen.

1. Versuch

Eine Änderung des Magnetfeldes der Spule erreichen wir z. B. durch eine im Bild 13.65 gezeigte Anordnung. Ihre Spule ist im Bild der Übersichtlichkeit wegen nur durch einige Windungen dargestellt. Achten Sie bitte beim Aufbau auf den gezeichneten Wicklungssinn der Windungen.

Wenn Sie den Dauermagneten schnell wegnehmen (= Magnetfeld verkleinern) oder annähern (ohne dabei auch noch die Polarität zu ändern), so schlägt der Zeiger kurz nach links bzw. rechts aus. Vielleicht vermerken Sie, wo der (+)Anschluß des Voltmeters liegen muß, damit beim Anziehen des Stabmagneten (Nordpol links!) der Zeiger nach rechts ausschlägt.

Hat die Geschwindigkeit beim Annähern und Abnehmen des Magneten Einfluß auf die Größe des Ausschlags, also auf die Größe der Stromstärke im Stromkreis?

2. Versuch

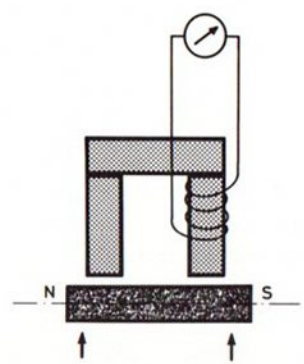
Wer einen ft-Magneten aus „hobby 3" oder e-m besitzt, ersetzt nun den Dauermagneten durch den Magneten des „hobby-Labors" nach Bild 13.66.

Das Magnetfeld kann wahlweise durch Berühren bzw. Trennen der beiden U-Kerne oder durch Ein/Aus-Schalten oder durch Umpolen des Stroms verändert (auf- und abgebaut oder umgepolt) werden. Gibt es jedesmal einen Stromimpuls?

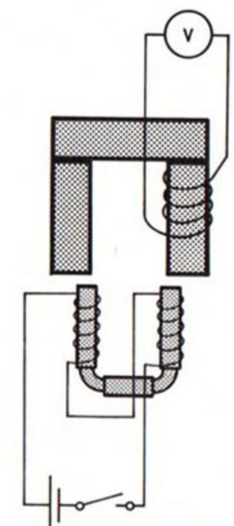
Ergebnis

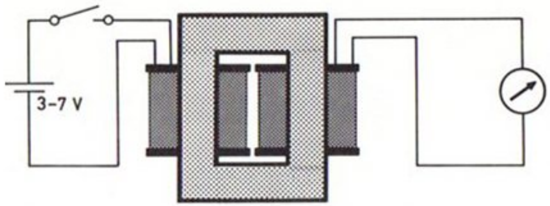
Es leuchtet aufgrund dieser Versuche ein, daß es lediglich auf die Änderung der Stärke des Magnetfeldes ankommt: Je größer diese Änderung ist und je schneller sie vor sich geht, um so höher ist die induzierte Spannung, die EMK, und damit auch der durch sie verursachte „Stromstoß".

13.65

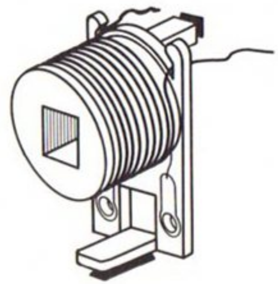


13.66





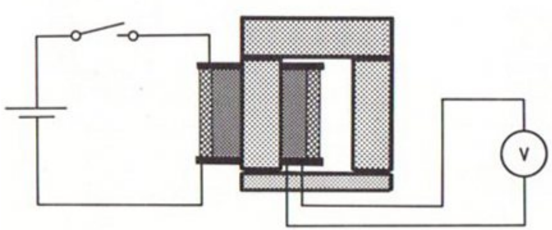
13.67



Schlingen Sie bitte den Draht noch einmal um den Zapfen!

13.68

Die Drahtenden sind bereits verzinnt; Sie können gleich die ft-Stecker anbringen. Sollten diese Enden aus irgendwelchen Gründen abreißen, dann können Sie sich folgendermaßen helfen: Halten Sie die Drahtenden kurz über die Flamme eines Feuerzeugs und entfernen Sie die Rückstände mit ganz feinem Sandpapier. Biegen Sie die blanken Enden dann ein paarmal um und versehen Sie sie vorsichtig mit ft-Steckern (nicht zu fest schrauben!).



13.69

13.5.4 Die Spannungsinduktion zwischen zwei Spulen

Wickelt man auf einen gemeinsamen Eisenkern zwei voneinander elektrisch getrennte Spulen und schickt Strom durch die eine Spule, so entsteht im Eisenkern ein Magnetfeld. Bild 13.67 zeigt ein Beispiel.

Solange die Größe dieses Magnetfeldes konstant (= gleichbleibend groß) ist, wird in der zweiten Wicklung keine Spannung induziert. Ändert sich jedoch die Feldliniendichte, weil die Stromstärke in der ersten Wicklung verkleinert oder vergrößert wird, so wird in der zweiten Wicklung eine Spannung induziert, die einen Strom fließen läßt, wenn der „Sekundär"-Stromkreis (mit der 2. Wicklung) geschlossen ist.

Versuch

Es ist nun nicht nötig, die beiden Spulen getrennt auf den Kern zu wickeln, es genügt, wenn man sie nach Bild 13.68 übereinander wickelt. Die zweite Wicklung bringen Sie bitte selbst auf. Dazu verwenden Sie den CuL-Draht (= lackisolierter Kupferdraht) Ihres hobby-Labors. Sie können insgesamt etwa 80 Windungen aufwickeln. Den Anfang und das Ende des Drahtes befestigen Sie bitte nach Bild 13.68 an dem Zapfen des Spulenkörpers mit Klebeband.

Nun schalten Sie nach Bild 13.69 die soeben erstellte zweite Wicklung über einen Ein-Taster an eine Gleichspannungsquelle, z. B. an die mit 940 μF geglättete Gleichspannung des Netzgerätes. An die Anschlüsse der Wicklung, die schon vorhanden war, schalten Sie Ihr Voltmeter. Vergessen Sie nicht den Eisenkreis mit der Ankerplatte zu schließen.

Jedesmal, wenn Sie den Taster niederdrücken oder loslassen, schlägt der Zeiger kurz ein wenig nach rechts bzw. links aus. Übrigens, die Ankerplatte muß nur beim ersten Mal an die Polschuhe von Hand angelegt werden; danach hält sie sich infolge der schon besprochenen „Remanenz" von selbst.

Ergebnis

Mit diesem Versuch ist die induktive Wirkung zwischen den beiden Wicklungen bewiesen. Wird durch das Einschalten des Stroms in der einen Wicklung ein magnetisches Feld in der Spule und im Eisenkern aufgebaut, so „schneiden" die dabei entstehenden Feldlinien die andere Wicklung. Deshalb wird in letzterer ein Spannungsstoß induziert. Fließt in der ersten Wicklung jedoch Strom in gleichmäßiger Stärke, so passiert in der zweiten Wicklung nichts. Es kommt also immer wieder auf die Änderung des Stroms und damit auf die Änderung des Magnetfeldes an!

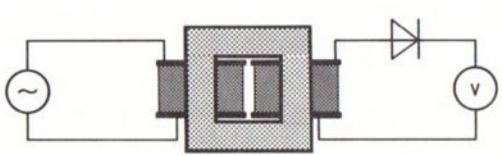
Hätten Sie die schon bestehende Wicklung mit den vielen Windungen an die Spannungsquelle geschaltet, so wäre an den Anschlüssen der nachträglich aufgebrachten Wicklung natürlich auch ein Spannungsstoß entstanden. Der ist jedoch so klein, daß Ihr Meßgerät ihn nicht anzeigt. Es kommt nämlich auf das Verhältnis der Windungszahlen der beiden Wicklungen zueinander an.

13.5.5 Die Spannungstransformation

Nun untersuchen wir noch ganz kurz folgenden, für die Wechselstromtechnik so wichtigen Fall:

Versuch

Schalten Sie – mit oder ohne Taster – die selbsterstellte Wicklung an die Wechselspannungsbuchsen Ihres Netzgerätes. Vor das Voltmeter setzen Sie nach Bild 13.70 die Diode. In diesem Schaltbild sind – nur aus Gründen der leichteren Darstellbarkeit – die beiden Spulen auf zwei gegenüberliegende Schenkel des Eisenkerns gezeichnet.



13.70

Beim Einschalten zeigt Ihr Voltmeter nicht etwa nur einen Spannungsstoß, sondern während der ganzen Einschaltdauer eine Spannung an, und zwar eine beachtlich hohe Spannung.

Sie haben einen „Spannungstransformator" gebaut,

In der Praxis allerdings benutzt man für Dauerbetrieb nicht einen massiven Eisenkern, sondern man schichtet dünne Bleche zu einem „Paket". Das hat den Vorteil, daß die bei der ständigen Ummagnetisierung durch den Wechselstrom im Eisen entstehenden „magnetischen Wirbelströme" in Grenzen gehalten werden. Die in dem massiven Kern Ihrer Experimentierspule entstehenden „magnetischen Wirbelstromverluste" sind auch der Grund dafür, daß die von Ihrem Voltmeter angezeigte Spannung niedriger ist, als es theoretisch aufgrund der Windungszahlen beider „Spulen" zu erwarten ist.

13.5.6 Die Selbstinduktion

Die Spannungsinduktion tritt nicht nur zwischen zwei getrennten Wicklungen auf – auch die einzelnen Windungen jeder Wicklung beeinflussen einander. Durch die Änderung der Feldlinienzahl wird auch in der Spule selbst eine Spannung induziert. Diesen Vorgang nennt man „Selbstinduktion". Es entsteht dabei eine Art „Gegen-*EMK*", welche der Spannung, die die Selbstinduktion hervorgerufen hat, entgegenwirkt.

Mit anderen Worten: Die Selbstinduktion einer Spule bewirkt eine Art „elektrischer Trägheit" dieses Bauelements, die den jeweiligen elektrischen Zustand beizubehalten versucht.

Wird z. B. eine Spule durch plötzliches Einschalten an Spannung gelegt, dann bewirkt die durch diesen Vorgang hervorgerufene „Gegen-*EMK*", daß der Strom nicht sofort in voller Stärke zu fließen beginnt, sondern erst langsam „ingang kommt". Umgekehrt: wird die Spule plötzlich „abgeschaltet", dann bewirkt die „Gegen-*EMK*", daß der Stromfluß nicht sofort aufhört, sondern langsam abklingt.

Die Höhe der „Gegen-*EMK*" hängt u. a. von der Geschwindigkeit, mit der die Feldlinien- bzw. die Magnetflußänderung erfolgt, ab. Da „Abschalten" eine sehr schnelle Flußänderung bedeutet, können in entsprechend gebauten Spulen auch sehr hohe Spannungsspitzen auftreten, welche die in der Technik wenig geschätzte Funkenbildung zwischen den Schaltkontakten verursachen. Es gibt da etliche Tricks, um diese „Spannungsstöße" unschädlich zu machen! Wir werden uns im „hobby-Labor 2" noch damit beschäftigen.

13.6 Das Wichtigste über Spulen

13.6.1 Die Induktivität

Ebenso wie die Kapazität eines Kondensators von dessen Bauart bestimmt wird, gibt es auch eine entsprechende Größe bei der Spule: die „Induktivität". Ihr Formelzeichen ist „L"; als Einheit wurde das „Henry", Abkürzung „H", festgelegt.

Für die Induktivität gilt folgende Beziehung:

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l} \text{ (H)}$$

N^2 = Quadrat der Windungszahl, A = Fläche und l = durchschnittliche Länge der Feldlinien sind die festliegenden Größen, welche die „Geometrie" der Spule bestimmen.

$\mu_0 \cdot \mu_r = \mu$ ist jedoch eine Größe, die wir bei unserer Experimentierspule ändern können: mit oder ohne Eisen, bzw. mit mehr oder weniger Eisen.

Auch in der Unterhaltungselektronik werden Spulen mit festliegender Windungszahl verwendet, deren Eisenkern verstellbar ist, so daß man eine gewünschte Induktivität einstellen kann.

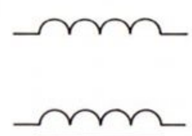
Die Induktivität unserer Spule liegt ohne Eisen etwa bei 300 mH und mit geschlossenem Eisenkern ungefähr bei 1 H. In der Praxis werden häufiger die untenstehenden abgeleiteten Einheiten verwendet.

Abgeleitete Einheiten:

1 mH = 0,001 H
1 µH = 0,001 mA = 0,000001 H

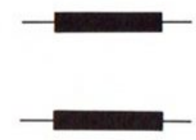
13.6.2 Schaltzeichen

Als Schaltzeichen einer Spule verwendet man in der englischsprachigen Literatur z. T. die symbolische Darstellung mehrerer Drahtwindungen nach Bild 13.71. Enthält die Spule Eisen, so wird dies durch einen dicken Strich darunter angedeutet. Im Zuge der Rationalisierung hat man das Schaltzeichen in der neuen deutschen Norm nach Bild 13.72 vereinfacht.



13.71

13.72



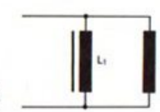
13.6.3 Zusammenschaltung von Spulen

Vollständigkeitshalber sei noch folgendes erwähnt: Schaltet man mehrere Spulen in Reihe (Bild 13.73), so ist die Gesamtinduktivität:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \ldots$$

13.73

13.74



Schaltet man zwei Spulen parallel (Bild 13.74), so ergibt sich die Gesamtinduktivität zu:

$$L = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

Bei Zusammenschaltung verhalten sich die Induktivitäten von Spulen also entgegengesetzt wie Kondensatoren.

13.7 Die Spule als Wechselstromwiderstand

Eine Spule besteht aus mehr oder weniger Drahtwindungen, die einen ohm'schen Widerstand darstellen, dessen Wert ohne weiteres nach den Ihnen bekannten Methoden ermittelt werden kann. Wird die Spule nun von einem Wechselstrom, der eine ständige Änderung des magnetischen Flusses bewirkt, durchflossen, dann kommt zum ohm'schen Widerstand R_L, der sogenannte „induktive Widerstand" X_L hinzu.

Dieser läßt sich mit folgender Formel berechnen:

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

Demnach steigt der induktive Widerstand mit größer werdender Induktivität. Mehr oder weniger Eisen in der Spule beeinflußt also deren Widerstand im Wechselstromkreis! Aus der Formel geht weiter hervor, daß der induktive Widerstand der Spule steigt, wenn die Frequenz f größer wird. Damit verhält sich die Spule genau umgekehrt wie der Kondensator, dessen „kapazitiver" Widerstand mit größer werdender Frequenz kleiner wird. Auf die Zusammensetzung von R_L und X_L zum gesamten Wechselstromwiderstand (= „Scheinwiderstand") soll hier nicht eingegangen werden.

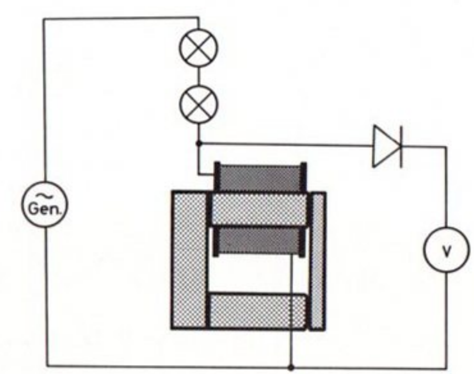
Versuch

Bauen Sie bitte die Schaltung nach Bild 13.75 auf. Nach Anschaltung an die Wechselspannung des Netzgerätes leuchten beide Lampen schwach. Mit dem Voltmeter – in Reihe mit der Diode geschaltet – erhalten Sie zwar keine genaue Angabe für die Teilspannung an der Spule. Sie können ihre Höhe aber mit der Teilspannung, die an den beiden Lampen steht, vergleichen.

Überzeugen Sie sich, daß der Wechselstromwiderstand der Spule bei geschlossenem Eisenkreis (U-Kern mit Magnetanker) viel höher ist als bei offenem Eisenkern (Magnetanker abgenommen oder Papierstreifen zwischen Anker und Polschuhen oder ganz ohne Eisen). Vielleicht entwerfen Sie eine Tabelle, in die Sie die Gesamtspannung und die Teilspannungen eintragen.

