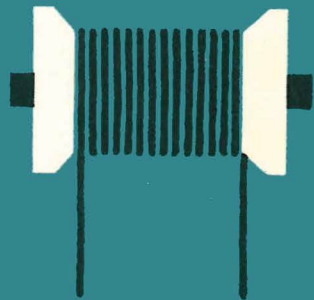
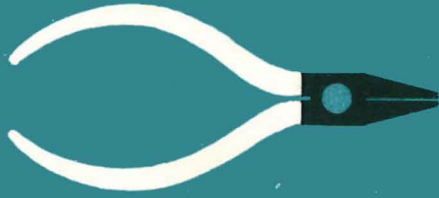
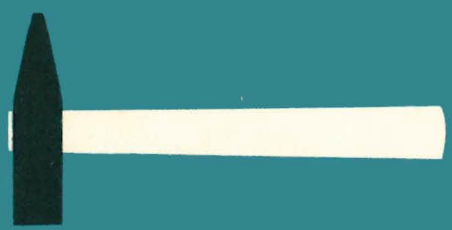
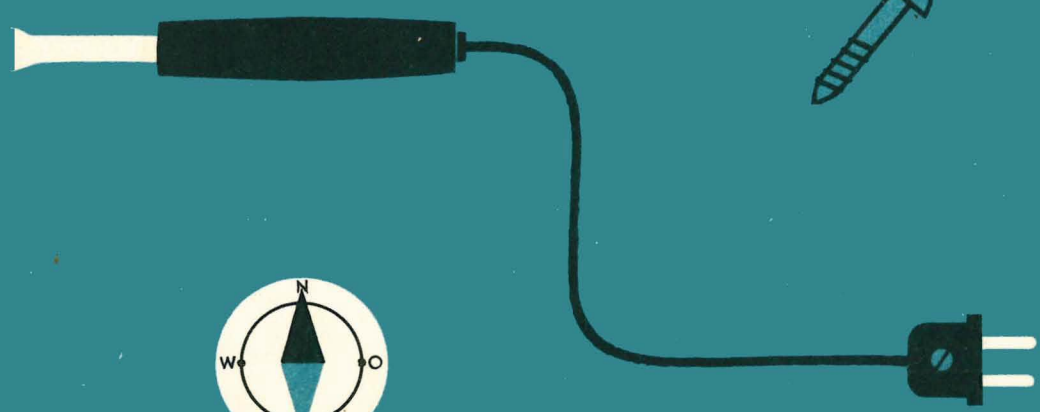


Radiobasteln - leicht gemacht

Hagen Jakubaschk







HAGEN JAKUBASCHK · RADIOBASTELN - LEICHT GEMACHT



HAGEN JAKUBASCHK

RADIOBASTELN LEICHT GEMACHT



DER KINDERBUCHVERLAG BERLIN

Einbandvorderseite: Konrad Golz
Einbandrückseite: Heinz-Karl Bogdanski
Illustrationen: Heinz-Karl Bogdanski
Schaltzeichnungen: Günter Reimann, Heinz Grothmann

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
Teil I	
WIR GEHENDEN DINGEN AUF DEN GRUND	
<i>Die Wärmewirkung des elektrischen Stromes</i>	15
<i>Die chemischen Wirkungen</i>	18
<i>Die magnetische Wirkung</i>	21
<i>Was ist elektrischer Strom?</i>	29
<i>Spannung – Stromstärke – Widerstand</i>	45
Die Spannungsverteilung	45
Die Stromverteilung	49
Wir kombinieren die Serien- und die Parallelschaltung	50
Das Ohmsche Gesetz	51
Der Spannungsteiler	57
<i>Leistung und Arbeit</i>	62
<i>Chemische Stromquellen – Elemente und Batterie</i>	68
Primärelemente	69
Sekundärelemente (Akkumulatoren)	75
<i>Elektromagnetismus</i>	78
Die Spule	78
Wir bauen eine elektrische Klingel	84
Das Relais – ein elektromagnetischer Schalter	88
Das Kompaßgalvanometer – ein Hilfsmittel für uns	92
Meßinstrumente	95
Das Weicheiseninstrument	95
Das Drehspulinstrument	97
Voltmeter und Amperemeter	98

<i>Die Induktion</i>	102
Magnetische Induktion	102
Elektromagnetische Induktion	104
Selbstinduktion	105
Die Zusammenschaltung von Spulen	109
Das Prinzip des Transformators	113
<i>Von Wellen und Frequenzen</i>	117
Wechselstrom und Wechselspannung	117
Der Transformator	127
Der induktive Scheinwiderstand	134
Der Kondensator (Der kapazitive Scheinwiderstand)	139
Drahtlose Energieübertragung	148
Drahtlose Wellen	156
Die Wellenausbreitung	160
<i>Von Mikrofonen und Lautsprechern</i>	164
Schallwandler	164
Der Kopfhörer	165
Das Reissche Telefon	167
Der Lautsprecher	170
Mikrophone	175
<i>Rundfunkröhren (Elektronenröhren)</i>	183
Die Vakuumdiode	183
Das Steuergitter	189
Mehrgitterröhren	204
<i>Transistoren und andere Halbleiter</i>	212
Halbleiterdioden	212
Transistoren	217
Umgang mit Halbleitern	229

Teil II

AUS VIELEN TEILEN WIRD EIN GANZES

Wir lesen Schaltungen	233
„Elektrische Weichen“	236
Der Schwingkreis	239

<i>Ein Sender entsteht</i>	247
Die Rückkopplung	248
Die Modulation	256
<i>So arbeitet ein Empfänger</i>	263
Die Demodulation	264
Die Abstimmung	266
Das Audion	268
Mehrkreisempfänger	274
Der Superhetempfänger	276
Die Überlagerung	277
Der Niederfrequenzverstärker	289
Der Netzteil	296
<i>Kleine Einzelteilkunde</i>	300
Widerstände und Potentiometer	300
Kondensatoren	302
<i>Ultrakurzwellen-Rundfunk (UKW)</i>	304

Teil III

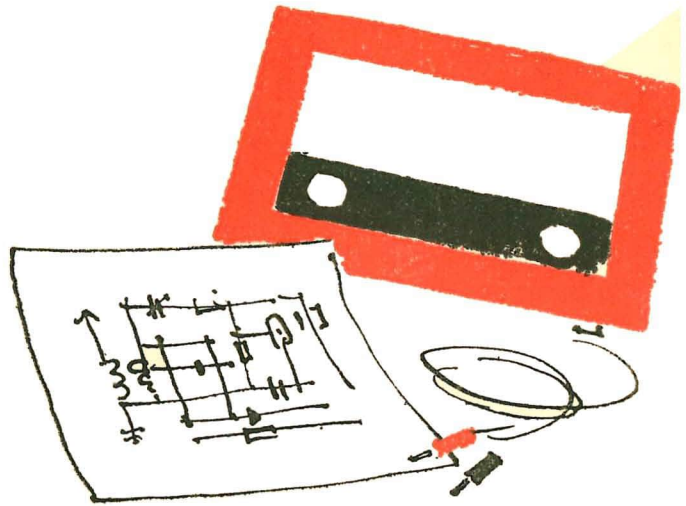
WIR WOLLEN ZEIGEN, WAS WIR GELERNT HABEN (Bauanleitungen)

<i>Allgemeine Hinweise</i>	310
<i>Transistorschaltungen</i>	314
Einfacher Detektorempfänger mit einer Diode	314
Detektorempfänger mit einer Transistor-NF-Stufe	315
Detektorempfänger mit drei Transistoren für Lautsprecherempfang	316
Transistor-Reflex-Audion	319
Universelles Transistor-Audion	321
Transistor-NF-Verstärker für universelle Verwendung	327
<i>Schaltungen mit Röhren</i>	330
Batteriebetriebener Einkreiser mit zwei Röhren für Kopfhörer und Lautsprecher	330
Einkreis-Audion für Netzbetrieb mit einer Doppelröhre	332
NF-Verstärker für Netzbetrieb mit einer Doppelröhre	335

<i>Kleine Hilfsgeräte für den Radiobastler</i>	337
Erweiterung des Meßgerätes „Multiprüfer I“ zum Vielfachmesser	338
Transistor-NF-Generator für universelle Anwendung	341
Ein einfaches Transistorprüfgerät	342
Experimentiernetzteil mit Durchgangsprüfeinrichtung	346
Durchgangsprüfer mit Transistoren für Batteriebetrieb	351
Transistor-Netzteil als Batterie-Ersatz für Transistorgeräte	354

Anhang

Die wichtigsten Schaltsymbole der Rundfunktechnik und Kurzhinweise zu den Einzelteilen	358
Farbkennzeichen auf Kleinstwiderständen	361
Empfehlenswerte Bücher	364



VORWORT

Während ich am Schreibtisch sitze und mir Gedanken mache, wie ich mein Buch beginnen soll, spielt neben mir ein Radio. Es spielt nicht gut; einmal wird es leiser und dann wieder lauter, und manchmal setzt es ganz aus.

Das Radio neben mir ist kein gekauftes Gerät; ich habe es selbst gebaut, um eine neue Schaltung auszuprobieren. Wenn sie sich bewährt, will ich eine Bauanleitung für Bastler schreiben.

Aber die neue Schaltung bewährt sich noch nicht. Es liegt wohl am Oszillator. Ich schalte den Apparat ab und denke an die Zeit zurück, als ich mit der Radiobastelei begann. Damals hatte ich nicht die geringste Ahnung davon, was ein Oszillator ist oder wie eine Radioröhre funktioniert; ich wußte nichts vom Schwingkreis oder von der Berechnung eines Widerstandes. Ich war nur begeistert von der Radiotechnik, und ich besaß eine Bauanleitung, die ich aus der Zeitung ausgeschnitten hatte.

Die Bauanleitung war nicht sehr ausführlich. Sie beschrieb nur, wie die einzelnen Teile zusammengesetzt waren, und eine Stückliste zählte die Teile alle auf. Ich kaufte sie mir, und mein gespartes Geld wurde alle. Das Gerät aber gab, als es fertig war, keinen Ton von sich. Dabei hatte ich mich genau an die Bauanleitung gehalten.

Ich dachte damals, man braucht nur alle Einzelteile richtig miteinander zu verbinden. Daß man auch verstehen muß, was in dem Gewirr von Drähten und Bauteilen vor sich geht, wußte ich nicht. In der Bauanleitung war davon nichts zu lesen.

Inzwischen habe ich gelernt, wie man Radios baut. Man kann nicht gleich mit einem großen Radio anfangen, sondern muß sich erst einmal Grundkenntnisse und Erfahrungen aneignen. Sie verhelfen dann später bei größeren Bastelobjekten zum Erfolg. Sie sind notwendig, damit man eine Bauanleitung nicht nur einfach nachbauen, sondern auch verstehen kann.

Als Radiobastler braucht man nicht genau zu wissen, was im Atomgefüge eines Transistors im einzelnen vor sich geht, und man muß diese Vorgänge nicht unbedingt berechnen können. Aber man muß wissen, wie ein Transistor arbeitet, wie er in ein Radiogerät einzusetzen ist und wie die einzelnen Teile dort zusammenwirken.

Mein Buch ist für die Anfänger im Radiobasteln bestimmt, und deshalb kann es kein Lehrbuch mit viel Theorie und zahlreichen Formeln sein. Es soll all denen, die ernsthaft lernen und systematisch basteln wollen, als praktische Experimentieranleitung dienen.

Wir untersuchen nicht alle Zusammenhänge, sondern beschränken uns auf die Dinge, die der Bastler unbedingt wissen muß. Vieles vereinfachen wir, damit es leichter zu verstehen ist.

Im ersten Teil des Buches werden die wichtigsten Grundlagen beschrieben. Die dort aufgeführten Experimente ermöglichen uns die wichtige praktische Übung für unsere späteren Basteleien.

Im zweiten Teil lernen wir das Zusammenwirken aller Erscheinungen und Einzelteile kennen. Es ist wichtig, daß wir den ersten Teil verstanden haben, bevor wir mit dem zweiten beginnen, denn dort wollen wir uns schon ein wenig an die knappe, sachliche Schreibweise der technischen Literatur gewöhnen, damit wir später auch andere Rundfunkbücher, solche für fortgeschrittene Bastler und Amateure, zur Hand nehmen können. In solchen Büchern, von denen im Anhang einige für uns besonders gut geeignete zusammengestellt sind, können wir später auch Antwort auf zunächst nebensächliche Einzelfragen finden.

Im dritten Teil des Buches finden wir einfache Bauanleitungen, an denen wir unser inzwischen erworbenes Wissen erproben können. Dann wird es uns nicht mehr schwerfallen, auch anspruchsvollere Bauanleitungen zu verstehen oder sogar diese oder jene Schaltung selbst auszuknobeln oder zu verbessern.

Ein Hinweis noch zu den Versuchen: Alle beschriebenen Experimente und Bauanleitungen wurden gründlich erprobt. Wenn es trotzdem einmal nicht gleich funktionieren sollte, so wollen wir

nicht gleich den Mut verlieren. Wir kontrollieren erst einmal, ob wir alles richtig gemacht haben und überlegen uns, worauf es bei dem Versuch ankommt. Meist sind dann kleine, scheinbar nebensächliche Änderungen für das Gelingen des Versuches entscheidend. Wollen wir uns nachsagen lassen, daß wir das Buch ratlos beiseitegelegt haben, nur weil wir nicht bemerkten, daß vielleicht ein Draht unter der Umhüllung gebrochen oder ein Lämpchen durchgebrannt war? Nein! In solchen Fällen können wir beweisen, daß wir denken können. Darauf, auf das selbständige Denken, kommt es in der modernen Technik vor allem an.

Die Grundlagen der Rundfunktechnik sind für Transistoren und Röhren die gleichen. Moderne rundfunktechnische und elektronische Geräte sind sehr oft mit Transistoren (Halbleitern) aufgebaut. Deshalb erscheint es vielleicht etwas verwunderlich, wenn wir in diesem Buch besonders ausführlich auf die Technik der „Radioröhre“ eingehen. Das hat aber seinen guten Grund. Transistorschaltungen sind zwar manchmal leichter nachzubauen als Röhrenschaltungen; ihre Wirkungsweise ist aber für Anfänger zunächst schwerer zu verstehen als die einer Röhrenschaltung. Außerdem gibt es seit einigen Jahren für Radiobastler verhältnismäßig viele Bücher und andere Veröffentlichungen über Transistoren und deren Anwendung. Bücher über den Umgang mit Radioröhren sind seltener und oft auch älteren Datums, aber — die Radioröhre ist zwar viel älter als der Transistor, doch noch längst nicht „unmodern“ oder „veraltet“! Deshalb ist es durchaus zweckmäßig, wenn wir uns mit den Grundlagen der Rundfunktechnik zunächst im Zusammenhang mit der Radioröhre vertraut machen und erst danach feststellen, wie man die gleichen Wirkungsweisen mit dem so ganz anders beschaffenen Bauelement „Transistor“ erreicht. Deshalb finden wir im dritten Teil des Buches nicht nur Transistorschaltungen als Bastelvorlagen, sondern daneben auch entsprechende Schaltungen mit Röhren — sie werden auch dann, wenn wir sie nicht nachbauen, das Verständnis für die Wirkungsweise von Transistorschaltungen erleichtern; denn ein Vergleich zwischen dem Aufbau einer Röhrenschaltung und dem einer Transistorschaltung zeigt deutlich den Unterschied zwischen Funktionsprinzip (dem Grundgedanken) und Funktionsweise (den Mitteln, mit denen der Grundgedanke verwirklicht wird). Diese beiden Dinge klar auseinander halten zu können, ist für den Bastler wie für den Techniker sehr wichtig.

TEIL I



WIR GEHEN DEN DINGEN AUF DEN GRUND

Die Wärmewirkung des elektrischen Stromes

Wir brauchen eine Taschenlampenbatterie (Flachbatterie 4,5 Volt), die völlig frisch sein muß, und ein dünnes Kupfer- oder Eisendrähchen von 2 bis 3 cm Länge. Das Drähchen können wir aus einem alten Stück Litze (Netzkabel von elektrischen Geräten) herausziehen; auch Blumenbindendraht eignet sich dazu.

Mit einer Pinzette oder Wäscheklammer halten wir das Drähchen quer über beide Anschlüsse der Batterie (Abb. 1). Der Draht glüht auf. Wenn die Batterie frisch ist, schmilzt er sogar.

Diese Erkenntnis wird bei der Wärmeplatte angewendet; auch beim Bügeleisen, dem Tauchsieder und der Glühlampe.

In der Glühlampe wird der Glühdraht bis zur hellen Weißglut erhitzt. Damit er dabei nicht verbrennt, ist er durch einen luftleeren oder mit chemisch unwirksamem Edelgas gefüllten Glaskolben gegen die Außenluft abgeschlossen.

Eine andere Anwendung der Wärmewirkung des elektrischen Stromes stellt die elektrische Schmelzsicherung dar. Sie enthält ein dünnes Drähchen, das in den zu schützenden Stromkreis eingeschalt-



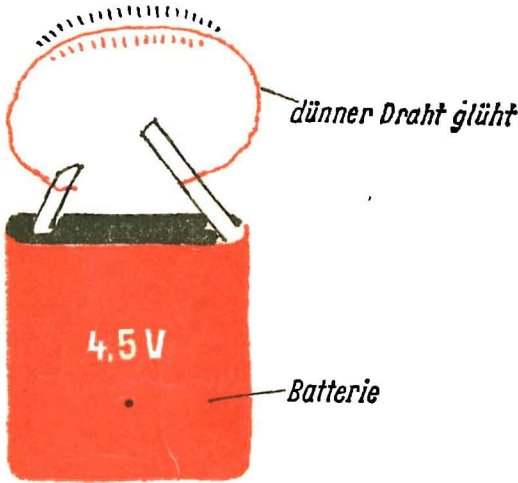


Abbildung 1

tet ist. Wird der Strom darin zu stark, dann schmilzt das Drähtchen und unterbricht den Stromkreis. Das können wir leicht mit einer kleinen Radiosicherung ausprobieren. Halten wir sie an beide Anschlüsse einer Batterie, dann glüht das Drähtchen kurz auf; es schmilzt sofort und unterbricht den Stromkreis. Da nun kein Strom mehr fließen kann, erkalten die Drahtenden wieder.

Wir wollen uns hier gleich einige Schaltsymbole einprägen. Diese Symbole werden benutzt, um Stromläufe übersichtlich darzustellen. Abb. 2 zeigt die soeben von uns benutzten Gegenstände und darüber ihre Schaltsymbole oder Schaltzeichen.

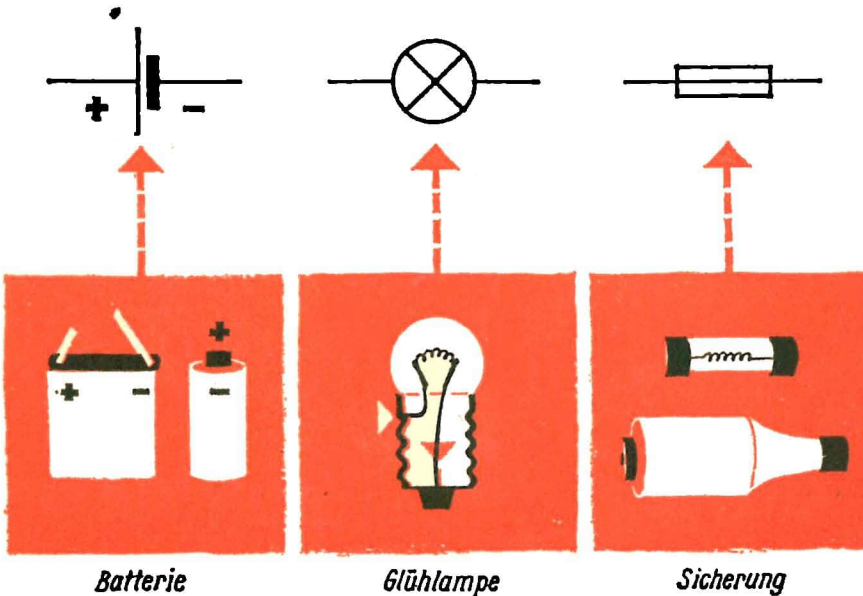


Abbildung 2

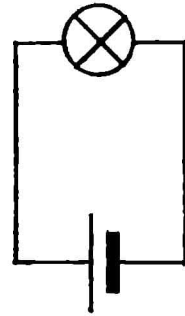


Abbildung 3

Die Lichterzeugung bei den Glühlampen beruht also auch auf der Wärmewirkung des elektrischen Stromes. Zum großen Kummer der Techniker, denn die Wärme der Glühlampe ist hier eine unerwünschte Nebenwirkung, die sehr viel Energie nutzlos vergeudet. Es gibt bessere Verfahren, um Elektrizität in Licht umzuwandeln. Die Nebenwirkungen, wie die Wärme, sind dabei geringer. Hierzu gehören beispielsweise die bekannten Leuchtröhren und die Glimmlampen. Sie haben keinen Glühdraht; bei ihnen leuchtet die Gasfüllung selbst. Doch mit diesen Verfahren wollen wir uns hier nicht näher beschäftigen.

Der Versuch mit dem Schmelzdrähtchen hat uns noch etwas anderes, sehr wichtiges gezeigt: Ein Stromkreis muß stets geschlossen sein, wenn der Strom wirken soll.

Abb. 3 zeigt einen einfachen Stromkreis. Wir benötigen dafür nur eine Taschenlampenbatterie und ein dazu passendes Glühlämpchen, das wir über zwei Drähte mit der Batterie verbinden. In Abb. 3 ist außer der Versuchsanordnung noch der gleiche Stromlauf unter Benutzung der Schaltsymbole dargestellt. Der Strom fließt von einem Batteriepol zum Lämpchen, über dessen Gewinde zum Glühdraht und zum Fußkontakt des Lämpchens, von da zurück zur Batterie. Wird dieser Kreislauf an beliebiger Stelle unterbrochen, so kann kein Strom mehr fließen – das Lämpchen erlischt, wenn wir einen

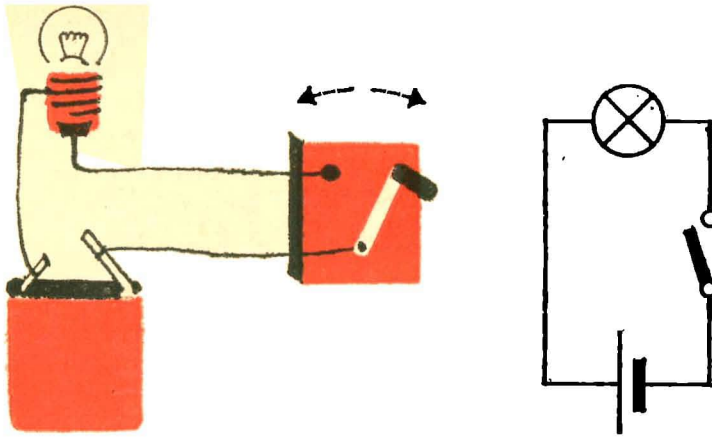


Abbildung 4

der beiden Drähte durchschneiden. Stromwirkungen können also durch Unterbrechungen und Schließen des Stromkreises beliebig herbeigeführt werden.

In der Praxis benutzt man zum Unterbrechen von Stromkreisen Schalter, die in den Stromkreis eingeschaltet werden, wie Abb. 4 zeigt. Dort ist außer der Versuchsanordnung wieder die Schaltzeichnung zu sehen, in der wir auch das Symbol für einen Schalter erkennen.

Für unsere Versuchszwecke ist ein Klingelausschalter am besten geeignet. Durch Verschieben seines Hebelarmes wird der Stromkreis geschlossen oder unterbrochen. Alle üblichen technischen Schalter funktionieren auf diese Weise, auch wenn sie meist komplizierter aufgebaut sind. Es ist übrigens gleich, ob wir den Schalter in die rechte oder linke Batterieleitung legen; es ist gleich, an welcher Stelle der Stromkreis unterbrochen wird.

Die chemischen Wirkungen

Der Strom kann auch chemische Wirkungen auslösen. Wir zeigen das mit einem Versuch nach Abb 5. Dazu brauchen wir ein Becherglas und zwei blanke Metallplatten von etwa 2×4 cm Größe. Kupferblech ist besonders gut geeignet, aber auch andere Bleche lassen sich verwenden.

Die beiden Platten verbinden wir mit einer Taschenlampenbatterie (4,5-Volt-Batterie). Das Glas füllen wir mit Leitungswasser, dem wir einige Tropfen Essig oder ein wenig Kochsalz begeben.

Nach einiger Zeit bemerken wir an den beiden Metallplatten kleine Bläschen, die dann bald nach oben steigen. An der mit dem Minuspol



der Batterie verbundenen Metallplatte steigen bedeutend mehr Bläschen auf als an der mit dem Pluspol verbundenen Platte. Wir können deshalb mit diesem Versuch bei einer Batterie Plus- und Minuspol unterscheiden.

Nun haben wir wieder einige Begriffe kennengelernt: Pluspol und Minuspol. Woher diese Bezeichnungen kommen, erfahren wir später. Wir wollen uns vorläufig nur merken, daß die Flußrichtung des Stromes vom Minuspol der Stromquelle – hier also der Batterie – zum Pluspol verläuft. In Abb. 2 waren die Polbezeichnungen an der Batterie und am Schaltsymbol schon angegeben.

Bei den bekannten Taschenlampen-Flachbatterien ist die kurze Fahne stets der Pluspol, die lange Anschlußfahne der Minuspol.

Die beiden Metallplatten in der Versuchsanordnung nach Abb. 5 werden Elektroden genannt. Die mit dem Minuspol verbundene Elektrode nennt man Kathode; die mit dem Pluspol verbundene Elektrode heißt Anode. Die ganze Anordnung nach Abb. 5 ist ein galvanisches Bad. Galvanische Bäder haben in der Elektrochemie eine sehr große Bedeutung.

Im galvanischen Bad tritt der Strom aus der Kathode in die Flüssigkeit über und wird von der Anode wieder aufgenommen. Die Kathode

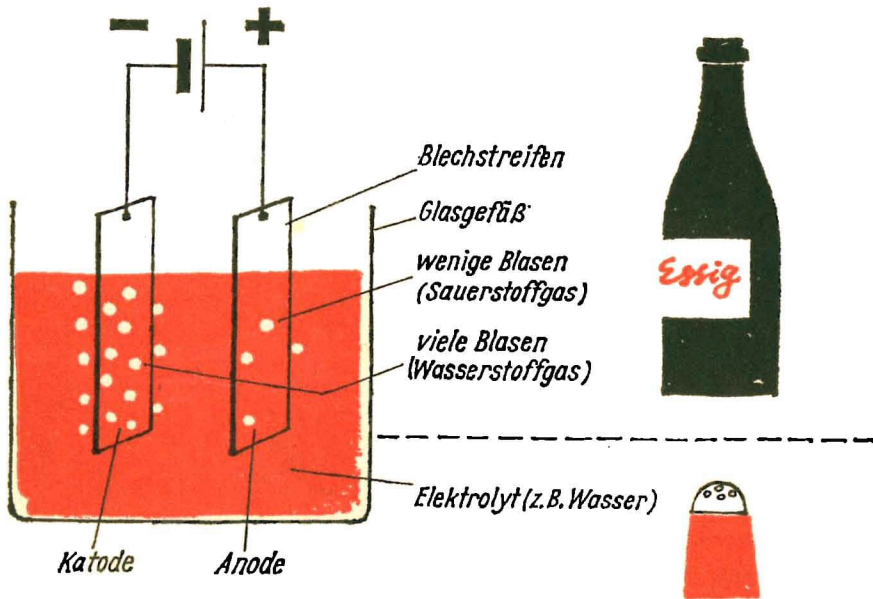


Abbildung 5

ist also stets die Elektrode, aus der der Strom austritt. Das wollen wir uns merken, denn diese Begriffe werden uns noch oft begegnen. In der Industrie benutzt man galvanische Bäder unter anderem zum Veredeln von Metallen. Um einen solchen Prozeß nachzuahmen, ersetzen wir die Elektroden unseres galvanischen Bades einmal durch blanke Eisenbleche, danach durch Kohlestifte. Die Kohlestifte können wir aus alten Taschenlampenbatterien ausbauen.

In Wasser lösen wir nun möglichst viele Kupfersulfatkristalle auf, so daß eine tiefblaue Lösung entsteht. Nachdem der Strom einige Zeit durch das galvanische Bad geflossen ist, stellen wir fest, daß sich an der Katode eine dünne Schicht metallischen Kupfers absetzt, die mit zunehmender Versuchsdauer immer dicker wird. Wir können danach an der verkupferten Kohle sogar einen Draht anlöten.

Damit der Versuch gelingt, darf der Strom jedoch nicht zu stark sein, sonst scheidet sich das Kupfer als schwammiger, schwärzlicher Belag ab, der leicht abwischbar und kaum als Metall erkennbar ist. Wir müssen es dann mit einer schwächeren Batterie, beispielsweise mit einer 1,5-Volt-Monozelle, versuchen.

Nähere Hinweise zu diesem Verfahren finden wir in dem im Anhang genannten Buch „Elektrotechnik – leicht gemacht“; für den Radiobastler hat dieses Verfahren weniger Bedeutung. Sehr wichtig für uns sind aber die chemischen Stromquellen, die wir später noch genauer kennenlernen werden.

Die magnetische Wirkung

Für unsere Versuche brauchen wir jetzt einen Dauermagneten. Das kann ein Spielzeug-Hufeisenmagnet sein, besser eignen sich aber Dauermagnete aus alten Lautsprechern.

Mit einem Ende des Magneten bestreichen wir einen Kupferstift (Kupferdrahtstück), einen Weicheisenstift (Eisendrahtstück) und einen Stahlstift mehrmals nacheinander in gleicher Richtung. Wir stellen dabei fest, daß Kupfer völlig unmagnetisch ist; es zeigt keine Anziehungswirkung. Bei Weicheisen und Stahl ist sie jedoch deutlich erkennbar.

Nachdem wir den Magneten beiseite gelegt haben, können wir feststellen, daß der Stahlstift jetzt seinerseits zum Magneten geworden ist. Er zieht nun selbst kleine Eisenteile, Stecknadeln und ähnliches an. Diese bleibende Magnetkraft heißt remanenter Magnetismus; entsprechende Magneten nennt man Permanentmagneten.

Weicheisen wird zwar vom Magneten angezogen, seine Magnetkraft verschwindet jedoch wieder, wenn wir den Magneten entfernen. Daher vermag der Weicheisenstift nachträglich keine fremden Eisenteilchen anzuziehen; er zeigt also keinen remanenten Magnetismus. Für den nächsten Versuch benötigen wir zwei gleiche Permanentmagneten. Eventuell genügen dafür schon zwei Stahlnägel, die wir durch Bestreichen mit unserem Magneten zu kleinen Permanentmagneten machen.





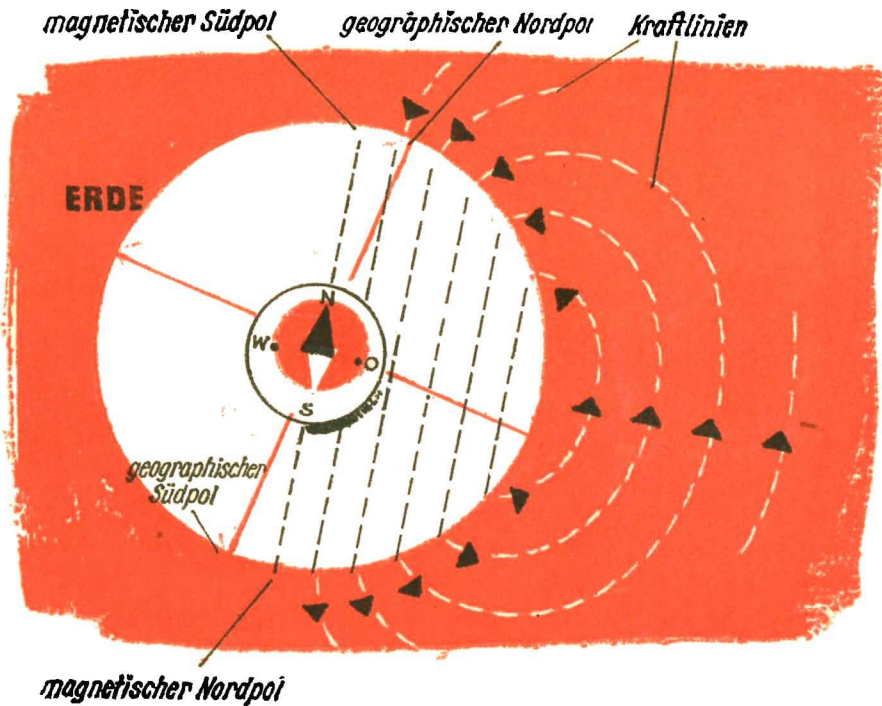
An handelsüblichen Magneten sind meist beide Pole unterschiedlich gekennzeichnet; sie werden als Nordpol und Südpol bezeichnet. Unsere Stahlnägel bestreichen wir nun in gleicher Richtung, so daß beide Kuppen beziehungsweise beide Spitzen gleiche Pole ergeben. Wenn wir diese beiden Magneten jetzt einander so nähern, daß sich gleiche Pole begegnen, dann bemerken wir eine deutliche Abstoßung. Begegnen sich verschiedene Pole, so bemerken wir eine deutlich verstärkte Anziehung. Aus diesem Versuch leiten wir eine wichtige Regel ab, die wir uns fest einprägen müssen:

Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige Pole ziehen sich an.

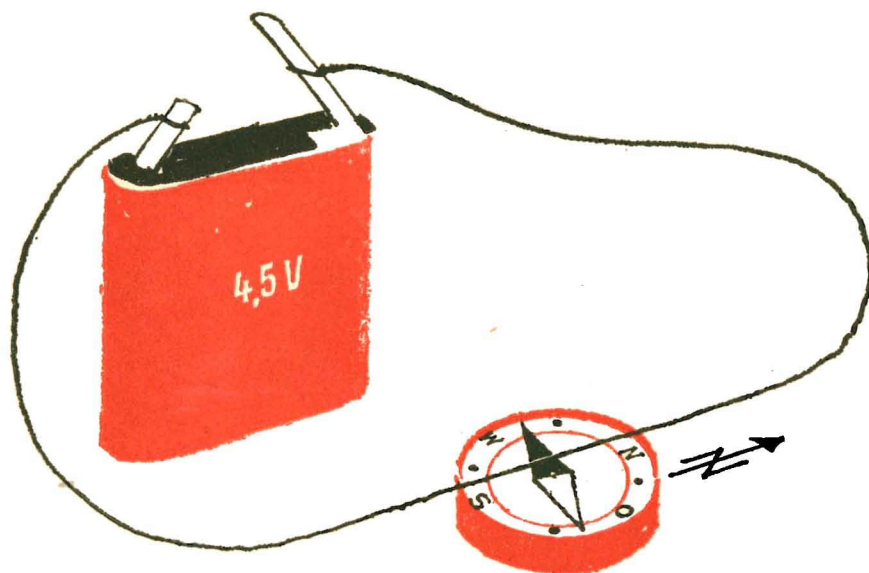
Auch die Erde hat ein Magnetfeld, das ungefähr in Richtung der Erdachse verläuft. In Nähe des geographischen Nordpols liegt der magnetische Südpol der Erde, in Nähe des geographischen Südpols der magnetische Nordpol. Die Kompaßnadel eines magnetischen Kompasses (etwa eines Schülerkompasses) besteht aus einer kleinen magnetisierten Stahlnadel; sie ist also nichts anderes als ein kleiner, drehbar gelagerter Permanentmagnet, dessen dunkel gefärbter Teil der Nordpol ist. Da sich ungleichnamige Pole anziehen, weist diese Nadelseite also immer zum magnetischen Südpol der Erde und damit fast genau zum geographischen Nordpol. Halten wir einen Permanentmagneten, dessen Magnetkraft stärker ist als das ziemlich schwache Erdmagnetfeld, in die Nähe der Kompaßnadel, so weist diese mit ihrem Nordpol zum Südpol unseres Magneten.

Kleine Magnetnadeln können wir selbst herstellen. Dazu benutzen wir kurze Uhrfederstücke, die sich, nachdem sie ausgeglüht worden sind, mit dem Hammer geradestrecken lassen.

Ein Korken bildet den Fuß unseres Kompasses. Durch ihn wird eine Stecknadel gesteckt, auf deren Spitze die Magnetnadel ruhen soll.



Zunächst stellen wir dann durch vorsichtiges Ausbalancieren des Stahlfederstreifchens dessen genaue Mitte (Schwerpunkt) fest. Dort schlagen wir mit einer Nagelspitze eine leichte Vertiefung ein, damit das Blechstreifchen später nicht von der Stecknadel abgleitet. Anschließend magnetisieren wir es durch Bestreichen mit einem Permanentmagneten und setzen es auf die Nadelspitze auf. Dort stellt sich unsere selbstgefertigte Magnetnadel wie jede andere Kompaßnadel in die Nordsüdrichtung der Erde ein. Für den nächsten Versuch, der uns den Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus zeigen wird, können wir diese Magnetnadeln verwenden. Wir wiederholen einen klassischen Versuch, den der Däne Oerstedt vor über hundert Jahren erstmalig durchführte. Dazu brauchen wir wieder eine frische Taschenlampenbatterie und ein etwa 50 cm langes Stück Leitungsdraht, der wenigstens 1 mm stark sein soll (beispielsweise Klingeldraht). Den Draht führen wir dicht über unsere Magnetnadel oder einen Schülerkompaß so entlang, daß er in der gleichen Richtung wie die Nadel liegt, also in Nordsüdrichtung. Die Enden biegen wir so um, daß wir sie mit der Batterie verbinden



können. Die Dauer des Versuchs soll nicht ausgedehnt werden, weil dabei die Batterie sehr schnell erschöpft wird.

Sobald beide Batteriepole angeschlossen sind, dreht sich die Magnetnadel aus der Nordsüdrichtung und stellt sich fast quer zum Draht. Wenn sich der Draht ganz dicht über der Nadel befindet und die Batterie kräftig genug ist, stellt sich die Nadel genau quer. Unterbrechen wir den Strom, indem wir ein Drahtende von der Batterie lösen, so geht die Nadel wieder in die alte Stellung zurück.

Offenbar erzeugt der fließende Strom also ein Magnetfeld. Es scheint quer zum Draht zu verlaufen, denn die Nadel stellt sich ja nach der bereits genannten Regel immer so ein, daß ihre Pole den entgegengesetzten Polen des fremden Magnetfeldes zugekehrt sind. Also müßte das quer zum Draht liegende Magnetfeld auch einen Nord- und Südpol aufweisen!

Wir wiederholen den Versuch, indem wir die Batterie umpolen, also ihre Anschlüsse vertauschen, so daß der Strom in umgekehrter Richtung durch den Draht fließt. Tatsächlich schwenkt die Magnetnadel wieder aus, aber diesmal nach der anderen Seite. Das Magnetfeld hat sich also umgekehrt, seine Lage ist demnach auch von der Stromrichtung abhängig.

Die Stärke des Magnetfeldes hängt von zwei Bedingungen ab: von der Stärke des Stromes und vom Abstand zum Stromleiter. Letzteres ist nachprüfbar, wenn wir die Nadel etwas vom Draht entfernen; die Ablenkung ist dann bedeutend geringer. Daß sie auch mit schwä-

cherem Strom geringer wird, können wir nachweisen, wenn wir eine etwas verbrauchte Batterie, die in der Taschenlampe nur noch schwaches Licht gibt, für den Versuch benutzen. Bei gleichem Abstand zwischen Draht und Kompaßnadel ist die Ablenkung bei der verbrauchten Batterie geringer als bei der frischen.

Wie sieht das Magnetfeld nun wirklich aus und welchen Verlauf hat es? Um das feststellen zu können, müssen wir uns erst einmal überlegen, wie wir das unsichtbare Magnetfeld mit einem Hilfsmittel sichtbar machen können. Dafür gibt es einen einfachen Trick, den wir zunächst mit unserem Permanentmagneten erproben.

Wir legen auf den Magneten ein Blatt Papier und streuen dann gleichmäßig dünn feines Eisenpulver auf (das Eisenpulver erhalten wir entweder in einer Chemikalienhandlung oder als Feilstaub in einer Schlosserei). Wenn das Eisenpulver größere Metallspäne enthält, muß es gesiebt werden.

Wir klopfen nun ganz leicht an das Papier und sehen dann eine Figur, wie sie Abb. 6 zeigt. Das Eisenpulver hat sich im Magnetfeld

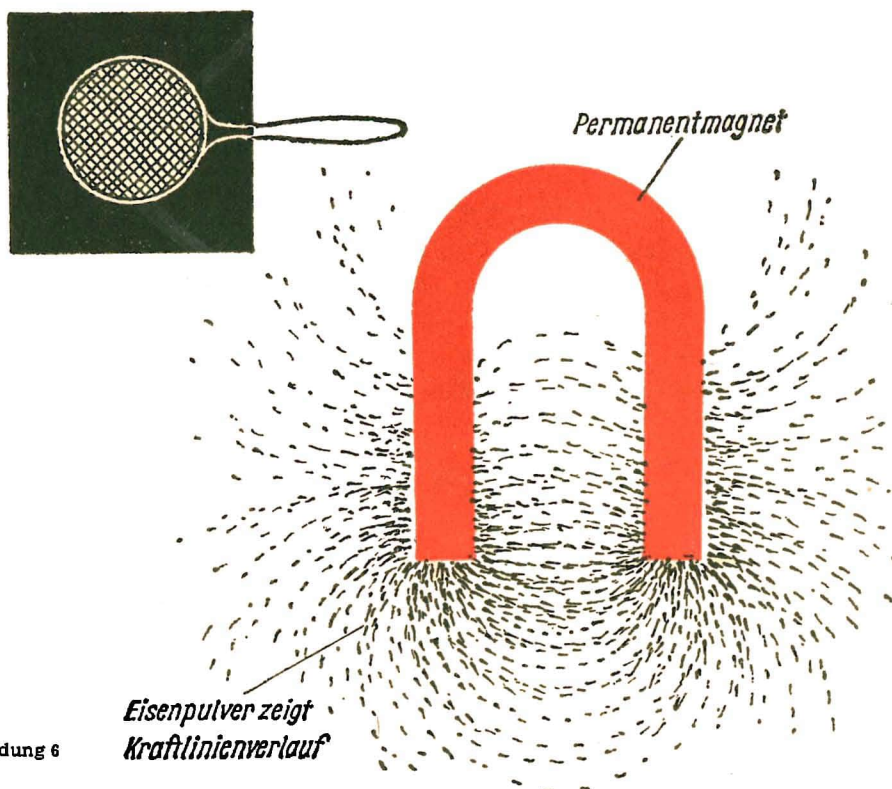


Abbildung 6

linienförmig geordnet. Dieser Anblick hat zu dem Begriff der „magnetischen Kraftlinien“ geführt. Man kann daraus den Verlauf des Magnetfeldes gut ersehen.

Wenn wir aber von „Kraftlinien“ sprechen, wollen wir nie vergessen, daß das nur ein Hilfsbegriff ist. Das Magnetfeld besteht nicht etwa aus unsichtbaren Fäden, zwischen denen keine Kraftwirkung auftritt, sondern es ist lückenlos. Es gibt also keine einzelne Kraftlinie!

Wie das Magnetfeld bei einem Permanentmagneten verläuft, wissen wir nun. Wie verläuft es aber bei einem stromdurchflossenen Draht?

Das stellen wir mit einem Versuchsaufbau nach Abb. 7 fest. Eine Stricknadel stecken wir senkrecht durch eine Postkarte. Die Enden der Stricknadel verbinden wir wieder über zwei kurze und möglichst dicke Drähte mit der Batterie, nachdem wir rund um die Stricknadel feines Eisenpulver dünn und gleichmäßig aufgestreut haben.

Wenn die Batterie angeschlossen ist, klopfen wir leicht an die Pappe. Das Pulver ordnet sich dann ringförmig um den Draht an, und wir

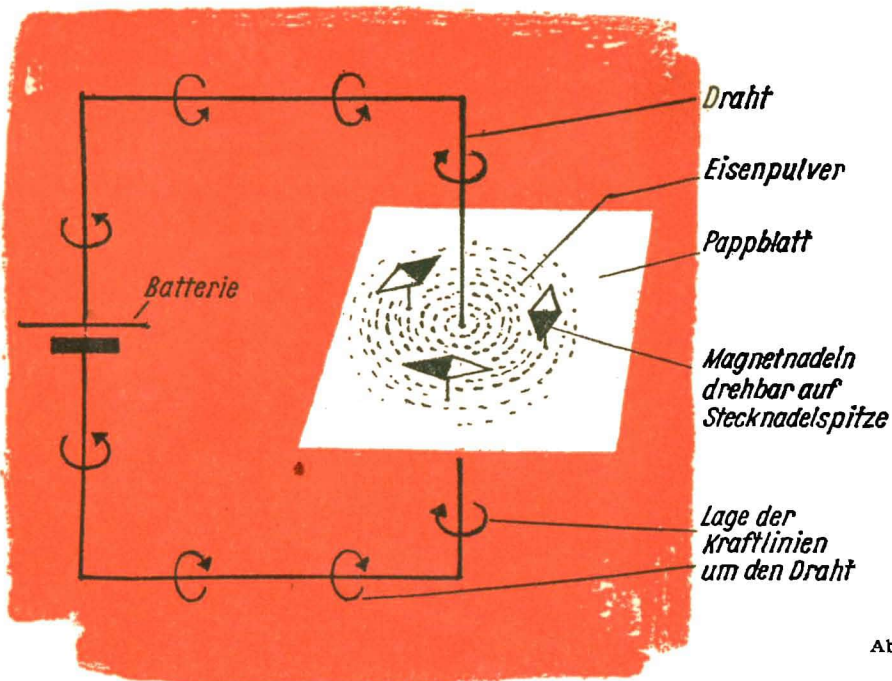
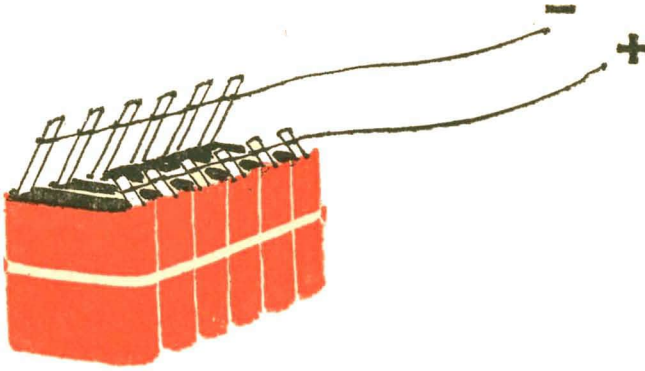


Abbildung 7



erkennen, daß das Magnetfeld nicht einfach quer zur Leitung, sondern rund um sie verläuft.

Wir können auch dicht neben der Leitung einige Magnetnadeln anordnen. Als Lagerspitzen stechen wir Stecknadeln von unten durch die Pappe. Beim Schließen des Stromkreises stellen sich die Magnetnadeln längs der am Eisenpulver sichtbaren kreisförmigen Kraftlinien ein. Polen wir die Batterie um, so drehen sich auch die Magnetnadeln um.

Beim Abschalten des Stromes verschwindet das Magnetfeld wieder. Die Magnetnadeln stellen sich alle in die Nordsüdrichtung des Erdmagnetfeldes, und die Ringfigur im Eisenpulver wird durch leichtes Klopfen sofort wieder verwischt. Zwischen der Drehrichtung des Magnetfeldes und der Stromrichtung besteht ein Zusammenhang.

Damit der beschriebene Versuch gelingt, muß der Stromfluß genügend stark sein. Trotzdem werden wir die Ringfigur im Eisenpulver nur in nächster Nähe des Drahtes erkennen, wenn wir nicht zuviel Eisenpulver aufgestreut haben. Das Magnetfeld des Drahtes reicht zwar sehr weit — theoretisch sogar unendlich weit, denn die Empfangswirkung der Ferritantenne in unserem Kofferradio zum Beispiel beruht darauf, wie wir später noch sehen werden — aber es ist schon in geringer Entfernung vom Draht bei unserem Versuch zu schwach, um das Eisenpulver noch zu beeinflussen. Besser gelingt der Versuch deshalb mit einer stärkeren Batterie. Entweder verwenden wir einen kleinen Motorradakku oder einen ähnlichen Akku mit etwa 4 Volt — aber dann kann der Strom schon so stark werden, daß unsere Drähte zu glühen beginnen (siehe Versuch nach Abb. 1). Wir dürfen dann also immer nur ganz kurz einschalten, zumal diese starke Belastung auch für den Akku nicht gut ist, oder wir benutzen fünf bis sechs gleiche, frische Taschenlampen-Flachbatterien, die wir parallelschalten. Dazu verbinden wir alle kurzen Anschlußfahnen

miteinander – das ist dann der eine Pol unserer Batteriekombination – und alle langen Anschlußfahnen, die den zweiten Pol ergeben. Da wir den Versuch nur während einer sehr kurzen Dauer durchführen, können wir die Batterien später noch für andere Versuche verwenden. Wieso der Strom durch diese Parallelschaltung stärker wird, erfahren wir, wenn wir uns später mit Batterien beschäftigen.

Die Lage des Magnetfeldes um einen stromdurchflossenen Draht müssen wir im Gedächtnis behalten. Dieses Magnetfeld besteht natürlich nicht nur an der Stelle unseres Pappblattes, sondern um die gesamte Leitung. In Abb. 7 ist das durch Pfeile angedeutet.

Wir haben nun die grundsätzlichen Wirkungen des elektrischen Stromes erkannt. Auf einige dieser Versuche werden wir später noch zurückkommen.

Jetzt wissen wir, wie der elektrische Strom wirkt, aber was elektrischer Strom ist, das wissen wir noch nicht.



Was ist elektrischer Strom?

Wenn wir im Lexikon nachschlagen, so lesen wir: Strom ist eine Elektronenbewegung. Was aber sind Elektronen? Schlagen wir wieder nach: Elektronen sind kleinste Bauteilchen des Atoms. Auch was ein Atom ist, steht im Lexikon. Nun müßten wir ja alles wissen.

Wir sehen, so geht es nicht. Versuchen wir also, diesen Zusammenhänge ganz einfach zu erklären.

Wir wissen, daß alle Stoffe auf der Erde und im Weltall aus Atomen bestehen. In fast allen Stoffen sind die Atome zu Molekülen vereint – doch damit wollen wir uns hier nicht näher befassen. Schauen wir uns statt dessen ein Atom an – vielmehr, versuchen wir es uns vorzustellen, denn ein einzelnes Atom läßt sich nicht sichtbar machen.

Jedes Atom besteht aus einem Atomkern, der von winzigen Atomteilchen, den Elektronen, umkreist wird.

Im einfachsten Fall – nämlich beim Wasserstoffatom – besteht das Atom nur aus dem Kern und einem Elektron, das den Kern umkreist. Der Kern besteht in diesem Fall nur aus einem Proton. Wir können uns das etwa so vorstellen, wie Abb. 8 es andeutet. Ähnlich, wie die Erde eine bestimmte Kreisbahn um die Sonne durchläuft, hält auch das Elektron eine bestimmte Bahn um den Atomkern ein. Wie kommt das?

Machen wir einen einfachen Versuch! Wir binden einen Stein an eine Schnur und schleudern ihn im Kreis herum. Wenn wir die Schnur loslassen, so fliegt der Stein durch die Wirkung der Fliehkraft davon. Solange wir die Schnur aber festhalten, kann er das nicht – nicht etwa nur, weil die Schnur ihn hält, sondern weil wir der Fliehkraft eine gleichgroße Zugkraft entgegensetzen. Wir ziehen den Stein mit der gleichen Kraft zu uns heran, mit der ihn die Fliehkraft von uns wegzieht. Beide Kräfte halten sich die Waage.

Elektron und Atomkern sind natürlich durch keine Schnur verbunden. Aber ähnlich wie zwischen den Polen eines Magneten, besteht auch zwischen Atomkern und Elektron eine Anziehungskraft. Durch ihre Wirkung würde das Elektron zum Atomkern hinfliegen, wenn diese Zugkraft nicht durch die Fliehkraft ausgeglichen würde.

Nun haben wir bereits, als wir über den Magneten sprachen, erfahren, daß sich ungleiche Pole anziehen. Also stellt das Elektron offenbar einen „Gegenpol“ zum Atomkern dar? So ist es tatsächlich, obwohl diese Anziehung nichts mit dem zu tun hat, was wir bei unseren Experimenten als magnetische Anziehung kennenlernten.

Die Erklärung dafür, wie die Anziehung im Atominnenen zustande kommt, wäre für uns zu kompliziert. Aber die beiden Pole müssen

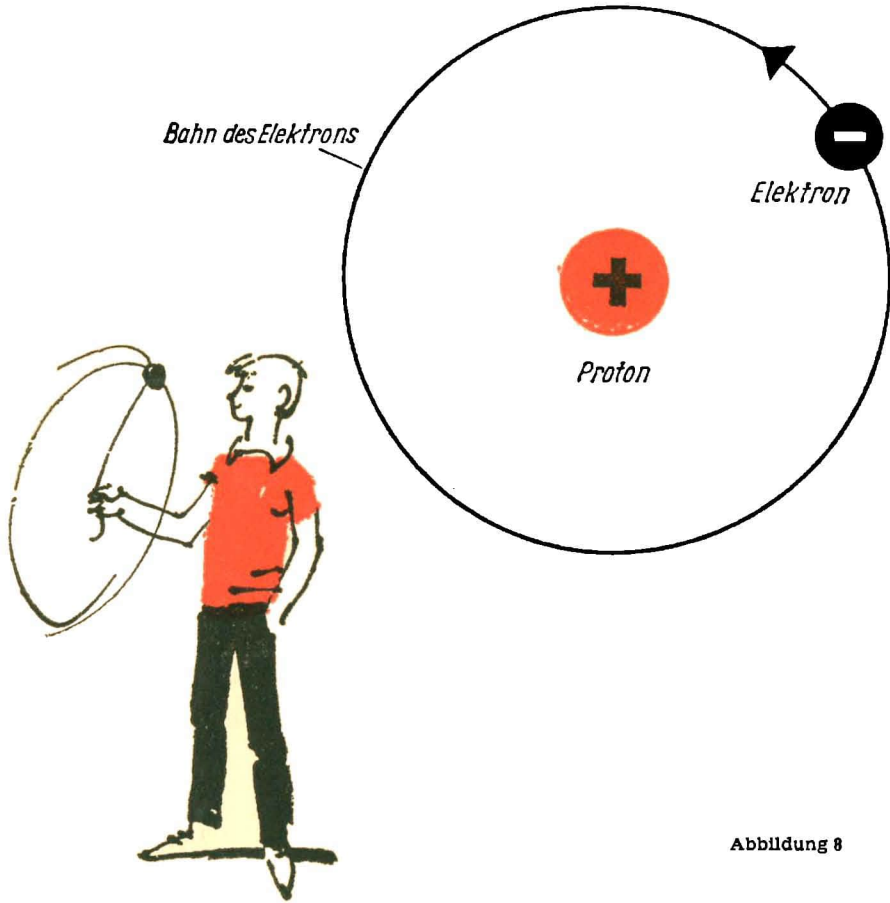
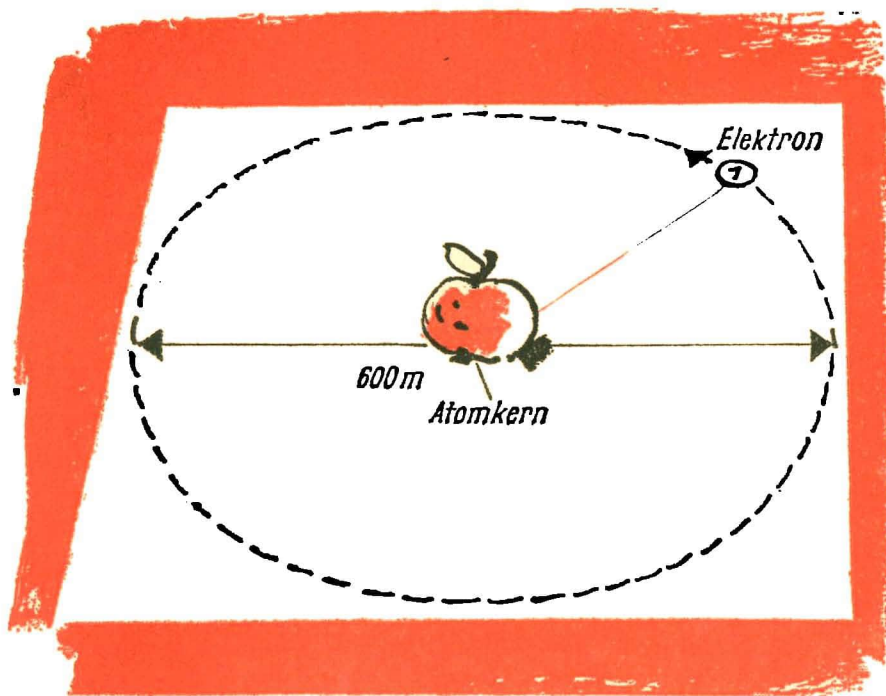


Abbildung 8

wir unterscheiden lernen – oder, um uns gleich an das Fachwort zu gewöhnen: Wir müssen zweierlei Polarität unterscheiden. Die Physiker sagen, daß beide Teilchen – das Proton im Atomkern und das Elektron in der Atomhülle – zweierlei elektrische Ladung haben: Das Elektron ist negativ geladen, das Proton positiv. In Abb. 8 sind die Polaritäten mit dem Zeichen + und – gekennzeichnet.

Nun wollen wir uns eine Vorstellung über die Größe eines solchen Atoms schaffen. Die Masse des Elektrons beträgt nur etwa $\frac{1}{1836}$ der des Protons; wir können uns also das Elektron wesentlich kleiner und leichter denken als den Atomkern, in dem fast die ganze Masse des Atoms vereinigt ist.

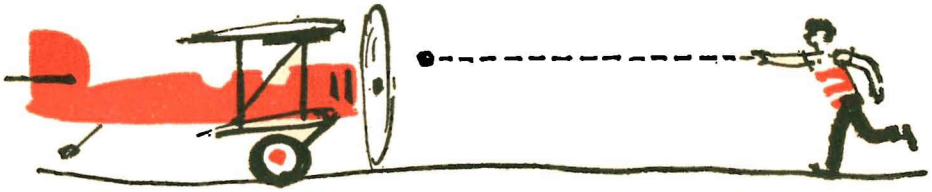
Zahlen für Größe und Gewicht anzugeben, hat wenig Sinn; sie sind so klein, daß wir uns darunter ohnehin nichts vorstellen könnten. Statt dessen soll uns wieder ein Vergleich helfen: Stellen wir uns den Atomkern etwa in der Größe eines Apfels vor, dann würde das Elektron ein Pfennigstück sein, das den Apfel in einer Entfernung von ungefähr 300 Metern umkreist! Dazwischen ist – außer der



Kraftwirkung, die wir mit Hilfe des Schnurbeispiels anschaulich gemacht haben – scheinbar nichts, nur „leerer Raum“.

In Wirklichkeit ist dieser Raum nicht leer. Das wird verständlich, wenn wir die Geschwindigkeit betrachten, mit der das Elektron den Kern umkreist. Sie beträgt beim Wasserstoffatom über 2000 Kilometer in der Sekunde! Jeder kann sich ausrechnen, wie viele Male das Elektron den Kern in jeder Sekunde umkreist: Das ganze Atom – dessen Halbmesser wir in unserem Vergleich mit 300 Metern angenommen haben – hat einen Durchmesser von weniger als einem millionstel Millimeter!

Wir wollen aber trotzdem noch einmal zu unserer bildhaften Vorstellung vom Atom zurückkehren. Wenn das Atom hauptsächlich aus „leerem Raum“ bestünde, müßte es möglich sein, ein einzelnes Elektron oder einen einzelnen Atomkern wie einen Stein durch das Wasserstoffatom hindurchzuwerfen. Die Gefahr, daß dabei das Elektron oder das Proton getroffen wird, müßte dann doch sehr gering sein?



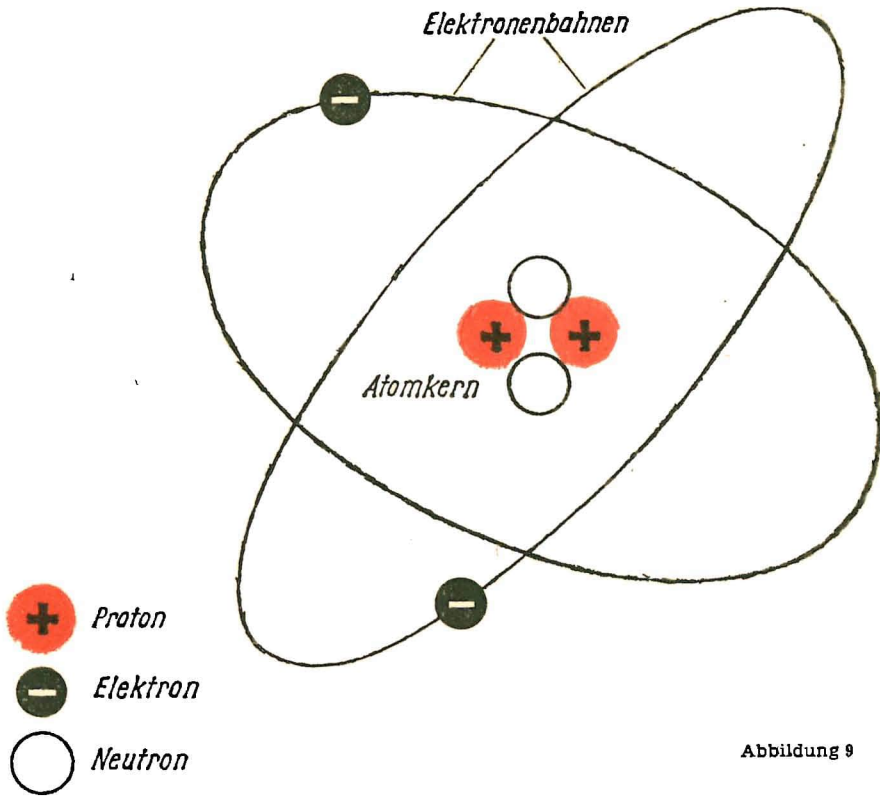
Denken wir noch einmal an das Beispiel des an die Schnur gebundenen und im Kreis geschleuderten Steins. Der Stein würde also sehr schnell rotieren, ähnlich wie ein Flugzeugpropeller. Wenn dieser rotiert, sehen wir nur einen schimmernden Kreis. Wir wissen aber, daß sich in diesem Kreis nur die Blätter des Propellers bewegen; der übrige Teil des Kreises ist „leer“. Man müßte also auch da einen Stein hindurchwerfen können! Aber das ist selbstverständlich nicht möglich, denn bevor der Stein auch nur ein Stückchen in diesen Kreis eingedrungen wäre, würde ihm schon das nächste Blatt des Propellers den Weg versperren. Der Stein würde also immer abprallen, gleich, wann und wie wir ihn werfen. Der Stein findet keinen leeren Kreis mit einem Propeller darin vor, sondern scheinbar eine undurchdringliche, runde Scheibe.

Auch das Atom können wir nicht als „fast leeren Raum“ ansehen. Zwischen dem Kern und der Hülle wirkt eine Anziehungskraft, die das Elektron um das Proton kreisen läßt. Wir können uns die „Hülle“, die von den Elektronenbahnen gebildet wird, etwa kugelförmig denken.

Bei Atomen, die komplizierter aufgebaut sind als das Wasserstoffatom, sind im Atomkern mehrere Protonen vereinigt, die wir uns dicht aneinandergepackt denken können. Könnte das möglich sein? Sie müßten sich doch abstoßen? Sie sind doch alle positiv?

Es gibt noch viele andere Atomteilchen außer den Protonen und Elektronen – etwa die Neutronen. Sie haben ungefähr die gleiche Masse wie die Protonen, unterscheiden sich aber von ihnen dadurch, daß sie keinerlei elektrische Ladung haben. Ein Neutron ist also – grob vereinfacht – sozusagen ein Proton ohne positive Ladung, es kann daher auch kein Elektron anziehen. Dafür bewirkt es, daß sich zwei Protonen nicht abstoßen. Wenn also in einem Atomkern außer Protonen noch Neutronen enthalten sind, bleibt der ganze Kern bei einander.

Ohne Neutronen kommt nur das Wasserstoffatom aus, obwohl es auch Wasserstoffarten (sogenannte Isotope) gibt, die außer dem Proton noch Neutronen enthalten. Ein Atomkern mit mehreren Protonen muß auch Neutronen enthalten.



Das einfachste Atom solcher Art ist das Heliumatom (Abb. 9): In seinem Kern sind zwei Protonen und zwei Neutronen enthalten. Zwei Protonen – bedeutet das nicht doppelte Anziehungskraft des Kernes? Ja, und deshalb sind in der Hülle auch zwei Elektronen vorhanden. Den beiden positiven Ladungen im Kern stehen also zwei negative Ladungen in der Hülle gegenüber.

Wenn ein Kern beispielsweise 92 Protonen enthält (das ist beim Uranatom der Fall) und dazu noch eine Anzahl von Neutronen, so hat das Atom in seiner Hülle auch 92 Elektronen. Diese kreisen aber nicht alle auf der gleichen Bahn. Die Abb. 9 deutet das an.

Die Elektronenbahnen können bei größeren Atomen alle denkbaren Schräglagen und auch verschiedene Durchmesser haben. Infolgedessen kann ein Atom auch mehrere Hüllen haben. Uns interessiert hier jeweils nur die äußerste Hülle.

Was wäre, wenn wir aus zwei Atomen je ein Elektron entfernen und beide Elektronen nebeneinanderlegen könnten? Sie müßten sich

sofort voneinander entfernen, denn sie sind ja beide negativ geladen.

Wie ist das bei den Atomen, denen je ein Elektron fehlt? Bei ihnen überwiegt eine positive Ladung im Kern. Ihre Anziehungskraft – durch das entfernte Elektron jetzt nicht mehr gebunden – dringt aus der Atomhülle heraus und wird nach außen wirksam: Das ganze Atom verhält sich jetzt in bezug auf Elektronen so wie ein Proton. Es zeigt nach außen eine positive Ladung.

Ein Atom mit einer oder auch mehreren positiven Ladungen (nämlich dann, wenn ihm mehrere Elektronen fehlen) wird Ion genannt. Man sagt auch, durch die Fortnahme der Elektronen wurde das Atom ionisiert. Bringen wir zwei ionisierte Atome einander nahe, so geschieht, was wir uns jetzt schon denken können: Sie stoßen sich ab, da beide positive Ladung haben. Nähern wir einem Ion aber ein Elektron – so springt es in die Atomhülle hinein und kreist dort auf der Bahn, auf der gerade ein Elektron fehlt. Fehlt nur dieses eine, dann ist das Atom wieder nach außen elektrisch neutral. Wenn jeder positiven Ladung des Kernes (also jedem Proton) ein Elektron in der Atomhülle gegenübersteht, heben sich alle Kräfte nach außen hin auf. Wir wissen jetzt, was ein Elektron ist, was Protonen sind und was ein ionisiertes Atom, ein Ion, ist. Was elektrischer Strom ist, wissen wir damit immer noch nicht. Wir wissen nur, daß manche Stoffe (beispielsweise Metalle) den Strom leiten, andere Stoffe (Gummi, Porzellan und die meisten Kunststoffe) wieder nicht.

Die aus Atomen und Molekülen einer Art bestehenden Grundstoffe sind im chemischen Sinne Elemente. Chemische Verbindungen entstehen, wenn sich mehrere Atome verschiedener Art zu Molekülen verbinden.

Moleküle sind also gewissermaßen Atomverbände. In ihnen sind die einzelnen Atome in ganz regelmäßiger, wenn auch meist komplizierter Struktur angeordnet; bei manchen Molekülen etwa wie Bienenwaben. In diesen Strukturen – man könnte grob vereinfacht von „Molekülgittern“ sprechen – kommen nun manchmal ganz eigenartige „Störungen“ vor. Beispielsweise könnten wir – gelänge es uns, diese winzigen Strukturen sichtbar zu machen – feststellen, daß sich bei manchen Stoffen – etwa bei den Metallen – zwischen den Gittern einige Elektronen herumtreiben, die offenbar überzählig sind. Ein solches freies Elektron springt vielleicht gerade jetzt in eine Atomhülle hinein und kreist auf einer der vorhandenen Elektronen bahnen mit. Natürlich ist es „zuviel an Bord des Atoms“ – ihm steht ja keine positive Ladung im Kern gegenüber. Also wird es bald wieder aus der Bahn herausfliegen – oder dafür ein anderes Elektron. Wichtig ist nur, daß die Anzahl stimmt. Das freigewordene

Elektron fliegt nun kurze Zeit ziellos durch das Molekülgitter, prallt einmal hier, einmal da auf eine Atomhülle (von den dort kreisenden Elektronen wird es ja abgestoßen!), bis es ihm gelingt, für kurze Zeit wieder in einem Atom unterzuschlüpfen. Nicht lange – denn jetzt ist dort wieder ein Elektron überzählig. Und so wiederholt sich das Spiel ständig. Einige überzählige Elektronen treiben sich ständig im Molekülgitter herum. Ihre Anzahl bleibt jedoch die gleiche, denn für jedes Elektron, das in eine Atomhülle schlüpft, wird ja wieder eines frei. Es gibt nun Elemente, in deren Atomen verhältnismäßig viele freie Elektronen in den Molekülgittern herumschwirren; bei den Atomen anderer Elemente ist das weniger oder kaum der Fall.

Es gibt bei einigen Molekülarten auch eine andere Form von „Störungen“, nämlich das Gegenteil: zuwenig Elektronen. Hier sind im Molekülgitter Stellen vorhanden, an denen dem einen oder anderen Atom ein Elektron fehlt. Diese „Löcher“ können ebenso wie die freien Elektronen „wandern“, indem ein Elektron vom benachbarten Atom in das „Loch“ springt und dieses Atom komplettiert. Allerdings hat jetzt das Nachbaratom eine unbesetzte Stelle, ein „Loch“ – das „Loch“ ist also scheinbar zum Nachbaratom gewandert.

Denken wir an eine vollbesetzte Stuhlreihe im Kino, bei der nur in der Mitte ein Platz frei – ein „Loch“ – ist. Jetzt kann ein Zuschauer nach dem anderen zur Mitte aufrücken, jeder auf den Platz seines Nebenmannes. Sind alle aufgerückt, befindet sich das „Loch“ – der freie Platz – am Ende der Reihe: Scheinbar ist der freie Platz gewandert!

Die „Löcher“ im Atomverband sollen uns hier zunächst nicht näher beschäftigen. Sie haben für die Halbleitertechnik (zu der die für uns so interessanten Transistoren gehören) Bedeutung. Bis dahin wollen wir auf eine vollständigere Erklärung verzichten.

Wenden wir uns den freien Elektronen zu. Wir stellen uns vor, daß in einem Kupferdraht ziemlich viele dieser freien Elektronen vorkommen. An einem Ende des Kupferdrahtes wollen wir jetzt die freien Elektronen aus dem Draht entfernen – wie wir das machen, sehen wir später. Was geschieht? Die der Mitte näher sitzenden freien Elektronen werden nachströmen – sie haben ja jetzt mehr Platz zum Vagabundieren. Die aus dem Draht entfernten Elektronen schicken wir zugleich am anderen Drahtende wieder hinein. Hier sind jetzt sehr viele freie Elektronen vorhanden. Da sie sich gegenseitig abstoßen, werden die hinzugekommenen Elektronen die vorhandenen verdrängen – zur anderen Drahtseite, wo mehr „freier Platz“ für sie ist. Ergebnis: Der ganze „Elektronenschwarm“ hat sich ein Stückchen längs des Drahtes bewegt!

Dieser Vorgang ist die Lösung des Geheimnisses des elektrischen Stromes! Elektrischer Strom ist nichts weiter als eine Bewegung von Elektronen durch das Molekulgitter. Wenn wir an einem Drahtende dauernd Elektronen „abpumpen“ und sie am anderen Drahtende wieder „hineinpumpen“, so haben wir in dem Draht einen ständigen Elektronenfluß – einen elektrischen Stromfluß! Allerdings – wir brauchen eine „Pumpe“, eine Kraft, die die Elektronen vom einen Drahtende absaugt und sie zum anderen befördert. Diese Pumpe ist unsere Stromquelle. Wie sie im einzelnen aufgebaut ist, sehen wir später.

Zuvor wollen wir noch in Gedanken ein anderes Experiment machen. Wir stellen uns zwei Drähte nebeneinander vor. Die Elektronen, die wir dem einen Draht wegnehmen, schicken wir jetzt in den anderen hinein. Was geschieht dann? Zunächst einmal gar nichts.

In dem einen Draht sind jetzt zuwenig Elektronen. Das wirkt sich bis auf seine Atome aus. Aus deren Hüllen springen nämlich jetzt einzelne Elektronen und werden zu freien Elektronen – die Atome, denen sie entsprungen sind, werden also zu Ionen. Doch nicht lange, dann fangen sie von ihren Nachbaratomen einige Elektronen ein und sind wieder komplett – dafür sind die Nachbaratome jetzt zu Ionen geworden.

Ein ionisiertes Atom zeigt aber nach außen hin positive Ladung. Der ganze Draht wird also nach außen hin positive Ladung zeigen, da ihm insgesamt Elektronen fehlen. Bei dem anderen Draht ist es genau umgekehrt: Er hat zuviel Elektronen, er zeigt also negative Ladung. Dabei bleibt es zunächst.

Wir merken uns als Regel: *Negative Ladung eines Gegenstandes, einer Leitung usw. bedeutet Elektronenüberschuß, positive Ladung bedeutet Elektronenmangel!*

Auf diese vereinfachte Regel werden wir bei unseren Versuchen und Erklärungen immer wieder zurückkommen.

Was geschieht, wenn wir die beiden Drähte jetzt miteinander in Berührung bringen? Sehr einfach: Die überschüssigen Elektronen des negativen Drahtes strömen in den anderen Draht über, der ja einen gleichgroßen Elektronenmangel hatte.

Beide Ladungen (die positive und die negative, wobei die positive Ladung ja eigentlich einen „Mangel“ bedeutet!) gleichen sich aus, die Drähte sind danach wieder elektrisch neutral. Der Ausgleichsstrom der Elektronen aber ist für diesen Moment nichts weiter als ein elektrischer Stromfluß!

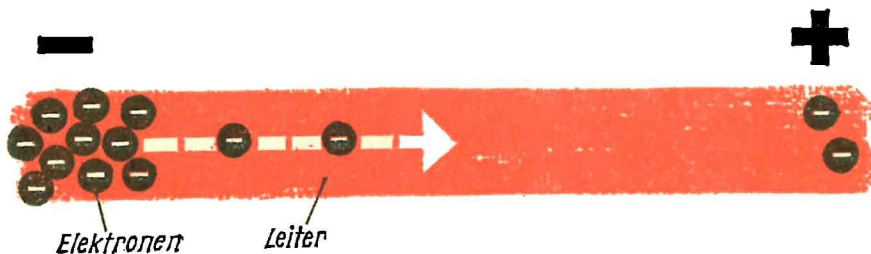
Warum gehen die Elektronen vom negativen Draht nicht einfach durch die Luft zum positiven Draht über? Die Luft besteht doch auch aus Atomen? Ja, aber sie enthält keine freien Elektronen. Freie

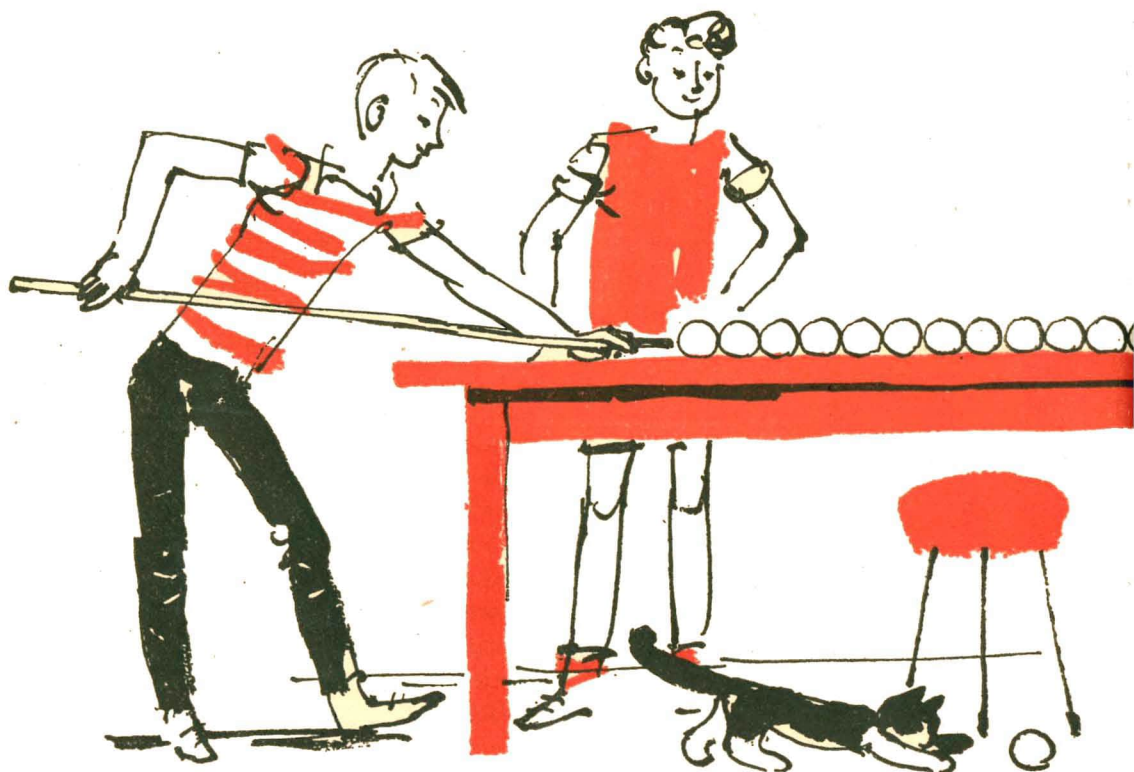
Elektronen sind — ohne daß wir das hier noch näher untersuchen wollen — Voraussetzung für die Stromleitung. In Wirklichkeit ist das alles weitaus komplizierter, deshalb müssen wir uns mit groben Vereinfachungen zufriedengeben.

Wir können also sagen, daß ein Stoff um so besser leitet, je mehr freie Elektronen er hat. Das Vorhandensein der freien Elektronen (sie werden oft auch Leitungselektronen genannt, nicht weil sie in elektrischen Leitungen vorkommen, sondern weil sie den Mechanismus des Stromtransportes bewerkstelligen) ist bei den einzelnen Stoffen sehr verschieden. Metalle enthalten viele freie Elektronen; sie leiten den Strom daher gut. Andere Stoffe (Kohle und bestimmte chemische Elemente, die man deshalb unter dem Sammelbegriff Halbleiter zusammenfaßt) haben nur wenige freie Elektronen, sie leiten den Strom daher schlechter. Das können wir uns so vorstellen, daß die wenigen freien Elektronen so weit voneinander entfernt sind, daß sie — wenn sich ihre freien Nachbarlektronen entfernen — nur recht zögernd nachrücken. Dadurch läuft der ganze Leitungsvorgang nicht mehr so leicht ab wie in unserem Beispiel. Außerdem müssen wir doch bedenken, daß die Leitungselektronen ja nicht einfach geradlinig durch das Atomgefüge hindurchfliegen können. Ständig stoßen sie auf die Bahnen anderer Elektronen, prallen ab und ändern ihre Richtung. Sie müssen sich also mühsam zwischen den Atomen hindurchwinden, und das ist um so schwieriger, je fester und dichter das Atomgefüge ist und je weniger freie Elektronen vorhanden sind.

Es gibt viele Stoffe, die fast keine freien Elektronen haben. Solche Stoffe können den elektrischen Strom deshalb kaum leiten. Man nennt sie Nichtleiter oder Isolatoren. Vollständige Nichtleiter gibt es nicht, denn einige ganz vereinzelt freie Elektronen sind stets vorhanden. Der durch sie ermöglichte Stromfluß ist aber so schwach, daß er meist keine Rolle spielt und kaum nachzuweisen ist.

Ganz nebenbei haben wir hier eine für die Radiotechnik wichtige Erkenntnis gewonnen: Die Stromrichtung verläuft von Minus nach Plus, nämlich vom Pol des Elektronenüberschusses zu dem des Elek-





tronenmangels! Wenn wir in älteren Fachbüchern noch die umgekehrte Richtung angegeben finden, so hat das den Grund, daß man die (heute als technische Stromrichtung bezeichnete und in der Starkstromtechnik vorläufig noch beibehaltene) Stromrichtung von Plus nach Minus willkürlich zu einem Zeitpunkt festlegte, als man von Elektronen und Leitungsvorgängen noch nichts wußte.

Wir haben soeben gesagt, daß die Leitungselektronen sich mühsam zwischen dem Atomgefüge hindurchwinden müssen. Wie erklärt es sich dann, daß die Elektronen trotzdem die hohe Geschwindigkeit von fast 300 000 km/s in der elektrischen Leitung zurücklegen können? Das erklärt sich gar nicht, weil es ein weit verbreiteter Irrtum ist! Die Elektronen legen pro Sekunde erstaunlich geringe Wege, teilweise nur Bruchteile eines Millimeters, zurück! Was sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzt, ist nur die treibende Kraft, gewissermaßen der „Druck“ der „Elektronenpumpe“, um bei unserem Beispiel zu bleiben! Wir können uns das an einem einfachen Versuch klarmachen.

Wir legen eine Anzahl von Tennisbällen dicht aneinander genau in einer Reihe auf den Tisch. Stoßen wir jetzt den hintersten Ball



ganz plötzlich an, so rollt im gleichen Moment schon der vorderste Ball davon. Was sich also blitzschnell durch die ganze Reihe fortgepflanzt hat, waren nicht die Bälle, sondern es war die Kraft des Anstoßes. Ebenso können wir uns die Stromleitung vorstellen. Der erste Ball der Reihe bewegt sich sofort, wenn wir den letzten anschieben. Die ganze Reihe bewegt sich also gleichmäßig. Ebenso setzen sich in einem Leitungsdraht alle Leitungselektronen praktisch gleichzeitig in Bewegung, wenn ein Strom zu fließen beginnt.

Noch eine wichtige Erkenntnis ergeben unsere Überlegungen: Wenn ein elektrischer Strom fließen soll, dann muß eine treibende Kraft vorhanden sein – denken wir an die in unserem Beispiel angenommene „Elektronenpumpe“! Ohne eine solche Kraft, die dafür sorgt, daß an einem Ende des Leiters ein Elektronenmangel auftritt und am anderen Ende ein Elektronenüberschuß, haben die Leitungselektronen keinen Anlaß, sich durch die Leitung zu bewegen.

Diese treibende Kraft bezeichnet man als elektrische Spannung. Ohne das Vorhandensein einer Spannung kann kein Strom fließen. Umgekehrt ist dagegen folgendes denkbar: Wenn zwei Pole (in unserem Beispiel die beiden getrennten Drähte) nicht leitend mitein-

ander verbunden sind, kann zwischen ihnen eine Spannung bestehen, ohne daß ein Strom fließt. Ursache des elektrischen Stromes ist also die elektrische Spannung! Jetzt erkennen wir auch, daß eine Spannung nur zwischen zwei verschiedenen Punkten (zwischen zwei Polen) existieren kann – denn wenn an einem Pol ein Elektronenüberschuß vorhanden ist, muß ja auch irgendwo der andere Pol existieren, dem diese Elektronen fehlen!

Wir haben hier zwei Grundbegriffe kennengelernt, mit denen wir uns experimentell noch näher beschäftigen werden: Die Begriffe der Spannung und – jetzt wollen wir den korrekten Ausdruck verwenden – der Stromstärke!

Doch was ist Stromstärke? Was ist ein starker und ein schwacher Strom?

Ein Strom wird stärker, nicht etwa, wenn mehr Elektronen zugleich durch die Leitung fließen, sondern wenn die vorhandenen Leitungselektronen (die ja alle gemeinsam wandern) schneller fließen. Stärkerer Strom – das heißt also höhere Elektronengeschwindigkeit (genaugenommen wird die Stromstärke nach der Anzahl der Elektronen gemessen, die einen Leiter mit bestimmtem Querschnitt in einer bestimmten Zeit passieren).

Höhere Spannung bedeutet einen größeren Elektronenüberschuß am einen Pol und größeren Elektronenmangel am anderen. Am negativen Pol „drängen“ sich die Elektronen gewissermaßen. Da sie gleichnamig sind, stoßen sie sich ab; man könnte also von einem „inneren Druck“ in dieser Elektronenansammlung sprechen. Sind mehr Elektronen an dem gleichen Pol vereinigt, so ist dieser „Druck“ größer, die „Saugwirkung“ des positiven Poles auf die Elektronen ebenso – wir sprechen dann von höherer Spannung.

Natürlich gibt es für Spannung und Stromstärke auch Maßeinheiten, damit man ausdrücken kann, wie hoch die Spannung und wie stark der Strom ist.

Die Spannung wird in Volt (benannt nach dem italienischen Physiker Volta) gemessen, die Stromstärke (nach dem französischen Physiker) in Ampere (gesprochen „ampehr“). Die entsprechenden Abkürzungen sind V und A.

Haben wir es mit sehr kleinen Strömen zu tun, so benutzt man die Einheit Milliampere (mA) oder sogar Mikroampere (μA). $1\text{ A} = 1000\text{ mA} = 1\,000\,000\ \mu\text{A}$. Ebenso werden für die Spannung außer dem Volt noch die Einheiten Millivolt (mV) und Mikrovolt (μV) benutzt, für höhere Spannungen noch das Kilovolt (kV). $1000\text{ V} = 1\text{ kV}$, und $1\text{ V} = 1000\text{ mV} = 1\,000\,000\ \mu\text{V}$.

Wir können uns jetzt schon teilweise die Wirkungen des elektrischen Stromes erklären, die wir zu Anfang experimentell untersucht

haben. Warum erwärmt sich ein Draht, wenn er vom Strom durchflossen wird?

Bisher hatten wir das „Molekülgitter“ eines Leiters als feststehend angenommen. Das stimmt nicht ganz. Die einzelnen Moleküle sind in ständiger schwingender Bewegung, etwa so, als wären die einzelnen Moleküle untereinander durch Federn verbunden, zwischen denen sie ständig schwingen können. Diese Schwingungen sind nichts anderes als das, was wir Wärme nennen!

Stellen wir uns nun vor, daß die Leitungselektronen sich durch dieses Gitter hindurchwinden müssen. Sie prallen dabei immer wieder auf einzelne Moleküle und stoßen diese an, so daß sie stärker ins Schwingen kommen. Stärkeres Schwingen bedeutet aber größere Wärme! Das ist die Ursache, weshalb sich der Draht beim Versuch nach Abb. 1 erwärmte.

Was geschieht, wenn wir den Strom verstärken? Die Elektronen bewegen sich dann schneller. Sie prallen also um so heftiger auf die Moleküle, so daß diese stärker ins Schwingen kommen: Der Draht wird heißer.

Doch ist da nicht ein Widerspruch? Betrachten wir noch einmal Abb. 3. Wir wissen, warum das Drähtchen in der Glühlampe zum Glühen kommt. Aber die Zuleitungsdrähte werden von den gleichen Elektronen durchflossen! (Daraus ergibt sich wieder, daß der Strom an allen Stellen der Leitung gleichstark ist!) Warum werden die Zuleitungsdrähte nicht warm? Sie werden warm, nur ist hier die Erwärmung so gering, daß wir sie nicht bemerken!