Wenn Sie Lust haben, können Sie den Wechselstromwiderstand der Spule für die verschiedenen Ausführungen mit und ohne Eisen aus dem Verhältnis der Teilspannungen berechnen. (Den Widerstand der Lampen setzen Sie dazu mit 100 Ω an.)

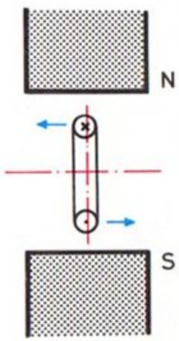
Jedoch sollten Sie die Messung der Teilspannung auch bei Betrieb mit nicht geglätteter und dann noch mit geglätteter (C = 940 μF) Gleichspannung vornehmen.



13.75

13.8 Die Spule im Magnetfeld

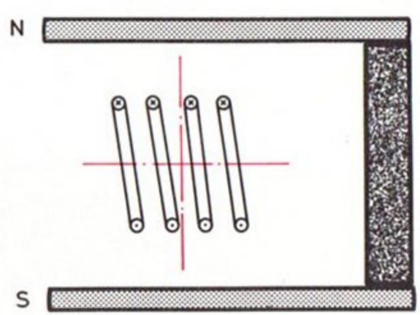
13.8.1 Der stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld



13.76

Wie Sie wissen, ist jeder stromdurchflossene Leiter von einem Magnetfeld umgeben. Befindet sich nun ein solcher Leiter samt seinem Magnetfeld im Wirkungsbereich eines anderen Magnetfeldes, z. B. in dem eines Dauermagneten, so müssen sich die beiden Magnetfelder beeinflussen. Ist der stromdurchflossene Leiter in einem derartigen System beweglich angeordnet, so werden sich das Magnetfeld des Leiters, und damit der Leiter selbst, so einstellen, daß sich beide Magnetfelder möglichst wenig gegenseitig beeinflussen. Die zu erwartende Bewegungsrichtung hängt von der „Richtung" des festen Magnetfeldes und von der Stromrichtung im Leiter ab.

Bild 13.76 zeigt eine solche Anordnung. Die (im Schnitt) dargestellte einzelne Leiterschleife ist beweglich auf einer Achse angeordnet, die – wie man sich vorstellen muß – senkrecht aus dem Schnittpunkt der roten Linien aus der Zeichnung hervorragt. Fließt nun Strom in der angegebenen Richtung (siehe nochmals Bild 13.41) durch die Schleife, dann dreht sie sich nach links.



13.77

Versuch

Ersetzen wir nach Bild 13.77 die Schleife durch eine Spule, so können wir den experimentellen Nachweis führen, daß unsere Überlegungen richtig sind.

Wegen der relativ steifen Zuleitungsdrähte zur Spule ist es besser, zur Verstärkung des Magnetfeldes der Spule einen Eisenkern einzusetzen. Benutzen Sie dazu das längere Stück des U-Kerns. Bild 13.78 zeigt die erste Baustufe, Bild 13.79 das fertige Modell.

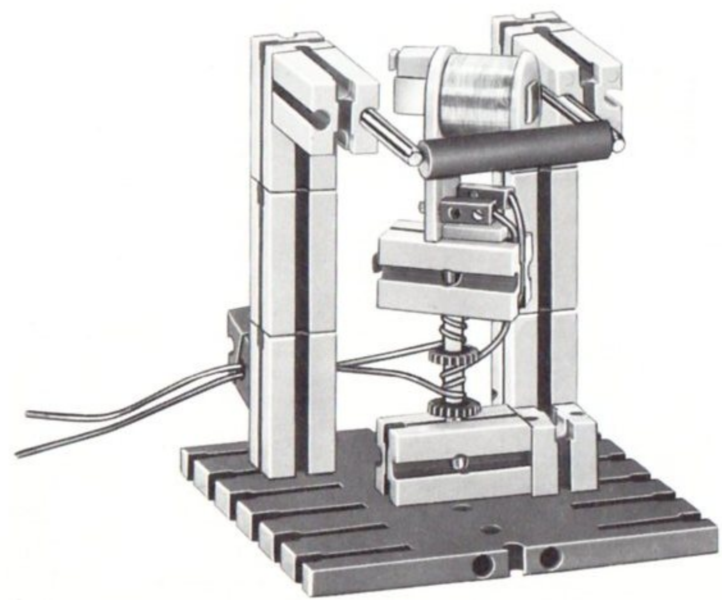
Die Zuleitungskabel wickeln Sie bitte möglichst locker um die Drehachse (und nicht so fest anziehen wie im Bild 13.79!) Die beiden Kabel werden gegensinnig gewickelt, so daß sich die Spule im stromlosen Zustand in eine bestimmte Lage einstellt. Die Kabellänge muß so bemessen werden, daß der Eisenkern der Spule im „Ruhestand" senkrecht zum Dauermagneten steht.

Wird nun der Elektromagnet nach Anschalten an eine Gleichspannungsquelle (0 . . . 6 V) von Strom durchflossen, so entsteht ein elektromagnetisches Feld. Aus den eben geschilderten Gründen dreht sich die Spule dann – je nach Stromrichtung – nach der einen oder der anderen Seite. Je höher die angelegte Spannung, d. h., je stärker der durchfließende Strom ist, um so größer wird die Anziehungskraft und damit die Ablenkung der Spule aus der Ruhelage.

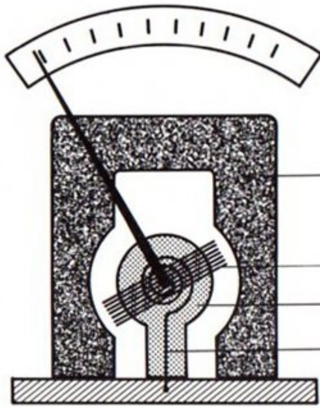
Wird der Strom ausgeschaltet, so versuchen die spiralig gewickelten Kabel, die Spule wieder in die Ausgangslage zurück zu ziehen. Das gelingt nicht ganz, weil die „Lagerreibung" bei unserem Modell ziemlich groß ist.

13.78

13.79



13.8.2 Das Drehspul-Meßwerk



13.80

(Diese Abbildung ist gegenüber Bild 13.79 um 180° gedreht.)

Ein Drehspulmeßwerk besteht aus einem Dauermagneten mit zwei Polschuhen und einer drehbar gelagerten einzelnen Spule (Spulenrähmchen oder kurz „Rähmchen“ genannt). Ein Beispiel zeigt Bild 13.80. Die Stromzuleitungen zum Spulenrähmchen erfolgen über Spiralfedern. Sie dienen zusätzlich dazu, daß das Rähmchen und der damit fest verbundene Meßwerkzeiger in der Ruhestellung (= Spule stromlos) eine bestimmte Stellung, nämlich die Null-Stellung, einnehmen. Zur Erhöhung der Wirkung ist zwischen Nord- und Südpol des Dauermagneten ein feststehender Eisenkern eingebaut. Um ihn dreht sich das Rähmchen herum. Die senkrechten Schenkel des Rähmchens können sich also in dem Luftspalt zwischen Magnet und Kern bewegen.

Wird das Rähmchen nun vom Strom durchflossen, so entsteht – wie bei dem zuletzt aufgebauten Versuchsmodell – zusätzlich ein Magnetfeld. Das Rähmchen samt Zeiger drehen sich so weit, bis das entstandene Drehmoment so groß ist wie das „Rückdrehmoment“ der beiden Spiralfedern.

Der Drehwinkel ist proportional der Stromstärke im Rähmchen. Wird, wie bei unserem ft-Meßgerät, keine lineare Skala gewünscht, so gestaltet man den Luftspalt zwischen dem Magneten und dem Kern entsprechend um.

Es ist leicht einzusehen, daß von einem solchen Meßwerk keine Wechselspannung (bzw. Wechselstrom) angezeigt werden kann.

13.8.3 Das Dreheisen-Meßwerk

Wechselstrom bringt jedoch ein Dreheisen-Meßwerk zum Ausschlag. Auch dieses Meßprinzip können wir mit unserer Spule erproben.

Versuch

Schneiden Sie sich bitte ein etwa 15×25 mm großes Stück aus festem Papier und rollen Sie es möglichst rund. Dann legen Sie es in das Innere der Spule nach Bild 13.81. Danach schneiden Sie aus einer Büroklammer oder aus etwa 1 mm dicken Nägeln zwei runde Eisenstäbchen von höchstens 15 mm Länge.

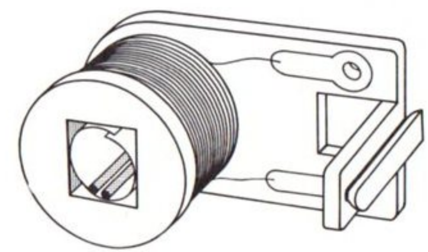
Wie werden sich die Stäbchen verhalten, wenn Sie die Spule an Gleichstrom schalten? Und was wird geschehen, wenn die Spule von Wechselstrom durchflossen wird?

Ergebnis

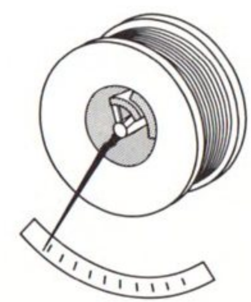
An den nebeneinanderliegenden Enden der beiden Stäbchen entstehen jeweils gleiche Pole, die sich gegenseitig abstoßen. Da das Innere der Spule ein Rohr ist, gehen die beiden Stäbchen um so weiter auseinander, je stärker die Magnetisierung, d. h. je größer die Stromstärke in der Spule ist. Überzeugen Sie sich davon durch Vorschalten verschieden großer Vorwiderstände.

Bei Wechselstrom wird zwar jedes der Stäbchen laufend ummagnetisiert, aber die Ummagnetisierung erfolgt stets gleichzeitig, so daß der Abstand der beiden Stäbchen dem Mittelwert des durch die Spule fließenden Wechselstroms entspricht.

Dieses Prinzip liegt dem Dreheisen-Meßwerk nach Bild 13.82 zugrunde. Das eine Eisenstück unseres Versuches ist in der Spule fest montiert, das andere ist drehbar gelagert. An ihm ist ein Zeiger befestigt. Auch hier wird die Null-Stellung durch nichtmagnetische Spiralfedern erzwungen.



13.81



13.82

14 Das Reed-Relais

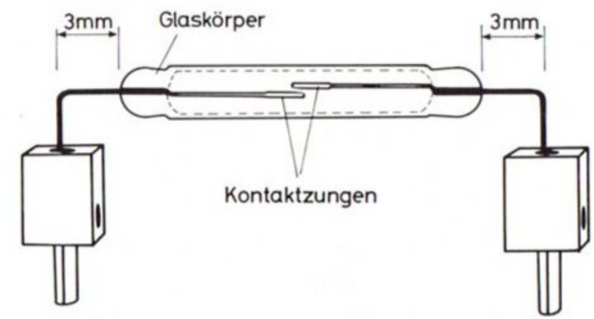
Es soll hier gleich darauf hingewiesen werden, daß das Thema „Relais“ in den Experimentier- und Modellbüchern 3 – 1 und 3 – 2 zum fischertechnik-Baukasten „hobby 3“ ganz ausführlich anhand vieler, sehr interessanter Modelle und praktischer Anwendungen behandelt ist. Wir können daher auf eine eingehendere Darstellung der Aufgaben und des Aufbaus der verschiedenen Relaisarten verzichten (dieses Buch würde sonst noch dicker!) und uns mit einem Relais beschäftigen, das in der modernen Nachrichtentechnik immer häufiger verwendet wird, nämlich mit dem in Ihrem hobby-Labor enthaltenen Reed-Relais (sprich: Ried-Relä).

14.1 Der Reed-Kontakt

Sicher haben Sie sich schon gefragt, was das kleine Glasröhrchen in der Kassette Ihres Baukastens zu bedeuten hat. An jeder Seite sind zwei Drahtanschlüsse herausgeführt, die schon mit ft-Steckern versehen sind. Das ist der Reed-Kontakt, den wir uns jetzt etwas näher ansehen wollen.

14.1.1 Aufbau des Reed-Kontaktes

Im Bild 14.1 sehen Sie eine Schemazeichnung, die zeigt, wie ein solcher Kontakt aufgebaut ist. Zwei „Kontaktzungen“ sind in einem Glaskörper eingeschmolzen; die Spitzen stehen ein klein wenig auseinder. Sie bestehen aus einem weichmagnetischen Material. Die „Zungenspitzen“ sind mit einem Rhodium-Metallbelag versehen, um ein „Kleben“ der Kontakte zu vermeiden.



14.1

Die ganze Anordnung ist im zugeschmolzenen Glasröhrchen von einem „Schutzgas“ umgeben, das überwiegend aus Stickstoff besteht. Der im Röhrchen herrschende Druck ist etwas höher als der normale Luftdruck. Dadurch wird die Funkenbildung zwischen den Kontaktzungen weitgehend unterdrückt, die den vom Techniker wenig geschätzten „Kontaktabbrand“ verursacht (siehe Abschn. 13.5.6). Solche Schädigungen der Kontaktzungen werden zusätzlich durch den Rhodiumbelag unterdrückt: Rhodium ist nämlich ein sogenanntes Edelmetall, das chemisch außerordentlich widerstandsfähig (resistent) und sehr wärmebeständig ist.

Bild 14.2 zeigt das Schaltbild für einen solchen Kontakt, der in „Ruhestellung“ geöffnet und in „Arbeitsstellung“ geschlossen ist; daher auch die Bezeichnung „Arbeitskontakt“. Sie kennen das Schaltzeichen bereits – es ist nichts anderes als eine Art Taster, der bei „Betätigung“ geschlossen wird. Man spricht daher auch von einem „Schließer“.

14.2

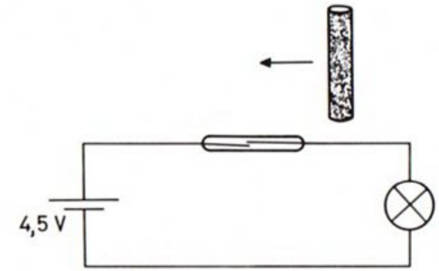
Betätigt wird unser Reed-Kontakt – wie Ihnen schon klar sein wird – durch magnetische Einwirkung. Wir wollen das gleich einmal ausprobieren.

14.1.2 Versuche mit dem Reed-Kontakt

Biegen Sie die Anschlußdrähte des Reed-Kontakts keinesfalls direkt am Glaskörper ab, da dieser dann leicht verletzt und das Bauelement damit zerstört werden kann. Der Abstand zwischen Glaskörper und „Biegestelle“ sollte mindestens 3 mm betragen (Bild 14.1)!

1. Versuch

Stecken Sie bitte den Reed-Kontakt auf das Experimentierfeld und fügen Sie ihn nach Bild 14.3 in die Schaltung ein. Das Schaltzeichen von Abb. 14.2 wurde mit der Andeutung des Röhrchens versehen, um Verwechslungen mit einem Ein-Taster zu vermeiden.



14.3

Beobachten Sie, wie sich der Kontakt verhält, wenn Sie das eine Ende des Stabmagneten einmal von links und einmal von rechts dem Röhrchen nähern und über seine ganze Länge hinwegführen.

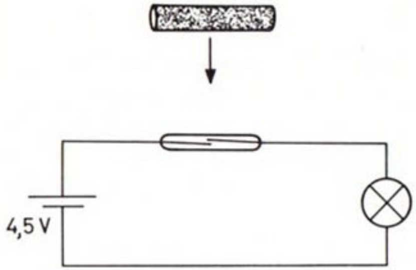
Was geschieht, wenn Sie den Stabmagneten genau in der Mitte des Röhrchens etwa 1 cm senkrecht über die „Zungenspitzen“ halten?

Ergebnis

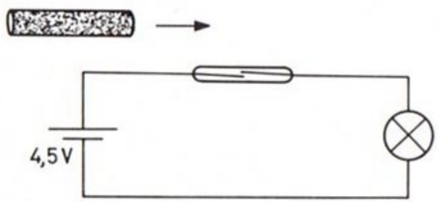
Nähert man einen Pol des Stabmagneten – egal, von welcher Seite – dem Röhrchenende auf etwa 2 cm, dann „schließt“ (der Fachmann sagt auch: „zieht“) der Kontakt und das Lämpchen brennt.