Bei gleicher Stromstärke wird ein Leiter (und jeder Leiter erwärmt sich beim Stromfluß!) um so weniger warm, je dicker er ist. Wir können uns das so vorstellen, daß sich in dem dickeren Draht der Zuleitung die vorhandenen Leitungselektronen auf eine größere Breite verteilen können. Die einzelnen Moleküle des Drahtes werden also nicht mehr so oft von einem Elektron getroffen wie in dem dünneren Drähtchen der Glühlampe. Sie kommen daher auch nicht so stark ins Schwingen. In dem dünnen Lampendrähtchen ist das Elektronen-„Gedränge“ (man spricht hier von Elektronendichte) entsprechend größer; hier wird fast jedes Molekül von einem, vielleicht sogar von mehreren Elektronen angestoßen. In dem dünnen Draht gibt es also beim Durchfließen der Elektronen gewissermaßen eine größere „Drängelei“.

Aus diesem Beispiel können wir gleich noch einen dritten, sehr wichtigen Begriff ableiten: den des Widerstandes.

Denken wir noch einmal an die „Drängelei“ und stellen wir uns vor, daß sich eine große Menschenmenge (sie soll unserem Elektronenstrom entsprechen) auf einer breiten Straße (dem dicken Draht) be-



wegt – sagen wir, einem Kino entgegen. An der Eingangstür des Kinos stauen sich die Menschen, denn die schmale Tür setzt dem Menschenstrom einen größeren Widerstand entgegen als die breite Straße. Der Menschenstrom kommt durch diese Tür nicht mehr so ungehindert hindurch wie durch die Straße. Stellen wir uns anstatt der Tür jetzt einen dünneren Draht im Verlauf des dickeren vor (wie z. B. das Glühdrähtchen in der Lampe im Verlauf des ganzen, aus dickeren Leitern bestehenden Stromkreises), dann erkennen wir schon, was mit dem Begriff des elektrischen Widerstandes gemeint ist.

Wir wollen uns merken, daß grundsätzlich jeder Leiter einen Widerstand hat (auch die breiteste Straße kann nicht beliebig viele Menschen zugleich ungehindert durchlassen!). Er wird um so geringer, je stärker der Querschnitt des Leiters ist. Der Widerstand steigt aber nicht nur mit dem verringerten Querschnitt des Leiters, sondern auch mit seiner Länge.

Denken wir uns in unserem Vergleich an Stelle der Kinotür einen langen Gang mit der Breite der Tür: Je länger er ist, um so weniger gut kommen die vielen Menschen hindurch, um so mehr stauen sie sich. Demnach wird auch der elektrische Widerstand mit der Länge des Leiters steigen. Und noch ein dritter Umstand spielt eine Rolle: das Material des Leiters.

Denken wir wieder an den schmalen Gang. Wenn dieser sehr winkelig ist und um viele Ecken führt, muß der Menschenstrom seine Richtung oft ändern und kommt noch schlechter vorwärts. Ist der Gang gerade und ohne Hindernisse, dann geht es besser voran. Wir können uns – ohne das jetzt näher zu erklären – denken, daß die Molekülstruktur des Leiters eine Rolle spielt. Je nach Aufbau und Beschaffenheit des „Molekülgitters“ muß der Weg der einzelnen Elektronen – um bei unserem Beispiel zu bleiben – mehr oder weniger „winkelig“ verlaufen. Je nach dem Material des Leiters wird er also einen größeren oder geringeren Widerstand aufweisen, wenn wir das Material an Hand von Drähten gleicher Länge und gleichen Querschnitts vergleichen. Daß die Materialeigenschaft eng mit der Anzahl der freien Elektronen im Material zusammenhängt, soll hier nicht näher erklärt werden. Auch eine weitere Erscheinung wollen wir nicht begründen, obwohl wir sie kennen müssen: Der Widerstand eines Leiters ist auch von seiner Temperatur abhängig.

Bei den meisten Leitern steigt der Widerstand, wenn sich die Temperatur erhöht. Alle Metalle beispielsweise vergrößern ihren Widerstand bei Erwärmung. Es gibt aber auch Stoffe, die sich umgekehrt verhalten, hierzu gehören die meisten Halbleiter. Sie verringern ihren Widerstand bei Erwärmung. Diese temperaturbedingten Widerstandsänderungen sind verhältnismäßig gering, so daß wir sie mit einfachen Mitteln experimentell schlecht zeigen können. Trotzdem muß man sie in der Technik oft berücksichtigen.

Fassen wir zusammen: Der Widerstand eines Leiters ist abhngig: 1. vom Material, 2. vom Querschnitt, 3. von der Länge und 4. (in geringerem Maße) von seiner Temperatur. Der Widerstand sinkt mit steigendem Querschnitt, er steigt mit wachsender Länge. Er steigt bei allen Metallen und vielen anderen Leitern mit der Temperatur, bei einigen Stoffen, besonders bei vielen Halbleitern, sinkt er mit der Temperatur.

Die Leitfähigkeit der Materialien ist sehr verschieden. Am besten leiten (weil sie den geringsten Widerstand haben) die Metalle. Unter ihnen wieder haben Silber und Kupfer den geringsten Widerstand (deshalb Kupferleitungen!); Eisen hat beträchtlich höheren, Speziallegierungen wie Konstantan und Manganin haben besonders hohen Widerstand. Diese Metallegierungen benutzt man daher zur Anfertigung von Widerständen (worunter in diesem Falle Bauteile verstanden werden, die dem Strom Widerstand entgegensetzen sollen). Konstantan hat dabei noch den Vorteil, daß sich sein Widerstandswert mit der Temperatur nur ganz wenig ändert, so daß man daraus Widerstände bauen kann, deren Wert konstant bleibt, auch wenn die Temperatur sich ändert. Daher auch der Name.

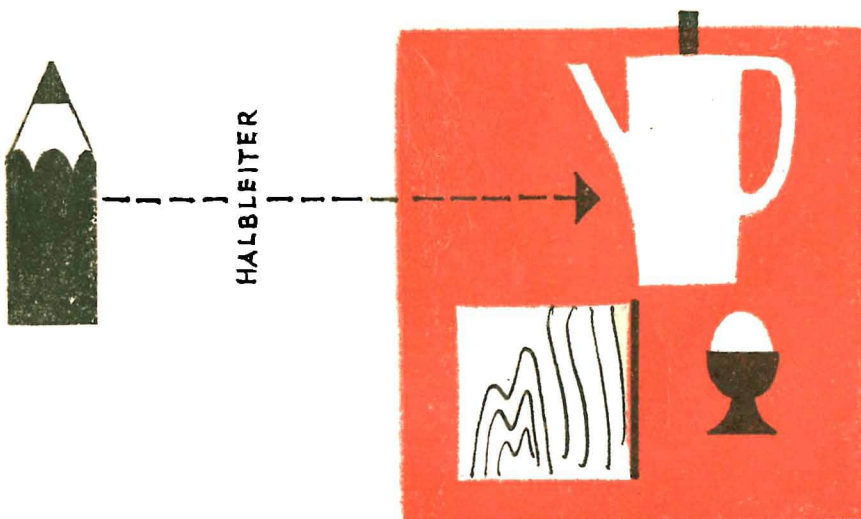
Noch schlechter leiten Kohle und – wie der Name schon sagt – die verschiedenen Halbleiter. Am schlechtesten (in der Praxis können wir sagen, überhaupt nicht) leiten die Isolatoren, vor allem die meisten Kunststoffe.

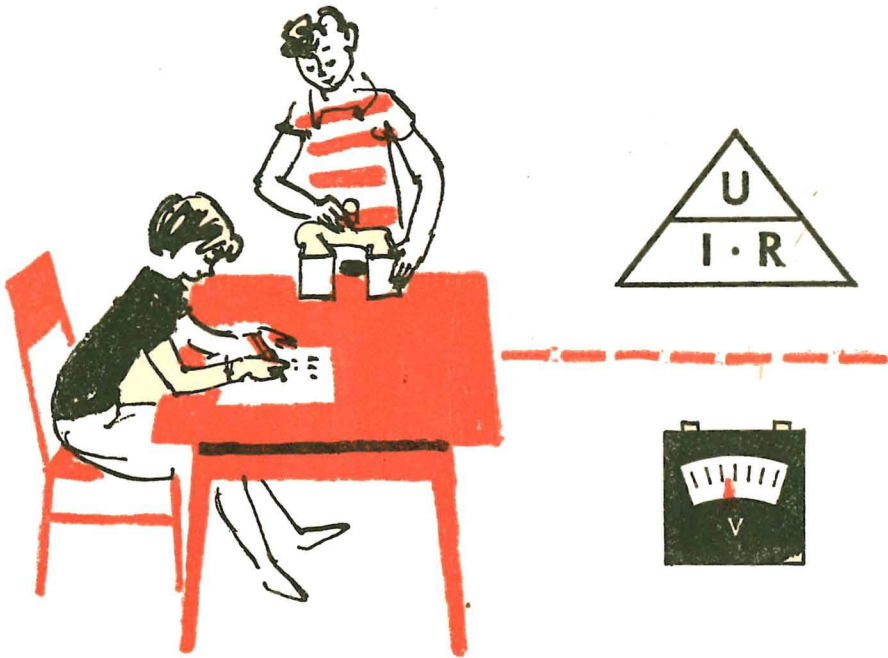
Kohle benutzt man, wenn sehr hohe Widerstandswerte erreicht werden sollen. Man nimmt dann ein kleines Porzellanröhrchen (Porzellan isoliert!), auf das eine Kohleschicht aufgetragen wird. An beiden Enden der Schicht werden Anschlußdrähte angebracht, und das Ganze wird zum Schutz der Kohleschicht lackiert. Diese Widerstände ergeben dann die bekannten Radiowiderstände – genau gesagt, Kohleschichtwiderstände. Wir lernen sie noch näher kennen. Drahtwiderstände sehen ähnlich aus; sie sind mit Widerstandsdraht (Konstantan und Manganin) bewickelt.

Auch für den Widerstandswert gibt es eine Maßeinheit, die für uns sehr wichtig ist. Es ist das Ohm (benannt nach dem deutschen Physiker, der das nach ihm bekannte Ohmsche Gesetz entdeckt hat). Die Abkürzung stammt aus dem Griechischen, es ist das große „Omega“, geschrieben Ω .

Für höhere Werte benutzen wir das Kiloohm ($k\Omega$) oder Megohm ($M\Omega$). $1 M\Omega = 1000 k\Omega = 1\,000\,000 \Omega$. Die Verkleinerung, das Milli-ohm ($1 \Omega = \frac{1}{1000} m\Omega$), kommt in der Rundfunktechnik kaum vor.

Wir wissen nun ausreichend genau, was elektrischer Strom ist, und wir haben seine wichtigsten Eigenschaften und die damit zusammenhängenden Grundbegriffe kennengelernt. Die Zusammenhänge der Begriffe Spannung, Stromstärke und Widerstand wollen wir nun experimentell untersuchen.





Spannung, Stromstärke, Widerstand

Die Spannungsverteilung

Jede Batterie gibt eine bestimmte Spannung ab. Bei den von uns benutzten Taschenlampenbatterien beträgt sie 4,5 V.

Wir wollen nun feststellen, wie sich diese Spannung aufteilt, wenn wir mehrere Stromverbraucher miteinander verbinden. Als Batterie benutzen wir wieder eine 4,5-V-Flachbatterie. Als Stromverbraucher dienen uns zwei dazu passende Glühlämpchen. Wir verbinden die Teile so miteinander, wie es Abb. 10 zeigt. Neben der bildhaften Darstellung ist hier die gleiche Schaltung unter Benutzung der Schaltzeichen angegeben.

Der Begriff „Stromverbraucher“, den wir soeben benutzt haben, ist nicht ganz exakt: Wie wir schon wissen, kann elektrischer Strom nicht „verbraucht“ werden und spurlos verschwinden. Es ist vielmehr so, daß am Minuspol der Batterie ein Elektronenüberschuß vorhanden ist, aber am Pluspol Elektronenmangel herrscht. Die Elektronen fließen also vom Minuspol über die Lämpchen zum Pluspol und in der Batterie durch deren „treibende“ Wirkung (denken wir an die „Elektronenpumpe“!) wieder zum Minuspol. Unterwegs

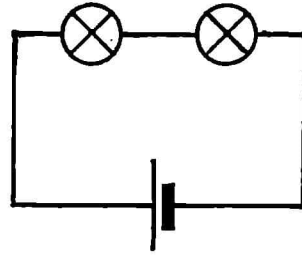


Abbildung 10

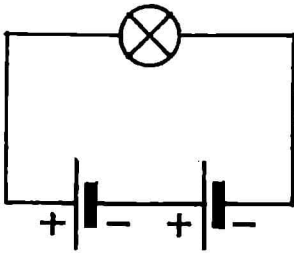


Abbildung 11

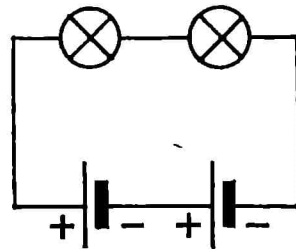
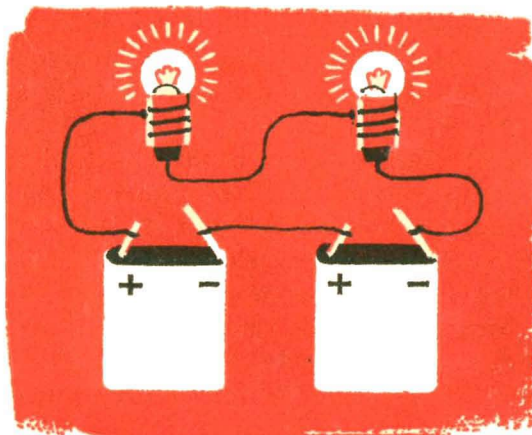
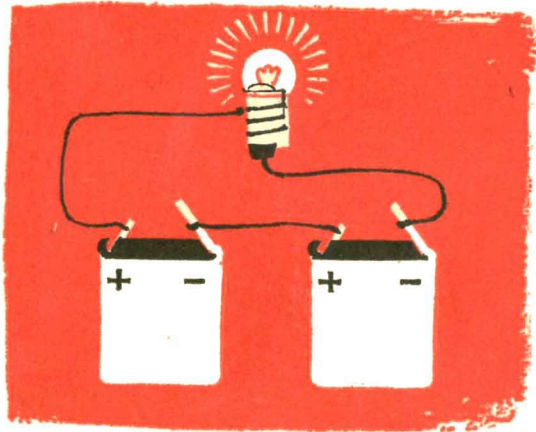


Abbildung 12

geht also kein Strom „verloren“, und es werden keine Elektronen „verbraucht“. Da der Begriff „Stromverbraucher“ aber allgemein benutzt wird, wollen auch wir ihn beibehalten und als Ausdruck für die Bauteile verwenden, in denen der Strom die von uns gewünschte Wirkung ausüben soll.

Was in den Lämpchen „verbraucht“ wird, ist der „Druck“, also die Spannung. Sie verleiht den Elektronen die Kraft, mit der sie gegen die Moleküle des Drahtes prallen. Dadurch bringen sie ihn zum Glühen.

Bei unserem Versuch stellen wir fest, daß die beiden Lämpchen bedeutend dunkler brennen, als wenn wir nur eines davon an die Batterie anschließen. Verwenden wir zwei Lämpchen vom gleichen Typ, dann brennen beide gleich schwach. Der Strom, der durch beide Lämpchen fließt, muß gleichstark sein, denn beide Lämpchen werden ja von den gleichen Elektronen durchflossen. Da sie aber jetzt dunkler brennen, muß der Strom schwächer sein als vergleichsweise bei dem Versuch nach Abb. 3. Offenbar teilt sich die Spannung zwischen den beiden Lampen auf.

Machen wir die Gegenprobe und erhöhen wir die Batteriespannung für ein Lämpchen auf den doppelten Wert! Dazu verbinden wir den Pluspol einer Batterie mit dem Minuspol einer zweiten (Abb. 11), so daß sich beide Spannungen addieren. Wir haben jetzt $4,5 + 4,5 = 9 \text{ V}$ zur Verfügung. Die doppelte Spannung wird die Elektronen jetzt doppelt kräftig treiben, also muß die doppelte Stromstärke zustandekommen.

Tatsächlich brennt das Lämpchen jetzt wesentlich heller als zuvor mit einer Batterie. Sein Glühdraht wird so stark erhitzt, daß er bald durchschmilzt. Dann ist das Lämpchen nicht mehr verwendbar; wir wollen also diesen Versuch nur kurzzeitig durchführen.

Wir kombinieren nun die beiden letzten Versuche miteinander, wie es Abb. 12 zeigt. Wieder erhalten wir die doppelte Spannung, aber auch den doppelten Widerstand im Stromkreis, denn wir haben ja zwei gleiche Lämpchen hintereinandergeschaltet. Die Spannung wird sich also wieder zwischen beiden Lämpchen aufteilen, so daß jedes Lämpchen gerade die Spannung einer Batterie erhält. Tatsächlich brennen beide Lämpchen jetzt normal hell, so, wie jedes von ihnen beim Anschluß an eine Batterie brennen würde.

Diese Verbindung zweier Stromverbraucher — auch die der zwei Batterien — wird Serienschaltung oder Reihenschaltung genannt.

Was geschieht, wenn wir eine der Batterien der Abb. 12 umpolen, also beide Pluspole der Batterien miteinander verbinden und die Lämpchen an beide Minuspole anschließen? Die Abb. 13 zeigt diese Anordnung.

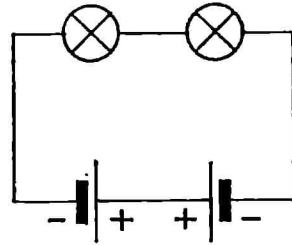
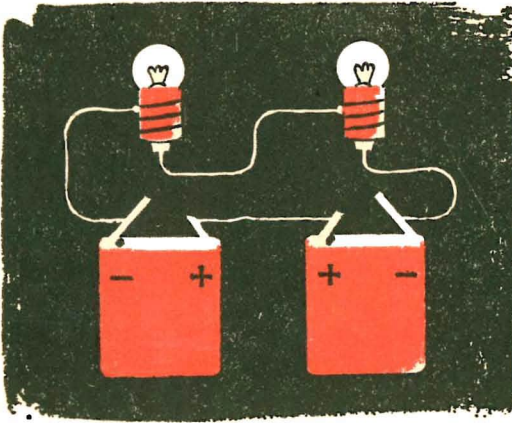


Abbildung 13

Von der rechten Batterie werden die Elektronen von rechts nach links getrieben, von der linken Batterie von links nach rechts. Dem Elektronen-„Druck“ von rechts steht daher ein gleichgroßer „Druck“ von links gegenüber, und beide heben sich auf. Zwischen beiden äußeren Polen besteht kein „Druckunterschied“ – also keine Spannung. Deshalb kann auch kein Strom fließen: Die Lämpchen leuchten nicht auf.

Das gleiche Ergebnis würden wir erhalten, wenn wir beide Batterie-Minuspole miteinander verbinden und die Lämpchen an die Pluspole anschließen würden.

Dieser Versuch soll nun mit zwei verschiedenen Batterien wiederholt werden, zum Beispiel mit einer 4,5-V-Batterie und einer 2-V-Batterie. Zunächst beobachten wir, wie hell die Lämpchen nur mit der 4,5-V-Batterie brennen. Dann schalten wir die 2-V-Batterie in Serie, wie es Abb. 12 zeigt. Die beiden Spannungen addieren sich, wir haben $4,5 + 2 = 6,5$ V zur Verfügung: Die Lämpchen brennen heller. Nun polen wir die 2-V-Batterie um, so daß die Schaltung entsprechend Abb. 13 zustandekommt. Die Lämpchen brennen jetzt dunkler; wir merken deutlich, daß jetzt weniger als 4,5 V vorhanden sind. Den 4,5 V der einen Batterie stehen die 2 V der anderen Batterie entgegen. Diese Spannung hebt von der zweiten Batterie 2 V auf, so daß dort noch 2,5 V für die Lämpchen übrigbleiben. Nun merken wir uns eine Regel:

Gleichsinnig gepolte Spannungen in Serienschaltung der Batterien addieren sich, gegensinnig gepolte subtrahieren sich. Im ersten Fall steht also die Summe beider Spannungen zur Verfügung, im zweiten Fall die Differenz.

Die Stromverteilung

Abb. 14 zeigt die Parallelschaltung zweier Lämpchen. Wenn die untere Lampe nicht vorhanden wäre, dann hätten wir einen einfachen Stromkreis, wie wir ihn schon kennen. Im ganzen Stromkreis fließt also die gleiche Stromstärke; sie ist also bei der Leitungsstelle A ebenso groß wie bei C. Nun setzen wir die untere Lampe ein und entfernen die obere. Es besteht wieder ein einfacher Stromkreis; bei B fließt dergleiche Strom wie bei A.

Jetzt setzen wir beide Lampen ein. Wir erkennen, daß jedes Lämpchen direkte Verbindung mit der Batterie hat und daher die volle Batteriespannung erhält. Beide Lampen brennen normal hell.

Die von der Batterie kommenden Elektronen strömen zum Teil durch die obere Lampe, ein anderer Teil wird für die untere Lampe gebraucht. Da aber der Strom durch jede Lampe genauso stark fließt wie zuvor – wir erkennen das an der Lampenhelligkeit – muß die Batterie jetzt offenbar einen stärkeren Strom liefern als zuvor für eine Lampe.

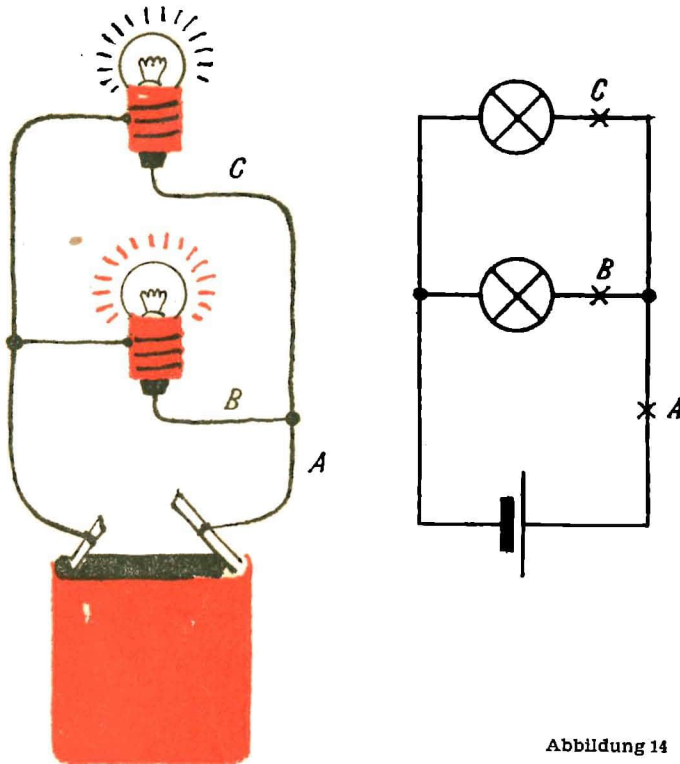


Abbildung 14

Bei der Leitungsstelle A fließen die beiden Lampenströme gemeinsam, die Stromstärke muß demnach der Summe der beiden einzelnen Lampenströme bei B und C entsprechen. Schalteten wir drei Lämpchen parallel, so würde bei A die Summe aller drei Lampenströme fließen.

Die Batterie muß also bei Parallelschaltungen stärkere Ströme liefern; dafür genügt die für eine Lampe notwendige Spannung. Wenn alle Lampen an der gleichen Batteriespannung liegen, müssen sie natürlich für die gleiche Spannung bestimmt sein.

Wir kombinieren die Serien- und die Parallelschaltung

Wie uns die Abb. 12 gezeigt hat, ist für die Serienschaltung zweier gleicher Lämpchen die doppelte Batteriespannung nötig. Wir kombinieren jetzt zwei solcher Serienschaltungen zu einer Parallelschaltung (Serienparallelschaltung) nach Abb. 15 und benutzen dazu vier gleichartige Lämpchen für 3,5 bis 4 V und zwei Taschenlampenbatterien von je 4,5 V. Da beide Batterien in Serie liegen, haben wir also 9 V zur Verfügung. Die Reihenschaltung der Lampen L 1 und L 2 entspricht der Abb. 12; jede Lampe erhält also die halbe Spannung der Batteriekombination und damit gerade die Spannung einer Batterie. Da beide Lampen vom gleichen Strom durchflossen werden, entspricht der Strom bei B dem einer Lampe. Das gleiche gilt für die Serienschaltung L 3 und L 4; auch bei C fließt daher der Strom einer Lampe.

Wir haben gesehen, daß sich bei einer Parallelschaltung die Einzelströme addieren; infolgedessen muß bei A die Summe der beiden Ströme von B und C fließen. Der gesamte Stromverbrauch dieser

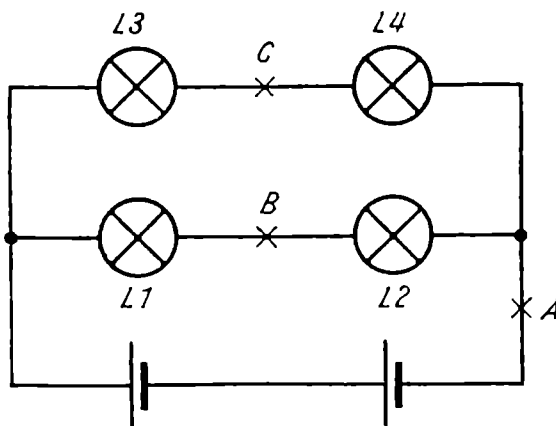


Abbildung 15

Schaltung entspricht also dem zweier Lampen (Abb. 14); der Spannungsbedarf ist aber wegen der Serienschaltung je zweier Lampen doppelt so groß.

Mit einem Voltmeter (Spannungsmesser) könnten wir an jedem Lämpchen die Spannung nachmessen; wir könnten auch bei A, B und C die Ströme messen, wenn wir einen Strommesser (Ampere-meter) zur Verfügung haben. Noch können wir aber auf diese Meßinstrumente verzichten. Es kommt uns zunächst darauf an, die Grundregeln festzustellen, nach denen sich Ströme und Spannungen aufteilen. Wir wollen diese Regeln noch einmal zusammenfassen: Bei Parallelschaltungen ergibt die Summe aller Einzelströme die Gesamtstromstärke, die die Batterie liefern muß. Alle parallelgeschalteten Verbraucher (hier also die Lämpchen) erhalten die gleiche Spannung und müssen deshalb auch für die gleiche Spannung geeignet sein.

Bei Serienschaltungen ergibt die Summe aller Spannungen der Verbraucher (hier die Summe aller Lampenspannungen) die Batteriespannung. Alle Verbraucher werden vom gleichen Strom durchflossen und müssen daher für die gleiche Stromstärke bestimmt sein.

Das Ohmsche Gesetz

Die Lämpchen unserer vorangegangenen Versuche stellen besondere Formen von Widerständen dar, deren Widerstandsdraht zum Glühen gebracht wird. Wir haben gesehen, daß der Strom bei der Erhöhung des Widerstandes zurückgeht (Abb. 10). Dann haben wir den Gesamtwiderstand in unserem Stromkreis dadurch erhöht, daß zwei Lämpchen in Serie geschaltet wurden. Dadurch addierten sich die Widerstandswerte der Lämpchen.

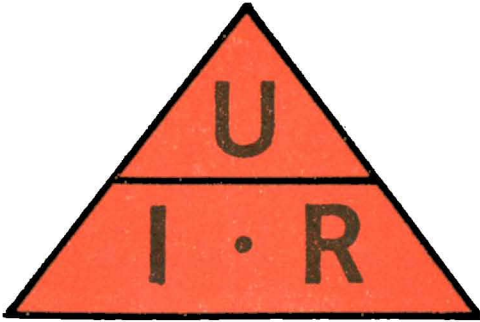
Der Strom steigt beim Erhöhen der Spannung (Abb. 11); erhöhen wir aber Widerstand und Spannung gleichermaßen (Abb. 12), so bleibt der Strom konstant.

Für Spannung, Stromstärke und Widerstand benutzt man Formelzeichen: Spannung = U, Stromstärke = I, Widerstand = R. Sie stehen zueinander in der Beziehung

$$U = I \cdot R$$

Damit lernen wir das wichtigste Gesetz der Elektrotechnik kennen. Durch Umstellung läßt sich aus zwei bekannten Größen leicht die unbekanntere errechnen:

Die Formel $I = \frac{U}{R}$ dient uns zur Errechnung der Stromstärke, und die Formel $R = \frac{U}{I}$ zur Errechnung des Widerstandes



U = Spannung (in Volt)

I = Stromstärke (in Ampere)

R = Widerstand (in Ohm)

Abbildung 16

Für diese drei Formeln hat man eine praktische Gedächtnisstütze in Form des Merkdreiecks, wie es Abb. 16 zeigt, geschaffen. Wir decken die gesuchte Größe mit dem Finger zu, und die zum Ausrechnen erforderliche Formel bleibt übrig. Dabei müssen wir aber darauf achten, daß wir stets nur in den Grundeinheiten Volt, Ampere und Ohm rechnen. Haben wir zum Beispiel einen Strom von 10 mA gemessen, dann dürfen wir diesen Wert nicht ohne weiteres in die Formel einsetzen, sondern müssen ihn als 0,01 A schreiben. Das gleiche gilt für die Spannungswerte und für die Widerstandswerte. Ein 10-k Ω -Widerstand wäre also nicht mit der Zahl 10, sondern mit der Zahl 10 000 (Ω) in die Rechnung einzusetzen. Die Richtigkeit der Rechenergebnisse läßt sich meßtechnisch beweisen, indem sie mit Hilfe eines Voltmeters und Amperemeters experimentell nachgeprüft wird. Wenn wir uns dabei erinnern, was Spannung und was Stromstärke ist, wird uns das nicht schwerfallen.

Eine Spannung besteht — wie wir schon wissen — stets zwischen zwei Punkten; ein Spannungsmesser muß daher mit den beiden Punkten, zwischen denen wir die Spannung messen wollen, verbunden werden.

Abb. 17 zeigt uns den Anschluß eines Voltmeters. Es wird mit den beiden Polen der Batterie oder — was hier das gleiche ist — der Lampe verbunden. Das Voltmeter mißt dann die Batteriespannung, die gleichzeitig — wie der Fachmann sagt — an der Lampe liegt.

Abb. 18 beschreibt, wie man Spannungen in einer Schaltung nach Abb. 12 mißt. Auch das bereits zur Spannungsverteilung Gesagte läßt sich so nachprüfen.

Wir können das Voltmeter hier an drei verschiedenen Stellen anschließen. Voltmeter 1 mißt die an der Lampe L2 liegende Spannung. Die an Lampe L1 liegende Spannung bestimmt man, indem das Voltmeter parallel zu L1 gelegt wird. Voltmeter 2 zeigt die Spannung der Batterie B 1 an (ebenso müßte Batterie B 2 gemessen werden). Wenn wir das Instrument so anschließen, wie für Voltmeter 3 gezeigt, können wir die Gesamtspannung beider Batterien messen.

Abbildung 17

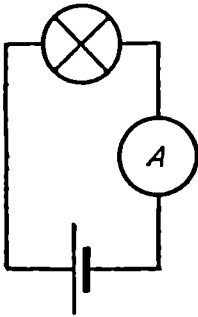
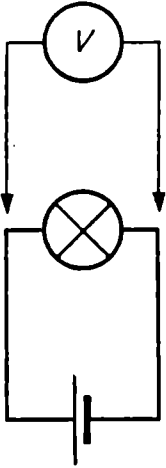


Abbildung 19

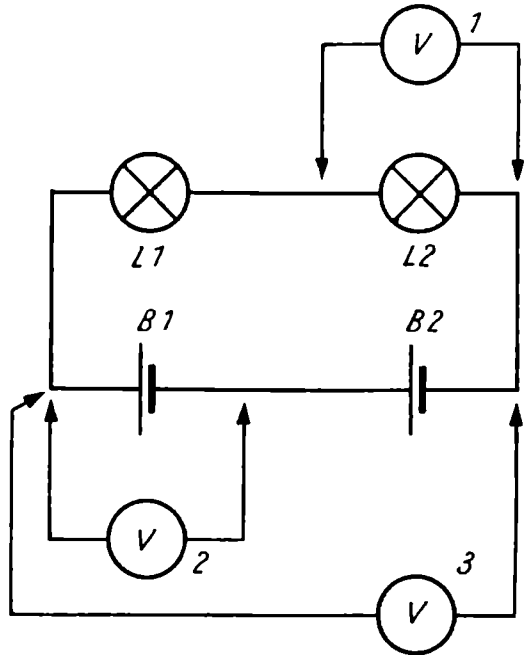


Abbildung 18

Ein Strommesser (Amperemeter) soll den durch eine Leitung fließenden Strom messen, deshalb muß es in diese Leitung eingeschaltet werden. Doch im Gegensatz zur Spannungsmessung, bei der die Voltmeteranschlüsse einfach an die beiden interessierenden Meßpunkte angehalten werden, muß bei der Strommessung die Leitung aufgetrennt werden. Die Schaltung sieht dann so aus, wie in Abb. 19 angegeben. Hier wird der Strom gemessen, der durch die Lampe fließt. Da die Stromstärke im ganzen Stromkreis gleich ist, kann man den Strommesser ebensogut in die andere Lampenleitung einschalten. Das Ergebnis ist das gleiche.

Abb. 20 zeigt, wie der Strommesser in eine etwas kompliziertere Schaltung eingeschaltet wird. Bei 1 zeigt er den Strom der Lampe L 1 an, bei 2 den der Lampe L 2. Schalten wir ihn bei 3 ein, so gibt er die Summe dieser beiden Ströme an, also hier die Gesamtstromstärke, die der Batterie entnommen wird. Auf diese Weise können wir die Erklärungen der vorangegangenen beiden Abschnitte meßtechnisch prüfen.

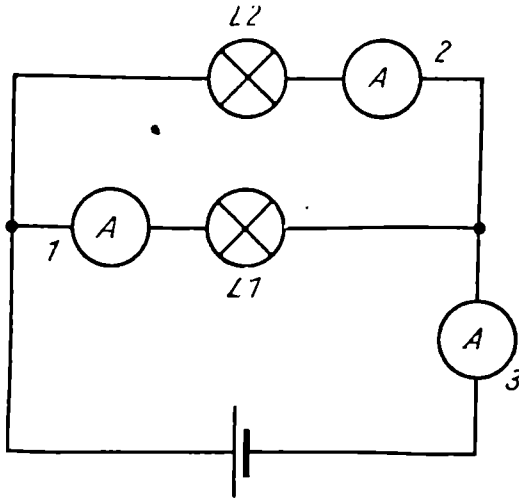


Abbildung 20

Für die nächsten Versuche brauchen wir einige Widerstände, deren Ohmwert bekannt ist. In einem Rundfunk-Bastelgeschäft erhalten wir für wenig Geld einige Drahtwiderstände in den Werten 5, 10 und 20 Ω , alle für eine Belastbarkeit von wenigstens 5 oder 6 Watt. Von jedem Wert wollen wir zwei bis drei Stücke kaufen und außerdem gleich noch einen kleinen Kohleschichtwiderstand von 5 bis 10 Ω mit einer Belastbarkeit von $\frac{1}{10}$ oder $\frac{1}{20}$ Watt. Dieser Kohleschichtwiderstand kostet nur 10 oder 15 Pfennige, und wir wollen ihn später absichtlich zerstören, um daraus zu lernen. Einstweilen lösen wir von ihm den Schutzlack (meist ist er grün) mit etwas Azeton oder Nagellackentferner ab. Darunter wird dann die spiralförmig auf ein Porzellanröhrchen aufgetragene Kohleschicht sichtbar.

Die folgenden Versuche führen wir mit den größeren Drahtwiderständen durch. Wir wollen uns dabei gleich das Schaltsymbol für einen Widerstand einprägen (Abb. 21). Aus dem Schaltsymbol ist nicht erkennbar, wie der Widerstand aufgebaut ist; es kann ein Drahtwiderstand oder ein Kohlewiderstand sein.



Abbildung 21

In den bisherigen Versuchen haben wir stets Lämpchen als Widerstände benutzt; bei den folgenden Versuchen denken wir uns stets die gekauften Drahtwiderstände an die Stelle der Lämpchen gesetzt, wenn wir Vergleiche mit den vorangegangenen Beispielen anstellen.

Zunächst schließen wir unseren $5\text{-}\Omega$ -Widerstand direkt an eine $4,5\text{-V}$ -Batterie an; die Schaltung entspricht dann der Abb. 3. Wir werden nach einiger Zeit merken, daß sich der Widerstand deutlich erwärmt; und das war ja auch nicht anders zu erwarten.

Wie stark ist nun der Strom, der durch den Widerstand fließt? Wir könnten das nach Abb. 19 messen, aber wir wollen uns ja in der Anwendung des Ohmchen Gesetzes üben. Für unser Rechenbeispiel runden wir die Zahlen einfachheitshalber ab; deshalb setzen wir die Batteriespannung von 5 V an. Nach dem Ohmschen Gesetz und nach

Abb. 16 ist $I = \frac{U}{R} = \frac{5\text{ V}}{5\ \Omega} = 1\text{ A}$. Das Instrument in der Abb. 19 würde

also mit dem $5\text{-}\Omega$ -Widerstand an Stelle der Lampe gerade 1 A anzeigen. Wenn wir ganz genau rechnen würden, müßten wir allerdings für U den genauen Wert von $4,5\text{ V}$ einsetzen oder sogar noch weniger, falls die Batterie nicht mehr ganz frisch ist. Welche Spannung man für U tatsächlich einsetzen müßte, ließe sich durch gleichzeitige Spannungsmessung (wie in Abb. 17) feststellen.

Welchen Widerstand hat das Lämpchen in der Abb. 17? Meist ist auf dem Sockel angegeben, für welche Spannung und Stromstärke es bestimmt ist. Der Aufdruck $3,5/0,1$ würde zum Beispiel bedeuten, daß das Lämpchen für $3,5\text{ V}$ bestimmt ist und bei dieser Spannung gerade $0,1\text{ A}$ aufnimmt. Aus diesen beiden Werten läßt sich der

Widerstand errechnen. Nach Abb. 16 ist $R = \frac{U}{I} = \frac{3,5}{0,1} = 35\ \Omega$. Das

Lämpchen hat $35\ \Omega$ Widerstand.

Was machen wir aber, wenn der Aufdruck fehlt oder unleserlich ist? Dann schließen wir das Lämpchen an eine Batterie an, am besten zunächst an eine 2-V -Batterie. Brennt es dann noch zu dunkel, dann benutzen wir eine Batterie für 3 oder $4,5\text{ V}$, bis es etwa normal leuchtet. Nun müssen wir nach Abb. 17 die Spannung an dem Lämpchen messen, denn wir wissen ja nicht, ob die Batterie noch die volle Spannung abgibt, und messen dann entsprechend Abb. 19 den Strom. Aus den mit diesen Messungen erhaltenen Werten für U und I können wir wieder den Widerstand R errechnen.

Mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes läßt sich jetzt exakt beweisen, was bisher bei der Betrachtung der Strom- und Spannungsverteilung gesagt wurde.

Sehen wir uns noch einmal Abb. 12 an. Wir verwenden jetzt aber zwei Lämpchen mit dem Aufdruck $2,5/0,2$ und zwei Batterien von je 3 V (Stabbatterien, bei denen die Messingkappe der Pluspol und der Zinkboden der Minuspol ist). Um wieder auf runde Zahlen zu kommen, nehmen wir an, daß die Batterien etwas verbraucht sind und nur noch je $2,5\text{ V}$ abgeben. Laut Abb. 12 haben wir also $2,5 + 2,5 = 5\text{ V}$

zur Verfügung. Wie groß ist der fließende Strom? Das können wir erst sagen, wenn wir den Widerstand errechnet haben. Für jedes

Lämpchen ergibt er sich nach $R = \frac{U}{I} = \frac{2,5}{0,2} = 12,5$ mit $12,5 \Omega$. Beide

Lämpchen sind in Serie geschaltet; der Gesamtwiderstand des Stromkreises beträgt damit $12,5 + 12,5 = 25 \Omega$. Den Widerstand der Zuleitungen brauchen wir dabei nicht zu berücksichtigen; er beträgt bei den Kupferdrähten, die wir verwenden, nur wenige hundertstel Ohm. Dieser Wert müßte zwar zum Lampenwiderstand hinzugezählt werden, aber er würde kaum etwas am Ergebnis ändern.

Der Widerstand dieses Stromkreises beträgt also 25Ω und die Span-

nung 5 V . Der fließende Strom ist demnach $I = \frac{U}{R} = \frac{5 \text{ V}}{25 \Omega} = 0,2 \text{ A}$, also gerade so groß, daß jede Lampe normal leuchten kann.

Nun hatten wir behauptet, daß sich die Spannung zwischen den Lampen aufteilt. Auch das läßt sich jetzt rechnerisch beweisen, denn wenn wir den Lampenwiderstand und dazu den durch die Lampe fließenden Strom kennen, dann können wir auch die an der Lampe liegende Spannung (die das Voltmeter 1 in Abb. 18 anzeigen würde) errechnen.

Den Lampenwiderstand hatten wir mit $12,5 \Omega$ und den durchfließenden Strom mit $0,2 \text{ A}$ errechnet. Die Spannung an jeder Lampe ist also $U = I \cdot R = 12,5 \cdot 0,2 = 2,5 \text{ V}$. Da die andere Lampe den gleichen Widerstand hat, fallen auch dort $2,5 \text{ V}$ Spannung ab (so sagt der Fachmann); beide Spannungen zusammen ergeben wieder die Batteriespannung.

Was hat es mit dem Ausdruck Spannungsabfall auf sich? Wir verstehen das am besten, wenn wir uns in den nächsten Versuchen mit diesem Ausdruck vertraut machen.

Stellen wir uns vor, daß wir ein $2,5\text{-V}$ -Lämpchen haben, dazu aber nur eine $4,5\text{-V}$ -Batterie. Das Lämpchen wird bald durchbrennen, wenn wir es direkt an die Batterie anschließen. Wir können leicht ausrechnen, daß bei der zu hohen Spannung ein Strom von wesentlich mehr als $0,2 \text{ A}$ fließt; das Glühdrächtchen wird zu heiß und schmilzt bald. Wir müssen also die Batteriespannung um 2 V verringern, damit wir die für das Lämpchen vorgeschriebene Spannung von $2,5 \text{ V}$ erhalten.

Wir schalten dem Lämpchen einen Widerstand vor, wie es Abb. 22 zeigt. Die Batteriespannung teilt sich jetzt, wie wir wissen, zwischen dem Widerstand und dem Lämpchen auf; in welchem Verhältnis, hängt vom Verhältnis der Widerstände ab. Die Spannung muß sich so aufteilen, daß für das Lämpchen gerade $2,5 \text{ V}$ übrigbleiben und die restlichen 2 V also am Widerstand „abfallen“ (man könnte das

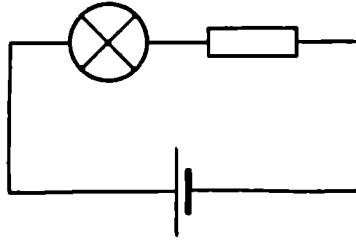


Abbildung 22

auch umgekehrt ausdrücken: Der Drahtwiderstand muß 2 V bekommen, damit die restlichen 2,5 V am Widerstand des Lampendrahtes abfallen). Wie berechnen wir nun den Vorschaltwiderstand (oder kurz ausgedrückt: Vorwiderstand) für das Lämpchen? Wieviel Ohm muß er haben?

Wir gehen davon aus, daß die Lampe, wenn sie mit 2,5 V normal brennt, einen Strom von 0,2 A benötigt. Der gleiche Strom fließt auch durch den Vorwiderstand. An ihm müssen also bei 0,2 A Strom-

fluß 2 V Spannung abfallen. Wir rechnen: $R = \frac{U}{I} = \frac{2}{0,2} = 10 \Omega$. Also muß der Vorwiderstand 10Ω haben.

Wie die Rechnung zeigt, gilt das nur für diese Lampentype. Stehen wir mit einer anderen Lampentype (oder mit einer anderen Batteriespannung) vor der gleichen Aufgabe, so erhalten wir für den Widerstand ein anderes Ergebnis. Mit einem der gekauften $10\text{-}\Omega$ -Widerstände, einem Lämpchen für 2,5 V/0,2 A und einer 4,5-V-Batterie können wir das experimentell nachprüfen. Am Vorwiderstand werden wir mit einem Voltmeter tatsächlich einen Spannungsabfall von 2 V messen, und das Lämpchen wird normal hell leuchten.

Der Spannungsteiler

Betrachten wir Abb. 23. Hier handelt es sich um die gleiche Schaltung wie in der vorangegangenen Abbildung, nur daß jetzt statt des Lämpchens ein zweiter Widerstand eingezeichnet wurde. Der Widerstand R_1 soll 10Ω haben und R_2 20Ω . Der Gesamtwiderstand des Stromkreises beträgt also 30Ω .

Für den Versuchsaufbau verwenden wir wieder unsere gekauften Widerstände und eine 3-V-Stabbatterie. Wie groß ist der Strom im

Stromkreis? Sehr einfach: $I = \frac{3 \text{ V}}{30 \Omega} = 0,1 \text{ A}$. Welche Spannung würde das Voltmeter 3 zeigen? Natürlich 3 V, die Batteriespannung. Welche Spannung würde aber Voltmeter 1 anzeigen? Wir brauchen nur den Spannungsabfall an R_1 zu errechnen: $U = I \cdot R_1 = 0,1 \cdot 10$

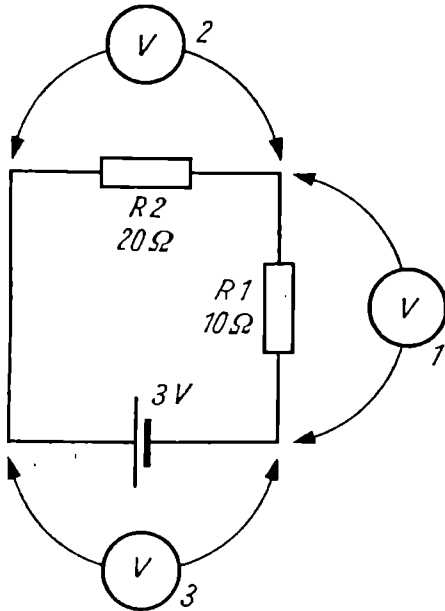


Abbildung 23

= 1 V. Der Spannungsabfall an R 2 (angezeigt vom Voltmeter 2) ergibt sich demzufolge mit $0,1 \cdot 20 = 2 \text{ V}$.

An R 1 steht eine Spannung (so sagt der Fachmann) von 1 V. Dann könnten wir hier ein Lämpchen für 1 V Spannung anschließen, und es müßte gerade normal brennen?

Wenn wir das ausprobieren und dem Widerstand R 1 ein Lämpchen parallelschalten, dann werden wir enttäuscht sein, weil die Sache nicht klappt. Messen wir nochmals die Spannung an R 1, so stellen wir fest, daß sie plötzlich weit niedriger als 1 V ist. Wie kommt das?

Sehen wir uns zunächst auf Abb. 24 an, was wir gemacht haben.

Das Lämpchen können wir als Widerstand auffassen, wir haben also dem Widerstand R 1 einen weiteren Widerstand – das Lämpchen – parallelgeschaltet, den wir als R 3 bezeichnen wollen. Uns interessiert nun, wie groß jetzt die Spannung U 1 ist, die wir nach Abb. 23 mit dem Voltmeter 1 gemessen hatten.

Der Strom in unserem Stromkreis teilt sich zwischen R 1 und R 3 auf – das wissen wir von der Parallelschaltung her. Durch R 1 fließen also keine 0,1 A mehr, sondern weniger. Demzufolge wird auch der Spannungsabfall an R 1 geringer – U 1 geht zurück. Wir hatten also nicht bedacht, daß das angeschlossene Lämpchen R 3 einen Strom aufnimmt, der für R 1 verlorenght, so daß der Spannungsabfall geringer werden muß.

Wie groß ist U 1? Welcher Strom fließt durch R 1, R 2 und R 3? Dazu müssen wir zunächst wissen, wie groß R 3 ist. Wir hatten dafür ein

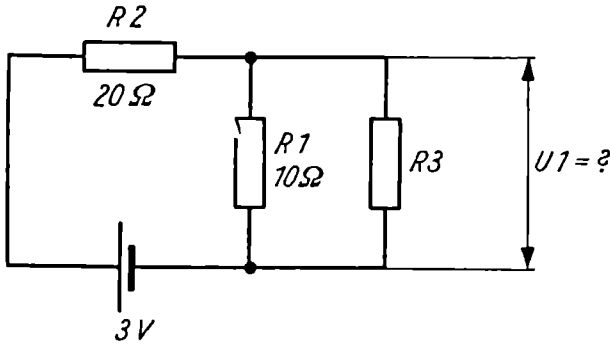


Abbildung 24

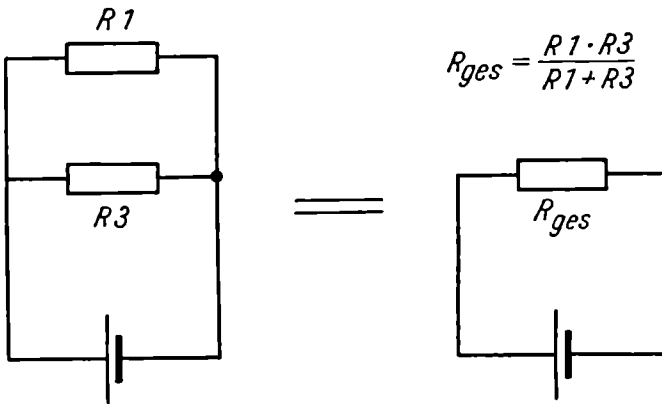


Abbildung 25

Lämpchen angenommen, das für 1 V bestimmt ist. Bei dieser Spannung nimmt es (das ist auf dem Sockel vermerkt oder läßt sich leicht messen) 0,1 A auf. Sein Widerstand beträgt also nach dem Ohmschen Gesetz 10Ω .

R_3 in Abb. 24 hat also ebenso wie R_1 10Ω . Jetzt müssen wir wissen, wie groß der Gesamtwiderstand der Parallelschaltung von R_1 und R_3 ist. Sehen wir uns dazu Abb. 25 an.

Die Schaltung kommt uns bekannt vor; sie erinnert an Abb. 14. Dort hatten wir gelernt, daß die Summe beider Ströme den Batteriestrom ergibt.

R_1 hat 10Ω ; die Batteriespannung nach Abb. 25 wollen wir mit 10 V annehmen.

Nach dem Ohmschen Gesetz sehen wir sofort, daß durch R_1 dann 1 A fließen muß. Das Gleiche gilt für den Widerstand R_3 , der ja auch 10Ω hat. Die Batterie muß also $1 + 1 = 2$ A liefern.

Nun stellen wir uns vor, jemand habe diese Parallelschaltung in einem geschlossenen Kasten verpackt, aus dem nur die zur Batterie



führenden Drähte herauschauen, und wir sollen feststellen, was in dem Kasten ist, ohne daß wir ihn auspacken. Wir schließen also die beiden Drähte an die 10-V-Batterie an und stellen mit einem Amperemeter in einer der Batterieleitungen fest, daß der geheimnisvolle Kasten gerade 2 A aufnimmt. Also rechnen wir nach dem Ohmschen Gesetz: $R = \frac{U}{I} = \frac{10}{2} = 5$. Unsere Antwort lautet deshalb: In dem Kasten ist ein Widerstand mit 5Ω verborgen!

Tatsächlich würden wir mit einem einzigen $5\text{-}\Omega$ -Widerstand genau das gleiche Ergebnis erhalten. Die Parallelschaltung von R_1 und R_3 mit je 10Ω entspricht also einem Widerstand von 5Ω . Wir können ganz allgemein sagen: Zwei parallelgeschaltete Widerstände gleichen Wertes ergeben einen Gesamtwiderstand mit dem halben Wert!

Schalten wir drei Widerstände gleichen Wertes parallel, ist der Gesamtwiderstand gleich einem Drittel, bei vier gleichen Widerständen gleich einem Viertel usw. Das gilt allerdings nur dann, wenn alle Parallelwiderstände untereinander gleich sind. Bei verschiedenen Werten wird der Gesamtwiderstand (wir wollen ihn hier als R_{ges} bezeichnen) nach folgender Formel errechnet, die wir uns nicht unbedingt merken, aber immer griffbereit haben müssen:

$$R_{\text{ges}} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}$$

R_1 und R_3 sind die beiden Teilwiderstände, aus denen sich R_{ges} zusammensetzt. Wie ist das bei mehr als zwei Teilwiderständen? Damit wir uns nicht mit noch mehr Formeln belasten müssen, gehen wir so vor, daß wir uns die Parallelschaltung in Gruppen zu je zwei Teilwiderständen zerlegt denken, aus denen wir R_{ges} errechnen. Diesen Wert sehen wir wieder als Teilwiderstand an, dem die anderen Widerstände parallel liegen. Wir rechnen also zwei- oder dreimal nach derselben Formel und kommen so auch zum Ziel.

Die Anwendung dieser Formel wollen wir gleich einmal üben. Nehmen wir in Abb. 25 für R_1 20Ω an und für R_3 30Ω . Wie groß ist dann R_{ges} ?

Nach der Formel ergeben sich $\frac{20 \cdot 30}{20 + 30} = \frac{600}{50} = 12 \Omega$. Wie wir sehen, brauchen wir bei Benutzung dieser Formel weder das Ohmsche Gesetz noch Spannungs- oder Stromwerte. Das ist der Vorteil dabei.

Und nun prüfen wir die Formel im Zusammenhang mit der Aufgabe nach Abb. 24 noch einmal. Dort war $R_1 = R_3 = 10 \Omega$; R_1 und R_3 waren gleich groß, und für diesen Fall wissen wir, daß dann

$$R_{\text{ges}} = \frac{R_1}{2} = \frac{R_3}{2}$$

ist, hier also 5Ω . Auf den gleichen Wert kommen wir auch mit der in Abb. 25 angegebenen Formel.

In Abb. 24 können wir uns also an Stelle der Parallelschaltung von R_1 und R_3 einen einzigen Widerstand mit 5Ω denken. Dann entspricht die Schaltung aber auch der Abb. 23, wobei wir dort für R_1 jetzt die aus der Parallelschaltung errechneten 5Ω einsetzen. Und nun können wir endlich U_1 errechnen. Der Gesamtwiderstand des Stromkreises ist $R_1 + R_2 = 5 + 20 = 25 \Omega$, der Stromfluß nach dem

$$\text{Ohmschen Gesetz also: } I = \frac{3 \text{ V}}{25 \Omega} = 0,12 \text{ A.}$$

Der Strom ist also um $0,02 \text{ A}$ größer geworden. Daraus können wir U_1 errechnen, wenn wir an Stelle von R_1 den für die Parallelschaltung gefundenen Wert von 5Ω einsetzen: $U = I \cdot R = 0,12 \cdot 5 = 0,6 \text{ V}$. Also ist die Spannung von ursprünglich 1 V auf $0,6 \text{ V}$ gesunken! Dafür ist sie an R_2 gestiegen: $20 \Omega \cdot 0,12 \text{ A} = 2,4 \text{ V}$. Wir machen die Probe, indem wir beide Teilspannungen zusammenrechnen: $0,6 + 2,4 = 3 \text{ V}$. Die Gesamtspannung entspricht wieder der Batteriespannung.

Was wir hier gemacht haben, war nichts weiter als die Berechnung eines „belasteten Spannungsteilers“ – im Grunde genommen ist das also gar nicht so schwierig, wie es in manchen Lehrbüchern aussieht. Die Notwendigkeit, eine Spannung aufzuteilen, ergibt sich jedoch in der Radiotechnik recht oft.

Einen einfachen Spannungsteiler hatten wir schon in Abb. 23. Die Gesamtspannung (Voltmeter 3) wird in die Teilspannungen U_2 (an R_2 , Voltmeter 2) und U_1 (an R_1 , Voltmeter 1) aufgeteilt. Wie wir gesehen haben, stimmt die einfache Berechnung nach dem Ohmschen Gesetz für U_1 und U_2 nur, wenn wir diese Teilspannungen nicht belasten – also wenn wir keinen zusätzlichen Stromverbraucher an eine der Teilspannungen anschließen. Meist wird das aber doch der Fall sein. Der unbelastete Spannungsteiler nach Abb. 23 wird dann zum belasteten Spannungsteiler nach Abb. 24.

Wir wollen uns merken, daß beim belasteten Spannungsteiler die abgegebene Teilspannung (U_1 in Abb. 24) von der Größe der Last abhängt (R_3 stellt hier die Last dar). Sie wird, wie wir ebenfalls gesehen haben, um so geringer, je höher die Last – also je kleiner der Lastwiderstand R_3 ist. Man kann einen Spannungsteiler nicht unabhängig von der vorgesehenen Belastung berechnen!

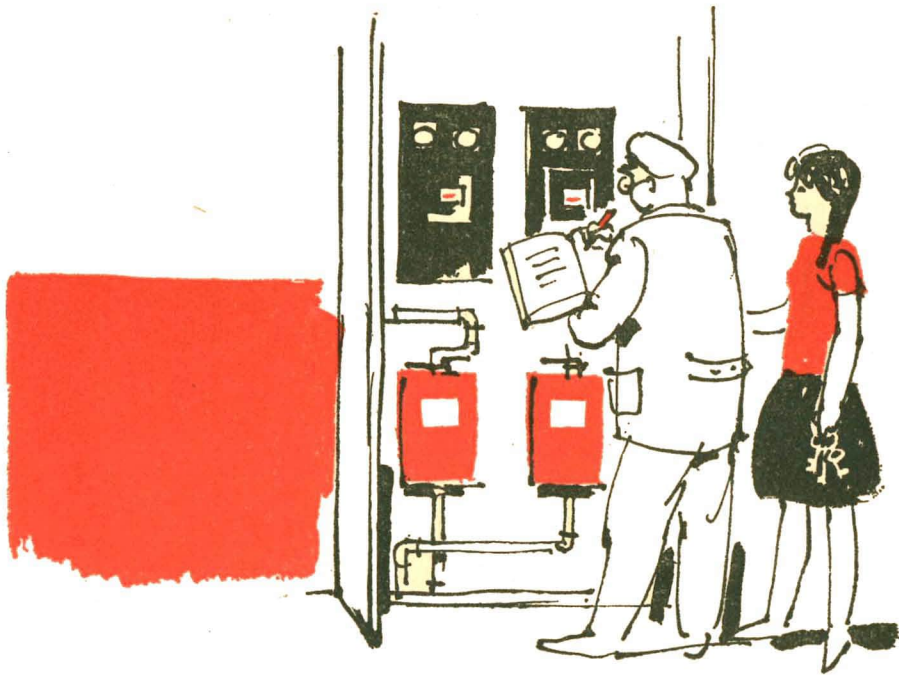
Es würde zu weit führen, hier näher auf diese Berechnungen einzugehen. Mit etwas Überlegung werden wir aber immer zum Ziel kommen, wenn in unserer Praxis einmal die Aufgabe auftritt, aus einer bestimmten Gesamtspannung durch Spannungsteilung eine geringere Teilspannung abzuleiten. Oft wird dann nur der Lastwiderstand R_3 bekannt sein, während wir R_1 und R_2 bestimmen müssen. In diesen Fällen gehen wir dann so vor, daß wir den Wert von R_1 auf etwa $\frac{1}{5}$ des Lastwiderstandes festlegen und daraus R_{ges} errechnen.

Aus R_{ges} und dem gewünschten Wert von U_1 ergibt sich der Gesamtstrom; daraus und aus der Gesamtspannung wieder R_2 . Dabei müssen wir stets an folgendes denken: Wenn wir R_3 (die Last) ändern, ändert sich auch U_1 !

Leistung und Arbeit

Ein stromdurchflossener Leiter erwärmt sich. Für diese Erwärmung ist eine bestimmte elektrische Leistung erforderlich. Nach unseren bisherigen Erkenntnissen muß sie eng mit Stromstärke und Spannung zusammenhängen. Erhöhen wir den Strom, so steigt die Erwärmung, es tritt also eine höhere elektrische Leistung auf. Wie ist das aber mit der Spannung?

Betrachten wir nochmals Abb. 12. Dort haben wir die doppelte Spannung, aber auch den doppelten Widerstand (zwei Lampen in Serie!), so daß der Strom in jeder Lampe und damit auch deren Erwärmung und Lichtabgabe gleich ist im Vergleich zur Erwärmung und Lichtabgabe nur einer Lampe.



Wir haben in Abb. 12 aber zwei Lampen, also die doppelte Leistung! Daraus erkennen wir, daß die Leistung auch von der Spannung abhängt.

Die elektrische Leistung wird in Watt gemessen (so benannt nach dem englischen Physiker James Watt); auch hier gibt es wieder die Vergrößerung und Verkleinerung der Dimension: $1 \text{ W} = 1000 \text{ mW}$ (Milliwatt), $100 \text{ W} = 1 \text{ kW}$ (Kilowatt). Das Formelzeichen für die Leistung lautet P .

Zwischen Stromstärke, Spannung und Leistung besteht eine Beziehung, die äußerlich dem Ohmschen Gesetz ähnelt:

$$P = U \cdot I$$

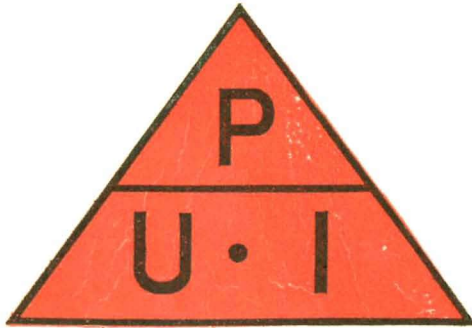
Die Abbildung 26 gibt eine Gedächtnisstütze in Form eines Merkdreiecks. Ebenso wie beim Ohmschen Gesetz müssen U , I und P zahlenmäßig in ihren Grundeinheiten V , A und W in die Rechnung eingesetzt werden.

Wir decken die gesuchte Größe mit dem Finger ab. Übrig bleibt die benötigte Formel zu ihrer Errechnung.

Üben wir uns wieder an einigen Beispielen. Ein Plätteisen hat laut Typenschild eine Leistungsaufnahme von 440 W und ist für 220 V bestimmt. Wie groß ist seine Stromaufnahme? Wir rechnen:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{440}{220} = 2 \text{ A. Das Plätteisen nimmt } 2 \text{ A auf.}$$

Welche Leistung nimmt das Lämpchen mit dem Aufdruck $2,5 \text{ V}/0,2 \text{ A}$



$P = \text{Leistung (in Watt)}$

$U = \text{Spannung (in Volt)}$

$I = \text{Strom (in Ampere)}$

Abbildung 26

auf, das wir zu unseren früheren Versuchen benutzten? $P = U \cdot I = 2,5 \cdot 0,2 = 0,5 \text{ W}$. Die Leistungsaufnahme beträgt 0,5 W.

In der Rundfunktechnik müssen wir solche Berechnungen sehr oft anstellen.

Betrachten wir noch einmal Abb. 22. Dort hatten wir einen Vorwiderstand für unser 2,5-V-Lämpchen errechnet. Die Widerstandsangabe 10Ω als Ergebnis genügt aber allein noch nicht. Während wir uns mit der Erklärung begnügt hatten, daß am Widerstand die 2 V, die wir „zuviel“ hatten, abfallen, wissen wir jetzt, daß sich jeder Widerstand erwärmt – die elektrische Leistung, die an ihm abfällt, kann ja nicht spurlos verschwinden! Wir wissen auch, daß sie in Wärme umgesetzt wird – aber in wieviel Wärme? Das zu wissen, ist sehr wichtig, denn der Widerstand muß diese Wärme an die ihn umgebende Luft abstrahlen können. Ist er zu klein gebaut, kann er das nicht ausreichend, infolgedessen erhitzt er sich zu sehr und wird schließlich zerstört.

Einem Widerstand müssen wir bei gleichem Ohmwert also um so größere Oberfläche geben, je mehr elektrische Leistung er aufzunehmen und als Wärme abzuführen hat.

Ein Widerstand wird deshalb als Bauteil durch zwei Größen gekennzeichnet: Durch seinen Widerstandswert (in Ω) und seine Belastbarkeit (in W). Widerstände gleichen Ohmwertes können also sehr verschiedene Größen haben.

Die maximal zulässige Belastbarkeit wird vom Hersteller des Widerstandes angegeben und ist meist zusammen mit dem Ohmwert aufgedruckt. Bei den Radiowiderständen, besonders den Kohleschichtwiderständen bis etwa 2 W Belastbarkeit, erkennen wir das sehr leicht an ihrer äußeren Größe. Am besten lassen wir uns einmal in einem Geschäft, das diese Teile führt, einige Widerstände verschiedener Belastbarkeit zeigen. Dann gewinnen wir sehr schnell einen Blick dafür, was einem Widerstand seiner äußeren Größe nach zugemutet werden darf – für wieviel Watt er also höchstens zugelassen sein kann.

Stets müssen wir feststellen, wie stark der Widerstand in einer Schaltung belastet wird. Betrachten wir das am Beispiel unseres 10- Ω -Vorwiderstandes aus Abb. 22, von dem wir wissen, daß an ihm 2 V abfallen.

Der durchfließende Strom beträgt hier 0,2 A. Wir rechnen: $P = U \cdot I = 2 \cdot 0,2 = 0,4$ W. Der Widerstand müßte also für eine Belastbarkeit von wenigstens 0,4 W bemessen sein. Größer darf er sein, das ist sogar günstig, weil er sich dann noch weniger erwärmt. Ist er aber kleiner, so wird er zu heiß.

Wir hatten für unsere Versuche einige Drahtwiderstände gekauft (höher belastbare Widerstände werden meist aus Draht hergestellt, weil Kohleschichten sich für höhere Leistungen weniger gut eignen), darunter einen mit 10 Ω für 5 oder 6 W. Er wäre also als Vorwiderstand für das Lämpchen gut geeignet und würde nur mit ungefähr $\frac{1}{10}$ der maximal zulässigen Leistung belastet. Außerdem hatten wir einen kleinen Widerstand gekauft, der ebenfalls 10 Ω hat, aber nur mit $\frac{1}{10}$ oder $\frac{1}{20}$ W belastet werden darf.

Schalten wir diesen Widerstand einmal vor das Lämpchen! Da der Ohmwert stimmt, brennt das Lämpchen normal. Der Widerstand wird aber bald heiß und brennt nach einiger Zeit durch, wie wir am Nachlassen und Erlöschen des Lämpchens sehen können. Wir haben diesen Widerstand „überlastet“, die an ihm abfallende Leistung von 0,4 W überstieg den für diesen kleinen Widerstand zulässigen Wert. So etwas darf also nicht passieren!

In Radiogeräten und besonders in Transistorschaltungen haben wir es meist nur mit sehr geringen Leistungen (oft nur in der Größenordnung einiger Milliwatt) zu tun. Hier reichen also fast immer Widerstände für 0,5 W oder sogar 0,25 W (bei Röhrengeräten) aus, für Transistorgeräte sogar 0,1 W oder 0,05 W. In Schaltbildern wird deshalb die Widerstandsbelastung meist nur bei den wenigen Widerständen angegeben, bei denen größere Belastungen auftreten. Wenn wir erst genau wissen, wie eine Schaltung funktioniert, können wir in Zweifelsfällen die erforderliche Belastbarkeit des Widerstandes selbst nach der auftretenden Belastung ausrechnen.

Wie stellen wir die Belastung fest, wenn wir lediglich den durch den Widerstand fließenden Strom, aber nicht die Spannung kennen? Sehr einfach: Nach dem Ohmschen Gesetz wird aus Widerstand und Strom die abfallende Spannung, danach entsprechend dem Leistungsgesetz (Abb. 26) aus Spannung und Strom die Leistung errechnet. Wenn wir weder den Strom noch die Spannung kennen, müssen wir versuchen, eine dieser Größen im Zusammenhang mit der Schaltung, in die der Widerstand eingesetzt ist, zu berechnen oder sie im fertigen Gerät praktisch messen. Meist ist es aber einfacher, die am

Widerstand abfallende Spannung zu messen und aus ihr und dem Widerstandswert den durchfließenden Strom zu berechnen.

Auf eines sei noch hingewiesen: Wenn wir an einen Widerstand eine bestimmte Spannung anlegen, so nimmt er je nach seinem Ohmwert einen bestimmten Strom und damit eine bestimmte Leistung auf. Wird die Spannung verdoppelt, dann verdoppelt sich nach dem Ohmschen Gesetz auch der Strom. Da die Leistung aus Spannung und Strom errechnet wird, vervielfacht sie sich in diesem Fall! Doppelte Spannung am Widerstand bedeutet also vierfache Leistung! Daraus erklärt sich auch, warum unsere kleinen Lämpchen so leicht durchbrennen, wenn wir sie an höhere Spannung legen. Unser 2,5-V-Lämpchen nahm 0,2 A und damit 0,5 W auf. Erhöhen wir jetzt die Spannung auf 5 V, so steigt der Strom auf 0,4 A und die Leistung auf $5 \cdot 0,4 = 2 \text{ W}$!

Außer der elektrischen Leistung kennt der Elektrotechniker noch den Begriff der elektrischen Arbeit. Obwohl dieser Begriff für unsere Zwecke weniger bedeutungsvoll ist, so müssen wir ihn jedoch kennen.



„Arbeit ist die Leistung in der Zeit“, sagt der Physiker. Tatsächlich nützt die elektrische Leistung allein nichts, wenn sie nicht eine gewisse Zeit wirksam ist. Wir bezahlen dem Elektrizitätswerk ja nicht die verbrauchten Watt oder Kilowatt, sondern die Kilowattstunden, und das ist ein wesentlicher Unterschied!

Die Arbeit wird in Wattsekunden (Ws) oder umgerechnet in Wattstunden (Wh) oder Kilowattstunden (kWh) gemessen. Sie errechnet sich aus Leistung mal Zeit.

Wenn eine Glühbirne mit einer Leistungsaufnahme von 100 Watt (=0,1 kW) 10 Stunden lang brennt, dann hat sie eine elektrische Arbeit von $10 \text{ h} \cdot 0,1 \text{ kW} = 1 \text{ kWh}$ in Licht und Wärme umgesetzt. Die gleiche Arbeit leistet ein Tauchsieder, der eine Leistung von 1000 W (=1 kW) hat und 1 Stunde in Betrieb ist. Die von beiden Geräten abgegebene Energiemenge ist dabei die gleiche.

Für unsere Zwecke genügt diese kurze Erklärung. Wer sich für diese Zusammenhänge interessiert, findet sie in dem im Kinderbuchverlag erschienen Buch von Smrž, „Elektrotechnik – leichtgemacht“, eingehend beschrieben.



Chemische Stromquellen – Element und Batterie

Bei den chemischen Stromquellen unterscheidet man zwischen Primärelementen und Sekundärelementen.

Primärelemente erzeugen eine Spannung unmittelbar auf Grund chemischer Reaktionen. Nach Erschöpfung der Chemikalien sind sie unbrauchbar.

Wir haben es mit solchen Stromquellen in unseren Versuchen schon zu tun gehabt: Alle Batterien üblicher Art gehören dazu. Es wird also Zeit, daß wir diesem Bauteil Batterie – der geheimnisvollen „Elektronenpumpe“ des Kapitels „Was ist elektrischer Strom?“ – einmal auf den Grund gehen.

Sekundärelemente sind Speicher. Sie erzeugen selbst keine Energie, diese wird ihnen als elektrischer Strom von außen zugeführt und infolge chemischer Vorgänge im Element gespeichert. Durch rückläufigen Verlauf dieser chemischen Vorgänge wird die elektrische Energie wieder frei. Hierzu gehören die Akkumulatoren (kurz auch Akkus genannt); sie lassen sich nach Erschöpfung wieder aufladen.



Primärelemente

Entsprechend der Abb. 5 hatten wir uns ein galvanisches Bad gebaut. Wir wollen diesen Versuch jetzt noch einmal wiederholen, aber mit einigen Abänderungen.

Das Glasgefäß wird mit einer Lösung von Salmiaksalz (in Apotheken und Drogerien erhältlich) und Wasser gefüllt. Die beiden Elektroden werden aus verschiedenem Material hergestellt (die Bezeichnungen Katode und Anode wollen wir bei den Elementen ausnahmsweise beiseite lassen). Dabei achten wir darauf, daß sie möglichst großflächig sind. Auch der Glasbehälter soll nicht zu klein sein. Ein Einkochglas hat etwa die richtige Größe.

Nun brauchen wir noch ein kleines 1,5-V-Lämpchen und ein Voltmeter, mit dem die Spannung zwischen beiden Elektroden gemessen werden kann.

Das Lämpchen wird, nachdem alles andere fertig ist, zwischen beiden Elektroden angeschlossen.

Die Elektrodenpaare stellen wir in verschiedenen Versuchen nacheinander aus Kupfer und Zink, Kupfer und Eisen, Kohle und Kupfer, Kohle und Eisen, Kohle und Zink her. Die Metalle verwenden wir in Form von recht großen, blanken Blechstreifen oder Blechplatten, die Kohle erhalten wir als Kohlestäbe alter leerer Taschenlampenbatterien, die wir auseinandernehmen.

Zwischen beiden Elektroden tritt eine elektrische Spannung auf. Ihre Größe hängt von den verwendeten Elektrodenkombinationen ab. Am geringsten ist sie bei den Elektrodenpaaren Kupfer/Eisen und Kohle/Kupfer, größer bei Kupfer/Zink, Kohle/Eisen und am größten bei der Kombination Kohle/Zink. Bei dieser Kombination erreicht die Spannung einen Wert von 1,5 V.

Wir können bei dieser Kombination versuchsweise ein chemisches Element aufbauen – eigentlich ist ja unsere Versuchsanordnung bereits eines. Abb. 27 zeigt, wie dieses Versuchselement etwa aussehen kann. Mit ihm können wir unser 1,5-V-Lämpchen schon recht kräftig zum Leuchten bringen. Leider nicht lange – denn wir machen die Beobachtung, daß das Lämpchen sehr schnell nachläßt und bereits nach einer knappen Minute fast verlöscht. Wir klemmen es ab, warten eine Weile und schließen es wieder an. Es leuchtet erneut auf, aber leider wiederum nicht lange. Gleichzeitig sehen wir am Kohlestab feine Bläschen. Das ist Wasserstoff, der durch die Zersetzung des Wassers beim Stromdurchgang entstanden ist. Die Bläschen bilden sich nur dann, wenn dem Element Strom entnommen wird. Streichen wir sie mit einem Pinsel von der Kohle ab, so brennt die Lampe sofort wieder heller.

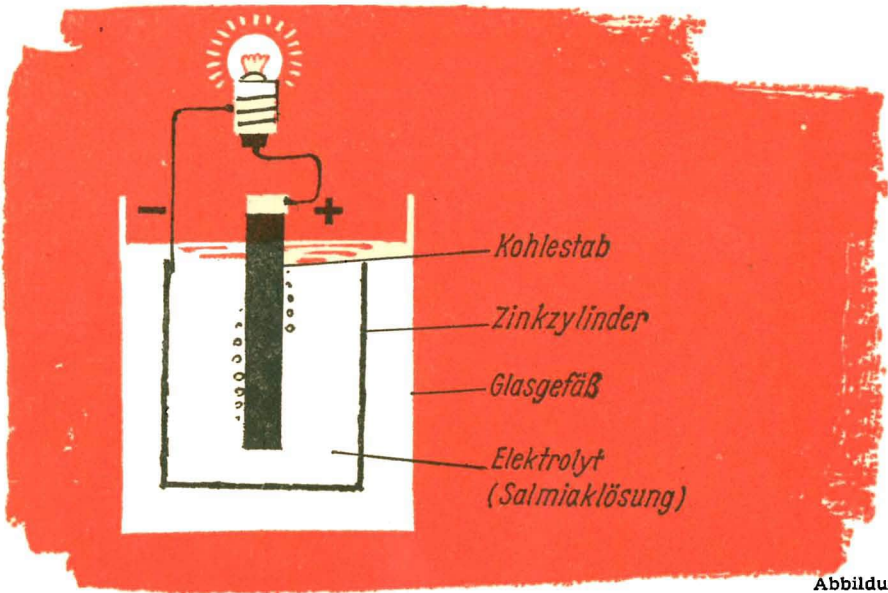


Abbildung 27

Daß die Spannung des Elementes durch diesen Vorgang — er wird Polarisation genannt und ist hier sehr unerwünscht — absinkt, können wir uns etwa so vorstellen, daß die Bläschen einen immer größeren Teil der Oberfläche der Kohle abdecken und dem Strom dadurch den Durchgang immer mehr erschweren. Diese Erklärung ist zwar nicht ganz exakt, aber sie ermöglicht uns eine anschauliche Vorstellung.

Bereits bei unseren Versuchen mit dem galvanischen Bad (Abb. 5) hatten wir gesehen, daß das Wasser beim Stromdurchgang zersetzt wird. Die Beobachtung der Wasserstoffbläschen können wir nun nutzen, um uns zu überlegen, welche der beiden Elektroden den Plus- oder Minuspol unseres Elementes bildet, also in welcher Richtung der Strom fließt. Der Versuch nach Abb. 5 hatte uns gezeigt, daß sich der Wasserstoff stets am Minuspol abscheidet. Also müßte bei unserem Element die Kohle der Minuspol — halt, das stimmt nicht!

Im galvanischen Bad scheidet sich der Wasserstoff — um es genau auszudrücken — an der Elektrode ab, aus der die Elektronen austreten und in den Elektrolyten, die Flüssigkeit, übergehen. So auch bei unserem Element. Die Elektronen treten aus dem Kohlestab aus und wandern zum Zinkzylinder (sie werden durch die elektrochemischen Kräfte dorthin getrieben). Also muß doch im Kohlestab ein ständiger Elektronenmangel, im Zink ein Elektronenüberschuß

herrschen! Demnach ist das Zink der Minuspol unseres Elementes, die Kohle der Pluspol. Es besteht also kein Widerspruch zum galvanischen Bad, aber uns wäre beinahe ein Denkfehler unterlaufen!

Daß tatsächlich die Kohle den Pluspol, das Zink den Minuspol bildet, läßt sich auf verschiedene Weise feststellen. Einmal, indem wir ein galvanisches Bad nach Abb. 5 bauen, es mit unserem Element verbinden und beobachten, an welchem Pol sich die meisten Bläschen abscheiden. Durch Vergleich mit der Taschenlampenbatterie stellen wir wieder fest, daß dieser Pol des galvanischen Bades der Minuspol ist. Er ist mit dem Zinkzylinder des Elementes verbunden!

Wir können die Polarität des Elementes noch auf andere Weise feststellen. Beide Pole werden durch einen Draht verbunden, unmittelbar darunter stellen wir eine Magnetnadel auf, die ja je nach der Stromrichtung zur einen oder anderen Seite ausweicht. Durch Vergleich der Auslenkrichtung beim Anschluß einer Taschenlampenbatterie läßt sich wieder die Polarität ermitteln. Diesen Versuch müssen wir mit unserem Element aber sehr schnell durchführen und die Magnetnadel dicht an den Draht bringen, da die Stromstärke, die bei diesem einfachen Element ohne hin nicht sehr groß ist, infolge der Polarisierung schnell nachläßt, so daß wir dann die Auslenkung nicht mehr genau erkennen können.

Die Polarisierung wird beseitigt, indem man den Kohlestab mit einer Chemikalie umgibt, die den Wasserstoff chemisch bindet, so daß er sich nicht mehr störend bemerkbar machen kann. Ein solches Element gibt dann über längere Zeit recht kräftige Ströme ab. Die dafür verwendete Chemikalie wird Depolarisator genannt und oxydiert den Wasserstoff wieder zu Wasser. Meist besteht der Depolarisator aus Braunstein. Mit der eigentlichen Elementfunktion hat er nichts zu tun.

Wenn wir nun noch den Elektrolyten – die Salmiaklösung – mit Weizenmehl, Sägemehl oder Stärkekleister eindicken und das Element wasserdicht nach oben hin abschließen, erhalten wir ein Trockenelement. Wir kennen es als Monozelle. Eine solche Monozelle gibt etwa 1,5 V ab, sie ist so aufgebaut, wie Abb. 28 zeigt. Es lohnt sich, einmal eine leere Batterie auseinanderzunehmen, wir können ihren Aufbau dann gut studieren und die Kohle, um die der Depolarisator mit einem Gazebeutelchen gehalten wird, für weitere Experimente verwenden.

Die Monozelle ist also ein Kohle-Zink-Trockenelement. Der Name ist etwas irreführend, denn innen sind diese Elemente alles andere als trocken! Deshalb müssen wir auch vermeiden, daß die Stromquelle, wenn wir sie in unsere Bastelgeräte eingesetzt haben, an Überalterung zugrunde geht. Der Zinkzylinder wird dann undicht,

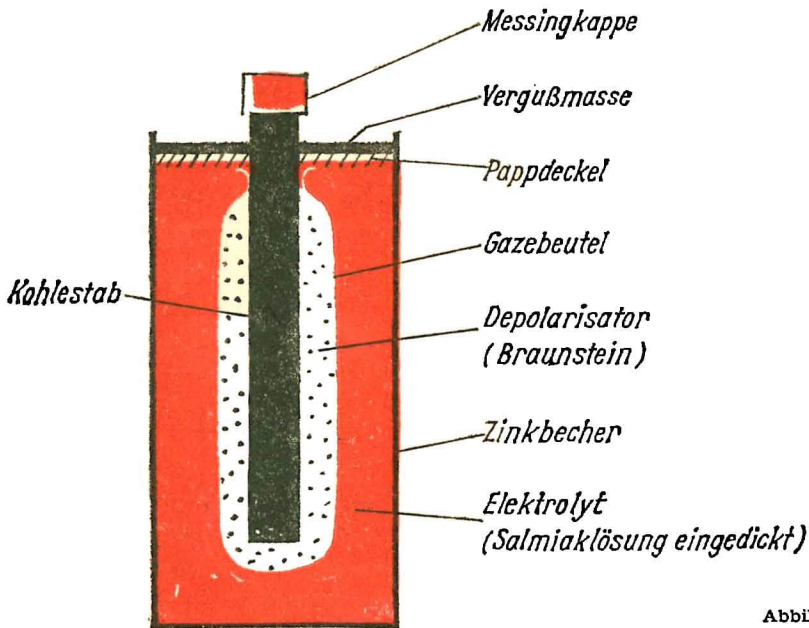


Abbildung 28

und der Elektrolyt läuft aus. Das kann an unserem Gerät allerhand Schaden verursachen.

Was ist nun eine Batterie? Eine Batterie ist eine Kombination mehrerer Elemente. Das ist alles! Da meist mehrere Elemente kombiniert sind, hat sich der Begriff Batterie allgemein für diese Art von Stromquellen eingebürgert, obwohl er streng genommen auch für Sekundärelemente (Akkus) gültig wäre!

Warum kombiniert man Elemente zu Batterien? Meist, um eine höhere Spannung zu erhalten. Man schaltet dann mehrere Elemente in Serie. Dabei muß – wie wir aus dem Versuch nach Abb. 13 schon wissen – auf richtige Polung geachtet werden! Jeder Pol des einen Elementes muß mit dem entgegengesetzten Pol des nächsten Elementes verbunden werden, damit sich die Spannungen addieren. In der Taschenlampen-Flachbatterie (wegen ihrer äußeren Form so genannt) finden wir drei Einzelemente in Serienschaltung. Abb. 29 zeigt ihren Aufbau. Ihre Spannung beträgt demzufolge das Dreifache eines Einzelementes: 4,5 V. In 3-V-Stabbatterien sind einfach zwei Einzelemente hintereinandergesteckt, so daß die Kohle des einen (sie trägt zur besseren Kontaktgabe eine Messingkappe) den Zinkboden des anderen berührt. Auch alle anderen Trockenbatterien – etwa die Radio-Anodenbatterien zu 67,5 V oder 85 V – sind aus einer entsprechenden Anzahl kleiner Einzelemente zusammengesetzt.

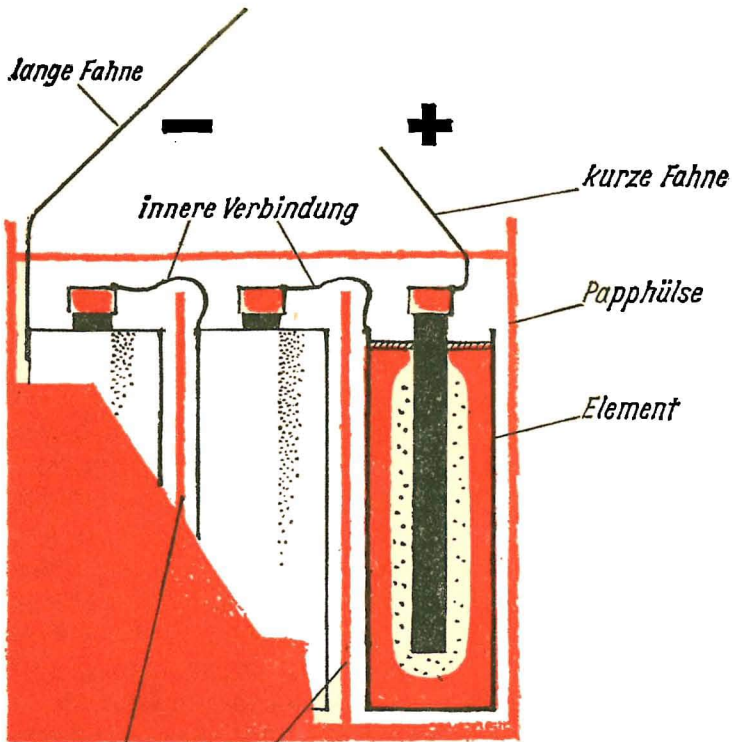


Abbildung 29

*Pappwände zur Isolierung
der Zinkbecher*

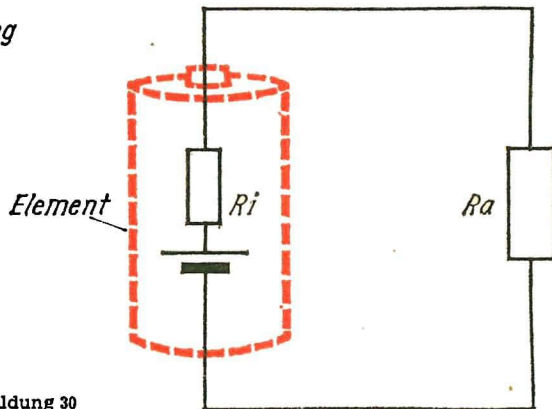


Abbildung 30

Einen wichtigen Begriff müssen wir noch kennenlernen – obwohl er eigentlich nichts Neues für uns bringt: den des inneren Widerstands eines Elementes.

Der Strom findet natürlich auch im Innern des Elementes selbst einen Widerstand vor – gleichviel ob beim galvanischen Bad oder beim Element (das ja auch nichts anderes ist als ein galvanisches Bad mit eigener Energiequelle für den Elektronenantrieb!). Die elek-

trochemischen Kräfte treiben zwar die Elektronen von der Kohle zum Zink, aber das ändert nichts daran, daß sich die Elektronen mühsam durch den Elektrolyten winden müssen. Flüssigkeiten leiten wesentlich schlechter als Metalle! Wir können uns das so vorstellen, als ob der eigentlichen Stromquelle im Element selbst noch ein Widerstand in Serie geschaltet ist – eben der Widerstand des Elektrolyten. Deshalb können Elemente keinen beliebig hohen Strom abgeben. Abb. 30 verdeutlicht das.

Das Element denken wir uns in eine „ideale“ widerstandslose Stromquelle – dargestellt durch das Batteriesymbol – und den Innenwiderstand (des Elektrolyten) zerlegt. Praktisch läßt sich beides natürlich nicht trennen, denn die elektrochemischen Vorgänge spielen sich ja im Elektrolyten bzw. an dessen Grenzflächen zur Kohle und um Zink ab.

Wir wollen den Innenwiderstand mit R_i bezeichnen. Unser „Verbraucher“ ist der Außenwiderstand, den wir R_a nennen wollen. Es spielt keine Rolle, ob er ein Lämpchen oder eine beliebige andere Widerstandsart darstellt.