Genau in der Mitte über den Kontaktzungen kann man den Stabmagneten aber ganz an das Röhrchen heranbringen, ohne daß der Kontakt geschlossen wird. Das liegt daran, daß in der Mitte des Röhrchens beide Kontaktzungen „gleichnamig“ magnetisiert werden und sich daher gegenseitig abstoßen.

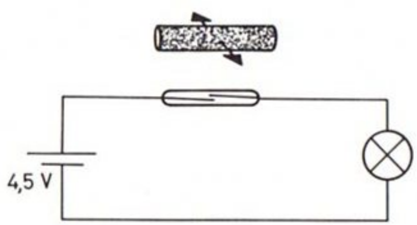
Es gibt also „Zonen“ am Röhrchen, in denen der Kontakt nicht schließt, wenn man nur einen Pol des Stabmagneten in einer Entfernung von etwa 1 bis 2 cm am Röhrchen vorbeiführt.



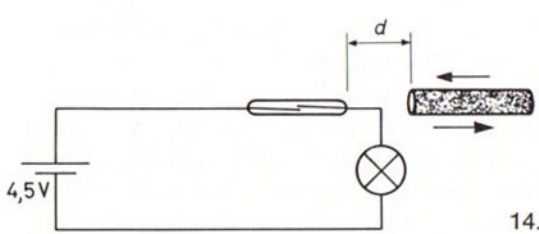
14.4



14.5



14.6



14.7

2. Versuch

Nähern Sie den Stabmagneten dem Reed-Kontakt gleichzeitig mit beiden Polen nach Bild 14.4. Was beobachten Sie jetzt? Wie groß ist die Entfernung zwischen Magnet und Kontakt, bei welcher der Kontakt anzieht, im Vergleich zum 1. Versuch?

Ergebnis

Die „Anzugsentfernung“ ist größer geworden, weil bei dieser Lage des Stabmagneten beide Pole voll zur Wirkung kommen: Jede Kontaktzunge wird jetzt „ungleichnamig“ magnetisiert. Dadurch wird die „Anzugsbereitschaft“ zwischen den beiden Kontaktzungen verstärkt.

3. Versuch

Führen Sie den Stabmagneten in etwa 2 cm Abstand parallel zum Reed-Kontakt über dem Röhrchen so vorbei, wie es Bild 14.5 zeigt. Gibt es auch jetzt Zonen, in denen der Kontakt nicht schließt? Sie werden feststellen, daß auch hierbei der Kontakt „flattert“.

4. Versuch

Probieren Sie bitte aus, wie der Stabmagnet am Kontakt vorbeigeführt werden muß, damit eine „eindeutige“, d. h. nur eine einmalige „Kontaktgabe“ erfolgt.

Ergebnis

Der Stabmagnet muß nach Bild 14.6 „quer“ zum Reed-Kontakt geführt werden, und zwar höchstens in einem Abstand von etwa 25 mm.

5. Versuch

Bild 14.7 zeigt eine weitere Schaltmöglichkeit. Im Bild ist dargestellt, wie Sie den Stabmagneten langsam dem Reed-Kontakt nähern müssen. Bei einer bestimmten Entfernung d_1 wird der Kontakt geschlossen und das Lämpchen leuchtet auf.

Nun entfernen Sie langsam den Stabmagneten wieder. Wie groß ist die Entfernung (in bezug auf d_1), bei der das Lämpchen verlischt? Wir nennen sie d_2.

Wiederholen Sie den Versuch zwei- oder dreimal.

Ergebnis

Die Entfernung d_1 zwischen Kontakt und Stabmagnet, bei welcher der Kontakt schließt (das Lämpchen leuchtet auf), ist erheblich kleiner als die Entfernung d_2, bei welcher sich der Kontakt wieder öffnet (das Lämpchen verlischt).

Da der Reed-Kontakt unter dem Einfluß des Magnetfeldes (Kraftlinien) des Stabmagneten betätigt wird, kann man statt von der Entfernung d auch von der magnetischen Kraft sprechen, die das Schließen oder das Öffnen des Kontakts bewirkt. Dann könnte man den beobachteten Sachverhalt auch so formulieren:

Die magnetische Kraft, die den Kontakt zum Schließen veranlaßt, ist größer als die Kraft, bei welcher der Kontakt wieder geöffnet wird. Die „Anzugskraft" ist also größer als die sog. „Haltekraft", die mindestens notwendig ist, damit das gezogene Relais nicht abfällt.

Schlußfolgerung

Es ist einzusehen, daß die „Anzugskraft" so viel größer sein muß: Sie wissen ja noch von Abschn. 13.4.5 her, daß der Luftspalt zwischen den beiden Kontaktzungen einen „magnetischen Widerstand" darstellt, der erst durch eine größere magnetische Kraft überwunden werden muß.

Wenn sich die Kontaktzungen berühren, dann kommt man mit weniger Kraft aus, d. h. der Abstand d zwischen Kontakt und Magnet (Bild 14.7) kann größer werden.

Wird die Entfernung d zu groß, dann reicht die magnetische Kraft nicht mehr aus, um den Kontakt „zu halten": er „fällt ab", wie der Fachmann sagt.

Auf diese wichtigen Zusammenhänge kommen wir im nächsten Abschnitt noch zurück.

Der Reed-Kontakt wurde so ausgewählt, daß er in die Nut der ft-Grundbausteine hineinpaßt. Bild 14.8 zeigt, wie es gemacht wird. Damit der Kontakt nicht aus der Nut herausrutscht, umwickeln Sie das Röhrchen zuvor mit etwas Papier oder heften ihn mit etwas Selbstklebestreifen am Baustein fest.

14.8

Auf diese Weise können Sie den Kontakt für alle ft-Modelle verwenden, bei denen ein am „Kontakt-Baustein" vorbeigeführter oder angenäherter ft-Magnet ein Signal auslösen soll, z. B. das Aufleuchten eines Lämpchens.

So kann mit einem solchen „Magnetschalter" angezeigt werden, ob ein Aufzug oben oder unten ist oder gerade an einem „Stockwerk" vorbeifährt.

Oder ein Schienenfahrzeug löst beim Überfahren des „Kontakt-Bausteins" ein entsprechendes Signal aus.

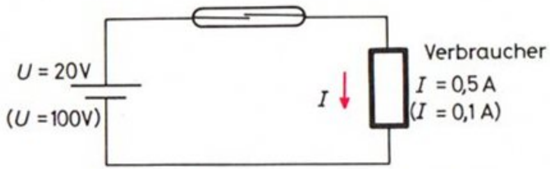
Der ft-Baukasten „hobby 3" bietet eine Fülle von Anwendungsmöglichkeiten für den Reed-Kontakt aus Ihrem hobby-Labor.

14.1.3 Maximale Schaltleistung

Nun müssen Sie noch wissen, welche „Lasten" der Reed-Kontakt zu schalten vermag, ohne Schaden zu nehmen.

Die max. zulässige Schaltleistung P_{max} beträgt 10 Watt. Der höchste Wert der „Schaltgleichspannung" beträgt 100 Volt. (Das ist die höchste Spannung, die bei geöffnetem Kontakt an den Kontaktzungen anliegen darf.) Die im Dauerbetrieb maximal zulässige Schaltstromstärke beträgt 500 mA (= 0,5 A).

Das bedeutet, daß beim Öffnen eines Reed-Kontaktes, der von einer Stromstärke $I = 0{,}5$ A durchflossen wird, höchstens eine Spannung $U = 10$ W : 0,5 A = 20 V auftreten darf (Bild 14.9).



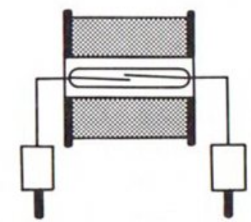
14.9

Beträgt die Betriebsspannung U jedoch 100 V, dann darf höchstens ein Strom von 10 W : 100 V = 0,1 A (= 100 mA) geschaltet werden.

Der Reed-Kontakt kann also ohne weiteres zum Schalten auch von den großen ft-Motoren, die bei 8 V einen Strom von etwa 200 mA ziehen, verwendet werden.

14.2 Kontakt + Spule = Relais

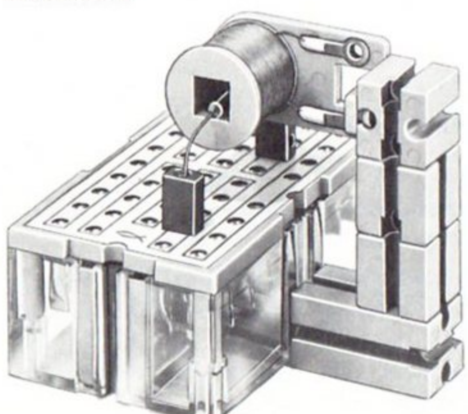
Selbstverständlich kann der Reed-Kontakt auch durch das Magnetfeld einer Spule betätigt werden. Er wird zu diesem Zweck einfach nach Bild 14.10 durch die „leere" Spule gesteckt. Abb. 14.11 zeigt, wie diese Anordnung, welche ein Reed-Relais darstellt, am Experimentierfeld-Baustein montiert werden kann.



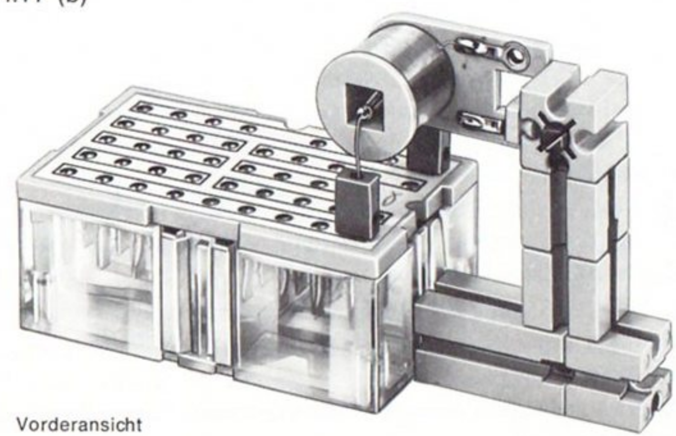
14.10

14.11 (a)

Seitenansicht



14.11 (b)



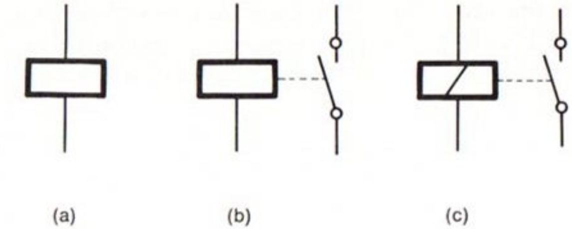
Vorderansicht

Bevor wir mit den Versuchen beginnen, soll noch das Schaltbild eines Relais erläutert werden. Wenn eine Spule als Antriebssystem eines Relais verwendet wird, so setzt man im Schaltplan das im Bild 14.12 (a) dargestellte Schaltzeichen ein.

Das schon bekannte Schaltzeichen für einen Arbeitskontakt (Schließer) wird durch eine „Wirkverbindung“ (gestrichelte Linie im Bild 14.12 (b) mit dem Schaltzeichen der Spule verbunden. Dadurch wird zum Ausdruck gebracht, daß die Kontaktbetätigung durch die Spule „bewirkt“ wird – beim Reed-Relais durch direkte Einwirkung des Magnetfeldes der Spule auf den Kontakt (Bild 14.10). (Bei allen anderen Relais wirkt das Magnetfeld über den mechanischen Umweg eines „Ankers“, also indirekt, auf die Kontaktgabe. Das Schaltzeichen dafür zeigt Bild 14.12 (c).)

Sie werden sehr bald merken, daß an Ihre Experimentierkunst bei den Versuchen mit dem Reed-Relais größere Anforderungen gestellt werden als bisher – das Relais nimmt nämlich allerhand Platz weg. Die Schemazeichnungen des Experimentierfeldes (im Anhang) werden Ihnen jetzt sicher gute Dienste leisten, wenn Sie eine verzwickte Versuchsanordnung schriftlich festhalten wollen.

Für die folgenden Versuche ist es notwendig, daß Sie die magnetischen Pole der Spule bei deren jeweiligem Anschluß an die Spannungsquelle kennen.

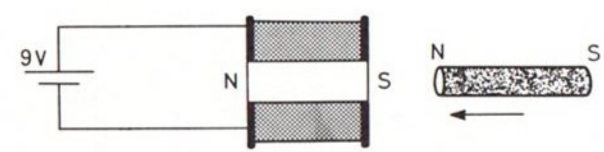


14.12

Versuch

Schließen Sie bitte die Relais-Spule so an eine Spannung von etwa 9 V an, wie es im Bild 14.13 dargestellt ist. Nähern Sie nun den Stabmagneten mit dem bereits gekennzeichneten Nordpol-Ende in der angegebenen Weise. Wird der Stabmagnet in die Spule hineingezogen, dann ist das dem Stabmagneten zugewandte Ende der Spule ein Südpol. Kennzeichnen Sie den (+)Anschluß und die N-Pol-Seite der Spule z. B. mit Selbstklebeetiketten.

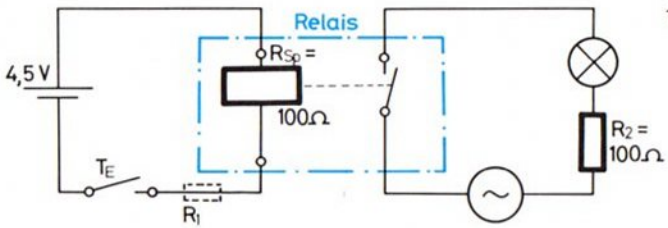
Bei umgekehrter Polung müssen Sie den Stabmagneten mit sanfter Gewalt in die Spule hineindrücken. Er wird buchstäblich auf der anderen Seite wieder „herauskatapultiert“. Der Effekt ist ziemlich verblüffend.



14.13

14.2.1 Der elektromagnetische Schalter

Im vorigen Abschnitt haben Sie den magnetisch betätigten Kontakt und auch einige Anwendungen kennengelernt. Jetzt bauen wir einen elektromagnetisch betätigten Reed-Kontakt, nämlich das eigentliche Reed-Relais, auf.

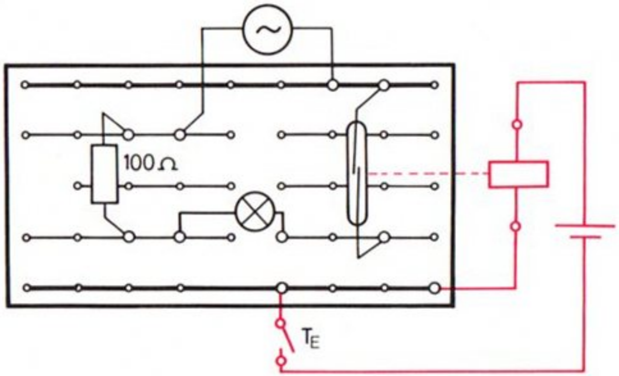


14.14

Über die Verwendung von R_1 siehe „Versuchsvorschlag“ auf Seite 261!

Versuch

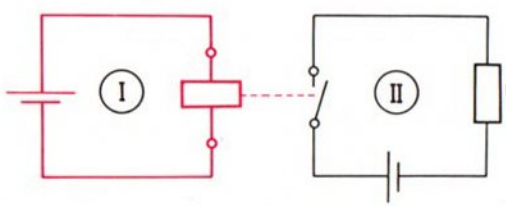
Abb. 14.14 zeigt die Schaltung, Bild 14.15 den Steckplan. Wenn Sie die Spule, die beim Relais als „Erregerspule“ bezeichnet wird, über T_E an Spannung legen, wird der Reed-Kontakt und damit auch der Wechselstromkreis, in dem das Lämpchen liegt, geschlossen: Das Lämpchen leuchtet auf. Der Widerstand $R_2 = 100\ \Omega$ verhindert, daß das Lämpchen zu hell brennt. Wird T_E wieder geöffnet, so verschwindet das Magnetfeld der Erregerspule, der Reed-Kontakt fällt daher ab und unterbricht den Wechselstromkreis; das Lämpchen erlischt.