R_i und R_a sind also in Serie geschaltet. Was wir aber außen als Batteriespannung benutzen können, ist nur der an R_a stehende Spannungsanteil. R_i und R_a bilden – sobald Strom fließt – einen Spannungsteiler genau wie in Abb. 23! Wir erkennen daran, daß die Batteriespannung um so mehr zurückgehen muß, je stärker der Strom ist, den wir entnehmen, also je geringer der Widerstand von R_a ist. 1,5 V haben wir tatsächlich nur dann, wenn wir keinen Strom entnehmen. Bei jeder Stromentnahme fällt ein Teil von dieser Spannung im Element selbst am Innenwiderstand R_i ab! Dagegen gibt es nur ein Mittel: Man muß R_i so gering wie möglich halten, was unter anderem durch großflächige Elektroden erreicht wird.

Wir können also sagen, daß ein Element um so stärkere Ströme abgeben kann, je größere Elektroden es hat. Für Versuche mit starken Strömen eignet sich deshalb eine Serienschaltung aus drei Monozellen besser als eine – die gleiche Spannung von 4,5 V ergebende – Flachbatterie, die aus kleineren Elementen zusammengesetzt ist.

Der Innenwiderstand eines Elementes steigt mit zunehmendem Alter an. Ein altes, fast erschöpftes Element kann deshalb bei sehr geringer Stromentnahme noch fast die volle Spannung aufweisen. Schließen wir aber einen stärkeren Stromverbraucher an – etwa eine Taschenlampenbirne –, dann geht die Spannung so weit zurück, daß die Lampe kaum glimmt. Die Ursache ist dann nicht ein Rückgang der Spannung im Element, sondern der Innenwiderstand hat sich so weit erhöht, daß an ihm bereits bei geringer Stromentnahme fast die ganze Spannung abfällt.

Für den Versuch nach Abb. 7 wurde ein starker Strom gebraucht. Dort hatten wir uns mit der Parallelschaltung mehrerer Batterien (jeweilige Verbindung der Pluspole und Minuspole) geholfen.

Schalten wir nun mehrere Elemente parallel, dann wirkt das Ganze wie ein Element mit vergrößerten Elektroden. Wir schalten dadurch alle Innenwiderstände parallel, deren Gesamtwert (wie wir bei Abb. 25 schon erklärt haben) infolgedessen sinkt. Dementsprechend können wir bei gleicher Spannung einen höheren Strom entnehmen. Schalten wir mehrere Taschenlampenbatterien parallel, dann ergibt sich eine Serienparallelschaltung, die mit derjenigen der Lampen in Abb. 15 vergleichbar ist.

Wie ist es bei der Serienschaltung? Hat eine 4,5-V-Flachbatterie den dreifachen Innenwiderstand eines Einzelelementes? Ja, denn die Innenwiderstände liegen jetzt in Serie. Also gibt diese Batterie nur ein Drittel des Stromes eines Einzelelementes ab? Nun, da sich durch die Serienschaltung nicht nur R_i , sondern auch die Spannung verdreifacht hat. Der maximal entnehmbare Strom bleibt nach dem Ohmschen Gesetz der gleiche wie beim Einzelelement.

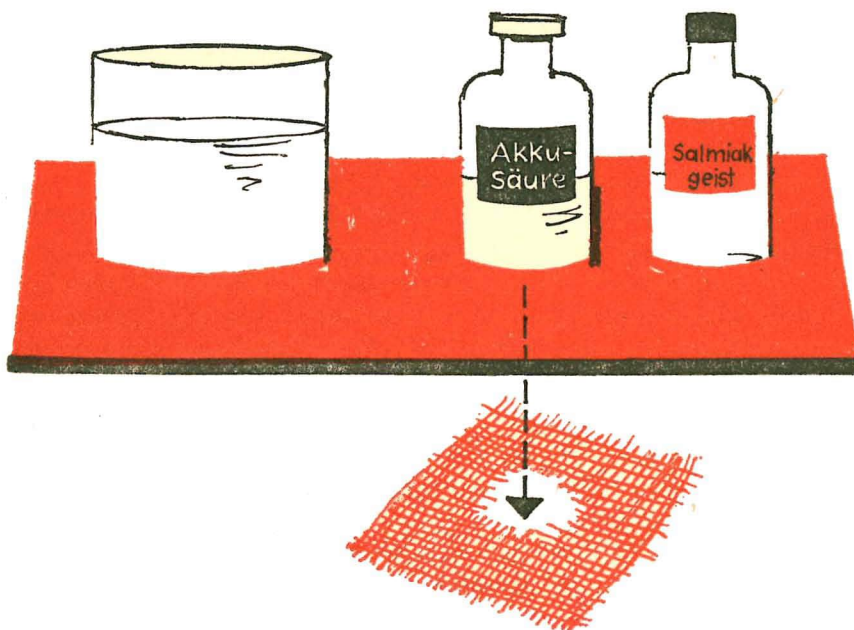
Die Parallelschaltung von Elementen oder Batterien wenden wir an, wenn wir höhere Ströme brauchen, die Serienschaltung, wenn wir höhere Spannungen brauchen. Brauchen wir beides, dann müssen beide Schaltungsarten aus entsprechend vielen Batterien oder Einzelzellen kombiniert werden. Bei der Parallelschaltung muß man beachten, daß alle Elemente bzw. Batterien untereinander die gleiche Spannung haben, anderenfalls würde die Batterie mit der höheren Spannung einen Strom durch die mit der niedrigeren treiben — beide würden sich selbsttätig entladen und wären sehr schnell zerstört.

Sekundärelemente (Akkumulatoren)

Sekundärelemente bilden keine eigene Spannung, sie vermögen aber elektrische Energie in Form von chemischer Energie zu speichern.

Dazu wieder ein Versuch. Wir bauen noch einmal das galvanische Bad auf, benutzen aber diesmal als Elektroden zwei Bleiplatten oder Bleiblechstreifen, die wir beim Klempner bekommen und zunächst blankschmirgeln. Sie sollen wieder möglichst große Flächen haben (mit dem Hammer breitklopfen).

Das Glasgefäß füllen wir mit 20%iger Schwefelsäure, die wir in Chemikalienhandlungen oder Autowerkstätten als Akkusäure gleich in der richtigen Verdünnung bekommen.



Für den Umgang mit der Akkusäure ist große Vorsicht nötig, denn die Säure hat stark ätzende Wirkung! Sie zerstört schon nach kurzer Zeit Textilien, Holz und Papier. Wir legen also vorsichtshalber eine Sprelacart- oder Glasplatte unter und passen gut auf, daß keine Säure verspritzt wird. Ist doch einmal etwas danebengegangen, so betupfen wir die Säureflecke sofort mit reichlich Salmiakgeist (den wir vorsorglich griffbereit halten) und spülen dann mit Wasser nach. Säure unter Verschuß halten und Flasche auffällig kennzeichnen! Beim Arbeiten mit Schwefelsäure wollen wir unbedingt eine Schutzbrille tragen, wie das auch in der Schule bei entsprechenden Chemie-Experimenten vorgeschrieben ist. Schon ein kleiner Säurespritzer kann sehr schwere Augenschäden verursachen! Sollten wir trotz aller Vorsicht einen Säuretropfen auf die Hand bekommen, so spülen wir sofort mit Salmiakgeist und danach mit Wasser gut ab. Die Verwendung von Gummihandschuhen – abgelegte Küchenhandschuhe aus Mutter's Küche, die danach aber nicht wieder für Küchenzwecke benutzt werden dürfen! – ist keineswegs übertrieben; erst recht nicht die Schutzbrille, denn beim Auge kommt jedes Ausspülen zu spät!

Zwischen den beiden Bleiplatten können wir mit einem Voltmeter oder einem Lämpchen zunächst keine Spannung feststellen. Wir müssen den Akku erst aufladen. Als Ladestromquelle benutzen wir zwei in Serie geschaltete Flachbatterien von je 4,5 V, so daß wir über 9 V verfügen. Die Stromquelle schalten wir in Serie mit einer

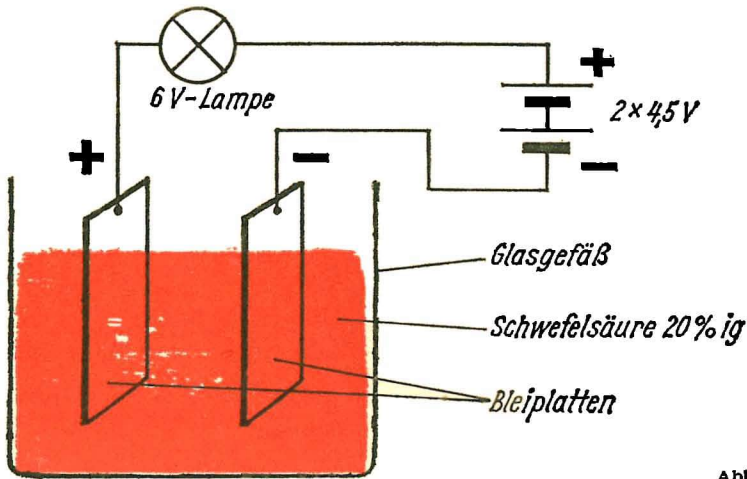


Abbildung 31

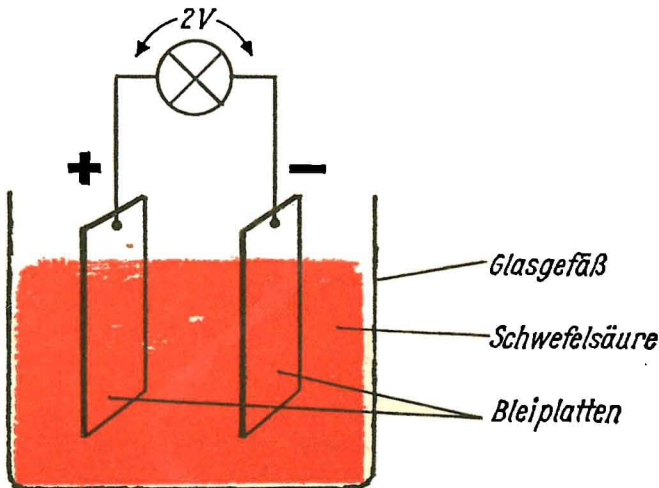


Abbildung 32

6-V-Lampe und dem Versuchsakku so, wie es Abb. 31 zeigt. Am Aufleuchten der Lampe sehen wir, daß ein Strom fließt, gleichzeitig sorgt die Lampe als Vorwiderstand dafür, daß dieser Strom nicht zu stark wird.

Nach einiger Zeit beobachten wir, daß die mit Plus verbundene Bleiplatte sich bräunlich zu färben beginnt. Wir warten, bis diese Färbung deutlicher wird, und schalten dann ab. Jetzt können wir ein Lämpchen für 1,5 bis 2,5 V direkt zwischen beide Platten schalten. Es wird hell aufleuchten (Abb. 32). Nach einiger Zeit läßt die Leuchtkraft nach – der Akku ist entladen. Wir können ihn dann wie zuvor beschrieben erneut aufladen und diesen Vorgang viele Male wiederholen. Wichtig ist stets, daß der Pluspol der Ladebatterie immer

mit dem Pluspol des Akkus (dunkle Platte) verbunden wird. Der Ladestrom verläuft also in umgekehrter Richtung wie der Entladestrom! Außerdem muß die Spannung der Ladebatterie stets etwas höher sein als die des Akkus, da sie ja die im Akku bei der Ladung entstehende Gegenspannung überwinden muß. Die von einem solchen Bleiakku abgegebene Spannung beträgt ungefähr 2 V.

Die Ladung unseres Versuchsakkus hält nicht sehr lange vor und ist nicht sehr groß; dazu sind die Plattenoberflächen zu klein. Industriell gefertigte Akkus haben deshalb speziell präparierte Platten mit sehr poröser Struktur und entsprechend großer wirksamer Oberfläche. Aus dem gleichen Grunde sind dort auch für jede Elektrode mehrere miteinander verbundene Platten vorhanden, die so angeordnet sind, daß sich immer eine positive und eine negative Platte gegenüberstehen.

Vorteilhaft beim Bleiakku ist sein sehr geringer Innenwiderstand (er kann weit unter $0,1 \Omega$ liegen, je nach Größe des Akkus); der Akku vermag daher sehr hohe Ströme ohne merklichen Spannungsrückgang zu liefern. In dieser Beziehung ist er dem Trockenelement weit überlegen.

Nach dem gleichen Prinzip baut man kleine gasdichte Akkus auf, die im Innern ebenfalls nicht trocken sind, obwohl sie unter der Bezeichnung Trockenakkus gehandelt werden. Für unsere Zwecke sind besonders die kleinen preiswerten 2-V-Trockenakkus vom Typ RZP 2 gut geeignet. Derartige Akkus enthalten Zusätze, die das bei der Ladung auch hier durch elektrolytische Zersetzung des Wassers entstehende Wasserstoffgas binden. Es würde sonst das Gehäuse aufblähen und sprengen. Aber ansonsten arbeitet ein solcher Akku nach dem gleichen Prinzip wie unser Versuchsakku.

Wir können einen gekauften Trockenakku zunächst über eine Lampe entladen, bis er fast leer ist (restlos entladen soll man Akkus nie!) und ihn dann in der beschriebenen Weise wieder aufladen und so fort.

Es gibt noch andere Akkuarten, die bekannteste unter ihnen ist der Nickel-Kadmium-Akku (er wird auch als Stahlakku bezeichnet). Sein Name weist auf die Elektrodenmetalle hin; als Elektrolyt dient hier Kalilauge. Er arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie der Bleiakku, seine Spannung liegt bei etwa 1,2 V je Zelle (bei Akkus wird an Stelle des Begriffs Element der Ausdruck Zelle benutzt), sein Innenwiderstand ist nicht ganz so niedrig wie der des Bleiakkus. Dagegen ist er robuster und im Betrieb unempfindlicher gegen Überladung oder zu tiefe Entladung.



Elektromagnetismus

Die Spule

Magnetische Wirkungen des Stromes hatten wir schon kennen-gelernt und dabei festgestellt, daß das magnetische Kraftfeld um einen geraden Leiter recht schwach ist. Was können wir tun, um es zu verstärken?

In Abb. 33 ist nochmals der Draht aus dem Versuch nach Abb. 7 dargestellt. Der Pfeil zeigt die Richtung der Kraftlinien an. Biegen wir den Draht zu einer Schleife, wie es Abb. 34 zeigt, so erkennen wir deutlich, daß die Kraftlinien im Innern der Schleife die gleiche Richtung haben. Dort drängen sie sich also enger zusammen — das Magnetfeld im Innern der Schleife ist stärker! Wir können es weiter verstärken, wenn wir den Draht zu einer Spirale aufwickeln (Abb. 35).

Ein solches Gebilde nennt der Techniker Spule. Im Spuleninnern haben alle Kraftlinien die gleiche Richtung; sie treten an einem Spulenende aus und am anderen in die Spulenachse ein. Wenn wir diese Spule an eine Batterie anschließen, können wir mit einigen Magnetnadeln die Form und Richtung des Kraftfeldes verfolgen. In Abb. 35 ist angedeutet, welche Stellung diese Nadeln einnehmen, wenn die Spule vom Strom durchflossen wird.

Eine Spule, die ein recht kräftiges Magnetfeld erzeugt, erhalten wir, indem wir eine leere Garnrolle mit Draht bewickeln. Der Draht soll nicht zu dünn sein (sonst wird sein Widerstand zu hoch und der Spu-

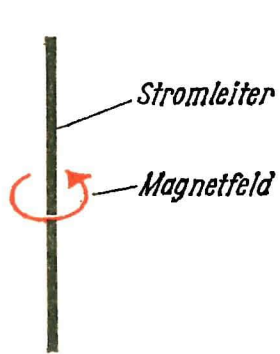


Abbildung 33

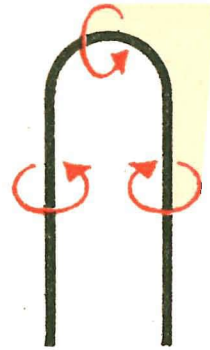


Abbildung 34

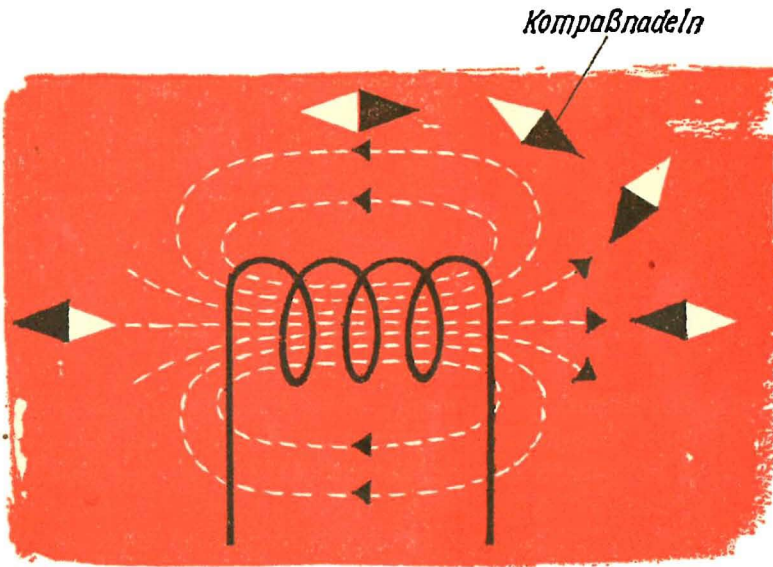


Abbildung 35

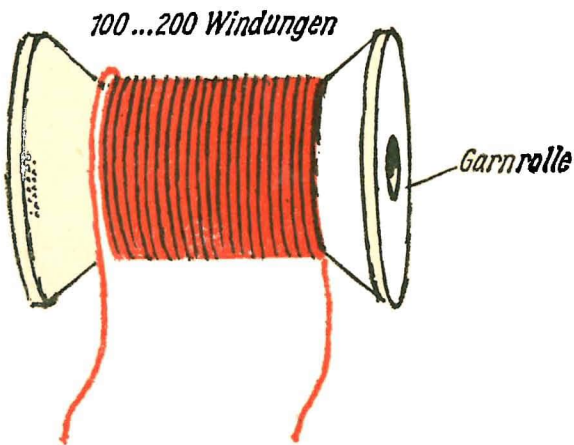


Abbildung 36



Abbildung 37

Abbildung 38

lenstrom zu schwach), andererseits aber doch so dünn, daß wir auf der Spule wenigstens 100 bis 200 Windungen unterbringen (Abb. 36).

Den Draht für diese Spule erhalten wir durch Abwickeln einer alten Radiodrosselspule oder einer anderen Spule, die wir aus der Schrottkiste einer Werkstatt billig bekommen. Es muß isolierter Draht sein, denn wenn die einzelnen Windungen sich metallisch berühren würden, könnte der Strom direkt von der einen Windung auf die nächste übergehen und sich den langen Weg durch die Drahtwicklung sparen.

Abb. 37 zeigt, wie wir die so angefertigte Spule mit unserer Batterie verbinden. Die Schaltsymbole für Batterie und Schalter kennen wir schon, und das Symbol für die Spule prägt sich leicht ein.

In Abb. 37 ist der Schalter noch offen, es kann also kein Strom fließen. Einige Magnetnadeln, die wir in Nähe der Spule aufgestellt haben, stellen sich in die Nord-Südrichtung der Erde ein, beispielsweise so, wie in Abb. 37 angegeben.

Nun schalten wir den Schalter ein (Abb. 38). Der Strom fließt durch die Spule und baut das Magnetfeld um die Spule auf, wie der Fachmann sagt. Die Magnetnadeln stellen sich sofort so ein, wie wir das bei Abb. 35 schon gesehen haben. Unsere Spule wirkt jetzt also offenbar wie ein Permanentmagnet, dessen Pole sich an den Stirnflächen der Spule befinden.

An den Magnetnadeln können wir erkennen, was der Nord- und was der Südpol ist. Polen wir die Batterie um, so daß der Strom umgekehrt durch die Spule fließt, so drehen sich auch die Magnetnadeln um – Nord- und Südpol sind jetzt vertauscht. Aus früheren Versuchen wissen wir, daß die Richtung des Magnetfeldes von der Stromrichtung abhängt.

Die Spule ist nun wie ein normaler Permanentmagnet in der Lage, kleine Eisenteilchen (Stecknadeln!) anzuziehen. Versuchen wir das einmal und schalten wir, wenn die Stecknadeln an unserer Spule hängen, den Schalter aus. Der Magnetismus verschwindet – die Stecknadeln fallen ab. Mit dem Schalter können wir den Magnetismus also beliebig entstehen und verschwinden lassen.

Wir wickeln nun die Hälfte der Windungen von unserer Spule wieder ab – aber den abgewickelten Draht schneiden wir nicht ab, sondern lassen ihn lose auf dem Boden liegen, so daß er noch vom Strom durchflossen wird. Dann schalten wir wieder ein.

Wir werden feststellen, daß die Spule jetzt die Stecknadeln merklich schwächer anzieht als zuvor. Die Stärke des Magnetfeldes ist also von der Windungszahl der Spule abhängig – das ist leicht erklärlich, wenn wir uns noch einmal überlegen, wie die Spule zustande gekommen ist (Abb. 33 bis 35). Den abgewickelten Draht durften wir nicht abschneiden, weil unser Experiment sonst mißlungen wäre. Durch Verkürzung der Drahtlänge wird der Widerstand im Stromkreis geringer – der Strom also stärker. Stärkerer Strom bedeutet aber stärkeres Magnetfeld, so daß die Schwächung des Magnetfeldes durch die verringerte Windungszahl wieder ausgeglichen würde und wir keinen Unterschied merken würden!

Die Beobachtung, daß das Magnetfeld mit stärkerem Strom stärker wird, machen wir auch, wenn wir zwei Batterien in Serie schalten und die Spule mit der doppelten Spannung betreiben. Da der Widerstand der Spule der gleiche geblieben ist, muß jetzt nach dem Ohmschen Gesetz ein doppelt so starker Strom fließen, was wir an der deutlich stärkeren Anziehungskraft sehen.

Wir merken uns: Die Stärke des Magnetfeldes einer Spule hängt erstens von der Windungszahl und zweitens von der Stromstärke ab. Fließt kein Strom, dann ist auch kein Magnetfeld vorhanden.

Daß es sich bei unserer Spule um den gleichen Magnetismus handelt wie beim Permanentmagneten, können wir beweisen, indem wir mit der stromdurchflossenen Spule einen Stahlnagel durch Bestreichen in einer Richtung magnetisieren, wie wir das früher schon mit dem Permanentmagneten getan hatten. Der Stahlnagel läßt sich mit der Spule ebensogut magnetisieren, allerdings nicht ganz so kräftig – dazu ist unsere Spule noch zu schwach. Besonders gut gelingt dieser Versuch, wenn wir den Stahlnagel nicht bestreichen, sondern in die Längsbohrung der Garnrolle einfach hineinschieben. Er wird dann von den magnetischen Kraftlinien der Länge nach durchflossen und so besonders wirksam beeinflusst.

Wir schieben nun in die Spule einen Kern aus Weicheisen hinein: einen dicken Zimmermannsnagel oder auch ein Bündel passend ge-

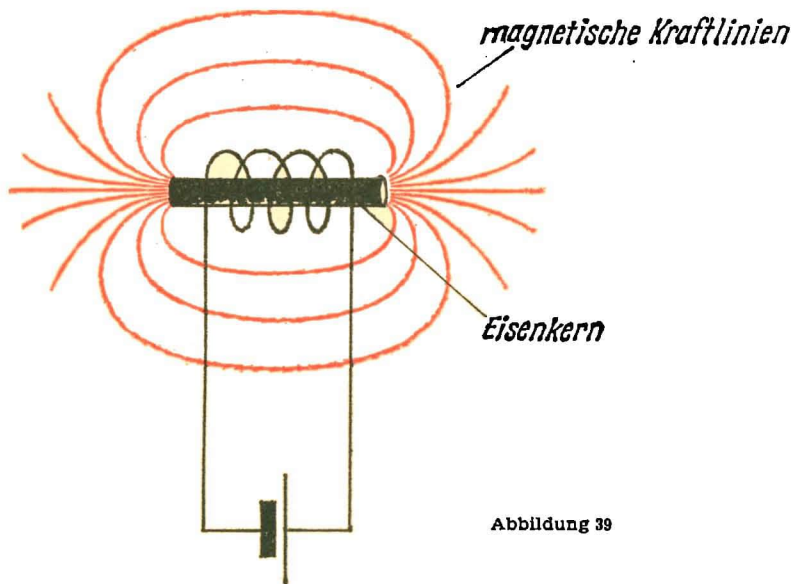


Abbildung 39

schnittener Eisendrähte (Blumenbindedraht). Zuvor probieren wir mit dem Permanentmagneten, ob es sich auch wirklich um Weicheisen und nicht etwa um Stahl handelt. Der Eisenkern soll nach Bestreichen mit dem Permanentmagneten nicht magnetisch bleiben, was wir durch die anschließende Probe mit einigen Stecknadeln feststellen.

Wenn wir die Spule jetzt einschalten, bemerken wir, daß ihre Magnetkraft durch den Eisenkern bedeutend verstärkt worden ist. Stecknadeln werden heftiger angezogen, die Kompaßnadel schon auf größere Entfernung beeinflußt und so weiter. Beim Abschalten des Stromes verschwindet die Magnetkraft wieder.

Die verstärkte Magnetkraft rührt daher, daß der Eisenkern einmal die Kraftlinien „bündelt“ — Abb. 39 veranschaulicht das —, zum anderen ist Eisen ein sehr guter magnetischer Leiter, während die Luft den magnetischen Kraftlinien einen ziemlich großen Widerstand entgegensetzt. Elektromagneten für technische Zwecke haben daher immer einen Eisenkern. Tatsächlich ist unsere Garnrolle nichts anderes als ein Elektromagnet.

Man kann die Kraftlinien noch enger auf ein bestimmtes Gebiet konzentrieren und dort stärkere Magnetkraft erreichen, wenn der Luftweg für die Kraftlinien durch zweckmäßige Ausbildung des Eisenkerns möglichst verkürzt wird. Abb. 40 zeigt dafür ein Beispiel. Wir können diese Elektromagnetform selbst bauen, wenn wir einige Eisenblechstreifen U-förmig biegen und an ein Ende unseres Spulenkernes ansetzen. Die in Abb. 40 nur angedeutete Spule wird dann wieder von der bewickelten Garnrolle gebildet.

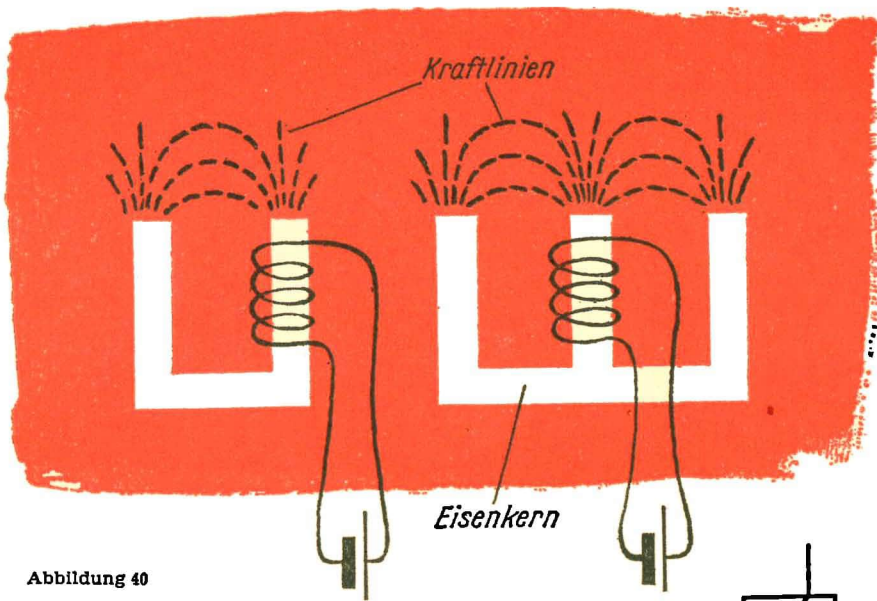


Abbildung 40

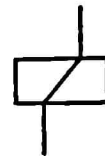


Abbildung 41

Gegenstände, die wir jetzt vor den Elektromagneten bringen, werden von beiden Magnetpolen (der untere ist hier doppelt nach oben geführt) kräftig angezogen. Diese Elektromagnetform finden wir oft in Starkstrom-Schalterschützen (das sind besondere Bauformen der Relais, über die wir noch Näheres erfahren).

Wir prägen uns nun das Schaltsymbol für einen Elektromagneten (Kraftmagneten) ein – Abb. 41 –, es wird überall da benutzt, wo der Elektromagnet die Aufgabe hat, eine mechanische Kraftwirkung auszuüben. Der Schrägstrich im quer zur Leitung liegenden Kästchen symbolisiert die Wicklung.

Wie bei dem Versuch nach Abb. 6 können wir auch bei unserem Garnrollen-Elektromagneten eine Pappe auflegen und mit aufgestreutem Eisenpulver das Kraftfeld sichtbar machen.

Wir bauen eine elektrische Klingel

Abb. 42 zeigt uns, wie wir aus dem Garnrollen-Magneten eine elektrische Klingel bauen können. Die bewickelte Garnrolle wird quer auf einem Holzbrettchen befestigt. Vor einem Ende des Eisenkerns bringen wir ein Eisenblech an (der Fachmann nennt dieses Blech den Anker), das sich um einen als Achse dienenden Nagel drehen kann

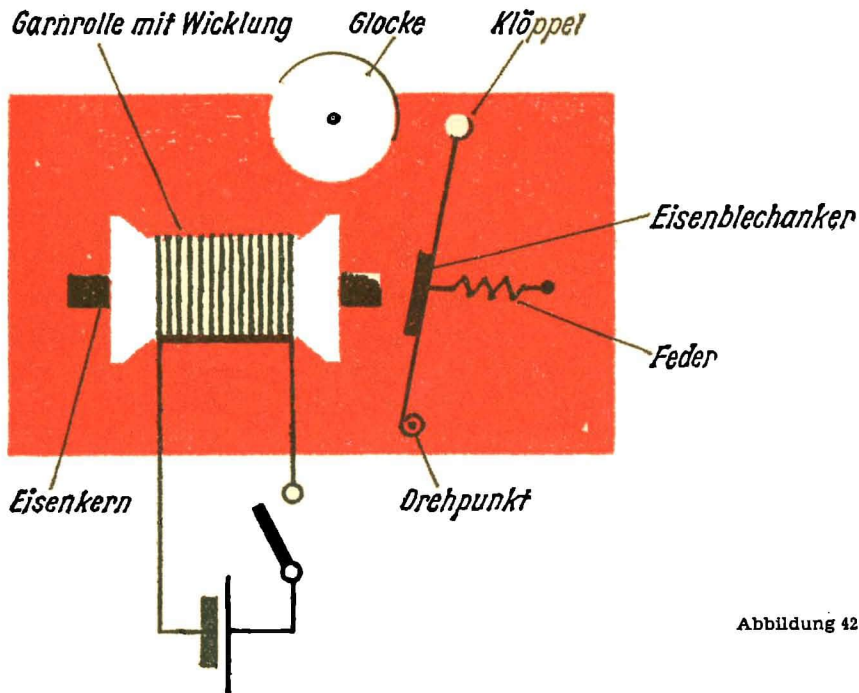


Abbildung 42

und welches wir mit einem steifen Draht (halbierte Stricknadel) zum Klöppelstiel verlängern. Damit der Magnet kräftig genug wirken kann, soll der Anker höchstens 5 mm vom Spulenkern entfernt sein. Eine kleine Feder (Gummibändchen) hält ihn in dieser Lage. Eventuell können wir rechts vom Anker noch einen Nagel in das Brett schlagen, an den der Anker sich anlegt, damit er sich nicht zu weit vom Kern entfernen kann.

Schalten wir den Strom ein, wird der Anker angezogen, die Glocke macht einmal „bim“ – das ist alles. Schalten wir aus, so holt die Feder den Anker wieder zurück, und beim nächsten Einschalten ertönt wieder ein Glockenschlag. Wir müßten also den Strom ständig ein- und ausschalten.

Diese Arbeit kann uns die Klingel selbst abnehmen, wenn wir einen kleinen Trick anwenden.

Wir bauen die Klingel jetzt so auf, wie es Abb. 43 zeigt. Der Übersichtlichkeit halber ist der Aufbau hier symbolisch skizziert. Batterie und Spule kennen wir schon aus Abb. 42. Neu ist jetzt der Ankerkontakt K. Er besteht aus dem Ankerblech selbst und einer Kontaktspitze, an die sich der Anker bei stromloser Spule anlegt. Als Kontaktspitze kann der Nagel dienen, der den Anker am zu weiten Zurückweichen hindert. Auf den Einschalter wurde in Abb. 43 der Einfachheit halber verzichtet.

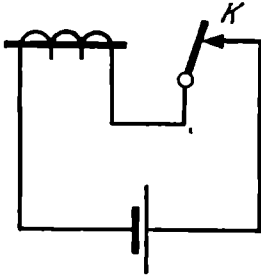


Abbildung 43

Sobald der Stromkreis geschlossen ist, fließt der Spulenstrom über den Kontakt K, die Spule wird magnetisch, zieht den Anker an — der Klöppel schlägt gegen die Glocke —, aber in diesem Moment wird der Stromkreis beim Kontakt K unterbrochen, weil der angezogene Anker die Kontaktspitze nicht mehr berührt.

Die Spule ist also abgeschaltet, der Anker fällt demzufolge wieder von der Spule ab und legt sich erneut an K an. Dadurch wird der Stromkreis wieder geschlossen, der Anker zieht erneut an, trennt dabei den Stromkreis auf — und so fort. Der am Anker sitzende Klöppel schlägt fortwährend gegen die Glocke.

Dieses Prinzip wird in älteren Büchern noch nach seinem Erfinder als Wagnerscher Hammer bezeichnet. Wir wollen uns aber gleich an die technisch exakte Bezeichnung Selbstunterbrecher gewöhnen. Der Name ergibt sich aus der Funktion: Die Anordnung unterbricht ihren Stromkreis selbsttätig. Sie stellt praktisch die Kombination eines Elektromagneten mit einem Schalter dar.

Den endgültigen Aufbau unserer Klingel für Batteriebetrieb zeigt Abb. 44. Sie enthält ferner eine Verbesserung: Der Eisenkern der Spule ist U-förmig gebogen, um die Kraftwirkung zu erhöhen. Mit einigen Eisenblechstreifen läßt sich diese Form leicht herstellen; sie entspricht der Form in Abb. 40. Die Spule wickeln wir mit lackiertem Kupferdraht (Kupferlackdraht, abgekürzt CuL) von etwa 0,3 bis 0,4 mm Durchmesser randvoll.

In Abb. 44 wird gleichzeitig der vollständige Stromlauf dargestellt und gezeigt, wie wir aus zwei Federblechstreifen (Messingblech oder Uhrfederstücke) einen Klingeltaster als Schalter selbst bauen können. (Ein Taster ist ein Schalter, der den Stromkreis nur schließt, solange man auf den Knopf drückt.)

Damit wir uns an die in der Technik übliche Symboldarstellung — Schaltzeichnung oder kurz Schaltung genannt — gewöhnen, ist in Abb. 45 die gleiche Anordnung noch einmal unter Benutzung der uns schon bekannten Symbole gezeichnet. M ist die Magnetspule, K der Ankerkontakt, B die Batterie und T der Taster. Die Schaltzeichnung sagt also nichts über die Lage der Teile und die Länge der Leitungen zwischen ihnen, sondern stellt die Symbole so dar, daß sich eine möglichst übersichtliche Zeichnung ergibt. Kontakte der

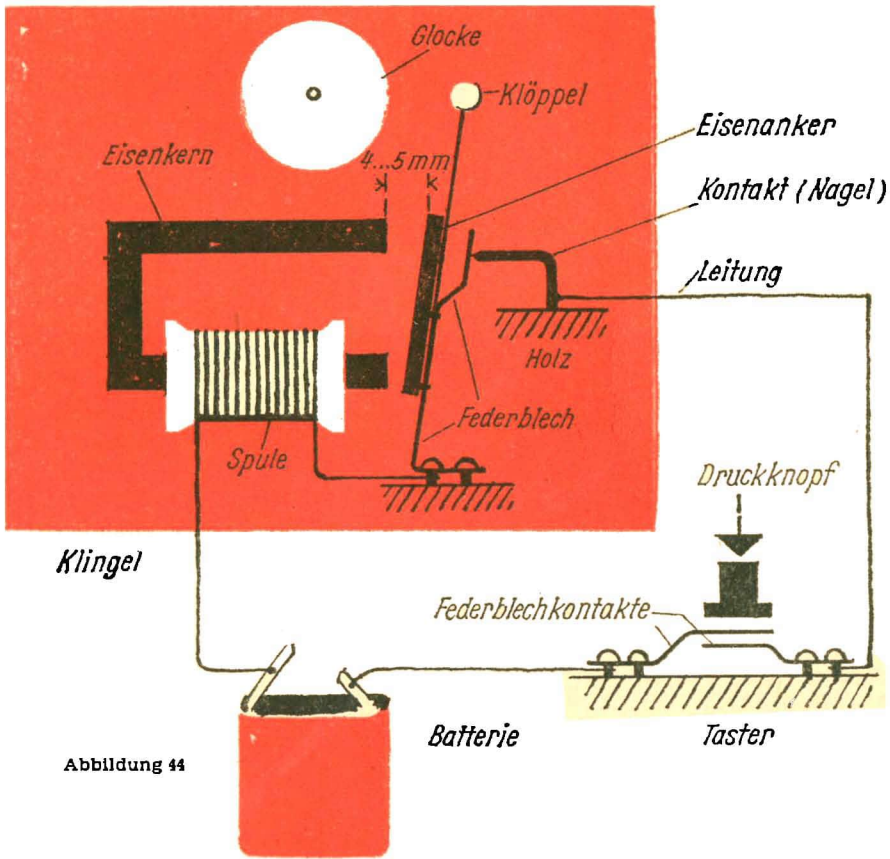


Abbildung 44

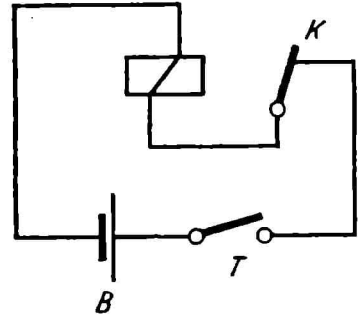


Abbildung 45

Art wie K in dieser Abbildung werden immer so gezeichnet, wie sie bei stromloser Spule stehen!
 Sehen wir uns jetzt einmal eine solche Klingel in einem Bastlerbedarfsladen an! Wenn wir die Haube abnehmen, erkennen wir genau den Aufbau von der Klingel der Abb. 44. Mitunter sitzt auf dem oberen Magnetkernschenkel noch eine zweite Spule, die mit der ersten in Serie geschaltet ist und die Magnetkraft noch verstärkt.

Eine „Klingel“ wollen wir aber im Bastlerladen nicht verlangen, sonst hält man uns dort für Laien. Der Fachmann nennt ein solches Gebilde einen Wecker. Das, was wir gebaut haben, ist ein Gleichstromwecker, denn unsere Batterie liefert Gleichstrom. Es gibt aber auch Wecker, bei denen der Unterbrecherkontakt K fehlt. An eine Batterie angeschlossen, machen sie genau wie unser erster Versuchsaufbau nur einmal „bim“. Sie sind für Wechselstrom bestimmt.

Über den Unterschied zwischen Gleich- und Wechselstrom erfahren wir bald noch näheres, vorläufig brauchen wir nur zu wissen, daß Wechselstrom ein pulsierender Strom ist, der seine Richtung ständig ändert. Also pulsiert auch das Magnetfeld der Spule, und deshalb wird der Anker rhythmisch angezogen, so daß eine besondere Selbstunterbrechung nicht nötig ist. Aber auch wenn die Selbstunterbrechung zusätzlich (bei einem Gleichstromwecker) vorhanden ist, klappt die Sache. Wir können unseren selbstgebauten Gleichstromwecker deshalb später auch mit Wechselstrom betreiben, hingegen einen Wechselstromwecker niemals mit Gleichstrom. Der Versuchsaufbau nach Abb. 42 stellt — wenn wir von der Batterie absehen — bereits einen Wechselstromwecker dar.

Das Relais — ein elektromagnetischer Schalter

Relais (das Wort kommt aus dem Französischen und wird „r'läh“ gesprochen) haben in der Elektrotechnik große Bedeutung.

Ein Relais besteht aus einem Elektromagneten, der einen Anker anzieht. Dieser Anker betätigt einen oder mehrere Schaltkontakte, die aber mit der Magnetspule nicht in Verbindung stehen. Eine Selbstunterbrechung erfolgt also dabei nicht. Man kann aber, wie wir gleich sehen werden, den Selbstunterbrecher als einen Spezialfall des Relais ansehen. Tatsächlich läßt sich grundsätzlich mit jedem Relais eine Selbstunterbrecherschaltung verwirklichen, wenn die Kontakte — so wie wir das beim Wecker gemacht haben — mit der Spule verbunden werden.

Relais sind zu Tausenden beispielsweise in den Fernsprechämtern vorhanden. Wenn wir eine Telefonwählscheibe drehen, betätigen wir damit zugleich in der Telefonzentrale über ein Dutzend Relais!

Eine andere Bauart von Relais — für Starkstromzwecke — ist das Schaltschütz. Dort betätigt der Magnet kräftige Starkstromkontakte, so daß mit einem relativ schwachen Spulenstrom über den Umweg der Relaiskontakte um ein Vielfaches stärkere Ströme geschaltet werden können.



Wir wollen uns mit dem Prinzip des Relais bekannt machen, denn ab und zu werden uns die Relais auch in der Rundfunktechnik begegnen. Unseren nach Abb. 44 selbstgebauten Wecker können wir leicht in ein Relaismodell umwandeln.

Abb. 46 zeigt die entsprechende Schaltung. Der praktische Aufbau ist uns vertraut, aber wir entfernen die Glocke, denn der Anker hat jetzt nur noch die Funktion eines Schaltebels. Kontakt 1 entspricht dem bereits vorhandenen Unterbrecherkontakt K aus den vorange-

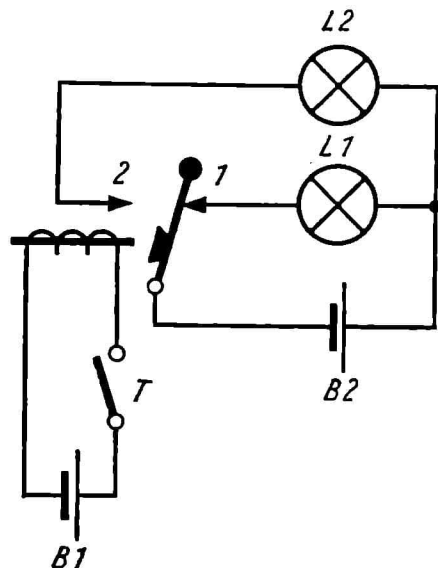
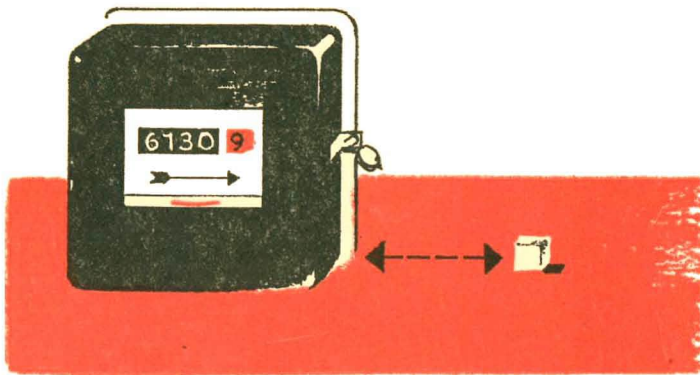


Abbildung 46



gangenen Abbildungen, er ist jetzt aber nicht mehr mit der Spule verbunden. Neu ist Kontakt 2, den wir auf der anderen Seite des Ankers so anordnen, daß ihn der Anker oder Klöppelstiel berührt, kurz bevor der Anker ganz am Spulenkern anliegt.

Wenn der Magnet stromlos ist, liegt der Anker also am Kontakt 1 an. Schalten wir mit T den Spulenstrom ein (ihn liefert nun die Batterie B 1), dann legt sich der Anker an Kontakt 1 an.

Wie wir sehen, ist jetzt ein zweiter Stromkreis vorhanden, der aus der Batterie B 2 und den Lampen L 1 und L 2 besteht. Ist T geöffnet, so ist Kontakt 1 geschlossen, und Lampe L 1 leuchtet. Schließen wir T, so wird Kontakt 1 geöffnet und 2 geschlossen. L 1 erlischt, und L 2 leuchtet auf. Da keine Selbstunterbrechung vorliegt, bleibt der Anker in dieser Stellung, bis wir T wieder öffnen.

Durch die Einschaltung des Steuerstromkreises (so genannt, weil wir mit ihm die Vorgänge im anderen Stromkreis steuern) haben wir eine Umschaltung zweier Lampen im anderen Stromkreis erreicht. Beide Stromkreise haben keinerlei Verbindung miteinander. Wir können also im Lampenstromkreis ganz andere Verhältnisse haben als im Steuerstromkreis. Beispielsweise läßt sich eine Relaispule so wickeln, daß bereits geringe Batteriespannungen oder geringe Spulenströme ausreichen, den Anker zu betätigen. Die Ankerkontakte können dann weit stärkere Ströme schalten.

Wenn beispielsweise die Lampen L 1 und L 2 sehr hohe Stromaufnahme haben und aus größerer Entfernung eingeschaltet werden sollen, könnte man den Lampenstrom nicht über längere Leitungen führen, da sie ebenfalls einen Widerstand haben und durch den an ihnen entstehenden Spannungsabfall den Strom zu sehr schwächen. Man setzt dann die Lampen an Ort und Stelle mit ihrer Stromquelle B 2 und dem Relais dicht zusammen und braucht für die Lampen-

leitungen nur noch kurze Verbindungen zu den Relaiskontakten. Das Relais wird dann aus größerer Entfernung über eine Leitung betätigt, die bedeutend höheren Widerstand haben darf (also dünner sein darf), denn die Relaispule benötigt ja nur einen recht geringen Steuerstrom. Dies als Anwendungsbeispiel.

An die Stelle der Lampen können auch andere Stromverbraucher, etwa Motoren oder weitere Relaispulen treten, wenn nur die Kontakte kräftig genug für die zu schaltenden Ströme gebaut sind. Man kann auch mehr als zwei Kontakte vorsehen.

Übliche Fernsprechrelais vermögen sechs und mehr Stromkreise gleichzeitig umzuschalten, mitunter haben sie auch mehrere getrennte Wicklungen auf dem Spulenkern, so daß sie von mehreren unabhängigen Steuerstromkreisen aus betätigt werden können. Das Prinzip des Relais ist stets das gleiche, seine Konstruktion dagegen sehr verschieden. Äußerlich hat beispielsweise ein Fernsprechrelais nicht die geringste Ähnlichkeit mit etwa einem Motor-Schalterschütz. Es gibt Motor-Schalterschütze, die größer sind als der Elektrizitätszähler in unserer Wohnung, und es gibt Miniaturrelais, die nicht größer sind als ein Stück Würfelzucker!

Abb. 47 zeigt, wie wir die Schaltung unseres Relaismodells aus Abb. 46 so abändern können, daß wir für beide Stromkreise mit der gleichen Batterie auskommen. Die Funktion ist gegenüber Abb. 46 unverändert; man muß bei derartigen Schaltungen nur daran den-

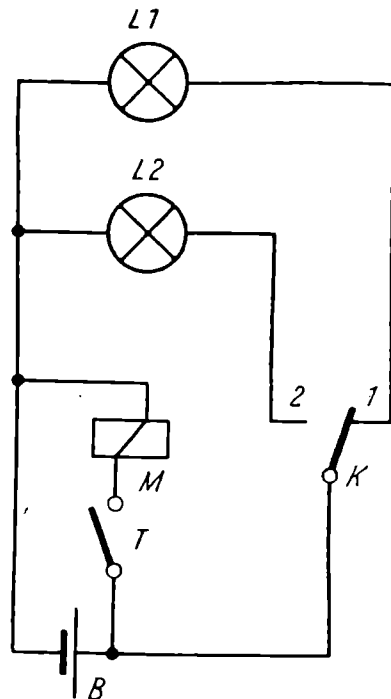


Abbildung 47

ken, daß die Lampen für die gleiche Spannung ausgelegt sein müssen wie die Relaispule, deren Spannung allerdings nicht so kritisch ist wie die der Lampen. Abb. 47 ist außerdem nach den vorschriftsmäßigen Schaltsymbolen gezeichnet. Beim Lesen solcher Schaltungen denken wir daran, daß Relaiskontakte stets so gezeichnet werden, wie sie der Schaltstellung bei stromloser Relaispule entsprechen.

Das Kompaßgalvanometer — ein Hilfsmittel für uns

Für vorangegangene Versuche hatten wir einen einfachen Schülerkompaß benutzt. Nähern wir dessen Magnetnadel einem Elektromagneten, so werden wir feststellen, daß die Nadel schon bei sehr geringen Stromstärken bzw. aus größerer Entfernung beeinflusst wird. Am stärksten würde sie dort beeinflusst werden, wo die magnetische Kraftliniendichte am größten ist: im Inneren der Magnetspule.

Auf diesem Wege können wir ein recht empfindliches Nachweisinstrument für schwache elektrische Ströme herstellen, das sich durch Änderung seiner Empfindlichkeit sogar in weiten Grenzen den jeweiligen Versuchsbedingungen anpassen läßt. Damit werden wir bei den nächsten Versuchen noch ohne kostspielige Meßinstrument auskommen.

Abb. 48 zeigt, wie wir dieses Gerät bauen. Die Spule wird direkt auf das Kompaßgehäuse gewickelt. Je mehr Windungen wir aufwickeln, desto geringere Ströme bewirken bereits eine deutliche Auslenkung der Nadel. Die Drahtstärke ist nicht kritisch, soll aber nicht zu gering sein, denn der Drahtwiderstand wird sonst schon so hoch, daß er sich bei manchen Versuchen störend bemerkbar machen könnte. Besonders für die später beschriebenen Induktionsversuche ist eine möglichst hohe Windungszahl günstig.

Mit etwas Geschick lassen sich durchaus 100 oder mehr Windungen auf dem Kompaß unterbringen. Wenn wir einen schmalen Pappstreifen unterlegen, können wir die ganze Spule mit Lack überstreichen und dann in einem Stück abziehen, so daß wir für den Kompaß sogar mehrere Wicklungen mit unterschiedlicher Windungszahl anfertigen können. Je nach den Versuchsbedingungen haben wir dann die Möglichkeit, die günstigste Windungszahl mit einem Griff auf den Kompaß aufzuschieben. Die Kompaßnadel können wir durch seitliches Vorbeiblicken an der Wicklung (die also nicht zu breit werden darf) noch gut sehen.

Im Gebrauch stellen wir den Kompaß stets so, daß die Nadel bei

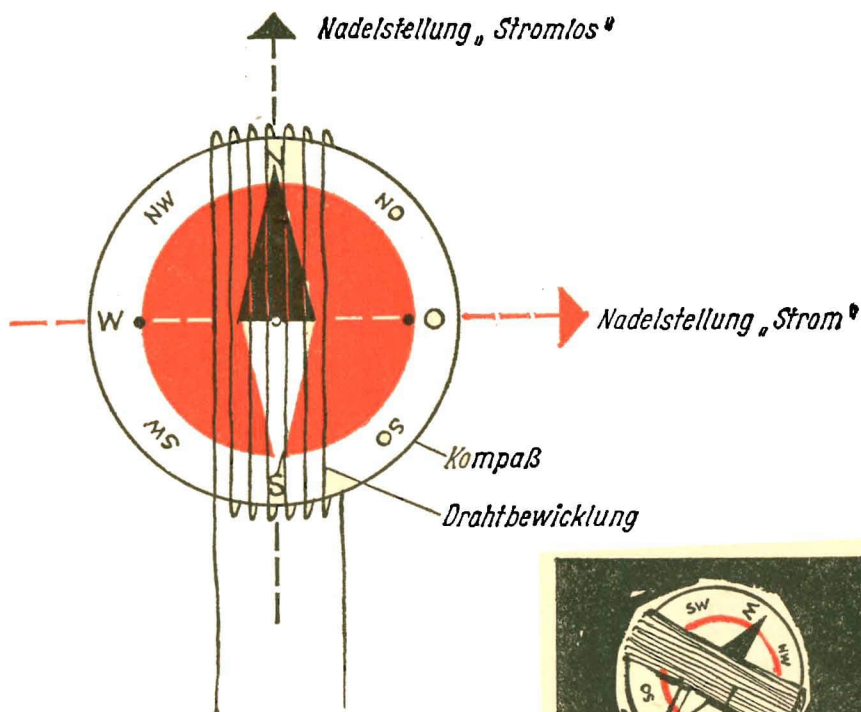
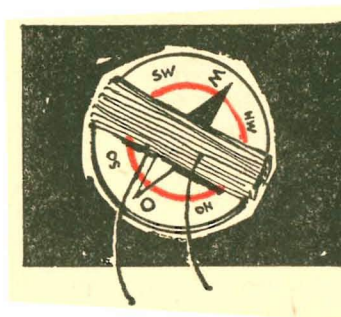


Abbildung 48



stromloser Spule parallel zur Wicklung steht, wie es Abb. 48 zeigt. Je nach Stromstärke in der Wicklung wird sie dann mehr oder weniger stark ausgelenkt, die Seite der Auslenkung läßt einen Rückschluß auf die Stromrichtung zu. Wenn wir diesem Zusammenhang einmal mit einer Batterie nachspüren und die Wicklungsenden farbig kennzeichnen (wobei wir gleich die vorschriftsmäßigen Farben benutzen: Blau für den Minuspol, Rot für den Pluspol), können wir auch bei unbekanntem Batterien jederzeit die Polarität feststellen.

Eigentlich hätten wir damit bereits ein Meßinstrument gebaut. Unter der Kompaßnadel könnten wir an Stelle der Windrose eine Zahlenskala anbringen, an der die Stromstärke in Ampere angeschrieben wird. Leider hätte das aber wenig Zweck, weil dieses Instrument zu ungenau wäre, besonders bei großen Ausschlägen der Nadel. Eine solche Eichung ist aber für unsere Zwecke auch nicht notwendig.

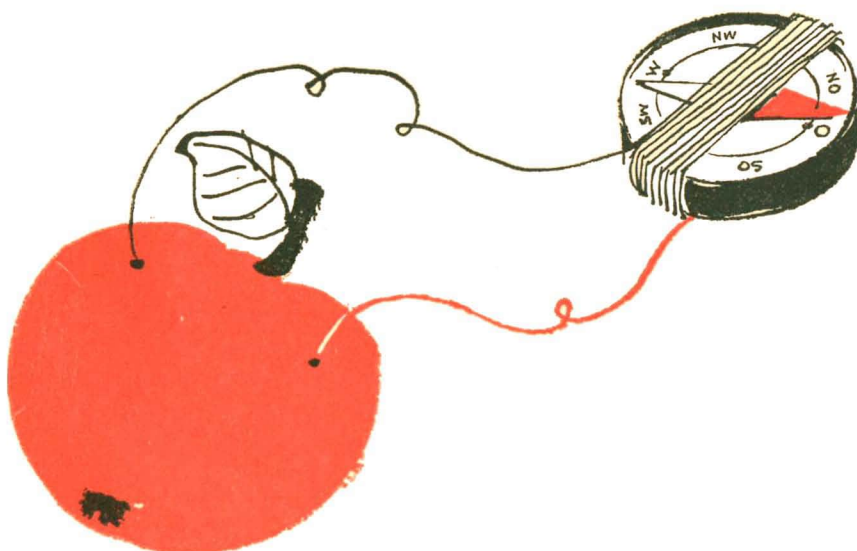
Mit ungefähr 100 Windungen wird unser Galvanometer bereits so empfindlich, daß die Nadel schon bei Strömen von wenigen Milli-

ampere (also wenigen $\frac{1}{1000}$ A) deutlich ausschlägt. Wir können damit besonders bei elektrochemischen Versuchen noch Ströme nachweisen, auf die unsere Lämpchen längst nicht mehr reagieren.

Versuchen wir einmal, einen Kupfer- und einen Eisendraht in eine Zitrone oder einen unreifen Apfel einzustecken! Kupfer und Eisen ergeben, wie wir bereits wissen, das Elektrodenpaar für ein chemisches Element. Der Elektrolyt unseres Elementes wird hier von der Fruchtsäure gebildet. Zwischen den beiden Drähten können wir also eine elektrische Spannung abnehmen. Sie ist so schwach, daß sie nicht für den Betrieb eines Lämpchens ausreicht und wird nur bei wenigen Zehntel Volt liegen. Der diesem Element entnehmbare Strom ist wegen des sehr hohen inneren Widerstandes ebenfalls sehr gering und beträgt höchstens etwa 1 bis 2 mA. Diese Werte ergeben aber an unserem Kompaßgalvanometer bereits einen deutlichen Nadelausschlag, wenn wir dessen Wicklung mit den beiden eingesteckenen Drahtelektroden verbinden!

Die Funktion des Kompaßgalvanometers wird uns sofort klar, wenn wir uns Abb. 35 noch einmal ansehen: Die Kompaßnadel ist bestrebt, sich längs der Kraftlinien einzustellen. Andererseits wird sie – wenn wir das Gerät richtig aufgestellt haben! – durch das Erdmagnetfeld quer dazu gestellt. Sie nimmt also (je nachdem, welches der beiden Magnetfelder überwiegt) eine Zwischenstellung ein.

Es gibt sehr empfindliche wissenschaftliche Instrumente, die ganz ähnlich funktionieren und noch weit geringere Ströme anzeigen können. Sie werden Galvanometer genannt, und wir können deshalb unser Hilfsinstrument durchaus als Kompaßgalvanometer bezeichnen.



Meßinstrumente

Wie funktionieren elektrische Meßinstrumente? Das zu wissen, ist für uns wichtig, denn in der Rundfunktechnik kommen wir ohne sie nicht aus. Wenn wir die Rundfunkbasterei erfolgreich betreiben wollen, werden wir uns schon bald ein Meßinstrument anschaffen müssen. Wir müssen dann auch wissen, wie es arbeitet, um es richtig einsetzen zu können.

Für uns sind dabei vorläufig nur zwei Instrumentenarten von Interesse, die auf dem magnetischen Prinzip beruhen.

Das Weicheiseninstrument

Wir nehmen noch einmal unseren Garnrollenmagneten ohne Eisenkern zur Hand, legen jetzt aber in die Bohrung der Garnrolle zwei Eisendrähte lose ein und schließen die Spule dann — waagrecht gehalten — an die Batterie an. Dabei bemerken wir, daß die beiden Drähte deutlich ein Stück auseinanderrücken. Wie kommt das?

Sehen wir uns Abb. 49 an. Wir wollen annehmen, daß am linken Spulenende der magnetische Nordpol, am rechten der Südpol zustande kommt. Die beiden Eisendrähte wirken dann als Kern und werden im gleichen Sinne magnetisiert. Solange Strom fließt, können wir sie daher als Stabmagnete ansehen. Beide haben links ihren Nord-, rechts ihren Südpol.

Wir wissen aber, daß sich gleichnamige Magnetpole abstoßen! Dies ist der Grund, weshalb die Drähte auseinanderrücken. Sind sie aus Weicheisen, so verschwindet ihr Magnetismus beim Abschalten des Stromes wieder, und durch ihr Gewicht rollen sie in der zylinderförmigen Bohrung der Garnrolle wieder zusammen.

Nach diesem Prinzip sind die Weicheisenmeßgeräte aufgebaut. Sie haben eine flache Spule mit ziemlich großer Mittelöffnung (Abb. 50), in der ein Eisenblechstreifen (der rechte in der Abbildung) fest angebracht ist, der andere (linke) Streifen ist mit seiner Kante schwenkbar an einer Mittelachse befestigt, die drehbar durch die Spulenmitte führt. An dieser Achse ist auch der Skalenanzeiger befestigt.

Wenn wir mit Abb. 49 vergleichen, müssen wir von der Seite auf die Spule sehen und uns vorstellen, daß wir einen der Eisendrähte dort festhalten, so daß nur der andere ausweichen kann. Schicken wir jetzt einen Strom durch die Spule von der Abb. 50, so wird der linke Streifen nach links weggedrängt — der rechte sitzt ja fest. Der linke Streifen schwenkt um die Achse, dreht diese und damit auch den Zeiger; wie weit, das hängt von der Magnetkraft und damit vom

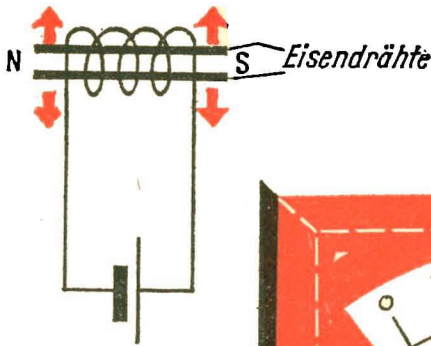


Abbildung 49

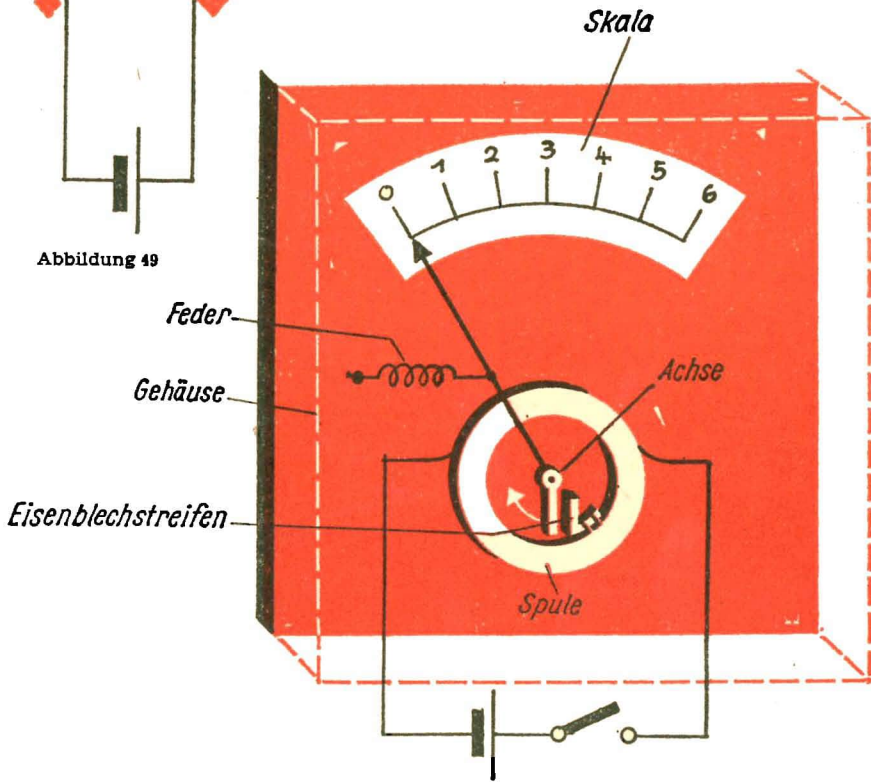


Abbildung 50

durchfließenden Strom ab, denn der Zeiger spannt, je weiter er auslenkt, die Rückstellfeder an. Sie zieht den Zeiger nach Abschalten des Stromes auch wieder in die Nullstellung zurück. An der Skala kann daher die Stromstärke direkt in Ampere angeschrieben werden.

Diese Geräte, deren Name sich aus ihren wesentlichen Teilen – den Weicheisenstreifen – erklärt, sind recht robust, aber nur für verhältnismäßig starke Ströme ab etwa 1 A geeignet. Bei schwachen Strömen ist die Abstoßung zwischen den Blechstreifen zu gering.

Für die Anzeige ist es bei den Weicheiseninstrumenten gleichgültig, in welcher Richtung der Strom die Spule durchfließt. Das ergibt sich auch aus Abb. 49: Kehren wir dort die Stromrichtung um, so haben beide Eisendrähte rechts ihren Nordpol, links den Südpol. Auch dann stehen sich also gleiche Pole gegenüber, und die Abstoßung erfolgt in derselben Weise.

Das Drehspulinstrument

Die empfindlichsten Meßgeräte für unsere Zwecke werden nach dem Prinzip der Drehspule gebaut; sie sind in der Rundfunktechnik bei weitem die wichtigsten.

Sehen wir uns Abb. 51 an! Zwischen den beiden Polen eines Permanentmagneten (wie wir ihn in Abb. 6 schon kennenlernten) ist eine Spule um ihre Querachse drehbar angeordnet. Wir schicken einen Strom durch sie, und zwar in der Richtung, daß sich oben an der Spule der Südpol, unten der Nordpol bildet. Da sich ungleichnamige Pole anziehen, wird das obere Spulenende zum rechten Pol des Permanentmagneten, das untere zum linken Pol gezogen – die Spule dreht sich im Uhrzeigersinn.

Abb. 52 zeigt uns, wie ein Drehspulinstrument praktisch aufgebaut ist. Der Permanentmagnet hat Ringform, und die Spule ist auf ein

Abbildung 51

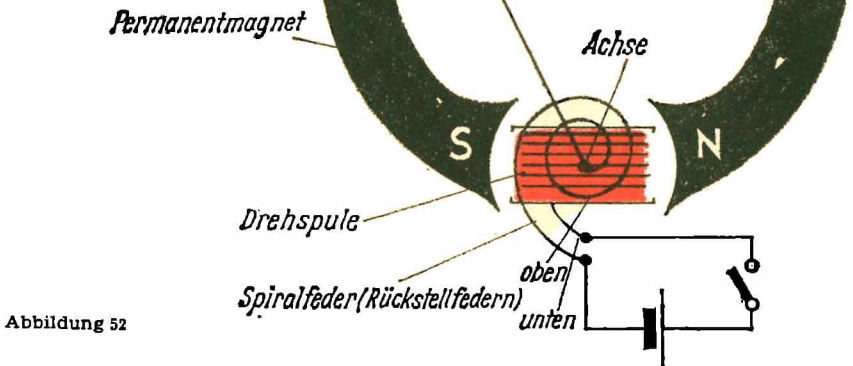
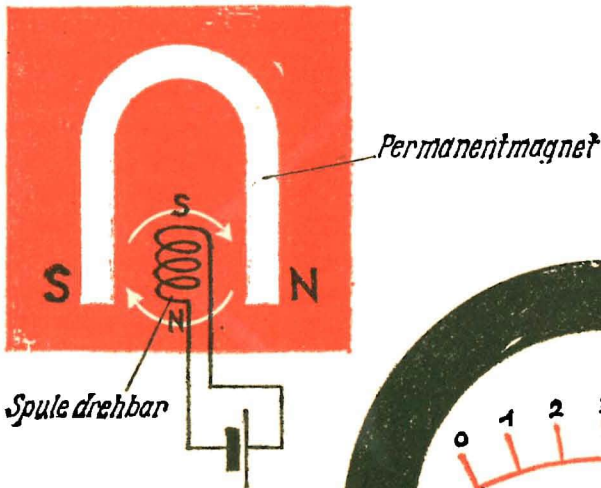


Abbildung 52

flaches, auf einer Achse drehbar angeordnetes Rähmchen gewickelt. Im übrigen entspricht die Funktion dem bei der Abb. 51 Gesagten: An der Achse ist wiederum der Zeiger befestigt, der von der Spulendrehung mitgenommen wird. Die Stromzuführung zur Drehspule erfolgt aber hier über zwei kleine Spiralfedern, die ähnlich wie die Unruhfeder in einer Uhr aussehen. Diese Federn wirken gleichzeitig als Rückstellfedern, um den Zeiger bei stromloser Spule wieder in Nullstellung zu bringen. In Abb. 52 ist nur die obere dieser beiden Federn eingezeichnet.

Beim Drehspulinstrument muß die Stromrichtung beachtet werden. Kehren wir bei Abb. 51 die Stromrichtung um, so entsteht der Südpol der Spule unten, der Nordpol oben. Die Spule würde sich also nach links drehen! Deshalb ist bei Drehspulinstrumenten stets an den Anschlüssen die Polarität mit + und – angegeben.

Drehspulinstrumente lassen sich so empfindlich bauen, daß der Zeiger schon bei Strömen von $50 \mu\text{A}$ ($=0,000\,05 \text{ A}$!) bis zum Skalenende ausgelenkt wird. Solche Instrumente haben dann auf der Drehspule mehrere tausend Windungen mit Drahtstärken, die dünner sind als ein Menschenhaar. Die Achse ist wie bei hochwertigen Uhren in Edelsteinen gelagert, Drehspule und Zeiger sind sehr leicht, und die Rückstellfedern haben nur ganz schwache Kraft. Als Permanentmagneten werden Speziallegierungen benutzt, die ein besonders kräftiges Magnetfeld erzeugen.

Solche Instrumente sind natürlich nicht billig und gegen Überlastungen (zu starke Ströme) sehr empfindlich. Bei zu starkem Strom schlägt der Zeiger leicht so heftig aus, daß er abbricht oder die Achse verbiegt – oder der dünne Draht der Drehspule brennt gar durch. Beim Umgang mit den empfindlichen Drehspulinstrumenten ist daher Sorgfalt nötig.

Voltmeter und Amperemeter

Worin besteht der Unterschied zwischen Voltmeter und Amperemeter? Einen grundsätzlichen Unterschied gibt es nicht, so merkwürdig das klingt.

Wir haben bisher immer nur in dem Sinne von der Strommessung gesprochen, daß wir durch die Spule des Meßinstrumentes einen Strom schickten, von dessen Stärke der Zeigerausschlag abhing. Der Strom wird also zum Messen durch die Spule geleitet. Das ist eine wichtige Bedingung: Wenn wir das Amperemeter zur Strommessung zusätzlich in einen Stromkreis einschalten (vergleiche Abb. 19 und 20), so muß der Widerstand der Spule sehr gering sein, besonders dann, wenn ein starker Strom fließt. Sonst wird der Strom

geschwächt! Der Widerstand der Spule würde beispielsweise in Abb. 19 in Reihe mit der Lampe liegen, und wenn er nicht bedeutend geringer als der Lampenwiderstand ist, so wirkt er für die Lampe wie ein Vorwiderstand! So etwas darf nicht passieren, denn wir würden einen falschen Stromwert messen!

Amperemeter müssen also einen recht geringen Widerstand haben. Je geringer er ist, desto besser, denn desto weniger macht sich die Einschaltung des Amperemeters in den Stromkreis bemerkbar und desto genauer wird das Meßergebnis.

Und die Spannungsmessung? Sehen wir uns in Abb. 17 erst noch einmal an, wie ein Voltmeter angeschlossen wird. Die Spule unseres Instrumentes versehen wir jetzt mit vielen Windungen aus dünnem Draht, sie erhält also einen recht hohen Widerstand. Dieser Widerstand bleibt stets gleich, und es wird jetzt nur noch von der Spannung, die wir an die Spule anlegen, abhängen, wie stark der durch das Instrument fließende Strom ist. (Ohmsches Gesetz)

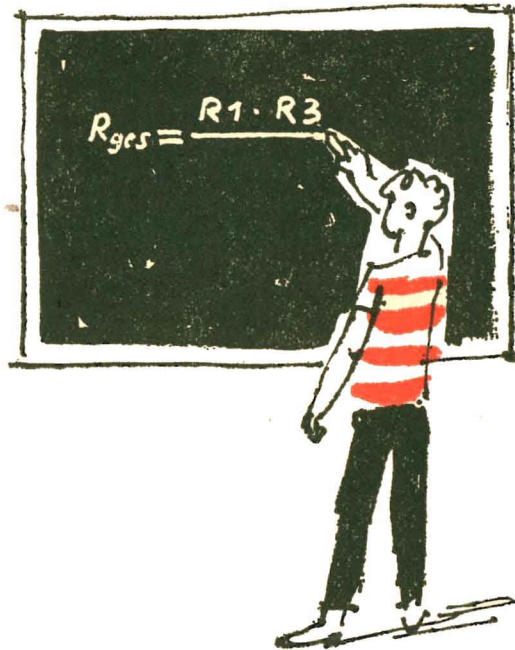
Je höher die angelegte Spannung ist, desto höher ist der Spulenstrom, desto weiter wird der Zeiger ausgelenkt. Also können wir an die Skala gleich den Spannungswert in Volt anschreiben! Wir lesen dann an der Skala eine Spannung ab, obwohl wir eigentlich eine Strommessung vornehmen: Die Messung des Stromes durch die Spule des Instruments!

Das zu wissen, ist für uns sehr wichtig. Das Voltmeter verbraucht einen zwar kleinen, aber doch merklichen Eigenstrom!

Auf Abb. 17 ist dieser Nachteil schon zu erkennen, denn dieser Eigenstrom wird ja der Batterie zusätzlich entnommen. Infolgedessen sind jene Voltmeter die hochwertigsten, die den geringsten Eigenstrom verbrauchen, also deren Spule einen möglichst hohen Innenwiderstand hat.

Den Innenwiderstand kann man nicht beliebig hoch wählen, ebenso wie man den Draht der Spule nicht beliebig dünn halten kann, auch paßt nicht beliebig viel Draht auf die Spule. Wie hilft man sich, besonders wenn das Voltmeter für höhere Spannungen geeignet sein soll?

Wer die vorangegangenen Kapitel aufmerksam gelesen hat, wird jetzt an Abb. 22 denken und damit schon die Lösung gefunden haben. Wir müssen dasselbe tun, was wir nach Abb. 22 mit der Lampe getan haben: Wir schalten dem Voltmeter einen Widerstand vor. Meist ist er gleich mit im Voltmeter eingebaut; die eigentliche Spule bekommt dann entsprechend geringere Spannung. Hier gelten dieselben Verhältnisse wie bei dem Beispiel der Lampe mit Vorwiderstand. An die Stelle der Lampe in Abb. 22 tritt nur die Spule des Instrumentes.



Wie bedeutsam ein geringer Eigenstromverbrauch des Voltmeters sein kann, erkennen wir an der Abb. 18. Für die Voltmeter 2 und 3 wäre das nicht so kritisch, deren Eigenstrom bedeutet lediglich eine zusätzliche Belastung der Batterien. Wie steht es aber mit Voltmeter 1? Sowohl die Lampen L 1 und L 2 als auch die Spule des Voltmeters 1 können wir als Widerstände betrachten. Dann erkennen wir aber deutlich, daß L 1, L 2 und Voltmeter 1 zusammen einen Spannungsteiler bilden!

Vergleichen wir die Verhältnisse einmal mit Abb. 23 und 24 und lesen dort noch einmal nach! Wenn wir Abb. 18 mit Abb. 24 vergleichen, würde R 2 der Lampe L 1 entsprechen, R 1 der Lampe L 2, und das Voltmeter 1 wäre der Widerstand R 3. Nanu? Wenn wir R 3 parallel zu R 1 schalten, geht doch an R 1 die Spannung zurück?! Also würde unser Voltmeter gar nicht die Spannung zeigen, die an R 1 (oder Lampe L 2) steht, wenn das Voltmeter nicht mehr angeschlossen ist?!

Tatsächlich, so ist es. Durch den Eigenstromverbrauch des Voltmeters geht die Spannung am Meßpunkt zurück. Wie weit — das hängt von der Höhe des Innenwiderstandes des Voltmeters ab. Je geringer er ist — je geringer also R 3 in Abb. 24 ist —, um so mehr geht die Spannung bei der Messung zurück, um so ungenauer wird also das Meßergebnis!

Bei einem hohen Widerstand des Voltmeters ist der Spannungsrückgang nur gering, so gering, daß er nicht ins Gewicht fällt. Wir erkennen das, wenn wir das Beispiel nach Abb. 24 noch einmal durchrechnen und für R_3 – den Innenwiderstand des Voltmeters – den hundert- oder zweihundertfachen Wert von R_1 annehmen. Nach Abb. 25 ist dann R_{ges} nicht wesentlich niedriger als R_1 allein, und damit ändern sich auch die Spannungsverhältnisse nicht wesentlich. Aber leider läßt sich eben R_3 im Falle des Voltmeters nicht beliebig hoch machen. Wenn etwa die Widerstände R_1 und R_2 in der zu messenden Schaltung schon sehr hohe Werte haben, macht sich die Parallelschaltung von R_1 und R_3 doch schon in einem beträchtlichen Spannungsrückgang bemerkbar. Das Voltmeter zeigt dann nicht die tatsächlich an R_1 (ohne das Voltmeter) vorhandene Spannung an, sondern einen zu niedrigen Wert. Das gleiche kann schon bei den einfachen Schaltungen mit den Lampen der Fall sein, wenn wir ein relativ unempfindliches Voltmeter verwenden, das einen hohen Spulenstrom braucht und demzufolge einen niedrigen Innenwiderstand hat!

Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist wichtig! Wenn wir später Spannungsmessungen in Rundfunkgeräten durchführen, kommt es oft vor, daß Spannungen an hohen Widerständen gemessen werden müssen. Man muß dann den Eigenstromverbrauch seines Voltmeters – oder, was auf das gleiche hinauskommt, den Innenwiderstand – kennen, um den entstehenden Meßfehler abschätzen zu können.

Nun werden wir auch verstehen, warum empfindliche Drehspulinstrumente nicht nur zur Messung geringster Ströme, sondern vor allem gerade zur genauen Messungen von Spannungen auch an hochohmigen Meßpunkten erforderlich sind, denn geringer Eigenstrom des Voltmeters ist ja gleichbedeutend mit hohem Innenwiderstand. Einen hochohmigen Meßpunkt hätten wir in Abb. 24, wenn R_1 und vor allem R_2 sehr hohe Werte (einige $k\Omega$ oder $M\Omega$) hatten. Bei solchen Messungen sagt der Fachmann übrigens, wenn die Spannung durch die zusätzliche Belastung des Voltmeters an R_1 zurückgeht: Die Spannung bricht zusammen.

Diesen Ausdruck wollen wir uns merken, weil er in der technischen Literatur häufig benutzt wird.

Es gibt in Rundfunkgeräten tatsächlich Meßpunkte, an denen ohne Meßinstrument 100 V und mehr vorhanden sind, ein angeschlossenes Voltmeter aber wegen der Hochohmigkeit des Meßpunktes je nach seinem Innenwiderstand nur ganz wenige Volt anzeigt! Leicht kann man dann glauben, man habe einen Fehler im Gerät gefunden, obwohl alles in Ordnung ist! Um derartige Spannungen an sehr

hochohmigen Punkten zu messen, benutzt man Spezialinstrumente (z. B. sogenannte Röhrenvoltmeter), die einen Innenwiderstand von vielen Millionen Ohm haben. Sie sind aber zu kompliziert, als daß sie für uns vorläufig in Frage kämen; außerdem sind sie sehr teuer.

Die Induktion

Mit den magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes haben wir uns nun schon mehrfach beschäftigt und dabei festgestellt, daß ein stromdurchflossener Leiter ein Magnetfeld um sich aufbaut. Nun wollen wir versuchen, ob sich dieser Vorgang umkehren läßt, ob es also möglich ist, durch Einwirkung eines Magnetfeldes auf einen Leiter elektrischen Strom zu erzeugen.

Magnetische Induktion

Um die magnetische Induktion nachzuweisen, benötigen wir einen möglichst kräftigen Permanentmagneten (entweder einen Hufeisenmagneten, wie er zu Spielzeugzwecken benutzt wird, oder einen alten hufeisenförmigen Lautsprechermagneten).

Der bei diesem Versuch entstehende Strom ist nicht sehr stark, deshalb wickeln wir den Leiter, den wir beeinflussen wollen, zu einer Spule auf, oder wir benutzen die mit Draht bewickelte Garnrolle aus den früheren Versuchen.

Als Nachweismittel für den Strom verwenden wir unser Kompaßgalvanometer.

Die Garnrollenspule erhält zur weiteren Verstärkung der Magnetwirkung einen Weicheisenkern, den wir — falls ein Hufeisenmagnet verwendet wird — wieder U-förmig gestalten (wie beim selbstgebauten Wecker). Abb. 53 zeigt die Versuchsanordnung.

Der U-förmige Eisenkern bietet den Vorteil, daß sich beide Magnetpole in direkten Kontakt zum Kern bringen lassen und wir damit keine Schwächung des Magnetfeldes durch die Luft in Kauf nehmen müssen.

Der Versuch gelingt am besten, wenn das Kompaßgalvanometer etwa so viele Windungen hat wie die Spule. Da die Windungszahl möglichst hoch sein soll, müssen wir viele Windungen mit Geschick auf dem Kompaß unterbringen. Der Kompaß muß dann von der Spule so weit entfernt stehen, daß er von ihr nicht magnetisch beeinflusst wird, also wenigstens 1 m weit ab (Verbindungsdrähte lang genug lassen!).

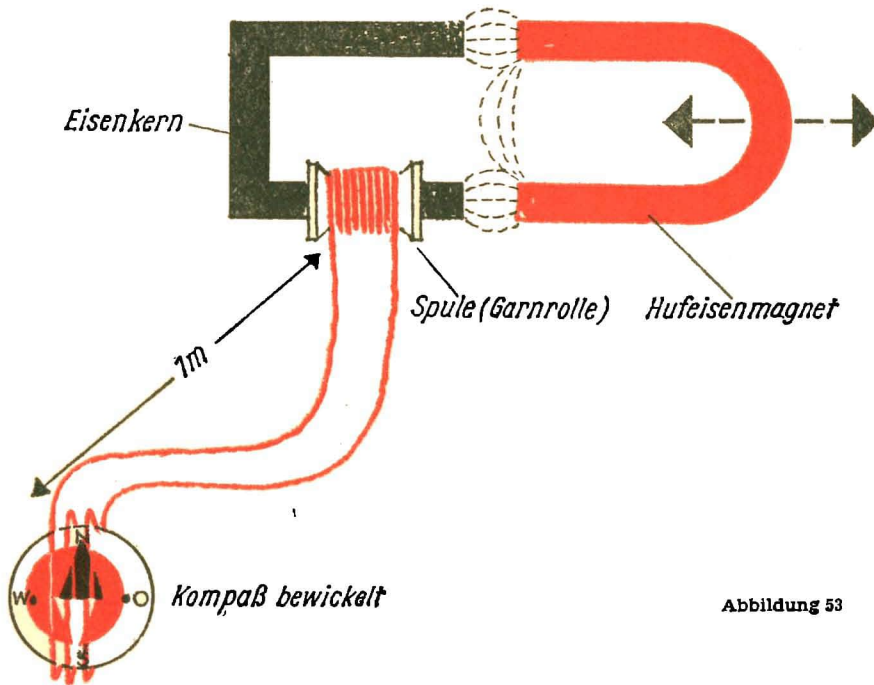


Abbildung 53

Wir setzen den Magneten nun abwechselnd schnell auf die Spule auf und reißen ihn plötzlich wieder weg.

Solange der Magnet ruht, wird kein Strom erzeugt, wobei es keine Rolle spielt, ob das Magnetfeld vorhanden ist oder nicht und wie stark es ist. Wird das Magnetfeld aber stärker (bei Annäherung des Magneten) oder schwächer (beim Wegnehmen des Magneten), so entsteht ein Stromstoß, wie wir am kurzen Ausschlagen der Magnetnadel im Kompaß erkennen.

Die Richtung des Stromstoßes ist davon abhängig, in welcher Richtung (stärker oder schwächer) sich das Magnetfeld ändert. Die Stromstärke oder die Höhe der in der Spule induzierten Spannung hängt unter anderem von der Schnelligkeit der Feldänderung ab. Eine andere Erscheinung läßt sich mit unseren einfachen Mitteln schlecht sichtbar machen, ist aber begreiflich: Der Stromstoß hält an, solange sich das Magnetfeld ändert bzw. der Magnet bewegt.

Wir können uns die Spule als eine große Zahl von in Serie geschalteten einzelnen Leitern (nämlich den Windungen) vorstellen. Die in den einzelnen Windungen induzierten Spannungen addieren sich durch diese Serienschaltung, ähnlich, wie wir das bereits von den Batterien her kennen. Wenn wir von der Spule eine Anzahl Windungen abwickeln, ist der induzierte Stromstoß merklich schwächer.

Grundsätzlich wäre es auch möglich, einen einfachen geraden Leiter in einem Magnetfeld zu bewegen. Aber dieser Versuch läßt sich von uns nicht ausführen, weil der dabei induzierte Stromstoß so schwach ist, daß wir ihn mit unseren Mitteln nicht nachweisen können.

Wir erkennen: Die Richtung des induzierten Stromstoßes – oder genauer gesagt, die Polarität der induzierten Spannung – hängt davon ab, in welchem Sinne sich das Magnetfeld ändert. Daß sie auch von der magnetischen Polarität abhängt, läßt sich ebenfalls leicht zeigen: Wir brauchen dazu in Abb. 53 nur den Nord- und Südpol des Magneten zu vertauschen. Die Spule wird dann im umgekehrten Sinne von den Kraftlinien durchflossen, und die Ausschlagsrichtung der Kompaßnadel ist genau umgekehrt wie beim ersten Versuch.

Wir können auch leicht zeigen, daß die Höhe der induzierten Spannung außerdem noch von der Stärke des Magnetfeldes abhängt. Die Versuche brauchen nur mit einem schwächeren Magneten wiederholt zu werden. Er ergibt, wie erwartet, schwächere Stromstöße.

Elektromagnetische Induktion

Da ein Elektromagnet die gleichen Eigenschaften hat wie ein Permanentmagnet, ist anzunehmen, daß diese Versuche auch mit einem Elektromagneten gelingen. Abb. 54 zeigt die entsprechende Versuchsanordnung; wieder in der uns nun schon geläufigen schematischen Darstellung.

Wir müssen uns jetzt noch einen zweiten Garnrollen-Elektromagneten wickeln und ihn, wie den schon vorhandenen, mit einem Weicheisenkern versehen. Die linke Spule mit dem Kompaßgalvanometer entspricht der bisherigen Versuchsanordnung; an die Stelle des Permanentmagneten in Abb. 53 tritt jetzt die zweite Spule mit Schalter und Batterie. Der Schalter wird geschlossen, dadurch stellt die rechte Spule einen Elektromagneten dar.

Nun wiederholen wir alle Versuche des vorangegangenen Abschnitts. Wir erhalten die gleichen Ergebnisse. Zwischen dem Elektromagneten und Permanentmagneten besteht also kein grundsätzlicher Unterschied.

Den Einfluß verschieden starker Magnetfelder können wir hier untersuchen, indem wir den Elektromagneten (rechte Spule) einmal mit schwächerem Strom, dann mit stärkerem Strom betreiben. Wir benutzen zu diesem Zweck einmal eine Batterie mit 1,5 V oder 2 V Spannung (Monozelle oder Trockenakku), zum anderen eine 4,5-V-Taschenlampenbatterie.