14.15

Schlußfolgerung

Das Relais ist also ein elektromagnetisches Schaltelement, durch das zwei verschiedene Stromkreise „nichtleitend“ miteinander „verkoppelt“ werden.



14.16

Erreger- und Lastkreis

Dieser Sachverhalt ist im Bild 14.16 noch einmal deutlich dargestellt. Der Stromkreis I wird auch als „Erregerkreis“ (weil in ihm die Erregerspule liegt) oder als „Steuerkreis“ bezeichnet, weil durch ihn der Stromkreis II geöffnet oder geschlossen, d. h. „gesteuert“ wird.

Im Stromkreis II, der in unserem Fall von einer Wechselstromquelle gespeist wird, liegt der zu schaltende Lastwiderstand. Deswegen nennt man diesen Stromkreis auch „Last-“ bzw. „Schaltkreis“. Beide sind elektrisch völlig voneinander getrennt: Kreis I ist in unserem Beispiel ein Gleichstrom- und Kreis II ist ein Wechselstromkreis. Die Leistung, welche die Erregerspule aufnehmen muß, damit das Relais „zieht“, ist verhältnismäßig gering. Dagegen kann durch den im Schaltkreis liegenden Verbraucher ein sehr viel größerer Strom fließen. Das hängt allein von der max. zulässigen Schaltleistung des Kontaktes ab – in unserem Fall beträgt sie 10 Watt.

Man kann also durch ein Relais mit Hilfe einer relativ kleinen Leistung wesentlich größere Leistungen „steuern“. Deswegen finden Sie heute in allen Zweigen der Elektrotechnik Relais der verschiedensten Bauart – vom Miniaturrelais in der Elektronik bis zum „Schaltschütz“, kurz „Schütz“ genannt, in der Starkstromtechnik. (Der Starkstromtechniker bevorzugt diesen Ausdruck. Schaltschütze können – je nach Ausführung – sogar mehrere hundert Ampere schalten.)

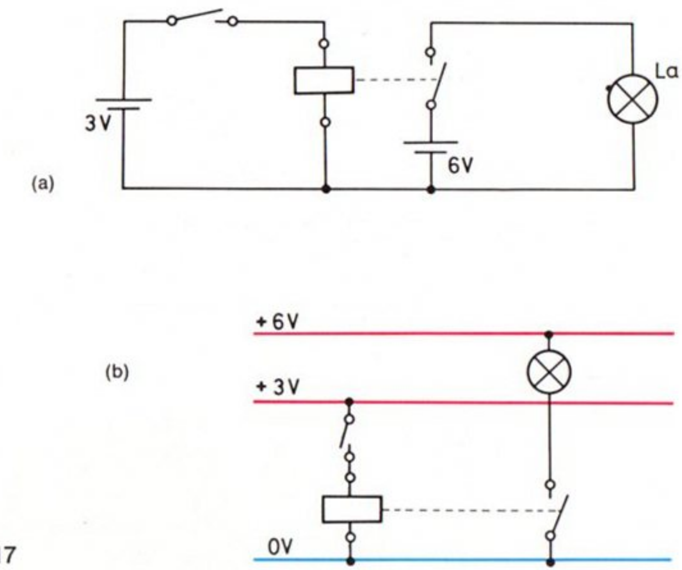
Gemeinsames Bezugspotential

Sollen zwei Gleichstromkreise durch ein Relais verkoppelt werden, dann kann man ohne weiteres zwei Pole (z. B. die (–)Pole) der beiden Energiequellen zusammenschalten. Das vereinfacht den Schaltungsaufbau. (Man sagt: ein gemeinsames Bezugspotential wählen.)

Versuch

Bild 14.17 zeigt zwei Ausführungen des Stromlaufplans, die elektrisch dasselbe aussagen. Für die Quelle im Erregerkreis benutzen Sie zwei Babyzellen, und für die Quelle im Lastkreis eignet sich der Gleichstromausgang des Netzgerätes „mot 4“. Für La könnten Sie auch ein ft-Lämpchen aus „hobby 3“ oder „e-m“ einsetzen.

Nachdem Sie sich davon überzeugt haben, daß die Schaltung funktioniert, bauen Sie sie vielleicht so um, daß die (+)Pole beider Quellen das gemeinsame Bezugspotential bilden. Entwerfen Sie zuvor bitte den entsprechenden Stromlaufplan entsprechend dem Bild 14.17 b.

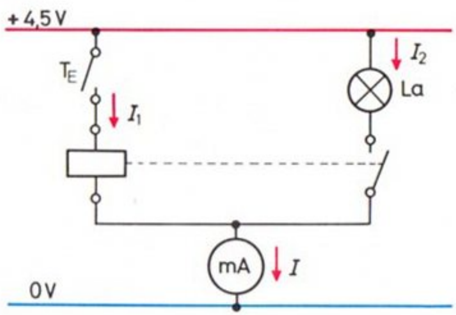


14.17

In vielen Fällen darf man die Schaltung noch weiter vereinfachen, indem man beide Stromkreise mit nur einer Quelle versorgt.

Versuch

Bild 14.18 zeigt den Stromlaufplan. Bauen Sie bitte die Schaltung auf und überzeugen Sie sich, daß die Sache funktioniert. Welchen Nachteil hat aber diese Schaltung? Messen Sie den Strom I!



14.18

Ergebnis

Vorteil: Die Schaltung ist denkbar einfach geworden.

Nachteil: Der Vorteil, zwei verschiedenartige Stromkreise miteinander verkoppeln zu können, ist verloren gegangen.

Um eine solche Schaltung zu betreiben, bedarf es keines Relais – da genügt auch ein einfacher Eintaster.

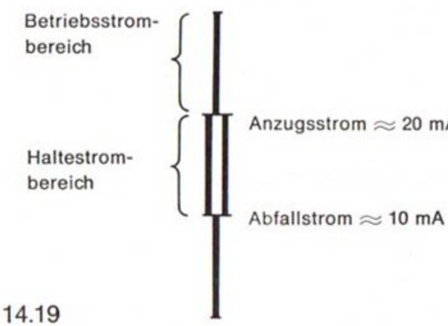
Außerdem wird die Spannungsquelle bei dieser Schaltung doppelt belastet, da sie ja b e i d e Stromkreise versorgen muß.

14.2.2 Die wichtigsten Kenndaten eines Relais

Anzugsstrom

So wird der Strom bezeichnet, der mindestens erforderlich ist, damit das Relais „anzieht" (oder „anspricht").

Bei unserem selbstgebauten Reed-Relais ist $I_{an} \approx 20$ mA (Bild 14.19). Die für die erforderliche Stärke des Magnetfeldes verantwortliche Durchflutung Θ (siehe Abschn. 13.4.4) beträgt dann 0,02 A · 1500 W = 30 Amperewindungen.



14.19

Haltestrom

Das ist diejenige Stromstärke, die mindestens notwendig ist, um den angezogenen Kontakt zu halten.

Abfallstrom

Wird der die Erregerspule durchfließende Strom (Erregerstrom) so weit verringert, daß der Kontakt gerade wieder in seine Ausgangsstellung (Ruhestellung) zurückspringt, dann ist der Wert des „Abfallstroms" erreicht. Bei unserem Relais ist $I_{ab} \approx 10$ mA.

Betriebsstrom

Damit das Relais schnell und sicher „zieht", ist der Betriebsstrom in der Praxis immer größer als der Anzugsstrom.

Schaltspiele

So nennt man einen „Schaltzyklus" von Ein–Aus. Reed-Relais werden in der Regel mehrere Millionen Schaltspiele „alt".

Schaltgeschwindigkeit

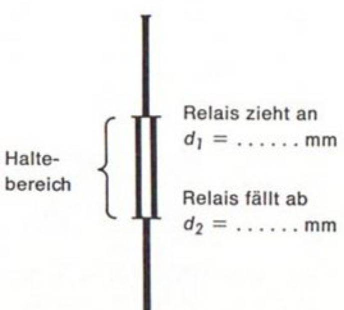
Da bei einem Reed-Relais keine schweren mechanischen Teile (wie bei anderen Relaisarten) zu bewegen sind, ist die Schaltgeschwindigkeit sehr groß: Der Kontakt kann pro Sekunde über hundert Schaltspiele sicher ausführen. Darüber wäre noch manches zu sagen – weil aber hohe Schaltgeschwindigkeiten für unsere Versuche nicht in Betracht kommen, brauchen wir auf dieses Thema, das vor allem in der Nachrichtentechnik eine wichtige Rolle spielt, nicht näher einzugehen.

Versuchsvorschlag

Versuchen Sie bitte nach Bild 14.14 zu ermitteln, ob die Angaben $I_{an} \approx 20$ mA und $I_{ab} \approx 10$ mA stimmen. Sie müssen dazu geeignete Widerstandswerte für den im Bild gestrichelt gezeichneten R_1 einsetzen.

14.2.3 Relais mit Reed-Kontakt als Öffner

Sie brauchen jetzt nicht in Ihrem hobby-Labor nach einem 2. Reed-Kontakt zu suchen. Wir funktionieren durch geeignete Maßnahmen den Schließer zu einem Öffner um. Das gelingt mit Hilfe unseres Stabmagneten. Zum besseren Verständnis ist im Bild 14.20 (entsprechend dem Bild 14.19) eine Grafik wiedergegeben, aus der die magnetische Wirkung des Stabmagneten auf den Reed-Kontakt hervorgeht. (Sie hatten entsprechende Versuche im Abschn. 14.1.2 schon durchgeführt.)



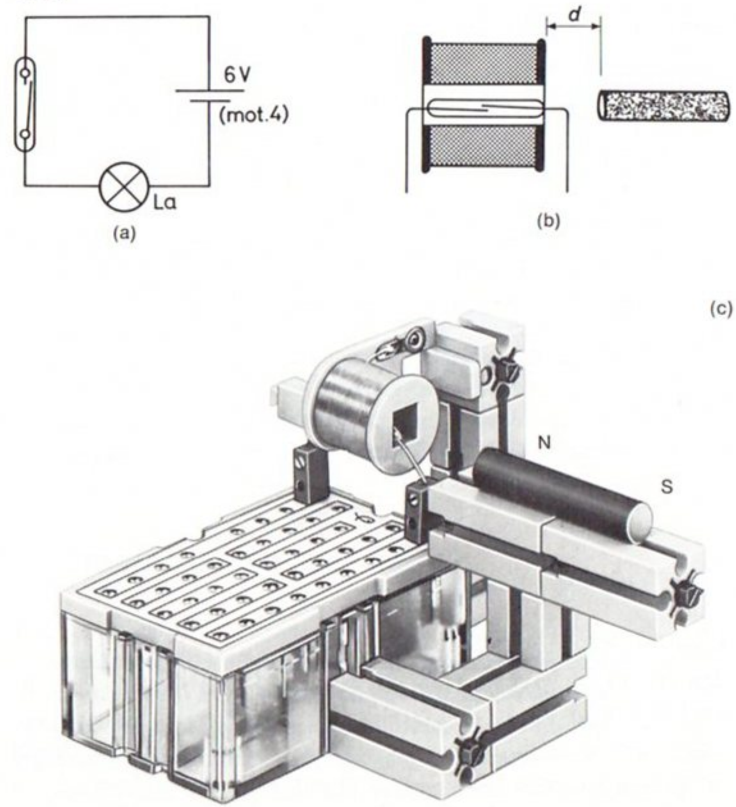
14.20

1. Versuch

Die Versuchsanordnung ist im Bild 14.21 dargestellt. Das Teilbild (a) zeigt das Schaltprinzip; Teilbild (b) verdeutlicht, was unter der Entfernung d (nach Bild 14.20) zu verstehen ist, und aus Teilbild (c) können Sie ersehen, wie Sie eine Vorrichtung zur Lagerung des Stabmagneten aus wenigen ft-Bausteinen herstellen können.

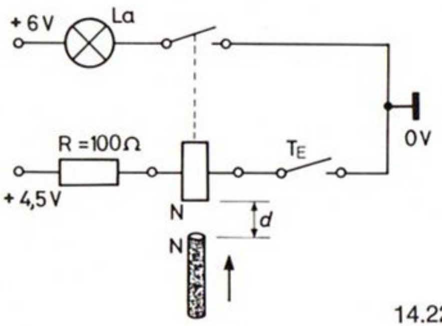
Ermitteln Sie nun zunächst die Anzugs- und Abfallentfernung d_1 und d_2 nach Bild 14.20 und tragen dort die gefundenen Werte ein.

14.21



Bauen Sie jetzt bitte die Schaltung nach Bild 14.22 auf und schalten Sie die Relais-Spule so an die Batterie, daß beim Betätigen von T_E an dem Spulenende gegenüber dem Stabmagneten ein magnetischer Nordpol auftritt.

Schieben Sie nach dem Loslassen von T_E den Stabmagneten so weit an die Spule heran, daß der Kontakt gerade anzieht und das Lämpchen leuchtet. Drücken Sie nun den Taster T_E. Was geschieht?



14.22

Ergebnis

Bei Tasterdruck verlischt das Lämpchen. Nach Loslassen von T_E leuchtet das Lämpchen wieder. In „Ruhestellung“ ist der Reed-Kontakt also geschlossen und in „Arbeitsstellung“ geöffnet. Mit anderen Worten: Der Reed-Kontakt ist jetzt zum „Öffner“ geworden.

Schlußfolgerung

Der Effekt beruht darauf, daß das Magnetfeld des Stabmagneten so auf den Kontakt einwirkt, daß er bei nicht betätigtem Taster geschlossen bleibt. Wird nun die Spule über R und T_E an Spannung gelegt, so entsteht ein Magnetfeld in der Spule, das dem Magnetfeld des Stabmagneten entgegengesetzt gerichtet, ja vielleicht sogar stärker als dieses ist: Der Kontakt fällt ab.

2. Versuch

Schieben Sie nun den Stabmagneten fast ganz an die Spule heran und betätigen Sie T_E.

Ergebnis

Das Magnetfeld der Spule ist zu schwach, um sich gegen das Feld des Stabmagneten durchzusetzen: Das Lämpchen leuchtet ständig.

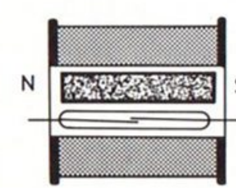
3. Versuch

Machen Sie das Spulenfeld dadurch stärker, daß Sie den 100-Ω-Widerstand aus der Schaltung herausnehmen. Wie verhält sich jetzt das Lämpchen bei Tasterdruck?

Ergebnis

Da nach Entfernung von R die Stromstärke und damit die Stärke des Magnetfeldes der Spule größer geworden sind, funktioniert die Anordnung wieder als „Relais mit Öffnerkontakt“.

Auch in der Praxis werden Reed-Relais mit Öffner nach diesem Prinzip verwirklicht, wobei der wirksame Stabmagnet in die Spule miteinbezogen wird. Bild 14.23 zeigt eine Schemazeichnung.



14.23

14.2.4 Relaiskontakt mit Selbsthaltung

Versuch

Setzen Sie bitte den 100-Ω-Widerstand wieder in die Schaltung 14.22 ein und drehen Sie den Stabmagneten um. Beide Magnetfelder sind jetzt „gleichgerichtet". Schieben Sie den Stabmagneten nun so an das Spulenende heran, daß die Entfernung etwas weniger als die „Abfallentfernung d_2" (Bild 14.20) beträgt. Das Lämpchen leuchtet nach Betätigung von T_E auf und bleibt brennen, auch wenn Sie T_E wieder loslassen. Das Lämpchen verlischt erst, wenn Sie den Stabmagneten weiter zurückziehen oder wenn Sie einen ferromagnetischen Gegenstand, z. B. eine Taschenmesserklinge oder einen Schraubenzieher, zwischen Magnetstab und Spule bringen. (Dadurch wird ja das Magnetfeld des Stabmagneten sozusagen „abgelenkt".)

Schlußfolgerung

Wieder beruht der Effekt auf der Wechselwirkung der beiden Magnetfelder. Im „Haltebereich" ist das Stab-Magnetfeld zu schwach, um den Kontakt zu schließen, aber stark genug, um den Kontakt zu halten, wenn er erst einmal „angezogen" hat. Das Anziehen des Kontakts wird durch Tasterdruck, d. h. durch das gleichsinnig gerichtete Spulen-Magnetfeld erreicht.