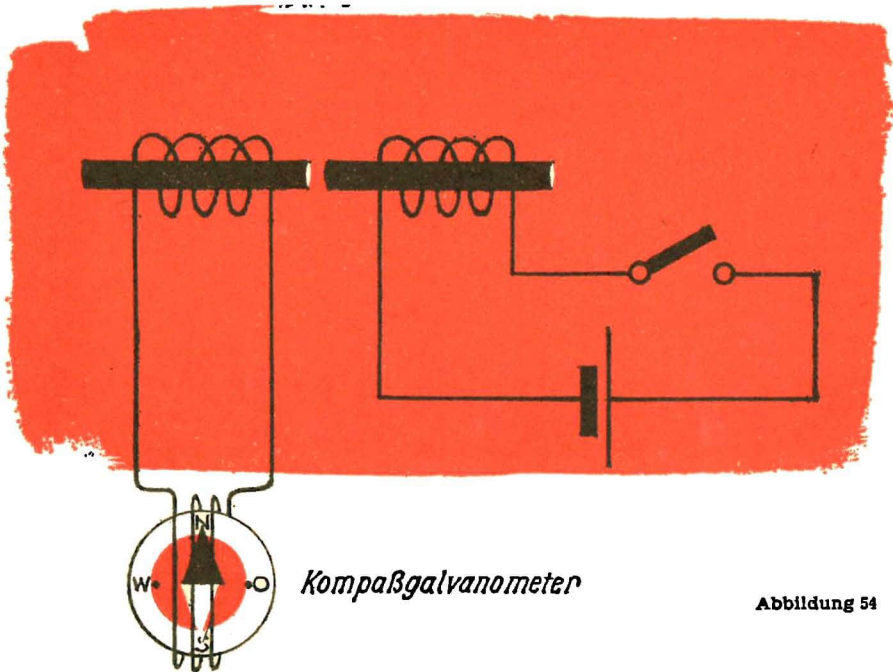


Abbildung 54

Das Annähern und Entfernen des Magneten hatte nur den Zweck, das Magnetfeld zu verändern. Jetzt ergibt sich noch eine bessere Möglichkeit: Wir lassen beide Spulen eng aneinandergesetzt und schalten dafür mit dem Schalter den Strom aus und ein. Da die Veränderung des Magnetfeldes unseres Elektromagneten nun besonders schnell vor sich geht, können wir jetzt besonders kräftige Kompaßausschläge beobachten. Die Nadel schlägt beim Einschalten nach der einen, beim Ausschalten nach der anderen Seite aus.

Mit dieser Versuchsanordnung haben wir Elektrizität in Magnetismus, diesen gleich wieder in Elektrizität umgewandelt. Damit ist auch die Umkehrbarkeit beider Vorgänge bewiesen. Da zum Bewegen der Magnetnadel eine – wenn auch kleine – mechanische Kraft erforderlich ist, läßt sich eine Kraft also über den Umweg des Magnetismus übertragen.

Selbstinduktion

Wir stellten fest: Wenn sich ein elektrischer Leiter in einem veränderlichen Magnetfeld befindet, wird in ihm eine elektrische Spannung induziert. In Abb. 54 befindet sich nicht nur die linke Spule unter dem Einfluß des Magnetfeldes, sondern ebenso auch die rechte

Spule, die dieses Magnetfeld erst erzeugt. Wir können uns leicht vorstellen, daß das von dieser Spule erzeugte Magnetfeld auch auf die eigenen Spulenwindungen einwirkt und dort zusätzlich zu dem von der Batterie gelieferten Strom eine Induktion ergibt. Dieser Vorgang heißt Selbstinduktion.

Der Nachweis der Selbstinduktion ist mit unseren Mitteln nur indirekt möglich. Wir verzichten dabei auf die linke Spule unserer Anordnung nach Abb. 54 und den Kompaß. Für die rechte Spule wird eine möglichst hohe Windungszahl (etwa 1000 Windungen) gebraucht, was beim Selbstbau genügend dünnen Draht sowie etwas Sorgfalt beim Wickeln verlangt. Dabei muß besonders darauf geachtet werden, daß kein Windungsschluß entsteht, also daß der Draht nicht irgendwo blanke Stellen hat, über die es zum Kurzschluß einzelner Windungen kommen könnte.

Besser geeignet ist eine normale kleine Radio-Netzdrösselspule. Sie stellt eine Spule hoher Windungszahl dar und hat zugleich den kräftigen, geschlossenen Eisenkern, der für diesen Versuch günstig ist. Es kommt jetzt nämlich darauf an, das Magnetfeld so wenig wie möglich zu schwächen. Der Kraftlinieneinfluß soll möglichst auf dem ganzen Weg durch das Eisen verlaufen.

Um den Effekt zu verstärken, benutzen wir eine möglichst hohe Batteriespannung (10 ... 20 V); wir schalten also mehrere Batterien in Serie.

Wenn die Spule an die Batterie geschaltet wird, halten wir den angefeuchteten Finger gleichzeitig auf beide Spulenanschlüsse und schalten dann die Spule wieder ab. Im Moment des Abschaltens wird ein kleiner elektrischer Spannungsstoß deutlich im Finger zu bemerken sein.

Was ist aber beim Einschalten und Ausschalten der Spule geschehen?

Die Selbstinduktionswirkung auf die eigene Wicklung des Elektromagneten besteht tatsächlich. Sie ist um so stärker, je mehr Windungen die Spule hat und je stärker das Magnetfeld ist.

Beim Einschalten der Spule wird eine Spannung mit einer Polarität induziert, die – und das müssen wir uns merken – stets der Polarität der Batteriespannung entgegengesetzt ist. Also wirkt sie der Batteriespannung entgegen; aus diesem Grunde kann der Spulenstrom beim Einschalten nicht sofort den Höchstwert erreichen, der durch den Ohmschen Widerstand der Spule bestimmt wird. Der Strom muß die Induktionsspannung allmählich überwinden, steigt also langsam an. Daher wird auch das Magnetfeld allmählich stärker, was wieder eine dauernde Induktionswirkung zur Folge hat. Erst wenn der Strom durch die Spule seinen Höchstwert entsprechend dem

Spulenwiderstand erreicht hat, bleibt er konstant, und die Selbstinduktion hört auf.

Beim Abschalten der Spule geschieht das Gegenteil. Das Magnetfeld bricht zusammen, es wird also schwächer, und damit tritt wieder eine Selbstinduktion auf, diesmal aber in umgekehrter Richtung. Denn das Magnetfeld ändert sich jetzt ebenfalls im umgekehrten Sinne! Die Selbstinduktionsspannung beim Abschalten ist daher der Batteriespannung gleichgepolt, sie liegt gewissermaßen mit ihr in Serie. Aber der Unterschied gegenüber dem Einschaltvorgang: Da der Schalter zu diesem Zeitpunkt bereits geöffnet ist, kann jetzt kein Strom mehr fließen.

Das zusammenbrechende Magnetfeld, in dem ja eine bestimmte Energiemenge gespeichert ist, bewirkt ein Ansteigen der Selbstinduktionsspannung auf sehr hohe Beträge. Sie können weit über der Batteriespannung liegen. Bei unserem Versuch ist keine zweite Spule mehr vorhanden, die die Energie des zusammenbrechenden Magnetfeldes aufnehmen und weiterleiten könnte, wie z. B. in Abb. 54 zum Kompaßgalvanometer. Also kann diese Energie nirgends mehr einen Strom bewirken; doch andererseits verschwindet Energie nicht spurlos. Es kommt deshalb zu der sehr hohen Abschaltinduktionsspannung, die wir mit unserem Finger deutlich gespürt haben.

Wenn wir den Schalterkontakt langsam genug öffnen, können wir auch dort ein deutliches Fünkchen beobachten. Die Abschaltspannung bahnt sich einen Weg in Form eines Funkenüberschlages zwischen den – im ersten Abschaltmoment nur wenige Zehntel Millimeter auseinanderstehenden – Kontakten.

Die Abschaltfunken treten immer dann auf, wenn eine Spule – oder, wie das wichtige Fachwort dafür lautet: Induktivität – abgeschaltet wird. Die Beseitigung dieser kontaktzerstörenden Funkenbildung macht den Technikern oft große Sorgen.

Wir wissen, daß der Spulenstrom beim Einschalten der Spule „langsam“ ansteigt. Die Schnelligkeit des Stromanstiegs hängt von der Größe der Selbstinduktion (also von Windungszahl und Spulenaufbau) ab. Je nach der Spule erreicht der Strom seinen vollen Wert in spätestens $\frac{1}{10}$ s, bei kleineren Windungszahlen schon in $\frac{1}{10000}$ s oder noch weniger! Deshalb können wir hierzu keinen Versuch durchführen.

Der Begriff Induktivität wird außer für die Spule selbst auch für die Größe der Selbstinduktion benutzt. Man kann also sagen: Die Induktivität einer Spule ist um so größer, je größer ihre Windungszahl ist. Mit geringer Windungszahl ist die Induktivität also klein, mit nur zwei oder drei Windungen oder gar nur einer halben Windung

sogar so klein, daß sie kaum noch feststellbar ist. Aber vorhanden ist die Selbstinduktion auch dann (vergleiche noch einmal die Abb. 33 bis 35)!

Hat ein einfacher, gestreckter Draht (Abb. 33) also auch eine Induktivität aufzuweisen? Jede gewöhnliche Leitung? So ist es tatsächlich. Jede einfache Leitungsverbindung ist als winzige Spule anzusehen! Die Induktivität einfacher Leitungen ist aber so gering, daß sie für uns vorläufig keine Rolle spielt. Später werden wir noch darauf zurückkommen, wenn wir hören, warum es in manchen Radiogeräten wichtig ist, Leitungen recht kurz zu halten. Deren Induktivität ist einer der Gründe dafür.

Nun haben wir ein weiteres Bauelement kennengelernt: Die Induktivität oder Spule. Auch hier haben wir gesehen, daß die Wirkung nicht auf das Bauelement selbst begrenzt ist. Nicht nur auf Eisenkerne aufgewickelte Drähte wirken als Induktivität, sondern in geringem Maße alle Leitungen.

Ähnliches hatten wir beim Widerstand festgestellt: Einen Widerstand hat nicht nur das Bauteil, welches wir unter diesem Namen kaufen können, sondern – wieder in geringerem Maße – jede Leitung überhaupt.

Die speziellen Wirkungen, mit denen wir uns beschäftigen, kommen meist dadurch zustande, daß wir sie in dem betreffenden Bauelement konzentrieren(also nicht etwa dort erst entstehen lassen!).

Einen Widerstand stellen wir dadurch her, daß wir den bei jedem Leiter vorhandenen Widerstand besonders groß machen (dünne oder lange Leitungen aus Material mit hohem Widerstand), eine Induktivität dadurch, daß wir einen Leiter zur Spule aufwickeln und sein Magnetfeld dadurch konzentrieren.

Oft kann man dann die erwünschte Wirkung von der unerwünschten nicht so gut trennen, wie das der Techniker und Konstrukteur gern möchten. Auch dafür ein Beispiel: Manchmal wird eine möglichst große Selbstinduktion angestrebt, ohne daß die Spule einen hohen Widerstand hat. Eine große Selbstinduktion bedeutet aber viele Windungen, diese erfordern einen langen Draht für die Spule, und dessen Widerstand kann man leider nicht beliebig klein machen. Man könnte es nur durch dicken Spulendraht – aber dann wird die Spule räumlich viel zu groß. Hier muß man also jeweils einen günstigen Mittelweg finden. Das mag als Beispiel dafür genügen, vor welchen Problemen die Konstrukteure solcher – scheinbar sehr einfachen – Bauteile manchmal stehen. Für uns genügt es aber, wenn wir diese Zusammenhänge in ihren Grundzügen kennenlernen.

Wir hatten bereits die Serienschaltung und Parallelschaltung von Widerständen untersucht. Wie steht es damit bei den Spulen?

Die Zusammenschaltung von Spulen

Hier müssen wir zunächst ein neues Maß kennenlernen, das für die Induktivität.

Die Induktivität einer Spule ist um so größer, je stärker in ihr die Wirkung der Selbstinduktion auftritt; sie hängt also außer vom Eisenkern vor allem von der Windungszahl ab.

Die Induktivität wird in Henry gemessen (nach einem englischen Physiker benannt), abgekürzt H. Das Formelzeichen für die Induktivität ist das L. Auch bei der Induktivität gibt es wieder die üblichen Verkleinerungen mH und μH ($1\text{ H} = 1000\text{ mH} = 1\,000\,000\ \mu\text{H}$). Bei sehr kleinen Spulen (in der UKW-Technik) kommt sogar das Nano-Henry nH vor: $1\text{ H} = 1\,000\,000\,000\text{ nH}$.

Die Bedeutung dieser Maße werden wir später im Zusammenhang mit dem Wechselstrom noch besser verstehen.

Bei der Zusammenschaltung von Spulen müssen wir zunächst zwei Fälle sorgfältig trennen: Entweder stehen beide Spulen so weit getrennt voneinander, daß sich ihre Magnetfelder nicht gegenseitig beeinflussen, oder beide Spulen sind so dicht beisammen, daß ihre Magnetfelder ineinander übergehen, etwa wenn wir sie auf den gleichen Eisenkern aufwickeln.

Der erste Fall ist recht einfach: Zwei getrennte Spulen können wir genau wie Widerstände entweder in Serie schalten – dann addieren sich ihre Induktivitäten. Zwei Spulen mit je 1 H ergeben in dieser Schaltung die Wirkung einer Spule mit 2 H. Oder wir schalten die Spulen parallel. Die resultierende Induktivität errechnet sich dann genauso, wie wir das für die Parallelschaltung von Widerständen erfahren haben.

Was aber, wenn beide Spulen auf einem Eisenkern sitzen? Sehen wir uns dazu Abb. 55 an. L1 und L2 sind die beiden Spulen. Den Eisenkern haben wir nicht gezeichnet, weil er nicht unbedingt erforderlich ist – es besteht bereits eine magnetische Kopplung zwischen beiden Spulen, wenn wir sie dicht aneinandersetzen.

Den Vorgang der magnetischen Kopplung kennen wir übrigens bereits, nur der Name dafür ist uns noch neu: In Abb. 54 sind die beiden Spulen ebenfalls magnetisch gekoppelt.

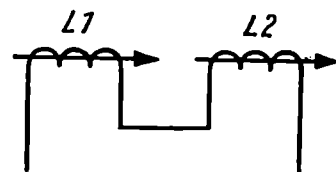
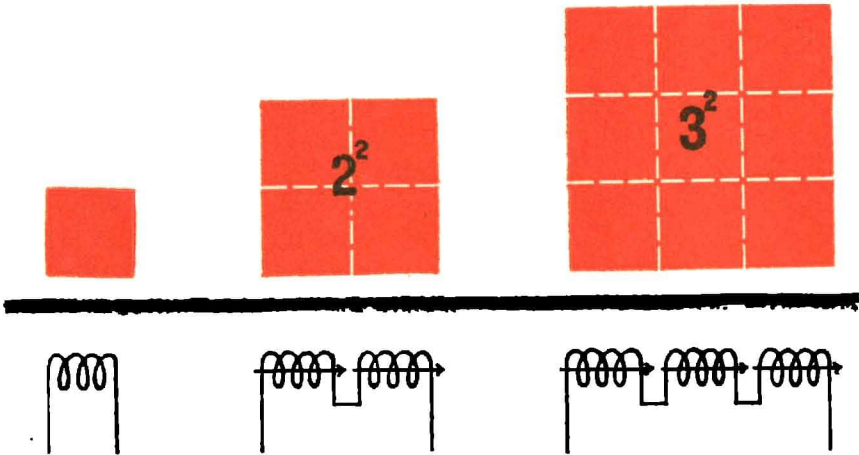


Abbildung 55



Wir wollen nun annehmen, daß beide Spulen im gleichen Wickelsinn gewickelt sind und so zusammengeschaltet werden, daß sie in gleicher Richtung vom Strom durchflossen werden. Ihre Magnetfelder haben dann— wie die beiden Pfeile in Abb. 55 andeuten — die gleiche Richtung; sie addieren sich. Also haben wir die doppelte Induktivität? Falsch! Es fließen jetzt durch jede Spule doppelt soviel Kraftlinien wie zuvor, denn die von L 1 erzeugten Kraftlinien fließen auch durch L 2 und umgekehrt. Jede Spule für sich hat bereits die doppelte Selbstinduktionswirkung wie zuvor bei Einzelanschluß! Die Induktivität jeder Spule verdoppelt sich, außerdem sind beide in Serie geschaltet — wir haben die vierfache Induktivität gegenüber der Einzelspule! Würden wir drei Spulen solcherart vereinen, so hätten wir die neunfache Induktivität — sie wächst also, mathematisch ausgedrückt, mit dem Quadrat der Induktivität der Einzelspule.

Wenn wir darüber genau nachdenken, bemerken wir, daß die Spulen hier eigentlich gar keine Einzelspulen mehr sind, denn wenn sie auf dem gleichen Eisenkern sitzen, könnten wir sie — um bei unserem Versuchsaufbau als Beispiel zu bleiben — auch auf die gleiche Garnrolle wickeln: Die Garnrolle bekommt einfach doppelt soviel Windungen. Daraus leiten wir eine wichtige Regel ab: Verdopplung der Windungszahl bedeutet vervierfachte Induktivität, oder, wieder mathematisch ausgedrückt: Die Induktivität einer Spule wächst mit dem Quadrat ihrer Windungszahl!

Sehen wir uns Abb. 56 an. Wieder haben wir zwei gleiche Spulen, aber beide sind entgegengesetzt gewickelt, der Strom fließt in der einen Spule genau andersherum als in der anderen. Jetzt sind beide

Magnetfelder entgegengesetzt – sie heben sich auf! Wir sehen daran schon, daß die Induktivität sinken muß und sogar – wenn beide Felder gleichstark, beide Windungszahlen also gleichgroß sind – fast verschwindet. Die restliche Induktivität entspricht dann ungefähr dem Wert eines geraden Drahtes in Länge des auf der Spule aufgewickelten.

Das gleiche ist der Fall, wenn wir einfach eine der Spulen der Abb. 55 umpolen, wie es Abb. 57 darstellt. Aber wozu das? Dann können wir die Spule doch gleich ganz weglassen, wenn sie keine Induktivität mehr hat?!

Probieren wir erst einmal aus, ob sich die Magnetfelder tatsächlich aufheben. Wir nehmen dazu unsere beiden Garnrollen-Elektromagneten aus Abb. 54 und schalten sie so zusammen, wie es Abb. 57 zeigt (oder wir drehen in einem zweiten Versuch eine der Spulen um, wie das in Abb. 56 der Fall ist) – wir müssen nur erreichen, daß der Strom in beiden Spulen im entgegengesetzten Sinn fließt. Als Eisenkern dient ein dicker Eisenstift (Zimmermannsnagel) für beide Spulen.

Wir werden feststellen, daß diese Spulenkombination tatsächlich kaum noch wie ein Magnet wirkt. Ein klein wenig restliche Anziehungskraft wird übrigbleiben, selbst wenn wir (was natürlich Bedingung ist) auf beiden Spulen genau die gleiche Windungszahl haben. Das kommt daher, daß bei unserer einfachen Anordnung ein Teil der Kraftlinien seitlich aus den Spulen austritt (wer das nicht glaubt, legt ein Blatt Papier über die Spulen und macht das Kraftfeld mit Eisenpulver sichtbar!). Deshalb heben sich beide Kraftfelder nicht restlos auf. Grundsätzlich richtig ist aber auch, was wir zuvor erfahren haben. Nur – wozu polt man dann zwei Spulen gegeneinander? Nun, es kommt in der Technik vor, daß ein Widerstand gebraucht wird, der sehr konstant und ausreichend belastbar sein soll, also aus Konstantan-Widerstandsdraht gewickelt werden muß. Er darf aber keine Induktivität aufweisen, sondern nur den Ohmschen Widerstand. Wir verfahren so, wie es Abb. 57 zeigt. Praktisch wird der Widerstand doch zur Spule?

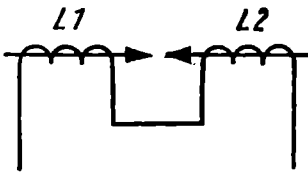


Abbildung 56

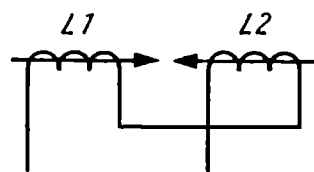


Abbildung 57

Widerstand des Drahtes. Was tun? Wird er aufgewickelt, so wird er standsdraht einfach in der Mitte gefaltet und so aufgerollt, daß zuletzt beide Enden übrigbleiben. Wir erhalten eine Spule, die aus zwei entgegengesetzt gepolten Teilspulen besteht. Abb. 58 zeigt den schematischen Aufbau.

Der Erfolg dieser Anordnung: Wir haben den langen Widerstandsdraht gut untergebracht, ohne daß wir eine Induktivitätswirkung in Kauf nehmen müssen! Derartige Wicklungen nennt man bifilar gewickelt.

Mit der Serienschaltung zweier Spulen wissen wir also nun Bescheid. Vor allem haben wir erkannt, daß es – wenn beide Spulen magnetisch gekoppelt sind – auf die richtige Polung ankommt. Wie steht es nun mit der Parallelschaltung zweier magnetisch gekoppelter Spulen?

Zeichnen wir erst einmal auf, wie das aussieht (Abb. 59). Wir polen beide Spulen wieder so, daß sie vom Strom in gleicher Richtung durchflossen werden und ihre Magnetfelder sich – wie in Abb. 55 – addieren. Also haben wir auch hier die vierfache Induktivität? Nein, denn wir haben eines übersehen: Der Strom teilt sich jetzt (wie bei jeder Parallelschaltung) zwischen beiden Spulen auf; jede wird also nur vom halben Strom durchflossen. Das Magnetfeld jeder Spule hat dann nur noch die halbe Kraft, beide Felder zusammen haben die Kraft einer Spule. Damit hat sich für beide Spulen gar nichts geändert, ihre Induktivität bleibt die einer einzelnen Spule. Aber da beide Spulen nicht in Serie liegen, addiert sich hier nichts! Wir können das Gebilde nach Abb. 59 einfach so auffassen, als hätten wir nur eine der Spulen gewickelt, dafür aber mit dem doppelten Drahtquerschnitt!

Die Gesamtinduktivität dieser Kombination ist also gleich der einer Einzelspule. Das gilt natürlich nur für zwei genau gleiche und magnetisch gekoppelte Spulen!

Schalten wir die Spulen so parallel, daß sie vom Strom entgegenge-

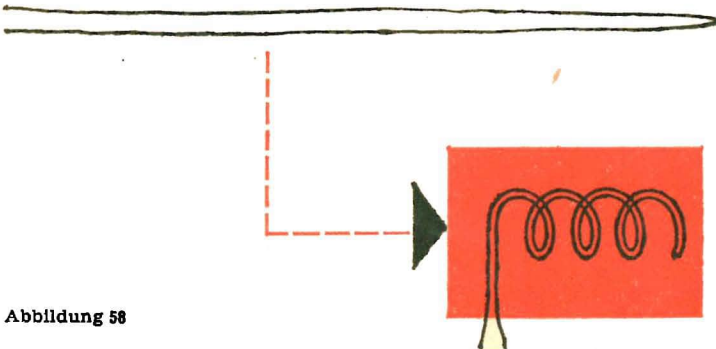


Abbildung 58

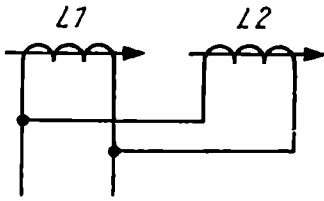


Abbildung 59

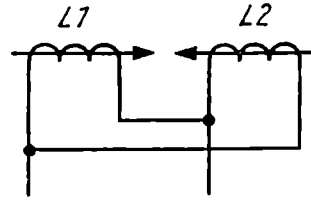


Abbildung 60

setzt durchflossen werden (Abb. 60), so heben sich ihre Magnetfelder wieder auf; die Induktivität wird also fast Null (diese Verhältnisse ähneln denen der Abb. 56).

Wenn wir das Zustandekommen der Selbstinduktion, der Induktivität und die Zusammenhänge bei Parallel- und Serienschaltung mit und ohne magnetische Kopplung einmal richtig verstanden haben, dann werden wir später immer wissen, in welcher Weise sich die Induktivität ändert, wenn wir zwei Spulen miteinander verbinden. Das Verständnis dieser Zusammenhänge ist für uns viel wichtiger als das Einprägen von Regeln. Verstehen ist besser als Auswendiglernen!

Das Prinzip des Transformators

So, wie jeder Techniker von einem Akku spricht, obwohl dieses Gerät eigentlich Akkumulator heißt, nennt der Fachmann den Transformator einfach Trafo.

Was ist ein Trafo? Transformieren heißt übertragen, und tatsächlich überträgt der Trafo etwas. Nach Abb. 54 haben wir elektrische Energie auf dem Umweg über den Magnetismus von einem Stromkreis (Batterie und rechte Spule) in einen anderen (linke Spule und Kompaßgalvanometer) übertragen. Wir wollen diesen Versuch noch einmal wiederholen.

Zunächst wickeln wir auf beide Spulen die gleiche Windungszahl und merken uns, wie weit die Kompaßnadel ausschlägt. Damit der Versuch besser zeigt, worauf es uns jetzt ankommt, wollen wir dafür sorgen, daß auf dem Kompaß ungefähr doppelt soviel Windungen sind wie auf der linken bzw. rechten Spule.

Nachdem wir uns die Größe des Ausschlages gemerkt haben, wickeln wir von der linken Spule die Hälfte der Windungen ab und probieren noch einmal. Wie zu erwarten war, ist der Kompaßausschlag geringer geworden. Wickeln wir aber auf die linke Spule doppelt so-

viel Windungen wie auf die rechte, so ist der Ausschlag noch stärker als zu Anfang. Bis jetzt überrascht uns das Ergebnis nicht.

Die linke Spule erhält nun wieder so viele Windungen wie zu Anfang; von der rechten wird die Hälfte abgewickelt, und dann probieren wir erneut. Der Nadelausschlag ist stärker als zu Anfang!

Machen wir es umgekehrt und wickeln wieder so viele Windungen auf wie zu Anfang und dann noch einmal die gleiche Anzahl dazu, so daß jetzt rechts doppelt soviel Windungen sind wie zuvor! Nun ist der Nadelausschlag schwächer als zu Anfang!

Das Ergebnis ist leicht zu erklären. Für die Versuche mit der veränderten linken Spule gilt: Wenn wir weniger Windungen haben, werden weniger Windungen vom Magnetfeld geschnitten — die induzierte Spannung ist geringer. Umgekehrt ist es, wenn wir mehr Windungen aufbringen.

Nun wissen wir aber, daß die Stärke der induzierten Spannung nicht allein von der Windungszahl, sondern auch von der Stärke des Magnetfeldes und von der Schnelligkeit, mit der das Magnetfeld sich ändert, abhängig ist. Wickeln wir auf die rechte Spule mehr Windungen, dann steigt auch die Selbstinduktion dieser Spule. Beim Einschalten und beim Ausschalten kann sich das Magnetfeld jetzt nicht mehr so schnell auf- und abbauen wie zuvor — aber damit wird die Induktionswirkung in der linken Spule geringer! Diese vereinfachte Erklärung soll uns nur zeigen, daß die in der linken Spule induzierte Spannung offenbar mit dem Verhältnis beider Windungszahlen in Zusammenhang steht.

Bis jetzt haben wir nur von „rechter“ und „linker“ Spule gesprochen. In eine der Spulen schickten wir den Batteriestrom hinein, aus der anderen Spule kam der induzierte Strom zum Vorschein. Natürlich können wir beide Spulen miteinander vertauschen, also links die Batterie und rechts das Kompaßgalvanometer anschließen. Wir müssen aber die Spulen bei technischen Beschreibungen eindeutig unterscheiden können. Man nennt deshalb die Spule, in die der Strom hineingeschickt wird, die Primärspule, und die Spule, aus der wir einen Strom entnehmen, die Sekundärspule.

Sitzen beide Spulen auf einem gemeinsamen Kern, so kann man sie auch auf einem Wickelkörper übereinanderwickeln. In der Abb. 54 liegt die Primärspule rechts und links die Sekundärspule. Wickeln wir beide auf einer einzigen Garnrolle übereinander, so sprechen wir nicht mehr von Spulen — es ist ja dann nur noch eine, aber mit zwei getrennten Wicklungen —, sondern von der Primärwicklung und Sekundärwicklung unseres Trafos.

Beide Spulen übereinanderzuwickeln ist sogar vorteilhaft, denn dann gehen (besonders wenn wir einen geschlossenen Eisenkern

verwenden, so daß die Kraftlinien nirgends durch Luft verlaufen) keine Kraftlinien durch seitlichen Austritt aus den Spulen für die Induktionswirkung verloren.

Ein Trafo kann auch mehrere Sekundärspulen haben. Stellen wir uns noch eine dritte Spule für den Aufbau nach Abb. 54 her und dazu ein zweites Kompaßgalvanometer! Die dritte Spule – unsere zweite Sekundärspule – ordnen wir rechts von der Primärspule an, oder wir wickeln alle drei Spulen auf einen Spulenkörper.

Die Primärspule erzeugt dann in beiden Sekundärspulen zugleich Induktionsstromstöße. Erhalten beide Sekundärspulen verschiedene Windungszahlen, so können wir zugleich zwei verschieden starke Induktionsströme abnehmen. Wir werden noch sehen, daß wir es in der Rundfunktechnik oft mit Trafos zu tun haben, die mehrere Sekundärwicklungen aufweisen.

Beim Versuchsaufbau nach Abb. 54 bekommen wir immer nur im Moment der Schalterbetätigung einen kurzen Stromstoß von der Sekundärspule, aber keinen ständigen Strom! Also müßten wir den Schalter so schnell wie möglich abwechselnd ein- und ausschalten können. Dazu könnten wir einen selbsttätigen Schalter verwenden: den Unterbrecher.

Wir schalten die Primärspule unseres Versuchstrafos einfach parallel zu der Magnetspule des Weckers (Abb. 43 bis 45). Sie wird dann immer zusammen mit der Magnetspule an die Batterie angeschlossen und abgechaltet. Der Selbstunterbrecher nimmt uns die Arbeit des schnellen Ein- und Ausschaltens ab, er sorgt dafür, daß der durch die Primärspule des Trafos fließende Batteriestrom gewissermaßen in einzelne Stromstöße zerhackt wird.

Tatsächlich gibt es für diese Zwecke sogenannte Zerhacker, die ganz ähnlich wie unser Selbstunterbrecher aufgebaut sind (natürlich ohne Glocke und Klöppel!) und die dazu benutzt werden, Batteriestrome zum Zweck des Transformierens in Stromstöße umzuwandeln – eben zu „zerhacken“. Das braucht man z. B. bei älteren Autoradios, um die wenigen Volt der Wagenbatterie mit einem Trafo auf höhere Spannung heraufsetzen zu können. Warum das nicht mit dem Batteriestrom direkt möglich ist, wissen wir: Der Strom fließt nach dem Einschalten gleichmäßig in einer Richtung (deshalb wird er Gleichstrom genannt), und weil das Magnetfeld im Trafo sich dabei nicht mehr ändert, entsteht in der Sekundärspule außer dem Einschaltstromstoß keine Spannung.

Die praktische Durchführung des Versuchs mit dem Selbstunterbrecher und unserem Trafo und der Anschluß des Kompaßgalvanometers an die Sekundärspule würde uns enttäuschen, da die Nadel höchstens ein wenig zittern, aber keine so kräftigen Ausschläge wie

zuvor bei Handbetrieb unseres Schalters zeigen würde. Die Erklärung ist einfach. Der Stromstoß in der Sekundärspule fließt ja beim Einschalten in entgegengesetzter Richtung wie beim Ausschalten der Primärspule. Die Kompaßnadel müßte also abwechselnd nach rechts und links ausschlagen, und zwar so schnell, wie der Anker unseres Unterbrechers vibriert. Das aber schafft die Nadel ganz einfach nicht – sie ist zu träge. Sie wird von der schnellen Richtungsänderung der Sekundärspannung so schnell abwechselnd nach rechts und links gelenkt, daß sie ganz einfach in Mittellage bleibt. Mit einem Kopfhörer an Stelle des Kompaßgalvanometers würden wir die Sekundärspannung als kräftiges Knattern hören.

Etwas Wichtiges haben wir hier ganz nebenbei erwähnt: Die Sekundärspannung unseres Trafos wechselt dauernd ihre Richtung. Wir nennen sie deshalb Wechselspannung. Der von ihr erzeugte Stromfluß durch das Kompaßgalvanometer ist also ein Wechselstrom.

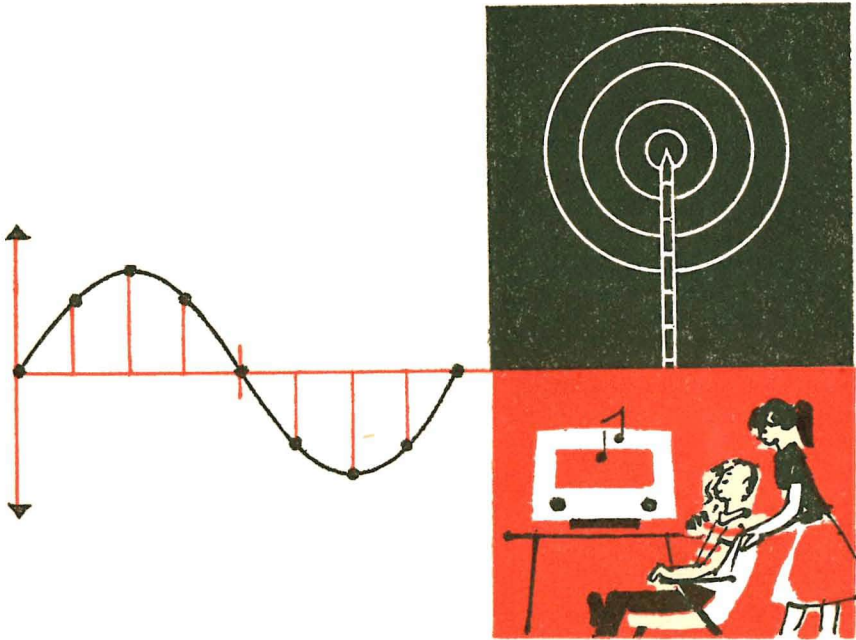
Wie wir gesehen haben, eignet sich das Kompaßgalvanometer nicht zum Nachweis von Wechselstrom oder Wechselspannung. Während der Trafo ein Gerät für Wechselspannung ist, handelt es sich beim Kompaßgalvanometer um ein Gleichstrominstrument.

Wir kennen nun den Gleichstrom und auch den Wechselstrom. Der Drehstrom soll hier nur erwähnt werden. Er stellt keine dritte Stromart dar, sondern eine Verknüpfung dreier Wechselströme (genauer: Wechselspannungen) in bestimmtem Verhältnis und spielt nur für den Starkstromtechniker eine Rolle. Wir haben bei unseren Basteleien nichts mit ihm zu tun.

Was ist aber Allstrom? Es gibt doch beispielsweise Allstromradiogeräte? Allstrom ist keine Stromart, sondern eine sprachliche Vereinfachung und bedeutet: „Für alle Stromarten geeignet“. Ein Allstromgerät ist also sowohl für Gleichstrom als auch für Wechselstrom geeignet.

Wir kennen schon einige technische Geräte, die als Allstromgeräte bezeichnet werden können: Den Ohmschen Widerstand und seine spezielle Form, die Glühlampe. Auch Plätteisen, Tauchsieder, Heizsonnen und alle anderen Geräte, die auf der Wärmewirkung des elektrischen Stromes beruhen, sind Allstromgeräte; für die Erwärmung des Drahtes ist es ja gleichgültig, in welcher Richtung er vom Strom durchflossen wird (denken wir daran, wie diese Erwärmung durch Anprall der Leitungselektronen an die Molekülgitter zustande kommt!), der Strom kann deshalb auch seine Richtung dauernd wechseln – ein Wechselstrom sein – ohne daß sich an der Erwärmung etwas ändert.

Der Wechselstrom ist die für uns wichtigste Stromart. Deshalb müssen wir uns mit seinen Eigenschaften etwas genauer beschäftigen.



Von Wellen und Frequenzen

Wechselstrom und Wechselspannung

Der Weg, eine Wechselspannung durch Zerhacken einer Gleichspannung und anschließendes Transformieren zu gewinnen, ist etwas umständlich. Wie kann man Wechselspannung anders erzeugen? Nehmen wir wieder die Induktion zu Hilfe! Wir können dann etwa so vorgehen, wie es Abb. 61 zeigt. Von einer Spule – die einen Eisenkern haben kann – lassen wir einen stabförmigen Permanentmagneten sich schnell drehen.

Wir wissen, daß in der Spule bei Annäherung eines Magnetpols ein Stromstoß entsteht, der so lange anhält, wie das Magnetfeld stärker wird. Die Spule der Abb. 61 ist an nichts angeschlossen; es kann also kein Strom fließen. Wir sprechen deshalb besser von einer Spannung. Sie ist an den Spulenanschlüssen nachweisbar.

Solange sich ein Pol des Magneten nähert, steigt diese Spannung – der Pol kommt ja immer näher, und das Feld in der Spule wird immer stärker. Geht der Magnetpol an der Spule vorbei, so wird das Feld wieder schwächer – die Spannung sinkt ab. Steht der Magnet quer zur Spule, so ist die Spannung gleich Null – der Spulenkerne wird in diesem Moment von keinen Kraftlinien durchflossen.

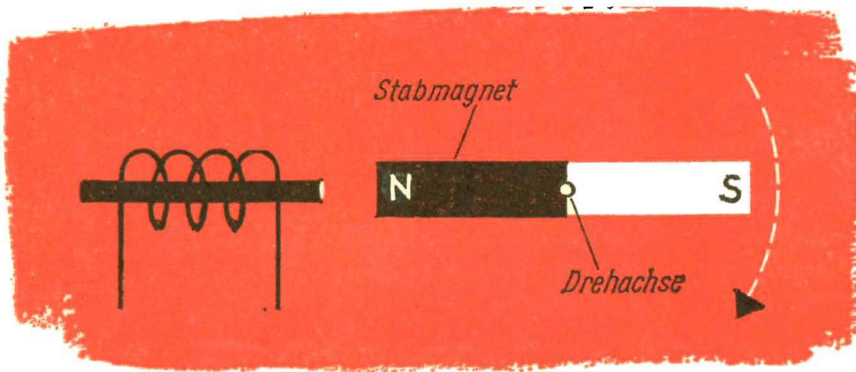


Abbildung 61

Der Magnet dreht sich weiter, deshalb kommt jetzt der andere Magnetpol in Spulennähe. Das Kraftfeld in der Spule beginnt wieder zu wachsen – aber die Kraftlinien verlaufen nun umgekehrt. Demzufolge ist auch die jetzt in der Spule entstehende Spannung umgekehrt gepolt! Sie steigt erneut an, bis der Magnetpol an der Spule vorbeigeht, danach fällt sie wieder bis Null ab (der Magnet steht in diesem Moment quer zur Spule), und dann beginnt alles von vorn. An der Spule können wir also eine Spannung abnehmen, die vom Wert Null bis zu einem Maximalwert ansteigt, wieder bis Null fällt und danach mit umgekehrter Polarität wieder bis zum Maximalwert ansteigt, um dann erneut bis auf Null zu sinken. Würden wir an die Spule einen Verbraucher – etwa Widerstand oder ein Lämpchen – anschließen, so würde der Strom durch diesen Verbraucher den gleichen Verlauf nehmen. Er wechselt also ständig seine Richtung – es ist Wechselstrom.

Damit haben wir das Prinzip der Dynamomaschine erkannt. Wenn wir einen Fahrraddynamo öffnen, werden wir sehen, daß er ebenso arbeitet. Bei ihm steht der Permanentmagnet fest, statt dessen dreht sich die Spule. Oft sind sogar zwei oder vier Magnete vorhanden und auch mehrere Spulen, die dann in Serie geschaltet werden, um eine höhere Spannung zu erreichen. Das Prinzip ist aber das gleiche. Wie messen wir eine Wechselspannung und einen Wechselstrom? Über Meßinstrumente haben wir schon einiges erfahren, die Unterscheidung zwischen Strom- und Spannungsmessung ist uns ebenfalls bekannt, sie gilt auch für Wechselstrom und Wechselspannung. Bleibt uns also nur festzustellen, wieweit sich unsere Meßgeräte – das Weicheisen- und das Drehspulinstrument – für Wechselstrom eignen.

Beginnen wir mit dem Weicheiseninstrument (Abb. 49 und 50). Hier kommt die Wirkung durch die Abstoßung zweier gleicher Magnetpole zustande. Wechselt die Stromrichtung, so wechseln auch beide Magnetpole der Eisenstreifen in der Spule; die Abstoßung bleibt also erhalten. Dieses Instrument ist offensichtlich auch für Wechselstrom verwendbar – es ist ein Allstrominstrument.

Anders beim Drehspulinstrument. Hier hängt die Drehrichtung der Spule von der Stromrichtung ab (Abb. 51); bei falscher Stromrichtung würde sich der Zeiger nach links drehen (Abb. 52). Bei Wechselstrom müßte die Drehspule in schneller Folge abwechselnd nach links und rechts abgelenkt werden – sie würde aber in Ruhe bleiben, weil sie ähnlich unserer Kompaßnadel den schnellen Stromwechseln nicht folgen kann.

Ein Drehspulinstrument stellt zunächst ein reines Gleichstrominstrument dar. Der vielen Vorzüge wegen, die wir schon kennengelernt haben – vor allem wegen seines geringen Eigenstromes bei Spannungsmessungen und der hohen Empfindlichkeit bei Strommessungen –, ist es aber auch in der Wechselstromtechnik unentbehrlich. Man macht es durch einen kleinen Kniff dafür verwendbar – nämlich, indem man es mit einigen Gleichrichtern zusammenschaltet.

Gleichrichter sind elektrische „Ventile“, deren Wirkungsweise wir später noch genau kennenlernen. Wir wollen uns zunächst merken.



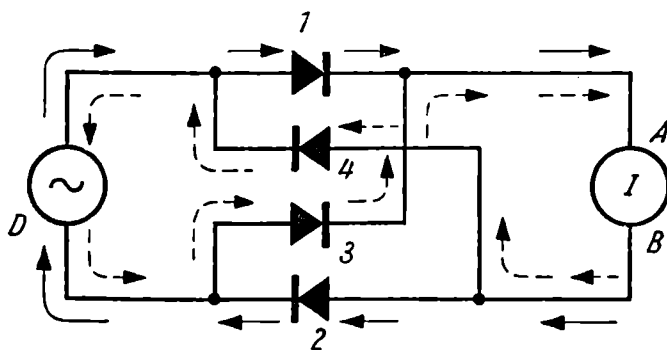


Abbildung 62

daß sie den Strom nur in einer Richtung hindurchlassen, also nicht in der Gegenrichtung.

Abb. 62 zeigt uns die Zusammenschaltung eines Drehspulinstrumentes I mit vier solchen Gleichrichtern (1 bis 4 in der Abb.). Als Wechselstromquelle – deren Stromabgabe wir messen wollen – können wir uns bei D unseren Versuchsdynamo nach Abb. 61 denken. Sie ist hier ganz allgemein als Wechselspannungsquelle angegeben.

In der Funktechnik ist es üblich, in Schaltbildern Spannungsquellen, deren Art und Aufbau für die Betrachtung der Schaltung nebensächlich ist, mit einem solchen Kreis anzugeben. Im Kreis wird dann nur das Symbol für die abgegebene Spannungsart angegeben: Das Zeichen \cong bedeutet Gleichspannung, \sim bedeutet Wechselspannung. Das Zeichen für Allstrom-Verbraucher ist aus beiden Zeichen zusammengesetzt: \cong . Es darf natürlich nur für Verbraucher verwendet werden, nicht für Spannungsquellen!

Wie funktioniert die Gleichrichterschaltung in Abb. 62, in die zur Veranschaulichung Strompfeile für beide Richtungen eingetragen sind?

Die ausgezogenen Pfeile haben folgende Richtung: Von der Wechselspannungsquelle D oben über Gleichrichter 1, Instrumentanschluß A, B, Gleichrichter 2, zurück nach D. Über die Gleichrichter 3 und 4 kann kein Strom fließen, denn auf sie trifft der Strom jetzt in Sperrrichtung. Das Instrument wird also in der Richtung A nach B durchflossen und soll so angeschlossen sein, daß dabei der Zeiger in der richtigen Weise ausgelenkt wird.

Betrachten wir nun die andere Stromrichtung – also die Richtung nach Umkehr der Polarität der Wechselspannung. Sie ist mit punktierten Pfeilen verdeutlicht. Der Strom fließt hier von D unten über Gleichrichter 3, A, B, 4, zurück nach D. Jetzt sperren Gleichrichter 1 und 2 diese Stromrichtung. Das Instrument wird aber wieder von A nach B durchflossen!

Wie wir sehen, lenken jetzt beide Stromrichtungen unserer Stromquelle den Zeiger nach der richtigen Seite aus. Der durch das Instrument I fließende Strom hat beide Male die gleiche Richtung – wir haben den Wechselstrom gleichgerichtet! Mit dieser Ergänzung kann man deshalb ein Drehspulinstrument auch für Wechselstrommessungen verwenden.

Wir wollen uns nun den zeitlichen Verlauf der Wechselspannung, wie sie unsere Dynamomaschine von Abb. 61 liefert, genauer ansehen.

Zur Veranschaulichung von Strömen und Spannungen benutzt der Techniker Kurvendarstellungen, sogenannte Diagramme. Wie kommt solch ein Kurvendiagramm zustande?

Nehmen wir an, wir hätten an einem Ende des Stabmagneten in Abb. 61 einen Bleistift mit der Spitze in Richtung parallel zur Achse befestigt und unter dem Magneten läge ein Stück Papier. Die Bleistiftspitze würde dann, wenn sich der Magnet dreht, einen Kreis schreiben. Das Ganze sieht in der Seitenansicht etwa so aus, wie es Abb. 63 zeigt (die Spule ist hier nur schematisch angedeutet).

Wir ziehen das Papier nun unter dem rotierenden Magneten schnell weg. Welche Figur wird die Bleistiftspitze dann schreiben?

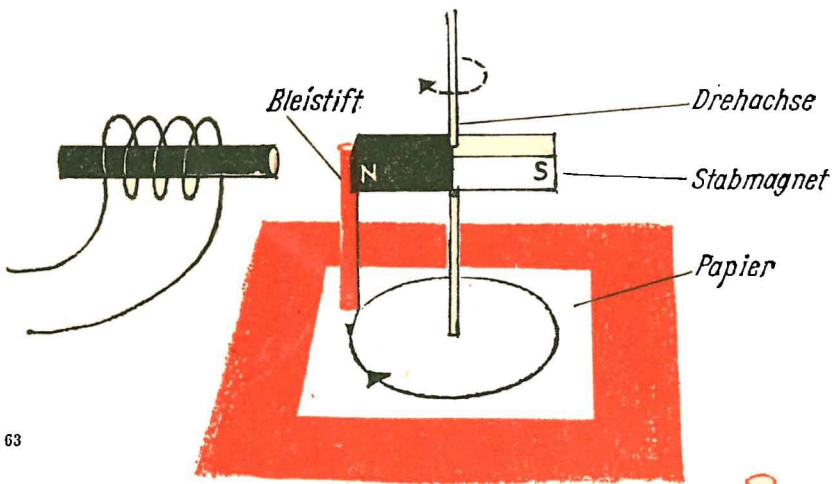


Abbildung 63

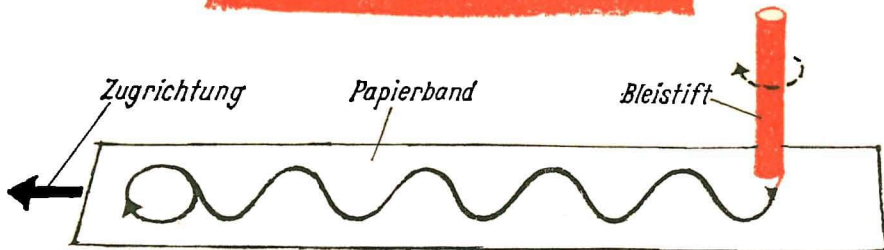


Abbildung 64



Probieren wir das einmal aus. Den Magneten können wir entbehren, wir nehmen nur den Bleistift in die Hand, legen ein nicht zu kurzes Papierband unter (zwei Zeichenblätter aneinanderkleben!), setzen den Bleistift am linken Ende des Bandes auf und malen nun einen schönen runden Kreis. Die Hand muß dabei ganz gleichmäßig im Kreise schwenken. Während wir nun unverdrossen den Bleistift kreisen lassen, zieht ein Helfer das Papierband gleichmäßig und schnell unter dem Bleistift weg (Abb. 64). Dabei darf der Bleistift nicht mit dem Papier mitwandern.

Der Kreis wird zu einer Wellenlinie, ähnlich in Abb. 64.

Abb. 65 zeigt uns den Zusammenhang zwischen der Drehung des Stabmagneten, der Kurvenform der Bleistiftlinie und der von unserer Spule abgegebenen, zwischen A und B meßbaren Wechselspannung.

Nehmen wir an, daß sich der Magnet in einer Sekunde einmal dreht. Er wird dann von der Stellung 1 — in der wir ihn gezeichnet haben — über Stellung 2, 3 usw. bis 8 und wieder über 1 kreisen. Von einem dieser Punkte zum anderen braucht er $\frac{1}{8}$ s.

Die waagerechte Linie in der Kurvenzeichnung stellt gewissermaßen die Zeitachse dar. Wir teilen sie in acht gleiche Abstände, jeder Teil

soll $\frac{1}{8}$ s entsprechen. Die Strecke vom Punkt 1 der Zeitachse bis zum nächsten Punkt 1 entspricht dann gerade 1 s und damit einer Umdrehung des Magneten.

Wenn der Magnet in Abb. 65 waagrecht steht, liegt er quer zur Spule. In diesem Moment wird keine Spannung in ihr induziert. Der Bleistift am Magneten befindet sich gerade in Höhe der Zeitachse, die wir – weil die Spannung in diesem Moment Null ist – als Nulllinie bezeichnen wollen.

Bei der weiteren Drehung nähert sich der Nordpol des Magneten der Spule; an den Anschlüssen A und B können wir jetzt eine Spannung messen, die beispielsweise mit dem Pluspol bei A, mit dem Minuspol bei B auftritt.

Über dem Punkt 1 unserer Zeitachse geben wir nun die augenblickliche Höhe der Bleistiftspitze an. Sobald der Magnet senkrecht steht, hat der Bleistift die höchste Stelle (Punkt 2 im Drehkreis und über der Zeitachse) erreicht. Auch die Spannung zwischen A und B hat jetzt ihren höchsten Wert.

Dreht sich der Magnet dann weiter (Punkt 3), so sinkt die Spannung wieder ab, auch der Bleistift steht wieder tiefer. Das tragen wir über die Zeitachse ein.

Bei Punkt 4 ist es ebenso: Der Bleistift hat die Nulllinie wieder erreicht, auch die Spannung zwischen A und B ist Null. Nun beginnt die zweite Halbdrehung des Magneten. Der Südpol nähert sich jetzt der Spule, die Spannung steigt wieder, aber mit umgekehrtem Vorzeichen: Jetzt ist Plus unten bei B, Minus oben bei A. Der Bleistift

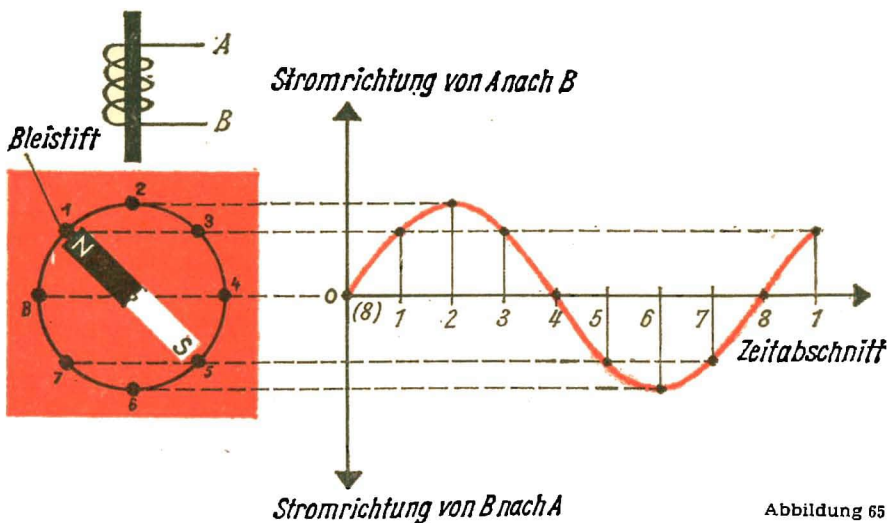


Abbildung 65

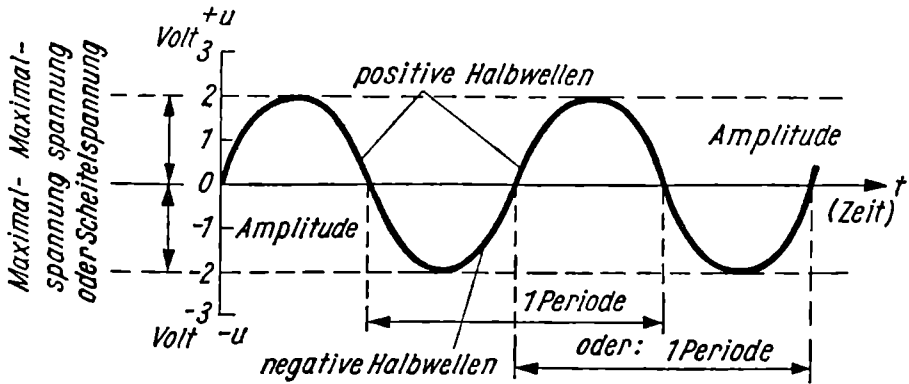


Abbildung 66

steht unterhalb der Nulllinie (Punkt 5). So verfahren wir weiter, bis wieder Stellung 1 erreicht ist.

Die Kurve, die sich ergibt, wenn wir unsere acht eingetragenen Punkte (und alle Zwischenpunkte, die ebenso entstehen) verbinden, entspricht in ihrem Verlauf genau der Spannung an den Punkten A und B. Die obere Halbwelle (der „Berg“ der Kurve) entspricht dabei der einen Stromrichtung, die untere Halbwelle (das „Tal“) der anderen, umgekehrten Stromrichtung. In den Momenten, in denen die Kurve die Zeitachse schneidet, ist keine Spannung vorhanden. Hier – in den Punkten 4 und 8 unserer Skizze – erfolgt die Richtungsumkehr der Wechselspannung, die also dauernd zwischen Null und dem Maximalwert der Spannung (Punkte 2 und 6) hin und her pendelt. Die Kurve ist deshalb ein genaues Abbild des zeitlichen Verlaufs der Wechselspannung. Wir zeichnen sie, weil sie für uns sehr wichtig ist, noch einmal ohne die zusätzlichen Hilfslinien auf (Abb. 66), und zwar gleich für zwei Magnetumdrehungen.

Die Zeit wird in der Technik mit dem Buchstaben t bezeichnet, sie ist bei derartigen Kurvendarstellungen stets von links nach rechts fortschreitend zu lesen. Die Höhe der Spannung im jeweiligen Zeitpunkt wird senkrecht aufgetragen, und zwar nach oben als positive Halbwelle, nach unten – für die umgekehrte Stromrichtung – als negative Halbwelle. Der Ausdruck Welle ergibt sich aus dem Aussehen dieser Kurve. Wichtiger für uns ist der Begriff Schwingung – er ist ebenfalls leicht zu verstehen, wenn wir bedenken, daß die Elektronen in der Spule und den von Wechselstrom durchflossenen Leitern nicht mehr gleichmäßig voranfließen, sondern hin- und herpendeln. Sie bewegen sich also im Leiter nur ein kleines Stück vorwärts, dann wieder zurück und so fort; sie kommen dabei nicht einmal sehr weit von der Stelle (denken wir an das, was wir bereits

über die recht geringe Transportgeschwindigkeit der Leitungselektronen erfahren haben!). Das Hin- und Herpendeln der Elektronen kann man mit dem Schwingen eines Uhrpendels vergleichen – deshalb bezeichnet man eine Welle, bestehend aus der positiven und der negativen Halbwelle, als eine Schwingung.

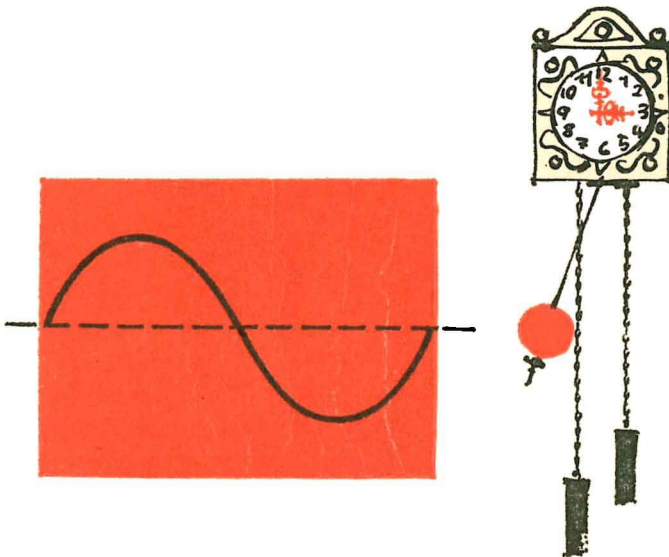
Wie lange dauert nun eine solche Schwingung? Offenbar so lange, wie der Stabmagnet in unserem Beispiel in Abb. 65 für eine Umdrehung braucht!

Die Dauer einer vollständigen Schwingung wird auch Periode genannt (Abb. 66). Die Periodendauer ist dabei um so kürzer, je schneller sich der Stabmagnet dreht.

Die Anzahl der Perioden je Sekunde nennt man die Frequenz des Wechselstromes. Die Frequenz ist ein sehr wichtiges Maß. Während beim Gleichstrom die Angabe von Spannung und Stromstärke ausreicht, kommt beim Wechselstrom noch als dritte Größe die Frequenz hinzu. Sie wird in Hertz (nach dem deutschen Physiker Heinrich Hertz) gemessen. Das Formelzeichen für die Frequenz ist das f , die Abkürzung für das Maß Hertz lautet Hz.

Der Wechselstrom des Starkstromnetzes hat die Frequenz 50 Hz, er führt also je Sekunde 50 Schwingungen aus (entspricht 50 „Bergen“ und 50 „Tälern“ in Abb. 66 während jeder Sekunde). Für höhere Frequenzen sind die Abkürzungen Kilohertz (kHz) und Megahertz (MHz) üblich: $1000 \text{ Hz} = 1 \text{ kHz}$, $1000 \text{ kHz} = 1 \text{ MHz}$.

Die Höhe der Kurve entspricht der Maximalspannung, die unsere Wechselspannung nur kurzzeitig erreicht; sie wird auch als Amplitude bezeichnet – ein Begriff, der für uns ebenfalls sehr wichtig ist! Da der Wert der Maximalspannung in manchen technischen Ver-



öffentlichungen auch als Scheitelspannung bezeichnet wird, ist auch diese Bezeichnung in Abb. 66 mit angegeben.

Welche Form hat die Kurve, wenn die Frequenz des Wechselstromes steigt?

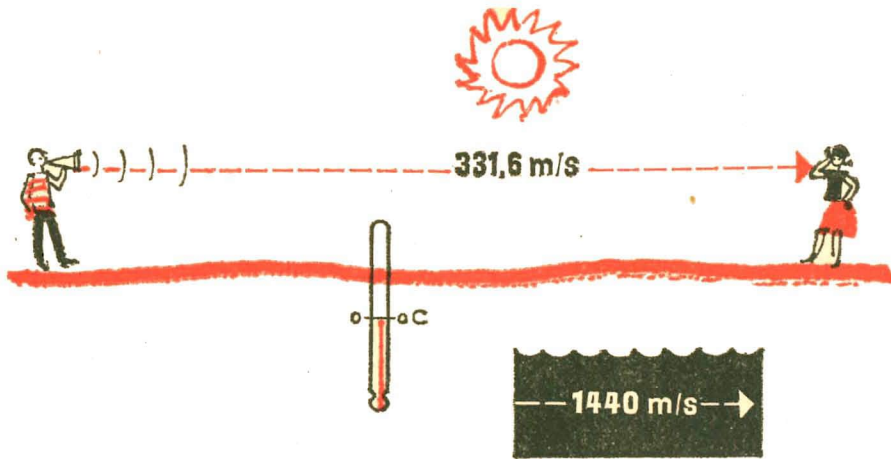
Da die Einteilung der Zeitachse bestehen bleibt, rücken die einzelnen Schwingungen dichter zusammen. Bei Verdoppelung der Frequenz der Wechselspannung in Abb. 66 entfallen auf die gleiche Länge der Zeitachse nicht zwei, sondern vier Perioden. Umgekehrt rücken die einzelnen Schwingungszüge immer weiter auseinander, je niedriger die Frequenz wird.

Nun könnte man fragen: Was ist, wenn die Frequenz den Wert Null erreicht? Dann wechselt die Spannung null mal – also gar nicht – ihre Richtung. In Abb. 66 würden wir dann – je nach Richtung der Spannung oder des Stromes – eine gerade Linie entweder ober- oder unterhalb der Nulllinie sehen, die parallel zu ihr verläuft. Ihre Höhe über oder unter der Nulllinie kennzeichnet Richtung und Höhe der so dargestellten Spannung oder des Stromes. Die Richtung ändert sich nicht mehr – es ist Gleichstrom! Tatsächlich könnte man den Gleichstrom als Wechselstrom mit der Frequenz Null Hz ansehen. Wir wollen aber weiterhin bei unserer bisherigen einfachen Vorstellung von Gleich- und Wechselstrom bleiben.

In der Mathematik und Mechanik wird die Kurvenform der Abb. 66 (nicht nur bei elektrischen Vorgängen, sondern ganz allgemein) Sinuskurve genannt. Die Wechselstromkurve hat also den Verlauf einer Sinuskurve, und man kann vereinfacht sagen: Der Wechselstrom oder die Wechselspannung ist sinusförmig!

Das ist allerdings nicht immer so – wir hatten ja bisher nur die von unserer Versuchsdynamomaschine abgegebene Wechselspannung betrachtet. In der Funktechnik kennt man andere, komplizierter verlaufende Kurvenformen – beispielsweise Sägezahnkurven und Rechteckkurven, deren Name schon auf ihre Form hindeutet –, doch damit wollen wir uns vorläufig nicht befassen. Wenn nichts anderes gesagt ist, nehmen wir in Zukunft bei Wechselspannungen immer die Sinusform an.

Wir haben es in der Funktechnik mit sehr verschiedenen Frequenzen zu tun. Das Starkstromnetz hat 50 Hz, die Antennenströme der UKW-Rundfunksender aber bis über 100 MHz, das sind mehr als 100 Millionen Schwingungen je Sekunde! Wie wir noch sehen werden, unterscheiden sich Wechselströme mit niedriger und hoher Frequenz im Verhalten in vielerlei Hinsicht. Man hat deshalb im Sprachgebrauch eine Unterteilung zwischen Niederfrequenz und Hochfrequenz getroffen und – Techniker lieben Abkürzungen – sie auch wieder mit Kurzbezeichnungen versehen: NF heißt Niederfre-



quenz, HF Hochfrequenz. Mit diesen Buchstaben sind also keine bestimmten Frequenzen gemeint, sondern Bereiche.

Die Niederfrequenz – der NF-Bereich – umfaßt die Frequenzen von etwa 10 Hz bis etwa 20 oder 30 kHz, also etwa den gesamten Hörbereich. Wir müssen hier daran denken, daß auch der hörbare Schall nur eine mechanische Schwingungserscheinung ist. Die Luft pflanzt den Schall durch das Schwingen ihrer Moleküle fort; auch diese Schwingungen kann man mit einer Sinuskurve zeichnerisch darstellen!

Die Begriffe Frequenz und Amplitude gelten in der Akustik – der Lehre vom Schall – ebenfalls. Je schneller die Schwingung, je höher die Frequenz ist, desto höhere Töne hören wir. Wenn eine elektrische Schwingung in eine gleichartige Luftschwingung (Schallschwingung) umgewandelt wird, können wir sie als Ton hören; die Tonhöhe entspricht dann der Frequenz unserer Wechselspannung.

Der Bereich der hörbaren Schwingungen reicht etwa von 16 Hz bis 15 kHz, darüber liegt das Gebiet des Ultraschalls.

Für die Unterscheidung NF und HF gibt es keine eindeutige Grenze. Wir wollen zum NF-Bereich alle die Frequenzen zählen, die in den hörbaren Bereich fallen oder nicht zu weit davon abliegen. Was darüber ist, soll für uns der HF-Bereich sein. In ihm gibt es auch noch weitere Unterteilungen, die wir – soweit für uns von Interesse – im zweiten Teil des Buches kennenlernen werden.

Der Transformator

Über den Transformator – kurz: Trafo – wissen wir bereits einiges (Abb. 54 hatte uns eine Versuchsanordnung gezeigt). Wir erinnern uns noch einmal daran, daß für die Induktionswirkung ein ständiges

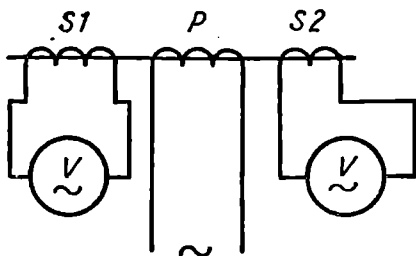


Abbildung 67

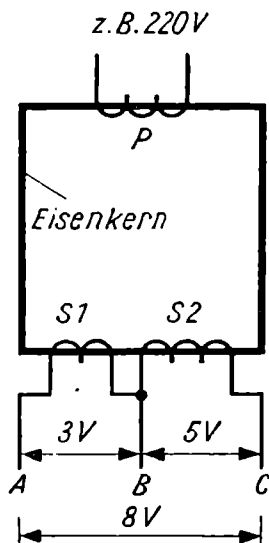


Abbildung 68

Entstehen und Verschwinden des Magnetfeldes Voraussetzung ist. Wenn wir nun an Stelle der Batterie eine Wechselspannungsquelle verwenden, wird der Strom, wie ja in die Sinuskurve schon zeigt, in der Primärspule abwechselnd ansteigen, fallen, in umgekehrter Richtung steigen, fallen und so fort – das Magnetfeld wird nie zur Ruhe kommen.

Abb. 67 zeigt den alten Versuchstrafo, den wir jetzt mit Wechselstrom betreiben. Der Wechselstrom wird der Primärspule P zugeführt.

Wir können gleichzeitig mehrere Sekundärspulen – hier S 1 und S 2 – anbringen. Alle Spulen setzen wir auf einen gemeinsamen Eisenkern oder wickeln sie, um eine noch festere magnetische Koppelung zu erreichen, übereinander. Wenn S 1 und S 2 verschiedene Windungszahlen haben, können wir an ihnen verschieden hohe Wechselspannungen abnehmen und mit Voltmetern messen. Die Voltmeter müssen natürlich für Wechselstrom geeignet sein. Das ist in der Skizze durch die Wellenlinie ~ angedeutet. Warum man für Wechselstrom gerade dieses Zeichen gewählt hat, wissen wir nun auch: Es deutet die Sinuskurve an.

Wichtig ist, daß möglichst keine magnetischen Kraftlinien verlorengehen oder geschwächt werden. Deshalb ist es vorteilhaft, einen ringförmigen Eisenkern zu verwenden, wie Abb. 68 zeigt. Die Kraftlinien verlaufen dann nirgends durch Luft. Diesen Aufbau finden wir zum Beispiel bei dem bekannten Klingeltrafo, der benutzt wird,

um aus der hohen Netzwechselspannung von 220 V ungefährliche Spannungen von wenigen Volt herzustellen.

Die beiden Sekundärspulen des Klingeltrafos in Abb. 68 sind in Serie geschaltet, S 1 gibt 3 V ab (Anschlüsse A–B), S 2 gibt 5 V ab (Anschlüsse B–C), so daß wir zwischen A und C dann 8 V abnehmen können und uns dadurch eine dritte Sekundärwicklung für diese Spannung sparen – falls S 1 und S 2 richtig zusammengeschaltet sind. Würden wir eine der beiden Spulen umpolen, so würde ihre Stromrichtung in jeder Halbwelle des Wechselstromes der Stromrichtung der anderen Spule genau entgegengesetzt sein – die Spannungen würden sich aufheben, und zwischen A und C hätten wir dann nur die Differenz beider Spannungen – in unserem Falle 2 V – zur Verfügung.

Wenn sich die Spannungen addieren sollen, müssen die Wicklungen im gleichen Drehsinn – bei beiden Spulen übereinstimmend – verlaufen. Wir können uns aber S 1 und S 2 auch als einzelne durchgehend gewickelte Spule vorstellen, die für den Anschluß der Leitung B angezapft ist.

Wie viele Windungen müssen die Primär- und die Sekundärspule haben? Wie beides grundsätzlich voneinander abhängt, haben wir früher schon experimentell ermittelt (Seite 113 bis 114). Wir wollen uns deshalb hier nur die Regel für den Trafo einprägen:

Die Spannungen verhalten sich zueinander wie die Windungszahlen! Was bedeutet das praktisch? Nehmen wir an, daß die Primärwicklung 100 Windungen hat. Hat die Sekundärwicklung halb soviel Windungen, also 50, so gibt sie auch nur die Hälfte von derjenigen Spannung ab, die wir an die Primärwicklung anlegen. Hat die Sekundärwicklung doppelt soviel Windungen wie die Primärwicklung, so gibt sie die doppelte Primärspannung ab.

Diese Zusammenhänge haben zu dem Begriff „Windungen pro Volt“ geführt, der vor allem bei der Herstellung von Trafos bedeutsam ist.

Nehmen wir an, daß die Primärwicklung eines Klingeltrafos 2200 Windungen hat und wir an sie die Netzspannung 220 V anlegen. Dann entfällt jeweils 1 V auf 10 Windungen. Die Primärwicklung hat nun 10 Windungen pro Volt.

Diese Angabe sagt allerdings weder etwas darüber aus, wieviel Windungen die Primärspule insgesamt hat, noch, für welche Primärspannung sie bestimmt ist. Wir können dieser Angabe aber entnehmen, wieviel Windungen unsere Sekundärspule benötigt, um dort eine bestimmte Spannung zu erhalten.

Wenn wir sekundär 4 V haben wollen, rechnen wir so: 10 Windungen ergeben 1 V, also ergeben 40 Windungen 4 V. Für 6 V brauchen

wir dann 60 Windungen. Wollen wir beide Spannungen erreichen, so brauchen wir nicht 40 und 60 Windungen, sondern wickeln zu den 40 Windungen noch 20 dazu – dadurch bekommen wir weitere 2 V. Diese 20 Windungen werden mit den 40 Windungen in Serie geschaltet. Abb. 68 zeigt diesen Aufbau.

Daß man beim Trafobau sekundär etwas mehr Windungen pro Volt rechnet als primär (man gibt 10 . . . 20 Prozent zu), hat seine Ursache in den Verlusten der Wicklungen (die ja auch einen Ohmschen Widerstand haben, dessen Wirkung wir mit dem Innenwiderstand bei unserem chemischen Element nach Abb. 30 vergleichen können) und des Eisenkernes. Warum im Eisenkern Verluste entstehen, werden wir noch erfahren.

Das Verhältnis der Primärwindungszahl zur Sekundärwindungszahl wird Übersetzungsverhältnis genannt. Bei einem Trafo mit primär 100 Windungen und sekundär 500 Windungen (die Sekundärspannung ist dann also fünfmal so hoch wie die Primärspannung!) beträgt das Übersetzungsverhältnis 1:5. Ebenso groß wäre es, wenn primär 200 und sekundär 100 Windungen vorhanden wären. Sind dagegen primär 200, sekundär nur 100 Windungen vorhanden, beträgt das Übersetzungsverhältnis 2;1, ebenso, wenn primär 80, sekundär 40 Windungen vorhanden sind usw. Daraus erkennen wir, daß das Verhältnis von Primär- und Sekundärspannung dem Übersetzungsverhältnis gleicht. Wenn wir also das Übersetzungsverhältnis und eine der Spannungen kennen, können wir die andere daraus errechnen.

Wir wollen uns nun das Schaltsymbol für einen Trafo einprägen, und zwar besonders das für einen NF-Trafo mit Eisenkern, wie wir ihn als Klingeltrafo und in der Rundfunktechnik als Netztrafo oder Ausgangsübertrager kennen. Die Wicklungen werden hier nicht, wie wir das bisher machten, als Spule, sondern als schwarze Rechtecke gezeichnet; der dicke Strich deutet den Eisenkern an (Abb. 69). Die Buchstaben für Primär- und Sekundärwicklung müssen nicht daran geschrieben werden. Welche Wicklung für welche Funktion be-

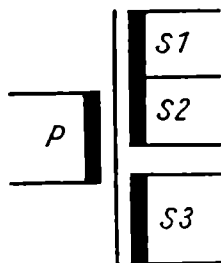


Abbildung 69

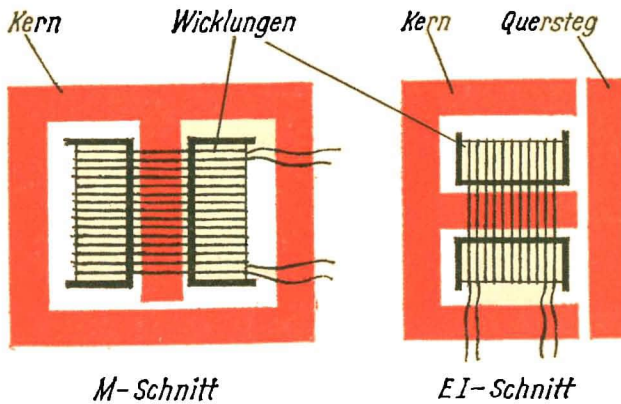


Abbildung 70

stimmt ist, ergibt sich immer aus der Schaltzeichnung des ganzen Gerätes. Man kann ja einen Trafo auch umkehren: Es wäre gleich, ob man an eine Wicklung 100 V anlegt und an der anderen 50 V entnehmen kann, oder ob man an dieser 50 V anlegt und dafür an der ersten Wicklung 100 V entnimmt!

Der Eisenkern des Trafos soll möglichst geschlossen sein. Wie Trafokerne tatsächlich aussehen, zeigt die Abb. 70. Von den verschiedenen gebräuchlichen Formen wollen wir nun die zwei wichtigsten nennen: Den M-Kernschnitt und den EI-Kernschnitt. Beide gibt es in einer nach Größen gestaffelten Typenreihe, deren Maße genormt sind. Die Typenbezeichnung gibt genau an, um welche Kerngröße es sich handelt. Der Kern M 42/15 hat z. B. folgende Maße: Kantenlänge 42 mm, Höhe des Blechpaketes 15 mm. Ähnlich werden EI-Kerne gekennzeichnet. Beim Selbstwickeln von Trafos nach Bauvorschrift müssen wir uns immer an die angegebene Kerngröße halten! Jede Kerngröße hat für das Kraftlinienfeld einen ganz bestimmten magnetischen Widerstand, und danach richtet sich die Berechnung der Windungszahlen. Diese ändern sich also, wenn wir einen Kern anderer Größe verwenden!

Warum besteht ein Trafokern nicht aus massivem Eisen, sondern aus einzelnen, mit dünnem Papier oder Lacküberzug voneinander isolierten Blechen? Es handelt sich dabei um einen Schutz gegen die sogenannten Wirbelströme.

Betrachten wir Abb. 71. Wir denken dabei wieder an den stabförmigen (offenen) Kern unseres Versuchstrafos, auf dessen Stirnfläche wir jetzt sehen. Deutlich ist zu erkennen, daß der Umfang des Kernes gewissermaßen eine Kurzschlußwindung bildet — eine in sich geschlossene Spule mit einer Windung. Im Eisenkern selbst werden

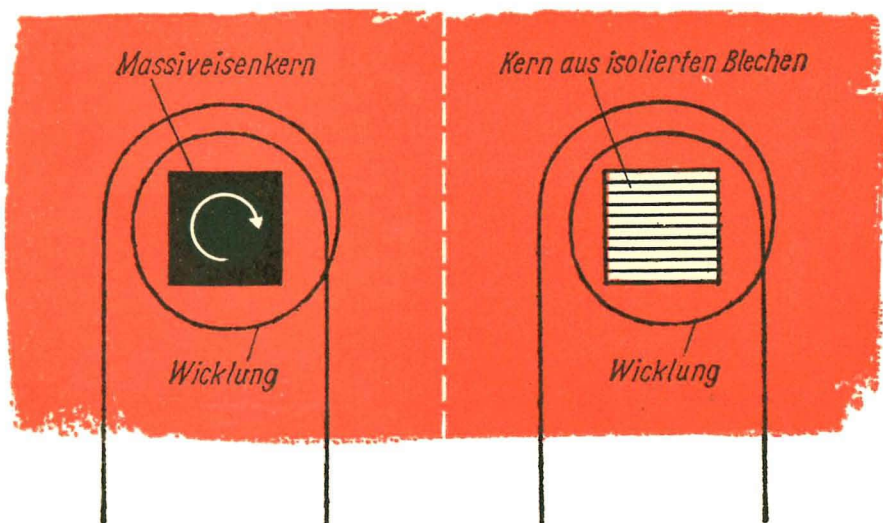


Abbildung 71

Abbildung 72

deshalb ebenfalls Ströme induziert, die im Kern kreisen. Der Kreis-
pfeil deutet das an.

Die Induktionsströme entziehen dem Magnetfeld beträchtliche Ener-
gien und setzen sie im Eisenkern in Wärme um. Um dem zu be-
gegnet, teilt man den Kern in einzelne Bleche auf, wie es Abb. 72
zeigt. Die Verlustströme – man nennt sie Wirbelströme – finden
dann keine geschlossene Strombahn mehr vor.

Die Bleche des Kerns sind gegeneinander isoliert und um so dünner
– der Kern muß um so feiner unterteilt sein –, je höher die Fre-
quenz des Wechselstromes ist, für den wir den Trafo verwenden
wollen.

Da man die Bleche nicht beliebig dünn halten kann, geht man bei
sehr hohen Frequenzen, also im HF-Gebiet, einen anderen Weg.
Man verwendet feines Eisenpulver, das mit keramischen Massen
oder Kunstharzen vermengt und gepreßt wird. Das Bindemittel iso-
liert die einzelnen Körnchen voneinander, trotzdem bleibt die
magnetische Eigenschaft erhalten. Dieses Kern-Material wird als
HF-Eisen (im Hinblick auf seine Verwendung) bezeichnet. Ganz
ähnlich aufgebaut sind die Ferrite genannten magnetischen Werk-
stoffe. Mit ihnen werden wir später noch zu tun haben. Wir begeg-
nen ihnen in der Ferritstabantenne und den Ferritpulkernen
von HF-Spulen.

Nicht immer haben die HF-Überträger Eisenkerne; hier wird oft die
magnetische Kopplung mit Luft als magnetischem Leiter angewen-
det. Soweit Kerne benutzt werden, sind sie stets aus Ferritmaterial-

Abbildung 73



lien. Man stellt sie im Schaltbild anders dar als NF-Trafos; ihr Schaltsymbol (Abb. 73) ähnelt der von uns bisher benutzten Darstellungsform. Soweit ein Kern vorhanden ist, wird er mit der punktierten Linie angegeben.

Ferritkerne können recht verschiedene Formen haben, vom kleinen Stabkern mit Gewinde, einschraubbar in den Spulenträger, über EI-ähnliche Formen bis zum Topfkern, der — wie sein Name schon sagt — die Spule allseitig umschließt. Im Schnitt ähnelt ein Topfkern der EI-Form. Abwandlungen dieser Form sind der Schalen- und der Haspelkern.

Wie sich die Spannungen der einzelnen Wicklungen zueinander verhalten, ist uns bekannt. Wie sieht das aber mit den Strömen und den Leistungen aus? Beginnen wir mit der Leistung. Der Trafo ist keine Energiequelle, aber er ist auch kein Verbraucher — vorausgesetzt, wir sorgen durch richtigen Aufbau (Vermeidung von Wirbelströmen und von Stromwärme in den Wicklungen infolge zu dünner Drähte) dafür, daß er keine nennenswerten Verluste hat. Es kann also weder mehr noch weniger Leistung sekundär herauskommen, als wir primär hineingeben.

Da sich die Leistung aus Stromstärke und Spannung errechnet, muß uns, wenn wir sekundär nur die Hälfte der Primärspannung entnehmen, dafür die doppelte Stromstärke zur Verfügung stehen. Setzen wir die Spannung sekundär herauf, wird die maximal entnehmbare Stromstärke um so geringer, je höher die Sekundärspannung ist. Sind mehrere Sekundärwicklungen vorhanden, so ergibt die Summe der von ihnen entnommenen Leistungen die von der Primärwicklung aufgenommene Leistung. Unseren bekannten Merksatz: „Die Spannungen verhalten sich zueinander wie die Windungszahlen“ können wir also ergänzen durch den zweiten Merksatz:

„Die Ströme verhalten sich zueinander umgekehrt wie die Windungszahlen.“

Wie steht es nun mit den Widerständen der Wicklungen?

Der induktive Scheinwiderstand

Wir müssen zunächst feststellen, welchen Widerstand eine einzelne Trafowicklung hat.

Wenn wir einen Trafo nur mit einer Wicklung anschließen, können wir die anderen Wicklungen als nicht vorhanden ansehen. Dann bleibt praktisch eine Spule übrig, die wir bereits als Selbstinduktionsspule kennen.

Wir wollen nun einen Versuch mit einem Klingeltrafo machen. Seine 8-V-Wicklung soll die Selbstinduktion sein; die 220-V-Wicklung schließen wir nicht an.

Messen wir zunächst einmal den Ohmschen Widerstand der 8-V-Wicklung, indem wir die Wicklung an eine Batterie mit bekannter Spannung anschließen (ein kleiner 2-V-Trockenakku eignet sich gut!) und mit einem Amperemeter den durchfließenden Strom sowie gleichzeitig mit einem Voltmeter die Spannung an der Wicklung messen.

Es wird ein verhältnismäßig starker Strom fließen (deshalb den Versuch nicht zu lange durchführen, sonst wird die Wicklung heiß!), und wegen des Innenwiderstandes der Batterie werden an der Wicklung nicht mehr ganz 2 V stehen. Auf die Angabe auf der Batterie können wir uns deshalb nicht verlassen.

Aus dem gemessenen Strom- und Spannungswert läßt sich der Widerstand der Wicklung nach dem Ohmschen Gesetz errechnen. Es ist ihr Gleichstromwiderstand oder Ohmscher Widerstand – wir haben ja mit Gleichstrom gemessen.

Gibt es noch einen zweiten Widerstand? Wir wiederholen den Versuch, indem wir an Stelle der Batterie einen zweiten Klingeltrafo oder einen anderen Trafo mit 4...6 V benutzen. Die Meßinstrumente müssen jetzt natürlich für Wechselstrom geeignet sein. Erstaunt werden wir feststellen, daß ein weit geringerer Strom fließt als zuvor – nach unserer Rechnung ergibt sich überraschend ein weit höherer Widerstand der Wicklung!

Wie war das doch mit der Selbstinduktion? Beim Einschalten kann der Strom nicht sofort die volle Höhe erreichen; er steigt infolge der Selbstinduktionswirkung (Seite 105 bis 107) erst allmählich an, und zwar um so langsamer, je mehr Windungen die Spule hat, also je höher ihre Selbstinduktion ist.

Wie ist das nun bei Wechselstrom? Die an der Wicklung liegende Spannung steigt langsam an, und mit ihr nach dem Ohmschen Gesetz der Strom? Nein! Er kann nicht so schnell ansteigen wie die Spannung; die Selbstinduktion verhindert das!

Wenn die Wechselspannung ihren Maximalwert erreicht hat, ist der

Strom noch nicht so weit angestiegen, wie das nach dem Ohmschen Gesetz auf Grund des Wicklungswiderstandes zu erwarten wäre. Doch nun beginnt die Spannung wieder abzufallen — der Strom hat also keine Zeit, den Höchstwert zu erreichen, er bleibt geringer, als er beim Anlegen einer Gleichspannung wäre —, die Wicklung hat für Wechselstrom scheinbar einen größeren Widerstand!

Man spricht hierbei tatsächlich vom Scheinwiderstand der Wicklung, manchmal auch von ihrem Wechselstromwiderstand, was für uns das gleiche bedeuten soll.

Nun wissen wir, wie sich das unterschiedliche Ergebnis zwischen den beiden Messungen mit Gleichstrom und Wechselstrom erklärt: Wir haben zuerst den Ohmschen Widerstand, dann den Scheinwiderstand gemessen!

Es hat in der Rundfunktechnik große Bedeutung, daß der Scheinwiderstand nicht nur von der Windungszahl der Spule — oder exakt ausgedrückt, von ihrer Induktivität — abhängt, sondern auch von der Frequenz des Wechselstromes. Er steigt mit steigender Frequenz. Das ist leicht einzusehen: Konstant bleibt die Selbstinduktion und mit ihr auch die Schnelligkeit des Stromanstiegs beim Anlegen der Spannung an die Spule. Wenn aber die Frequenz des Wechselstromes steigt, so erreicht die Spannung ihren maximalen Wert schneller als zuvor, aber der Strom kann nicht schneller steigen und wird daher — bevor die Spannung wieder sinkt — noch geringere Höhe erreichen als zuvor, und dies, obwohl die Spannung gleichgeblieben ist. Das bedeutet aber einen Anstieg des Scheinwiderstandes!

Kehren wir zum Transformator zurück. Üblicher Weise hält man die Induktivität der Primärwicklung so hoch, daß — wenn die Sekundärwicklungen nicht angeschlossen sind — nur ein ganz minimaler Primärstrom fließt (die Primärspule hat so viele Windungen). Dann ist auch die vom Trafo aufgenommene Primärleistung sehr klein.

Schließen wir jetzt an eine Sekundärwicklung einen Verbraucher an, so entnimmt dieser dem Trafo einen Sekundärstrom und damit eine Sekundärleistung. Sie wird aus dem Energieinhalt des magnetischen Kraftfeldes erzeugt. Die Energie, die das Kraftfeld nun an die Sekundärwicklung abgibt, geht jedoch für die Selbstinduktion in der Primärwicklung verloren — deren Selbstinduktion wird geringer, und dies bedeutet, daß sich ihr Scheinwiderstand verringert! Die Primärwicklung nimmt jetzt einen höheren Strom und damit höhere Leistung auf — die Leistung, die wir als Sekundärleistung entnehmen!

Unsere Erklärung vereinfacht diese Zusammenhänge, sie sind in Wirklichkeit komplizierter: Es treten zeitliche Verschiebungen zwi-

schen der Spannungs- und der Stromkurve auf – sogenannte Phasenverschiebungen. Wir wollen diese Zusammenhänge aber im Rahmen dieses Buches übergehen.

Hier noch ein weiteres Gedankenexperiment. Wie wir wissen, hat jede Stromquelle einen inneren Widerstand; wir haben das bei den Batterien kennengelernt.

Nun wollen wir uns eine Wechselstromquelle vorstellen, die eine Spannung von 10 V abgibt und einen inneren Widerstand von 10Ω hat. Sie kann also höchstens 1 A Strom abgeben. An sie schließen wir einen Trafo an, der primär einen Scheinwiderstand von 10Ω haben soll. Im ganzen Primärstromkreis sind also 20Ω Widerstand vorhanden, und es fließt ein Primärstrom von 0,5 A. Daraus ergibt sich, daß an der Primärwicklung 5 V stehen (die restlichen 5 V fallen am Innenwiderstand der Stromquelle ab!).

Die Primärwicklung soll 200 Windungen haben; auf dem Trafo sind weiter zwei Sekundärwicklungen vorhanden, eine mit 100 Windungen und eine mit 400 Windungen. An derjenigen mit 100 Windungen können wir 2,5 V abnehmen, an derjenigen mit 400 Windungen demzufolge 10 V. Die aufgenommene Primärleistung wäre $5 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ A} = 2,5 \text{ W}$, ebenso groß wäre die entnehmbare Sekundärleistung.

Wir schließen die 2,5-V-Wicklung an einen Verbraucher an, der gerade 1 A aufnimmt und damit die Sekundärleistung von 2,5 W. Wie groß ist sein Widerstand? Nach dem Ohmschen Gesetz ist

$$R = \frac{U}{I} = \frac{2,5}{1} = 2,5 \Omega.$$

Betrachten wir die andere Wicklung. Sie gibt 10 V ab, für 2,5 W Sekundärleistung bedeutet das 0,25 V (denn $10 \cdot 0,25 = 2,5$!). Ein Ver-

braucher, der dieser Wicklung 2,5 W entnimmt, hätte also $\frac{10}{0,25} = 40 \Omega$.

Nun sehen wir uns das Verhältnis der Widerstände der Wechselspannungsquelle und der Verbraucher an. Die Wechselspannungsquelle gibt an den Trafo 5 V ab; ihr Innenwiderstand beträgt 10Ω . Zunächst das Übersetzungsverhältnis: Primär zur ersten Sekundärwicklung = 2:1, zur zweiten Sekundärwicklung = 2:4 oder 1:2. Ebenso übersetzen sich die Spannungen. Zur ersten Sekundärwicklung also wie 2:1 = 5:2,5 V, und zur zweiten wie 1:2 = 5:10 V. Der „Quellenwiderstand“ wird aber zum ersten Verbraucher übersetzt mit $10 \Omega : 2,5 \Omega = 4:1$, zum zweiten Verbraucher mit $10 \Omega : 40 \Omega = 1:4$!

Wir sehen an diesem Rechenbeispiel, daß man hier von einer Widerstandstransformation sprechen kann (wenn der Fachmann von einer Impedanztransformation spricht oder einer Impedanzwandlung, so meint er etwas Ähnliches, denn die Impedanz hängt eng mit unserer Erklärung des Scheinwiderstands zusammen).

Die Scheinwiderstände zweier Trafowicklungen verhalten sich zueinander wie ihre Induktivitäten. Denken wir an die Reihenschaltung zweier Spulen (wenn wir die Windungszahl einer Wicklung verdoppeln, entspricht das der Reihenschaltung zweier Spulen gleicher Windungszahl!) und betrachten wir nochmals Abb. 55.

Wie wir wissen, steigt die Induktivität (und damit der Scheinwiderstand bei einer bestimmten Frequenz) mit dem Quadrat der Windungszahl. Doppelte Windungszahl bedeutet also doppelte Spannung, vierfache Induktivität, vierfacher Scheinwiderstand (auch der der Quelle scheint um das Vierfache erhöht), halber Strom, gleiche Leistung. Für dreifache Windungszahl sinngemäß dreifache Spannung, neunfache Induktivität, ein Drittel des Stromes, daher wieder gleiche Leistung; der Scheinwiderstand der Quelle erscheint ebenfalls mit seinem neunfachen Wert als Scheinwiderstand der Sekundärspule.

Das klingt alles sehr kompliziert, ist aber bedeutend einfacher, als es zunächst aussieht. Diese Zusammenhänge sind aber für uns sehr wichtig. Wenn wir sie erst verstanden haben, wird uns das Verständnis für ein Bauteil leichtfallen, das wir eigentlich schon kennen, hier aber mit seinem zweiten, vom Fachmann häufiger benutzten Namen nochmals vorstellen wollen: Die Selbstinduktionsspule oder Drosselspule – kurz Drossel genannt.

Die Drossel besteht nur aus einer einzigen Wicklung mit vielen Windungen (Windungszahl je nach der Frequenz, bei der sie benutzt werden soll) und einem Kern, der – wieder je nach Frequenzbereich – ein Eisenkern oder ein HF-Eisenkern ist. Für Frequenzen oberhalb einiger MHz wird oft auf den Kern verzichtet; die Drossel besteht dann nur noch aus einigen frei aufgerollten Drahtwindungen, was sich auch in ihrem Schaltsymbol ausdrückt (Abb. 74). NF-Drosseln mit Eisenkernen sehen ebenso aus wie Trafos, aber haben nur zwei Anschlüsse. HF-Drosseln werden wie HF-Übertrager dargestellt. Haben sie keinen Kern, so läßt man die punktierte Linie weg.

Woher nun der Name Drosselspule? Ganz einfach: Eine solche Spule läßt Gleichstrom nahezu ungehindert durch, wenn man nur dafür

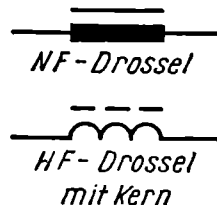


Abbildung 74

sorgt, daß der Drahtwiderstand (Ohmscher Widerstand der Wicklung) recht gering bleibt. Wechselstrom dagegen muß den Scheinwiderstand überwinden, der durch geeignete Konstruktion allerdings sehr hoch gemacht werden kann. Er ist außerdem um so höher, je höher die Frequenz des Wechselstromes ist.

Wechselstrom kann man mit einer solchen Spule also abdrosseln oder — je nach Frequenz — sogar völlig sperren (wir wollen uns gleich einprägen, daß die Sperrwirkung sehr von der Frequenz abhängt, man hier also nicht schematisch zwischen Gleich- und Wechselstrom unterscheiden kann!).

Gleichstrom läßt diese Spule fast ungehindert durch.

Als Drosseln bezeichnet man daher nur solche Spulen, die nach ihrer Konstruktion und Schaltung im fertigen Gerät die Aufgabe des Abdrosselns von Wechselströmen haben.

Die Induktivität von Drosselspulen wird in den uns schon bekannten Maßen Henry (H), mH oder μH angegeben. Bei Drosseln für den NF-Bereich, die Eisenkern und verhältnismäßig große Drahtlängen (hohe Windungszahlen) haben — Induktivität meist um $1 \dots 10 \text{ H}$ —, findet man mitunter auch noch zusätzlich die Angabe des Ohmschen Widerstandes der Wicklung. Außerdem gilt für diese Drosseln eine bestimmte maximale Gleichstrombelastung, die nicht überschritten werden soll. Sonst könnte es geschehen, daß der Eisenkern magnetisch gesättigt ist und keine weiteren Kraftlinien mehr aufnehmen kann. Die Folge wäre dann ein starkes Absinken der Induktivität, deren genauer Wert (das sei hier nur nebenbei erwähnt) in jedem Fall von der Stärke einer solchen Gleichstromvormagnetisierung abhängt.

Es kommt also vor, daß in der gleichen Leitung sowohl Gleichstrom als auch Wechselstrom gleichzeitig fließen. Wie ist das möglich? Denke n wir an den Leitungsmechanismus: Wenn in einer Leitung ein Gleichstrom und gleichzeitig ein schwächerer Wechselstrom fließen, dann strömen die Leitungselektronen zwar in einer Richtung — dem Gleichstrom entsprechend — aber mit einer im Takt der Wechselspannung rhythmisch schneller und langsamer werdenden Geschwindigkeit. Man sagt dann, dem Gleichstrom ist ein Wechselstrom überlagert.

Wir können den Wechselstromversuchsdynamo aus Abb. 61 auch in Serie mit einer Batterie schalten. Die eine Halbwelle der Wechselspannung der Batterie wird dann entgegengesetzt gepolt sein, die andere mit ihr gleichsinnig. Während der einen Halbwelle findet dann eine Subtraktion, während der anderen Halbwelle eine Addition statt. Aus dieser Vorstellung heraus können wir uns den Begriff der Überlagerung zweier Ströme recht gut verständlich machen.

Der Kondensator (Der kapazitive Scheinwiderstand)

Ein weiteres sehr wichtiges Bauelement ist der Kondensator. Dazu wieder ein Experiment, das wir allerdings zunächst einmal in Gedanken durchführen müssen, weil der Effekt des praktischen Experiments hier so schwach wäre, daß wir ihn mit unseren Mitteln nicht nachweisen könnten.

Abb. 75 zeigt zwei Metallplatten, die wir mit einem geringeren Luftzwischenraum aufgestellt haben. Da sie sich nicht berühren, kann zwischen ihnen kein Strom fließen.

Schließen wir beide Platten einmal an unsere Batterie an, wie das in Abb. 75 schon angedeutet ist. Wir wissen: Am negativen Batteriepol herrscht Elektronenüberfluß, dort stauen sich die Elektronen. Am Pluspol herrscht Elektronenmangel.

Die Metallplatten sind zunächst elektrisch neutral, sie enthalten wie jedes Metall eine Anzahl freier Elektronen. Die Batterie saugt nun von der mit Plus verbundenen Platte die vorhandenen freien Elektronen ab; diese Platte wird positiv geladen. Die andere Platte bekommt vom Elektronen-„Stau“ des Minuspoles der Batterie ein entsprechendes Quantum negativer Ladung; zwischen beiden Platten steht jetzt die Batteriespannung.

Nun trennen wir die beiden Verbindungen zur Batterie auf. Mit speziellen Meßgeräten könnten wir jetzt feststellen, was wir uns schon denken können: Die Spannung zwischen beiden Platten bleibt bestehen! Auf der negativen Platte herrscht nach wie vor Elektronenüberschuß (wohin sollten diese Elektronen auch abwandern, da die Platte keine Verbindung hat!), auf der positiven Platte herrscht

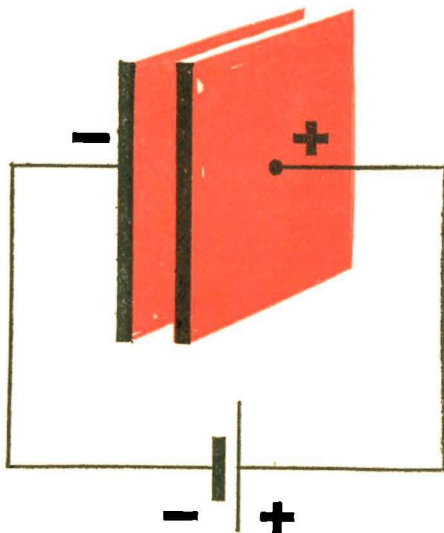


Abbildung 75

Elektronenmangel (woher sollte diese Platte die von der Batterie abgezogenen Elektronen ergänzen!).

Was würde geschehen, wenn wir beide Platten miteinander direkt verbinden, etwa mit einem Drahtstück? Die überschüssigen Elektronen der negativen Platte wandern zur positiven, ergänzen dort die fehlenden freien Elektronen, und beide Platten sind wieder elektrisch neutral. Hätten wir in das Drahtstück ein Amperemeter eingeschaltet, so hätten wir einen kurzen Stromstoß bemerkt: Er rührt von den Ausgleichselektronen her, die von der negativen zur positiven Platte strömen. Dieses einfache Gebilde ist ein Kondensator! Bevor wir uns mit ihm weiter beschäftigen, lernen wir das Schalt-symbol für den Kondensator kennen, damit wir unsere nächsten Skizzen gleich recht übersichtlich zeichnen können (Abb. 76). Dieses Symbol ist sehr einprägsam; die beiden Querstriche deuten die beiden Metallplatten an.



Abbildung 76

Der Kondensator ist also für die von der Batterie gelieferte Gleichspannung so etwas wie ein Elektrizitätsspeicher. Leider ist er das nicht im Sinne eines Akkus – wir können ihn also nicht etwa als Stromquelle benutzen, denn auf den Platten finden nur verhältnismäßig wenige Elektronen Platz, der „Elektrizitätsspeicher“ wäre also sehr schnell erschöpft. Wie viele Elektronen (welche Elektrizitätsmenge) wir auf ihm unterbringen können, hängt von zwei Umständen ab: Einmal von der Plattengröße, zum anderen von der Spannung, mit der wir den Kondensator aufladen. Hat die Batterie in Abb. 75 eine hohe Spannung (hohen „Druck“, wenn wir an unseren früheren Hilfsbegriff der „Elektronenpumpe“ denken), so können auf die negative Platte mehr Elektronen gepreßt, von der positiven mehr abgesaugt werden. Also müßten wir den Kondensator als „Elektrizitätsspeicher“ recht groß machen und ihn mit hoher Spannung aufladen. Und trotzdem eignet sich der Kondensator nicht als Stromquelle. Denn wenn wir ihn entladen, sinkt die Spannung zwischen beiden Platten um so mehr ab, je mehr Elektronen von der einen Platte zur anderen gewandert sind – je weiter der Ausgleichsvorgang fortgeschritten ist. Wir könnten also bei der Stromentnahme nicht mit konstanter Spannung und daher auch nicht mit konstantem Strom rechnen.

Tatsächlich erfolgt die Aufladung des Kondensators, sobald wir die Batterie entsprechend Abb. 75 anschließen, zunächst mit hohem

Strom – die Platten sind ja noch ungeladen. Je mehr sie aufgeladen sind, um so größer ist beispielsweise auf der negativen Platte der Elektronen-„Stau“, gegen den die Batterie aufkommen muß – um so größer ist auch die Spannung zwischen beiden Platten und damit um so geringer die Spannungsdifferenz zwischen dem Kondensator und der Batterie. Um so geringer ist aber mit fortschreitender Ladung auch der Aufladestrom.

Der Aufladestromstoß ist also zu Anfang sehr kräftig und nimmt dann allmählich ab. Ebenso ist es bei der Entladung, wenn wir die Kondensatorplatten verbinden: Zunächst herrscht eine hohe Spannungsdifferenz zwischen beiden Platten, und im ersten Moment fließt ein hoher Entladestrom. Je mehr die Entladung fortschreitet, desto geringer wird die Spannung zwischen den Platten, desto geringer also auch der Entladestrom.

Versuchen wir zunächst einmal, das „Fassungsvermögen“ unseres Kondensators recht groß zu machen. In der Industrie wird dabei ein Kniff angewendet: Als Platten nimmt man Metallfolien. Als Isolierung dient nicht Luft, sondern es wird ein Papierband zwischengelegt und das Ganze zu einem Wickel zusammengerollt (Abb. 77). Die entstandene Rolle tränkt man mit einem Isoliermittel (früher Paraffin, heute meist Kunstharz) und bringt sie entweder in einem Metallbecher unter (Becherkondensator) oder in einem rollenförmigen Isoliergehäuse (Rollenkondensator).

Neuerdings geht man, um die Kondensatoren bei gleichem „Fassungsvermögen“ kleiner zu halten, noch einen Schritt weiter: Man verzichtet auf die Metallfolien und bringt auf dem Papierband selbst

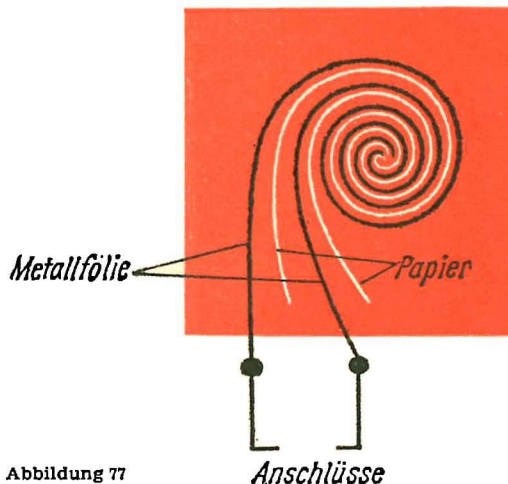


Abbildung 77

eine dünne Metallschicht auf. Zwei solcher zusammengerollter Bänder ergeben dann ebenfalls einen Kondensator.

Mit jedem Metallbelag ist ein Anschlußdraht verbunden, der aus der Vergußmasse herausgeführt wird. Die Papierzwischenlage macht man so dünn wie möglich – auch dadurch wird das „Fassungsvermögen“ gesteigert. Sie darf jedoch nicht zu dünn sein, da sonst bei hohen Spannungen zwischen den Metallbelägen ein Spannungsdurchschlag erfolgen kann – die Spannung sucht sich dann in Form eines Funkenüberschlages einen Weg durch die Isolierung. Der Kondensator wird so durch Kurzschluß zwischen beiden Belägen zerstört. Die für jeden Kondensator angegebene höchstzulässige Spannung darf deshalb niemals überschritten werden!

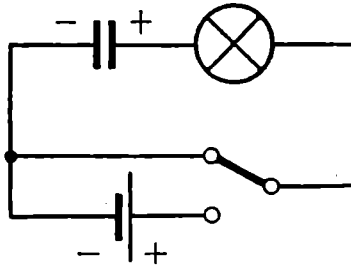
Für das „Fassungsvermögen“ wird natürlich auch wieder ein Maß gebraucht. Der Fachausdruck für das „Fassungsvermögen“ lautet Kapazität, und dieser Begriff wird manchmal auch für den Kondensator selbst benutzt. Gemessen wird die Kapazität in Farad (benannt nach dem englischen Physiker Faraday). Allerdings ist die Maßeinheit Farad (abgekürzt F) für die Praxis viel zu groß. Sie wurde nämlich zu einer Zeit festgesetzt, als man mit der Kapazität noch nichts Rechtes zu beginnen wußte. Heute benutzt man nur millionstel Teile davon als Maße: $1 \text{ F} = 1\,000\,000 \mu\text{F}$ (Mikrofarad) – aber diese Gleichung hat wenig praktischen Wert für uns. Wichtiger sind die folgenden: $1 \mu\text{F} = 1000 \text{ nF}$ (Nanofarad), $1 \text{ nF} = 1000 \text{ pF}$ (Pikofarad).

Die beiden Metallplatten aus Abb. 75 haben vergleichsweise, wenn wir sie uns etwa $10 \times 10 \text{ cm}$ groß denken und ungefähr 1 mm voneinander entfernt aufstellen, eine Kapazität von knapp 100 pF . Eine Kapazität von $1 \mu\text{F}$ ($= 1\,000\,000 \text{ pF}$) hat dagegen schon eine wesentlich größere „Speicherfähigkeit“. Wie gering sie trotzdem noch ist im Vergleich zu dem Gewohnten aus unseren früheren Versuchen, werden die folgenden Versuche zeigen. Wir werden dann auch verstehen, warum wir diese Versuche nicht mit dem einfachen Plattenkondensator nach Abb. 75 durchführen konnten.

In einem Einzelteilgeschäft kaufen wir uns einen Kondensator für $1000 \mu\text{F}$ (notfalls reichen auch $500 \mu\text{F}$) und für eine Spannung von wenigstens 12 V . Kondensatoren mit so großen Kapazitäten sind stets Elektrolytkondensatoren (der Fachmann kürzt wieder ab: Elkos).

Wodurch sich die Elektrolytkondensatoren von Rollkondensatoren unterscheiden, erfahren wir in einem späteren Kapitel. Vorläufig müssen wir nur darauf achten, daß auf diesen Kondensatoren die Anschlüsse mit $+$ und $-$ gekennzeichnet sind. Wir dürfen sie niemals falsch polen, sondern müssen immer darauf achten, daß die

Abbildung 78



Batteriespannung bei unseren Versuchen stets mit richtiger Polarität anliegt, sonst können Elkos leicht Schaden nehmen. Bei Rollkondensatoren sind dagegen beide Anschlüsse gleichwertig. Hat unser Elko nur einen Anschluß, so ist dies der Pluspol; der Minuspol wird vom Metallgehäuse gebildet.

Wir bauen jetzt die Versuchsschaltung nach Abb. 78 auf. An ihr wollen wir das bisher zur Aufladung und Entladung Gesagte nachprüfen.

Wenn der Umschalter in der oberen Stellung ist, so ist die Batterie abgeschaltet, und die Lampe — da der Kondensator von sich aus keine Spannung erzeugen kann — dunkel.

Nun schalten wir den Schalter nach unten. Im Moment des Umschaltens bemerken wir ein kurzes Aufblitzen des Lämpchens (für das wir am besten eine Fahrrad-Rückstrahlerbirne 6 V/0,05 A verwenden); danach verlischt es sofort wieder. Jetzt schalten wir den Schalter in die obere Stellung zurück. Wieder blitzt das Lämpchen kurz auf — der Entladestromstoß wurde nachgewiesen.

Wir können die Batteriespannung nun verringern und werten feststellen, daß das Aufblitzen dann schwächer ist — die gespeicherte Elektrizitätsmenge ist geringer.

Haben wir mehrere Kondensatoren, so können wir auch an Stelle des 1000- μ -Kondensators größere oder geringere Werte einsetzen. Wir werden dann feststellen, daß mit geringerer Kapazität auch ein schwächeres Aufblitzen zu verzeichnen ist. Wird der Wert zu gering, so sehen wir gar kein Aufleuchten — die Elektrizitätsmenge reicht nicht mehr aus, den Glühfaden zum Glühen zu bringen. Daß die Auf- und Entladung aber trotzdem noch stattfindet, können wir recht gut mit dem Kompaßgalvanometer nachweisen, wenn wir es an Stelle der Lampe einschalten. Wir bemerken dann (ausreichend Windungen auf dem Kompaß vorausgesetzt) noch bei Werten um 50 bis 100 μ F ein deutliches Rucken der Nadel. Aus der Richtung ihrer Auslenkung ersehen wir außerdem, daß die Stromrichtung bei der Aufladung gerade umgekehrt wie bei der Entladung ist — das war ja auch nicht anders zu erwarten (Elektronenflußrichtung in den Kondensatorzuleitungen bei der Auf- und der Entladung!).

Nun das Formelzeichen für den Kondensator (genauer: für die Kapazität): Es ist das C. In Schaltbildern können wir also Kondensatoren mit C 1, C 2, C 3 usw. numerieren, ebenso wie wir das bei Widerständen mit R 1, R 2, R 3 und bei Induktivitäten mit L 1, L 2 usw. getan hatten.

Wie verhält es sich mit der Serien- und Parallelschaltung von Kondensatoren?

Betrachten wir zunächst die Parallelschaltung (Abb. 79). Stellen wir uns in der Abb. 75 zwei gleiche Plattenkondensatoren parallelgeschaltet vor: Wir erhalten dasselbe Ergebnis, als hätten wir einen einzigen Kondensator mit doppelter Plattengröße. Die Kapazitäten parallelgeschalteter Kondensatoren addieren sich also. Das gilt auch, wenn wir drei oder noch mehr Kondensatoren parallel schalten: dann addieren sich alle Werte.

Bei der Serienschaltung verhält es sich etwas komplizierter. Abb. 80 zeigt die Schaltung und auch die Formel dafür, nach der die gesamte Kapazität C_{ges} aus den beiden in Serie geschalteten Teilkapazitäten C 1 und C 2 errechnet wird. Sind beide Kapazitäten gleich, so ist die resultierende Kapazität C_{ges} gleich der halben Kapazität eines Einzelkondensators.

Diese Formel gleicht der für die Parallelschaltung von Widerständen. Wir müssen hier jedoch beachten: Bei Kondensatoren wird die Kapazität durch die Serienschaltung verkleinert, durch die Parallelschaltung vergrößert, also genau umgekehrt als bei Widerständen!

Wir brauchen keine Formeln zu lernen, müssen uns aber merken, wie ein Plattenkondensator aussieht (Abb. 75) und was in ihm vorgeht. Dann können wir uns jederzeit daran erinnern, ob die Parallelschaltung zweier solcher Kondensatoren die Kapazität (das „Fassungsvermögen“ für die Elektronen!) vergrößert oder verkleinert. Und dann wissen wir auch, wann die Formel in der Abb. 80 gilt und wann wir nur die Kapazitätswerte zu addieren brauchen.

Man könnte jetzt fragen: Ja, funktioniert denn die Serienschaltung von Kondensatoren überhaupt? Die mittlere Leitungsverbindung in

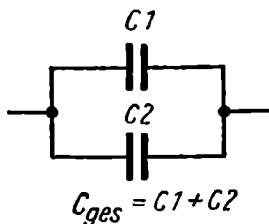


Abbildung 79

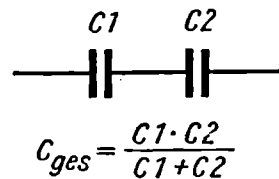


Abbildung 80

der Abb. 80 hat doch keinerlei Verbindung mit den äußeren Anschlüssen dieser Kondensatorkombination mehr? Nun, experimentell läßt sich das mit der Anordnung nach Abb. 78 sehr schnell zeigen:

Wir schalten zwei 1000- μ -Kondensatoren in Serie (wenn wir Elkos verwenden, müssen wir den Pluspol des einen mit dem Minuspol des anderen verbinden!) und wiederholen den Versuch. Ergebnis: Die Lampe blitzt auf, und zwar gerade so hell, als hätten wir den Versuch mit einem 500- μ -F-Kondensator durchgeführt!

Damit ist bewiesen, daß die Serienschaltung klappt – warum das so ist, wissen wir noch nicht. Die Erklärung ist aber einfach: Wenn wir die Reihenschaltung so anschließen, wie Abb. 81 zeigt, dann herrscht auf der linken Platte von C 1 ein Elektronenüberschuß. Wir wissen aber, daß sich gleichnamige Ladungen abstoßen. Die überzähligen Elektronen auf der negativen Platte stoßen die vorhandenen Elektronen der dicht benachbarten positiven Platte ab – sie drängen sie gewissermaßen aus dem Kondensator hinaus! Diese Platte wird damit positiv, die verdrängten Elektronen wandern zur negativen Platte von C 2, dort werden sie von der positiven Ladung der rechten Platte von C 2 – die ja von der Batterie positiv geladen wird – angezogen. Bei der Aufladung findet also auch im mittleren Leitungsstück zwischen C 1 und C 2 ein Stromfluß statt! Ebenso ist es bei der Entladung: Die Elektronen im mittleren Leitungsstück fließen wieder dahin zurück, von wo sie bei der Aufladung herkamen – zur positiven Platte von C 1.

Wie verhält sich ein Kondensator bei Wechselstrom? Dazu machen wir einen Versuch nach Abb. 82. Wir brauchen wieder einen Kondensator mit etwa 500 μ F Kapazität. Wenn ein Elko verwendet wird, kann der Versuch nur kurzzeitig durchgeführt werden, denn Elkos dürfen eigentlich nur mit Gleichspannung betrieben werden. Für einige Sekunden überstehen sie unseren Versuch aber ohne Schaden.

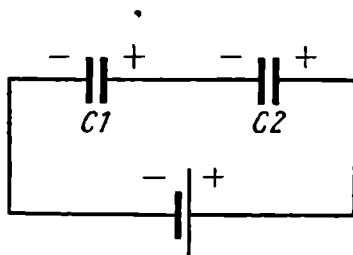


Abbildung 81

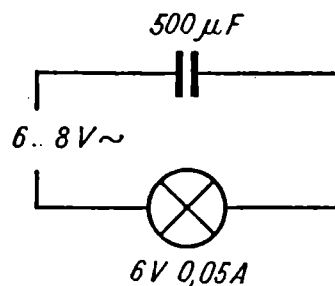


Abbildung 82

Wir haben jetzt lediglich die Batterie unseres Versuches aus Abb. 78 durch eine Wechselspannungsquelle ersetzt. Hierfür eignet sich gut ein Klingeltransformator oder ein Radio-Heiztransformator.

Wir stellen dabei fest, daß die Lampe jetzt ständig brennt. Das ist merkwürdig, denn außer dem Ladestromstoß kann doch über den Kondensator kein ständiger Strom fließen? Sollte er durchgeschlagen sein?

Ersetzen wir die Wechselspannungsquelle – den Trafo – nochmals durch die Batterie. Jetzt stellen wir den einmaligen Stromstoß beim Auf- und beim Entladen wieder fest. Sollte der Kondensator für Wechselspannung durchlässig sein?

Wir überlegen uns, wie die Aufladung vor sich ging. Für eine gewisse Zeit – solange, bis der Kondensator voll geladen war – floß Strom. Das ist jetzt auch bei Wechselstrom der Fall.

Wir nehmen an, daß in der Abb. 82 die erste Halbwelle der Wechselspannung mit Minus am rechten Kondensatorenanschluß auftritt. Der Ladestrom beginnt zu fließen. Bevor der Kondensator aber voll geladen ist, hat der Wechselstrom seine Richtung umgekehrt – die soeben rechts in den Kondensator „hineingepumpten“ Elektronen werden also sofort wieder abgezogen und dafür werden links Elektronen „eingepumpt“. Jetzt fließt ein Ladestrom in umgekehrter Richtung. Wieder kehrt, bevor der Kondensator voll geladen ist, die Wechselspannung ihre Richtung um – der Kondensator wird erneut umgeladen. Und so geht das Geschehen weiter – es fließt ein ständiger Ladestrom! Das ist der Grund, warum die Lampe ständig leuchtet. Der Kondensator läßt scheinbar den Wechselstrom durch; wir können also tatsächlich vereinfachend sagen: Ein Kondensator ist für Wechselstrom durchlässig, während er Gleichstrom sperrt (abgesehen von dem kurzen Ladestromstoß!).

Um einen echten Stromfluß durch das Dielektrikum des Kondensators (so wird die Isolierung zwischen den Platten genannt) handelt es sich also nicht, jedoch tritt diese Erscheinung nach außen hin so auf. Wir können uns aber schon vorstellen, daß dieser Stromfluß um so geringer ist, je kleiner die Kapazität ist. Bei kleinerer Kapazität ist ja der Kondensator schneller geladen, und gegen Ende der Ladung läßt der Ladestrom, wie wir wissen, immer mehr nach.

Wir können auch das experimentell beweisen: Verwenden wir für den Versuch in Abb. 82 einen kleineren Kondensator (etwa $100 \mu\text{F}$), so brennt die Lampe merklich dunkler. Bei wesentlich kleinerem Wert ist der Stromfluß so schwach, daß die Lampe gar nicht mehr brennt. Der Kondensator wirkt also bei Wechselstrom wie ein scheinbarer Widerstand – er hat ebenfalls einen Scheinwiderstand! Da wir diesen Begriff bereits von der Induktivität her kennen, müs-

sen wir in Zukunft zwischen dem induktiven Scheinwiderstand und dem kapazitiven Scheinwiderstand unterscheiden.

Der Scheinwiderstand unseres Kondensators steigt mit geringerer Kapazität. Bei der Induktivität war es umgekehrt; deren Scheinwiderstand fiel mit geringerer Induktivität. Außerdem hing der induktive Scheinwiderstand noch von der Frequenz der Wechselspannung ab — mit steigender Frequenz würde der induktive Scheinwiderstand größer.

Wie verhält sich das beim Kondensator? Wir überlegen: Höhere Frequenz bedeutet schnelleren Wechsel der Stromrichtung, also schnellere Umladung des Kondensators. Infolgedessen wird der Kondensator bei höherer Frequenz nicht mehr so weit aufgeladen wie bei tieferer — er kann daher, um den gleichen Strom fließen zu lassen (und damit: um den gleichen Scheinwiderstand aufzuweisen!), geringere Kapazität haben.

Wir stellen fest: Der Scheinwiderstand eines Kondensators fällt mit steigender Kapazität! Auch hier verhält sich der induktive Scheinwiderstand genau umgekehrt wie der kapazitive. Der Extremfall für beide ist beim Gleichstrom gegeben: Der Kondensator läßt ihn nicht durch — er hat bei Gleichstrom einen unendlich hohen Widerstand. Die Induktivität dagegen weist bei Gleichstrom keinerlei induktiven Widerstand mehr auf (überlegen wir nochmals, wie er zustande kam!), sondern hat nur noch den sehr geringen Ohmschen Widerstand des Wicklungsdrahtes. Induktivität und Kapazität verhalten sich in bezug auf Wechselstrom genau entgegengesetzt!

Zum Begriff Scheinwiderstand müssen wir hier noch einiges sagen. Zunächst muß man wissen, daß in der Elektrotechnik grundsätzlich jedes Bauteil Verluste aufweist.

Jede Leitung hat einen — wenn auch geringen — Verlust: ihren Ohmschen Widerstand, in dem ein Teil der elektrischen Energie in Wärme umgewandelt wird.

Die Induktivität hat Verluste: Einmal wiederum den Ohmschen Widerstand der Wicklung (der sich ja nicht vermeiden, sondern nur möglichst gering machen läßt), außerdem noch Verluste durch Wirbelströme im Kern, der ja auch nicht beliebig fein unterteilt werden kann.

Der Kondensator hat ebenfalls Verluste; sie sind bei guten Kondensatoren allerdings äußerst gering. Sie entstehen im Dielektrikum, also in der Isolierung zwischen den Belägen. Denken wir daran, daß es keine völligen Nichtleiter gibt: Auch im besten Isolierstoff sind noch einige wenige freie Elektronen vorhanden. Sie werden aber durch die Anziehungskräfte der Kondensatorbeläge ebenso in Bewegung gebracht wie die Elektronen in den Belägen selbst! Dabei

stoßen sie an die Moleküle des Isolierstoffs – das Ergebnis ist wieder eine Erwärmung des Dielektrikums, genannt dielektrische Wärme!

Die Verlustwiderstände bei allen Bauteilen können wir uns mit dem „idealen“, verlustfreien Bauteil in Serie geschaltet denken – etwa so, wie der Innenwiderstand eines chemischen Elementes (der ja dessen Verlustwiderstand darstellt!) mit dem „idealen Element“ in Serie geschaltet gedacht werden kann (Abb. 30).

Was wir im Vorangegangenen als Scheinwiderstand bezeichnet haben, ist daher stets die Summe des Verlustwiderstandes und „idealen“ induktiven bzw. kapazitiven Widerstandes.

Bei unseren Rundfunkbauteilen ist der Unterschied zwischen Verlustwiderstand und Scheinwiderstand meist so unbedeutend (der Verlustwiderstand ist meist viel geringer!), daß wir ihn für unsere Basteleien vorläufig vernachlässigen können. Wir wollen uns deshalb auch nicht um die Unterscheidungen kümmern, die der Techniker zwischen den drei Begriffen Blindwiderstand, Scheinwiderstand und Wirkwiderstand trifft. Das können wir später nachholen, wenn wir uns als fortgeschrittene Bastler mit der Fachliteratur befassen. Auch auf die rechnerischen Beziehungen zwischen Induktivität, Kapazität, ihren Scheinwiderständen und der Frequenz wollen wir hier verzichten. Es genügt für den Anfang, wenn wir die prinzipiellen Zusammenhänge kennen.

Drahtlose Energieübertragung

Wir beginnen auch diesen Abschnitt mit einem Gedankenexperiment.

Abb. 83 zeigt eine Wechselstromquelle, an die als Verbraucher ein Kondensator mit seinem Scheinwiderstand angeschlossen ist. Wir wollen annehmen, daß unsere Wechselstromquelle eine Wechselspannung hoher Frequenz liefert – eine HF-Spannung also. Dann kann der Kondensator recht klein sein, trotzdem wird ein beachtlicher Wechselstrom im Stromkreis fließen.

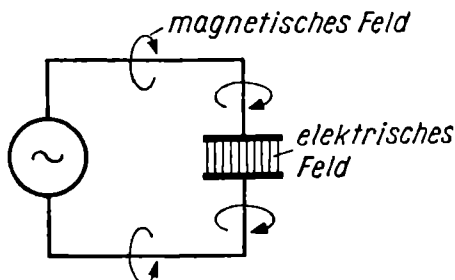


Abbildung 83

Um die Zuleitungen des Kondensators baut sich ein magnetisches Kraftfeld auf – wir kennen es bereits aus unseren ersten Versuchen (Abb. 7), dort allerdings als Gleichfeld. Jetzt ändert es Stärke und Richtung im Takt des Wechselstromes, der durch den Kondensator fließt.

Wir wissen, daß die magnetischen Kraftlinien für uns nur ein Hilfsbegriff sind. Einen ähnlichen Hilfsbegriff wollen wir jetzt hinzufügen: den der elektrischen Kraftlinien bzw. des elektrischen Kraftfeldes.

Zwischen den Platten des Kondensators oder ganz allgemein zwischen zwei Punkten verschiedener Spannung muß ja offenbar ein Kraftfeld herrschen, anders wäre die gegenseitige Anziehung zwischen positiver und negativer Ladung nicht erklärlich.

Denken wir noch einmal an das Atommodell (Abb. 8 und 9) und die Erklärung der gegenseitigen Anziehung zwischen positiver und negativer Ladung zurück! Wir hatten dort das Beispiel des an einer Schnur im Kreis geschleuderten Steines benutzt und uns vergegenwärtigt, daß die „Schnur“ im Atommodell nur ein Hilfsbegriff zur Veranschaulichung der Anziehungskraft war. Etwa ein solches „Schnurenbündel“ – vielleicht in Form gespannter Gummifäden – könnten wir uns zwischen der positiven und negativen Ladung beider Kondensatorplatten denken – freilich dürfen wir diesen Vergleich nicht sehr wörtlich nehmen!

So kann man sich das Vorhandensein eines elektrischen Kraftfeldes zwischen zwei Punkten verschiedener Spannung vorstellen. Es gibt experimentelle Möglichkeiten, auch dieses Kraftfeld sichtbar zu machen – ähnlich wie wir das beim magnetischen Feld mit dem Eisenpulver taten. Dazu gehören allerdings recht hohe Spannungen, und deren Erzeugung wäre für uns zu gefährlich. Deshalb verzichten wir auf dieses Experiment.

Das Kraftfeld ist dort besonders kräftig, wo sich hohe Spannungsunterschiede auf geringem Abstand gegenüberstehen – also gerade zwischen den Platten eines Kondensators. In Abb. 83 ist seine Lage zwischen den Platten angedeutet.

Wir wollen nun den Kondensator – wie Abb. 84 zeigt – „auseinanderziehen“, also den Plattenabstand vergrößern. Dadurch wird auch das elektrische Kraftfeld auseinandergezogen. Es wird schwächer, tritt jetzt aber bereits ein wenig aus dem Kondensator „heraus“.

Klappen wir den Kondensator nun ganz auseinander (Abb. 85), dann verläuft das elektrische Kraftfeld völlig außerhalb des Kondensators (der jetzt mit der ursprünglichen Form des Kondensators nicht mehr viel Ähnlichkeit hat); dafür treten die elektrischen Kraftlinien jetzt weit in den freien Raum hinaus. Mit zunehmendem Abstand von

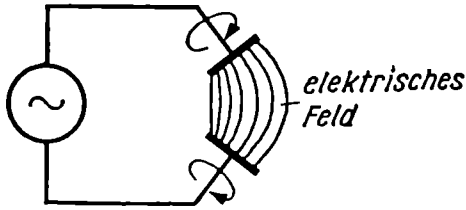


Abbildung 84

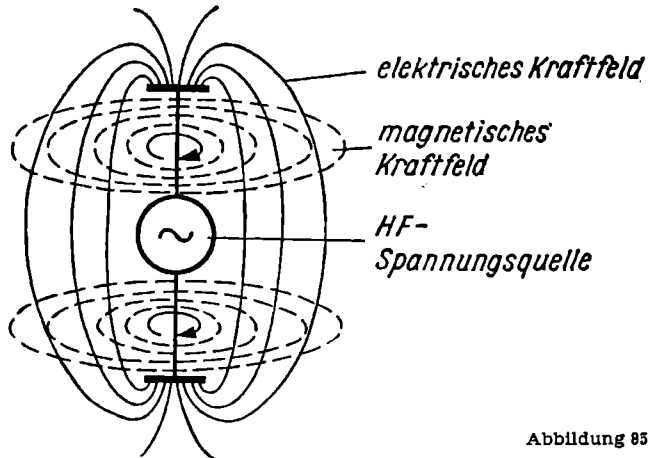


Abbildung 85

unserem „offenen Kondensator“ nimmt die Stärke dieses Kraftfeldes zwar zunächst sehr schnell, in größerer Entfernung aber langsamer ab, theoretisch reicht es jedoch unendlich weit!

In Abb. 85 ist dazu noch das magnetische Kraftfeld eingezeichnet. Seine Lage war in Abb. 83 und 84 schon angegeben; wir müssen uns aber wieder daran erinnern, daß es ebenfalls in Nähe der Leitung zunächst schnell, dann immer langsamer abnimmt, theoretisch jedoch ebenfalls unendlich weit reicht!

Dieser „offene Kondensator“ streut die elektrischen Kraftlinien weit in den freien Raum, seine Zuleitungen tun das gleiche mit dem magnetischen Kraftfeld. Beide Kraftfelder stehen, wie wir auf Abb. 85 gut erkennen, stets senkrecht aufeinander. Der „offene Kondensator“ hat nun nur noch geringe Kapazität, weit weniger als zu Anfang (Abb. 83), aber sie ist noch vorhanden.

Da wir voraussetzten, daß unsere Wechselspannungsquelle eine sehr hohe Frequenz hat, fließt in den Leitungen in Abb. 85 trotzdem noch ein recht kräftiger Wechselstrom. Der Stromkreis ist auf den ersten Blick scheinbar nicht geschlossen! Etwas anderes ist aber dabei noch merkwürdiger.

Wir könnten, wenn wir eine ausreichend kräftige HF-Spannungsquelle hätten, durch Einschalten eines Lämpchens in eine der Kondensatorleitungen leicht beweisen, daß tatsächlich ein Wechselstrom fließt (die Lampe läge dann in Serie mit dem Kondensator). Daß an dem offenen Kondensator auch eine Spannung anliegt, ergibt sich schon aus der Tatsache, daß ein Strom fließt, außerdem könnte man das auch beweisen, indem man ein Lämpchen zwischen beide Kondensatorplatten anschließt (die Lampe liegt dann dem Kondensator parallel). Wenn aber ein Strom fließt und eine Spannung vorhanden ist, dann wird auch eine Leistung verbraucht! Wo bleibt sie in diesem Fall?

Sie wird tatsächlich in den freien Raum abgestrahlt, und zwar in Form des Energieinhaltes des elektrischen und magnetischen Feldes! Unser „offener Kondensator“ strahlt die Energie in den offenen Raum ab – er sendet sie aus!

Wir ersetzen nun die obere Kondensatorplatte durch einen in großer Höhe lang ausgespannten Draht. Die untere Leitung verbinden wir mit dem Erdboden – wir erden sie. Was dann entstanden ist, zeigt Abb. 86: Eine Sendestation! Den ausgespannten Draht nennen wir die Antenne.

Das Schaltsymbol, eine Pfeilspitze, zeigt uns Abb. 86. Wir sehen dort auch gleich das Symbol für die Erdverbindung. Die Antenne vertritt jetzt den einen Kondensatorpol, die Erde den anderen! Wie fangen wir diese Energie aber wieder auf?

Abb. 87 deutet diesen Vorgang an. Es wird ein zweiter „offener Kondensator“ errichtet, der sich im elektrischen Kraftfeld des ersten befindet, das ja weit in den Raum reicht. Einen – wenn auch sehr

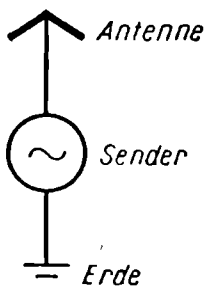


Abbildung 86

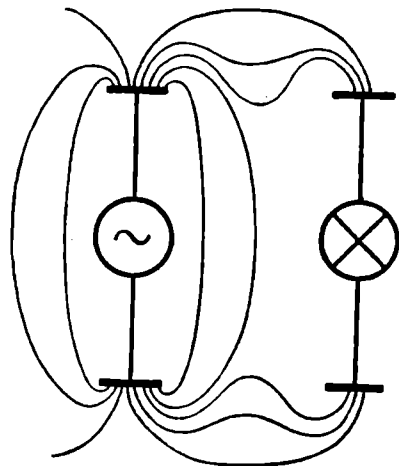
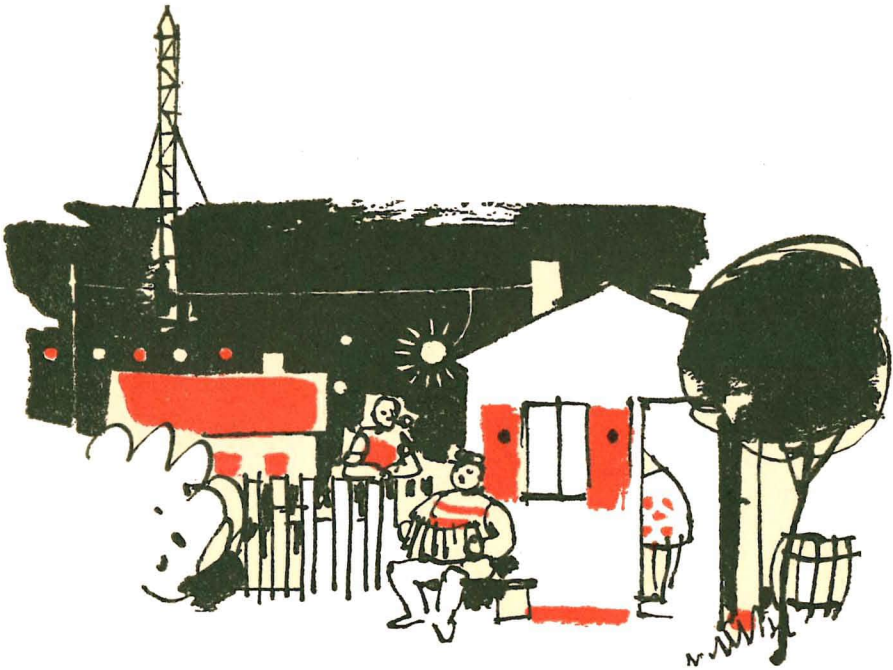


Abbildung 87



kleinen – Teil der Kraftlinien nimmt er also auf – die Folge ist: Zwischen seinen Polen tritt eine, wenn auch kleine, HF-Spannung auf, die natürlich die gleiche Frequenz hat wie die des Senders. Wir können sie dann nutzbar machen, was in der Abb. 87 durch ein Lämpchen angedeutet ist. Allerdings reicht die aufgefangene Energie nur in nächster Nähe eines starken Senders zum Betrieb eines Lämpchens aus. In größerer Entfernung – etwa an den Antennen unserer Rundfunkgeräte – werden die aufgefangenen Leistungen nur noch Werte in der Größenordnung eines millionstel Watts oder noch weniger erreichen!

Einen drastischen Beweis für die Richtigkeit dieser Erklärung gab es in den zwanziger Jahren. In Hamburg hatte eine Rundfunkgesellschaft den Sendeturm eines starken Senders unmittelbar neben einer Laubenkolonie aufgestellt. Es dauerte nicht lange, und die Kleingärtner waren dahintergekommen, daß sie ihre Lauben kostenlos mit „Strom aus der Luft“ beleuchten konnten, indem sie einfach Antennendrähte in ihren Gärten spannten und zwischen diese und die Erde Glühlampen schalteten. Das klappte so gut, daß die Sendegesellschaft bald auf die allabendliche Festbeleuchtung aufmerksam wurde und einen Prozeß gegen die Kleingärtner anstrebte. Seitdem gibt es eine gesetzliche Bestimmung, die die Verwendung dieser von Sendern ausgestrahlten Energie zu anderen Zwecken als dem Empfang der Sendungen ausdrücklich verbietet.

Wir wollen uns das Prinzip dieser Energieübertragung noch besser verdeutlichen. Das ist möglich, wenn wir diese Übertragung etwas

vereinfacht als Serienschaltung zweier Kondensatoren auffassen (Abb. 88). Ein Vergleich mit Abb. 87 und Abb. 84 zeigt uns das deutlich. Allerdings zeigt Abb. 87 auch, daß der größte Teil der Kraftlinien nicht die Platten des rechten Kondensators erreicht, sondern sich zwischen den linken bewegt und damit der Übertragung verlorenght. Dies haben wir in der Abb. 88 punktiert mit einem dritten Kondensator angedeutet, der ja eigentlich nichts anderes darstellt als einen Teil unseres ursprünglichen Kondensators aus Abb. 83 und 84.

Wenn der untere Pol des Senders geerdet ist(dabei ist bei allen Rundfunksendern der Fall, muß aber nicht unbedingt sein, denn man kann die Erde z. B. tragbaren Funkstationen auch durch ein antennenähnliches „Gegengewicht“ in Bodennähe ersetzen), dann würde der unterste Kondensator in Abb. 88 entfallen. Die Übertragung – in der Darstellung mit Schaltzeichen – sieht dann so aus, wie es Abb. 89 zeigt.

Wir haben uns bisher mit der Energieübertragung durch elektrische Kraftlinien beschäftigt. Es gibt aber noch eine zweite Möglichkeit, wie Abb. 90 zeigt.

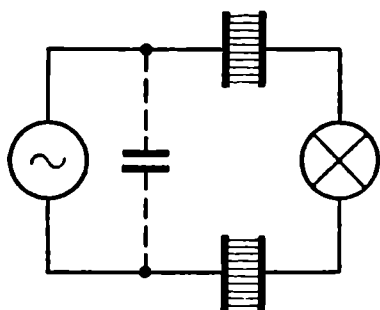


Abbildung 88

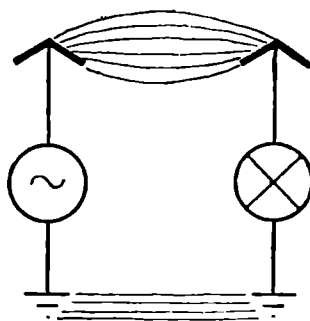


Abbildung 89

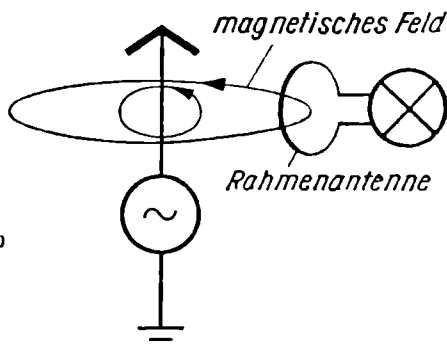


Abbildung 90

Eine Spule mit möglichst großem Durchmesser können wir so bauen und anordnen, wie das in Abb. 90 angedeutet ist (die Spule ist hier nur mit einer Windung gezeichnet). Die Spule wird dann von magnetischen Kraftlinien des Senderfeldes durchsetzt, demzufolge wird in ihr eine HF-Spannung induziert, natürlich mit der gleichen Frequenz der HF-Spannung des Senders. Entsprechend der geringen magnetischen Feldstärke in größerer Entfernung von der Senderantenne muß die in der Spule induzierte Spannung wieder sehr schwach sein (in der Größenordnung weniger millionstel Volt!). Die Glühlampe ist hier wie in den anderen Abbildungen nur als Symbol für den „Verbraucher“ zu verstehen. An ihre Stelle müssen wir den Rundfunkempfänger denken.

Die Spule wird man also möglichst großflächig machen, damit sie von recht vielen Kraftlinien durchsetzt wird. Wenn man sie zu diesem Zweck auf einen Holzrahmen wickelt oder in ein ringförmiges Isolierrohr einzieht, erhält man eine sogenannte Rahmenantenne. Sie ist etwas unhandlich, hat aber den großen Vorteil der Richtwirkung. Deshalb wird sie heute noch in verschiedenen Funkdiensten als Peilantenne benutzt, um die Richtung festzustellen, in der sich ein Sender befindet. Wie die Richtwirkung zustande kommt, zeigt Abb. 91.

Rahmenantenne 1 wird von den Kraftlinien durchströmt, in ihr wird also eine Spannung induziert. Rahmenantenne 2 dagegen wird von den Kraftlinien quer getroffen, die Kraftlinien können nicht durch die Spule strömen — es wird keine Spannung induziert! Man hört den Sender daher am kräftigsten, wenn die Schmalseite des Rahmens in seine Richtung weist, und am geringsten — im günstigsten Fall gar nicht —, wenn die Breitseite des Rahmens (oder die Achse dieser überdimensionalen flachen Spule) zum Sender weist. Durch Verdrehen der Rahmenantenne kann man also die Senderrichtung feststellen.

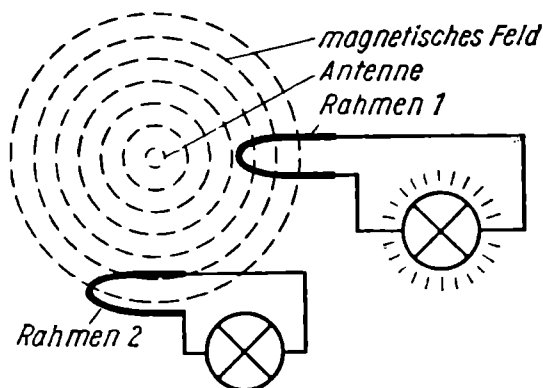


Abbildung 91

Eine moderne „Schwester“ hat die Rahmenantenne seit einiger Zeit in der Ferritstabantenne bekommen. Diese ist weiter nichts als eine auf einen Stab aus Ferritmaterial aufgewickelte Spule. Der Werkstoff Ferrit eignet sich besonders gut für hohe Frequenzen, da er geringe magnetische und Wirbelstromverluste aufweist. Wenn der Ferritstab auch recht lang (10 . . . 20 cm) gewählt wird, damit er von möglichst vielen magnetischen Kraftlinien getroffen wird, gibt er dennoch weniger Spannung ab als die Rahmenantenne! Er hat jedoch die gleiche Richtwirkung wie sie.

Abb. 92 zeigt uns das. Ferritstab 1 empfängt den Sender nicht – die Kraftlinien treffen die Spule quer. Dagegen hat Ferritstab 2 die richtige Lage zum Empfang. Für die modernen Taschenempfänger benutzt man fast ausschließlich Ferritantennen. Durch Drehen der Ferritstabantenne oder des ganzen Empfängers kann man störende Sender weitgehend ausblenden, wenn sie nicht in der gleichen oder ähnlichen Richtung liegen wie der gewünschte Sender.

Der Sender sendet Energie aus – aber können wir damit schon eine richtige Nachrichtenübermittlung bewerkstelligen?

Das ist möglich, wenn wir das Morsealphabet zu Hilfe nehmen. Im Takt der Morsezeichen schalten wir unseren HF-Spannungserzeuger ein und aus – im gleichen Takt wird unsere „Empfängerlampe“ aufleuchten und verlöschen – vielmehr sie würde das tun, wenn die ankommenden Energien stark genug wären. Aber dafür läßt sich sorgen. Bald werden wir erfahren, wie wir die Antennenenergie verstärken können und was wir zu tun haben, um mit diesen elektrischen Wellen Sprache und Musik zu übertragen.

Die elektrischen Wellen werden oft auch, besonders von Laien, als Rundfunkwellen bezeichnet. Der Fachmann benutzt diesen Ausdruck nicht gern, auch deshalb, weil die Anwendung für den Rundfunk ja nur eine von vielen Anwendungsmöglichkeiten der drahtlosen Übertragung ist.

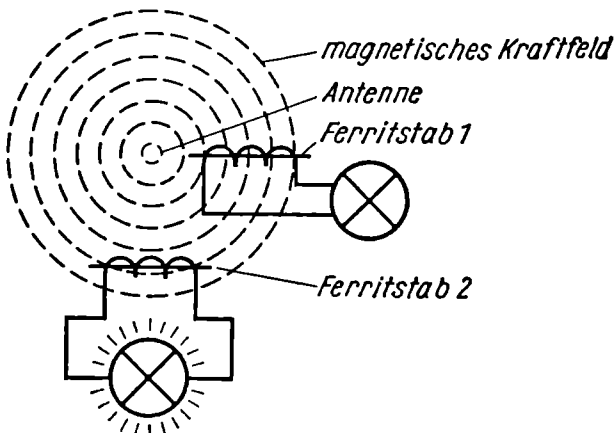


Abbildung 92

Was verstehen wir nun unter diesen Wellen? Von Wellen hatten wir schon bei der Erklärung der Sinusschwingung gesprochen. Dieser Begriff war dort vom wellenförmigen Aussehen der Schwingungen abgeleitet worden. Wellen sind nichts anderes als Schwingungen – auch die Wasserwellen im Teich ergeben sich aus dem Auf- und Niederschwingen der Wassermoleküle.

Was schwingt jedoch bei der drahtlosen Übertragung? Wir könnten einfach sagen: Der ständige Wechsel des Kraftfeldes – sowohl des elektrischen als auch des magnetischen – ist ein Schwingungsvorgang; also breitet sich das Kraftfeld wellenförmig aus. Diese Erklärung ist richtig, aber man kann sich darunter nur schlecht etwas vorstellen. Versuchen wir deshalb, auf andere Weise zu einer anschaulichen Erklärung zu kommen.

Drahtlose Wellen

Die elektrische Spannung (der „Druck“ in den Stromkreisen) pflanzt sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit fort. Also breiten sich auch die elektrischen und magnetischen Kräfte – für die wir den Hilfsbegriff der Kraftlinien benutzen – mit dieser Geschwindigkeit aus (rund gerechnet 300 000 km/s). Diese Kraftfelder sind ja die Ursache für die Elektronenbewegungen.

Wir wollen uns nun einen Sender vorstellen, der eine Frequenz von 10 MHz ausstrahlt (sein von der Antenne erzeugtes Kraftfeld wechselt also die Polarität in jeder Sekunde 10millionenmal). An 7,5 m Abstand von der Sendeantenne soll eine Empfangsantenne 1 stehen (Abb. 93), in 15 m Entfernung steht Empfänger 2, wieder 7,5 m wei-



ter der dritte und in 30 m Entfernung der vierte Empfänger (wieder vereinfacht als Lampen dargestellt). Die Spannung an der Sendantenne hat, wie wir wissen, einen sinusförmigen Verlauf, entspricht also der Kurve in Abb. 94.

Um nun nicht mit unnötig viel Nullen zu rechnen, wollen wir den Zeitablauf nicht in Sekunden, sondern in Nanosekunden (ns) berechnen: $1 \text{ ns} = \frac{1}{1\,000\,000\,000} \text{ s}$. 100 ns entsprechen also einer $\frac{1}{10\,000\,000} \text{ s}$ und damit einer Frequenz von $10\,000\,000 \text{ Hz} = 10 \text{ MHz}$ (siehe Seite 125).

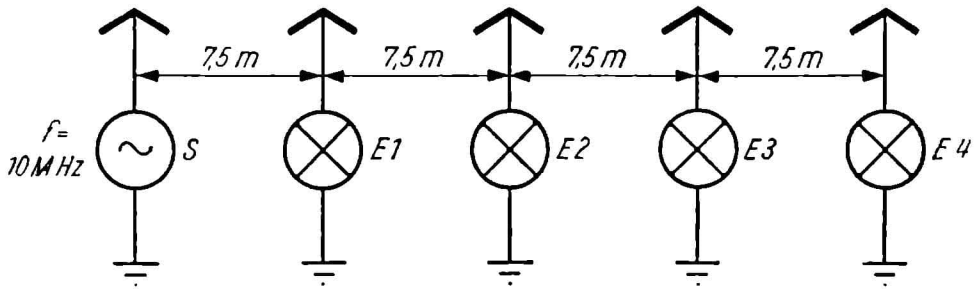


Abbildung 93

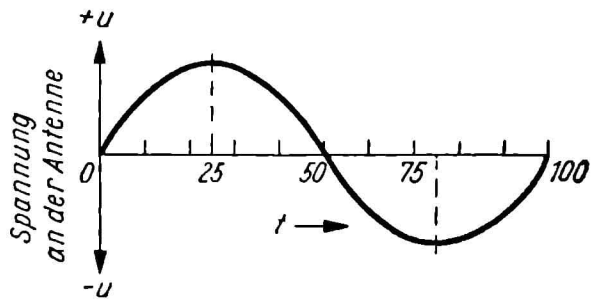


Abbildung 94

150 000 000 km



Wir gehen vom Anfang der Schwingung, vom Nullpunkt aus. Die Spannung steigt an der Antenne nach positiven Werten (das bedeutet: Plus an der Antenne, Minus an der Erde). In diesem Moment gehen die ersten Kraftlinien von der Antenne aus. Entsprechend dem Kurvenanstieg folgen ihnen ständig weitere, immer stärkere Kraftlinien bis zur 25. Nanosekunde. Danach fällt die Kurve wieder, die nächsten Kraftlinien sind also wieder schwächer. In der 50. Nanosekunde ist der Nulldurchgang der Kurve erreicht und die Antenne spannungslos – es wird keine Kraftlinie ausgestrahlt. Nun beginnt der Vorgang von neuem, jedoch mit umgekehrter Polarität der Antennenspannung (Minus an der Antenne, Plus an Erde) und des Kraftfeldes. Die Kraftliniendichte steigt wieder bis zur 75. Nanosekunde und sinkt dann bis zur 100. Nanosekunde auf Null ab, womit eine Schwingung vollendet ist.

Die Kraftlinien breiten sich mit 300 000 km/s aus. Da $1 \text{ s} = 1\,000\,000\,000 \text{ ns}$ ist, legen die Kraftlinien in 1 ns einen Weg von $\frac{300\,000\,000}{1\,000\,000\,000} = 0,3 \text{ m}$ zurück. Ihre Geschwindigkeit beträgt umgerechnet 0,3 m/ns. In 100 ns – der Zeitdauer einer Periode unserer Schwingung – legen sie also 30 m zurück.

Wir vergleichen nun Abb. 94 (die uns das „Geschehen“ an der Sendeantenne zeigt) mit Abb. 93. Mit Beginn der positiven Halbwelle beginnen die ersten Kraftlinien ihren Weg in Richtung der Empfangsantennen. Da Antenne 1 gerade 7,5 m entfernt ist, kommt die erste Kraftlinie dort nach 25 ns an. Zu diesem Zeitpunkt hat aber die Antennenspannung schon ihren Maximalwert erreicht. Weitere 25 ns später ist die Antennenspannung wieder Null, gleichzeitig haben die dem Maximum entsprechenden Kraftlinien die Antenne 1 und die mit Kurvenbeginn ausgestrahlten die Antenne 2 erreicht. Wieder 25 ns später: Jetzt sind die ersten Kraftlinien bei Antenne 3 eingetroffen, diejenigen, die der positiven Maximalspannung entsprechen, sind jetzt bei Antenne 2 und die in der 50. ns ausgestrahlten Kraftlinien (genauer die in diesem Moment fehlenden, bei der 50. ns ist ein Nulldurchgang der Spannung!) bei Antenne 1 angelegt. An der Sendeantenne wird in diesem Augenblick die negative Maximalspannung erreicht. In der 100. ns schließlich kommt der Beginn unserer Schwingung bei Antenne 4 an (wir hatten oben errechnet, daß die entsprechenden Kraftlinien in 100 ns gerade 30 m zurücklegen!), während bei der Sendeantenne gerade in diesem Moment die zweite Schwingung beginnt.

Wie unser Rechenbeispiel zeigt, können wir uns das Fortschreiten des Kraftfeldes tatsächlich so vorstellen, als bewege sich eine sinusförmige Welle von 30 m Länge von der Sendeantenne weg durch den



Raum (und über die Antennen 1 bis 4 hinweg!). Bildlich kann man das mit der Wellenausbreitung vergleichen, die sich ergibt, wenn man einen Stein ins Wasser wirft. Ebenso wie von der Einschlagstelle ringförmige Wasserwellen fortlaufen, breiten sich die elektrischen Wellen um die Sendeantenne aus — allerdings mit der viel, viel höheren Geschwindigkeit von 300 000 km/s.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bleibt stets die gleiche — also muß sich bei geänderter Frequenz auch die Wellenlänge ändern. Sie war in unserem Rechenbeispiel 30 m lang.

Der Begriff Wellenlänge ist zwar recht anschaulich, aber veraltet. Er wird nur noch in einigen Spezialfächern der Funktechnik benutzt.

Die Wellenlänge entspricht in unserem Beispiel der Länge einer Periode, wenn man deren Zeitdauer mittels der immer gleichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit auf eine Wegstrecke umrechnet. Da Wellenlänge und Frequenz in festem Zusammenhang stehen, genügt es, für eine Schwingung entweder die Frequenz oder die Wellenlänge anzugeben.

Aus verschiedenen praktischen Gründen gibt man heute meist die Frequenz an. Lediglich in den Rundfunkprogrammen finden wir

noch beide Angaben nebeneinander, da ältere Rundfunkgeräte auf ihren Skalen meist noch Wellenlängenangaben in Metern, moderne Geräte fast immer Frequenzangaben in kHz oder MHz haben. Beide Maße werden über die Lichtgeschwindigkeit umgerechnet:

$$\text{Wellenlänge} = \frac{300\,000}{\text{Frequenz}} \text{ oder: } \text{Frequenz} = \frac{300\,000}{\text{Wellenlänge}}$$

In diesen Formeln müssen wir die Frequenz in Kilohertz (kHz) und die Wellenlänge in Metern einsetzen. Die Wellenlänge wird also mit sinkender Frequenz größer. Eine Schwingung von 100 kHz hat 3 km Wellenlänge!

Nur der Vollständigkeit halber sei noch das Formelzeichen für die Wellenlänge – die wir in Metern messen – genannt: Es ist das kleine griechische λ (gesprochen „lambda“).

Wie breiten sich die Wellen nun über große Entfernung aus?

Die Wellenausbreitung

Wenn sich die Empfangsantenne nicht weit von der Sendeantenne entfernt befindet, dann wird sie unmittelbar von den Funkwellen getroffen. Wie geht das aber bei größeren Abständen zwischen Sender und Empfänger vor sich?

Betrachten wir Abb. 95, in der die Größenverhältnisse allerdings übertrieben dargestellt sind. S ist die Sendeantenne, E 1 bis E 3 sind drei Empfangsantennen in verschiedener Entfernung. E 1 bekommt die Funkwellen direkt von der Sendeantenne. Die Antenne E 2 liegt – vom Sender aus gesehen – direkt am Horizont, die Welle zu ihr muß also dicht über den Erdboden wandern und wird dabei auf diese große Entfernung schon stark geschwächt (wir können uns das so vorstellen, daß jede Unebenheit des Bodens, jeder Mast, jeder Baum und Berggipfel dem Kraftfeld Energie entziehen). Diese direkte Welle wird deshalb Bodenwelle genannt. Gäbe es nur sie, so könnte eine hinter der Erdkrümmung (also unter dem Horizont) liegende Empfangsantenne E 3 den Sender nicht empfangen. Die Erde ist aber in Höhen von einigen 100 km von einer Luftschicht umgeben, von der wir im Zusammenhang mit Erdsatelliten schon oft gehört haben: der Ionosphäre. In dieser stark verdünnten Luftschicht gibt es Gasschichten, in denen die Moleküle ionisiert sind (daher auch der Name). Von den Atomen der Gase sind also Elektronen abgespalten – wir haben dort starke Konzentrationen von Elektronen und Ionen. Die Ionisation wird unter anderem von der Ultraviolettstrahlung der Sonne und auch von der kosmischen Strahlung bewirkt – auch das können wir uns vergrößert so vorstellen, daß die Strahlungsteil-

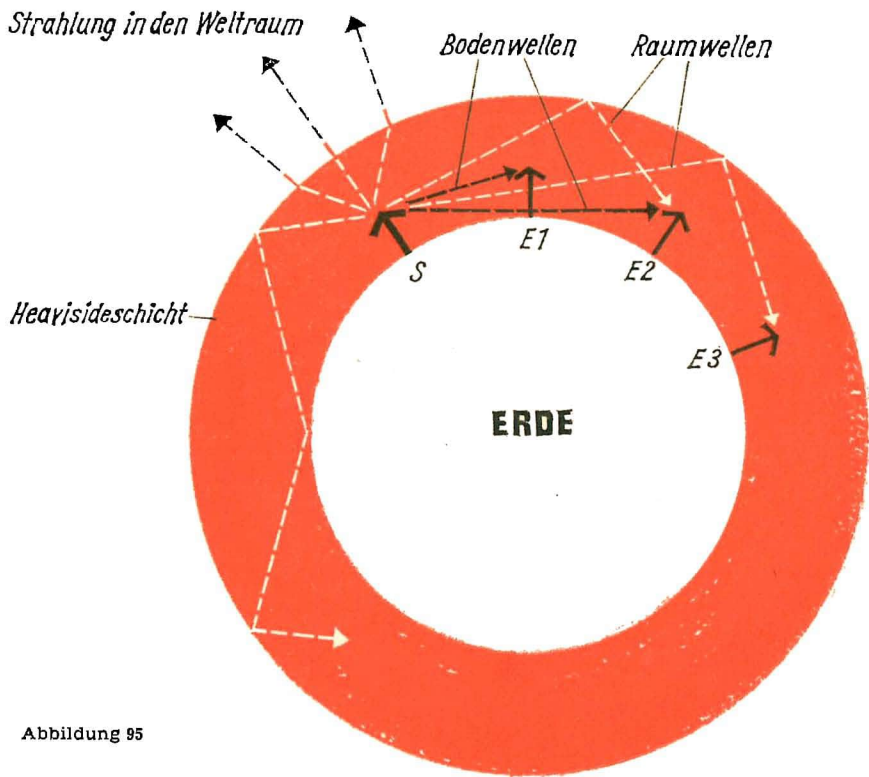


Abbildung 95

chen, die, aus dem Weltall kommend, die Erde mit riesiger Geschwindigkeit erreichen, auf die Gasatome aufprallen und dabei aus deren Atomhüllen Elektronen heraus schlagen.

Diese ionisierten Gasschichten haben eine merkwürdige Eigenschaft: Auf manche Funkwellen wirken sie wie ein Spiegel — sie reflektieren die Wellen. Von der Sendeantenne kommende Wellen treffen dort auf und können wieder zur Erde reflektiert werden. Man nennt solche Wellen Raumwellen. Wie Abb. 95 zeigt, kann eine Raumwelle auf ihrem „Zickzackkurs“ die Erdkrümmung überwinden — über die Raumwelle kann auch Empfangsantenne E3 den Sender empfangen.

Die reflektierenden Schichten werden nach ihrem Entdecker auch als Heaviside-Schicht (sprich „häwißeid“) bezeichnet — es handelt sich aber um mehrere Schichten in verschiedenen Höhen, deren Eigenschaften ständigen tages- und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen sind (denken wir an ihre Entstehungsursache!).

Wir dürfen uns diese Schichten deshalb nicht als idealen Spiegel vorstellen, im Gegenteil: Die Stärke der bei E3 ankommenden

Raumwelle schwankt ständig in weiten Grenzen — der Sender wird lauter und leiser hörbar. Die Empfangsfeldstärke bei E3 kann durchaus im Verhältnis 1:100 und mehr schwanken! Mitunter kann der Empfang auch ganz ausbleiben — wenn die reflektierenden Schichten ungünstig liegen oder kurzzeitig ihre reflektierende Eigenschaft ganz verlieren.

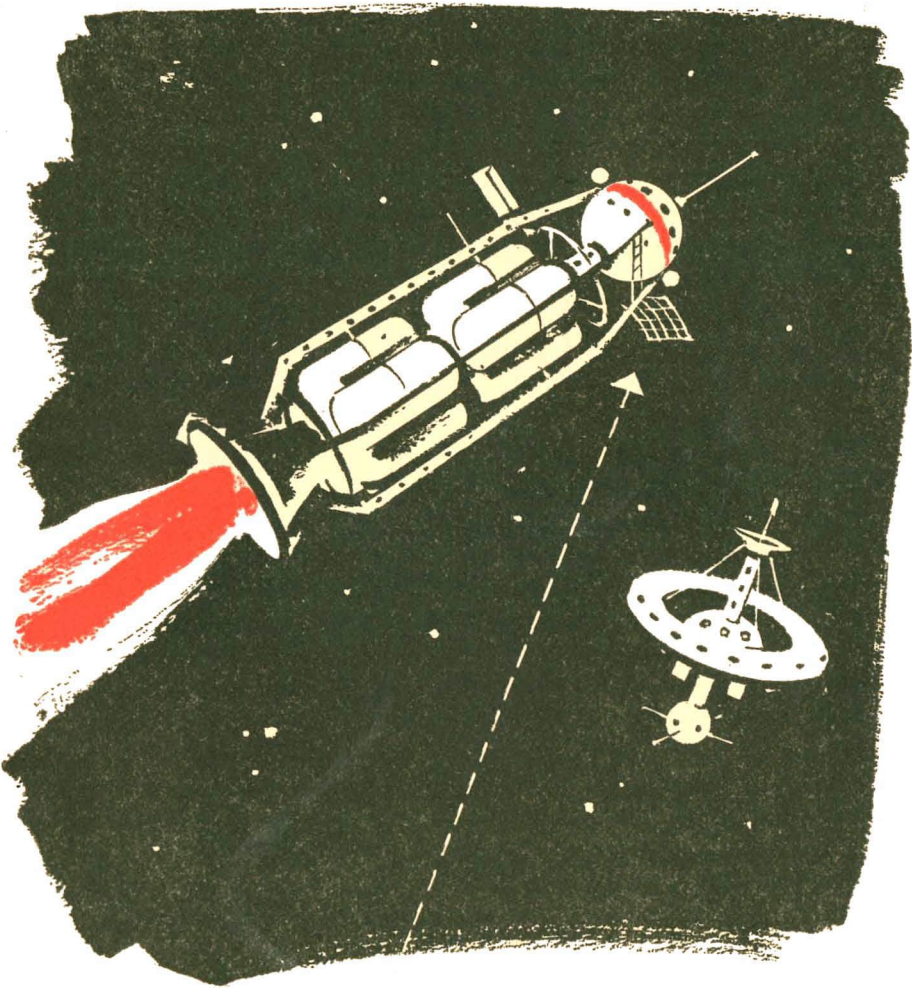
Man spricht dann vom Schwund des Senders oder mit einem aus der englischen Sprache entnommenen Fachwort vom Fading (gesprochen „fäding“). Im Empfänger gibt es zum Ausgleich dieser Schwankungen besondere Schaltungen: Den Schwundausgleich oder Fadingausgleich. Wir werden diese später kennenlernen.

Besonders ungünstig sind die Verhältnisse bei der Empfangsantenne 2. Dort treffen Bodenwelle und Raumwelle zugleich ein. Da die Raumwelle einen längeren Weg zurückzulegen hat als die Bodenwelle, kann es zwischen beiden je nach Höhe und Eigenschaft der Heaviside-Schicht einmal zu einer Verstärkung, kurz darauf wieder zur Schwächung oder vollständigen Auslöschung beider Wellen kommen. Hier kann oft der beste Schwundausgleich im Rundfunkgerät keinen brauchbaren Empfang mehr zustande bringen.

Wir wollen uns noch merken, daß die reflektierenden Eigenschaften der Heaviside-Schicht auch von der Frequenz unserer Funkwellen abhängen. Lange Wellen breiten sich vorwiegend über die Bodenwelle aus, kurze Wellen dagegen vorwiegend über die Raumwelle. Sehr kurze Wellen (Ultrakurzwellen mit Frequenzen über etwa 30 MHz) werden nur schlecht reflektiert. Sie durchdringen die Ionosphäre und verlieren sich im Weltraum. Diese Frequenzen sind daher besonders gut für Funkverbindungen mit Raumschiffen geeignet, ermöglichen aber auf der Erde kaum Reichweiten, die länger sind als die der Bodenwelle.

Der Winkel, unter dem die Funkwelle auf die Heaviside-Schicht trifft, hat ebenfalls Bedeutung für die reflektierende Eigenschaft. Trifft die Welle sehr steil auf die Schicht, so durchdringt sie diese und verliert sich im Weltraum. Auch diese Möglichkeit haben wir in Abb. 95 eingezeichnet.

Was hat es nun mit den Begriffen Langwelle, Mittelwelle usw. auf sich? Dies ist eine willkürliche, aber für den Sprachgebrauch praktische Unterteilung in Frequenzbereiche. Die Funkwellen haben nach ihrer Wellenlänge oder Frequenz recht verschiedene Ausbreitungseigenschaften, von denen wir einige schon angedeutet haben. Wir wollen darauf hier aber nicht näher eingehen; einiges werden wir später bei der Besprechung der Ultrakurzwellen noch erfahren. Die Unterteilung — zwischen der es keine klare Abgrenzung gibt — sieht etwa so aus:



Langwellenbereich: 150 kHz bis 500 kHz

Mittelwellenbereich: 500 kHz bis 1600 kHz

Grenzwellenbereich: 1600 kHz bis 5 MHz

Kurzwellenbereich: 5 MHz bis 30 MHz

Ultrakurzwellenbereich (UKW-Rundfunk und Fernsehen):

30 bis 300 MHz

Dezimeterbereich: 300 MHz und darüber (Der Name rührt von den
bei einigen 10 cm liegenden Wellenlängen her!)

Für Bastler sind davon vor allem der Mittelwellen- und Kurzwellen-
bereich von Interesse.



Von Mikrofonen und Lautsprechern

Schallwandler

Was Schall ist, haben wir schon kurz gesagt (Seite 127): Schallwellen sind mechanische Schwingungen der Luftmoleküle. Im Bereich der hörbaren Töne haben diese Schwingungen eine Frequenz zwischen etwa 16 Hz und 15 kHz. Wenn wir diese Schwingungen in genau gleichartige elektrische Schwingungen umwandeln können, dann lassen sie sich über Leitungen übertragen und am Ende der Leitung wieder in akustische Schwingungen – in Schall – zurückverwandeln. Dies ist das Prinzip der Tonübertragung.

Die Geräte, mit denen wir den Schall in elektrische Schwingungen umwandeln, nennen wir Schallempfänger oder Mikrophone. Die entsprechenden Geräte zur Umwandlung der elektrischen Schwingungen in Schallschwingungen bezeichnen wir als Schallstrahler; hierzu gehören Kopfhörer und Lautsprecher. Beide Gruppen fassen wir unter dem Sammelbegriff Schallwandler zusammen.

Die elektrischen Schwingungen in der Tonübertragung müssen natürlich in der Frequenz und auch in der Schwingungsform – die

durchaus nicht immer sinusförmig ist, sondern bei komplizierten Tönen (Klängen und Geräuschen) auch sehr komplizierte Formen haben kann – genau dem Schwingungsverlauf der Schallschwingung entsprechen. Die Frequenzen, mit denen wir es dabei zu tun haben, fallen demzufolge (vergleiche Seite 127) in den NF-Bereich. Wenn wir in Zukunft von der NF-Spannung, der NF-Schwingung oder ganz kurz von der NF sprechen, wollen wir darunter immer diese elektrische Schwingung verstehen, die ein Abbild der Schallschwingung ist.

Der Kopfhörer

Die Umwandlung einer elektrischen Schwingung in eine Schallschwingung können wir experimentell nachweisen. Wir benutzen dazu unseren Garnrollen-Elektromagneten aus den früheren Versuchen, wieder mit Eisenkern (Abb. 96). Vor dem Kern ordnen wir ein recht dünnes Eisenblechstück so an, daß es möglichst dicht vor dem Kern steht (Luftspalt etwa 1 mm), ohne ihn aber zu berühren. Als Blech eignet sich ein Konservendbüchsendeckel, sofern er aus magnetisierbarem Material besteht. Wir können ihn ohne besondere Befestigung mit der Hand vor den Spulenkern halten. Die Spule schließen wir an Wechselstrom an, den wir einem Klingeltransformator entnehmen. Das Magnetfeld der Spule ändert nun im Takt der Wechselspannung seine Richtung und Stärke, entsprechend dem Verlauf der Sinuskurve der Spannung schwankt es ständig zwischen Null und einem Höchstwert. Unser Blech wird im gleichen Rhythmus mehr oder weniger angezogen – es beginnt im Rhythmus der Wechselspannung zu vibrieren: Es schwingt! Diese Schwin-

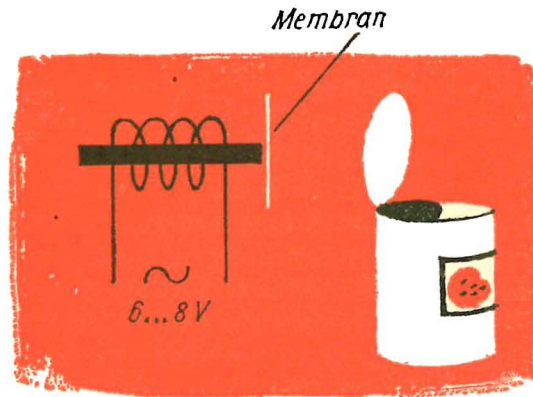


Abbildung 96

gungen teilen sich der Luft mit, und wir hören einen deutlichen Brummtönen, der uns vom Radio her bekannt vorkommt. Er hat nicht etwa die Frequenz von 50 Hz wie die Netzwechselspannung, sondern die doppelte Frequenz: 100 Hz! Das nützt uns natürlich nichts, denn wir wollen ja erreichen, daß die Tonfrequenz genau der Frequenz unserer Wechselspannung entspricht! Warum schwingt das Blech — es hat die Funktion einer Membran — mit der doppelten Frequenz? Denken wir an die Sinuskurve! Sie steigt zu einem positiven Höchstwert — in diesem Moment ist auch die Anziehung der Membran am stärksten —, sie wölbt sich am weitesten in Richtung auf die Spule durch, und das entspricht dem Maximalwert der ersten Halbwelle unserer Schallschwingung.

Sobald die Sinuskurve der Spannung auf Null abfällt, geht auch die Membran in ihre Ruhelage zurück. Nun beginnt die zweite Halbwelle. Die Stromrichtung hat sich geändert und damit auch die magnetische Polarität der Spule. Während der negativen Halbwelle müßte auch die Membran die zweite Halbwelle der Schallschwingung ausführen, also jetzt nach der anderen Richtung — vom Magneten weg — ausweichen. Für die Membran ist es aber ohne Bedeutung, ob sie vom Nord- oder Südpol des Magneten angezogen wird. Sie bewegt sich also auch in der zweiten Halbwelle der Spannungskurve zur Spule hin. Während die Spannung einmal hin- und herpendelt, wird die Membran zweimal angezogen — sie schwingt mit der doppelten Frequenz!

Wie ändern wir das? Wir ersetzen den Eisenkern der Spule durch einen Permanentmagneten (Abb. 97). Dann ist ständig ein Magnetfeld vorhanden, die Membran also ständig ein klein wenig durchgewölbt (was weiter nicht stört). Wenn die Spule nun ein wechselndes Magnetfeld erzeugt, so wird sich dieses zum Feld des Permanentmagneten addieren (wenn es die gleiche Polarität wie dieser hat) oder von ihm subtrahieren (wenn es entgegengesetzte Polarität hat). Infolgedessen wird das Feld des Permanentmagneten im Takt der Wechselspannung während der einen Halbwelle geschwächt, während der anderen verstärkt, und die Membran schwingt mit der Frequenz der Wechselspannung. Dies ist das Prinzip des Kopfhörers oder, wie er auch genannt wird, des magnetischen Hörers.

Um zu erreichen, daß der Hörer schon auf kleinste Spannungen reagiert, also möglichst empfindlich ist; bildet man den Permanentmagneten als Hufeisenmagneten aus und setzt auf beide Pole Spulen, die so in Serie geschaltet sind, daß sich ihre Wirkungen addieren (Abb. 98). Je nach Verwendungszweck haben diese Spulen viele tausend Windungen; ihr Widerstand beträgt meist einige tausend Ohm (diese für Radiozwecke bestimmten Hörer werden hochohmige

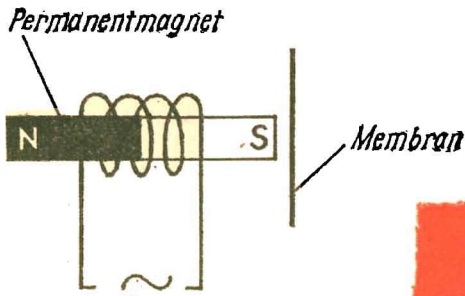


Abbildung 97

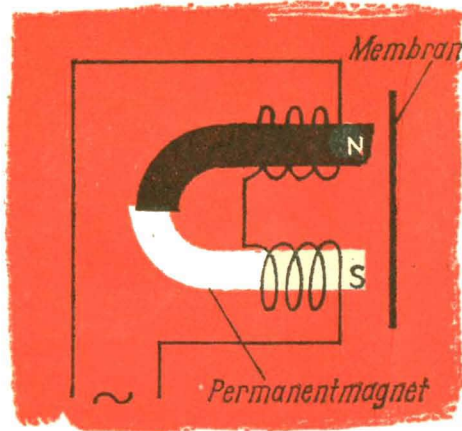


Abbildung 98

Hörer genannt), oder der Spulenwiderstand liegt bei entsprechend geringerer Windungszahl bei 10 bis 100 Ω . Diese niederohmigen Hörer finden vorwiegend für Fernsprechzwecke Verwendung. In den Telefonhörern sind sie als auswechselbare Hörkapseln eingesetzt. Wir können nun einmal einen Radiokopfhörer aufschrauben und die Membran abnehmen, um dessen Aufbau mit Abb. 98 zu vergleichen.

Übliche Radiokopfhörer – auch Funkkopfhörer genannt – haben zwei solche Hörkapseln, die in Serie geschaltet sind. Sie haben dann meist 4 k Ω Widerstand – jede Kapsel also 2 k Ω . Falls wir einen solchen Hörer für eine Schaltung verwenden wollen, bei der ein niederohmiger Hörer vorgeschrieben ist, können wir uns behelfen, indem wir die Serienschaltung beider Kapseln zur Parallelschaltung umwandeln. Der resultierende Widerstand beträgt dann 1 k Ω , und das reicht dann für unsere Zwecke oft schon aus.

Das Reissche Telefon

Die Kopfhörerausführung nach Abb. 97 war der erste Schallwandler überhaupt. Er wurde von Philipp Reis im Jahre 1861 erfunden. Philipp Reis verband zwei solche Hörer über eine Leitung miteinander (Abb. 99). Ein Hörer diente als Schallempfänger, der andere

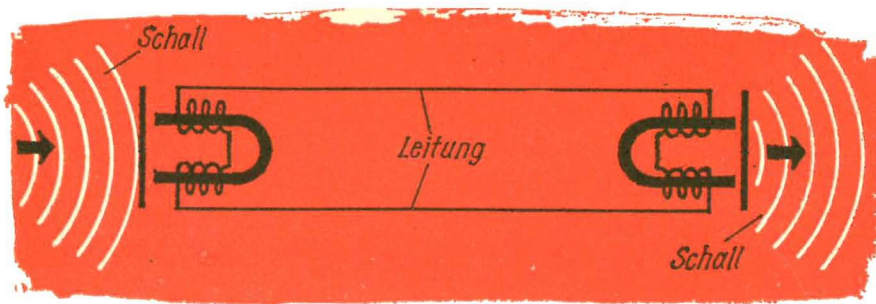


Abbildung 99

als Schallstrahler – was die eine Person in den einen Hörer hineinsprach, konnte die andere Person am anderen Hörer hören und umgekehrt –, denn beide Hörer waren ja gleich. Wieso aber wirkt ein Hörer als Schallempfänger – als Mikrofon?

Sehen wir noch einmal Abb. 98 an. Wenn wir gegen die Membran sprechen, wird sie von den Schallwellen in Schwingungen versetzt. Im Rhythmus dieser Schwingungen ändert sich ihr Abstand von den Polen des Permanentmagneten – also auch die Breite des Luftspaltes zwischen Membran und Magnet.

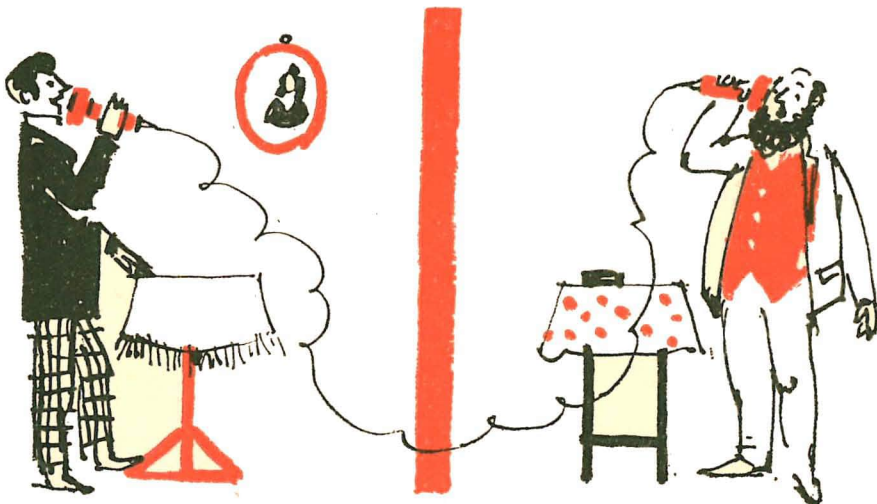
Der Luftspalt schwächt aber die magnetischen Kraftlinien, die aus einem Pol in die Membran und von dieser in den anderen Pol übertreten. Ändert sich die Breite des Luftspaltes, so ändert sich auch die Stärke des Magnetfeldes – es wird einmal mehr, einmal weniger stark geschwächt. Wir wissen aber: Magnetfeldänderungen ergeben in der Spule eine Induktionswirkung! Dort wird also eine Wechselspannung induziert, deren Frequenz und Kurvenform genau der Schallschwingung entspricht – der Hörer hat den Schall in elektrische Schwingungen umgewandelt! Diese Schwingungen werden über die Verbindungsleitung zum zweiten Hörer übertragen (Abb. 99) und dort wieder zu Schall. Das einfache Verfahren funktioniert also in beiden Richtungen.