Nach Loslassen des Tasters, bleibt der Kontakt geschlossen.

14.2.5 Gepolte Relais

Ein Relais wird als „gepolt" oder auch als „polarisiert" bezeichnet, wenn es nur mit einer bestimmten elektrischen Polung betrieben werden kann. Wird die Erregerspule umgekehrt gepolt an die Quelle gelegt, dann zieht das Relais nicht an. Auch wir können ein solches Relais verwirklichen.

Versuch

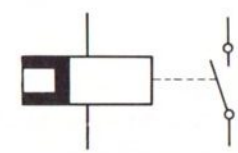
Drehen Sie den Stabmagneten wieder um, so daß die Magnetfelder gegensinnig gerichtet sind, und bringen Sie ihn auf eine Entfernung zur Spule, die ein klein wenig größer ist als die „Abfallentfernung d_2" (Bild 14.20). Sie können das Relais durch Tasterdruck nicht zum Anziehen bringen: Das Lämpchen bleibt dunkel.

Polen Sie die Anschlüsse der Erregerspule um, dann spricht das Relais in der gewohnten Weise an.

Schlußfolgerung

Obwohl der Magnetstab etwas außerhalb des Haltebereichs liegt, genügt dennoch die Kraft seines gegensinnig gerichteten Magnetfeldes, um das Spulen-Magnetfeld so zu schwächen, daß dessen Kraft nicht mehr ausreicht, um den Kontakt zu schließen.

Wird das Spulen-Feld durch Umpolen der Anschlüsse umgedreht, dann wirkt die Kraft des Stab-Feldes beim Einschalten unterstützend; der Reed-Kontakt schließt. Seine Kraft reicht jedoch nicht aus, um den Kontakt zu halten, wenn die Erregerspule abgeschaltet wird.



14.24

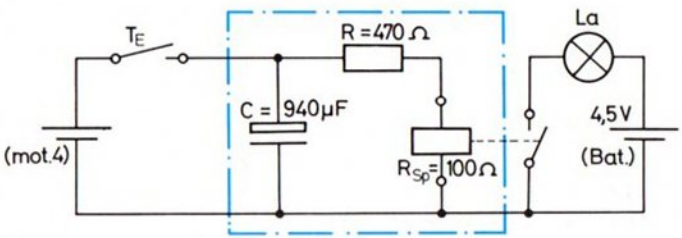
Das Schaltzeichen für ein polarisiertes Relais zeigt Bild 14.24.

14.2.6 Relais mit Abfallverzögerung

Die sogenannten „Verzögerungsschaltungen" spielen in der modernen Steuertechnik eine ganz wichtige Rolle. Im „hobby-Labor 3" werden wir uns noch sehr eingehend damit beschäftigen und solche Schaltungen aufbauen. In diesem Abschnitt wollen wir zunächst nur das Prinzip, das allen „Zeitschaltungen" zugrunde liegt, anhand unseres Reed-Relais verdeutlichen. Nachdem Sie das Kapitel 12 aufmerksam „studiert“ haben, wird Ihnen ohne weiteres klar sein, daß in jeder „Zeitschaltung“ ein Kondensator die ausschlaggebende Rolle spielt. Der nun folgende Versuch basiert auf den Erkenntnissen, die Sie im Abschnitt 12.6.3 gewonnen haben.

1. Versuch

Im Bild 14.25 ist wieder unsere schon bekannte Relais-Schaltung dargestellt. Neu ist der Kondensator C = 940 µ (470 µF ‖ 470 µF), der parallel zur Reihenschaltung Erregerspulenwiderstand (≈ 100 Ω) + R (= 470 Ω) liegt.



14.25

Bauen Sie die Schaltung bitte auf, wobei Sie zur Versorgung des Erregerstromkreises den Gleichstromausgang des ft-Netzgerätes benutzen sollten. Für den Lastkreis genügt eine Spannungsquelle von etwa 4,5 Volt. Wie verhält sich das Lämpchen bei Betätigung von T_E?

Ergebnis

Bei Schließen von T_E zieht das Relais an und La leuchtet sofort auf. Wird T_E geöffnet, so leuchtet La deutlich etwas nach, bevor es verlischt.

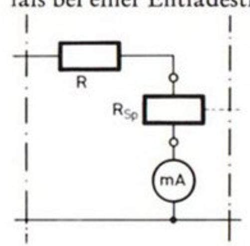
Der Kondensator bildet mit dem Widerstand R und dem Widerstand der Erregerspule zusammen ein RC-Glied. Beim Drücken von T_E wird der Kondensator auf die volle Betriebsspannung U aufgeladen. Nach dem Öffnen von T_E entlädt sich der Kondensator über $R + R_{sp} \approx 570\ \Omega$. Und das ergibt die „Verzögerungszeit“ für das Abfallen des Relais.

Schlußfolgerung

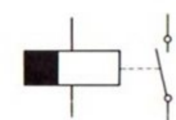
Die „Abfallverzögerung“ ist abhängig von der Zeitkonstanten τ des RC-Gliedes. In unserem Fall beträgt $\tau = 0{,}00057\ \text{M}\Omega \cdot 940\ \mu\text{F} = 0{,}54$ s; nach etwa $2\,\tau \approx 1$ s hat der Entladestrom den Wert des Abfallstroms (≈ 10 mA) unterschritten; das Relais fällt ab und das Lämpchen erlischt.

Soll die Verzögerungszeit vergrößert werden, so müssen entweder C oder R oder beide größere Werte haben. R kann nicht größer werden, weil dann der Wert des „Anzugsstroms“ für das Relais nicht mehr erreicht wird. Also muß C vergrößert werden. Wer den ft-Gleichrichter-Baustein besitzt, kann statt der beiden 470-µF-Kondensatoren den darin eingebauten 2200-µF-Kondensator in die Schaltung einsetzen. Die Verzögerungszeit wird dementsprechend länger.

Übrigens: Wenn Sie Ihren Strommesser nach Bild 14.26 in die Schaltung 14.25 einsetzen, können Sie deutlich sehen, daß das Relais bei einer Entladestromstärke von etwa 10 mA abfällt.



14.26



14.27

Noch eins: Der Kondensator in der Schaltung 14.25 hat noch eine andere „Funktion“: Er wirkt beim Drücken von T_E gleichzeitig als Glättungskondensator (siehe Kap. 12.8!). Deswegen erreicht die Eingangsspannung U eine Höhe von etwa 12 V, so daß die Anzugsstromstärke $I_{an} = 12\ \text{V} : 570\ \Omega = 21$ mA gut erreicht wird. Das Schaltzeichen für ein „Relais mit Abfallverzögerung“ zeigt Bild 14.27.

14.3 Das Reed-Relais im Wechselstromkreis

Da wir ein „hobby-“ und kein „Ausbildungslabor“ haben, können wir uns ruhig erlauben, ein paar Schaltungen auszuprobieren, die in der Technik normalerweise nicht angewendet werden.

Wechselstrom-Relais sind z. B. in der Praxis so konstruiert, daß das regelmäßige Wechseln von Stromrichtung und Stromstärke sozusagen „unschädlich“ ist: Ein solches Relais zieht beim Einschalten des Wechselstroms genau so ruhig und sicher an, also ob es mit Gleichstrom betrieben würde.

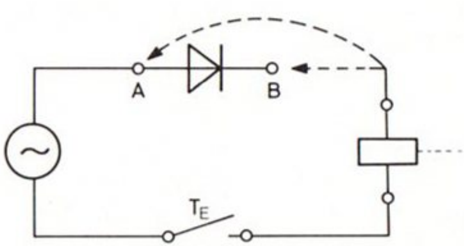
Wir aber wollen unseren Reed-Kontakt ruhig „flattern“ lassen und sehen, was man damit vielleicht anfangen könnte.

14.3.1 Das Relais als Summer

Was passiert, wenn wir unser Reed-Relais an eine Wechselspannung schalten?

Versuch

Bauen Sie bitte die Schaltung 14.28 auf. Als Quelle benutzen wir den Wechselspannungsausgang des ft-Netzgerätes „mot. 4“.



14.28

Drücken Sie T_E und verbinden Sie die Erregerspule zuerst mit dem Punkt A und dann mit dem Punkt B.

Ergebnis

Wird das Relais mit Punkt A, d. h. direkt mit der Wechselspannungsquelle verbunden, dann „summt“ das Relais mit einem höheren Ton, als wenn es mit B verbunden wird.

Schlußfolgerung

Im Kap. 11 (Diode) und im Kap. 12.8 (Glättungskondensator) wurde bereits eingehend behandelt, was wir zur Erklärung dieser „musikalischen“ Erscheinung über den Wechselstrom wissen müssen. Im Wechselstromkreis ändert das Magnetfeld der Erregerspule ständig seine Stärke und 100mal pro Sekunde auch seine Richtung. Hundertmal in der Sekunde wird der Reed-Kontakt geschlossen und wieder geöffnet. Da die Kontaktzungen nicht aus Watte sind, verursachen sie bei jedem Schaltspiel natürlich ein Geräusch. Bei der Geschwindigkeit ergibt das im Endeffekt ein „Summen“. Und was Sie da hören, das ist der berühmt-berüchtigte „Netzbrumm“. Im „hobby-Labor 3“ werden wir ihn ganz komfortabel mit Hilfe einer elektronischen Schaltung über einen Lautsprecher zu Gehör bringen.

Verbinden Sie das Relais „hinter“ der Diode mit dem Punkt B, dann hören Sie nur das „Schnarren“, das 50 Schaltspiele pro Sekunde erzeugen: Die Diode hat ja eine „Halbwelle“ unterdrückt, wie Sie noch vom Kap. 11 her wissen.

Bei einer „Zweiweggleichrichtung“ kommen Sie wieder auf volle „Tourenzahl“. Sie können sich davon überzeugen, wenn Sie das Relais an den Gleichspannungsausgang von „mot. 4“ legen. Die noch vorhandene Restwelligkeit läßt das Relais munter summen, was bei Relais-Schaltungen höchst unerwünscht ist. Mit einem Glättungskondensator wird „der Brumm“ beseitigt.

In der Praxis wird natürlich kein Mensch auf die Idee kommen, ein Relais als „Summer“ zu benutzen, obwohl andere Relais, wie z. B. das Relais aus dem „hobby-3-Baukasten“, einen beachtlichen Spektakel verursachen, wenn sie an Wechselstrom gelegt werden.

Wie ein mechanischer Summer in der Praxis aufgebaut wird, ist im Modell- und Experimentierbuch hobby 3–1 auf Seite 45 an einem funktionstüchtigen Modell sehr gut dargestellt.

14.3.2 Einweggleichrichtung mit Relais

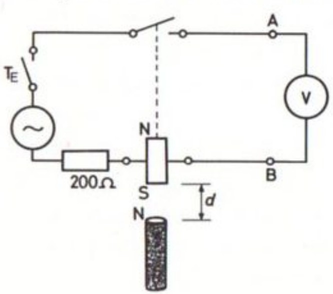
Auch die Gleichrichtung von Wechselspannung mit Hilfe eines Relais ist natürlich eine technische „Schnapsidee“. Sie haben ja im Kap. 11 gesehen, wie einfach und wirksam diese Aufgabe mit einer Diode gelöst wird. Trotzdem wollen wir spaßeshalber eine solche Gleichrichter-Schaltung mit unserem Relais aufbauen.

Überlegung

Eine Einweg-Gleichrichtung müßte mit Hilfe des Reed-Relais zu verwirklichen sein, wenn es gelingt, das Relais dazu zu bringen, nur dann anzuziehen, wenn eine positive (oder eine negative) Halbwelle die Erregerspule „passiert“. Sie brauchen nicht lange zu überlegen – Sie haben das bereits bewerkstelligt, und zwar im Abschn. 14.2.5! Die Versuchsanordnung zeigten die Bilder 14.21 und 14.22. Des Rätsels Lösung lautet: Polarisiertes Relais!

Versuch

Bauen Sie bitte den Versuch nach Bild 14.29 auf. Die Entfernung d zwischen Magnet und Spule soll zunächst so groß sein, daß der Stabmagnet den Reed-Kontakt noch nicht beeinflußt. Bei Betätigung von T_E zeigt der Spannungsmesser 0 Volt an, da ja der Kontakt (wie Sie am Summton erkennen können), der Wechselspannung folgend, ebenfalls eine Wechselspannung an die Ausgangsklemmen A-B „vermittelt“. Und Wechselspannung zeigt unser Meßgerät nicht an. Was geschieht, wenn Sie nun den Stabmagneten langsam der Spule so weit nähern, bis er den Anschluß des Reed-Kontakts berührt? (Sollte der Zeiger des Spannungsmessers nach links ausschlagen, dann drehen Sie den Stab einfach um.)



14.29

Ergebnis

Bei Annäherung des Stabmagneten an die Erregerspule beginnt der Zeiger des Spannungsmessers bei einer bestimmten Entfernung d auszuschlagen.

Bei einer ziemlich genau begrenzten Entfernung d' erreicht die Ausgangsspannung U_{AB} ihren Höchstwert von knapp 3 Volt. Der Summton ist in ein Schnarren wie beim letzten Versuch übergegangen. Bei weiterer Annäherung sinkt die Spannung sehr schnell ab, bis der Summton plötzlich aufhört. Dann zeigt das Instrument wieder 0 Volt an.

Schlußfolgerung

Je kleiner d wird, um so mehr wirkt sich das Feld des Stabmagneten auf den Reed-Kontakt aus, d. h., die „Polung“ wird wirksam. Die Höchstspannung wird dann erreicht, wenn sich beide Magnetfelder gegenseitig so beeinflussen, daß die Halbwelle, die eine gegensinnige Polung der Magnetfelder hervorruft, den Kontakt nicht betätigt, während die Halbwelle, die eine gleichsinnige Polung bewirkt, den Kontakt zum Schließen bringt. Dann steht an den Ausgangsklemmen A–B, ähnlich wie bei der Gleichrichtung durch eine Diode, eine „pulsierende“ Gleichspannung.

Wird der Kontakt bei weiterer Annäherung des Stabmagneten durch sein jetzt „überwiegendes“ Magnetfeld „stillgelegt“, d. h. ständig geschlossen, dann steht am Ausgang die reine kontinuierliche (= ohne Unterbrechung) Wechselspannung des Netzgerätes.

Die mit dem Relais erzielte „Gleichrichtung“ ist allerdings eine recht „hoppelige“ Angelegenheit, weil das mechanische Schließen und Öffnen des Kontakts etliche Störungen verursacht – abgesehen davon, daß auch der schönste Kontakt bei so schneller Betätigung relativ schnell verschlissen wird. Auch das Schnarrgeräusch macht auf die Dauer keine reine Freude. Kurz: Für die Praxis eignet sich das Verfahren nicht; aber es hat vielleicht Spaß gemacht, festzustellen, daß unsere Überlegung in bezug auf das „gepolte Relais" richtig war.

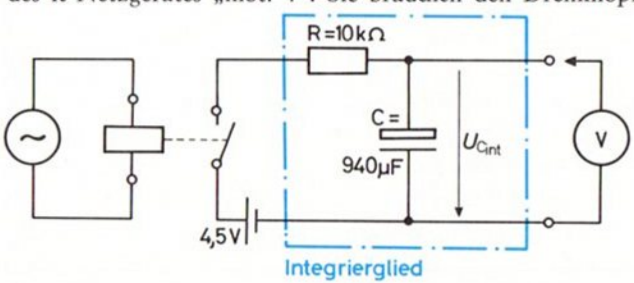
14.3.3 Integration schneller Impulse

Mit diesem letzten Versuch knüpfen wir an den Abschn. 12.11.1 an, in dem Sie im Versuch 12.69 (Seite 211) die „Integration" von relativ langen Impulsen durchgeführt hatten. Statt des Tasters wollen wir jetzt das Reed-Relais verwenden, das im Wechselstromkreis mit Zweiweggleichrichtung 100 Impulse pro Sekunde liefert. So schnell kann man den Taster nicht betätigen!