Mit zwei gleichartigen Kopfhörern können wir diesen klassischen Versuch leicht nachahmen – wir werden allerdings enttäuscht sein, daß die Wiedergabe des Sprechers am anderen Ende sehr, sehr leise ist. Der Sprecher muß laut in die Hörmuschel hineinschreien, und trotzdem müssen wir am anderen Ende genau hinhören, um ihn zu verstehen. Das liegt nicht an unserer Versuchsanordnung, sondern an der zu geringen Empfindlichkeit dieser Mikrofonbauart. Jedoch vor hundert Jahren war diese leise Verständigung schon eine große Sensation.

Für unsere Bastelpraxis ist die Erkenntnis interessant, daß man einen magnetischen Hörer auch als Mikrofon benutzen kann. Die von diesem (und jedem anderen) Mikrofon abgegebene NF-Spannung ist sehr gering, sie liegt in der Größenordnung eines tausendstel Volt und darunter! Wir werden aber noch erfahren, wie man solche geringen Wechselspannungen verstärkt; am Ende des Buches finden wir auch eine Bauanleitung für einen NF-Verstärker. Ein Mikrofon dafür haben wir also schon!

Auch im Rundfunkgerät ist ein NF-Verstärker enthalten. Wenn wir einen Kopfhörer an die Tonabnehmerbuchsen des Rundfunkgerätes anschließen (Plattenspieleranschluß; nicht versehentlich die Buchsen für den 2. Lautsprecher anschließen! Das kann schwere Schäden geben!), das Radio auf Plattenspieler umschalten und den Lautstärkereglern laut aufdrehen, können wir im Lautsprecher hören, was wir in den Hörer hineinsprechen. Allerdings wird die Wiedergabe nicht sehr schön klingen und brummen – der Kopfhörer ist ja auch nicht als Mikrofon vorgesehen. Wir können mit diesem Versuch aber beweisen, daß der Kopfhörer wirklich als magnetisches Mikrofon arbeiten kann.

Moderne Kleinhörer sind nicht größer als ein Stück Würfelzucker, man kann sie im Ohr tragen – deshalb werden sie Ohrhörer genannt. Sie sind ebenso aufgebaut wie normalgroße Hörkapseln.



Der Lautsprecher

Können wir aus unserem Hörer einen Lautsprecher machen, indem wir einfach die Wechselspannung an der Spule so weit steigern, bis die Membran genügend kräftig schwingt, um „laut zu sprechen“? Die Membran würde schon bald an die Magnetpole anschlagen, ein häßliches Klirren wäre die Folge. Wir wollen uns merken: Wenn ein Kopfhörer klirrt, kann das daran liegen, daß sich die Membran zu dicht am Magneten befindet! Setzen wir sie weiter vom Magneten weg, so wird sie vom Magneten weniger beeinflußt und schwingt schwächer. Für große Lautstärken ist dieser Hörer also nicht geeignet.

Als das von den Konstrukteuren erkannt worden war, bauten sie zunächst eine Lautsprecherart, die heute keine Bedeutung mehr hat, die wir aber der Vollständigkeit wegen erwähnen wollen: den Freischwingerlautsprecher (Abb. 100).

Vor den Polen eines Permanentmagneten steht frei eine kleine Stahlzunge, der Anker. Er ist von der Spule umgeben, die aber nicht fest auf dem Anker sitzt, sondern am Lautsprechergehäuse befestigt ist. Der Anker kann in der Spule einige Millimeter frei schwingen. Die Wechselspannung an der Spule magnetisiert den Anker, an dessen Spitze also abwechselnd ein Nord- und ein Südpol entsteht. Dadurch wird der Anker immer vom gleichnamigen Magnetpol abgestoßen, vom ungleichnamigen angezogen – er schwingt im Takt der NF-Spannung. Da er nicht zwischen, sondern vor den Magnetpolen steht, kann er mehrere Millimeter ausschlagen, obwohl der Luftspalt

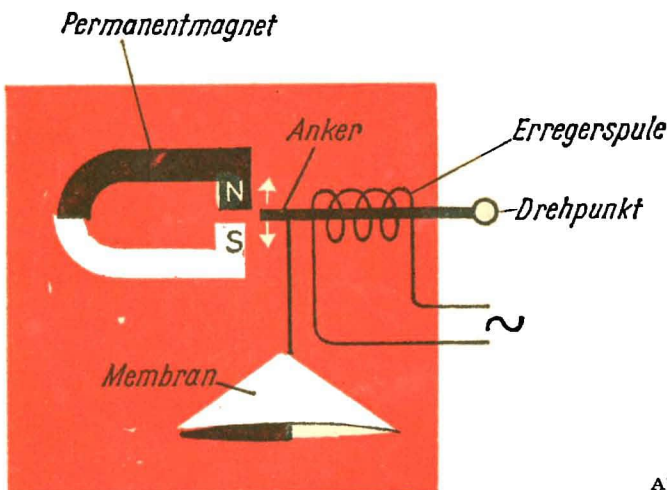


Abbildung 100

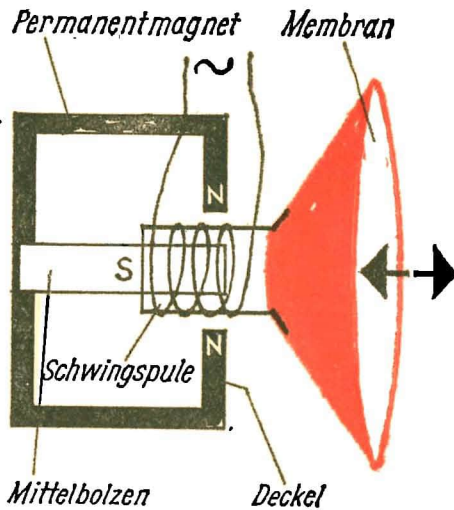


Abbildung 101

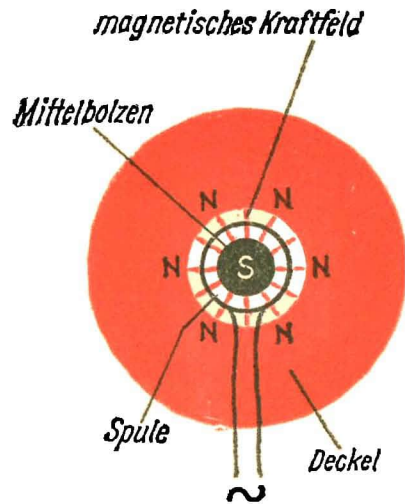
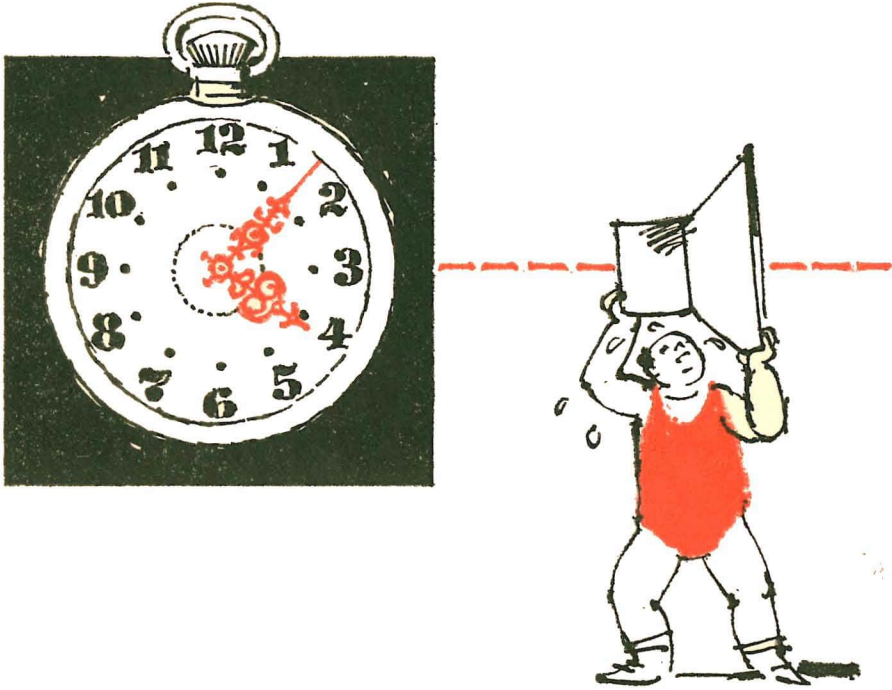


Abbildung 102

zwischen ihm und den Magnetpolen sehr gering ist. Der Anker ist über einen kleinen Stift mit der Membran verbunden, die hier durch einen großen konusförmigen Pappkegel gebildet wird. Mit dieser Anordnung sind also schon bedeutend größere Schwingamplituden möglich als mit dem Kopfhörer-Membran-Aufbau der Abb. 98. Noch vor etwa 30 Jahren war diese Lautsprecherausführung in allen billigen Radiogeräten zu finden.

Weitaus besser bewährten sich die heute ausschließlich benutzten dynamischen Lautsprecher. Sie werden in allen Größen und für alle Leistungen gefertigt. (Der Begriff Leistung rührt hier daher, daß zur Bewegung der Membran natürlich eine gewisse Kraft nötig ist — um so mehr, je kräftiger die Membran schwingen, je größer also die Lautstärke sein soll. Diese Kraft müssen wir dem Lautsprecher als elektrische Leistung zuführen.)

Abb. 101 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines dynamischen Lautsprechers. Ein starker Permanentmagnet ist als Topfmagnet ausgebildet — ein Pol wird von dem dicken Mittelbolzen, der andere von einem Deckel gebildet, der diesen Bolzen ringförmig umgibt. Zwischen Bolzen und Deckel befindet sich ein schmaler ringförmiger Luftspalt, in dem frei beweglich eine Schwingenspule sitzt, die direkt an der Membran befestigt ist. Wenn wir dieser Spule eine Wechselspannung zuführen, so wird sie in dem spaltförmigen Magnetfeld abgelenkt (die Pfeile deuten das an); sie taucht abwechselnd mehr oder weniger tief in den Magnetpalt ein. Wichtig ist dabei, daß die



Spule nicht am Deckelrand oder Mittelbolzen schleift oder sonstwie im Luftspalt des Magneten klemmt. Da sie direkt an der Membran sitzt und mit dieser zusammen als Ganzes schwingt (daher der Name Schwingspule!), entfallen alle mechanischen Befestigungen oder Zwischenglieder.

Dieser Lautsprecher ist heute schon so weit vervollkommen, daß er fast allen Ansprüchen genügt, auch in den Funk- und Fernsehstudios, wo ja an die Wiedergabequalität weit höhere Ansprüche gestellt werden als bei unserem Radio zu Hause. Es gibt bereits dynamische Lautsprecher, die nicht größer sind als eine Taschenuhr, andere wieder sind so groß und schwer, daß sie von einer Person kaum noch angehoben werden können (vor allem der Magnet ist dann sehr groß und schwer!).

Abb. 102 zeigt zur Verdeutlichung noch einmal die Aufsicht auf Magnet und Spule bei entfernter Membran. Das magnetische Kraftfeld verläuft hier sternförmig vom Mittelbolzen zum Deckel. Der Wirkungsgrad des Lautsprechers ist um so besser (die Lautstärke bei gleicher angelegter Wechselspannung um so größer), je stärker das Magnetfeld und damit der Magnet ist.

Während es heute möglich ist, ausreichend kräftige Permanentmagneten anzufertigen, mußte man noch vor etwa 20 Jahren zu

einem Hilfsmittel greifen, wenn man ein besonders kräftiges Magnetfeld haben wollte (Abb. 103):

Man brachte auf dem Mittelbolzen noch eine kräftige Spule fest unter, die mit Gleichstrom betrieben wurde. Der Mittelbolzen war dann kein Permanentmagnet, sondern einfaches Eisen. Das Ganze stellte aber einen kräftigen Elektromagneten dar, mit dem sich kräftigere Magnetfelder erzeugen ließen als mit den damals bekannten Magnetwerkstoffen. Nachteilig war der beträchtliche zusätzliche Stromverbrauch der Erregerspule und die Notwendigkeit einer Gleichstromquelle. Heute sind diese elektrodynamischen Lautsprecher als veraltet anzusehen; es wird nur noch der mit Permanentmagnet versehene permanentdynamische Lautsprecher benutzt. Die Unterscheidung elektrodynamisch / permanentdynamisch rührt aus der Zeit her, als beide Systeme nebeneinander benutzt wurden.

Auch der permanentdynamische Lautsprecher (wir nennen ihn in Zukunft einfach dynamischer Lautsprecher) läßt sich als Mikrofon verwenden — für unsere Zwecke sogar recht gut! Wenn die Membran des dynamischen Lautsprechers von Schallwellen getroffen wird, schwingt die Schwingspule in deren Takt im Magnetfeld. Dadurch wird in ihr eine Wechselspannung induziert — der Schall wird also auch bei diesem Lautsprecher in elektrische Schwingungen umgewandelt. (Für unsere Zwecke wollen wir Lautsprecher mit kleinen Membranen bevorzugen — kleine Membranen sind leichter, können schneller schwingen und geben deshalb bei der Verwendung als Mikrofon die hohen Töne besser wieder. Große Lautsprecher klingen als Mikrofon merklich dumpfer.)

Die Schwingspule beim dynamischen Lautsprecher hat nicht sehr viele Windungen — sie würde sonst nicht mehr in den schmalen

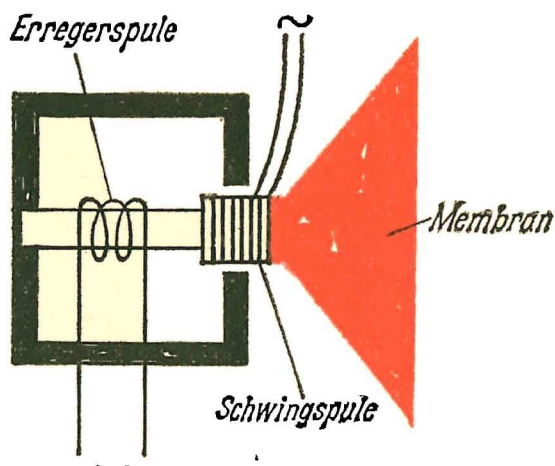


Abbildung 103

Luftspalt passen und auch zu schwer werden. Sie ist deshalb sehr niederohmig.

Der Widerstand üblicher Lautsprecherspulen liegt zwischen 2 bis höchstens 20Ω , meist um $3 \dots 6 \Omega$. (Eigentlich handelt es sich hierbei um den Scheinwiderstand – es fließt ja Wechselstrom durch die Spule. Der Techniker spricht deshalb hier von der Impedanz: Die Impedanz ist der Scheinwiderstand, den eine Spule bei einer Frequenz von 1 kHz hat. Exakt müßten wir also sagen: Die Lautsprecherimpedanz liegt bei wenigen Ohm.) Derartig geringe Widerstandswerte sind zum direkten Anschluß an andere Geräte meist ungeeignet. Wir wissen aber, daß man Widerstände transformieren kann, und zwar mit Übertragern (Seite 136). Deshalb gehört zu einem dynamischen Lautsprecher fast immer ein Lautsprecherübertrager, der diese Impedanztransformation vornimmt. Seine Sekundärwicklung ist mit der Schwingspule des Lautsprechers verbunden; der Primärwicklung wird die für den Lautsprecher bestimmte NF-Spannung zugeführt (Abb. 104). Die Schwingspulenimpedanz erscheint dann – mathematisch ausgedrückt – mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses des Übertragers an dessen Primärwicklung. Das hat den Vorteil, daß man den Anschlußwiderstand – die Anschlußimpedanz – des Lautsprechers auf beliebige Werte festlegen kann, indem einfach die Primärwicklung des Übertragers entsprechend bemessen wird. Es gibt sogar Lautsprecherübertrager, deren Primärwicklungen mehrere Anzapfungen (Teilwicklungen) haben, so daß man je nach Wahl der Anschlüsse verschiedene Anschlußimpedanzen zur Verfügung hat.

Das Übersetzungsverhältnis eines Lautsprecherübertragers (er wird auch Ausgangsübertrager oder Ausgangstrafo genannt) liegt meist bis 20:1 bis 30:1; die Primärspannung wird also herabtransformiert. Das bedeutet nicht etwa einen Lautstärkeverlust – die übertragene Leistung bleibt, wie wir wissen, konstant!

Die abgegebene Lautstärke ist nur von der dem Lautsprecher zugeführten Leistung abhängig.



Abbildung 104

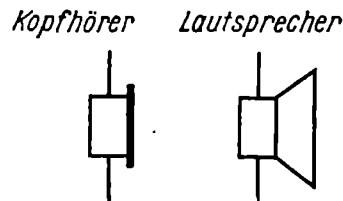


Abbildung 105

Wenn wir den Lautsprecher als Mikrofon verwenden, spielt der Übertrager ebenfalls eine Rolle. Die Schwingspule würde wegen ihrer geringen Windungszahl nur eine sehr geringe NF-Spannung abgeben. Mit dem Übertrager wird sie – entsprechend seinem Übersetzungsverhältnis – auf den 20...30fachen Wert erhöht, was uns sehr willkommen ist.

Versuchen wir einmal den Lautsprecher mit Übertrager an den Tonabnehmereingang eines Rundfunkgerätes anzuschließen! Die Primärwicklung des Übertragers muß also mit den Tonabnehmeranschlüssen verbunden sein. Wir werden feststellen, daß der Lautsprecher – je nach Größe und Ausführung – als Mikrofon zwar etwas dumpf klingt, aber für Bastlerzwecke als Mikrofon durchaus geeignet ist! Wenn unser Rundfunkgerät ausreichend verstärkt (oder wir uns einen NF-Verstärker selbst gebaut haben), dann können wir mit diesem „Mikrophon“ sogar leise Gespräche noch aus mehreren Metern Entfernung aufnehmen.

Die Abb. 104 zeigt uns das Schaltsymbol des Lautsprechers. Das Symbol für den Übertrager kannten wir bereits. In Abb. 105 sind das Lautsprechersymbol und das Kopfhörersymbol noch einmal angegeben. Um welche Lautsprecher- oder Hörerart es sich handelt, muß aus dem Schaltsymbol nicht erkennbar sein. Soweit das von Bedeutung ist, kann es im kompletten Schaltbild zusätzlich angegeben werden.

Mikrofone

Nach welchem Prinzip arbeitet nun das eigentliche Mikrofon? Dafür gibt es verschiedene Prinzipien. Eines kennen wir bereits: das des dynamischen Mikrofons. Es ähnelt im Aufbau dem dynamischen Lautsprecher (Abb. 106), hat jedoch eine besonders kleine und leichte Membran; auch die Schwingspule ist sehr leicht ausgeführt. Meist ist in seinem Gehäuse noch ein kleiner Anpassungsübertrager eingebaut, der die niedrige Schwingspulenimpedanz auf einen Wert von entweder 200 Ω oder einige Kiloohm herauftransformiert. Gleichzeitig erhöht sich damit die Spannungsabgabe.

Oft haben diese Mikrofone drei Anschlüsse; der dritte ist dann immer mit dem Gehäuse verbunden, um dieses erden zu können. Damit wird vermieden, daß von außen Störungen (fremde elektrische Kraftfelder!) in das Mikrofon eindringen können. Diese Mikrofonart wird wegen seiner Konstruktion (die Schwingspule taucht in den Magnetspalt ein) auch Tauchspulmikrofon genannt. Viele Reportermikrofons des Rundfunks sind so aufgebaut. Neuer-

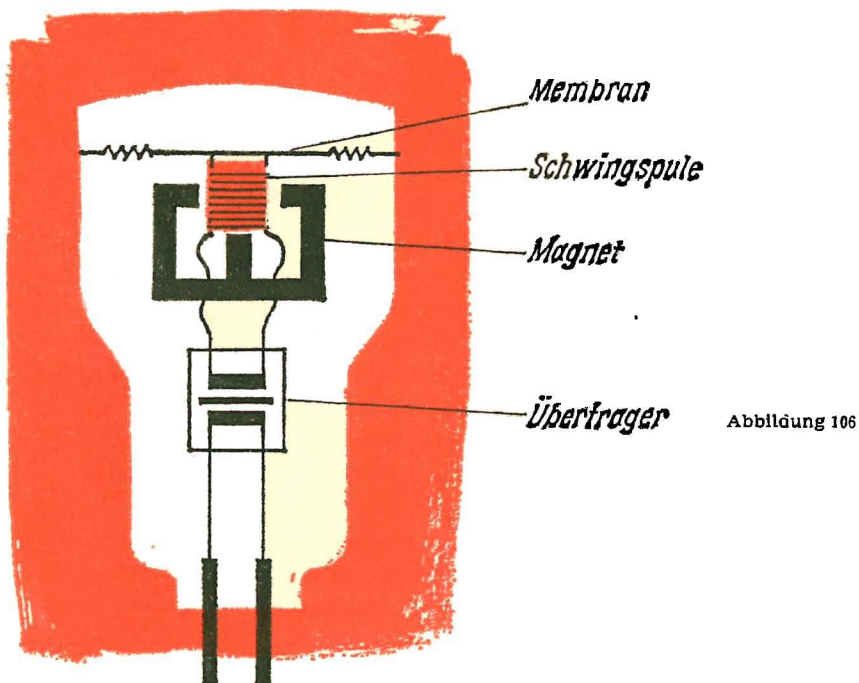


Abbildung 106

dings gibt es Tauchspulmikrofone, die trotz des notwendigen Magneten nicht größer und dicker sind als etwa eine Zigarre! Die Mikrofonübertrager sind ebenfalls sehr klein; es gibt Ausführungen, die nicht viel größer sind als ein Reißnagel!

Tauchspulmikrofone ermöglichen schon sehr hochwertige Übertragungen. Für Heimzwecke genügen sie hohen Ansprüchen. Sie sind vor allem sehr robust.

Das hochwertigste, aber auch komplizierteste und teuerste Mikrofon (beim Rundfunk und Fernsehen für hochwertige Aufnahmen fast ausschließlich benutzt) ist das Kondensatormikrophon. Für uns scheidet es schon wegen seines sehr hohen Preises aus, wir wollen es deshalb nur kurz besprechen.

Die eigentliche Mikrofonskapsel besteht aus einer hauchdünnen Membran (Abb. 107) und einer Gegenelektrode. Die Membran ist entweder aus Kunststoff mit dünnem Metallüberzug oder aus einem hauchdünnen Goldblättchen hergestellt. Das Gold ist so dünn, daß man hindurchblicken und die Gegenelektrode erkennen kann. In der Durchsicht erscheint dieses Metallblättchen wie grünes Zelluloid!

Der Abstand der Membran von der Gegenelektrode beträgt nur wenige tausendstel Millimeter. Die außergewöhnliche Präzision, die

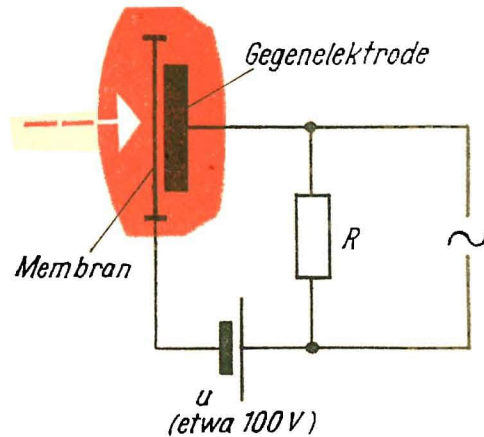


Abbildung 107

für den Aufbau notwendig ist, macht den hohen Preis verständlich. Membran und Gegenelektrode bilden einen Kondensator (daher auch der Name). An ihn wird über einen Widerstand R (der einen sehr hohen Wert von $100\text{ M}\Omega$ oder mehr hat!) eine Gleichspannung von etwa 100 V angelegt. Sobald Schallwellen die Membran treffen, ändert sich ihr Abstand zur Gegenelektrode – wenn auch nur um winzige Beträge. Das bedeutet eine Kapazitätsänderung des Kondensators, die allerdings sehr gering ist. Damit ändert sich aber auch die Ladung des Kondensators – wir können uns das so vorstellen, als würde der Kondensator, sobald seine Kapazität bei Annäherung der Membran an die Gegenelektrode wächst, von der Batterie ein wenig nachgeladen. Verringert sich die Kapazität wieder – beim Zurückweichen der Membran –, so fließt diese nachgeladene Elektrizitätsmenge wieder ab. Es pendelt also ein geringer Umladungsstrom im Takt der Schallwellen. Dieser Strom muß über den Widerstand R fließen und erzeugt dort einen Spannungsabfall. Parallel zu R kann man also eine Wechselspannung abnehmen. Sie ist jedoch dermaßen gering, daß man sie nicht über eine Leitung fortführen kann, sondern an Ort und Stelle verstärken muß. Daher ist die Kondensatorkapsel stets mit einer Verstärkerröhre zusammengebaut. Im Mikrofongehäuse sitzt dann außer der Gleichspannungsquelle U und dem Widerstand R noch ein kleiner Verstärker mit den zugehörigen Teilen.

Wichtiger ist für uns eine andere Mikrofonart: das Kristallmikrofon (Abb. 108). Es gibt bestimmte Kristallarten – z. B. Seignettesalz und Rochellesalz –, die die Eigenschaft haben, bei mechanischen Einwirkungen (Druck oder Biegung) eine elektrische Spannung zu erzeugen. Das wird hier ausgenutzt. Ein kleines stäbchenförmiges oder quadratisches Kristallplättchen wird auf beiden Seiten mit dünnen

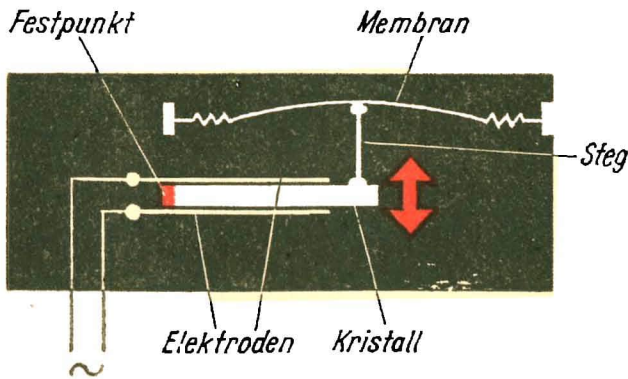


Abbildung 108

Metallfolien belegt, die als Elektroden dienen. Sie sind mit dem Mikrophonanschluß verbunden und haben die Aufgabe, die Spannung vom Kristall abzunehmen. Die Membran – ein dünnes, federnd eingespanntes Aluminiumblättchen – ist über einen kleinen Steg mit dem Kristall verbunden, das andere Ende des Kristalls ist fest eingespannt. Wenn die Membran schwingt, wird der Kristall etwas (in Pfeilrichtung) durchgebogen. An den Elektroden entsteht dadurch eine Spannung, deren Polarität und Höhe der Richtung und Stärke der Durchbiegung entspricht – die Spannung hat also den gleichen Verlauf wie die Schallschwingung.

Diese Mikrofone sind verhältnismäßig billig, ihre Qualität reicht aber für Heimzwecke völlig aus. Die zu Heimtonbandgeräten mitgelieferten Mikrofone sind zum Beispiel fast immer Kristallmikrofone. Diese Mikrofonart ist für uns sehr wichtig, schon deshalb, weil die anderen bisher besprochenen Mikrofonarten für Bastelzwecke zu teuer sind und das einzige Mikrofon, das noch billiger ist – das Kohlemikrofon –, in seiner Klangqualität nur für anspruchslose Sprechverständigung ausreicht.

Beim Kristallmikrofon müssen wir noch etwas zu seiner Anschlußimpedanz sagen – sie wird auch Quellwiderstand genannt, weil man das Mikrofon als Wechselspannungsquelle ansehen kann.

Wie jede Stromquelle hat auch jedes Mikrofon einen Innenwiderstand. Über seine grundsätzliche Bedeutung waren wir uns schon bei den galvanischen Elementen (Abb. 30) klargeworden. Wir wissen: Wenn der Außenwiderstand – etwa der Eingangswiderstand des nachfolgenden Verstärkers – zu gering gegenüber dem Quellwiderstand des Mikrofons ist, geht dessen Spannungsabgabe zurück, weil die Quellenspannung größtenteils am Innenwiderstand der Quelle abfällt. Aus Gründen, die wir hier nicht näher untersuchen wollen, treten dann auch starke Klangverfälschungen auf. Wir sehen also, daß Mikrofone mit geringem Quellwiderstand bedeutend vorteilhafter sind.

Wie steht es damit beim Kristallmikrofon? Zunächst müssen wir wissen, daß der Kristall nahezu ein Nichtleiter ist. Die beiden Elektroden bilden also gewissermaßen einen Kondensator gegeneinander, mit dem (spannungserzeugenden) Kristall als Dielektrikum dazwischen. Der Kristall ladet diesen Kondensator gewissermaßen auf.

Wir haben es beim Quellwiderstand des Kristallmikrofones mit einem Scheinwiderstand zu tun, der nicht einmal konstant ist, denn die abgegebene Frequenz ist es ja auch nicht! Deshalb müssen wir wissen, welche Kapazität dieser Kondensator etwa hat (meist zwischen 1000 und 10 000 pF) und uns dann darauf einigen, den Quellwiderstand für eine bestimmte Frequenz anzugeben, und zwar für 1 kHz. Wir können dann – wie früher schon erwähnt wurde – von der Quellenimpedanz sprechen. Sie liegt beim Kristallmikrofon bei ungefähr 1 M Ω , also ziemlich hoch.

Der Eingangswiderstand des nachgeschalteten Verstärkers muß entsprechend hoch sein, und dies ist leider ein Mangel dieses sonst recht brauchbaren Mikrofontyps. Die Verbindungsleitung zwischen Mikrofon und Verstärker wird nämlich dadurch recht empfindlich gegen Störungen durch fremde elektrische Felder, so daß wir sie nicht sehr lang machen dürfen. Noch ein weiterer für uns sehr wichtiger Grund kommt hinzu: In der Mikrofonleitung laufen beide Leitungsadern nebeneinander, sie bilden deshalb zueinander einen Kondensator! (Denken wir an Abb. 75: Die beiden Platten können auch andere Form haben, ohne daß sich am Prinzip etwas ändert, sie können also auch die Form zweier nebeneinander verlaufender Drähte haben!) Infolgedessen hat jede Leitung eine Kapazität der beiden Leitungsadern gegeneinander aufzuweisen! Wir können sie nur verringern, indem wir die Leitung kürzer machen. Einige tausend pF Leitungskapazität kommen schnell zustande, aber dieser Wert liegt schon in der Größenordnung der Kapazität unserer Quelle! Die Leitung wirkt also wie ein dem Mikrofon parallelgeschalteter Kondensator und damit – wir übertragen ja Wechselspannung! – wie ein zusätzlicher Verbraucher! Ist die Leitung zu lang, so geht gerade beim Kristallmikrofon viel Spannung durch diese Leitungskapazität verloren! Das müssen wir wissen, denn gerade mit Kristallmikrofonen werden wir es ab und zu zu tun haben.

Das Kristallmikrofon hat aber erfreulicherweise auch einen Vorteil: Von den bisher besprochenen Mikrofonarten gibt es – wenn wir alle Mikrofone bei gleicher Schallstärke vergleichen – die höchste Spannung ab: Wenn wir aus 1 m Entfernung normal sprechen, können wir mit etwa 1 mV (= $1/1000$ V) NF-Spannung rechnen.



Das einfachste Mikrofon ist das Kohlemikrofon. Seine Übertragungsfähigkeit läßt sich ein solches Mikrofon billig bauen. Die Übertragungsqualität reicht nur für mittelmäßige Sprachwiedergabe aus; aussetzung für eine Massenfabrikation, wie sie beispielsweise für Fernsprechzwecke erforderlich ist. Alle Telefonmikrofone sind deshalb Kohlemikrofone.

Das Kohlemikrofon wirkt wie ein veränderlicher Widerstand. Um uns das Prinzip des Kohlemikrofons zu erklären, führen wir einen Versuch durch. Dazu brauchen wir zwei Kohlestäbe, die wir aus alten Taschenlampenbatterien ausbauen und zuvor sorgfältig säubern (auskochen!) und gut trocknen. Abb. 109 zeigt den Versuchsaufbau. Eine leere Zigarrenkiste dient als Resonanzboden. Auf ihn legen wir beide Kohlestäbe gekreuzt aufeinander. An ihrer Berührungsstelle kann der Strom von einer Kohle auf die andere übergehen.

Der Widerstand, der dem Strom an dieser Stelle entgegengesetzt wird, ist bei der Kohle druckabhängig. Drücken wir die Kohlestifte stärker gegeneinander, so wird der Übergangswiderstand geringer. Werden die Kohlen erschüttert — etwa durch Klopfen an den Kasten oder laute Geräusche, die den Resonanzboden vibrieren lassen —, so ändert sich der Übergangswiderstand im Rhythmus dieser Erschütterungen bzw. der Resonanzbodenschwingung.

Wir schalten diese Anordnung in Serie mit einer Batterie und einem guten Kopfhörer. Die Widerstandsänderung bei der Kohle macht

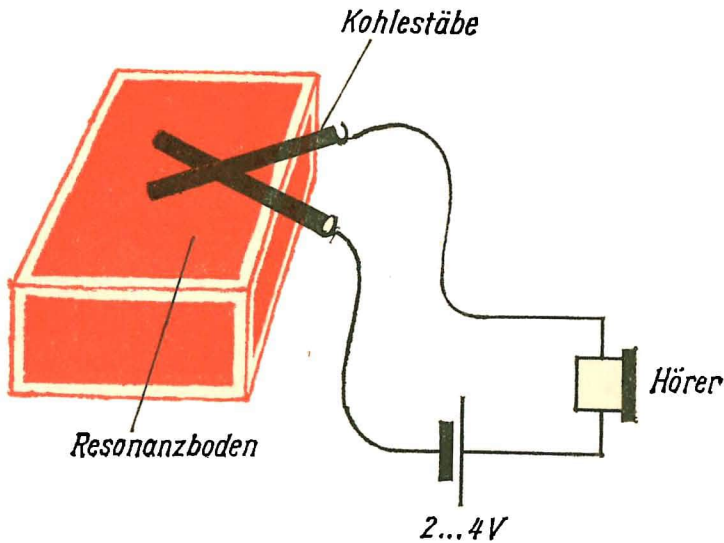


Abbildung 109

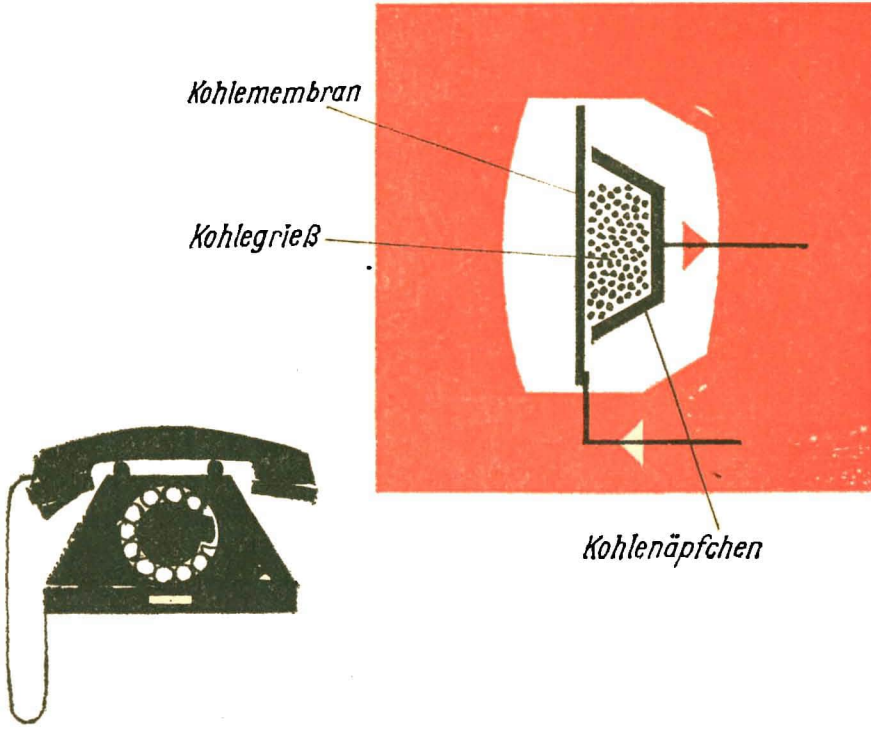
sich dann als Stromschwankung bemerkbar – wir können im Hörer das von unserem Kohlestab-Versuchsmikrofon aufgenommene Geräusch leise hören!

Den Aufbau eines industriell gefertigten Kohlemikrofons zeigt uns Abb. 110. Die Membran besteht aus einem dünnen Kohleplättchen, dahinter sitzt ein kleines Kohlenäpfchen, in ihm befindet sich etwas Kohlegrieß (kleine Kohlekörnchen). Der Strom geht von der Membran in den Kohlegrieß und von da in das Näpfchen über. Die Membranschwingungen drücken den Kohlegrieß mehr oder weniger stark zusammen – es entsteht der gleiche Effekt wie bei unserem Versuch, jetzt aber wegen der zahlreichen Übergangsstellen zwischen den Körnchen viel deutlicher!

Wie Abb. 110 andeutet, sind alle Fernsprechmikrofone aufgebaut. Wenn wir eine solche Kohle-Einsatzkapsel am Ohr schütteln, hören wir den lose im Näpfchen liegenden Kohlegrieß deutlich rascheln. Das Kohlemikrofon benötigt also eine Stromquelle.

Die Abb. 111 zeigt die Schaltung unseres Versuchsaufbaus unter Benutzung der Schaltsymbole. Bereits bekannt sind uns die für Hörer und Batterie. Das Mikrofonsymbol gilt allgemein; die Bauart ist daraus nicht ersichtlich. Deshalb muß die Mikrofonart in Schaltbildern erforderlichenfalls noch zusätzlich angegeben werden.

Unser Kohlemikrofon liefert Stromschwankungen. Zum Betrieb eines Hörers – wie in Abb. 111 ist das gerade das Richtige. Aber



Kohlemembran

Kohlegrieß

Kohlenäpfchen

Abbildung 110

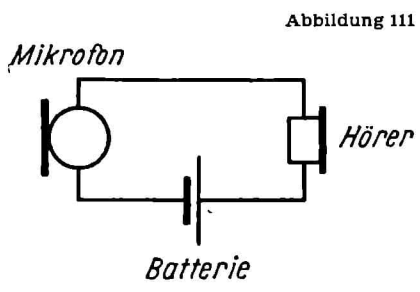


Abbildung 111

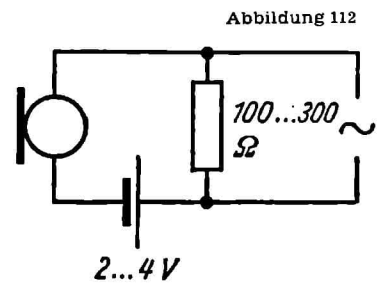


Abbildung 112

für den Anschluß eines Verstärkers benötigen wir die NF-Schwingung als NF-Spannung. Wie gehen wir vor, um eine NF-Spannung vom Kohlemikrofon abnehmen zu können?

Abb. 112 zeigt, wie man stets – nicht nur bei Mikrofonen! – eine Stromschwankung in eine pannungsschwankung überführt: Der Mikrofonstrom durchfließt einen Widerstand und erzeugt an ihm einen Spannungsabfall. Schwankt der Strom jetzt im Takt der NF-Schwingung, so muß nach dem Ohmschen Gesetz auch der Spannungsabfall an diesem Widerstand schwanken, Parallel zu ihm können wir also unsere NF-Spannung abgreifen.

In Abb. 112 sind für Widerstand und Batterie gleich die in Frage

kommenden Werte eingetragen, wie sie für die Verwendung normaler Fernsprech-Kohlemikrofone für uns am günstigsten sind. Mit einem solchen Mikrofon können wir die Schaltung nach Abb. 112 aufbauen und die beiden vom Widerstand abgehenden Leitungen wieder mit dem Tonabnehmeranschluß unseres Radios verbinden. Wir werden dann feststellen, daß die vom Mikrofon abgegebene NF-Spannung (die wir am Widerstand abgreifen) weit kräftiger ist als bei allen anderen Mikrofonen — leider klingt die Übertragung nicht besser als eine Telefonübertragung, sondern eher noch schlechter, weil der Radiolautsprecher viele Verzerrungen des Mikrofones hörbar macht, die die Telefonhörkapsel und Telefonleitung unterdrücken. Außerdem bemerken wir ein dauerndes Kratzen und Prasseln in der Übertragung: Es rührt von ständigen leichten Bewegungen des Kohlegrießes und von winzigen Fünkchenbildungen zwischen den einzelnen Kohlekörnern her. Durch möglichst geringe Batteriespannung (dann wird aber auch die abgegebene NF-Spannung geringer!) können wir diese Störungen in erträglichen Grenzen halten.

Rundfunkröhren (Elektronenröhren)

Die Vakuumdiode

Bisher haben wir stets angenommen, daß sich die Elektronen nur in einem Leiter bewegen. Daß sie sich aber auch unabhängig vom Vorhandensein eines Leiters im freien Raum bewegen können, ist eine der wichtigsten Voraussetzungen der Rundfunktechnik.

Wenn wir einen Draht bis zur hellen Glut erhitzen, gerät sein Molekülgefüge in so starke Schwingungen, daß aus seiner Oberfläche freie Elektronen herausgeschleudert werden (so können wir uns das vorstellen). Diese Elektronen kommen bei normalem Luftdruck nicht weit, sie prallen sofort auf die sie umgebenden Luftmoleküle.

Anders ist das im luftleeren Raum. Durch die Wucht, mit der die Elektronen aus dem Glühdraht geschleudert werden, entfernen sie sich einige Millimeter von dem Glühdraht (für atomare Größenverhältnisse ist das bereits eine sehr große Entfernung!) und bilden dann um ihn eine Elektronenwolke.

Abb. 113 zeigt uns einen luftleeren Glaskolben mit einem Glühdraht. Er wird durch eine Heizbatterie zum Glühen gebracht. Den Vorgang, der zur Bildung der Elektronenwolke führt, nennt man Glühemission (oder in der Röhrentechnik kurz: Emission).

Emittieren heißt soviel wie ausstrahlen. Mit der Heizbatterie hat dieser Vorgang nichts zu tun; wir könnten den Glühdraht auch



anders, etwa von außen durch eine Gasflamme oder auf andere Weise zum Glühen bringen.

Eine Elektrode, die Elektronen aussendet, hatten wir früher schon Katode genannt, der Glühdraht bildet also jetzt die Katode. In einiger Entfernung von dieser Katode ist eine zweite Elektrode – etwa eine Blechplatte oder ein Blechzylinder – angebracht: die Anode.

Zwischen Anode und Katode schalten wir eine zweite Batterie – die Anodenbatterie –, und zwar so, daß der Pluspol an der Anode liegt. Die Anode wird dann die frei im Raum fliegenden Elektronen anziehen – damit entfernt sich die Elektronenwolke von der Katode: die Elektronen werden von der Anode aufgefangen. Sie fließen zur

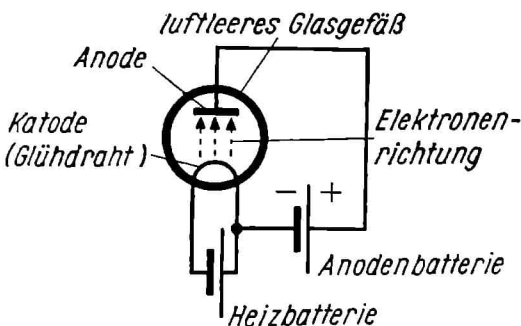


Abbildung 113

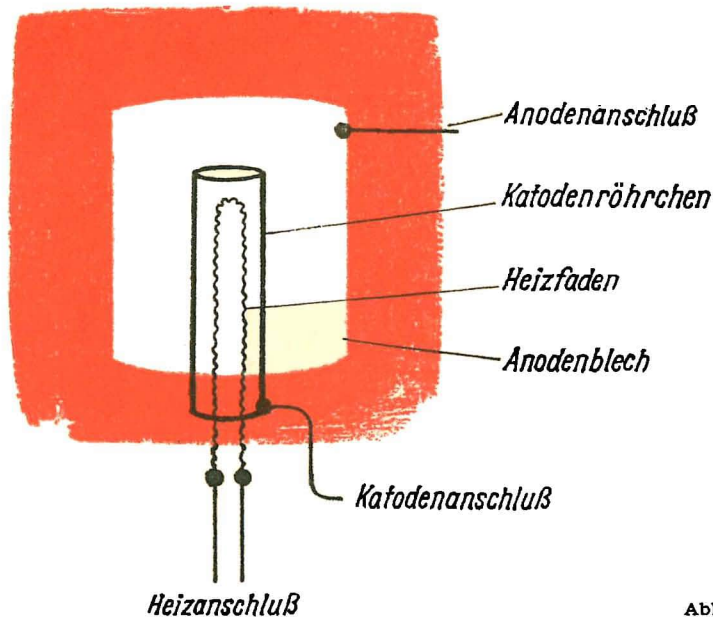


Abbildung 114

Anodenbatterie und von da wieder zur Katode. Diese treibt — da durch die Wirkung der Anodenbatterie an ihr jetzt ein Elektronenüberschuß besteht — die Elektronen zusätzlich noch von sich weg und zur Anode hin. Es fließt also ein Strom durch die Röhre, obwohl zwischen Katode und Anode keine Verbindung besteht!

Da es gleichgültig ist, wie die Katode zum Glühen gebracht wird, kann man deshalb die Röhre auch so aufbauen, wie Abb. 114 zeigt: Die Katode ist jetzt ein Röhrchen, das außen mit einer Schicht aus bestimmten Chemikalien (z. B. Bariumoxid) überzogen ist, die die Eigenschaft hat, schon bei verhältnismäßig geringen Glühtemperaturen (Rot- bis Gelbglut) reichlich Elektronen zu emittieren.

Das Kathodenröhrchen wird durch einen in ihm isoliert untergebrachten Heizfaden zum Glühen gebracht. Der Heizfaden hat jetzt keine Verbindung mehr mit der Katode. Die Anode ist als Blechzylinder um die Katode angeordnet. Die Abb. 115 zeigt diesen Aufbau in Skizzenform. Der Effekt ist der gleiche wie in Abb. 113.

Vorteilhaft ist, daß Heizbatterie (Kurzbezeichnung der Heizspannung: U_h) und Anodenbatterie (Kurzbezeichnung für die Anodenspannung: U_a) jetzt voneinander getrennt sind.

Der Unterschied zwischen beiden Röhrenformen besteht also nur in der Heizung: Wir sprechen dann, wenn der Glühdraht selbst zugleich die Katode ist, von direkter Heizung, im anderen Fall — Kato-

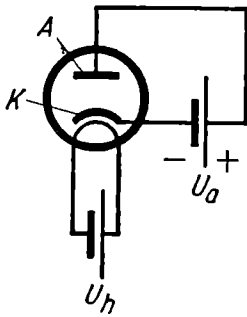


Abbildung 115

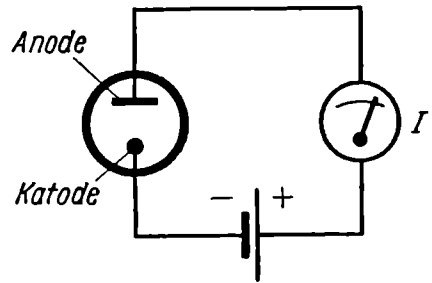


Abbildung 116

denröhrchen mit isoliert eingesetztem Heizfaden – von indirekter Heizung.

Die indirekte Heizung hat mitunter auch einen Nachteil: Nach dem Einschalten der Röhrenheizung dauert es eine Weile, bis die Katode zum Glühen kommt und die Röhre arbeiten kann. Deshalb müssen wir bei unserem Radio nach dem Einschalten eine Weile warten, da dessen Röhren fast immer indirekt geheizt sind!

Direkt geheizte Röhren sind schon ungefähr eine Sekunde nach dem Einschalten betriebsbereit, da der Heizdraht sofort aufglüht.

Als Batterieröhren finden wir direkt geheizte Röhren in älteren Kofferradios. Solche Empfänger spielen sofort beim Einschalten.

Bei der Betrachtung von Schaltungszeichnungen interessiert den Techniker meist nicht, ob eine Röhre direkt oder indirekt geheizt ist. Der Fachmann kann das außerdem an der Typenbezeichnung erkennen, wie wir noch sehen werden. Man hat deshalb das Schaltsymbol für diese Röhre soweit vereinfacht, daß die Katode einfach durch einen Punkt dargestellt wird, die Anode durch einen Strich. Abb. 116 zeigt uns das.

Gezeichnet wird nur der Anodenstromkreis. Damit wollen wir uns jetzt beschäftigen. Der von der Anode aufgefangene Elektronenstrom wird Anodenstrom genannt. Abb. 116 zeigt, wie wir ihn mit dem Amperemeter I messen können. Der beim Amperemeter hier ausnahmsweise eingezeichnete Zeiger zeigt, daß ein Anodenstrom fließt. Was geschieht, wenn wir die Batterie umpolen? Die Anodenspannung liegt dann mit dem Minuspol an der Anode (Abb. 117). Jetzt fließt kein Anodenstrom. Die Katode ist positiv geladen und fängt daher dadurch die Erwärmung emittierten Elektronen sofort wieder ein. Zur Anode können die Elektronen auch deshalb nicht gelangen, weil die Anode jetzt negativ ist und die Elektronen abstoßt. Aus der Anode können aber auch keine Elektronen aus-

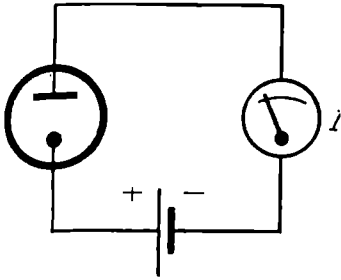


Abbildung 117

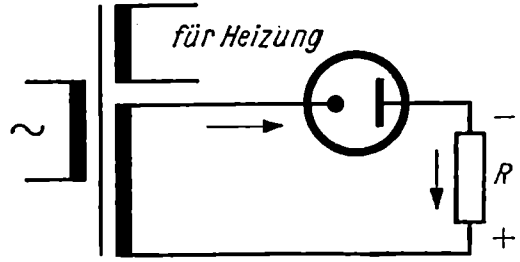


Abbildung 118

treten, denn diese ist ja kalt! Die Röhre läßt den Elektronenstrom also nur in einer Richtung durch: von der Katode zur Anode. In umgekehrter Richtung sperrt sie den Strom. Wir haben ein elektrisches „Ventil“ vor uns!

Wie wir sehen, hat die Röhre nur zwei Anschlüsse. In Wirklichkeit sind vier da – Abb. 115 – oder drei – Abb. 113 –, aber die Heizanschlüsse werden nicht mitgezählt, da sie nicht unmittelbar mit der Röhrenfunktion in Zusammenhang stehen. Es sind nur Hilfsanschlüsse!

Diese Röhre wird deshalb auch als Zweipolröhre oder Diode bezeichnet. Eine Diode können wir also als elektrisches Ventil verwenden. Wir werden später noch andere Dioden kennenlernen und, wo eine genaue Unterscheidung nötig ist, diese Röhre als Vakuumdiode bezeichnen (Vakuum = luftleerer Raum).

Was geschieht, wenn wir an die Diode eine Wechselspannung anlegen (Abb. 118), die wir einem Trafo entnehmen (der gleich eine zweite Wicklung bekommen kann, mit der wir die Heizspannung für die Diode erzeugen können!)? Der Widerstand R stellt den Verbraucher dar.

Betrachten wir zunächst die negative Halbwelle des Wechselstromes – der Minuspol der Spannung tritt am oberen Anschluß der Trafowicklung auf. Die Diode wird dann einen Strom durchlassen, denn ihre Katode ist jetzt negativ. Der Strom fließt in Pfeilrichtung durch den Widerstand R , an ihm steht also eine Spannung mit der angegebenen Polarität.

Die positive Halbwelle der Wechselspannung tritt mit dem Pluspol an der Katode auf. Jetzt ist die Diode also wie in Abb. 117 gepolt: Sie sperrt! Diese Halbwelle des Wechselstromes wird nicht durchgelassen; am Widerstand R kann während dieser Zeit keine Spannung auftreten.

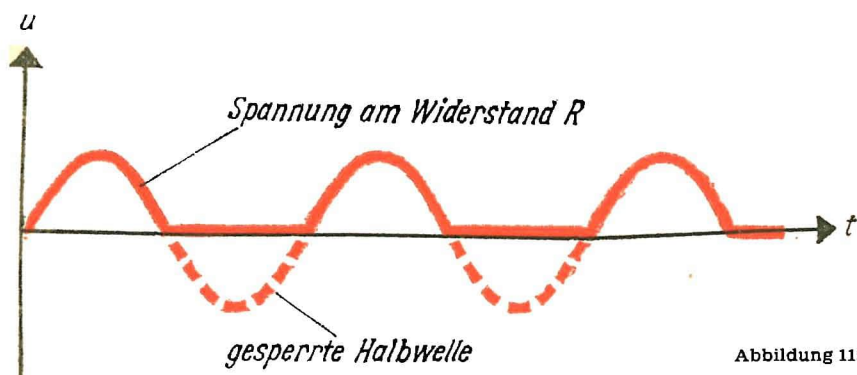


Abbildung 119

Der Strom fließt also nur in einer Richtung durch den Widerstand: Wir haben den Wechselstrom gleichgerichtet, durch R fließt Gleichstrom! Allerdings fließt dieser Gleichstrom nur während einer Halbwelle der Wechselspannung, er pulsiert. Die an R abfallende Spannung ist deshalb eine pulsierende Gleichspannung. Ihren zeitlichen Verlauf zeigt Abb. 119; punktiert gezeichnet ist die fehlende Halbwelle, die von der Diode gewissermaßen abgeschnitten wird. Wie wir aus der pulsierenden Gleichspannung eine saubere, wirklich gleichbleibende Spannung erhalten, erfahren wir in einem späteren Abschnitt.

An dieser Stelle ein Ratschlag: Wir wollen uns bei der Betrachtung von Schaltungen von vornherein angewöhnen, uns nach der Elektronenrichtung innerhalb der Röhre zu orientieren. Es wäre von Nachteil, wenn wir uns einfach merken würden, daß der Pluspol der Spannung an der Anode liegen muß, wenn Anodenstrom fließen soll. Das ist zwar richtig, kann aber trotzdem zu Irrtümern führen. Ein Beispiel: In Abb 118 liegt der Minuspol der an R abfallenden Spannung scheinbar an der Anode – aber eben nur scheinbar! Beim Betrachten der Elektronenflußrichtung sehen wir sofort, daß sich die Elektronen tatsächlich am oberen Ende von R stauen, also dort der Minuspol der an R meßbaren Spannung liegt.

Wollen wir die Röhre betrachten, so müssen wir die an ihr zwischen Katode und Anode liegende Spannung untersuchen. Die Elektronen, die sich am oberen Ende von R stauen, kommen ja von der Anode, sie fehlen also dort. Die am unteren Ende von R abgewanderten Elektronen sind über die Trafowicklung zur Katode gelangt – dort ist ein Elektronenüberfluß vorhanden. Die an der Diode zwischen Katode und Anode meßbare Spannung tritt also mit Minus an der Katode auf. Würden wir uns, anstatt solche Überlegungen anzustellen, einfach die Regel „Plus muß an Anode sein“ merken, so wäre das nicht klar erkennbar!

Das Steuergitter

Ihre eigentliche Bedeutung erhielt die Röhrentechnik durch die Erfindung des Steuergitters. Was hat es damit auf sich?

In die Röhre fügen wir jetzt zwischen Katode und Anode ein Drahtgitter ein. Im Schaltsymbol wird das so dargestellt, wie Abb. 120 zeigt. Während die ersten Röhren dieser Art tatsächlich ein einfaches Drahtnetz hatten, besteht das Gitter bei modernen Röhren aus einer kleinen Drahtspirale, die die Katode in geringem Abstand umgibt (Abb. 121).

Zunächst schließen wir das Gitter nicht an und wiederholen den Versuch nach Abb. 116. Es fließt wieder ein Anodenstrom – die Elektronen fliegen zwischen den Gitterdrähten hindurch. Nach kurzer Zeit sehen wir aber am Strommesser, daß der Anodenstrom immer schwächer wird und schließlich fast ganz versiegt. Was ist geschehen?

Einige der Elektronen prallen auf die Gitterdrähte und werden vom Gitter aufgefangen. Von da können sie aber nicht weiter, daher kommt auf dem Gitter sehr bald ein Elektronen-„Stau“ zustande, und das Gitter lädt sich negativ auf. Dadurch werden sie aber die zwischen den Gitterdrähten hindurchfliegenden Elektronen mehr und mehr behindert – das negative Gitter stößt sie zur Katode zurück. Verbinden wir das Gitter jetzt mit der Katode, so können die dort angesammelten Elektronen zur Katode abfließen – der Anodenstrom hat sofort wieder seine volle Höhe.

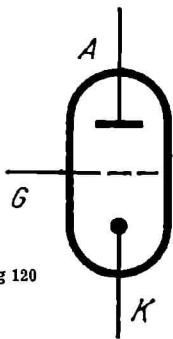


Abbildung 120

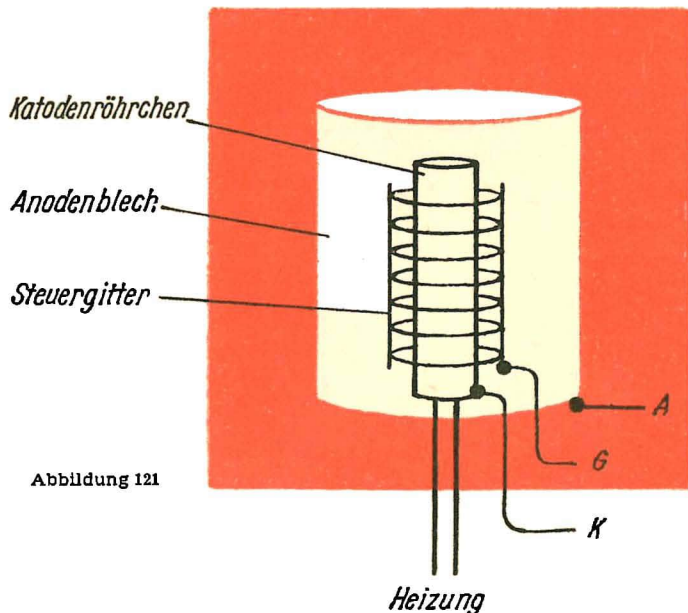


Abbildung 121

Nun laden wir das Gitter absichtlich negativ auf. Dazu verwenden wir eine zweite Batterie, die diese Gitterspannung (wir wollen sie kurz U_g nennen) liefert, wie Abb. 122 zeigt.

Wir beobachten erneut, daß der Anodenstrom durch das negative Gitter geschwächt wird und – wenn wir U_g nur groß genug machen – sogar ganz gesperrt wird. Die Röhre läßt dann keinen Strom mehr durch.

Nun polen wir die Gitterbatterie um, so daß das Gitter positiv wird. Jetzt fließt ein besonders starker Anodenstrom – stärker als zuvor ohne Gitter! Das positive Gitter zieht die Elektronen zusätzlich an und verleiht ihnen besonderen „Schwung“; es unterstützt also die Saugwirkung der Anode. Allerdings fängt das Gitter jetzt auch selbst Elektronen ein – es wirkt wie eine Anode. Auf die dünnen Gitterdrähtchen prallen viele Elektronen auf, so viele, daß das Gitter leicht zum Glühen kommen und sogar zerstört werden kann.

Wir wollen uns merken, daß ein Gitter deshalb normalerweise keine positive Spannung bekommen darf. Wenn das Gitter negativ ist (Abb. 122), kann aber kein Gitterstrom fließen (wie bei der Anode). Interessant ist also, daß die Gitterbatterie zwar eine Gitterspannung U_g liefert, aber keinen Strom abzugeben braucht!

Wir wollen die Gitterspannung nun in ihre Höhe ändern und sehen, was dabei geschieht. Abb. 123 zeigt uns drei in Serie geschaltete Batterien, und mit dem Stufenschalter S können wir entweder in Stellung 0 das Gitter mit der Katode verbinden (dann wirkt es so, als sei es nicht vorhanden) oder die Gitterspannung auf 1, 2 oder 3 Volt einstellen.

Die Anodenspannung U_a haben wir in dieser Abbildung mit angegeben; sie ist meist bedeutend höher als die Gitterspannung – die Anode ist ja auch bedeutend weiter von der Katode entfernt als das Gitter.

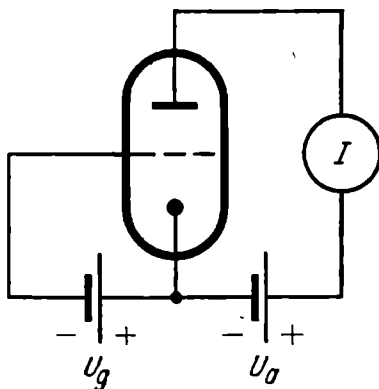


Abbildung 122

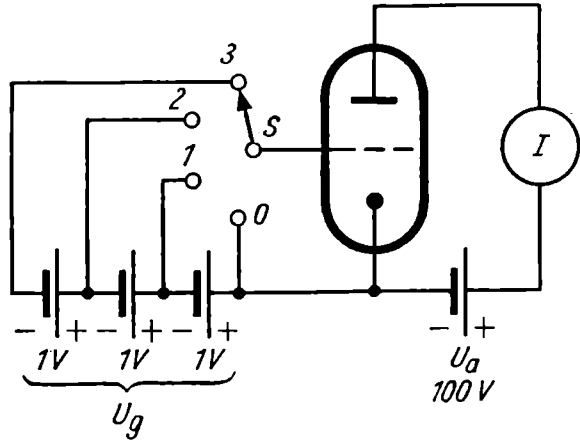


Abbildung 123

Wir stellen den Schalter auf 0 und lesen am Instrument I den Anodenstrom ab. Dann schalten wir S auf 1 V Gitterspannung. Der Anodenstrom wird bedeutend schwächer. Wir erhöhen auf 2 V Gitterspannung – der Anodenstrom wird noch schwächer, weil die abstoßende Wirkung des Gitters auf die Elektronen jetzt stärker ist. Bei 3 V Gitterspannung schließlich ist der Anodenstrom nur noch gering, und würden wir die Gitterspannung weiter erhöhen, so hörte der Anodenstrom ganz auf. Wir sagen dann, die Röhre ist gesperrt. Der Anodenstrom kann durch Änderung der Gitterspannung reguliert werden, obwohl kein Gitterstrom fließt, das Gitter also keine Leistung aufnimmt! Wir können den Anodenstrom daher leistungslos steuern. Wenn wir an das Gitter aber eine Spannung anlegen, ohne daß ein Strom fließt, können wir auch sagen, das Gitter hat scheinbar einen unendlich hohen Eingangswiderstand – das ergibt sich wieder aus dem Ohmschen Gesetz!

Nun legen wir an das Gitter eine Wechselspannung an. Die negative Halbwelle der Wechselspannung macht das Gitter dann im Rhythmus des Kurvenverlaufes mehr oder weniger negativ, und der Anodenstrom macht diese Schwankungen mit – sein zeitlicher Verlauf ist ein genaues Abbild dieser Halbwelle. Sobald die zweite Halbwelle der Wechselspannung beginnt, wird das Gitter positiv – doch das darf nicht geschehen! Die Wechselspannung darf nicht einfach an das Gitter gelegt werden; wir müssen dafür sorgen, daß es immer negativ gegen die Katode bleibt.

Wir nehmen also wieder eine Gitterbatterie zu Hilfe. Als Wechselspannungsquelle verwenden wir ein Mikrofon. Abb. 124 zeigt die Schaltung.

Das Mikrofon liegt als Wechselspannungsquelle in Serie mit der Gittervorspannung U_g . Die Wechselspannung wird sich also in ihrer

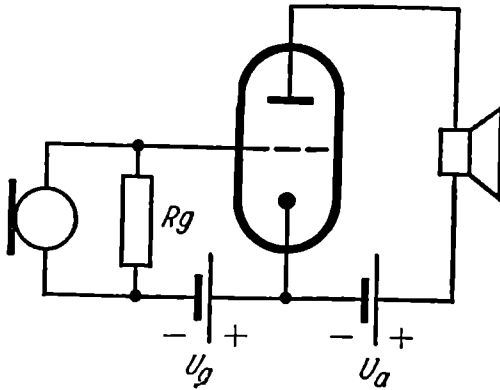
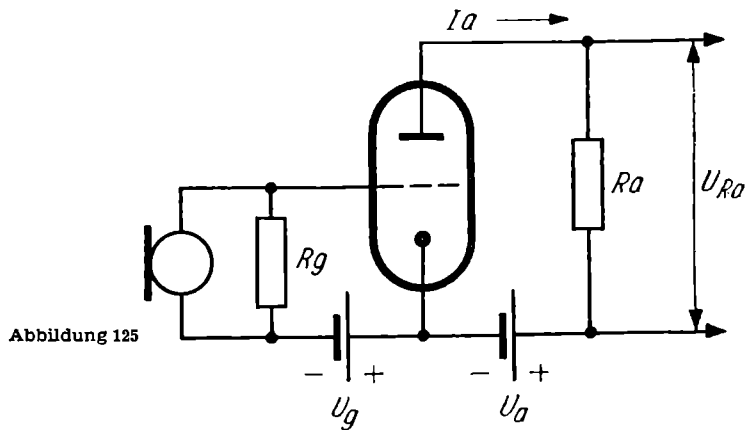


Abbildung 124

negativen Halbwelle zur Gittervorspannung addieren, in ihrer positiven davon subtrahieren. Die Spannung am Gitter schwankt damit im Rhythmus der Wechselspannung, bleibt aber immer negativ, wenn wir dafür sorgen, daß U_g größer ist als die Wechselspannung. Warum sprechen wir auf einmal von Vorspannung? Weil U_g nur noch die Aufgabe hat, das Gitter negativ zu halten, ihm eine gewisse Voraufladung zu geben, um deren Mittelwert dann die Gitterspannung pendelt.

Die eigentliche Steuerung des Anodenstromes erfolgt durch die Wechselspannung, sie ist also die Steuerspannung. Der Anodenstrom macht alle Schwankungen der Gitterspannung mit — seine Schwankungen haben den gleichen zeitlichen Verlauf wie die Gitterwechselspannung. Allerdings darf der Anodenstrom nicht ganz den Wert Null erreichen, denn dann könnte es geschehen, daß ein Teil der Stromschwankungen — unserer Wechselspannungskurve — „unterschlagen“ werden: Noch geringer als Null könnte der Anodenstrom ja nicht werden, selbst wenn die Gittersteuerspannung noch weiter nach negativen Werten anstiege! Diese Erscheinung ist also unerwünscht.

In Abb. 124 ist an Stelle des Meßinstrumentes ein Lautsprecher in den Anodenstromkreis geschaltet. Seine Membran macht die Stromschwankungen mit, so daß sie hörbar werden. Wozu ist aber der mit R_g bezeichnete Gitterwiderstand vorhanden? Im Falle unseres Versuches wäre er eigentlich nicht notwendig, doch wir wissen ja nicht, was für ein Mikrofon angeschlossen wird. Wenn es ein Kristallmikrofon wäre (Abb. 108), müßten wir daran denken, daß dieses Mikrofon ja wie ein Kondensator aufgebaut ist— zwischen seinen Elektroden könnte kein Gleichstrom fließen, da der Kristall isoliert. Die Gittervorspannung von der Gitterbatterie ist aber eine Gleich-



spannung — sie könnte daher nicht zum Gitter gelangen! Um ihr diesen Weg zu ermöglichen, ist R_g vorhanden. Über diesen Widerstand kann die Gittervorspannung zum Gitter kommen. Da kein Gitterstrom fließt, darf R_g einen sehr hohen Wert haben (einige $M\Omega$!), ohne daß an ihm Spannung verlorenght. (Ohmsches Gesetz).

Warum aber mit dieser Röhre eine Verstärkerwirkung möglich ist, können wir aus Abb. 124 noch nicht klar erkennen. Was wir bezwecken, ist doch die Verstärkung kleiner Spannungen auf Werte, mit denen wir etwas anfangen können. Denken wir an die geringe Spannungsabgabe von Mikrofonen (höchstens wenige Millivolt) und Antennen (höchstens einige zehntel Millivolt!). Bisher haben wir mit einer Gitterwechselspannung Anodenstrom schwanken lassen.

In diesem Zusammenhang wollen wir uns mit einigen neuen Begriffen bekanntmachen: Als Eingang der Röhre bezeichnen wir den Anschluß, dem die zu verstärkende Spannung zugeführt wird, also nicht nur das Gitter, denn wir können ja eine Spannung nicht an einem einzigen Punkt anlegen! Also: Gitter und Katode bilden den Eingang. Der Ausgang ist dort, wo die verstärkte Spannung zum Vorschein kommt: zwischen Anode und Katode.

Wenn wir Abb. 125 mit Abb. 124 vergleichen, sehen wir, daß sich eingangsseitig nichts geändert hat, nur ausgangsseitig haben wir den Lautsprecher durch einen Widerstand ersetzt. Er wird Anodenwiderstand genannt; wir bezeichnen ihn kurz mit R_a .

Durch den Anodenwiderstand fließt der Anodenstrom, also entsteht an R_a ein Spannungsabfall. Er ist um so größer, je größer der Anodenstrom ist. Steigt der Anodenstrom, so steigt auch der Spannungsabfall (in Abb. 125 mit U_{Ra} bezeichnet); fällt der Anodenstrom, so fällt auch U_{Ra} . Den Anodenstrom können wir auch mit I_a bezeichnen.

Wenn der Anodenstrom nun im Takt der Eingangswechselspannung (in diesem Fall der Mikrofonspannung) pendelt, dann muß U_{Ra} im gleichen Takt pendeln.

Wir wollen annehmen, daß in der Abb. 123 2 V Gitterspannung eingestellt sind und daß wir den Anodenstrom beispielsweise mit 0,1 A messen. Das Meßinstrument ersetzen wir durch einen Widerstand, wie wir das schon in der Abb. 125 getan haben. Er soll 100 Ω haben. Und nun müssen wir rechnen.

Der Spannungsabfall an R_a (den wir uns in Abb. 123 an Stelle des Instrumentes denken) beträgt nach dem Ohmschen Gesetz $U = I \cdot R = 0,1 \cdot 100 = 10$ V. Erhöhen wir die Gitterspannung von 2 auf 3 V, wird das Gitter um 1 V negativer. Wir stellen fest, daß der Anodenstrom jetzt auf den halben Wert zurückgeht: 0,05 A.

Nun machen wir das Gitter um 1 V positiver als beim ersten Versuch, d. h., wir verringern die Gittervorspannung von -2 V auf -1 V (das Minuszeichen vor der Zahl weist darauf hin, daß die Spannung am Gitter negativ ist). Der Anodenstrom steigt dann auf den Wert 0,15 A. Einer Gittervorspannung $-U_g$ (auch hier wollen wir jetzt das Minuszeichen vorsetzen) von -1 V entspricht also ein Anodenstrom I_a von 0,15 A, bei $-U_g = -2$ V ist $I_a = 0,1$ A, bei $-U_g = -3$ V ist $I_a = 0,05$ A. Die mittlere Gittervorspannung von -2 V wurde um ± 1 V geändert. Dadurch schwankt der mittlere Anodenstrom von 0,1 A um $\pm 0,05$ A (0,05 A = 50 mA).

Eine Gitterspannungsänderung von je 1 V bewirkt eine Anodenstromänderung von je 50 mA. Man sagt dazu, der Anodenstrom ändert sich um 50 mA/V (Milliampere pro Volt); dieser Wert wird als Steilheit der Röhre bezeichnet und ist für jede Röhre verschieden. — Die praktisch bei Röhren vorkommenden Werte liegen meist nur bei etwa 2 bis 20 mA/V. Um auf runde Zahlen zu kommen, rechnen wir bei unserem Beispiel mit dem sehr hohen Wert von 50 mA/V. — Je größer die Steilheit, um so größer die erreichbare Verstärkung, wie wir gleich sehen werden.

Eine Gitterspannungsschwankung von ± 1 V können wir erreichen, indem wir in Serie mit der 2-V-Gitterbatterie eine 1-V-Wechselspannungsquelle schalten. Dann haben wir in deren positiver Halbwelle am Gitter -1 V, in der negativen Halbwelle -3 V. Das entspricht der Abb. 125.

Wie groß ist nun U_{Ra} , wenn wir die eben benutzten Zahlenwerte verwenden? Der Mittelwert des Anodenstromes war 0,1 A, und für $R_a = 100 \Omega$ ergab sich $U_{Ra} = 10$ V. Wenn nun I_a 0,15 A beträgt, ist $U_{Ra} = I_a \cdot R_a = 0,15 \cdot 100 = 15$ V. Beträgt I_a nur 0,05 A, so ist $U_{Ra} = 0,05 \cdot 100 = 5$ V. Die Spannung pendelt also um den Mittelwert von 10 V jetzt mit ± 5 Volt.

Wir haben am Gitter eine Wechselspannung von 1 V angelegt und können an R_a eine Wechselspannung von 5 V abnehmen – wir haben unsere Eingangsspannung 5fach verstärkt!

Das ist das Prinzip der Verstärkerwirkung von Elektronenröhren. Die Größe der Verstärkung hängt also einmal davon ab, wie stark sich der Anodenstrom bei 1 V Gitterspannungsänderung ändert. Dieser Steilheit genannte Röhrenwert ist konstruktionsbedingt. Die Zusammenhänge zwischen Gitterspannung U_g und Anodenstrom I_a könnten wir jetzt in Kurvenform darstellen. Die erhaltene schräg ansteigende Kurve wird U_g/I_a -Kennlinie der Röhre genannt. Diese Röhrenkennlinien (es gibt auch noch andere, beispielsweise die U_a/I_a -Kennlinie, die den Zusammenhang zwischen Anodenspannung und Anodenstrom zeigt) sind für den Gerätekonstrukteur sehr wichtig. Wir können aber auf diese doch etwas komplizierten Dinge vorläufig noch verzichten.

Die Größe der Verstärkung hängt außer von der Röhrensteilheit auch noch vom Anodenwiderstand R_a ab. Wenn wir R_a vergrößern, wird auch der Spannungsabfall U_{R_a} größer und damit auch die Ausgangswechselspannung, also die Schwankung von U_{R_a} . Auch das soll ein Rechenbeispiel zeigen.

Wir wissen, daß unser Mikrofon in Abb. 125 nur etwa 1 mV

($= \frac{1}{1000}$ V) abgibt. Also würde die Ausgangsspannung nach der vorstehenden Rechenweise nur 5 mV betragen. Nun erhöhen wir den Widerstand R_a von 100 Ω auf 1 k Ω . An ihm würde jetzt ein mittlerer Spannungsabfall von nicht 10 V, sondern 100 V entstehen – aber dann bliebe ja, wenn wir U_a wie in Abb. 123 mit 100 V versehen, für die Anode keine Spannung mehr übrig! So ginge es also nicht: Man kann R_a nicht beliebig groß machen.

Entweder machen wir R_a kleiner, damit der Spannungsabfall an ihm geringer wird und für die Anode (sie muß ja die Elektronen ansaugen!) noch genug Spannung übrigbleibt, oder wir erhöhen die Spannung U_a entsprechend – vielleicht auf 200 V.

Im letzteren Falle könnten wir R_a mit 1k Ω wählen, an R_a würden dann 100 V abfallen, und für die Anode blieben noch 100 V übrig.

Nun legen wir an das Gitter die Mikrofonwechselspannung mit 1 mV an. Wir wissen, daß sich der Anodenstrom bei einer Gitterspannungsänderung von 1 V um 50 mA ändert. Bei einer Gitterspannung

von 1 mV wird er sich also um $\frac{50}{1000} = 0,05$ mA ändern. Errechnen

wir wieder U_{R_a} für diese Änderung: $U_{R_a} = I_a \cdot R_a$, wobei R_a jetzt 1k Ω (=1000 Ω) beträgt, also $0,000\ 05\ \text{A} \cdot 1000\ \Omega = 0,05\ \text{V}$. 0,05 V sind gleich 50 mV. Wir haben die Eingangsspannung von 1 mV um das 50fache

verstärkt! Die Verstärkung steigt also mit höherem Anodenwiderstand tatsächlich.

Leider kann man — das haben wir gesehen — R_a nicht beliebig groß machen.

Kann man die Eingangsspannung beliebig groß wählen?

Sie darf ja nicht größer werden als die Gittervorspannung! Aber auf beispielsweise 2 V müßten wir sie steigern können, wenn wir R_a wie zuletzt mit $1\text{ k}\Omega$ beibehalten. Rechnen wir nach:

Die Gittervorspannung soll 2,5 V betragen, sie pendelt jetzt um $\pm 2\text{ V}$, also zwischen 0,5 und 4,5 hin und her. Soweit ist das in Ordnung. Die Verstärkung hatten wir mit 50fach errechnet, unsere 2 V werden also auch 50fach verstärkt (man kann das genau wie oben gezeigt nachrechnen!) — an R_a erhalten wir eine Spannungsschwankung von $2 \cdot 50 = 100\text{ V}$. U_{R_a} pendelt um $\pm 100\text{ V}$ und daher (da der Mittelwert für U_{R_a} wie oben errechnet 100 V beträgt) zwischen 0 und 200 V — zwischen Null und der vollen Betriebsspannung U_a ! Zeitweilig — in der negativen Halbwelle der Gitterspannung — ist also an der Anode keine Spannung mehr vorhanden!

Wir ahnen schon, daß hier etwas nicht in Ordnung ist. Erhöhen wir einmal die Eingangsspannung bis auf 2,5 V, den Wert der Gittervorspannung! Die Spannung am Gitter pendelt dann zwischen 0 und 5 V — das Gitter wird gerade noch nicht positiv. Wir müßten jetzt rechnerisch eine Ausgangsspannung an R_a von $2,5 \cdot 50 = 125\text{ V}$ erhalten. Da der Mittelwert der Spannung an R_a nur 100 V beträgt, kann sie dort aber auch nicht um 125 V , sondern nur höchstens um $\pm 100\text{ V}$ pendeln (kleiner als Null kann ja die Spannung nicht sein!).

Die Eingangsspannung ist zu groß; wir haben kein brauchbares Ergebnis. Wenn wir R_a verringern und uns mit geringerer Verstärkung begnügen würden, dann könnten wir die Röhre mit einer Eingangsspannung von 2,5 V gerade noch betreiben.

Das Rechenbeispiel hat uns gezeigt, daß wir die einzelnen Größen immer im Zusammenhang sehen müssen. Wir können also die einzelnen Spannungen und Ströme durchaus nicht beliebig abändern. Das zu wissen, ist für uns sehr wichtig. Wir dürfen beispielsweise die Verstärkung einer Röhre nicht dadurch beliebig steigern, daß wir R_a einfach größer machen. Ähnliches gilt auch für die anderen Betriebswerte.

Daran wollen wir denken, wenn wir später in Bauanleitungen von den vorgeschriebenen Werten im Schaltbild abweichen — das will also immer gut überlegt sein! Zunächst wollen wir uns nur merken, daß die Eingangswechselspannung einer Röhre stets geringer als die Gittervorspannung sein soll, also nicht einmal genauso groß wie

diese werden darf. Das gleiche gilt für die Ausgangswchelspannung in bezug auf die Betriebsspannung und Anodenspannung. Was machen wir nun, wenn die 50fache Verstärkung in unserem Beispiel nicht ausreicht? Mit 50 mV Ausgangsspannung, auf die wir die 1 mV Eingangsspannung unseres Mikrofones verstärkt haben, kann man auch noch nicht viel beginnen. Mit einer Röhre kommen wir kaum auf viel höhere Werte des Verstärkungsfaktors als 50 bis 100.

Wir schalten zwei Röhren hintereinander! Die 50 mV Ausgangsspannung der ersten Röhre leiten wir einer zweiten Röhre zu, die wiederum 50fach verstärkt. An deren Ausgang haben wir dann $50 \cdot 50 = 2500 \text{ mV} = 2,5 \text{ V}$ Ausgangsspannung.

Man spricht bei den einzelnen Röhren mit ihren zugehörigen Widerständen usw. von Verstärkerstufen – wir haben also die Mikrofonspannung mit einer zweistufigen Verstärkung um das 2500 fache erhöht. Die Verstärkungsfaktoren der einzelnen Stufen multiplizieren sich: Drei Verstärkerstufen mit je 50facher Verstärkung ergäben eine Gesamtverstärkung von $50 \cdot 50 \cdot 50 = 125\,000$ fach! Unsere Mikrofonspannung von 1 mV wäre dann auf 125 V verstärkt – und das reicht in jedem Falle.

Wie wird die Zusammenschaltung zweier Verstärkerstufen praktisch bewerkstelligt? Könnten wir in Abb. 125 die Anode unserer Röhre mit dem Gitter der nächsten Röhre verbinden? An der Anode haben wir eine positive Spannung, das Gitter der folgenden Röhre würde also auch positiv, und das darf nicht sein!

Sehen wir uns Abb. 126 an. Die erste Stufe mit der Röhre 1 (abgekürzt: Rö 1), ihrer Gittervorspannungsquelle U_{g1} , Gitterwiderstand R_{g1} und Anodenwiderstand R_{a1} kennen wir schon aus Abb. 125.

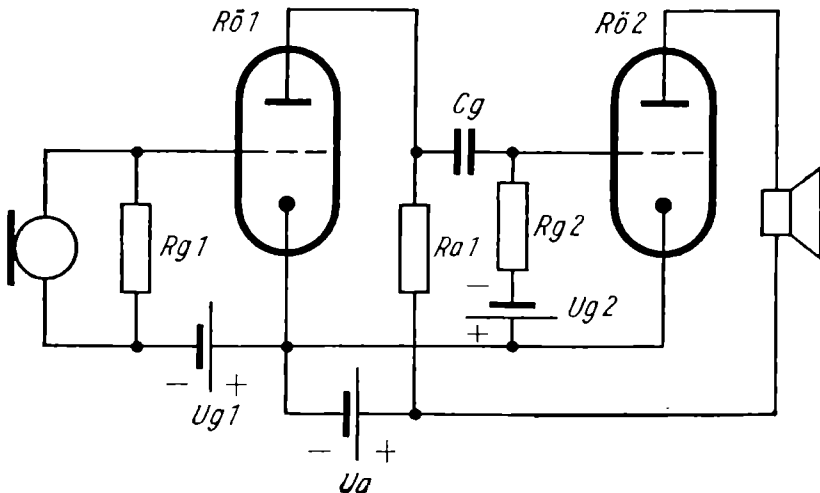
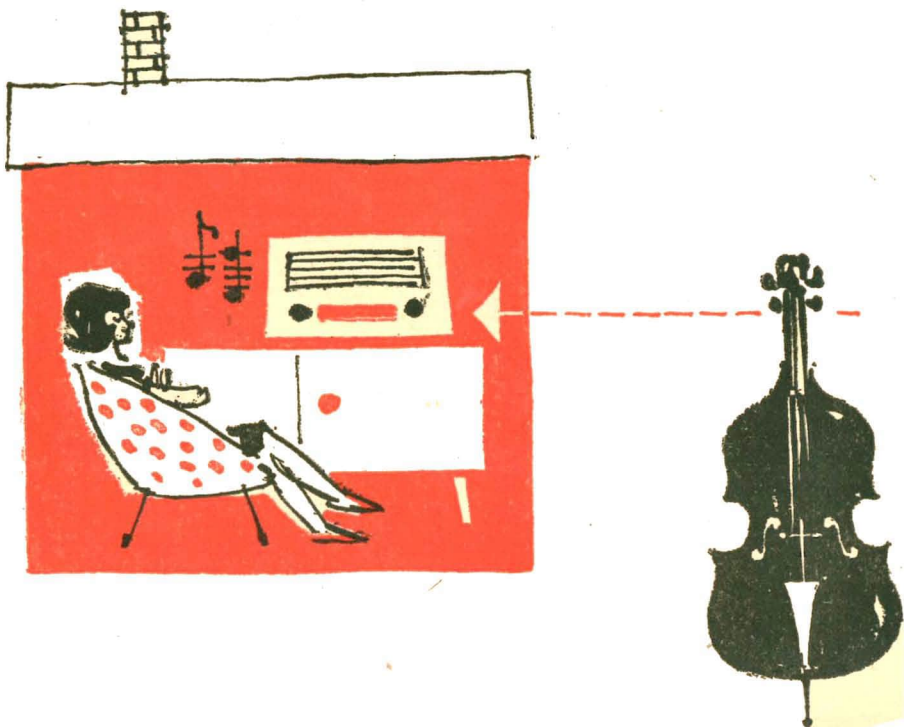


Abbildung 126

Die 1 besagt, daß diese Bauteile zur ersten Stufe gehören. Rö 2 ist die zweite Stufe, in ihrem Anodenstromkreis liegt ein Lautsprecher, den wir als Anodenwiderstand $R_a 2$ der Röhre Rö 2 ansehen können. Rg 2 und Ug 2 kennen wir auch. Hier fällt uns nur auf, daß Ug 2 etwas anders als in Abb. 124 und 125 geschaltet ist. Das läuft aber auf das gleiche hinaus: Die Spannung Ug 2 muß über Rg 2 am Gitter der Rö 2 liegen – das ist einwandfrei der Fall. Die Eingangswchselspannung muß zwischen Gitter und Katode auftreten – auch das ist der Fall, denn wir können voraussetzen, daß unsere Anodenstromquelle U_a einen sehr geringen Innenwiderstand hat (dafür läßt sich sorgen), und dann ist es gleichgültig, ob wir unsere Ausgangswchselspannung wie in Abb. 125 parallel zu R_a – oder zwischen Anode und Katode der Röhre abnehmen. Im letzteren Fall liegt der geringe Innenwiderstand der Anodenspannungsquelle U_a in Serie mit R_a . Das ist alles.

In der Praxis verfährt man stets so wie im letzteren Fall. Das hat den Vorteil, daß man beide Röhrenkatoden direkt miteinander verbinden kann, wie Abb. 126 zeigt. Außerdem läßt sich dann für beide Röhren die gleiche Anodenspannungsquelle U_a benutzen. Beide Anodenstromkreise liegen hier also gewissermaßen parallel an der Batterie U_a .

Wenn wir die Anodenspannung der ersten Röhre vom Gitter der zweiten fernhalten wollen, müssen wir uns an den Kondensator erinnern. Er läßt Wechselspannung durch –, wie wir vereinfacht sa-



gen; Gleichspannung sperrt er. Genau darauf kommt es uns an: Wir leiten die Wechselfspannung von der Anode der Rö 1 über einen Koppelkondensator (auch Gitterkondensator genannt, weil er dem Gitter vorgeschaltet ist) C_g zum Gitter der zweiten Röhre. Die Anodengleichspannung von Rö 1 wird vom Kondensator nicht durchgelassen, und alles ist in Ordnung.

Wir haben inzwischen mehrfach von der Anodenwechselfspannung gesprochen. Dabei müssen wir immer daran denken, daß es sich hier um ein Schwanken der Anodengleichspannung im Takt der Eingangswchselfspannung handelt.

Wieso läßt der Kondensator dann aber diese Gleichspannungsschwankungen hindurch?

Sehr einfach, wenn wir daran denken, wie der Kondensator arbeitet: Wenn die Spannung an der Anode schwankt, schwankt auch die Aufladung der (in Abb. 126) linken Kondensatorplatte und damit auch die Ladung der rechten. Diese Schwankungen werden an das Gitter der zweiten Röhre weitergeleitet.