Auf den praktischen „Nährwert" dieses Versuches wollen wir nicht eingehen. Das Experiment soll nur deutlich machen, daß die „Spannungskurve" am Ausgang eines unbelasteten Integriergliedes der Spannungskurve bei „normaler" Aufladung eines Kondensators über einen Widerstand immer ähnlicher wird, je kürzer die Schaltpausen im Vergleich zur Dauer der „Eingangsimpulse" sind.

Versuch

Bild 14.30 zeigt die Versuchsanordnung. Um das Reed-Relais zu betätigen, genügt die „Brummspannung" am Gleichstromausgang des ft-Netzgerätes „mot. 4". Sie brauchen den Drehknopf nur so weit aufzudrehen, bis das Relais zu summen beginnt. Beobachten Sie den Zeiger des Spannungsmessers.

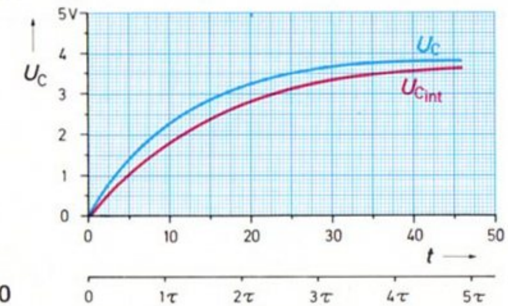


14.31

Ergebnis

Der Zeiger des Spannungsmessers „wandert" kontinuierlich nach rechts. Der Zeigerausschlag geht erst relativ schnell, dann immer langsamer vor sich. Der Spannungsverlauf am Ausgang des Integriergliedes ähnelt ganz dem Spannungsverlauf an einem Kondensator, wenn dieser über einen Widerstand aufgeladen wird.

Nun ist der Ausdruck „ähnelt ganz" etwas unbestimmt. Um Ihnen zu zeigen, w i e ähnlich der Verlauf der Spannungs/Zeit-Kurve $U_{C_{int}}$ am Kondensator unseres Integriergliedes derjenigen Kurve U_C ist, die bei der Aufladung von $C = 940\ \mu F$ über $R = 10\ k\Omega$ entsteht, wurden bei Abfassung des Buches die entsprechenden Kurven im Diagramm 14.31 mit einem sehr hochohmigen Spannungsmesser aufgenommen.



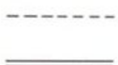
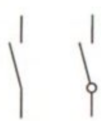
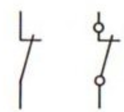
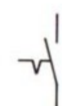
14.30

Wenn Sie Lust haben, könnten Sie ebenfalls die entsprechenden Kurven mit dem ft-Spannungsmesser aufnehmen. Dabei müßten Sie wieder nach Abschn. 12.4.2 (Seite 188) vorgehen, um die durch den Innenwiderstand des Spannungsmessers entstehenden Fehler zu vermeiden.

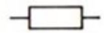
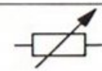
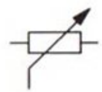
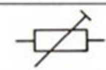
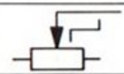
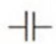
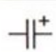
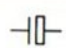
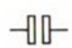
Sie können sich sicher vorstellen, daß sich $U_{C_{int}}$ immer besser an U_C angleicht, je kürzer die Dauer der Impulse am Eingang des Integriergliedes werden. Sind sie „ungemein klein" – nun, dann wird der Ladestrom praktisch nicht mehr unterbrochen und der Verlauf von $U_{C_{int}}$ ist gleich dem von U_C.

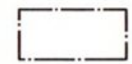
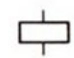
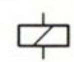
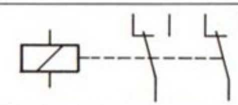
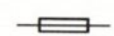
Anhang

A 1 Genormte* Schaltzeichen

Schaltzeichen	Erläuterungen
	Bewegungsrichtung
oder 	Wirkverbindung
	nicht leitende Kreuzung — leitend verbunden („Lötpunkt")
	Schließer (Taster) (Arbeitskontakt) (ohne und mit Verbindungsstelle)
	Öffner (Taster) (Ruhekontakt) (ohne und mit Verbindungsstelle)
	Wechsler (Taster)
	Ein/Aus-Schalter
	Wechselschalter

* Interessenten können die einschlägigen DIN-Blätter beziehen vom Beuth-Vertrieb GmbH, 1 Berlin 30, Burggrafenstr. 4-7 und 5 Köln 1, Friesenplatz 16.

	Zelle; Batterie
	Widerstand
	stetig veränderbarer Widerstand
	Potentiometer
	einstellbarer Widerstand (Trimmer)
	stufig veränderbarer Widerstand
oder 	Induktivität (Spule); Wicklung
oder 	Wicklung (Spule) mit Kern
	Kondensator
	gepolter Kondensator
	Elektrolytkondensator
	ungepolter Elektrolytkondensator
	einstellbarer Kondensator (Trimmer)
	Drehkondensator

	Masse (Bezugspotential)
	Umrahmungslinie
 oder 	Dauermagnet
	Hubmagnet
	Antrieb allgemein (z. B. für Relais, Schütz)
	Elektromechanischer Antrieb (z. B. mit Angabe einer wirksamen Wicklung)
	Relais mit 2 Wechslern
	Elektromechanischer Antrieb mit Abfallverzögerung
	gepoltes Relais mit Dauermagnet
	Steckerstift Steckerbuchse
	Sicherung
	Halbleiterdiode (Spitze weist in Durchlaßrichtung)

 oder 	Lampe
	Lampe mit aufgesetzter Linse
	Gleichstrommotor
—	Gleichstrom
∼	Wechselstrom
$\underline{\sim}$	Gleich- oder Wechselstrom (Allstrom)
	Meßgerät, allgemein
	Spannungsmesser
	Strommesser
	Transformator ohne Kern (Übertrager, Wandler)
	Transformator mit Kern
	Transformator mit zwei Sekundärwicklungen

A 2 Sinnbilder für Beschriftung von Meßgeräten

Sinnbild	Erläuterungen
⊥	Meßgerät: Senkrechte Gebrauchslage
⊓	Meßgerät: Waagerechte Gebrauchslage
	Meßgerät: Schräge Gebrauchslage; z. B. 60°
 	Drehspulmeßwerk (links) Dreheisenmeßwerk (rechts)
	Drehspulmeßwerk mit eingebautem Gleichrichter (für Wechselspannungsmessung)
 	Prüfspannung = 2 kV Ohne Zahl im Stern: Prüfspannung = 500 V

A 3 Allgemeine physikalische Größen

Größe	Formelzeichen	Maßeinheit	Kurzzeichen	Bemerkungen und Zusammenhänge
Länge	l	Meter	m	abgeleitete Einheiten: mm; cm; km
Fläche	A	Quadratmeter	m^2	abgeleitete Einheiten: mm^2; cm^2; km^2
Kreisradius	r	Meter	m	Kreisumfang: $U = 2\,r \cdot \pi = 2\,r \cdot 3{,}14$ Kreisinhalt: $A = r^2 \cdot \pi = r^2 \cdot 3{,}14$
Kreisdurchmesser	d	Meter	m	$d = 2\,r$
Wegstrecke	s	Meter	m	
Geschwindigkeit	v	Meter pro Sekunde	m/s	$v = s : t$
Beschleunigung	a	Meter pro Sekundequadrat	m/s^2	$a = s/t : t = s : t^2$
Zeit	t	Sekunde	s	abgeleitete Einheiten: 1 min = 60 s; 1 h = 3600 s
Masse	m	Kilogramm	kg	abgeleitete Einheiten: 1 g = 0,001 kg; 1 t = 1000 kg
Kraft	F	Newton	N	$F = m \cdot a$ 1 N = 1 : 9,81 kp (Kilopond)
Arbeit (Energie)	W	Newtonmeter	N · m	$W = P \cdot t$ 1 Nm = 1 : 9,81 kp · m
Leistung	P	Newtonmeter pro Sekunde	Nm/s	$P = W : t$ (1 W = 1 J/s; 1 kW = 1,36 PS)
Temperatur	ϑ	Grad	°C; °K	Celsiustemperatur = ° C (0° C = + 273,15° K) Kelvintemperatur = ° K; 0° K = −273,15° C (absol. Nullpunkt)
Wärmemenge	Q	Joule	J	1 J (sprich: „Dschul“) = 1 N · m = 1 Ws

A 4 Elektrische Größen

Als Formelzeichen sollten natürlich auch griechische Buchstaben (z. B. ϑ, Φ, ϱ usw.) schräg (= kursiv) gedruckt werden. Aus drucktechnischen Gründen geschieht das in der Praxis häufig nicht, zumal diese Formelzeichen nicht mit entsprechenden Einheitenzeichen verwechselt werden können, wie z. B. *W* (Arbeit) mit W (Watt) oder *m* (Masse) mit m (Meter) bzw. *A* (Fläche) mit A (Ampere).

Größe	Formelzeichen	Maßeinheit	Kurzzeichen	Bemerkungen und Zusammenhänge	siehe Seite
Ladung	Q	Coulomb	C	$Q = I \cdot t$; $Q = C \cdot U$ 1 C = 1 As (Amperesekunde)	177
Stromstärke	I	Ampere	A	$I = U : R$ A = V : Ω	19, 20
Spannung	U	Volt	V	$U = I \cdot R$ V = A · Ω	24
Stromdichte	S	Ampere pro Quadratmillimeter	$\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{mm}^2}$	$S = I : A$	
Leistung	P	Watt	W	$P = U \cdot I$ $P = U^2 : R = I^2 \cdot R$ $P = W : t$ W = V · A	41, 44
Arbeit (Energie)	W	Wattsekunde	W · s	$W = P \cdot t$	43
Widerstand	R	Ohm	Ω	$R = U : I$ Ω = V : A	27
Leitwert	G	Siemens	S	$G = 1 : R$ S = 1 : Ω $G = I : U$ S = A : V	32
spezif. Widerstand	ϱ	Ohm mal Quadratmillimeter pro Meter	$\Omega \cdot \frac{\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$	$R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$ $\frac{\Omega \cdot (\mathrm{mm}^2 : \mathrm{m}) \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{mm}^2}$ (Drahtwiderstand)	32
Leitfähigkeit	$\varkappa$	Siemens mal Meter pro Quadratmillimeter	$\mathrm{S} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{mm}^2}$	$\varkappa = 1 : \varrho$	32
Elektr. Feldstärke	E	Volt pro Meter	V/m	$E = U : l$	213
Kapazität	C	Farad	F	$C = Q : U = \frac{I \cdot t}{U}$ $\mathrm{F} = \frac{\mathrm{A} \cdot \mathrm{s}}{\mathrm{V}} = \mathrm{s} : \Omega$	177, 178
Dielektrizitätskonstante	ε			Materialkonstante	213, 214

Größe	Formel-zeichen	Maßeinheit	Kurz-zeichen	Bemerkungen und Zusammenhänge	siehe Seite
Ladezeit Entladezeit	t	Sekunde	s	$t \approx 3 \ldots 5\,\tau$	192
Zeitkonstante (Kondensator)	τ	Sekunde	s	$\tau = R \cdot C$ $\quad \Omega \cdot \frac{s}{\Omega} = s$	191
Energie im Kondensator	W	Wattsekunde	Ws	$W = {}^1\!/\!_2\, C \cdot U^2$	178
Kapazitiver (Blind-)Widerstand	X_c	Ohm	Ω	$X_c = \frac{1}{2\,\pi f \cdot C}$	206
Windungen	N	(reine Zahl)	–		235
Magnet. Durchflutung	Θ	Amperewindung	A · N	$\Theta = I \cdot N$	235
Magnet. Fluß	Φ	Weber	Wb	$\Phi = B \cdot A$ $\quad$ 1 Wb = 1 Vs (= 10^8 Maxwell)	226, 235
Magnet. Feldstärke	H	Amperewindungen pro Meter	A · N / m	$H = \frac{I \cdot N}{l} = \frac{\Theta}{l}$ (frühere Einheit: Oerstedt)	231, 235
Magnet. Flußdichte (Induktion)	B	Tesla	T	$B = \Phi : A = \mu \cdot H$ $\quad 1\,T = V \cdot s\,/\,m^2 = Wb/m^2$ (frühere Einheit: Gauß)	236
Magnet. Leitfähigkeit = Permeabilität	μ			Materialkonstante	236
Elektromotorische Kraft (EMK)	E	Volt	V	$E = B \cdot l \cdot N$	236
Induktivität einer Spule	L	Henry	H	$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l}$ $\quad 1\,H = V \cdot s\,/\,A = \Omega \cdot s$	246
Induktiver (Blind-) Widerstand einer Spule	X_L	Ohm	Ω	$X_L = 2\,\pi f \cdot L$ (Wechselstromwiderstand)	247

Größe	Formelzeichen	Maßeinheit	Kurzzeichen	Bemerkungen und Zusammenhänge	siehe Seite
Dauer einer Periode	T	Sekunde	s	$T = \frac{1}{f}$	201
Frequenz	f	Hertz	Hz	$f = \frac{1}{T}$ $\quad$ $\mathrm{Hz} = \frac{1}{\mathrm{s}}$	201

A 5 Kennsilben für Größenordnungen (Potenzen)

Vorsilbe Potenz Zahl	Bezeichnung	Beispiel
Tera (T) $= 10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000$	(Billion)	
Giga (G) $= 10^{9} = 1\,000\,000\,000$	(Milliarde)	10^9 Hz = 1 GHz
Mega (M) $= 10^{6} = 1\,000\,000$	(Million)	$10^6\ \Omega = 1\ \mathrm{M}\Omega$
Kilo (k) $= 10^{3} = 1\,000$	(Tausend)	$10^3\ \Omega = 1\ \mathrm{k}\Omega$
Hekto (h) $= 10^{2} = 100$	(Hundert)	10^2 l = 1 hl
Deka (D) $= 10^{1} = 10$	(Zehn)	10 g = 1 dg
$10^{0} = 1$	(Eins)	
Dezi (d) $= 10^{-1} = 0{,}1$	(1: Zehn)	10^{-1} m = 1 dm
Zenti (c) $= 10^{-2} = 0{,}01$	(1: Hundert)	10^{-2} m = 1 cm
Milli (m) $= 10^{-3} = 0{,}001$	(1: Tausend)	10^{-3} A = 1 mA
Mikro (µ) $= 10^{-6} = 0{,}000\,001$	(1: Million)	10^{-6} A = 1 µA
Nano (n) $= 10^{-9} = 0{,}000\,000\,001$	(1: Milliarde)	10^{-9} F = 1 nF
Piko (p) $= 10^{-12} = 0{,}000\,000\,000\,001$	(1: Billion)	10^{-12} F = 1 pF
Femto (f) $= 10^{-15}$	(1: Billiarde)	
Atto (a) $= 10^{-18}$	(1: Trillion)	

A 6 Spezif. Widerstand und Leitfähigkeit einiger Stoffe

Werkstoff	$\varrho \left(\Omega \cdot \frac{\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}\right)$	$\varkappa \left(\frac{1}{\Omega} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{mm}^2}\right)$
Silber	0,016	62,5
Kupfer	0,0175	56 ... 58
Aluminium	0,0286	35
Wolfram	0,055	18,2
Zink	0,063	15,9
Eisen	0,10	10
Nickel	0,10	10
Platin	0,11	9,09
Manganin (Legierung)	0,42	2,38
Konstantan (Legierung)	0,49	2,04
Kohle	600	$1{,}67 \cdot 10^{-3}$

A 7 Einheitengleichungen

Ohm'sches Gesetz	V : A = Ω V : mA = kΩ V : µA = MΩ	V : Ω = A V : kΩ = mA V : MΩ = µA	A · Ω = V mA · kΩ = V µA · MΩ = V
Leistungs-gleichung	V · A = W V · mA = mW V · µA = µW	W : A = V mW : mA = V µW : µA = V	W : V = A mW : V = mA µW : V = µA
Widerstands- und Leitwert	1 Ω = 1 S 10 Ω = 0,1 S 100 Ω = 0,01 S 1000 Ω = 0,001 S		
Zeitkonstante (Kondensator)	F · Ω = s µF · MΩ = s µF · kΩ = ms		

A 8 Internationale Wertereihen für Schichtwiderstände

Ω; kΩ; MΩ

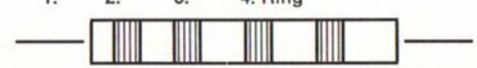
E6	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	1,0

E12	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,3	3,9	4,7	5,6	6,8	8,2	1,0

E24	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1	1,0

A 9 Farbcode für Schichtwiderstände

Kennfarbe	1. Ring: Ziffer	2. Ring: Ziffer	3. Ring: Multiplikator (1. u. 2. Ring mal 3. Ring)	4. Ring: Toleranz
schwarz	–	0	10^0 Ω = 1 Ω	
braun	1	1	10^1 Ω = 10 Ω	± 1 %
rot	2	2	10^2 Ω = 100 Ω	± 2 %
orange	3	3	10^3 Ω = 1 kΩ	
gelb	4	4	10^4 Ω = 10 kΩ	
grün	5	5	10^5 Ω = 100kΩ	ohne Kennzeichnung: ± 20 %
blau	6	6	10^6 Ω = 1 MΩ	
violett	7	7		
grau	8	8		
weiß	9	9		
silber	–	–	10^{-1} Ω = 0,1 Ω	± 10 %
gold	–	–	10^{-2} Ω = 0,01 Ω	± 5 %



	1.	2.	3.	4. Ring	
Beispiele:	rot	viol.	br.	silb.	= 27 · 10 Ω = 270 Ω ± 10 %
	weiß	br.	or.	gold	= 91 · 1 kΩ = 91 kΩ ± 5 %
	blau	grau	silb.	rot	= 68 · 0,1 Ω = 6,8 Ω ± 2 %
	gelb	viol.	rot	br.	= 47 · 100 Ω = 4,7 kΩ ± 1 %
	schw.	br.	br.	–	= 01 · 10 Ω = 10 Ω ± 20 %

A 10 Antworten auf die im Text gestellten Fragen

Seite 32

$\varrho_{Eisen} = 0{,}1\ \text{mm}^2/\text{m} \cdot \Omega \quad d = 0{,}15\ \text{mm} \quad A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$

$l = 90\ \text{m} \qquad A = 3{,}14 \cdot (0{,}075\ \text{mm})^2 = 0{,}018\ \text{mm}^2$

$$R_{Eisen} = \frac{0{,}1\ \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \cdot 90\ \text{m}}{0{,}018\ \text{mm}^2} = \mathbf{500\ \Omega}$$

Seite 42

1. Die aufgenommene Leistung ist gleich groß, da 100 W = 0,1 kW sind.

2. Zunächst muß der Widerstand der Lampe unter den Nennbedingungen „100 W/220 V" bestimmt werden:

   $P = I \cdot U; \qquad I = P : U = 100\ \text{W} : 220\ \text{V} = \mathbf{0{,}45\ A}$

   $R = U : I = 220\ \text{V} : 0{,}45\ \text{A} = \mathbf{489\ \Omega}$

   Bei einer Spannung von 110 V fließen dann

   $I = U : R = 110\ \text{V} : 489\ \Omega = \mathbf{0{,}225\ A}$

3. Die bei 110 V aufgenommene Leistung beträgt dann nur noch

   $P = 0{,}225\ \text{A} \cdot 110\ \text{V} = 24{,}75\ \text{W} =$ rund **25 W**

   Wie Sie von Abschn. 4.9.3 her wissen, ist der Lampenwiderstand keine konstante Größe, sondern temperaturabhängig; deswegen ist diese Leistungsberechnung nicht ganz korrekt.

Seite 44

Die Antwort (b) ist richtig:

100 W · 10 Std. = 1000 Wh = 1 kWh

Für diese in Licht (und leider auch in Wärme) umgewandelte elektrische Arbeit (= Energie) müssen 10 Pf. bezahlt werden.

Seite 47

$P = U^2 : R$

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

1. $P = 250\ \text{mW} = 0{,}25\ \text{W}; \qquad R = 100\ \Omega$

   $U = \sqrt{0{,}25} \cdot \sqrt{100} = 0{,}5\ \text{W} \cdot 10\ \Omega = \mathbf{5\ V}$

2. $U = \sqrt{0{,}25} \cdot \sqrt{33} = 0{,}5\ \text{W} \cdot 5{,}7\ \Omega = \mathbf{2{,}87\ V}$

3. $U = \sqrt{0{,}25} \cdot \sqrt{470} = 0{,}5\ \text{W} \cdot 21{,}7\ \Omega = \mathbf{10{,}85\ V}$

Seite 50

linke Spalte

1. $I = U : R = 5\ \text{V} : 50\ \Omega = 0{,}1\ \text{A}$

   $P = I \cdot U = 0{,}1\ \text{A} \cdot 5\ \text{V} = \mathbf{0{,}5\ W}$

   Es muß also ein 0,5-W-Widerstand gewählt werden.

2. $I = 6\ \text{V} : 2\ \text{k}\Omega = 3\ \text{mA}; \qquad P = 6\ \text{V} \cdot 3\ \text{mA} = \mathbf{18\ mW}$

   Ein 1/4-W-Typ genügt vollauf.

rechte Spalte

Aus dem Diagramm 3.14 können Sie ersehen, daß Sie an den 1-W-Widerstand von 33 Ω maximal eine Spannung von etwa 5,8 V anlegen dürfen. Die Spannungen für die 4,7-Ω- und 10-Ω-Widerstände können Sie aus dem Diagramm nur sehr überschlägig entnehmen. U_{max} beträgt für 4,7 Ω etwa 2,1 V und für 10 Ω etwa 3,2 V.

Seite 58

1. $R_{ges} = 147{,}7\ \Omega$

2. Für $U = 6$ V ist

   $I = 6\ \mathrm{V} : 147{,}7\ \Omega = 0{,}041\ \mathrm{A}$

   $U_3 = R_3 \cdot I = 10\ \Omega \cdot 0{,}041\ \mathrm{A} = \mathbf{0{,}41\ V}$

3. Der Strom ist durch alle Widerstände gleich groß:

   $\mathbf{I = 0{,}041\ A}$

4. Die Meßleitungen müssen an die Punkte C und D gelegt werden.

5. Da an den Widerstandswerten nichts geändert wird, muß das Verhältnis von U_1 zu U stets gleichbleiben – auch wenn U höher oder niedriger wird:

   $U_1 : U = R_1 : R_{ges} = 4{,}7\ \Omega : 147{,}7\ \Omega \approx 1 : 30$

Seite 61

$$R_{ges} = \underset{R_1}{100\ \Omega} + \underset{R_2}{470\ \Omega} + \underset{R_3}{100\ \Omega} = 670\ \Omega$$

$I = 6\ \mathrm{V} : 670\ \Omega = 0{,}009\ \mathrm{A}$

Von C aus gesehen (= Null-Potential) ist D positiver;

U_1 erhält also ein (+)Vorzeichen und beträgt:

$U_1 = 100\ \Omega \cdot 0{,}009\ \mathrm{A} = \mathbf{+\ 0{,}9\ V}$

B und A sind von C aus gesehen negativer; U_2 und U_3 erhalten daher ein (–)Vorzeichen:

$U_2 = 470\ \Omega \cdot (-\ 0{,}009\ \mathrm{A}) = \mathbf{-\ 4{,}23\ V}$

$U_3 = 100\ \Omega \cdot (0{,}009\ \mathrm{A}) = \mathbf{-\ 0{,}9\ V}$

Die Potentialdifferenz zwischen C und A hat dann den Wert:

$U_{AC} = -0{,}9\ \mathrm{V} + (-4{,}23\ \mathrm{V}) = \mathbf{-\ 5{,}13\ V}$

Die Potentialdifferenz zwischen D und A beträgt:

$U_{DA} = +\ 0{,}9\ \mathrm{V} - (-\ 5{,}13\ \mathrm{V}) = +\ 0{,}9\ \mathrm{V} + 5{,}13\ \mathrm{V} = +\ 6{,}03\ \mathrm{V}$

$U_{DA} \approx \mathbf{+\ 6\ V}$

Seite 62

$$R_{ges} = \underset{R_1}{100\ \Omega} + \underset{R_2}{10\ \Omega} + \underset{R_3}{33\ \Omega} = 143\ \Omega$$

1. $I = U : R_{ges} = 7\ \mathrm{V} : 143\ \Omega = 0{,}049\ \mathrm{A}$

   $U_1 = 100\ \Omega \cdot 0{,}049\ \mathrm{A} = \mathbf{4{,}9\ V}$

   $U_2 = 10\ \Omega \cdot 0{,}049\ \mathrm{A} = \mathbf{0{,}49\ V}$

   $U_3 = 33\ \Omega \cdot 0{,}049\ \mathrm{A} = \mathbf{1{,}62\ V}$

   Damit ergibt sich für $P = U \cdot I$:

   $P_1 = \mathbf{0{,}24\ W}$ $P_2 = \mathbf{0{,}024\ W}$ $P_3 = \mathbf{0{,}079\ W}$

   Die Reihenschaltung kann also mit 0,25-W-Widerständen bei 7 V betrieben werden.

2. Wird U auf 9 V erhöht, dann muß natürlich für R_1 ein 0,5-W-Typ gewählt werden, da R_1 bereits bei 7 V nahe an der max. Belastbarkeit lag:

   $I = 9\ \mathrm{V} : 143\ \Omega = 0{,}063\ \mathrm{A}$

   $U_1 = 6{,}3\ \mathrm{V}$

   $P_1 = 6{,}3\ \mathrm{V} \cdot 0{,}063\ \mathrm{A} = \mathbf{0{,}397\ W}$

Seite 67

Wenn für einen Vollausschlag bei 10 V der Wert des Vorwiderstandes 30 kΩ betrug, dann muß der Widerstandswert für einen Vollausschlag bei 20 V auch doppelt so groß sein, nämlich 60 kΩ.

Da 30 kΩ als R_i bereits im Meßgerät eingebaut sind, muß der äußere Vorwiderstand R_{Va} 60 kΩ – 30 kΩ = 30 kΩ betragen.

Seite 68

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{U_2}{U_1} = 33\,\Omega \cdot \frac{4\text{ V}}{1\text{ V}} = \mathbf{132\,\Omega}$$

Seite 76

Der Potentiometerwiderstand $R_{A\text{-}E}$ ist immer gleich der Summe von $R_{S\text{-}A}$ und $R_{E\text{-}S}$. Daher ist $R_{E\text{-}S}$ leicht zu berechnen nach:

$$R_{E\text{-}S} = R_{A\text{-}E} - R_{A\text{-}S}$$

Seite 79

In Stellung 1 ist der Schleifer nach Bild 5.21 direkt mit A und damit mit der (–)Sammelschiene verbunden. Damit ist der Schutzwiderstand R_S „kurzgeschlossen", und $U_{S\text{-}A}$ ist natürlich gleich Null.

Seite 82

1. Da an $R_{S\text{-}A}$ (Bild 5.28) höchstens 3 V auftreten dürfen – wenn nämlich bei Schleiferstellung 10 $R_{S\text{-}A} = R_p = 10\text{ k}\Omega$ ist –, so muß bei $U = 6$ V an R_v eine Spannung von 3 V abfallen. Das heißt: R_v muß gleich R_p gleich 10 kΩ sein.

2. Soll dagegen nur eine Spannung zwischen 3 und 6 V zur Verfügung stehen, dann muß der Widerstand R_v zwischen A und (–)Sammelschiene geschaltet werden. Die Spannung wird zwischen S und (–)Sammelschiene abgegriffen. Probieren Sie bitte diese und die nächste Schaltung auch praktisch einmal aus.

3. Zunächst die Dimensionierung von R_1 und R_2 nach Bild 5.29! Es soll bei der Gesamtspannung $U = 7{,}5$ V eine zwischen 1 und 6,5 V einstellbare Spannung zur Verfügung stehen. Das entspricht einer Potentialdifferenz von 6,5 V – 1 V = 5,5 V. Bleibt ein Rest von 2 V, von dem je 1 V an den Widerständen R_1 und R_2 abfallen muß, da ja die Potentialdifferenz zwischen 0 und 1 V, bzw. zwischen 6,5 V und 7,5 V jeweils 1 V beträgt. Also sind $R_1 = R_2$ und $U_1 = U_2$.

Dann gilt:

$$\frac{R_1}{R_p} = \frac{U_1}{U_p} \quad ; \qquad R_1 = R_p \cdot \frac{U_1}{U_p} = 10\text{ k}\Omega \cdot \frac{1\text{ V}}{5{,}5\text{ V}} = 1{,}82\text{ k}\Omega$$

$R_1 = R_2 = \mathbf{1{,}82\ k\Omega}$

Die einstellbare Spannung muß zwischen dem Punkt S und der (–)Sammelschiene abgenommen werden. Bei Schleiferstellung 1 (an A) wird nur die Spannung $U_1 = 1$ V abgegriffen. Bei Schleiferstellung 10 (an E) sind es $U_1 + U_p = 1\text{ V} + 5{,}5\text{ V} = 6{,}5$ V. Und genau dieser Spielraum zwischen 1 V und 6,5 V war gefordert.

Wird die Spannung nicht zwischen S und (–)Sammelschiene abgegriffen, sondern zwischen den Punkten A und S, so ist $U_{S\text{-}A}$ bei Schleiferstellung 1 gleich Null (siehe Antwort auf die Frage Seite 79), und in Stellung 10 beträgt sie 5,5 V. Dieser Einstellbereich war jedoch nicht gefordert.

Seite 89

$R_1 = 100\,\Omega$; $R_2 = 33\,\Omega$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{100}{33} \qquad \mathbf{P_2 \approx 3 \cdot P_1}$$

R_2 nimmt rund die 3fache Leistung wie R_1 auf.

Seite 91

1. $R_1 = 1\text{ k}\Omega$; $\quad R = 0{,}25\text{ k}\Omega$
   $R = 25\,\%$ von $R_1 = {}^1/_4\,R_1$
   Nach Tabelle 6.15 (Zeile 1) muß ein Widerstand $R_2 = {}^1/_3\,R_1 = 333\,\Omega$ parallel geschaltet werden.

2. $R_1 = 4{,}7\text{ k}\Omega$; $\quad R = 3{,}5\text{ k}\Omega$
   $R \approx 75\,\% = {}^3/_4\,R_1 \approx 0{,}75\,R_1$
   Nach Tabelle 6.15 muß der Parallelwiderstand R_2 eine Größe von $3 \cdot R_1 = \mathbf{14{,}1\ k\Omega}$ haben.

Seite 93

Shunt für Vollausschlag bei 2 A:

$$R_{Sh\ ges} = 1{,}5\ \text{k}\Omega \cdot \frac{0{,}333\ \text{mA}}{1999{,}667\ \text{mA}} = 0{,}0003\ \text{k}\Omega = 0{,}3\ \Omega$$

$$R_{Sh\ außen} = \frac{R_{Sh\ innen} \cdot R_{Sh\ ges}}{R_{Sh\ innen} - R_{Sh\ ges}} = \frac{5\ \Omega \cdot 0{,}3\ \Omega}{4{,}7\ \Omega}$$

$$R_{Sh\ außen} = \mathbf{0{,}32\ \Omega}$$

Die Länge des Widerstandsdrahtes für diesen Shunt errechnet sich zu

$$l = \frac{100\ \text{cm} \cdot 0{,}32\ \Omega}{2{,}45\ \Omega} \approx \mathbf{13\ cm}$$

10 Skalenteile ≙ jetzt 2 A;
1 Skalenteil ≙ 0,2 A

Sie müssen demnach die abgelesenen Werte mit dem Faktor 0,2 multiplizieren, um den entsprechenden Stromwert zu erhalten.