Wir können also die Schwankungen der Anodenspannung tatsächlich als Wechselfspannung auffassen, als Wechselfspannung, die der Anodengleichspannung überlagert ist! Die Gleichspannung an der Anode hat, wie wir wissen, nur Hilfsfunktion. Sie hält den ständigen Anodenstrom aufrecht.

Die Abb. 126 zeigt uns nun einen vollständigen zweistufigen Verstärker. Er wäre in dieser Form ein NF-Verstärker — wir übertragen ja die NF-Spannung unseres Mikrofones zu einem NF-Verbraucher, dem Lautsprecher.

Wie groß muß der Koppelkondensator C_g sein, d. h., welche Kapazität muß er ungefähr haben? Zunächst gilt — je größer, desto besser, denn desto ungehinderter läßt er die Wechselfspannung durch, vor allem die der tieferen Frequenzen, also tiefen Töne. Denken wir daran, daß der Scheinwiderstand eines Kondensators mit fallender Frequenz steigt!

Nun hat es aber keinen Sinn, riesige Kondensatoren einzubauen. Sie nehmen unnötig viel Platz weg, außerdem kann dann ein anderer Nachteil auftreten. Es gibt nämlich keine vollständigen Nichtleiter! Auch die beste Isolierung zwischen den Belägen eines Kondensators läßt noch einen freilich sehr geringen, aber doch vorhandenen Strom durch — und zwar auch Gleichstrom! Je größer die Kapazität, desto größer die Beläge, desto größer daher dieser Reststrom! Wird der Kondensator zu groß oder ist es gar eine minderwertige Ausführung mit schlechter Isolation, so kommt durch die Anodenspannung der Rö 1 doch noch ein geringer Gleichstrom zum Gitter der Rö 2 zustande. Dessen negative Vorspannung wird dann

verringert und das Gitter kann sogar positiv werden! Das darf aber nicht geschehen.

Bei den Gitterkondensatoren kommt es also vor allem auf die hochwertige Isolation an. Man macht deshalb die Kapazität nicht größer, als für gute Übertragung der tiefen Töne notwendig ist.

Was geschieht, wenn der Kondensator zu klein ist? Hinter dem Kondensator liegt der Eingangswiderstand der Röhre R_ö 2 — er ist, wie wir wissen, praktisch unendlich hoch. Zwischen Gitter und Katode liegt aber noch R_g 2 (in Serie mit U_g 2, deren Innenwiderstand gegenüber R_g 2 so gering ist, daß wir einfach nur mit R_g 2 rechnen können). R_g 2 liegt also parallel zu der Eingangswchselspannung der R_ö 2 und wirkt als zusätzlicher Verbraucher.

Wird C_g zu klein, so ist sein Scheinwiderstand sehr hoch. Für unsere Wechselspannung kommt es dann zu einer Spannungsteilung zwischen dem Scheinwiderstand von C_g und R_g 2! Es kann geschehen, daß an R_g 2 eine weit geringere Wechselspannung steht als an der Anode von R_ö 1 — wir verlieren dadurch an Verstärkung!

Noch unangenehmer ist aber, daß der Scheinwiderstand von C_g frequenzabhängig ist: Für tiefere Frequenzen ist er größer, und dabei wird die Spannung an R_g 2 noch geringer — die tiefen Töne werden mehr geschwächt als die hohen! Wir müssen also C_g so groß machen, daß sein Scheinwiderstand für die tiefsten Frequenzen, die wir übertragen wollen (also für 30 oder 50 Hz), noch wesentlich kleiner ist als der Widerstand von R_g 2! Dadurch ist also die untere Grenze für die Kapazität von C_g gegeben.

Wer sich diesen Vorgang der Spannungsteilung genau veranschaulichen will, kann auf Seite 58 nachlesen und in Abb. 126 den Widerstand R_g 2 mit dem Widerstand R 1 in Abb. 23 vergleichen. R 2 in Abb. 23 wird dann in Abb. 126 vom Scheinwiderstand des Kondensators C_g gebildet. Die in Abb. 23 vom Voltmeter V 3 gezeigte Batteriespannung wäre mit der von der Anode und Katode der R_ö 1 abgenommenen Anodenwechselspannung zu vergleichen, die am Gitter der R_ö 2 auftretende Steuerspannung mit der von V 1 in Abb. 23 angezeigten Spannung. Wie wir sehen, lassen sich die komplizierten Verhältnisse in Verstärkerschaltungen (und allen anderen größeren Schaltungen) immer wieder auf die einfachen Grundlagen zurückführen!

Wie können wir die beiden Batterien für U_g 1 und U_g 2 in Abb. 126 entbehrlich machen?

Überlegen wir, worauf es ankommt: Das Röhrengitter muß negativ gegen die Katode gemacht werden oder: Die Katode muß gegenüber dem Gitter positiv sein! Die Abb. 127 zeigt die Lösung dieser Aufgabe.

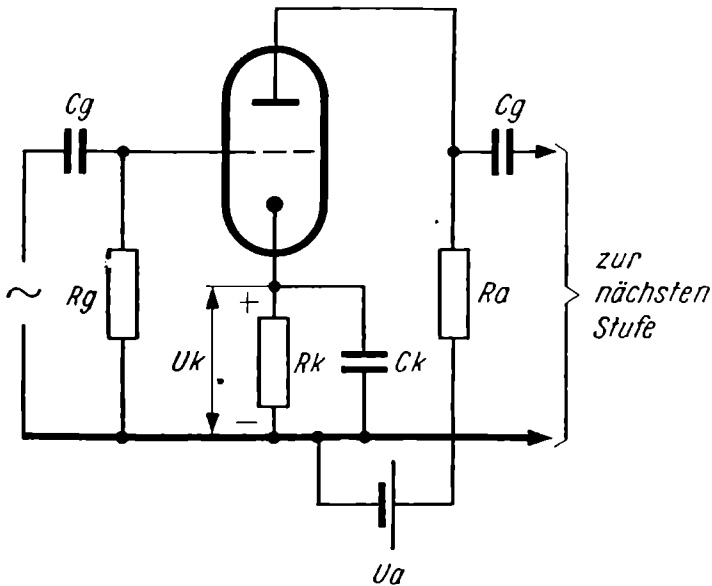


Abbildung 127

Wir schalten in die Katodenleitung der Röhre einen Widerstand ein, den wir Katodenwiderstand nennen und mit R_k bezeichnen wollen. Kondensator C_k soll zunächst noch nicht vorhanden sein.

Der Anodenstrom der Röhre fließt nun auch durch R_k , genauer: Die aus der Katode austretenden Elektronen fließen von unten nach oben durch R_k , an R_k tritt also unten ein Elektronenstau, oben an der Katode ein Elektronenmangel auf. An R_k kommt dadurch ein Spannungsabfall zustande.

Wenn wir wissen, wie groß der mittlere Anodenstrom ist, können wir R_k nach dem Ohmschen Gesetz so berechnen, daß dieser Spannungsabfall — in Abb. 127 mit U_k bezeichnet — gerade so groß ist, wie die negative Gittervorspannung sein soll — also einige Volt. Bei einem Anodenstrom von 0,1 A müßte also — wenn U_k gleich 3 V sein

soll — $R_k = \frac{U_k}{I_a} = \frac{3}{0,1} = 30 \Omega$ sein. Dann ist die Katode gegen die

untere, dick gezeichnete Leitung um 3 V positiv. Das Gitter schließen wir jetzt über R_g an diese untere Leitung an, am unteren Ende von R_k also. Dann ist die Katode gegen das Gitter um 3 V positiv oder, anders gesagt, das Gitter gegen die Katode um 3 V negativ — es hat eine negative Vorspannung von -3 V gegen die Katode! Damit ist die Gitterspannungsquelle U_g überflüssig geworden, wir erzeugen die Gittervorspannung jetzt mit dem Katodenwiderstand.

Allerdings hat dieses Verfahren zunächst noch einen Nachteil. Wenn nämlich der Anodenstrom pendelt, so pendelt auch der Strom durch R_k und damit U_k im Takt der NF-Spannung. U_k ist aber nichts anderes als die Gittervorspannung.

Betrachten wir diesen Vorgang für eine Halbwelle der Gitterwechselspannung etwas genauer! Wenn das Gitter negativer wird (negative Halbwelle), so sinkt der Anodenstrom, und demzufolge wird auch U_k geringer. Das heißt aber nichts anderes, als daß die Gittervorspannung sinkt – weniger negativ wird! Der negativen Halbwelle der NF-Spannung, die das Bestreben hatte, die negative Ladung des Gitters zu erhöhen, wirkt also die Verringerung von U_k – wodurch das Gitter weniger negativ wird – genau entgegen: Die NF-Spannung wird geschwächt!

Dieser Vorgang – der hier durchaus unerwünscht ist – wird Gegenkopplung genannt. Da diese Gegenkopplung am Katodenwiderstand auftritt, spricht man von Katodengegenkopplung. Sie wird in manchen Fällen absichtlich erzeugt, aber das soll uns hier vorläufig nicht interessieren. Wir stellen nur fest: Der Katodenwiderstand schwächt die Eingangsspannung durch diese Gegenkopplung – er verringert die Verstärkung! Was tun wir dagegen?

Wir überbrücken R_k mit einem Kondensator C_k , wie es Abb. 127 zeigt. Die Schwankungen der Katodenspannung U_k an R_k stellen ja wieder nichts anderes dar als eine Katodenwechselspannung, die unserer Eingangsspannung entgegenwirkt. Durch den Katodenkondensator C_k wird sie kurzgeschlossen, für diese Wechselspannung liegt – wenn C_k nur genügend groß ist – die Katode wieder direkt an der dick ausgezogenen Leitung, so wie wir das von den vorangegangenen Abbildungen gewohnt waren. Es kann also keine Gegenkopplung auftreten, und trotzdem bleibt die Gittervorspannung erhalten, weil sie durch den Gleichspannungsabfall an R_k gebildet und als Gleichspannung von C_k nicht beeinflusst wird.

Für die Größe der Kapazität des Katodenkondensators C_k gelten wieder ähnliche Überlegungen, wie wir sie bereits für den Gitterkondensator C_g angestellt haben. C_k muß so groß sein, daß er auch die Wechselspannung bei der tiefsten zu übertragenden Frequenz noch kurzschließt – sein Scheinwiderstand muß bedeutend geringer sein als der Wert von R_k .

Wir hatten schon errechnet, daß sich für R_k schon recht geringe Werte ergeben – um einen noch niedrigeren Scheinwiderstand zu erhalten, werden für C_k deshalb mitunter sehr große Kapazitätswerte gebraucht, die bei $10 \dots 100 \mu\text{F}$, nicht selten sogar noch höher liegen. Die Werte für C_g dagegen liegen (immer für den NF-Bereich betrachtet) meist bei $0,01 \dots 0,1 \mu\text{F}$. Was ist die Folge, wenn C_k zu klein ist? Die Folgen sind ähnlich wie bei einem zu kleinen Gitterkondensator: Bei tiefen Tönen ist der Scheinwiderstand von C_k schon zu hoch, um R_k noch voll wirksam zu überbrücken. Für diese Frequenzen kommt es zu einer Gegenkopplung an R_k – die tiefen

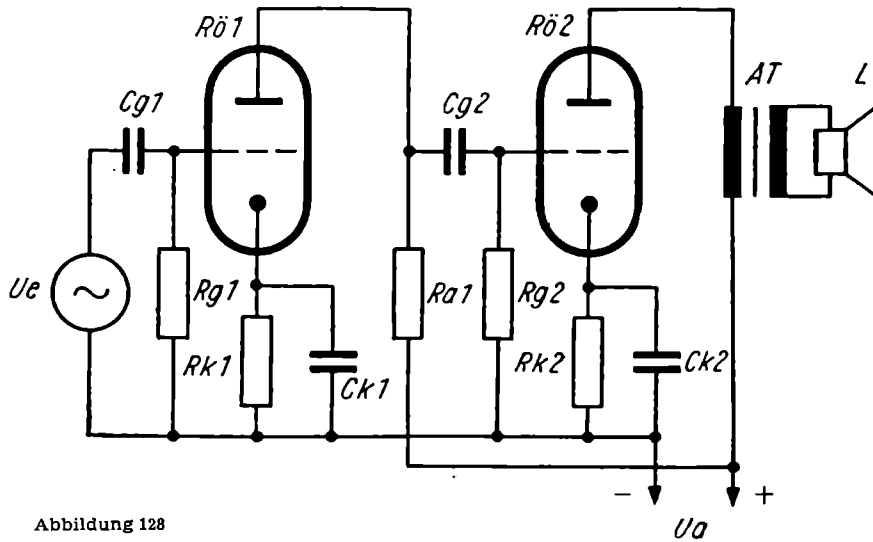


Abbildung 128

Töne werden geschwächt! (Dieser Einfluß von C_k und C_g wird oft absichtlich dazu benutzt, den Klang der Wiedergabe zu ändern!) Wir können unser Verstärkerschaltbild nun in der endgültigen Form zeichnen (Abb. 128). Es vereint alle Bauteile, die wir an Hand der vorangegangenen Abbildungen schon besprochen haben. Deshalb gibt es zu Abb. 128 nicht mehr viel zu erklären. Sie stellt das vollständige Schaltbild eines zweistufigen Verstärkers dar. Es fehlt lediglich eine nähere Angabe zur Anodenspannungsquelle. Sie wird bei U_a angeschlossen.

Wie die Anodenspannung erzeugt wird, sehen wir später. Immerhin brauchen wir jetzt keine Hilfs-Gleichspannungsquellen mehr, U_a ist die einzige Stromquelle, die wir benutzen.

Für die Eingangswechselspannung haben wir in Abb. 128 wieder eine ganz beliebige Quelle angenommen und sie durch das allgemeine Symbol dafür dargestellt. Es muß ja kein Mikrofon sein — auch einen Schallplattenspieler könnten wir uns dort angeschlossen vorstellen oder jede andere NF-Spannungsquelle, deren Spannung zu verstärken ist.

Etwas Neues sehen wir am Ausgang des Verstärkers. Der Lautsprecher L ist hier nicht direkt in die Anodenleitung von $Rö 2$ eingeschaltet, sondern über einen Ausgangstrafo AT (auch Ausgangsübertrager oder Lautsprecherübertrager genannt). Warum? Wir wollen bei L einen dynamischen Lautsprecher anschließen! Sein Widerstand — seine Impedanz — ist sehr gering, das wissen wir. Schalteten wir ihn direkt in den Anodenkreis der $Rö 2$, so würde diese geringe Impedanz den Wert für $R_a 2$ der zweiten Röhre darstellen. Wir wis-

sen aber, daß die Verstärkung auch von der Größe von R_a abhängt; R_a soll also nicht zu klein sein. Der Ausgangstrafo transformiert den Widerstand der Schwingspule unseres Lautsprechers auf einen Wert von einigen $k\Omega$, dieser Wert tritt an den Primäranschlüssen des Ausgangsrafos in Erscheinung und wird — da die Primärwicklung jetzt in den Anodenstromkreis der Rö 2 eingeschaltet ist — als R_a für Rö 2 wirksam. Der Trafo paßt also den geringen Schwingspulenwiderstand von L an die Verhältnisse im Anodenstromkreis an — deshalb wird er oft auch als Anpassungstrafo bezeichnet. Verlieren wir dadurch nicht an Ausgangsspannung, die wir zuvor so mühsam verstärkt haben? Der Trafo transformiert doch abwärts, wie wir auf Seite 174 gelesen haben? Ja, aber beim Lautsprecher kommt es nicht auf die Spannung, sondern auf die Leistung an. Für einige Watt Leistung braucht die niederohmige Schwingspule — wie sich leicht errechnen läßt — nur wenige Volt Spannung. An der Primärwicklung von AT muß dann tatsächlich eine bedeutend höhere Spannung (100 V und mehr!) auftreten, aber — da die Leistung gleichbleibt — dafür eine geringere Stromstärke des NF-Stromes. Letzteres ist gleichbedeutend mit dem Betrag, um den der Anodenstrommittelwert der Rö 2 schwanken muß. Wir ersehen daraus, daß Rö 2 nicht zu geringen Anodenstrom haben darf, um solche Stromschwankungen zu ermöglichen — es muß eine kräftige Röhre sein. Da sie am Ende unseres Verstärkers angeordnet ist, wird sie als Endröhre (manchmal jedoch auch etwas unkorrekt als Lautsprecherröhre) bezeichnet.

Endröhren haben daher immer verhältnismäßig hohen Anodenstrom.

Mehrgitterröhren

Betrachten wir noch einmal Abb. 116: Diese Röhre hatten wir als Zweipolröhre oder Diode bezeichnet. Und nun sehen wir uns Abb. 120 an: Diese Röhre hat — damit mit ihr verstärkt werden kann — einen dritten Anschluß (das Gitter) bekommen. Es ist eine Dreipolröhre oder Triode. Wir hatten es im vorigen Abschnitt also immer mit Trioden zu tun.

Es gibt Röhren mit mehr als drei Elektroden, die auch mehr als ein Gitter haben. Wir werden gleich feststellen, daß zusätzliche Gitter entweder ebenso wirken wie das eine Steuergitter, das wir bisher kennen (eine dieser Röhren wird uns später bei der Beschreibung des Superhetempfängers als Mischröhre begegnen), oder die zusätzlichen Gitter haben nur eine Hilfsfunktion — dann ändert sich am

Funktionsprinzip unseres Verstärkers nichts. Was ist unter Hilfsfunktion zu verstehen?

Erinnern wir uns noch einmal an die Röhrenfunktion, die wir bei Abb. 113 erklärt hatten! Die Elektronen prallen auf die Anode auf, und zwar um so heftiger, je stärker sie angezogen werden — je höher also die Anodenspannung ist. Man benutzt aber oft recht hohe Anodenspannung — auch wir waren ja bei unserem Rechenbeispiel auf Seite 195 schon gezwungen, die Anodenspannung zu erhöhen.

Eine hohe Anodenspannung ist für eine hohe Ausgangsspannung erforderlich. Besonders in der negativen Halbwelle ist dann die Spannung an der Anode sehr hoch, weil der Anodenstrom und damit der Spannungsabfall am Anodenwiderstand gering ist. Das gilt erst recht, wenn als Anodenwiderstand ein induktiver Scheinwiderstand vorhanden ist — wie bei Rö 2 in Abb. 128. Der Gleichstromwiderstand des Übertragers ist gering — an der Anode ist also fast der volle Wert von U_a vorhanden. Bedeutend höher aber ist sein Wechselstromwiderstand, und ihn müssen wir für unsere Verstärkungsberechnung eigentlich einsetzen. Da die Rechnung viel komplizierter wird als in unseren bisherigen Beispielen, verzichten wir darauf. Es ist aber denkbar, daß an der Anode vorübergehend (in der Halbwelle, die der negativen Halbwelle am Gitter entspricht) sogar beträchtlich höhere Spannungswerte auftreten als der Wert von U_a !

Bei solchen hohen Anodenspannungen kann es beispielsweise vorkommen, daß die Elektronen in der Röhre mit so großer Wucht auf das Anodenblech aufprallen, daß es stark erhitzt wird und sogar zu glühen beginnt — soweit darf es bei unseren Basteleien natürlich niemals kommen!

Aber noch etwas anderes geschieht: Die Elektronen können aus dem Anodenblech andere Elektronen herausschlagen (durch den Aufprall eines Elektrons auf eine Atomhülle kann das dort kreisende Elektron herausgeschleudert werden). Es werden also zusätzliche Elektronen frei — sogenannte Sekundärelektronen, die allerdings leicht auf das Gitter zurückgelangen können, vor allem, wenn sich in Nähe der Anode (wie wir gleich erfahren werden) noch ein zweites positives Gitter befindet. Man ordnet deshalb manchmal in der Nähe der Anode ein Gitter an, das diese Sekundärelektronen abbremst und entweder zur Anode zurücklenkt oder selbst auffängt und ableitet. Dieses Gitter wird Bremsgitter genannt. Es ist fast immer mit der Katode verbunden. Mit der Verstärkerwirkung hat es nichts zu tun.

Wichtiger ist ein anderes Gitter — das Schirmgitter. Sehen wir uns noch einmal die Triode im Beispiel der Abb. 127 an. In der Röhre stehen sich hier Gitter und Anode ziemlich dicht gegenüber. Beide

bilden zueinander einen Kondensator, dessen Kapazität allerdings ziemlich klein ist. Immerhin ist der Scheinwiderstand dieser Kapazität bei hohen Frequenzen schon so gering, daß ein merklicher Teil der Anodenwechselspannung über diese innere Röhrenkapazität (sie wird auch nach ihrer Ursache als Gitter-Anode-Kapazität $C_{g/a}$ bezeichnet) zum Gitter zurückgelangen kann.

Im NF-Bereich macht sich diese Erscheinung verhältnismäßig wenig bemerkbar. Anders im HF-Bereich – hier kann die auf das Gitter rückwirkende Ausgangsspannung beträchtlich stören und sogar das Arbeiten des Verstärkers in Frage stellen. Wir haben ja bereits bei der Betrachtung des Katodenkondensators gesehen, welche unangenehmen Folgen die Verkopplung von Ein- und Ausgangsspannung haben kann. Leider kann man von außerhalb der Röhre nur umständlich und mit Spezialschaltungen etwas gegen diese schädliche Kapazität tun.

Aus diesem Grunde wurden Röhren geschaffen, die zwischen Steuergitter und Anode noch ein weiteres Gitter haben, das beide gegeneinander abschirmt – eben das Schirmgitter. Abb. 129 zeigt uns, wie es angeschlossen und im Röhrensymbol angedeutet wird. Es ist ähnlich aufgebaut wie das Steuergitter (Abb. 121), der Raum zwischen seinen Gitterdrähten ist aber größer.

Damit das Schirmgitter den Elektronenstrom nicht unnötig schwächt, wird es über einen Widerstand (Schirmgitter-Vorwiderstand R_{sg} in Abb. 129) an den Pluspol der Anodenspannungsquelle angeschlossen. Es beschleunigt dann die Elektronen noch zusätzlich, fängt allerdings selbst auch einige Elektronen ein – dadurch fließt ein Schirmgitterstrom.

Der Widerstand R_{sg} sorgt dafür, daß die Schirmgitterspannung immer etwas niedriger ist als die Anodenspannung – die Elektronen würden ja sonst nicht erst bis zur Anode fliegen, sondern gleich vom Schirmgitter aufgenommen.

Für Wechselspannung ist das Schirmgitter gegen die Katode kurz-

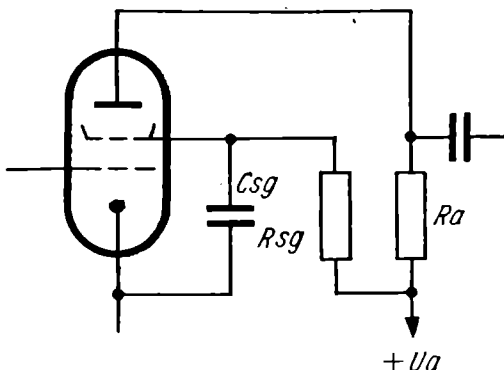


Abbildung 129

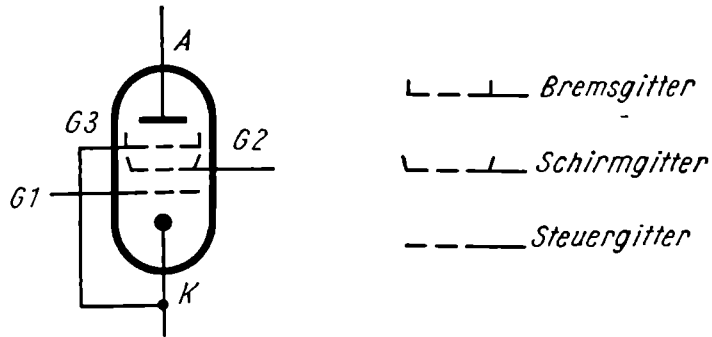


Abbildung 130

geschlossen, und zwar über den Schirmgitterkondensator C_{sg} . Für die Wechselspannung wirkt es deshalb wie eine Abschirmung. Die inneren Röhrenkapazitäten bestehen jetzt zwischen Anode und Schirmgitter — die Ausgangsspannung kann also höchstens über Schirmgitter und C_{sg} zur Katode, aber nicht auf das Steuergitter gelangen.

Einige Röhren, besonders Endröhren, haben speziell konstruierte Schirmgitter, die ohne R_{sg} und C_{sg} unmittelbar mit $+U_a$ verbunden werden. Das Schirmgitter liegt infolgedessen direkt an Plus; die Schirmgitterspannung ist bei diesen Röhren ausnahmsweise gleichgroß oder sogar ein wenig größer als die Anodenspannung. Diese Röhren dürfen aber niemals ohne Anodenspannung betrieben werden — auch nicht kurzzeitig, denn dann übernimmt sofort das Schirmgitter den ganzen Anodenstrom. Da seine Oberfläche viel kleiner ist als die der Anode (es sind ja nur dünne Drähte statt eines Bleches!), glüht es hell auf und wird sehr schnell zerstört!

Die Schirmgitterröhre hat vier Anschlüsse — vier Pole. Sie wird deshalb Vierpolröhre oder Tetrode genannt. Kommt jetzt noch ein drittes Gitter hinzu — das bereits erwähnte Bremsgitter —, dann entsteht die Fünfpolröhre, die Pentode. Die Abb. 130 zeigt das Schalt-symbol einer Pentode. Da die Elektronen immer in Richtung von der Katode zur Anode gezählt und die Gitter fortlaufend numeriert werden, besteht die Pentode aus den Elektronen: Katode, Steuergitter (Gitter 1, g_1), Schirmgitter (Gitter 2, g_2), Bremsgitter (Gitter 3, g_3) und Anode. Entsprechend wird bei Röhren mit noch mehr Gittern verfahren, mit denen wir uns hier aber nicht beschäftigen.

Aus Platzersparnis werden bei modernen Röhren oft mehrere Röhrensysteme in einem gemeinsamen Glaskolben untergebracht. Sie sehen äußerlich wie eine Röhre aus, funktionell können wir sie aber als zwei völlig getrennte Röhren auffassen. Allerdings ist manchmal die eine oder andere Elektrode — meistens die Katode — beiden Röhren gemeinsam. Eine solche Röhre zeigt die Abb. 131 in ihrer Symboldarstellung. Es ist die Kombination einer Triode und einer



Pentode, wobei beide Röhren eine gemeinsame Katode haben. Im Aufbau stehen beide Röhrensysteme oftmals übereinander. Wir können uns das so vorstellen, daß in Abb. 121 das Katodenröhrchen doppelt so lang ist und unten von dem Pentodensystem, oben vom Triodensystem umgeben wird. Bei den Elektrodenbezeichnungen muß man dann zwischen beiden Systemen unterscheiden. $g_1 T$ in Abb. 131 ist das Steuergitter der Triode, $g_1 P$ das Steuergitter der Pentode. Der gleiche Aufbau ist auch unter Verwendung getrennter Katoden möglich, dann werden die Katoden ebenso unterschieden: kT und kP .

Wenn wir eine moderne Röhre betrachten, sehen wir am Röhren-

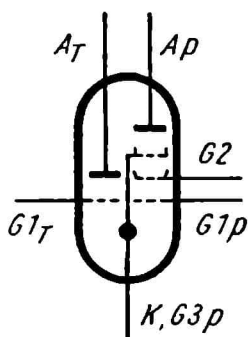


Abbildung 131

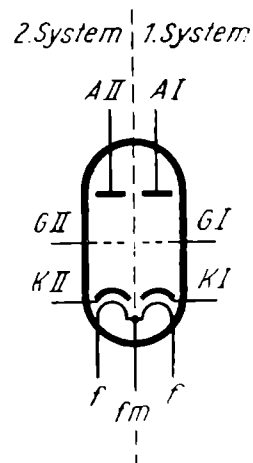
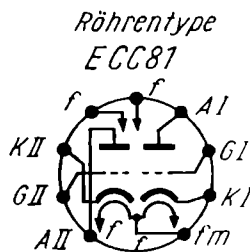
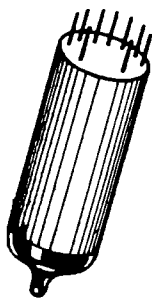
boden eine Anzahl von Anschlußstiften (meist sieben oder neun Stifte). Welcher Stift gehört zu welcher Elektrode? Da das von außen meist nicht erkennbar ist, gibt es dafür Röhrendatenbücher, in denen alle wichtigen Röhren mit ihren elektrischen Daten und Sockelschaltbildern angegeben sind.

Aus den Röhrendaten-Tabellenbüchern ersehen wir beispielsweise die für die betreffende Röhre vorgeschriebene Gittervorspannung und die Anodenspannung, dazu den Anodenstrom. Bei Mehrgitterröhren sind noch Schirmgitterspannung und -strom usw. angegeben. Außerdem sind in den Tabellen die Steilheit verzeichnet sowie noch andere Werte (Durchgriff, Innenwiderstand usw.), die für den Gerätekonstrukteur wichtiger sind als für uns, sowie die Daten der Heizspannung und des Heizstroms. Sie sind auch für uns wichtig.

Wir erinnern uns daran, daß die Katode von einem Heizfaden zum Glühen gebracht wird. Wie für jede Glühlampe, die wir betreiben wollen, müssen wir auch für den Heizfaden die richtige Spannung und Stromaufnahme kennen. Ist die Heizspannung zu gering, wird die Katode nicht ausreichend warm; die Röhre arbeitet dann schlecht oder überhaupt nicht. Ist die Heizspannung zu hoch, so brennt der Heizfaden durch, und die Röhre ist unbrauchbar.

Besondere Bedeutung hat das Sockelschaltbild für uns. Aus ihm ersehen wir die richtige Anschlußweise der Röhre. Als Beispiel zeigt uns Abb. 132 die Röhrentype ECC 81. Links sehen wir die Röhre selbst. Wir merken uns, daß die Anschlüsse immer in der Lage von unten auf den Sockel gesehen gezeichnet sind. Meist ist entweder ein stärkerer Stift, eine Seitennase oder – wie hier – ein größerer Zwischenraum zwischen zwei Stiften vorhanden. Dadurch wird nicht nur ein falsches Einsetzen der Röhre in das Gerät verhindert, sondern wir können uns auch bei der Bestimmung der Anschlüsse orientieren, indem wir die Röhre immer so halten, wie der Sockel gezeichnet ist.

Abbildung 132



Rechts in Abb. 132 ist das Symbol der Röhre gezeigt, es handelt sich hier also um eine Doppeltriode (zwei Triodensysteme in einem Kolben) mit getrennten Katoden. Die beiden Heizfäden für die Katoden sind in Serie geschaltet und die Fadenmitte (abgekürzt im Sockelschaltbild: f_m) ist an einem Sockelstift herausgeführt. Wie wir aus einer Röhrentabelle ersehen können, braucht jeder Heizfaden $6,3\text{ V}/0,15\text{ A}$.

Wir können die Röhre entweder mit $12,6\text{ V}$ heizen (beide Fadenenden f ; f anschließen, f_m bleibt frei, Serienschaltung beider Heizfäden) oder aber mit $6,3\text{ V}$ (beide Fadenenden f verbinden und an einem Pol der Heizspannung, f_m an den anderen Pol, Parallelschaltung beider Fäden). Der aufgenommene Heizstrom beträgt demnach im ersten Fall $0,15\text{ A}$, im zweiten $0,3\text{ A}$. Welche Schaltung man wählt, hängt von der Konstruktion des Gerätes ab, in dem die Röhre arbeiten soll. Die Katoden werden im Sockelschaltbild nicht – wie in anderen Schaltbildern – mit Punkt gekennzeichnet, sondern so, wie wir das bei Abb. 115 taten. Dadurch kann man nämlich zeigen, welcher Heizfaden zu welcher Katode gehört (manchmal ist das wichtig) oder ob es sich etwa um eine direkt geheizte Röhre handelt (vergleiche Abb. 113 und 115). In der Mitte der Abb. 132 sehen wir das Sockelschaltbild, wie wir es auch in der Röhrentabelle finden. Seine Deutung wird uns jetzt nicht mehr schwerfallen. Es läßt erkennen, welche Elektrode an welchen Sockelstift angeschlossen ist.

Die Doppeltriode unseres Beispiels wäre als Röhre für die Schaltung in Abb. 128 geeignet; dort kommen wir also mit einem Röhrenkolben aus! Die Röhren müßten allerdings anders bezeichnet werden, da sie ja im gleichen Kolben sitzen: etwa als Rö 1a und Rö 1b oder – auch das wird in der Fachliteratur gemacht – als Rö 1_I und Rö 1_{II}. Außerdem zeichnet man dann oft den Kreis beim Röhrensymbol in Abb. 128 nicht geschlossen, sondern nur zur Hälfte. Die andere Hälfte des Kreises fehlt entweder oder wird punktiert gezeichnet. Dadurch deutet man an, daß es sich um eine halbe Röhre handelt, die mit noch einem anderen Röhrensystem zusammen im gleichen Glaskolben sitzt.

Wie wir schon sagten, könnte in der Abbildung 128 für Rö 2 auch eine Tetrode oder Pentode benutzt werden, also zum Beispiel die Röhre aus Abb. 131. Kämen wir dann wieder mit dieser einen Doppelröhre aus? Nein! Diese Röhre hat zwar ein Triodensystem, was wir für Rö 1 einsetzen könnten, und ein Pentodensystem (bei dem das Bremsgitter im Röhreninnern mit der Katode verbunden, also nicht an einen Anschlußstift geführt ist) – aber sie hat auch eine gemeinsame Katode. Wir sehen jedoch in Abb. 128, daß beide Katoden getrennt sein müssen – jede bekommt ja einen eigenen Katodenwider-

stand! Eine Doppelröhre mit gemeinsamer Katode eignet sich also in dieser Schaltung nicht.

Es gibt jedoch auch Kombinationen nach Abb. 131 mit getrennter Katode. Mit einer solchen Röhre – etwa der Type ECL 82 – können wir den Verstärker aufbauen. Im dritten Teil des Buches werden wir eine Bauanleitung für einen solchen Verstärker finden, der der Schaltung nach Abb. 128 ganz ähnlich ist und eine Triode-Pentode als Doppelröhre verwendet.

Woran erkennt der Techniker, um was für eine Röhre es sich handelt, wenn er kein Röhrendatenbuch zur Hand hat? Bei modernen Röhren kann man nämlich auch schon einiges aus der Typenbezeichnung entnehmen. Spezialröhren weichen davon allerdings ab. Wir wollen uns nur die wichtigsten Kennzeichen für normale Rundfunkröhren merken.

Der erste Buchstabe der Typenbezeichnung gibt die Heizungsart an. Für uns sind davon nur vier Arten wichtig:

E = 6,3 V Wechselstromheizung,

U = Allstromheizung mit 0,1 A Heizstrom,

P = Allstromheizung mit 0,3 A Heizstrom,

D = Batterieheizung (direkt geheizte Katode!) für 1,4 V.

Die E-Röhren haben bei einheitlicher Heizspannung verschiedene Heizströme (je nach Katodengröße); man schaltet sie immer parallel an die Heizspannungsquelle.

U-Röhren sind für Allstromgeräte bestimmt, sie können sowohl mit Wechselstrom als auch mit Gleichstrom geheizt werden. Da man in Allstromgeräten keinen Trafo für die Heizspannung einbauen kann, werden diese Röhren in Serie geschaltet und mit einem Vorwiderstand (dem Heizwiderstand des Empfängers) direkt an die Netzspannung angeschlossen. Wegen der Serienschaltung aller Heizungen haben sie gleichen Heizstrom, aber je nach Katodengröße verschiedene Heizspannung. Ebenso die P-Röhren, die vorwiegend in Fernsehgeräten benutzt werden.

D-Röhren können nur mit Batterie geheizt werden; für die Heizspannung genügt eine Monozelle als Batterie.

Der zweite und die folgenden Buchstaben der Typenbezeichnung geben die Art des Röhrensystems an.

Jeder Buchstabe bedeutet ein System. Röhren mit drei Buchstaben haben also zwei Systeme!

C = Triode für Spannungsverstärkung (geringe Leistung)

D = Triode als Endröhre (für größere Endleistung)

F = Pentode für Spannungsverstärkung im HF-Verstärker oder
NF-Verstärker

H = Hexode (Mischröhre) – Spezialröhre für Superhetempfänger

- K = veraltete Spezialröhre für Mischzwecke im Superhetempfänger
 L = Pentode für Leistungsverstärkung (Endpentode, oft benutzt als „Lautsprecherröhre“)
 M = Abstimmmanzeige-Spezialröhre („Magisches Auge“)
 Y = Gleichrichterröhre mit einer Anode für Netzgleichrichter (Einweggleichrichter)
 Z = Gleichrichterröhre mit zwei Anoden und gemeinsamer Katode für Netzgleichrichter (Zweiweggleichrichter)
 A = Gleichrichterröhre (Diode) für geringe Spannungen und Ströme, vorwiegend für HF-Gleichrichtung
 B = dasselbe mit zwei Anoden und gemeinsamer Katode.

Die zuletzt genannten vier Röhrenarten sind also Dioden, wie wir sie zu Anfang kennenlernten. In ihrer Bauart und Anodenstromstärke unterscheiden sie sich aber je nach Anwendung (Y und Z für Netzspannungs-Gleichrichtung, A und B für HF-Gleichrichtung) sehr!

Wir haben hier verschiedene uns noch unbekannte Ausdrücke gesehen. Auf sie kommen wir im zweiten Teil des Buches noch zurück.

Hier nur noch einige Typenbeispiele: Die ECC 81 (Abb. 132) ist nach diesem Buchstabenschlüssel also eine Doppeltriode mit 6,3 V Heizspannung für jeden Heizfaden; sie darf mit Wechselstrom geheizt werden. Eine EL 84 wäre eine Pentode für Lautsprecherbetrieb, eine EF 80 eine Pentode für HF- und NF-Vorverstärkung, beide für 6,3 V. UCL 82: Wie Abb. 131, Heizung 0,1 A Allstrom — usw. Die Nummer hinter den Buchstaben ist für uns ohne Bedeutung, sie ist eine Fabrikationsnummer und bezeichnet die Bauform der Röhre.

Transistoren und andere Halbleiter

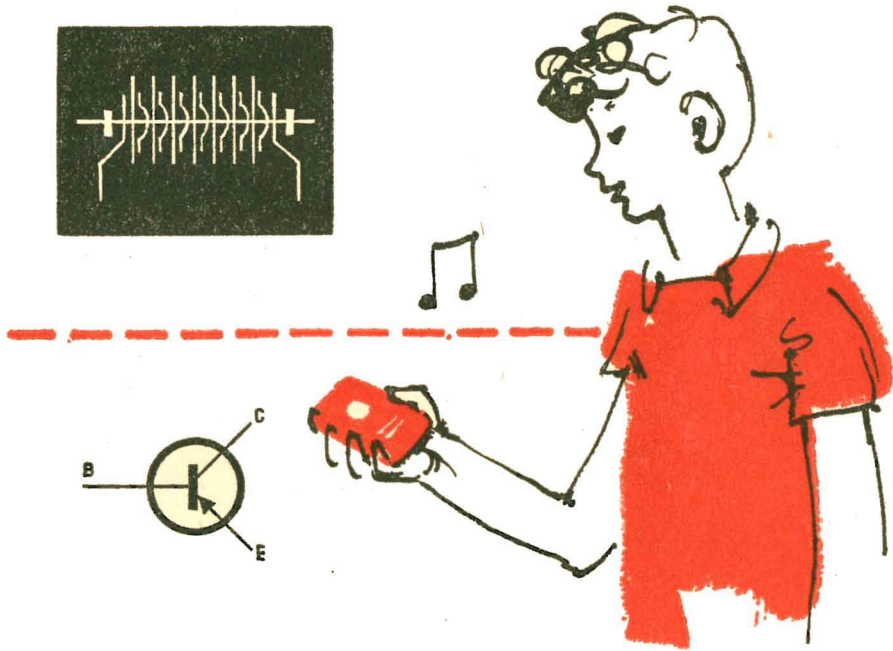
Halbleiterdioden

Wir haben bisher die Vakuumdiode kennengelernt und gesehen, daß sie ein elektrisches Ventil darstellt und sich zur Gleichrichtung von Wechselspannungen eignet. Diesem Zweck dienen aber auch ganz andere Diodenarten: die Halbleiterdioden.

Bis vor einigen Jahren hatten davon vor allem die Selengleichrichter besondere Bedeutung.

Selen ist ein chemisches Element mit Halbleitereigenschaften — es leitet den elektrischen Strom bedeutend schlechter als Metalle. Ähnliche Eigenschaften haben Germanium und Silizium sowie einige chemische Verbindungen (z. B. Kupferoxydul).

Auf Seite 35 hatten wir schon kurz erwähnt, daß es Halbleiter gibt,



bei denen der Leitungsmechanismus etwas anders verläuft als bei den Metallen – an Stelle der freien Elektronen sind dort „Löcher“ im Atomverband vorhanden. Daraus erklärt sich auch das eigenartige Verhalten dieser Halbleiter, wenn wir sie mit Leitern zusammenbringen, bei denen der Stromfluß vorwiegend durch die freien Elektronen erfolgt.

Die genaue Erklärung für diese Vorgänge ist sehr kompliziert, um sie zu verstehen, müßten wir sehr gut mit der Atomphysik Bescheid wissen. Wir wollen uns deshalb damit begnügen, diese Erscheinungen nur festzustellen.

Den Aufbau eines Selengleichrichters zeigt uns die Abb. 133. Auf einer Metallplatte (häufig Eisenblech), die zugleich als Grundplatte dient, ist eine dünne Selenschicht aufgespritzt. An der Berührungsstelle zwischen Selen und Metall bildet sich eine dünne Grenzzone, die Sperrschicht genannt wird. Wir können uns vorstellen, daß ihre Stärke nur wenige Moleküle beträgt.

Metalle gehören zu den Leitern, die überzählige freie Elektronen haben. Beim Selen dagegen überwiegt die „Löcher-Leitung“ – an der Grenzstelle, der Sperrschicht, treffen daher zwei Zonen mit unterschiedlichem Leitungsmechanismus zusammen. Die Sperrschicht läßt den Elektronenstrom vom Selen zum Metall fast ungehindert durch, vom Eisen zum Selen dagegen treffen die Elektronen auf einen sehr hohen Widerstand – es fließt fast kein Strom! Der

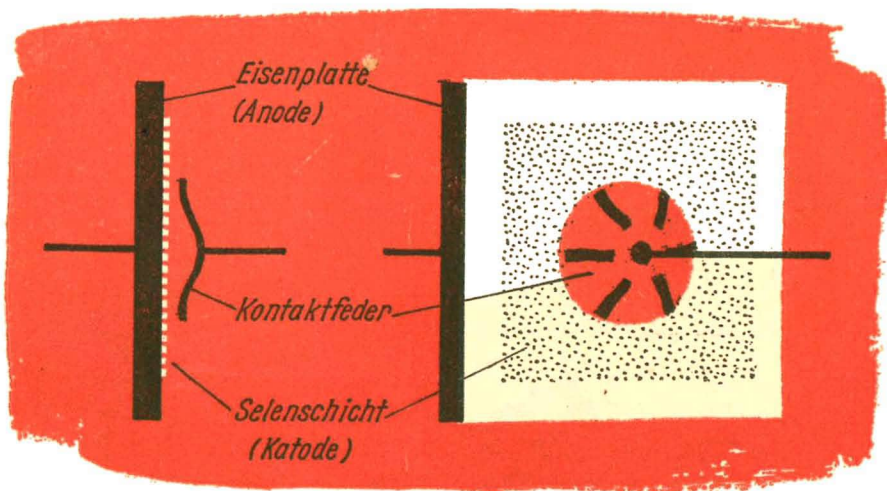


Abbildung 133

Selengleichrichter wirkt also in einem Stromkreis nach Abb. 116 bis 118 ebenso wie die Vakuumdiode – wir können ihn an Stelle der Röhre einsetzen und kommen zum gleichen Ergebnis!

Weil sich dieser Gleichrichter – wie jeder andere Halbleitergleichrichter – ebenso verhält wie die Vakuumdiode, benutzt man hier die gleichen Elektrodenbezeichnungen. Die Elektrode, aus der die Elektronen austreten – die Selenschicht – ist die Katode, die Grundplatte die Anode. Wenn wir uns das merken, wissen wir auch immer, wie der Gleichrichter anzuschließen ist. Aus dem gleichen Grund, den wir schon auf Seite 188 genannt haben, wollen wir uns auch hier nicht an die Bezeichnung + und – für die Gleichrichteranschlüsse gewöhnen, sondern uns merken: Der Kontakt zur Selenschicht wird bei den üblichen Rundfunk-Selengleichrichtern mit einem runden, gefiederten Messingplättchen hergestellt, und daran können wir auch bei lackierten Gleichrichtern die Katode erkennen.

Gegenüber der Vakuumdiode gibt es aber doch einige Unterschiede. Der Strom wird nämlich auch in der Sperrichtung nicht restlos gesperrt, wie wir das von der Vakuumdiode her kennen. Auch in dieser Richtung fließt bei Halbleitergleichrichtern ein geringer Sperrstrom – je geringer er ist, desto wertvoller ist der Gleichrichter. Außerdem dürfen wir in Sperrichtung keine allzu große Spannung an den Gleichrichter anlegen – die Wechselspannung, die wir gleichrichten, darf also nicht zu hoch sein. Wir müssen daran denken, daß die Sperrschicht sehr dünn ist – eine zu hohe Spannung „durchschlägt“ sie; es kommt zu einem kleinen Funkenschlag durch die Sperrschicht, und der Gleichrichter ist dann unbrauchbar.

Die Sperrspannung darf bei Selengleichrichtern nur höchstens 14...15 V betragen. Wenn wir höhere Spannungen gleichrichten wollen, schalten wir mehrere Selengleichrichter in Serie. Die einzelnen Platten werden dann auf einem isolierten Schraubenbolzen gestapelt (Abb. 134). Durch Auszählen der Plattenzahl können wir feststellen, bis zu welcher Spannung der Gleichrichter benutzt werden darf. Ein Gleichrichter mit 20 Platten kann bis zu $20 \cdot 15 = 300$ V benutzt werden.

Weiterhin müssen wir wissen, wie hoch die durchfließende Stromstärke maximal sein darf. Dieser Durchlaßstrom erwärmt die Selenplatten, und wenn diese Erwärmung zu groß wird, schmilzt die Selen-schicht ab. Die maximale Stromstärke wird vom Hersteller angegeben, man kann sie ungefähr an der Platten-größe abschätzen. Eine Selenplatte der Größe 50×50 mm darf bis ungefähr 0,3 A belastet werden.

Selengleichrichter sind nur für niedrige bis mittlere Frequenzen (höchstens 1...2 kHz) geeignet. Die Selen-schicht bildet mit der

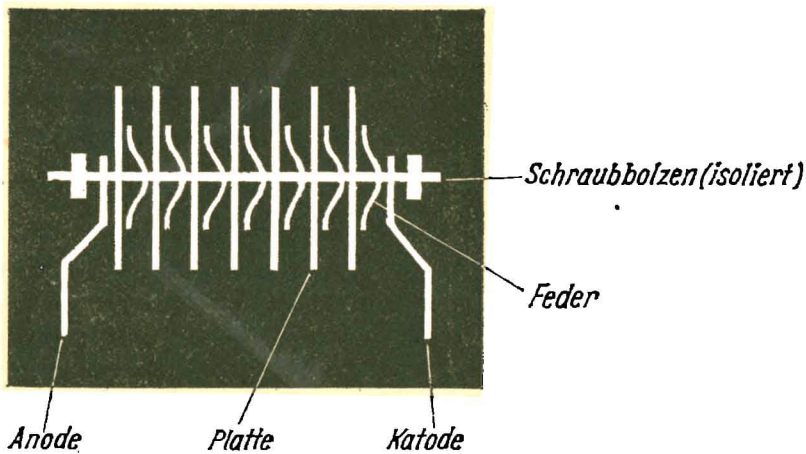


Abbildung 134

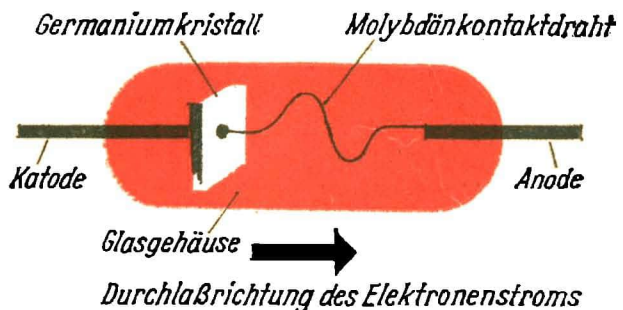


Abbildung 135

Grundplatte einen Kondensator, dessen Kapazität gewissermaßen parallel zu der Gleichrichterstrecke liegt — sie überbrückt den Gleichrichter! Höhere Frequenzen fließen also über diese Sperrschichtkapazität ab, so daß der Gleichrichtereffekt mit steigender Frequenz immer mehr beeinträchtigt wird!

In der Funktechnik werden aber sehr oft Gleichrichter gerade für hohe Frequenzen gebraucht — also HF-Gleichrichter. In Frage kommen wegen dieser schädlichen Kapazität nur solche Gleichrichter, bei denen die Sperrschichtkapazität möglichst klein ist. Diese Forderung führte zu den Germanium-Gleichrichtern, und zwar zunächst zur Entwicklung der Germanium-Spitzengleichrichter. Wir kennen sie heute als winzige Germaniumdioden. Abb. 135 zeigt vergrößert den Aufbau einer solchen Germanium-Spitzendiode, wie sie richtig heißt.

In einem winzigen luftdichten Glasgehäuse (luftdicht deshalb, weil Germaniumkristalle durch Luftfeuchtigkeit sehr schnell zerstört werden) ist ein nur millimetergroßer Germaniumkristall untergebracht. Auf seiner Oberfläche sitzt ein dünnes Drähtchen aus Molybdän oder Gold auf.

Zur Bildung einer Sperrschicht und zum Gleichrichtereffekt kommt es an der winzigen Berührungsstelle. Die Elektronen werden in Richtung vom Kristall zum Drähtchen durchgelassen, der Kristall ist also die Katode (der Katodenanschluß wird durch einen farbigen Ring oder Farbpunkt am Gehäuse gekennzeichnet).

Wegen der sehr kleinen Berührungszone beider Elektroden ist die Sperrschichtkapazität hier sehr gering — diese Dioden sind daher auch für HF-Gleichrichtung geeignet. Dagegen vertragen sie nur sehr geringe Ströme (nur wenige Milliampere!). Ihre maximale Sperrspannung ist unterschiedlich. Bei den billigen Universaldioden (etwa vom Typ GA 100, der sich für Bastelzwecke gut eignet) liegt sie bei höchstens 20 V; es gibt jedoch auch Typen, die für bedeutend höhere Spannungen zugelassen sind (z. B. die Type GA 104 bis 100 V). Der Sperrstrom (Strom in Sperrichtung der Diode, also Plus an Katode) ist sehr gering, etwa in der Größenordnung um $10 \mu\text{A}$ ($1/100\,000 \text{ A}$!).

Für die Gleichrichtung höherer Stromstärken benutzt man heute, solange nicht allzuhohe Spannungen gleichzurichten sind, an Stelle der allmählich veraltenden Selengleichrichter sogenannte Germanium-Flächendioden. Sie sind aus der Spitzendiode entstanden, indem dort das Kontaktdrähtchen der Anode durch eine Kontaktpille aus Indium ersetzt wird, die in den Germaniumkristall eingeschmolzen wird (Abb. 136). Zwischen der Indiumpille und dem Germaniumkristall bildet sich die für den Gleichrichtereffekt notwendige Sperr-

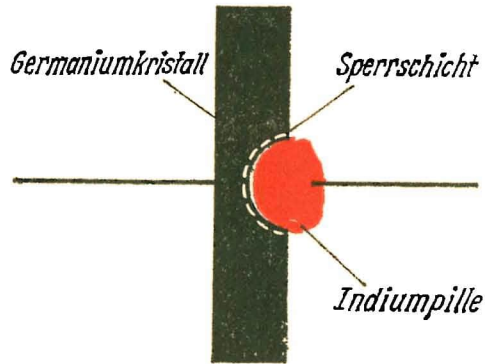


Abbildung 136

schicht aus; sie hat hier aber eine größere Fläche als bei der Spitzendiode (daher der Name Flächendiode!).

Die Flächendioden kann man mit höheren Stromstärken belasten (0,1 ... 1 A, neuerdings auch 10 A, es gibt sogar schon Typen für 200 A Durchlaßstrom!). In ihren übrigen Daten entsprechen sie etwa den Spitzendioden, allerdings sind Sperrstrom und Sperrschichtkapazität wegen der größeren Fläche der Sperrschicht hier größer. Trotzdem sind sie bedeutend vorteilhafter als Selengleichrichter, aber leider vorläufig noch etwas teurer als diese. An Stelle des Germaniums benutzt man neuerdings auch Silizium als Halbleiter, mit dem sich weitere Vorteile (vor allem größere Wärmefestigkeit) erreichen lassen. Das Prinzip ist bei Siliziumgleichrichtern dasselbe wie bei Germaniumgleichrichtern.

Abb. 137 zeigt uns das Symbol für alle Arten von Halbleitergleichrichtern. Der Strich deutet die Katode an (den Kristall in Abb. 135), die Pfeilspitze die Anode (das Kontaktdrähtchen in Abb. 135).



Abbildung 137

Wir müssen hier also aufpassen: Der Elektronenstrom fließt entgegen der Dreieckspitze durch die Diode, die Pfeilspitze gibt nicht die Durchlaßrichtung an! Da das leicht zu verwechseln ist, wollen wir es uns besonders fest einprägen.

Transistoren

Transistoren sind moderne Halbleiterbauelemente mit Verstärkungseigenschaft. Ihr Prinzip wurde erst 1948 entdeckt. Seitdem haben die Transistoren einen regelrechten Siegeszug durch die ge-

samte moderne Nachrichtentechnik angetreten. Viele neue technische Wege wurden erst durch sie ermöglicht.

In sehr vielen Fällen können die Transistoren die Aufgaben von Röhren übernehmen; sie sind aber bedeutend kleiner und leichter: Je nach ihrer Leistungsklasse können ein Dutzend und mehr Transistoren in einen Fingerhut passen! Selbst leistungsstarke Transistoren sind kaum größer als ein Fingerhut! Die Transistortechnik ist also noch jung und die Entwicklung noch im Fluß. Die kommenden Jahre werden hier noch viele Überraschungen bringen. Es ist nicht richtig, die Transistoren als Ersatz für Röhren anzusehen, wie man das noch vielfach liest. Tatsächlich haben die Transistoren nämlich in ihrer Wirkungsweise nicht viel Ähnlichkeit mit Röhren. Es ist deshalb auch nicht zweckmäßig, sie mit Röhren zu vergleichen. Solche Vergleiche findet man noch in älteren Lehrbüchern, aber sie führen in der praktischen Anwendung sehr leicht zu Widersprüchen und Irrtümern.

Um zum Transistor zu kommen, gehen wir von einer Flächendiode aus (Abb. 136) und stellen uns vor, daß auf der anderen Seite des Germanium-Kristallplättchens eine zweite Indiumpille eingeschmolzen wird (Abb. 138), und zwar so tief, daß sich die Sperrschichten beider Pillen im Innern des Germaniumkristalls auf einer Entfernung von wenigen tausendstel Millimetern gegenüberstehen – das ist die große Schwierigkeit bei der Herstellung! Zwischen beiden Sperrschichten, die sich nicht berühren dürfen, ist also nur eine hauchdünne Germaniumschicht vorhanden. Den Germaniumkristall bezeichnen wir jetzt als Basis (Abkürzung B), die beiden Indiumpillen als Kollektor C und Emitter E (Achtung! Den Kollektor C in Schaltbildern nicht mit der Bezeichnung C an Kondensatoren verwechseln!).

Wir haben nun eine schon fast vollständige Vorstellung vom Inneren eines Transistors gewonnen. Er muß wegen der Luftempfindlichkeit



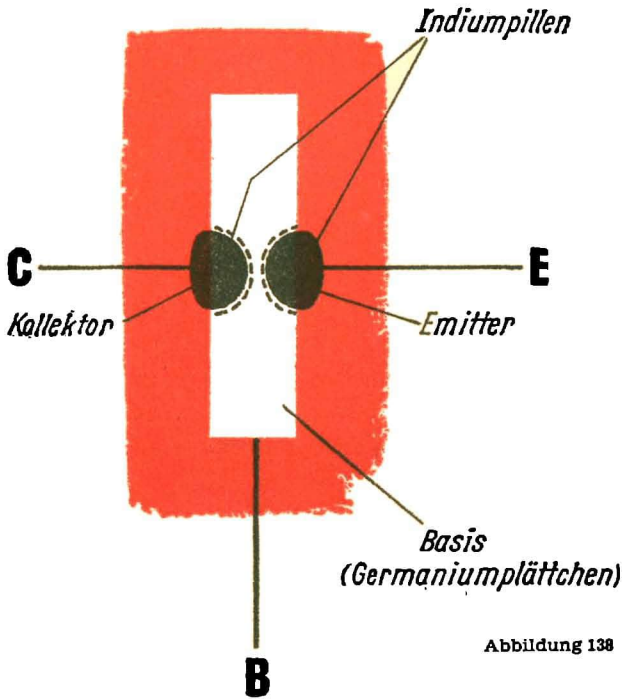


Abbildung 138

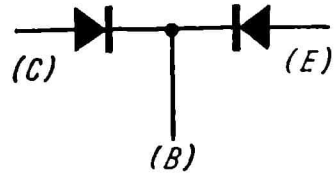


Abbildung 139

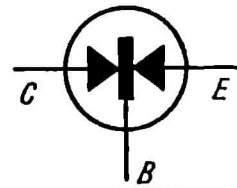


Abbildung 140

des Halbleitermaterials noch in einem luftdichten Gehäuse untergebracht werden, das – da der Germaniumkristall nur millimetergroß ist – sehr klein sein kann. Wieso „verstärkt“ dieses Gebilde aber? Das Ganze stellt zunächst nichts weiter als eine Kombination zweier Flächendioden dar, deren Katode (der Kristall) gemeinsam ist. Wir könnten das Gebilde also im Schaltbild etwa wie Abb. 139 darstellen. Da aber die Katode beiden Dioden gemeinsam ist, wäre eine Darstellung wie Abb. 140 noch zweckmäßiger. Der Kreis deutet wie bei der Röhre auch hier wieder das Gehäuse an.

Doch zurück zur Abb. 138. Wir schicken einen Elektronenstrom von der Basis zum Emitter. Diese beiden Anschlüsse bilden eine einfache Diode, wir bezeichnen sie im Transistor als Basis-Emitter-Strecke. Umgekehrt – vom Emitter zur Basis – kann kein Strom fließen, denn in dieser Richtung sperrt ja die Diode! Versuchen wir nun einen Elektronenstrom vom Kollektor zum Emitter zu schicken. Es geht nicht – die Diodenstrecke Kollektor-Basis (genannt Basis-Kollektor-Strecke) sperrt, wenn die Elektronen vom Kollektor kommen. Also kehren wir die Stromrichtung um: vom Emitter zum Kollektor. Auch das geht nicht – jetzt sperrt die Emitter-Basis-Strecke! An Abb. 139 können wir das noch deutlicher erkennen. Die Kollektor-Basis-Diode und die Basis-Emitter-Diode sind in Serie geschaltet, aber gegensinnig gepolt – eine von beiden sperrt also immer!

Wir schicken jetzt Elektronen zum Kollektor, so daß dieser negativ geladen wird, aber gleichzeitig senden wir einen zweiten Elektronenstrom von der Basis zum Emitter, also in Durchlaßrichtung der Basis-Emitter-Strecke. Und nun passiert etwas ganz Eigenartiges: Die von der Basis zum Emitter fließenden Elektronen reißen (wir können uns vorstellen, gewissermaßen durch eine „Sogwirkung“) Elektronen aus dem Kollektor mit zum Emitter hinüber! Denken wir daran, daß sich ja beide Sperrschichten sehr dicht gegenüberstehen! Der Basisstrom bewirkt also, daß die Kollektor-Sperrschicht plötzlich stromdurchlässig wird, obwohl die Elektronen am Kollektor andrängen und die Kollektor-Sperrschicht dadurch eigentlich in Sperrichtung gepolt ist! Also beginnt zugleich mit dem Basisstrom ein Kollektorstrom zum Emitter zu fließen. Dieser Kollektorstrom kann sogar bedeutend stärker sein als der Basisstrom!

Die Erklärung für dieses eigenartige Verhalten (das um so ausgeprägter ist, je dichter sich in Abb. 138 die beiden Sperrschichten gegenüberstehen) ist wieder sehr kompliziert und gehört in die Atomphysik. Wir benutzen deshalb ausnahmsweise einmal ein mechanisches Modell zum Vergleich für die Wirkungsweise.

Die Abb. 141 zeigt das „Kanalmmodell“ für unseren Transistor. In ein kleines Sammelbecken münden zwei Wasserkanäle als Zuflüsse: Der „Basiskanal“ B und der „Kollektorkanal“ C. Das Wasser (es dient als Vergleich für die Elektronenströme) kann durch den dritten Kanal, den „Emitterkanal“ E, wieder abfließen.

Vor der Einmündung des Basiskanals ist eine Klappe schwenkbar angeordnet. Sie wird vom zufließenden Wasser angehoben und bewegt sich dabei um ihre Achse. Klappe und Achse bewegen sich in Pfeilrichtung. Dadurch wird der Schieber am Kollektorkanal – der also nicht schwenkbar ist, sondern senkrecht nach oben gleiten kann – mit hochgehoben, da der Arm, an dem er sitzt, von der Achse geschwenkt wird.

Aus dem Kollektorkanal kann nun ebenfalls Wasser zufließen. Wir erkennen: Bereits ein wenig Wasserzufluß im Basiskanal genügt, um dort die Klappe etwas anzuheben und dabei den Schieber vor dem Kollektorkanal so weit anzuheben, daß von dort viel mehr Wasser zufließt als von B aus. Hört der Wasserzufluß von B wieder auf, so sinkt die Klappe und mit ihr der Schieber, und auch der viel stärkere Wasserzufluß vom Kollektorkanal her hört wieder auf. Ohne Wasserzufluß bei B kann also auch von C kein Wasser zufließen. Der Basis-Wasserstrom löst also den Kollektor-Wasserstrom aus – er steuert ihn!

Dieses Modell hat natürlich mit den tatsächlichen Vorgängen im Transistorkanal nichts zu tun, es zeigt aber deutlich, wie wir uns

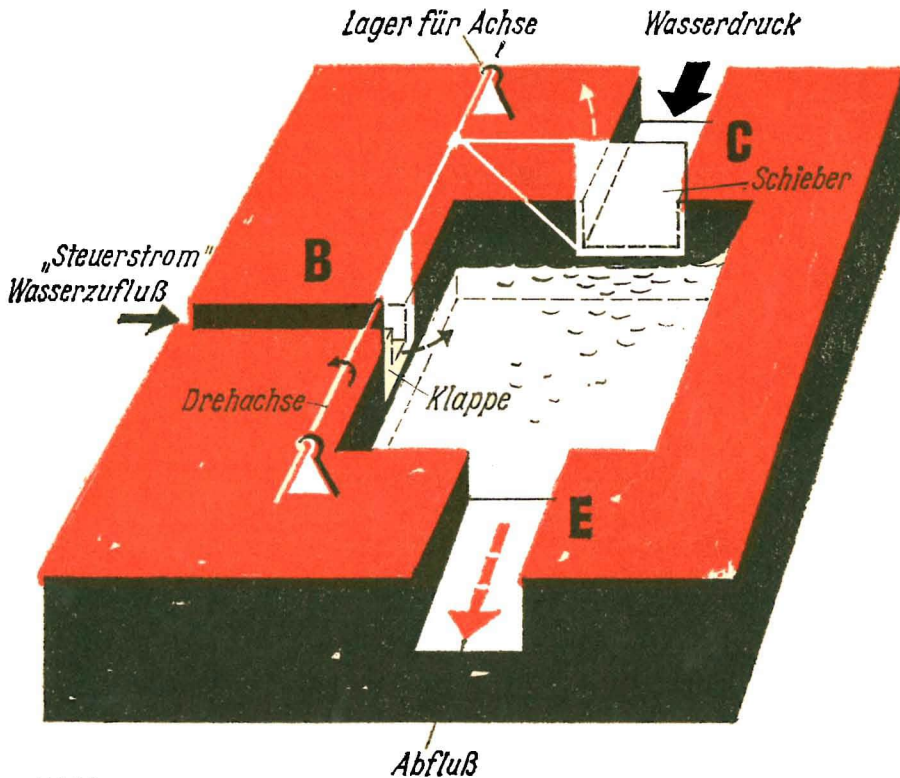


Abbildung 141

die Transistorfunktion vorstellen können: Ein schwacher Basisstrom (Elektronenstrom von der Basis zum Emitter) kann einen weit stärkeren Kollektorstrom (Elektronenstrom vom Kollektor zum Emitter) auslösen. Was wir in unserem „Kanalmmodell“ mit Klappe und Schieber bewerkstelligten, kommt im Transistor durch atomare Vorgänge in den Sperrschichten zustande.

Wie andersartig die Vorgänge im Transistor sind, zeigt sich auch darin, daß es grundsätzlich zwei Arten von Transistoren gibt: Die pnp-Typen und die npn-Typen.

Betrachten wir noch einmal Abbildung 139. Wir können uns die beiden Diodenstrecken auch umgekehrt gepolt denken, also mit ihren Anoden verbunden. Das läßt sich durch bestimmte Legierungszusätze im Basismaterial (Bild 138) leicht erreichen. In der Abb. 139 wären dann bei B die beiden Anoden, bei C und E je eine Katode anschließbar. Dementsprechend wäre im Bild 140 die Anode beiden Dioden gemeinsam und die Katoden getrennt. Alles bisher Gesagte gilt auch für diesen Transistortyp, nur mit dem Unterschied, daß

wir die Betriebsspannung jetzt umgekehrt polen müßten. Im Sinne des auf Seite 219/220 Gesagten fließen die Elektronen jetzt vom Emitter zur Basis und – in Sperrichtung – zum Kollektor. Die Funktion bleibt die gleiche – nur mit umgekehrten Stromrichtungen und umgepolter Spannungsquelle. Wir haben bei diesem Transistortyp also den negativen Pol (n) am Emitter, eine positive Spannung an der Basis (p) und wiederum eine positive Spannung am Kollektor, der aber, wie wir wissen, in Sperrichtung gepolt ist und als Diodenstrecke (Basis-Kollektor-Diode) eigentlich eine negative Spannung (n) benötigt. Um beide Diodenstrecken des Transistors in Durchlaßrichtung zu betreiben, müßte man also die Spannung (in der Reihenfolge Kollektor, Basis, Emitter) mit der Polung negativ-positiv-negativ, abgekürzt npn, anlegen. Dieser Transistor wäre also ein npn-Typ. – Genau umgekehrt bei dem zu Anfang genannten in Abb. 139 und 140 dargestellten Transistortyp. Dort wären für Betrieb der Diodenstrecken in Durchlaßrichtung die Spannungen (wieder in der Reihenfolge C-B-E) in der Polung positiv-negativ-positiv anzulegen; dies ist der Typ des pnp-Transistors, dessen Funktion wir uns mit dem Kanalmodell verdeutlicht haben. Für den npn-Typ ist unser Kanalmodell schon nicht mehr so leicht vorstellbar (das Wasser müßte dort rückwärts fließen!).

Für uns sind vor allem die auf Germanium-Grundlage gefertigten pnp-Transistoren von Bedeutung, mit ihnen werden wir uns bei unseren späteren Beschreibungen ausschließlich befassen. npn-Transistoren werden uns bei unserer Bastelarbeit vorläufig nicht begegnen. Sie werden meistens auf Siliziumgrundlage, seltener auf Germaniumgrundlage gefertigt und haben vor allem für die Industrie und dort für spezielle Anwendungen der Elektronik und Verstärkertechnik Bedeutung.

Eine weitere Unterscheidung müssen wir kennen: Eben wurden bereits Siliziumtransistoren erwähnt, während wir bisher nur von Germaniumhalbleitern sprachen. Siliziumtransistoren sind eine neuere Entwicklung; sie haben ebenfalls vorwiegend für die Industrie Bedeutung und sind für Bastelzwecke vorläufig noch wenig gebräuchlich, zumal Siliziumtransistoren vorläufig auch noch etwas teurer sind als Germaniumtransistoren. Allerdings scheint die technische Entwicklung in jüngster Zeit mehr und mehr auf Siliziumhalbleiter hinauszulaufen. Uns braucht das aber vorläufig nicht zu stören, denn die Schaltungstechnik mit Siliziumtransistoren ist weitgehend die gleiche wie mit Germaniumtransistoren. Was wir also mit diesen jetzt an Erfahrung sammeln, können wir in späteren Jahren auch beim Umgang mit Siliziumtransistoren anwenden. Einige Unterschiede zwischen Germanium- und Siliziumhalbleitern

gibt es freilich, wir werden sie später mit erwähnen, immer dort, wo Unterschiede zu den Germaniumtransistoren bestehen. Vorläufig sei hier nur erwähnt, daß man Siliziumtransistoren ebenso wie Germaniumtransistoren in zwei unterschiedlichen Arten, nämlich vom pnp-Typ und vom npn-Typ fertigen kann. Aus Gründen der leichteren Herstellbarkeit trifft man bei den meisten Typen (unter anderem bei allen DDR-Typen) entweder pnp-Germaniumtransistoren an (dazu gehören alle unsere für Bastelzwecke benötigten Typen) oder npn-Siliziumtransistoren. Deshalb lassen sich diese beiden häufigsten Arten nicht ohne weiteres in einer Schaltung gemeinsam verwenden oder gegeneinander austauschen (Unterschied in der Polung der Spannungen!). Daß Siliziumtypen meistens npn-Typen sind, also in der Schaltung mit umgekehrter Polung gegenüber Germaniumtypen (die fast immer pnp-Typen sind) betrieben werden, hat daher nichts mit dem Halbleitermaterial zu tun. Es erklärt sich einfach daraus, daß sich bei Germanium die pnp-Ausführung, bei Silizium die npn-Ausführung besser herstellen läßt und beide Halbleitermaterialien normalerweise nicht in einer gemeinsamen Schaltung vorkommen, so daß die unterschiedliche Polung beider nicht stört. Nur in seltenen Spezialschaltungen, die für uns zu kompliziert sind, verwendet man beide Halbleitermaterialien oder manchmal (in sogenannten Komplementärschaltungen) auch pnp- und npn-Typen aus ein und demselben Grundmaterial (dann meistens Silizium).

Für HF-Zwecke haben sich bisher Germaniumtransistoren besser bewährt, besonders für sehr hohe Frequenzen, auch hat Germanium noch weitere Vorteile, z. B. tritt der Gleichrichtereffekt an den Diodenstrecken schon bei recht geringen Spannungen auf, geringer als bei Silizium. Dagegen haben Siliziumhalbleiter erheblich höheren Sperrwiderstand (er ist rund 2 Größenordnungen besser als bei Germanium!) und vertragen auch höhere Kristall-Betriebstemperaturen (bis etwa 150 Grad gegenüber höchstens 85 Grad bei Germanium), so daß Siliziumbauelemente höher belastbar sind. Beide Halbleiterarten haben also Vor- und Nachteile für den Gerätekonstrukteur.

Auch die Herstellungsverfahren (die verschiedenen Technologien) sind bei modernen Transistoren sehr kompliziert und zum Teil ganz anders, als wir es bei Abb. 136 erwähnt haben. Die dort gezeigte Ausführung — der sogenannte Legierungstransistor — ist die älteste Serienausführung; sie ist heute noch üblich neben modernen Techniken wie Diffusionsverfahren (dabei werden die Zonen für Emitter und Kollektor nicht als Pillen einlegiert, sondern aufgedampft) oder die sehr vielseitige Planartechnik (die mit Ätzwvorgängen und

fotochemischen Mitteln arbeitet und deren Beschreibung hier zu kompliziert ist). Der praktische Aufbau moderner Transistoren (außer vom Legierungstyp) hat dann mit unserer Abb. 136 keine Ähnlichkeit mehr; die Funktion ist aber im Prinzip die gleiche. Da es für uns nur auf die äußeren Eigenschaften des Bauelements Transistor ankommt, brauchen wir uns mit diesen Unterschieden nicht näher zu beschäftigen. Es genügt vorläufig, die Begriffe zu kennen, damit wir uns zurechtfinden, wenn uns später einmal der eine oder andere Ausdruck in anderen Büchern oder Beschreibungen begegnet. Im Rahmen dieses Buches werden wir ausschließlich mit den preiswerten, für Bastlerzwecke allgemein üblichen Germaniumtransistoren vom pnp-Typ zu tun haben.

In den nächsten Jahren werden zunehmend auch die Siliziumtransistoren für Bastelzwecke Verbreitung finden, weil allmählich die Produktion der Germaniumtypen zugunsten der Siliziumbauelemente immer mehr eingeschränkt werden wird. Dies braucht uns aber im Rahmen dieses Buches vorläufig noch nicht zu kümmern, zumal wir späterhin alles, was wir im Zusammenhang mit unseren derzeitigen Germaniumtransistoren gelernt haben, auch für Siliziumtransistoren wissen müssen.

Das äußere Aussehen und der Aufbau eines Transistors hängen weitgehend von Typ und Verwendungszweck ab. Es gibt Transistoren für NF- und für HF-Anwendungen, außerdem unterscheidet man nach dem maximal zulässigen Kollektorstrom zwischen Kleinsignal-Transistoren (für die Verstärkung kleiner Signale — kleiner Wechselspannungen also) und Leistungstransistoren. Diese werden zum Teil für sehr hohe Kollektorströme (mehrere Ampere!) gefertigt und passen dann natürlich nicht mehr in einen Fingerhut, sondern sind je nach Bauform ebenso bis doppelt so groß wie dieser. Sehen wir uns den Aufbau eines Kleinsignal-Legierungstransistors etwas näher an (Abb. 142).

Das Basis-Kristallplättchen ist direkt an dem Basis-Zuleitungsdraht befestigt. Die Verbindung der beiden Indiumpillen für Kollektor und Emitter (sie sind mit bloßem Auge kaum erkennbar!) mit den Zuleitungsdrähten erfolgt über feine Kontaktdrähtchen von weniger als $\frac{1}{10}$ mm Stärke. Das Ganze ist in einem nicht luftleeren, aber luft- und feuchtigkeitsdicht verschlossenen kleinen Gehäuse untergebracht.

Abb. 143 zeigt das Schaltsymbol für einen Transistor. Der für uns wichtigere pnp-Typ (Abb. 143 a) ist daran erkennbar, daß der Emitterpfeil zur Basis hin weist. Bei npn-Typen weist er von der Basis weg (Abb. 143 b). Ob es sich um einen Germanium- oder Siliziumtyp handelt, ist dagegen nicht aus dem Schaltsymbol, sondern nur

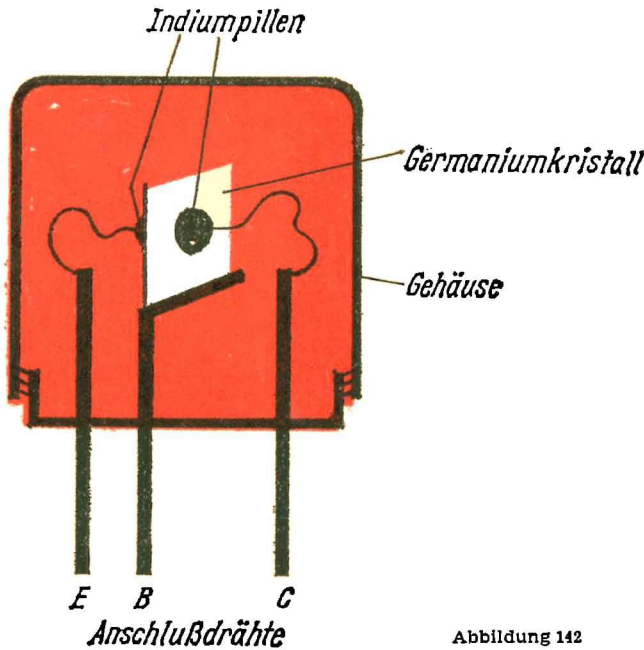


Abbildung 142

aus der Typenbezeichnung ersichtlich. In der DDR haben seit einigen Jahren alle Germaniumtransistoren als ersten Buchstaben in der Typenreihe ein G, alle Siliziumtypen ein S. Die npn-Typen der DDR-Produktion sind stets Siliziumtypen; die pnp-Typen fast immer Germaniumtypen.

Unsere Darstellungen in Abb. 138 bis 140 waren nicht für Schaltzeichnungen bestimmt, sondern dienten nur der Erklärung. Die Bezeichnungen B, E und C in Abb. 143 können ebenfalls fortgelassen werden. Der Kollektor wird durch die fehlende Pfeilspitze angedeutet.

Wir wollen nun die Eigenschaften eines Transistors etwas näher kennenlernen. Abb. 144 zeigt seine grundsätzliche Schaltung.

Interessant ist zunächst, daß als Betriebsspannung für den Transistor schon 3 bis höchstens 9 V ausreichen — wir brauchen also weder eine Heizspannung noch eine besonders hohe Betriebsspannung, wie sie als Anodenspannung bei der Röhre nötig war! Die Betriebsspannung U_B muß also bei pnp-Transistoren mit Plus am Emitter angeschlossen sein, das wollen wir uns als Regel merken. Die Emitterleitung ist meist auch die gemeinsame Leitung aller Stufen des fertigen Gerätes; wir lernen sie später noch unter dem Begriff Masseleitung kennen.

Das Meßinstrument I zeigt den Kollektorstrom an. Wir entfernen den Widerstand R_b zunächst und schließen die Basis nicht an. Dann dürfte kein Kollektorstrom fließen. Aber es fließt, wenn wir genau

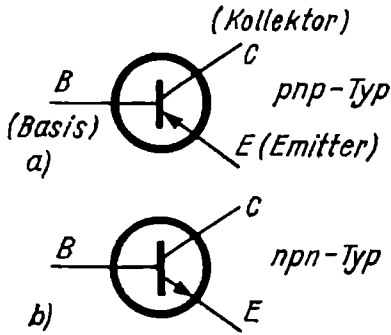


Abbildung 143

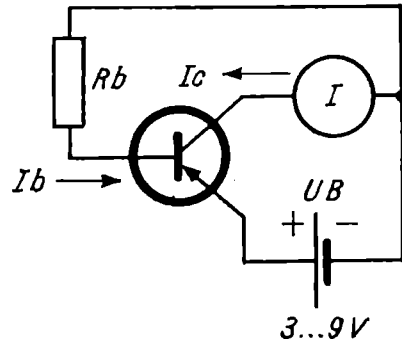


Abbildung 144

hinsehen, doch ein ganz geringer Strom! Hierbei handelt es sich um den sogenannten Kollektor-Reststrom.

Wie wir wissen, sind Halbleiterdioden keine idealen Gleichrichter — die Kollektor-Basis-Strecke sperrt deshalb auch dann nicht vollständig, wenn kein Basisstrom fließt. Der Kollektor-Reststrom ist von Transistor zu Transistor verschieden und außerdem sehr stark von der Temperatur des Transistorkristalls abhängig, er steigt mit der Temperatur. Wir werden uns bei Transistoren überhaupt daran gewöhnen müssen, daß innerhalb einer Type nicht etwa alle Exemplare gleiche elektrische Werte haben, sondern recht beträchtliche Unterschiede zeigen, so daß man für bestimmte Anwendungen sogar die Transistoren auf bestimmte Eigenschaften hin aussuchen muß! Bei guten Transistoren soll der Kollektor-Reststrom so gering wie möglich sein. Bei Siliziumtypen ist er etwa zwei Größenordnungen geringer als bei Germaniumtypen, weist aber dafür größere Temperaturabhängigkeit auf.

Schließen wir jetzt den Widerstand an — wir nennen ihn Basis-Widerstand R_b . Je nach seinem Wert fließt ein bestimmter Basisstrom von U_B -Minus über R_b , Basis, Emitter zurück nach U_B -Pluspol.

Der Basisstrom soll beispielsweise 0,2 mA betragen. Am Instrument lesen wir dann 10 mA ab. Der Kollektorstrom hat also den 50fachen Wert des Basisstromes.

Wir verwenden dafür wieder Abkürzungen: Basisstrom I_b und Kollektorstrom I_c (in Transistortabellen wird der Kollektor-Reststrom mit I_{c0} bezeichnet, 0 ist dabei als Null zu lesen).

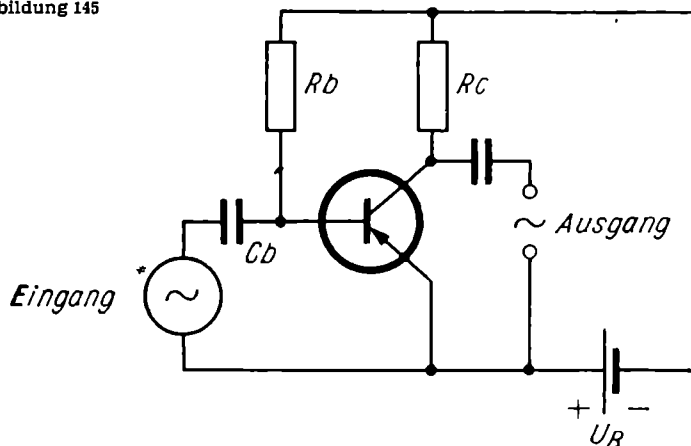
Verringern wir in Abb. 144 den Basisstrom I_b auf die Hälfte, also auf 0,1 mA, indem wir R_b auf den doppelten Wert vergrößern, so geht der Kollektorstrom auf 5 mA zurück. Wenn wir umgekehrt I_b auf 0,3 mA erhöhen, wird $I_c = 15$ mA. Die Basisstromänderung wird also 50fach verstärkt als Kollektorstromänderung bemerkbar — wir haben eine 50fache Stromverstärkung erreicht.

Man sagt dazu, der Stromverstärkungsfaktor des Transistors beträgt 50.

Abgekürzt wird der Stromverstärkungsfaktor in den Transistor-tabellen entweder mit dem griechischen Buchstaben β (beta) oder auch mit dem Formelzeichen h_{21e} . Nur dieser Wert ist für uns interessant. Bei den Transistortabellen müssen wir aufpassen, weil dort meist noch andere h -Werte angegeben sind, die für den Gerätekonstrukteur wichtig sind, deren Bedeutung aber für uns zu kompliziert ist.

Der Stromverstärkungsfaktor schwankt ebenfalls von Transistor zu Transistor sehr stark, er kann innerhalb einer Type zwischen dem Wert 20 (und weniger) und weit über 100 schwanken! Transistor-exemplare mit möglichst hoher Stromverstärkung sind natürlich besonders wertvoll. Wegen dieser prinzipiell unvermeidbaren großen Herstellungstoleranzen wissen wir nie genau, wie groß die Stromverstärkung des Transistors, den wir gekauft haben, nun ist — das wird auf den Transistoren entweder nicht angegeben, oder sie sind bei einigen Typen in Stromverstärkungsgruppen unterteilt —, dann wissen wir wenigstens ungefähr, mit welchem Wert wir etwa rechnen können. Dennoch wird es in vielen Fällen nötig sein, die Widerstandswerte der Schaltung — und besonders den Basiswiderstand — für den betreffenden Transistor genau auszuprobieren (der Fachmann kann den Stromverstärkungsfaktor messen und die genauen Schaltungswerte danach berechnen). Das müssen wir wissen, denn viele Fehlschläge beim Transistorbasteln kommen daher, daß unser Transistor eine andere Stromverstärkung hat als der, für den die passenden Werte in der Bauanleitung angegeben sind. In solchen Fällen werden wir also zunächst immer versuchen, durch geringe Wertänderung des Basiswiderstandes zum Ziel zu kommen. Dabei müssen wir allerdings gut aufpassen, denn für jeden Transistor sind nur bestimmte Höchstwerte für Basisstrom und Kollektorstrom zu-

Abbildung 145



lässig, die nicht überschritten werden dürfen, anderenfalls wird der Kristall sofort zerstört, was besonders dann leicht geschieht, wenn wir den Basiswiderstand zu gering machen und der Kollektorstrom dadurch zu stark wird. Es empfiehlt sich deshalb immer, bei solchen Versuchen zunächst mit hohen Widerstandswerten zu beginnen und außerdem in die Kollektorleitung oder wenigstens in die Batterie-zuleitung einen Strommesser einzuschalten. Wir sehen dann rechtzeitig, ob die Stromstärke für den Transistor gefährliche Werte annimmt.

Eine NF-Spannung könnten wir nun der Transistor-Basis zuleiten. In ihrem Takt schwankt dann auch der Basisstrom und entsprechend verstärkt der Kollektorstrom – dieser Vorgang ist uns ähnlich schon von der Verstärkerröhre her geläufig. Von daher wissen wir nun auch, wie wir die Kollektorstromänderung in eine Spannungsänderung umsetzen können, denn wir wollen ja eine Spannungsverstärkung erreichen. Die Abb. 145 zeigt, wie das gemacht wird: Wir schalten in die Kollektorleitung einen Widerstand ein – genannt Kollektorwiderstand R_c . Basiswiderstand R_b bewirkt, daß ein mittlerer Basisstrom und damit ein mittlerer Kollektorstrom fließt (ähnlich wie wir bei der Röhre mit einer mittleren Gittervorspannung einen mittleren Anodenstrom einstellten). Um diesen Mittelwert des Kollektorstromes pendelt dann der Kollektorstrom, wenn wir der Basis über den Koppelkondensator C_b (auch Basiskondensator genannt) eine Wechsellspannung zuführen. Die Stromschwankung des Kollektorstromes erzeugt am Kollektorwiderstand R_c eine Spannungsschwankung, die am Kollektor abgenommen und eventuell über einen weiteren Kondensator C_b der Basis eines zweiten Transistors zugeleitet werden kann. Insofern hat das Prinzip einige Ähnlichkeit mit dem einer Verstärkerschaltung mit Röhren.

In manchen Beschreibungen stoßen wir auf den Begriff „Arbeitspunkt des Transistors“. Damit ist immer der mittlere Kollektorstrom gemeint, um dessen Wert der Kollektorstrom bei der Verstärkung pendelt. Die Einstellung des vorgesehenen Arbeitspunktes geschieht also durch Veränderung des Basiswiderstandes R_b und muß für jeden Transistor neu erfolgen. Das ist kein Nachteil, denn Transistoren haben nahezu unbegrenzte Lebensdauer (ein weiterer Vorteil gegenüber den Röhren!), sie werden daher auch fest eingelötet und brauchen kaum jemals ausgewechselt zu werden.