Seite 110

1. Positiv
2. + 4,5 V
3. – 3,0 V
4. + 1,5 V

Seite 126

1. $R_1 = 100\ \Omega$; $R_2 = 470\ \Omega$; $R_L = 470\ \Omega$

   $R_2 \parallel R_L = 235\ \Omega$

   $$U_a = U_L = U_e \cdot \frac{R_2 \parallel R_L}{R_1 + R_2 \parallel R_L} = U_e \cdot \frac{235\ \Omega}{335\ \Omega} = \mathbf{0{,}7 \cdot U_e}$$

   Für $U_e = 4{,}5$ V ist $U_a = \mathbf{3{,}15\ V}$

2. Der Längsstrom ist dann:

   $$I_l = \frac{U_e}{R_1 + R_2 \parallel R_L} = \frac{4{,}5\ \text{V}}{335\ \Omega} = \mathbf{13\ mA}$$

Der Querstrom beträgt:
$I_q = {}^1/_2\, I_l$ (da $R_2 = R_L$ ist) $= \mathbf{6{,}5\ mA}$

Seite 128

Theoretisch müßte an $R_1 = 100$ kΩ folgende Teilspannung auftreten:

$$U_1 = U \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = U \cdot \frac{100\ \text{k}\Omega}{110\ \text{k}\Omega} = \mathbf{0{,}91 \cdot U}$$

Für $U = 4{,}5$ V müßte U_1 rund **4,1 V** betragen.

Durch Parallelschaltung des Spannungsmessers ergibt sich aber:

$$R_1 \parallel R_i = \frac{100\ \text{k}\Omega \cdot 30\ \text{k}\Omega}{130\ \text{k}\Omega} = 23{,}1\ \text{k}\Omega.$$ Damit wird

$$U_1 = \frac{23{,}1\ \text{k}\Omega}{33{,}1\ \text{k}\Omega} \cdot U = \mathbf{0{,}7\ U}$$

Für $U = 4{,}5$ V ist U_1 demnach nur **3,15 V** (statt 4,1 V ohne Meßgerät!)

Der Meßfehler beträgt also 0,95 V, d. h. fast 1 V!, bzw. rund 23 %.

Seite 131

Der 1. Teiler besteht aus:
$R_1 = 1\ \text{k}\Omega \parallel 100\ \Omega = 91\ \Omega$ und $R_2 = 10\ \Omega$

Das Teilerverhältnis ist dann

$$V_{t1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10\ \Omega}{101\ \Omega} = \mathbf{\frac{1}{10{,}1}}$$

Der 2. Teiler besteht aus:
$R_3 = 940\ \Omega \parallel 10\ \text{k}\Omega + 33\ \Omega = 892\ \Omega$ und $R_2 = 10\ \Omega$

Das Teilerverhältnis ist dann:

$$V_{t2} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} = \frac{100\ \Omega}{992\ \Omega} = \mathbf{\frac{1}{9{,}92}}$$

Das Gesamtteilerverhältnis ergibt sich zu

$$V_t = V_{t1} \cdot V_{t2} = \frac{1}{10{,}1} \quad \frac{1}{9{,}92} = \mathbf{\frac{1}{100{,}19}} \quad \text{statt} \quad \frac{1}{100}$$

Der Fehler kann also ohne weiteres vernachlässigt werden.

Seite 138

1. Nach der besprochenen Methode können Sie einen Widerstandswert von rund 70 Ω erhalten, wenn Sie 470 Ω – 470 Ω – 100 Ω parallelschalten.

2. Der Gesamtstrom errechnet sich bei $U = 9$ V zu:

   $R_{ges} = 235\ \Omega \parallel 100\ \Omega = 70{,}15\ \Omega$

   $I_{ges} = 9\ \text{V} : 70{,}15\ \Omega = \mathbf{128\ mA}$

   Die Teilströme errechnen sich zu:

   $I_1 = I_2 = 9\ \text{V} : 470\ \Omega = \mathbf{19\ mA}$

   $I_3 = 9\ \text{V} : 100\ \Omega = \mathbf{90\ mA}$

   Probe:

   $I_1 + I_2 + I_3 = 128\ \text{mA} = I_{ges}$

(Beispiel 6)

Damit durch einen Widerstand bei gleichbleibender Spannung der 6fache Strom fließt, muß nach dem ohm'schen Gesetz der Wert des Widerstandes um das 6fache kleiner werden.

In unserem Beispiel müßte der Widerstand von 470 Ω auf den Wert von 470 Ω : 6 = 78,33 Ω gebracht werden. Wenn Sie zu 470 Ω einen Widerstand von 100 Ω parallelschalten, ergibt sich ein Wert von rund 82 Ω, was für unsere Zwecke völlig ausreicht.

Bei einer Spannung von 10 V fließen durch 470 Ω rund 21 mA; durch 82 Ω rund 122 mA – also etwa die 6fache Stromstärke.

(Frage)

Der Widerstandswert von 100 Ω ∥ 470 Ω beträgt genau 82,5 Ω. Bei 6 V fließen rund 73 mA durch die Parallelschaltung. Wie Sie dem Diagramm entnehmen können, fließen davon 60 mA durch den 100-Ω-Widerstand, der dann eine Leistung von 6 V · 60 mA = 0,36 W aufnehmen muß. Der 100-Ω-Widerstand muß also ein 0,5-W-Typ sein.

Haben Sie jedoch nur einen 0,25-W-Widerstand zur Hand, dann darf die Spannung höchstens

$$0{,}25\ \text{W} : 0{,}06\ \text{A} \approx \mathbf{4{,}2\ V}$$

betragen.

Seite 140

Zunächst ermitteln Sie in der bekannten Weise die Kennlinie für die angegebene Reihenschaltung z. B. bei einer Stromstärke von 30 mA. Die zugehörige Spannungskoordinate liegt etwa bei 7,3 V. Um nun den Stromwert für eine Spannung von 6 V zu finden, gehen Sie vom Punkt 6 V auf der Spannungsachse senkrecht nach oben und dann vom Schnittpunkt mit der ermittelten Kennlinie aus genau waagerecht nach links. Sie finden dann einen zugehörigen Stromwert von etwa 25 mA.

Umgekehrt finden Sie für den Stromwert von 40 mA einen Spannungswert von knapp 10 V.

Für die einzelnen Teilspannungen können Sie aus dem Diagramm etwa folgende Werte entnehmen:

an 10 Ω: knapp 0,5 V
an 33 Ω: rund 1,3 V
an 100 Ω: jeweils etwa 4 V

Seite 184

$W_{ges} = {}^1/_2\, U^2 \cdot C_{ges}$ (Formel von Seite 178)

$$C_{ges} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{470\ \mu\text{F} \cdot 47\ \mu\text{F}}{517\ \mu\text{F}} = 42{,}7\ \mu\text{F}$$

Für $U = 6$ V ergibt sich:

$W_{ges} = {}^1/_2 \cdot 36\ \text{V}^2 \cdot 42{,}7\ \mu\text{F} = 768{,}6\ \mu\ \text{Ws} \approx \mathbf{0{,}77\ mWs}$

Nach Bild 12.15 errechnen sich die Teilenergien zu:

$W_1 = {}^1/_2\, ({}^6/_{11}\ \text{V})^2 \cdot 470\ \mu\text{F} = 69{,}94\ \mu\ \text{Ws} \approx \mathbf{0{,}07\ mWs}$

$W_2 = {}^1/_2\, ({}^{60}/_{11}\ \text{V})^2 \cdot 47\ \mu\text{F} = 699{,}16\ \mu\ \text{Ws} \approx \mathbf{0{,}7\ mWs}$

A 11 Was ist beim Kauf eines Meßgerätes zu beachten?

Es wäre durchaus denkbar, daß bei der Beschäftigung mit dem „hobby-Labor 1" der Wunsch auftaucht, zusätzlich noch ein empfindlicheres und vielseitigeres Meßgerät zu besitzen. Sicher werden Sie in der Absicht, sich solch ein Instrument anzuschaffen, noch bestärkt, wenn Sie erfahren, daß im „hobby-Labor 2" sehr viele interessante Messungen an Halbleiter-Bauelementen durchgeführt werden, wobei Sie ein sogen. Vielfach- bzw. Universalmeßgerät u n b e d i n g t benötigen.

Es gibt nun eine kaum noch überschaubare Vielzahl von Gerätetypen der unterschiedlichsten Qualität. Da ist es wohl angebracht, einige Hinweise zu geben, die Ihnen helfen sollen, Fehlkäufe zu vermeiden.

- Kaufen Sie nur ein Instrument, dem ein Schaltplan bzw. eine Gebrauchsanweisung beigegeben ist, woraus die Werte der Innenwiderstände bei den verschiedenen Strommeßbereichen hervorgehen. Sie brauchen diese Werte unbedingt zur Meßwertkorrektur (s. Abschn. 8.4.2!).

- Die Empfindlichkeit im Gleichspannungsbereich sollte mindestens 20 kΩ/V betragen!

- Der Innenwiderstand für die Spannungsmessung ergibt sich aus dem Produkt aus der Empfindlichkeit und der Meßbereichsangabe. So beträgt z. B. der Innenwiderstand eines 20-kΩ/V-Meßgerätes bei dem Meßbereich von 5 V bereits 100 kΩ; im 10-V-Bereich sind es 200 kΩ usw.

  Eine Empfindlichkeit von 20 kΩ/V ist also schon recht beachtlich.

- Eine höhere Empfindlichkeit hat allerdings bei billigeren Meßgeräten den Nachteil, daß die Werte der Innenwiderstände bei der Strommessung recht hoch werden, was zu größeren Meßfehlern führt.

  Anders ist es, wenn der Eingang des Meßgerätes mit einer elektronischen Schaltung ausgestattet ist, was vom Hersteller immer angegeben wird. Solche Instrumente haben Empfindlichkeiten von mehreren 100 kΩ/V bis zu einigen MΩ/V, ohne daß die Innenwiderstände in den Strommeßbereichen sonderlich hohe Werte annehmen.

  Natürlich sind derartige Meßgeräte wunderschön – aber leider nicht ganz billig!

- Das Meßgerät sollte eine Gleich- und Wechselspannungsmessung sowie eine Gleichstrom- und Widerstandsmessung in mehreren Bereichen ermöglichen. Eine Möglichkeit der Wechselstrommessung ist angenehm, aber nicht unbedingt erforderlich; sie kann meistens durch eine Spannungsmessung umgangen werden.

  Damit Sie auch die Stromstärke z. B. von ft-Motoren noch gut messen können, sollte der maximale Strommeßbereich mindestens 500 mA betragen. Für die Messung von Kurzschlußströmen von Batterien benötigen Sie sogar einen Meßbereich von mindestens 5 A.

  Alle Meßeinrichtungen, die darüber hinausgehen, sind meist nur unnötiger Ballast, der das Meßgerät nur verteuert, ohne die Qualität zu steigern.

- Die für die Widerstandsmessung benötigten Zellen sollten Typen sein, die nicht „auslaufen" und das Meßgerät auf diese Weise beschädigen können. Bei sehr guten Meßgeräten ist der Raum für die Zellen abgekapselt.

- Achten Sie darauf, daß der Zeiger nicht bei jeder Meßbereich-Umschaltung bis zum Skalenende ausschlägt, wenn die Zellen in das Meßgerät eingesetzt sind! (So etwas gibt es nämlich.)

- Die Meßgenauigkeit wird angegeben in % vom Skalenendwert. Bei 2,5 % und einem Meßbereich von 10 V kann jeder in diesem Bereich abgelesene Wert um ± 2,5 % von 10 V = 0,25 V vom tatsächlichen Wert abweichen. Die „Genauigkeitsklasse" (= Meßgenauigkeit) sollte auf dem Skalenblatt angegeben sein. Eine Meßgenauigkeit von 2,5 % ist für unsere Zwecke völlig ausreichend. Jede Steigerung der Genauigkeit muß teuer bezahlt werden.

- Das Skalenfeld sollte unbedingt eine sogen. Spiegelskala enthalten, um Ablesefehler zu vermeiden, die sich ergeben, wenn man nicht genau senkrecht über der Zeigerspitze abliest. Bei der Ablesung muß sich der Zeiger mit seinem Spiegelbild decken.

- Um Ablesefehler zu vermeiden, sollten die Skalen so groß wie möglich und auch übersichtlich unterteilt sein. Je weniger Skalen, um so besser!

  Der Zeiger sollte so schmal wie möglich sein (Messerzeiger!).

- Je länger ein Zeiger ist, um so „lageempfindlicher" ist er. Es ist dann nicht gleichgültig, ob das Meßgerät auf dem Tisch liegt, schräg oder senkrecht steht. Die Gebrauchslage wird ebenfalls auf dem Skalenblatt angegeben und muß bei der Messung eingehalten werden. (Siehe Schaltzeichen-Tabelle!)

A 12 Rechnen mit Zehnerpotenzen

Wir rechnen mit der Basis 10 (= Zehnerpotenzen)

a^b 10^2 bedeutet: $10 \cdot 10$

10^3 bedeutet: $10 \cdot 10 \cdot 10$ usw.

a^b: a = Basis (Grundzahl)

b = Exponent (Hochzahl)

a^b = Potenz (lies: a hoch b)

- Die Hochzahl bzw. der Exponent gibt an, wie oft man eine Zahl (hier die 10) mit sich selbst multiplizieren muß.

- Wie aus der Tabelle A 5 hervorgeht, gibt der positive Exponent (das (+)Zeichen läßt man einfachheitshalber weg) die Anzahl der Nullen hinter der 1 an (wenn die Basis 10 ist!).

- Ist der Exponent negativ, dann ist der Kehrwert gemeint:

$$10^{-1} = \frac{1}{10^1} = 0{,}1$$

$$10^{-2} = \frac{1}{10^2} = \frac{1}{100} = 0{,}01 \text{ usw.}$$

- Der negative Exponent gibt die Zahl der Stellen nach dem Komma an.

- Zehnerpotenzen werden miteinander multipliziert, indem man die Exponenten addiert.

z. B.: $10 \cdot 100 = 10^1 \cdot 10^2 = 10^{1+2} = 10^3 = 1000$

$$10^5 \cdot 10^{-2} = 10^{5-2} = 10^3 \qquad \frac{100\,000}{100} = 1000$$

- Zehnerpotenzen werden durcheinander dividiert, indem man die Exponenten voneinander abzieht.

z. B.: $10^3 : 10^1 = 10^{3-1} = 10^2 \qquad \frac{1000}{10} = 100$

$$10^3 : 10^{-2} = 10^{3-(-2)} = 10^{3+2} = 10^5 \qquad \frac{1000}{1/100} = 1000 \cdot 100 = 100\,000$$

A 13 Empfehlenswerte Literatur

1. *G. Adolph, F. Dziock, D. Heinrich, W. Wemhöner:* „Fachkunde für Elektriker". Verlag H. Stam GmbH, Köln, 4. Aufl. 1970

2. *F. Bergtold:* „Elektronik-Rechnen". Verlag M. Frech, Stuttgart, 1970; TOPP-Reihe Nr. 60

3. – – „Elektronik-Diagramme". Verlag M. Frech, Stuttgart, 1971; TOPP-Reihe Nr. 62

4. *W. M. Köhler:* „Meßinstrumente und ihre Anwendung". Franzis-Verlag, München; Heft 111/112 der „Radio-Praktiker-Bücherei" (Taschenbuch)

5. *H. Meyer:* „Vom Ohm'schen Gesetz zur RC-Schaltung". A. Philler Verlag, Minden; Nr. 2017/2018 der „Lehrmeister-Bücherei" (Taschenbücher)

6. *L. Starke, H. Bernhard:* „Leitfaden der Elektronik", Teil 1 und 2. Franzis-Verlag, München; 4. Aufl. 1970

A 14 Beim ft-service-Händler einzeln erhältliche Teile

(Auszug)

Gelenkstein, Zapfen
rund und eckig

Winkelachse

Doppelkabel blau
1000 mm, Stecker rot
und grün

Doppellitze blau, 1500 mm

Flachstecker, grün
Flachstecker, rot

Leuchtkappe, rot
Leuchtkappe, gelb
Leuchtkappe, grün
Leuchtkappe, blau
Leuchtkappe, weiß

Leuchtstein-Unterteil

Kugellampe

Stufenschalter, Oberteil
Stufenschalter, Unterteil

Taster

Elektromagnet

Verteilerplatte, einpolig

Verteilerplatte, dreipolig

Dauermagnet, grün
Dauermagnet, rot

Achse 110
Achse 60
Achse 50
Achse 30

Klemmkontakt

Federkontakt

Stichwortverzeichnis

L

M

N

O

P

Q

R

S

T

U

V

W

Z

Art.-Nr. 6 39560 7 · Ref.-Nr. 158 · 2/74/8 · Printed in Germany · Copyright by Fischer-Werke · Artur Fischer · 7241 Tumlingen · Änderungen vorbehalten.