Betrachten wir noch eine etwas erweiterte Schaltung einer Transistor-Verstärkerstufe (Abb. 146). Den Eingang und Ausgang für die NF-Spannung erkennen wir wieder, auf den Kollektorwiderstand R_c . Der Basiswiderstand R_b aus Abb. 145 heißt hier $R_b 1$ und ist nicht am Batterie-Minuspol, sondern am Kollektor angeschlos-

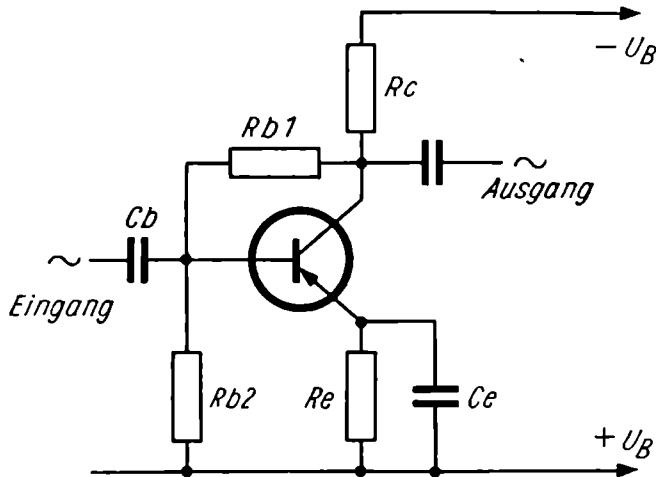


Abbildung 146

sen. Das hat den Vorteil, daß sich die Temperaturabhängigkeit des Transistors – sie äußert sich in einer Verschiebung des Arbeitspunktes und kann zu Verzerrungen in der Wiedergabe führen – nicht mehr so stark bemerkbar macht. Aus dem gleichen Grunde ist oft noch ein zweiter Widerstand zwischen Basis und Emitter oder – wie in Abb. 146 – Basis und Batterie-Pluspol eingeschaltet: R_{b2} . Beide Basiswiderstände zusammen werden dann als Basis-Spannungsteiler bezeichnet – sie unterteilen ja die Batteriespannung. An R_{b2} fällt dann eine geringe Spannung, die Basis-Vorspannung ab, die wir mit der Gittervorspannung bei Röhren vergleichen können. Sie sorgt wieder für den richtigen Arbeitspunkt bzw. Kollektorstrom. Außerdem ist manchmal noch ein Emitterwiderstand R_e vorhanden, der dann – um Gegenkopplungen zu vermeiden – mit einem Emitterkondensator C_e überbrückt wird. Diese beiden Teile haben gewisse Parallelen zum Katodenwiderstand und Katodenkondensator bei Röhren (vergleiche Abb. 127). Sie haben hier die Aufgabe, ebenfalls für eine Temperaturstabilisierung zu sorgen. Diese Hinweise mögen vorläufig genügen.

Umgang mit Halbleitern

Abschließend einige wichtige Benutzungsregeln, die verhindern sollen, daß wir die wertvollen Halbleiter beim Basteln vorzeitig beschädigen:

Bei Transistorgeräten nicht die Batterieanschlüsse verwechseln!

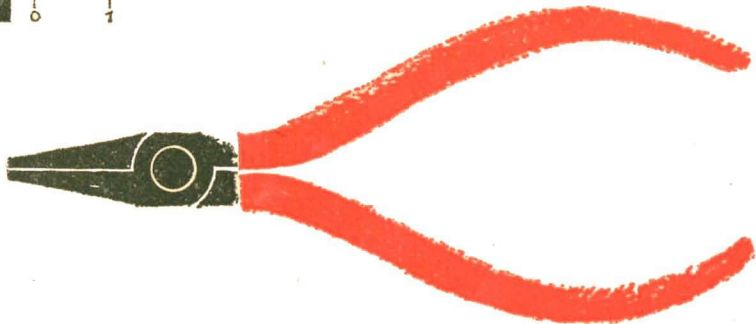
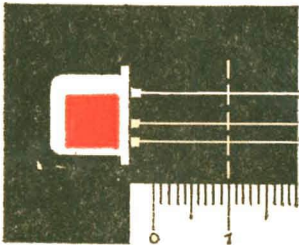
Falschpolung der Batterie kann zur Überlastung der Transistoren führen!

Zuleitungsdrähte dürfen höchstens auf 10 mm (nicht weniger) gekürzt werden, sonst zerstört die Lötwärme beim Einlöten den Kristall! Aus dem gleichen Grunde Anschlußdraht beim Löten mit einer kleinen Flachzange halten (Wärmeableitung). Beim Einlöten schnell und mit wenig Zinn löten. Keinesfalls Lötfett verwenden!

Anschlußdrähte niemals direkt am Gehäuse scharf umbiegen oder verdrehen. Das Gehäuse kann sonst leicht undicht werden, und der Kristall verdirbt dann sehr schnell.

Halbleiter dürfen sich im Betrieb niemals merklich erwärmen (Gefahr der Beschädigung des sehr leicht schmelzbaren Kristalls!), Erwärmung läßt auf Überbelastung (zu starken Strom) schließen!

Die Anschlüsse bei Transistoren sind nicht bei allen Typen gleich. Wir entnehmen sie entweder aus einer Transistorentabelle (eine solche ist beispielsweise in dem im Anhang genannten „Großen Radiobastelbuch“ zu finden) oder lassen sie uns beim Einkauf zeigen. Wenn der Transistor Metallgehäuse hat (bei allen DDR-Typen der Fall), hat dieses oftmals Verbindung mit einem der Anschlüsse (meist dem Kollektor). Deshalb darauf achten, daß das Gehäuse keine anderen Bauteile berührt, sonst kann es Kurzschlüsse geben!



TEIL II



AUS VIELEN TEILEN WIRD EIN GANZES

Wir lesen Schaltungen

Eigentlich haben wir das Schaltungslesen schon im ersten Teil des Buches gelernt, gewissermaßen nebenbei. Wir wissen bereits, daß der Techniker zur Darstellung von Stromläufen für die einzelnen Bauteile Schaltsymbole benutzt. Diese Symbole werden in der Schaltzeichnung (oder kurz: der Schaltung) so angeordnet, daß sich eine möglichst kurze und vor allem übersichtliche Linienführung für die Leitungsverbindungen ergibt. Die Lage der Schaltzeichen sagt also nichts über die tatsächliche Anordnung im fertigen Gerät aus.

Die meisten Schaltsymbole sind genormt; die wichtigsten haben wir im Zusammenhang mit der Erklärung der Bauteile schon kennengelernt. Einige weitere werden uns noch begegnen.

Im Anhang ist eine Tabelle mit den für unsere Zwecke wichtigsten Schaltzeichen zu finden, dort werden auch einige Hinweise zur Anwendung dieser Zeichen und zu den betreffenden Bauteilen gegeben. Die Schaltzeichnung ist die wichtigste Arbeitshilfe bei unseren Basteleien. Aus ihr ersehen wir nicht nur, wie das Gerät funktioniert; wir können daraus auch entnehmen, was für Material wir brauchen. Bei manchen Bauanleitungen werden Stücklisten angegeben — Aufstellungen für das benötigte Material. Wir werden in Zukunft ohne diese Stücklisten auskommen, da wir uns diese Einzelheiten aus der Schaltzeichnung genausogut selbst herausschreiben können. Das hat zugleich den Vorteil, daß wir sofort erkennen können, an welcher Stelle wir das eine oder andere Bauteil, das wir schon haben, an Stelle des angegebenen verwenden können.

Wir wollen uns angewöhnen, die elektrischen Größen der Bauteile (Ohmwert, Kapazitätswert usw.) im Schaltbild gleich bei dem Bauteil einzutragen. Erstens erleichtert das ein Verstehen der Schaltungsfunktion: Wenn wir zum Beispiel einen Kondensator sehen, müssen wir auch seine Größe kennen, um zu wissen, welche Wirkung er verursacht! Zweitens brauchen wir nicht alle Werte noch einmal gesondert in der Stückliste zusammenzustellen. Zusätzliche neutrale Kennzeichnungen, Numerierungen (etwa R 1, R 2, R 3 usw. für Widerstände) verwenden wir dann zusätzlich nur dort, wo einzelne Teile etwa im Zusammenhang mit der Textbeschreibung oder aus anderen Gründen besonders gekennzeichnet werden sollen oder wo es sich um eine allgemeine Beschreibung handelt, bei der die Größe der einzelnen Teile nicht so sehr interessiert. Dies haben wir ja im ersten Teil dieses Buches schon oft gemacht.

Ein Schaltzeichen wollen wir noch kennenlernen, es hat in Schaltbildern besonders wichtige Bedeutung: Das Massesymbol.

Was heißt Masse? Die meisten Geräte haben entweder ein Metallgehäuse oder ein Metallchassis, das geerdet werden muß oder zumindest im Gerät gewissermaßen die „Erde“, den gemeinsamen Pol darstellt, an dem alle Stromkreise zusammenlaufen. Dieser Punkt in der Schaltung wird auch Bezugspunkt genannt.

Wenn das Gerät ein Metallgehäuse hat, ist dieses der Bezugspunkt, seine Metallmasse wird dann oft sogar als elektrischer Leitungsweg benutzt. Davon kommt der Ausdruck Masse.

Die Masse ist also das Chassis, oder – wenn kein leitendes Chassis vorhanden ist oder es aus anderen Gründen keine Verbindung mit der Schaltung haben darf – ein dicker blanker Draht (Masseleitung oder Bezugsleitung genannt), oft auch nur ein bestimmter Lötanschluß im Gerät. Einige Bildbeispiele werden uns das am besten erläutern.

In der Abb. 127 hatten wir es, ohne es zu wissen, schon mit der Masseleitung zu tun. Wir hatten sie dort ausnahmsweise als dicke Leitung gezeichnet. Daß sie tatsächlich durch alle Stufen des Gerätes hindurchgeht, erkennen wir am besten in Abb. 128. Auch ein Pol der Betriebsspannung U_a sowie ein Pol der Eingangs- und der Ausgangswechselspannung in Abb. 127 liegen an Masse.

In Abb. 147 haben wir nochmals eine zweistufige Verstärkerschaltung angegeben, aber zusätzlich das Massesymbol eingezeichnet (ausnahmsweise dick.) Es könnte hier an beliebiger Stelle der Masse-

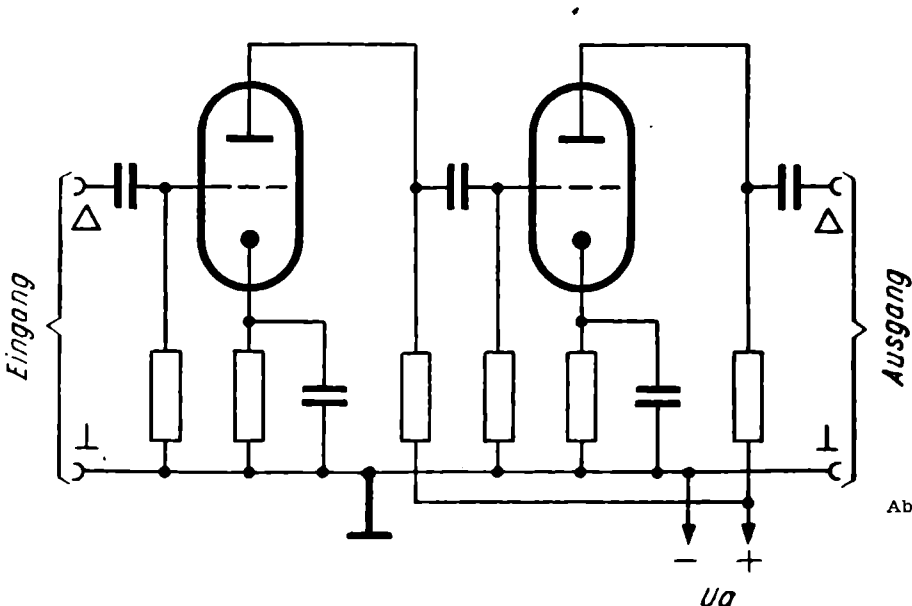


Abbildung 147

leitung angezeichnet werden – also auch in der Mitte oder ganz rechts oder links.

Bei größeren Schaltungen würde die Masseleitung in vielen Verzweigungen durch das ganze Bild laufen – die überwiegende Anzahl der Bauteile hat ja irgendwo mit Masse Verbindung. Um das übersichtlicher zu gestalten, läßt man die durchgehende Masseleitung deshalb ganz weg und ersetzt sie an jedem mit Masse verbundenen Bauteil durch das Massezeichen. Die gleiche Schaltung nach Abb. 147 würde in dieser Darstellung so aussehen, wie es Abb. 148 zeigt. Alle mit dem Massezeichen versehenen Bauteile müssen wir uns also untereinander verbunden denken.

Man hat außerdem noch die Festlegung getroffen, daß alle Anschlüsse, die nur mit einem Pol dargestellt werden, den zweiten Pol an Masse haben. In Abb. 148 ist beispielsweise vom Eingangsanschluß und vom Ausgangsanschluß nur noch je ein Pol gezeichnet. Auch der Anschluß der Anodenspannung ist nur als $+ U_a$ angegeben. Wir wissen dann, daß der zweite Pol der Eingangsspannung an Masse kommt, die Ausgangsspannung zwischen dem gezeichneten Pol und Masse abzunehmen ist und der Minuspol von U_a an Masse liegt.

Gleiches gilt für Spannungsangaben in Schaltbildern. Oft wird an bestimmte Leitungen die Spannung angeschrieben, die dort vorhanden sein muß und mit einem Voltmeter kontrolliert werden kann. Ein Voltmeter muß aber zwischen zwei Punkten angeschlossen werden. Ist bei den Spannungsangaben nichts anderes angegeben, so ist

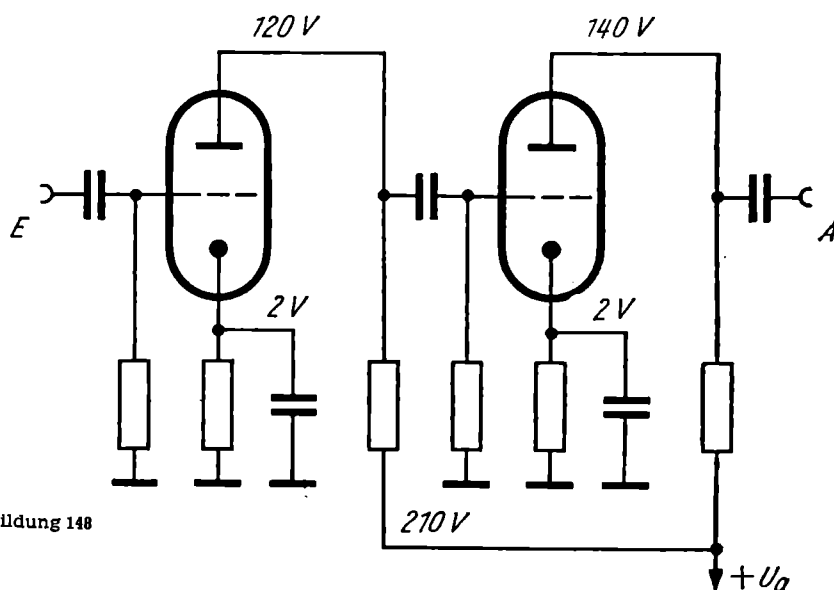


Abbildung 148

immer die Spannung gegen Masse gemeint — der zweite Pol des Voltmeters kommt bei der Messung an Masse. Als Beispiel sind in Abb. 148 an einigen Stellen Spannungen angegeben, die zwischen dieser Leitung und Masse zu messen sind.

Bei den Technikern hat sich auch eine sprachliche Vereinfachung eingebürgert, die wir kennen müssen, obwohl sie nicht korrekt ist: Der Techniker spricht oft von „heißen“ Leitungen. Das heißt nicht, daß sich eine Leitung erwärmt! Gemeint ist, daß diese Leitung eine Spannung gegen Masse führt — meist wird eine Wechselspannung gemeint sein. Eine „kalte“ Leitung ist dann jede, die keine solche Spannung gegen Masse führt.

Dieser Ausdruck wird gewöhnlich dann benutzt, wenn kritische Leitungen vorhanden sind — also solche, die entweder sehr störungsempfänglich sind, weil sie nur sehr kleine NF-Spannungen führen oder besonders hohe Wechselspannungen führen. Es gibt dafür sogar ein Zeichen, das nicht genormt ist, aber oft benutzt wird: ein kleines Dreieck, wie es in Abb. 147 an Eingang und Ausgang angegeben ist. Diese Anschlüsse sind also die „heißen“ Pole des Ein- und Ausganges, die unteren, mit dem Massezeichen versehenen die „kalten“ Pole. Soviel als Erklärung, wenn uns diese Bezeichnung einmal in der technischen Literatur begegnen sollten.

Zur Abb. 148 sei noch erwähnt, daß das Massezeichen nicht etwa bedeutet, daß diese Teile einfach „irgendwo“ an Masse gelegt werden dürfen; man darf zum Beispiel die unteren (kalten!) Enden der Gitterwiderstände nicht einfach unter die nächstbeste Befestigungsschraube des Chassis klemmen! Dazu finden wir im dritten Teil des Buches noch einige Hinweise.

„Elektrische Weichen“

Bisher haben wir uns im wesentlichen mit den Grundeigenschaften der einzelnen Bauteile beschäftigt. Ab und zu hatten wir auch schon einige dieser Bauteile in einfachen Schaltungen kombiniert, um ihre Wirkung zu zeigen. Wir wollen jetzt das Zusammenwirken dieser Bauteile untersuchen und feststellen, wie aus vielen Teilen ein Ganzes — das fertige Gerät — wird. Beginnen wir mit den „elektrischen Weichen“.

Sehr oft stehen wir vor der Aufgabe, Gleichspannung und Wechselspannung bzw. die entsprechenden Ströme zu trennen. Beim Röhrenverstärker mußten wir bereits an der Anode die NF-Spannung von der Anodengleichspannung trennen. Abb. 149 zeigt das auszugswise noch einmal.

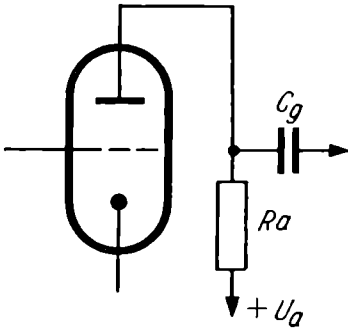


Abbildung 149

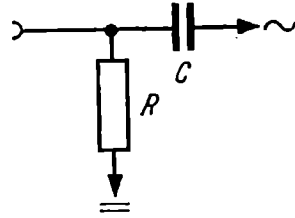


Abbildung 150

Der Gleichstrom fließt hier über R_a , der Wechselstrom über C_g , denn C_g läßt ja keinen Gleichstrom durch, und R_a – ja, der Widerstand läßt beide Ströme durch, oder genauer gesagt, er schwächt beide gleichermaßen. Aber lassen wir uns hier nicht durch die Röhrenfunktion ablenken!

Wir lösen diese „Weiche“ einmal heraus (Abb. 150). Links legen wir zunächst Gleichspannung an. Sie kann über C nicht weiter, über R fließt aber ein Gleichstrom. Dabei geht an R Spannung verloren, aber die „Weichenstellung“ stimmt. Nun legen wir links eine Wechselspannung an. Der Wechselstrom kann über C fließen – sogar nahezu ungeschwächt, wenn wir C genügend groß machen. Über R fließt aber ebenfalls ein Wechselstrom, und zwar – bei gleicher Spannung am linken Anschluß – genauso stark wie zuvor der Gleichstrom! Der Widerstand ist also noch nicht ideal. Wir brauchen ein Bauteil, das sich (ähnlich wie der Kondensator) bei Gleich- und Wechselspannung verschieden verhält – nur im umgekehrten Sinn! Das haben wir – die Induktivität. Setzen wir diese an Stelle des Widerstandes ein (Abb. 151). Nun geht alles wunschgemäß: Eine Wechselspannung kann über C abfließen, wird aber von L gesperrt (wenn wir nur die Induktivität groß genug machen), eine Gleichspannung wird von C gesperrt, kann aber über L ungehindert abfließen (wenn nur der Wicklungswiderstand von L ausreichend klein ist).

In Abb. 151 ist die gleiche Schaltung dargestellt, aber unter Benutzung der für Spulen verschiedenen Symbole, wie wir sie früher schon kennenlernten (Abb. 74). Hier fällt der Name Drosselspule besonders auf – die untere Leitung ist für Wechselstrom verdrosselt. Dieses Prinzip können wir gut bei unserem Verstärker anwenden (Abb. 152), wenn wir R_a dort durch eine Drossel ersetzen. Der Vorteil: Die Anodenspannung ist jetzt wenig geringer als die Betriebsspannung, weil der Anodengleichstrom an der Drossel nur geringen Gleichspannungsabfall hervorruft. Trotzdem erreichen wir hohe

Verstärkung, denn als Anodenwiderstand für die Schwankungen des Anodenstromes (denken wir an die Röhrenfunktion!) tritt der Scheinwiderstand der Drossel auf, und der kann sehr hoch sein! Dennoch verfährt man in NF-Verstärkern nur selten nach diesem Prinzip – die für NF nötigen Drosseln würden groß und schwer. In der HF-Verstärkertechnik finden wir jedoch sehr oft Spulen als „Anodenwiderstände“.

Sehr oft müssen wir aus einem Gleichstrom Wechselspannungen ausfiltern oder heraussieben. Das machen wir mit einem Siebglied nach Abb. 153: Der Gleichstrom kann die Drossel L ungehindert passieren, aber Wechselstrom wird fast ganz gesperrt. Der Kondensator C bildet zusätzlich einen Kurzschluß für Wechselspannungsreste, die durch L noch hindurchkommen könnten. Wenn eine geringe Schwächung des Gleichstromes tragbar ist (bzw. ein kleiner Spannungsabfall zulässig), kann die Drossel auch durch einen Widerstand ersetzt werden (Abb. 154). Ein solches Siebglied ist klein und billig, und die große und schwere Drossel (besonders bei NF) wird entbehrlich. Die Siebwirkung ist naturgemäß schlechter als in Abb. 153. Der Widerstand für sich allein hätte keinerlei Siebwir-

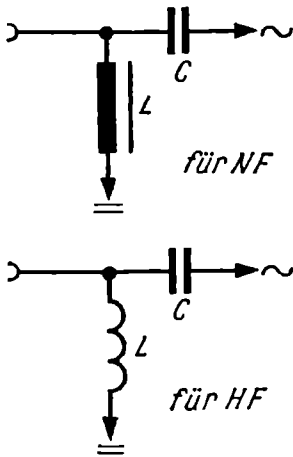


Abbildung 151

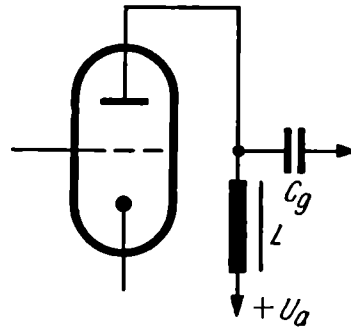


Abbildung 152

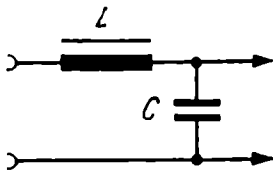


Abbildung 153

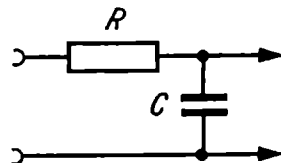


Abbildung 154

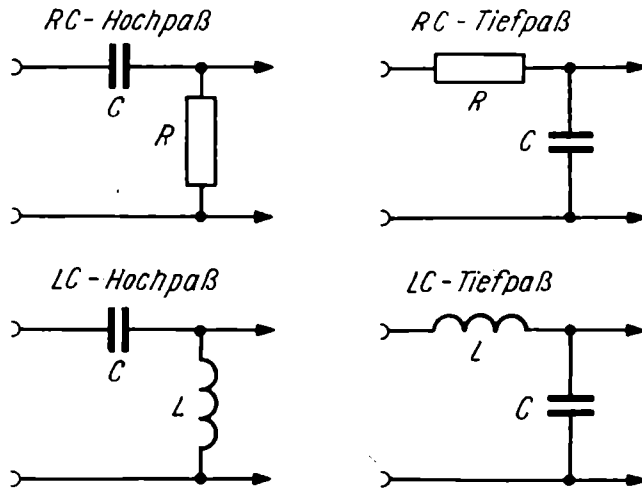


Abbildung 155

kung; zusammen mit C bildet er aber einen Spannungsteiler für Wechselspannung. Die Wechselspannung an C wird um so geringer, je höher ihre Frequenz und je größer C im Verhältnis zu R ist — man wird C also möglichst groß machen. Ein solches Siebglied heißt RC-Siebglied im Gegensatz zum LC-Siebglied nach Abb. 153.

Diese Siebglieder sperren die Wechselspannung. Will man den umgekehrten Effekt erreichen — das Siebglied soll Gleichspannung und eventuell auch NF (also Wechselspannungen tiefer Frequenzen) sperren, HF (Wechselspannungen hoher Frequenzen) aber durchlassen — dann sind in Abb. 153 und 154 einfach C und L oder R gegeneinander zu vertauschen. Die Wechselspannung wird dabei um so besser durchgelassen, je höher ihre Frequenz ist; deswegen bezeichnet man ein solches Siebglied auch als Hochpaß. Der umgekehrte Fall ist demzufolge ein Tiefpaß — er läßt tiefe Frequenzen besser passieren als hohe, am besten also die Frequenz Null: den Gleichstrom. In Abb. 155 sind diese vier Fälle noch einmal veranschaulicht.

Der Schwingkreis

Schwingkreise gehören zu den wichtigsten Baugruppen in Empfängern und Sendern, ja in der gesamten Funktechnik. Sie ermöglichen es nämlich, einen Empfänger auf einen bestimmten Sender abzustimmen.

Machen wir zunächst wieder einen Versuch in Gedanken, da wir die entstehende Wirkung mit unseren Mitteln schlecht nachweisen kön-

nen. In Abb. 156 haben wir einen Kondensator mit einer Gleichspannung aufgeladen – etwa, indem wir ihn kurz mit einer Batterie verbunden haben. Diese Ladung behält er zunächst, solange der Schalter noch offen ist. Nun schließen wir den Schalter. Was geschieht?

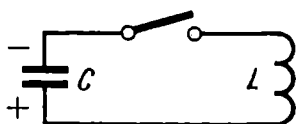


Abbildung 156

Der Kondensator entlädt sich über die Spule, doch nicht plötzlich, da die Selbstinduktion der Spule bewirkt, daß der Strom nur langsam ansteigen kann. Dadurch wird gleichzeitig um die Spule ein Magnetfeld aufgebaut.

Sobald der Kondensator entladen ist, müßte der Stromfluß aufhören. Aber dadurch wird auch das Magnetfeld schwächer – es bricht zusammen. Wir wissen, was nun geschieht: Die Selbstinduktionsspannung war, solange der Strom und das Magnetfeld anstiegen, dem Entladestrom des Kondensators entgegengerichtet. Nun ist es umgekehrt. Das zusammenbrechende Magnetfeld erzeugt einen Strom in der Spule, der dem Entladestrom des Kondensators gleichläuft (vergleiche Seite 106/107). Auch nach Entladung des Kondensators wird der Strom weiterfließen – der Kondensator wird erneut aufgeladen, aber mit umgekehrtem Vorzeichen! Jetzt ist Minus unten am Kondensator und Plus oben.

Nachdem das Magnetfeld der Spule verschwunden ist, beginnt sich der Kondensator erneut zu entladen, und zwar in umgekehrter Richtung. In der Spule geschieht das gleiche wie soeben geschildert – der Kondensator wird wieder nicht entladen, sondern auf entgegengesetzte Polarität umgeladen –, und so pendeln die Elektronen dauernd von einer Kondensatorplatte zur anderen und wieder zurück! Das aber bedeutet nichts anderes, als daß in diesem Stromkreis ein Wechselstrom fließt!

Das Pendeln der Ladung, das Hin- und Herschwingen der Elektronen können wir uns auch so erklären: Im geladenen Kondensator ist ein gewisser Energiebetrag gespeichert, und zwar in Gestalt des elektrischen Kraftfeldes (Abb. 83)! Bei Entladung über die Spule wird das elektrische Kraftfeld über den Elektronenstrom in das magnetische Kraftfeld der Spule überführt, dieses dann wieder zurück ins elektrische Kraftfeld usw. Die im Kondensator zuvor gespeicherte Energie pendelt also dauernd zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Kraftfeld hin und her. Dauert dieser Schwingungsvorgang ewig an? Natürlich nicht. Er würde ewig an-

dauern, wenn der Schwingkreis – so nennen wir den Stromkreis in Abb. 156 – verlustfrei wäre, doch das ist er nicht. Die Leitungen und besonders die Spulenwicklung haben einen Ohmschen Widerstand. In ihm wird ein gewisser Teil der elektrischen Leistung bei jedem Schwingungsvorgang in Wärme umgesetzt; dieser Energieanteil geht für die weiteren Schwingungen verloren, das Pendeln hört allmählich auf.

Die im Schwingkreis zustande kommende Schwingung ist ein Wechselstrom, die wir in Kurvenform darstellen können. Die Abb. 157 zeigt ihren zeitlichen Verlauf.

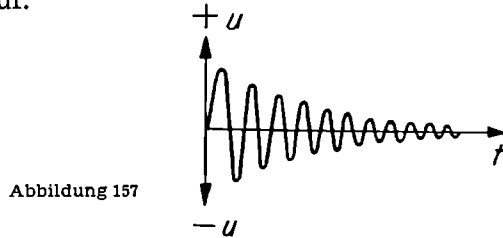


Abbildung 157

Infolge der genannten Schwingkreisverluste klingt die Spannung langsam ab. Diese Kurvenform wird daher als gedämpfte Schwingung bezeichnet. Übrigens kommen Schwingkreisverluste nicht nur durch den Ohmschen Widerstand zustande. Wenn wir in die Spule einen nicht unterteilten Eisenkern stecken oder in das Magnetfeld der Spule beispielsweise ein Stück Blech halten, kommen darin Wirbelströme zustande. Vergleiche Seite 132! Diese Wirbelströme entziehen dem Schwingkreis ebenfalls Energie; die Schwingung klingt noch schneller ab.

Welche Frequenz hat die Schwingung? Wovon hängt die Frequenz ab? Machen wir den Kondensator kleiner, so ist die Entladung schneller beendet, der ganze Vorgang läuft rascher ab – und die Frequenz ist höher geworden. Machen wir die Spule kleiner, so ist ihre Selbstinduktion geringer, der Entladestrom kann schneller ansteigen. Auch dann ist die Entladung schneller beendet, und die Umkehrung des Vorganges erfolgt rascher – die Frequenz ist gestiegen. Die Frequenz muß um so höher sein, je kleiner C und L sind. Zu bestimmten Werten von C und L gehört also eine ganz bestimmte Frequenz des Schwingkreises. Der Zusammenhang zwischen L, C und der Frequenz f ergibt sich aus der Schwingungsgleichung oder

$$\text{Thomsonschen Gleichung: } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

Für uns ist es praktischer, wenn wir die Frequenz eines Schwingkreises nach einer sogenannten zugeschnittenen Größengleichung ausrechnen (wie der Mathematiker eine solche aus der Grundgleichung abgeleitete Formel nennt):

$$f = \frac{5030}{\sqrt{L \cdot C}} \text{ (kHz, mH, pF)}$$

Die in der Klammer angegebenen Dimensionierungen sagen uns, in welcher Weise wir die Werte für L und C einsetzen müssen, um die Frequenz in Kilohertz zu erhalten.

Durch Umstellung der Formel können wir, wenn wir die Frequenz und die Größe zum Beispiel des Kondensators kennen, auch eine der anderen Größen eines Schwingkreises errechnen, beispielsweise die Induktivität der Spule. Diese Größengleichung ist gut verwendbar, wenn wir für unseren selbstgebaute Empfänger einmal einen Schwingkreis selbst berechnen müssen. Aber noch etwas anderes, für unsere Basteleien Wichtiges, sagt diese Formel.

Wir werden später sehen, daß der Schwingkreis den Frequenzbereich (Wellenbereich) unseres Empfängers bestimmt. Wenn wir nun feststellen, daß bei einer selbstgewickelten Spule der Frequenzbereich nicht genau stimmt, müssen wir entweder das C im Schwingkreis oder das L (die Spule) ändern. Das Wurzelzeichen in der Formel weist uns darauf hin, daß eine Änderung von C oder L um den zehnfachen Betrag nur eine Änderung der Frequenz um rund den dreifachen Betrag ergibt. Wollen wir beispielsweise f auf den halben Wert verringern, so muß entweder C oder L auf den vierfachen (nicht nur doppelten!) Wert vergrößert werden!

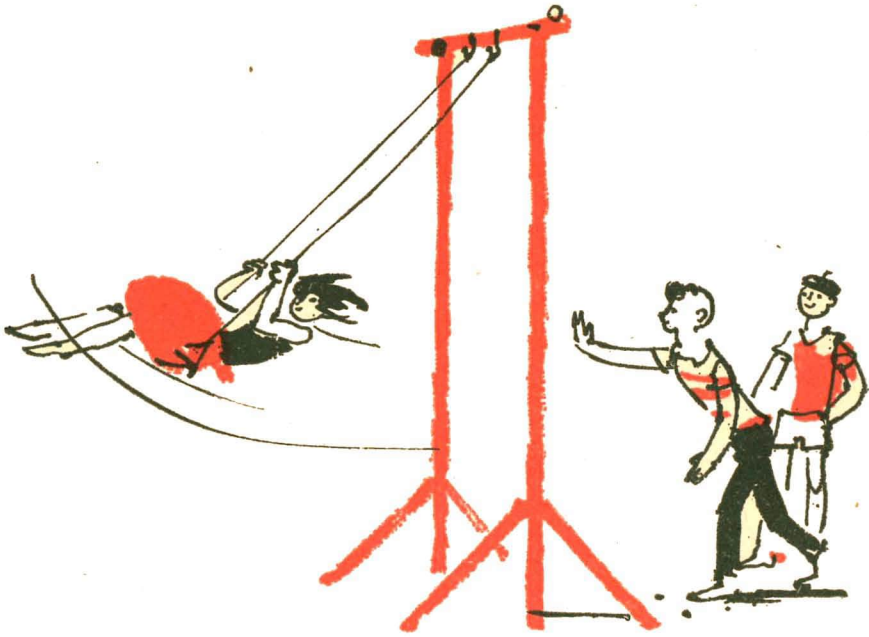
Meist werden wir L ändern, indem wir auf unserer Spule einige Drahtwindungen hinzu- oder abwickeln. Nun wissen wir aber • (Seite 109 bis 113), daß sich die Induktivität mit dem Quadrat der Windungszahl ändert. Verdoppeln wir die Windungszahl, so haben wir die vierfache Induktivität. Nach dem soeben Gesagten ergibt sich im Schwingkreis dadurch die halbe Frequenz. Wollen wir also die Frequenz auf die Hälfte verringern, vervierfachen wir die Induktivität, indem wir die Windungszahl verdoppeln und sinngemäß auch umgekehrt. Das klingt kompliziert – aber wenn wir es genau durchdenken, ist es sehr einfach.

Die Schwingfrequenz unseres Schwingungskreises wird Resonanzfrequenz genannt. Resonanz bedeutet Mitschwingen.

Die Resonanzerscheinung haben wir uns alle schon einmal zunutze gemacht, beispielsweise bei der Kinderschaukel. Sie soll uns als Beispiel dienen.

Wenn wir auf der Schaukel sitzen, so würde es einem Helfer sehr schwerfallen, uns langsam nach der einen oder anderen Seite anzuheben. Wenn er aber die Schaukel immer im richtigen Moment anstößt, würden wir allmählich immer höher schwingen, ohne daß der Helfer dazu viel Kraft braucht. Stößt er die Schaukel unregelmäßig, zu schnell oder zu langsam, vergeudet er seine Kraft; mit der Schaukelei (ohne unser Zutun) wäre es bald zu Ende.

Beim Schwingkreis ist das ähnlich. Dort pendeln die Elektronen hin



und her – wie die frei schwingende Schaukel. Sie führt übrigens ebenfalls gedämpfte Schwingungen aus. Wenn wir sie anheben (Aufladung des Kondensators; Seite 240) und dann loslassen (Schalter schließen in Abb. 156), schwingt sie allmählich immer weniger – denn was für unsere Elektronen die Schwingkreisverluste, sind bei der Schaukel die Reibungsverluste am Luftwiderstand und in der Aufhängung!

Bei der Schaukel gleicht man diese Verluste durch taktgerechtes Anstoßen immer wieder aus, um sie im Schwingen zu halten. Man muß sie im gleichen Takt – mit der gleichen Frequenz ihres Schwingens anstoßen. Wenn es uns gelänge, die Elektronen im Schwingkreis im Takt der Schwingfrequenz „anzustoßen“ und so die Kreisverluste auszugleichen, ließe sich das Abklingen der Schwingung vermeiden – aus der gedämpften Schwingung würde eine ungedämpfte Schwingung (Abb. 158).

Das „Antippen“ unserer Schwingkreis-„Schaukel“ können wir zum Beispiel so bewerkstelligen, wie es Abb. 159 zeigt. L 1 und C bilden

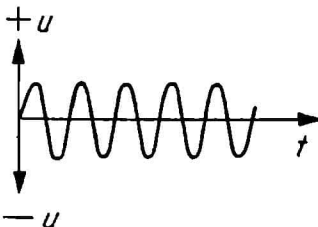


Abbildung 158

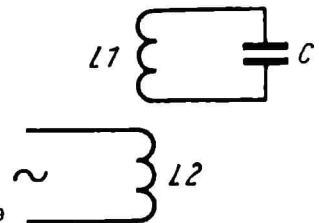


Abbildung 159

den Schwingkreis. Neben L 1 ist eine zweite Spule L 2 angeordnet, und beide Spulen bilden einen Transformator. Der Spule L 2 führen wir eine Wechselspannung zu, die demzufolge über L 1 in den Schwingkreis transformiert wird. Das hat zunächst nur zur Folge, daß im Schwingkreis und über C ein Wechselstrom fließt, der nicht besonders kräftig ist.

Was geschieht, wenn wir die Wechselspannung in der Frequenz soweit ändern, daß sie der Resonanzfrequenz des Kreises (also der Frequenz, die wir nach der auf Seite 241 genannten Formel errechnen) entspricht? Es beginnt die freie Schwingung, die wir bei Abb. 156 schon erklärten.

Der Schwingkreis schwingt jetzt selbsttätig weiter, und über L 2 brauchen wir nur noch eine ganz geringe Energie in den Kreis zu transformieren – einzukoppeln, sagt dazu der Techniker – und zwar gerade nur soviel, daß die Kreisverluste ausgeglichen werden! Die Spannung im Schwingkreis (die Schwingamplitude – den Begriff der Amplitude kennen wir von Abb. 66 her) schaukelt sich auf, ebenso, wie die Kinderschaukel höher und höher schwingt. Die Amplitude schaukelt sich zwar nicht unbegrenzt weit auf, denn mit steigender Amplitude steigen auch die Kreisverluste an – höhere Spannung bedeutet höheren Strom und damit in den vorhandenen Verlustwiderständen höhere Verlustleistung! Doch wenn wir die Kreisverluste möglichst niedrig halten (geringe Ohmsche Widerstände durch dicken Spulendraht, geringe Wirbelstromverluste durch Auswahl geeigneter Spulenkerne usw.), kann sich die Spannung sehr weit aufschaukeln und ist dann viel größer als die von L 2 in den Kreis transformierte Spannung, die ohne diese Resonanzerscheinung an L 1 und C auftreten würde!

Das ist das Wesentliche für uns: Wenn wir eine sehr geringe Spannung über L 2 in den Kreis einkoppeln (L 2 dient als Koppelspule), dann würden wir bei jeder Frequenz außerhalb der Resonanzfrequenz (gleich ob höhere oder tiefere Frequenz) auch an L 1 und C nur eine geringe Spannung haben. Bei der Resonanzfrequenz aber ergibt sich ein ganz beträchtlicher Spannungsanstieg! Wie wir diesen Effekt dazu benutzen, aus mehreren gleichzeitig vorhandenen Frequenzen (beispielsweise von verschiedenen Sendern) eine einzige herauszusieben, werden wir bald sehen.

Vorläufig interessiert uns, wie wir die Resonanzfrequenz ändern können. Wir wissen es schon: durch Änderung des Kondensators oder der Spule. Machen wir eines davon regelbar, so brauchen wir nicht die Frequenz der Wechselspannung der Resonanzfrequenz des Schwingkreises anzupassen, sondern können umgekehrt den Schwingkreis auf eine vorhandene Frequenz einstellen. Dieses Ein-

stellen bezeichnen wir als Abstimmen. Wie wird das praktisch gemacht?

Abb. 160 zeigt einen Weg zum Abstimmen der Spule. Bekanntlich ändert sich ihre Induktivität – sie nimmt zu –, wenn wir einen Eisenkern in sie hineinschieben. Beim Herausziehen nimmt die Induktivität wieder ab. Durch Verschieben des Spulenkernes können wir also die Induktivität ändern und damit die Resonanzfrequenz. Diese Abstimmungsart wird Induktivabstimmung genannt, wir finden sie in verschiedenen Rundfunkempfängern angewandt. Gleitet der Kern aus der Spule heraus, verringert sich die Induktivität, und – wir haben es schon erläutert – die Resonanzfrequenz steigt an. Das wollen wir uns für unsere Bastelpraxis merken. Kern heraus – Frequenz höher!

Die zweite Methode besteht darin, den Kondensator zu ändern. In Abb. 161 ist das angedeutet: Wir haben die beiden Platten gegeneinander verschoben. Jetzt stehen sich geringere Flächen gegenüber, die Kapazität ist kleiner geworden und damit die Resonanzfrequenz höher. Kondensatoren bestehen doch aber praktisch nicht aus Platten, sondern aufgewickelten Metallbändern? Sie eignen sich also nicht.

Abb. 162 zeigt uns einen speziellen Kondensator für diesen Zweck. Zwei Platten sind halbkreisförmig zugeschnitten (bei den meisten Kondensatoren weicht die Form etwas vom Halbkreis ab; die Gründe dafür sind nicht von prinzipieller Bedeutung und für uns nebensächlich).

Eine Platte ist feststehend; sie wird Stator genannt. Die andere ist auf einer Achse drehbar angebracht; sie heißt Rotor. Drehen wir den Rotor nach rechts, so stehen sich immer größere Plattenflächen (in der Abbildung schraffiert) gegenüber. Die größte Kapazität ist erreicht, wenn der Rotor völlig eingedreht – ganz unten ist, die ge-

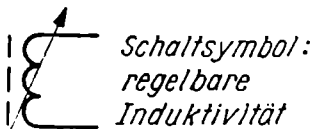
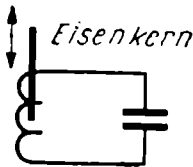


Abbildung 160

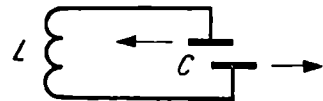


Abbildung 161

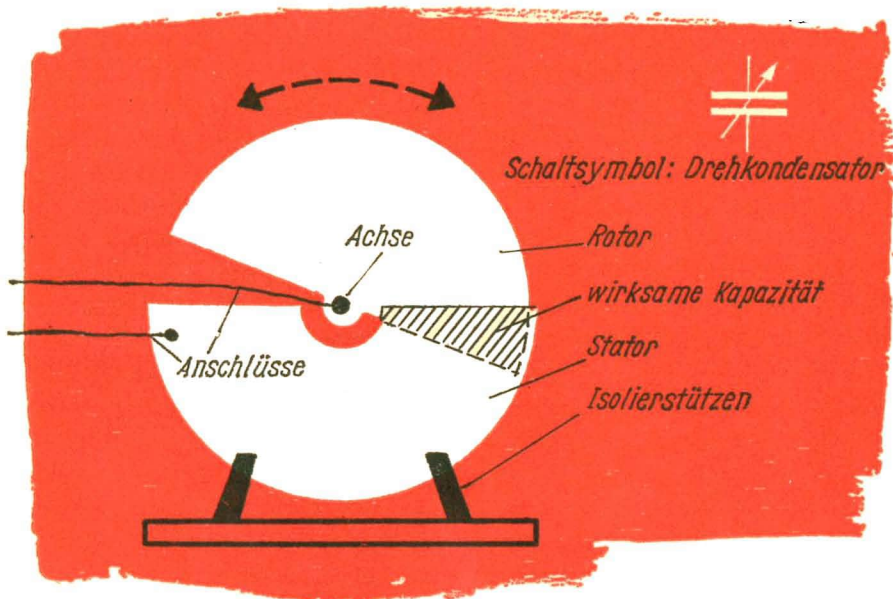


Abbildung 162

ringste Kapazität, wenn der Rotor ganz oben steht (eine geringe Kapazität bleibt, weil der Rotor auch dann noch in unmittelbarer Nähe des Stators steht). Durch Drehen der Achse können wir also den Kapazitätswert ändern – diese Spezialausführung heißt Drehkondensator oder kurz Drehko.

Meist bestehen Stator und Rotor aus mehreren Platten, die kammförmig ineinandergreifen. Damit wird eine höhere Kapazität erreicht. Als Isolierung zwischen beiden Platten dient Luft. Für besonders kleine Ausführungen benutzt man auch dünne Kunststofffolie, die zwischen die Platten gelegt wird. Solche Drehkos sind die sogenannten Foliedrehkos – sie sind bei gleicher Kapazität kleiner als Luftdrehkos, ergeben aber etwas höhere Verluste im Schwingkreis. Bei Luftdrehkos muß darauf geachtet werden, daß sich die Platten nicht verbiegen und den Drehko kurzschließen.

Mit einem Drehko können wir den Schwingkreis also abstimmen. Diese Abstimmart wird kapazitive Abstimmung genannt und ist die gebräuchlichste Abstimmart; wir finden sie bei fast allen Radios. Da ein kleinerer C-Wert im Schwingkreis höhere Resonanzfrequenz bedeutet, merken wir uns für den Drehko: Platten herausgedreht – Frequenz höher!

Wir erinnern noch einmal an den Zusammenhang zwischen Drehkapazität und Resonanzfrequenz: Wenn wir einen Schwingkreis von

der Frequenz 1500 kHz auf 500 kHz verstellen wollen – also auf $\frac{1}{3}$ der Frequenz – dann muß die Kapazität des Drehkos nicht auf den dreifachen, sondern rund den zehnfachen Wert erhöht werden!

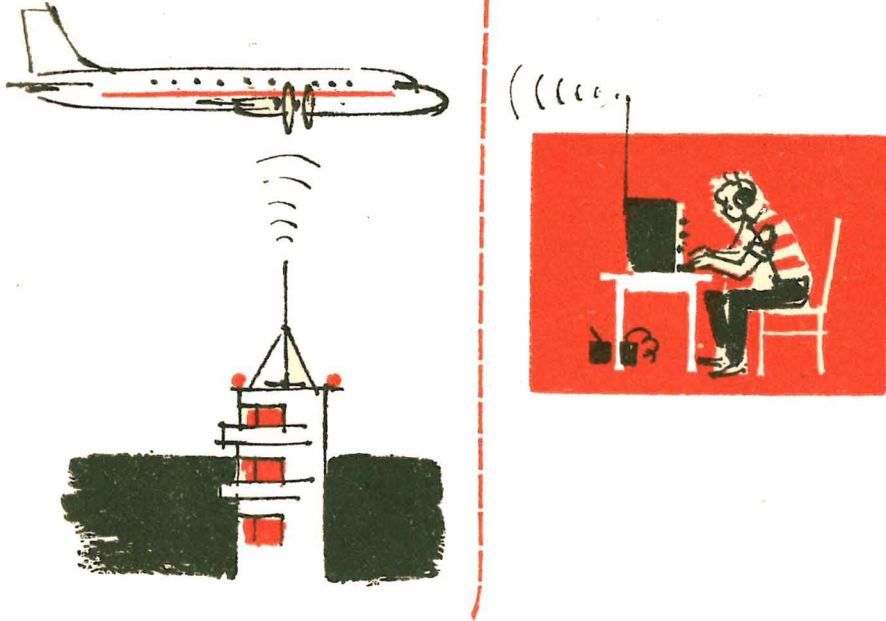
Wie verhielten sich der Scheinwiderstand eines Kondensators und der einer Spule bei Frequenzänderung? Der kapazitive Scheinwiderstand fiel mit steigender Frequenz, der induktive Scheinwiderstand stieg mit steigender Frequenz. Wenn wir also eine Spule und einen Kondensator zu einem Schwingkreis zusammenfügen, dann müßte es eine Frequenz geben, bei der beide Scheinwiderstände den gleichen Wert erreichen. Das ist tatsächlich der Fall, und zwar gerade bei der Resonanzfrequenz des Kreises! Vorläufig wollen wir uns aber nur merken, daß die Scheinwiderstände von L und C bei der Resonanzfrequenz gleich groß sind.

Ein Sender entsteht

Wie erzeugen wir ungedämpfte HF-Schwingungen, wie entsteht ein Sender? Das wollen wir jetzt untersuchen. Allerdings können wir dazu keine Experimente durchführen – wir dürfen es nicht! Es gibt dafür gesetzliche Vorschriften, die besagen: Nicht nur zum Senden, sondern bereits zur Anfertigung eines Senders wird eine Genehmigung, die Amateurfunklizenz, verlangt. Die Ausstrahlung von HF – ganz gleich in welcher Form und Stärke – unterliegt strengen gesetzlichen Vorschriften. Das ist leicht einzusehen: Der Funkverkehr (nicht nur der Rundfunkempfang) könnte gefährlich gestört werden. Denken wir nur an den Flugsicherungsfunkdienst! Würde eine Flugzeugfunkverbindung im Moment der Landung durch einen fremden Sender versehentlich gestört, so könnte leicht ein Absturz die Folge sein! Solche Beispiele ließen sich noch viele nennen.

Für die Funkamateure gibt es deshalb die Amateurfunklizenz. Um sie zu erlangen, muß nach einer vorangegangenen Amateurfunkausbildung eine Prüfung abgelegt werden, die sich nicht nur auf technische Dinge erstreckt, sondern auch auf den sogenannten Funkbetriebsdienst. Ein Funker muß ja auch wissen, wie er sich im Äther zu benehmen hat! Auch beim Kraftfahrzeug genügt es ja nicht, über den Aufbau des Motors Bescheid zu wissen – man muß außerdem die Fahrschule besucht haben und die Verkehrsregeln kennen, anderenfalls würden sich alle Fahrzeuge ständig behindern, und niemand käme vorwärts.

Die Amateurfunkausbildung erhalten wir im Rahmen einer Arbeitsgemeinschaft bei der GST – Gesellschaft für Sport und Technik –, der wir uns als Mitglied anschließen. Dieser Weg garantiert uns die



erforderliche Ausbildung (allein können wir uns die nötigen Kenntnisse und Fähigkeiten nicht aneignen) und ist deshalb auch für die Erlangung der Funklizenz vorgeschrieben. Wer sich näher dafür interessiert und später einmal Funksendeamateur werden möchte, kann sich von der nächstgelegenen GST-Kreisleitung alle näheren Auskünfte geben lassen. Für uns ist vorläufig wichtig zu wissen, daß wir keine Versuche ausführen dürfen, bei denen Hochfrequenz abgestrahlt wird, selbst dann nicht, wenn unser Versuchssender nur wenige Meter weit reichen soll.

Wir besprechen deshalb die Sender nur soweit, wie das zum Verständnis der Empfänger notwendig ist.

Die Rückkopplung

Wie werden HF-Schwingungen erzeugt?

Es gibt verschiedene Arten der Schwingungserzeugung. Am einfachsten zu verstehen ist die Rückkopplungsschaltung – sie ist zugleich die älteste bekannte Schaltungsart zur Erzeugung von NF-Schwingungen. Sie kann auch für die Erzeugung von NF-Schwingungen (solchen, die ihm hörbaren Bereich liegen, also Tonfrequenzschwingungen) benutzt werden, allerdings werden dann Spule und Kon-

densator sehr groß, so daß man diese Schaltung für NF-Zwecke sehr selten antrifft.

Wir wollen uns jetzt nur für die Erzeugung von HF-Schwingungen interessieren. In der Schaltungsfunktion besteht hier kein Unterschied zum NF-Generator.

Der Begriff Generator bedeutet soviel wie Erzeuger — ein HF-Generator ist also ein Schwingungserzeuger für Hochfrequenz. Oft benutzt man dafür auch den Ausdruck Oszillator. Oszillieren heißt soviel wie schwingen — ein HF-Oszillator ist also ein HF-Schwingungserzeuger.

Die Rückkopplungsschaltung, die wir nun betrachten, wird nach ihrem Erfinder, dem deutschen Physiker Alexander Meißner, auch manchmal Meißnersche Rückkopplung genannt. Der Name sagt schon, daß dort irgend etwas zurückgekoppelt wird.

Die Abb. 163 stellt uns einen Rückkopplungsgenerator vor. Wir erkennen zwei uns bereits bekannte Baugruppen: den Schwingkreis mit dem Abstimmkondensator C_A und der Abstimmspule L_A . Um den Kreis auf verschiedene Resonanzfrequenzen abstimmen zu können, haben wir, wie das Schaltsymbol zeigt, einen Drehkondensator benutzt.

Rechts davon sehen wir eine Verstärkerstufe. Auch sie ist uns bereits bekannt (vergleiche Abb. 127); wir erkennen den Gitterkondensator, Gitterwiderstand und Anodenwiderstand. Diese Teile sind in der Abbildung nicht näher bezeichnet. Neu sind C_R und L_R — nein, L_R kam schon in Abb. 159 vor! Dort hatten wir eine zweite Spule L_2 angebracht, um den Schwingkreis „anstoßen“ zu können — um ihm eine Spannung zuführen zu können. Die gleiche Aufgabe hat L_R in Abb. 163. Was geschieht in dieser Schaltung?

Schalten wir ein — legen wir die Anodenspannung bei $+ U_a$ an. An der Röhrenanode tritt in diesem Moment eine Spannung auf, die

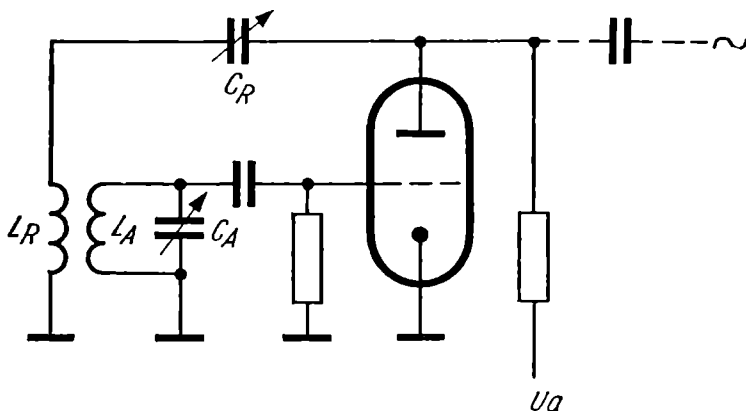


Abbildung 163

Anodenspannung. Von ihr wird der Kondensator C_R aufgeladen, über C_R fließt also ein kurzer Ladestromstoß nach L_R und weiter nach Masse (und damit zurück zum Minuspol der Anodenspannung, siehe Abb. 147 und 148). Der kurze Ladestromstoß wird über L_R auf L_A transformiert – L_A gibt also einen kurzen Stromimpuls ab, der C_A aufladet.

Nun beginnt im Schwingkreis der Schwingvorgang – die in den Schwingkreis transformierte Energie pendelt zwischen L_A und C_A . An den Anschlüssen von C_A steht also jetzt eine Wechselspannung mit der Frequenz, für die unser Schwingkreis in Resonanz ist. Über den Gitterkondensator kommt diese Wechselspannung zum Röhren-gitter und wird in der Röhre verstärkt. An der Anode haben wir deshalb eine größere Wechselspannung mit der gleichen Frequenz, die der Schwingkreis hat. Diese Wechselspannung – und das ist der entscheidende Trick dabei! – wird nun über C_R wieder zur Rückkopplungsspule L_R geleitet und von dieser erneut in den Schwingkreis transformiert! Da sie die gleiche Frequenz hat wie der Schwingkreis, regt sie ihn zum kräftigen Weiterschwingen an, so daß die Schwingspannung an C_A und damit auch am Röhrengitter bestehen bleibt. Dadurch bleibt aber auch die Rückführung dieser Spannung von der Anode über C_R und L_R in den Kreis bestehen – der Schwingkreis schwingt ständig weiter!

An der Röhrenanode besteht also eine ständige Wechselspannung – eine ungedämpfte Schwingung (Abb. 158), die wir über einen Kondensator dort abgreifen und weiterverwenden können (punktiert angedeutet.)

Im Grunde genommen hat also die Röhre nur die Aufgabe, die vom Schwingkreis abgenommene Spannung zu verstärken, damit sie zum Kreis zurückgeleitet werden kann. Dort bewirkt diese Rückkopplungsspannung (der Begriff Rückkopplung ist jetzt verständlich!) einen Ausgleich der Schwingkreisverluste. Die Frequenz der Schwingspannung und damit die Frequenz, die wir beim Oszillator an der Anode abnehmen können, kann durch Veränderung von C_A (deshalb haben wir dort einen Drehko!) oder auch von L_A geregelt werden. Warum wird für C_R – den Rückkopplungskondensator – ebenfalls ein Drehko verwendet?

Wenn wir C_R kleiner machen, dann wird weniger Schwingspannung rückgekoppelt. Die Rückkopplung wird schwächer, ja sie kann so schwach werden, daß die in den Schwingkreis rückgekoppelte Energie nicht mehr ausreicht, um die Kreisverluste auszugleichen. Die Schwingung klingt dann bald ab – der Generator hört auf zu schwingen. Für die HF-Erzeugung muß C_R also ausreichend groß sein.

Wenn wir mit dem Oszillator nur Schwingungen erzeugen wollen, muß C_R nicht regelbar sein. Für Empfangszwecke müssen wir jedoch die Rückkopplung regeln können, wie wir später noch sehen werden.

Noch eines ist wichtig: L_R kann nicht beliebig angeschlossen werden. Wenn wir vom schwingenden Oszillator bei L_R die Spulenanschlüsse vertauschen, also L_R umpolen, schwingt der Oszillator nicht mehr — so groß wie C_R auch machen.

Denken wir noch einmal an das Beispiel der Kinderschaukel. Wir müssen sie, damit sie weiterschwingt, immer im richtigen Rhythmus anstoßen — bei unserer Schaltung geschieht das automatisch, da die rückgeführte Spannung aus der Schwingkreisspannung gewonnen wird und daher immer deren Frequenz hat. Die Kinderschaukel werden wir nicht abstoßen, wenn sie auf uns zukommt, und heranziehen, wenn sie von uns wegschwingt — wir werden sie in der richtigen Richtung anstoßen!

Wenn wir also L_R umpolen, wird die Rückkopplungsspannung mit umgekehrtem Vorzeichen in den Schwingkreis transformiert. Die von L_R in L_A induzierte Spannung ist dann der Schwingspannung genau entgegengesetzt. Wenn die Schwingspannung ihre positive Halbwelle beginnen will, tritt die Rückkopplungsspannung mit der negativen Halbwelle auf und schwächt die Schwingspannung, anstatt sie zu verstärken! Wir müssen daher die Rückkopplungsspule umpolen, wenn der Oszillator nicht schwingen will. Damit erreichen wir, daß bei Schwingkreisspannung und Rückkopplungsspannung stets die Halbwellen gleicher Polarität zusammenfallen.

Bei der Verstärkerstufe fehlt der Katodenwiderstand — hat das Gitter hier keine negative Vorspannung?

Im Moment des Anschwingens des Oszillators — beim Einschalten — hat das Gitter tatsächlich keine negative Vorspannung. Was geschieht also, wenn die erste positive Halbwelle vom Schwingkreis auf das Gitter trifft? Sie macht das Gitter positiv, so daß es in diesem Moment wie eine zweite Anode wirkt.

Einige Elektronen werden vom Gitter aufgenommen und machen dieses negativ. Sie können über den Gitterwiderstand — wenn wir ihn recht hochohmig machen — nur langsam zur Katode abfließen, langsamer, als sie vom Gitter aufgenommen werden. Dadurch bleibt am Gitter ein Elektronenstau — das Gitter wird automatisch negativ! Der Gitterkondensator verhindert ein Abfließen dieser Elektronen über die niederohmige Schwingkreis-spule.

Wir können uns diesen Vorgang auch anders erklären. Solange das Gitter nicht negativ ist, wird ein Teil der Wechsellspannung zwischen Gitter und Katode gleichgerichtet — Gitter und Katode bilden ja

miteinander eine Diode! Diese Gittergleichrichtung sorgt für das Zustandekommen der Gittervorspannung. Wird die Vorspannung so hoch, daß die positiven Halbwellen der Wechselfspannung geringer sind als die Gittervorspannung, so wird das Gitter auch nicht mehr kurzzeitig positiv – es erfolgt keine Gittergleichrichtung mehr. Dadurch fällt die Gittervorspannung wieder langsam ab, denn die Elektronen fließen vom Gitter allmählich über den Gitterwiderstand zur Katode ab. Sobald die Gittervorspannung so weit gesunken ist, daß die Maximalwerte der positiven Halbwellen unserer Schwingkreisspannung sie übersteigen, erfolgt in diesem Augenblick wieder eine Gleichrichtung – das Gitter wird etwas nachgeladen. Dieser Vorgang spielt sich selbsttätig ein, die Gittervorspannung wird immer gerade auf der gleichen Höhe gehalten wie die Amplitude der Schwingspannung! Deshalb ist ein Katodenwiderstand hier entbehrlich.

Wie eine HF-Spannung erzeugt wird, wissen wir nun. Wir könnten sie von der Anode abnehmen und einer zweiten normalen Verstärkerstufe, danach vielleicht noch einer dritten, zuführen – dann hätten wir zuletzt eine sehr hohe HF-Spannung zur Verfügung, die wir einer Antenne zuleiten und abstrahlen könnten –, und das wäre bereits ein Sender!

Die Sendeantenne kann in Abb. 163 auch gleich an die Anode angeschlossen werden (Masse wird dann mit Erde verbunden); der Oszillator für sich wäre auch bereits ein Sender – aber ein sehr schwacher. Immerhin kann solch ein einstufiger Sender (so genannt, weil er nur eine Röhrenstufe hat) für manche Fälle, wo es auf einfachen

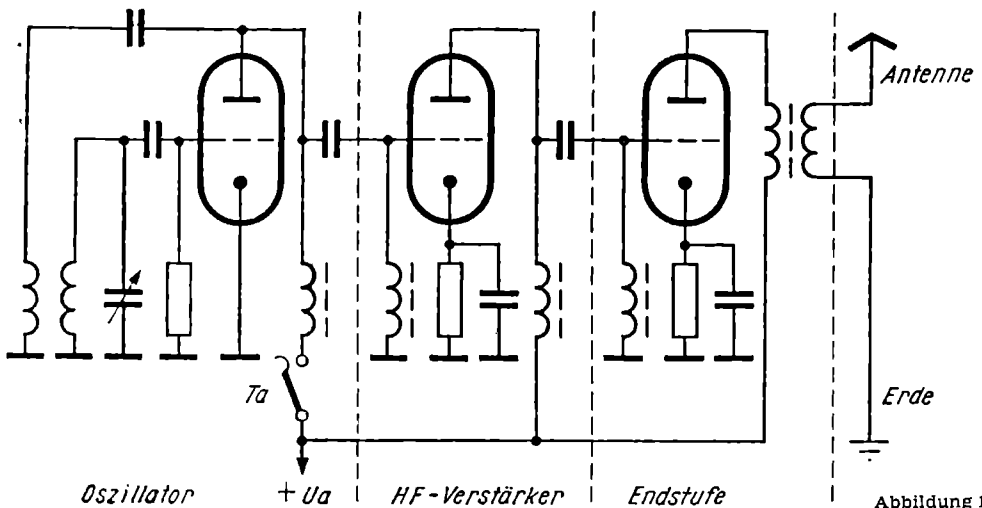
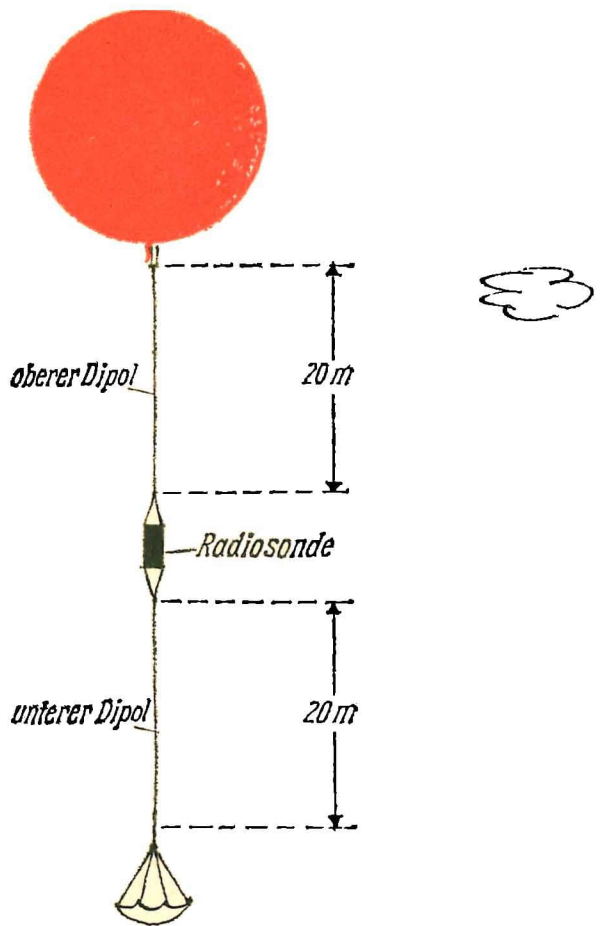


Abbildung 164



Aufbau bei geringer Reichweite ankommt, schon ausreichen. Die einfachen Kleinsender der Radiosonden, die vom Wetterdienst mit Ballons aufgelassen werden und die Ergebnisse der Meßinstrumente der Radiosonde übertragen, sind etwa so aufgebaut, wie Abb. 163 zeigt.

Ein kräftiger Sender braucht einige Verstärkerstufen und ist etwa so geschaltet wie in Abb. 164. Dem Oszillator ist hier eine Verstärkerstufe nachgeschaltet. Die Anoden- und Gitterwiderstände sind durch HF-Drosseln ersetzt. Den Grund für die Verwendung der Anodendrosseln hatten wir auf Seite 237 schon genannt (Abb. 152). Für die Gitterdrosseln gilt folgendes: Wir müssen bereits mit ziemlich hohen Wechselspannungen am Gitter rechnen und würden durch die Gittergleichrichtung eine ziemlich hohe Gittervorspannung erhalten, wenn wir wieder einen hochohmigen Gitterwiderstand verwendeten. Sie wäre so hoch, daß der Anodenstrom der Röhre sogar ganz gesperrt werden könnte! Machen wir aber, um das zu vermeiden, den Gitterwiderstand niederohmiger, so wird zwar die Gittervorspannung nicht mehr ganz so hoch, aber um sie auf brauchbare

Werte zu bringen, müßte der Gitterwiderstand so niedrig sein, daß wir viel HF-Spannung verlieren. Der Gitterwiderstand liegt ja der zu verstärkenden Gitterwechselspannung parallel und verursacht infolgedessen um so mehr Verluste, je geringer sein Wert ist! Widerstände sind hier also nicht mehr ideal. Statt ihrer verwendet man Gitterdrosseln – sie haben sehr geringen Gleichstromwiderstand, so daß an ihnen kein merklicher Elektronenstau und keine besondere Gittervorspannung entsteht. Die für die Röhre notwendige Gittervorspannung erzeugen wir auf die bekannte Weise mit dem Kathodenwiderstand.

Abb. 164 stellt also einen dreistufigen Sender dar, der sich aus den Baugruppen Oszillator, Verstärkerstufe und Endstufe zusammensetzt. Die Endstufe ist eigentlich auch eine Verstärkerstufe, sie wird Endstufe genannt, weil sie die Leistung für die Antenne liefern muß.

Damit wir in Zukunft nicht immer die gleiche Schaltung aufzeichnen müssen, benutzen wir jetzt eine Darstellungsweise, die auch der Techniker verwendet, wenn er nur die Zusammenhänge einzelner Baugruppen zeigen will und sich nicht dafür interessiert, wie diese Baugruppen im einzelnen aufgebaut sind. Diese Darstellungsweise sehen wir in Abb. 165.

Die einzelnen Baugruppen werden nur noch als Blöcke gezeichnet – wir erhalten ein Blockschaltbild. Abb. 165 ist also das Blockschaltbild zu unserem Sender nach Abb. 164.

Der HF-Oszillator wird mit einer dreifachen Wellenlinie dargestellt. (Es hat sich eingebürgert, HF durch drei Wellenlinien darzustellen, NF durch nur eine – wir wollen jedoch diese Unterscheidung nicht allzu streng nehmen.) Der Pfeil deutet an, daß die Frequenz regelbar ist. Verstärkerstufen werden immer durch ein Dreieck dargestellt, dessen Spitze die Richtung zeigt, in der der Verstärker arbeitet – die Dreieckspitze weist also stets zum Ausgang des Verstärkers. Daß alle Baugruppen untereinander über die gemeinsame Masseleitung verbunden sind, weiß der Techniker ohnehin. Man stellt daher im Blockschaltbild nur die Verbindungen dar, die die einzelnen Baugruppen untereinander als heiße Leitungen verbinden (siehe dazu Seite 236). Auch die Stromversorgungsleitungen läßt man meist

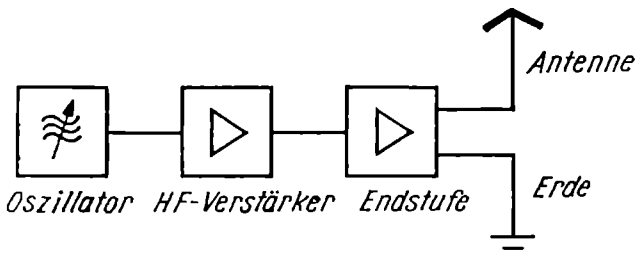


Abbildung 165



weg – wir wissen ja auch ohne besonderen Hinweis in Abb. 165, daß jede Verstärkerstufe im fertigen Gerät (Abb. 164) ihre Anodenspannung von der gemeinsamen Anodenspannungsquelle $+U_a$ bekommt.

Wie wir die Spannung von der Endstufe entnehmen (auskoppeln) und zur Antenne führen, zeigt uns Abb. 164: mit einem HF-Transformator. Dessen rechte Spule – die Sekundärspule – ist die Wechselspannungsquelle für die Antenne! Und nun sehen wir uns noch einmal die Abb. 83 bis 87 an – dort haben wir schon eine Vorstufe des Blockschaltbildes benutzt! Der Kreis mit dem Wechselstromzeichen war die Sekundärspule in der Endstufe unseres Senders.

Wie können wir mit dem Sender eine Nachricht übertragen? Erinnern wir uns an die Morsezeichen! Wenn wir den Sender im Takt der Morsezeichen ein- und ausschalten, leuchtet entsprechend den Abb. 87 bis 93 unsere Empfangsglühlampe im Takt der Zeichen auf. Wir könnten also mit der Morsetaste die Anodenspannung U_a des Senders ein- und ausschalten. Das würde der Taste jedoch schlecht bekommen, da der gesamte Stromverbrauch aller Röhren bei einem Sender ziemlich stark ist. Bei großen stationären Funkstationen ver-

braucht der Sender so viel Strom wie ein ganzes Wohnviertel! Doch es ist ja nicht nötig, alle Röhren zu schalten – oder zu tasten, wie der Fachmann sagt. Wir schalten unsere Morsetaste einfach in die Anodenleitung des Oszillators ein (Ta in Abb. 164) und tasten nur den Oszillator! Die stromfressenden Verstärker- und Endstufenröhren bleiben ständig unter Strom. Trotzdem klappt alles: Wenn der Oszillator nicht schwingt, wird auch nichts verstärkt, und es kann keine HF-Spannung an die Antenne kommen!

Die Modulation

Wie übertragen wir mit dem Sender Sprache und Musik? Unser Mikrofon liefert eine NF-Spannung. Wie wir sie auf ausreichende Werte verstärken können, haben wir bei den Röhren besprochen (z. B. Abb. 128). Es ergibt sich dann eine NF-Schwingung der Form, wie sie in Abb. 166 oben dargestellt ist. Unser Sender strahlt eine HF-Schwingung aus, wie sie die mittlere Abbildung zeigt. Beide Schwingungen unterscheiden sich nur in der Frequenz – die NF-Schwingung kann zwischen etwa 15...30 Hz und etwa 15 kHz liegen, die HF-Schwingung hat aber mehrere hundert oder tausend kHz. Wir müßten unserer HF-Schwingung gewissermaßen die NF-Schwingung „mit auf die Reise geben“ – etwa so, wie ein Pferd den Reiter trägt. Das Pferd wäre dann die HF, der Reiter die NF. Warum strahlen wir die NF-Spannung nicht einfach über die An-

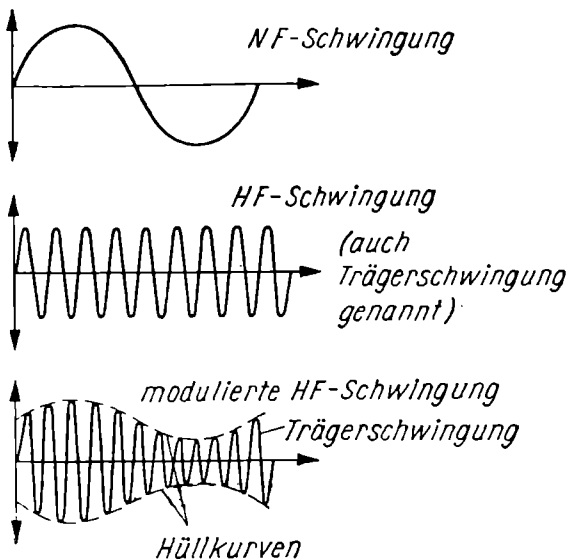


Abbildung 166



tenne ab? Denken wir noch einmal an die Erklärung der Antennenwirkung (Abb. 83 bis 87)! Bei einer Frequenz von wenigen kHz wäre sowohl das elektrische als auch das magnetische Feld der Antenne zu schwach, größere Entfernungen zu überbrücken.

In bezug auf das elektrische Feld können wir uns die drahtlose Verbindung Sender-Empfänger wie einen kleinen Kondensator vorstellen. Da die kapazitive Wirkung zwischen Sendeantenne und Empfangsantenne wegen der großen Entfernung sehr gering ist, brauchen wir hohe Frequenzen, um über diese kleine Kapazität eine ausreichende Wirkung zu erzielen. Ähnlich verhält es sich mit dem magnetischen Kraftfeld. Wir haben ja bei unseren früheren Versuchen zur Induktion schon festgestellt, daß die Induktionswirkung um so kräftiger ist, je schneller die magnetische Feldänderung erfolgt — je höher die Frequenz ist. Deshalb eignet sich die NF-Spannung nicht zur unmittelbaren Aussendung; wir brauchen die HF als „Pferd“ für unseren „Reiter“, die NF.

Jetzt können wir die Stärke der HF-Spannung — ihre Amplitude — im Takt der NF-Schwingung ändern. Das Ergebnis ist die untere Kurve in Abb. 166. Die vom Oszillator gelieferte HF (mittlere Kurve) wird im Takt der NF (obere Kurve) in ihrer Amplitude verändert (untere Kurve). Um das noch deutlicher zu zeigen, haben wir die NF-Amplitude punktiert dargestellt.

Wir sehen, daß diese punktierte „Umhüllung“ in ihrem Verlauf genau der NF-Schwingung entspricht. Deshalb nennt man diese punktierte Linie auch die Hüllkurve der modulierten HF-Spannung (den Vorgang, bei dem wir die HF-Amplitude im Takt der NF-Spannung verändern, nennen wir Modulation — kurz gesagt, wir modulieren die HF-Spannung mit der NF-Spannung). Abb. 166 zeigt uns also oben die NF-Spannung, darunter die noch unmodulierte HF-Spannung und unten die mit der NF modulierte HF-Spannung. Die Amplitude der HF-Spannung folgt jetzt allen Schwankungen der NF; sie wird in deren Takt stärker und schwächer.

Weil wir die Amplitude der HF beeinflussen, spricht man bei diesem Verfahren von Amplitudenmodulation. Es gibt noch andere Verfahren, beispielsweise die Frequenzmodulation (sie wird beim UKW-Rundfunk angewendet). Bei ihr wird die HF nicht in der Amplitude, sondern in ihrer augenblicklichen Frequenz beeinflusst. Die HF-Spannung bleibt dann in ihrer Amplitude konstant, schwankt aber in der Frequenz im Takt der NF-Schwingung um einen mittleren Wert. Damit wollen wir uns hier nicht näher befassen, denn für unsere Basteleien ist vorläufig nur die Amplitudenmodulation wichtig.

Wie modulieren wir die Amplitude der HF-Spannung? Man könnte im einfachsten Fall daran denken, ein Kohlemikrofon in die Sendeantennenleitung einzuschalten. Dieses Mikrofon ändert ja (Abb. 110) seinen Widerstand, wenn Schallwellen auftreffen. Es würde also den Antennenstrom und damit auch die von der Antenne abgestrahlte HF-Amplitude im Takt der Schallwellen ändern. Diese Änderungen wären aber viel zu schwach; außerdem würde das Mikrofon durch die starken Antennenströme sofort beschädigt werden – der Kohlegrieß verbrennt. Dieser Weg ist also praktisch nicht möglich. Wir müssen die Modulation im Sender vornehmen.

Sehen wir das Blockschaltbild Abb. 167 an. Oben erkennen wir den Sender aus Abb. 165, darunter ein Mikrofon mit einem nachgeschalteten NF-Verstärker. Am Ausgang des HF-Verstärkers steht uns die HF-Schwingung nach Abb. 166 mitte zur Verfügung, am Ausgang des NF-Verstärkers die NF-Schwingung nach Abb. 166 oben. Beide Schwingungen führen wir der Senderendstufe zu, die jetzt zusätzlich die Aufgabe der Modulation übernimmt. Diese Baugruppe heißt daher Modulator.

Die Schaltung dieses Modulators (Abb. 168) ähnelt auf den ersten Blick der Senderendstufe in Abb. 164. Doch in die Anodenleitung

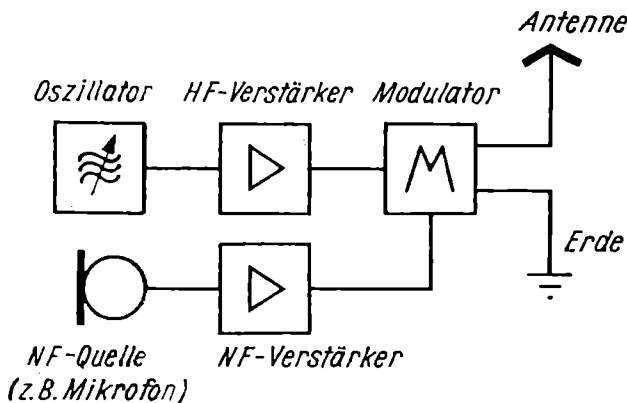


Abbildung 167

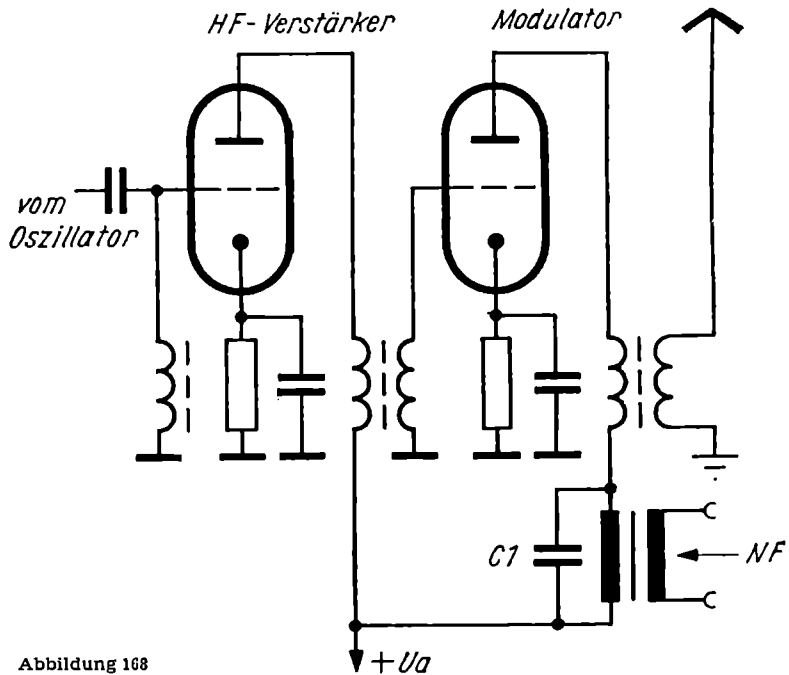


Abbildung 168

der Endröhre ist jetzt ein NF-Übertrager eingefügt, dem wir die NF zuführen. Dadurch wird der Anodenstrom der Endröhre im Takt der NF geändert.

Durch diese Änderung wird bewirkt, daß sich auch die Stärke des HF-Stromes im Anodenstromkreis ändert. Die in den Antennenstromkreis induzierte Spannung schwankt also im Takt der NF — wir haben die HF-Antennenspannung mit der NF moduliert.

Der NF-Übertrager wird mit einem Kondensator C 1 überbrückt, der so klein ist, daß er sich bei der NF noch nicht bemerkbar macht, aber für die HF die Trafowicklung überbrückt, die ja bei dieser hohen Frequenz sonst wie eine Drosselspule wirken würde.

Abb. 169 zeigt die gleiche Schaltung etwas vereinfacht. Unten ist die letzte Stufe des NF-Verstärkers gezeichnet, deren Anodenstrom im Takt der NF schwankt. Wir können ihn deshalb gleich durch den Modulationsübertrager in der Senderendstufe leiten. Das Prinzip bleibt das gleiche wie in Abb. 168.

Die Abbildungen 168 und 169 weisen noch eine weitere Änderung gegenüber dem Sender der Abb. 164 auf. Dort war die HF von der Anode der Vorröhre über den uns schon bekannten Gitterkonden-

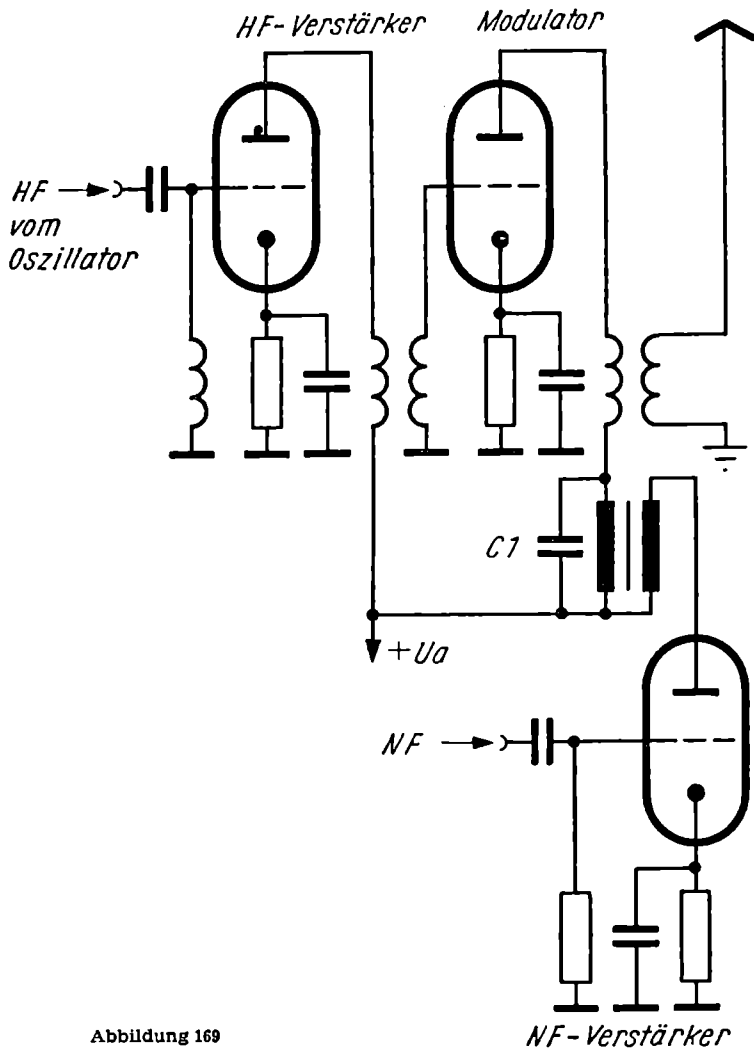


Abbildung 169

sator zum Gitter der Endröhre geleitet worden und eine Gitterdrossel notwendig. Wenn sich aber in der Anodenleitung der Vor- röhre und am Gitter der Endröhre Spulen befinden, dann können wir beide auch magnetisch koppeln. Dadurch wird aus ihnen ein Übertrager.

In Abb. 168 und 169 haben wir das schon so gemacht. Die HF-Span- nung wird jetzt induktiv übertragen, und der Gitterkondensator kann entfallen.

Wir sehen auch hier wieder deutlich, wie man durch sinnvolle Kom- bination der einfachen Grundlagen, die wir im ersten Teil des Buches kennenlernten, zu immer weiteren Verbesserungen einer

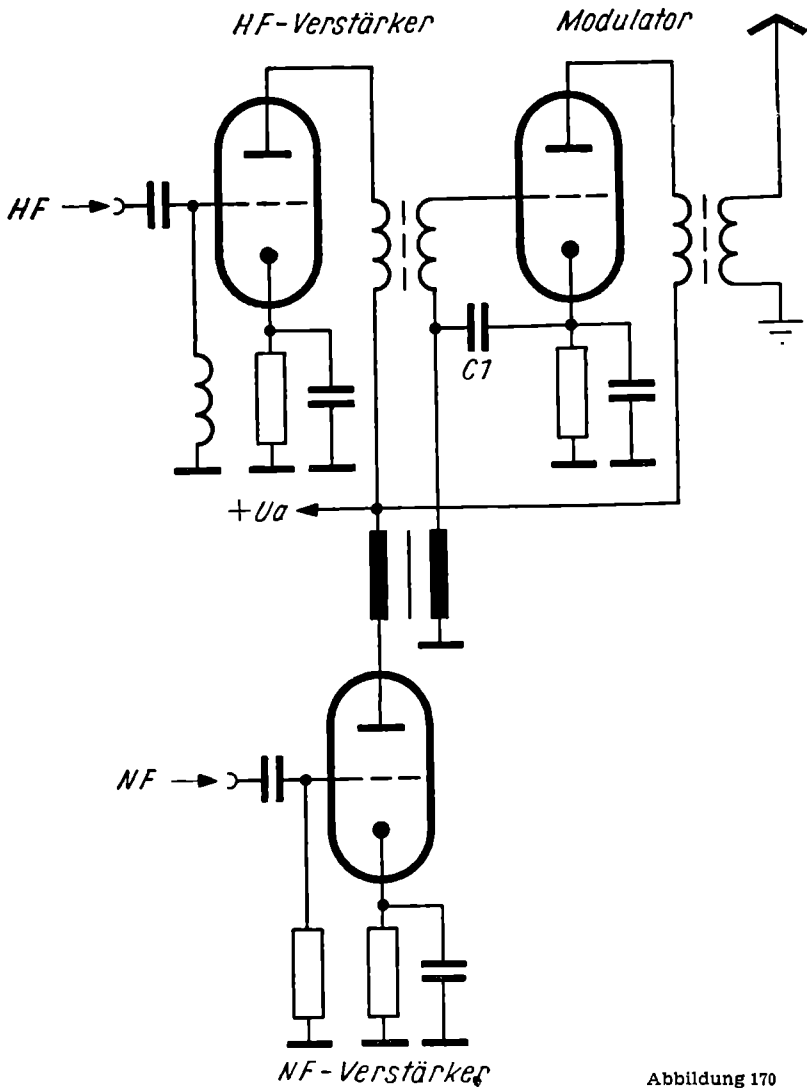


Abbildung 170

Schaltung kommt. Natürlich hat diese veränderte Kopplungsart zwischen den beiden Röhren nichts mit der Modulation zu tun.

Wir haben die HF-Spannung bisher in der Anodenleitung der Endröhre moduliert. Dieses Modulationsverfahren für eine Amplitudenmodulation wird deshalb auch als Anodenmodulation bezeichnet. Es gibt dafür noch andere Modulationsarten, von denen jede Vor- und Nachteile hat, die wir hier nicht näher untersuchen können.

Um uns in der Schaltungstechnik zu üben, wollen wir nur noch eine zweite Modulationsart kurz betrachten: die Gittermodulation nach Abb. 170. Am HF-Verstärker und NF-Verstärker hat sich nichts ge-

ändert, auch der NF-Modulationsübertrager ist wieder vorhanden. Er wirkt jetzt aber auf das Gitter der Endröhre, so daß am Endröhrengitter jetzt außer der HF-Spannung auch noch die NF-Spannung liegt. Diese kann die HF-Spule am Gitter wegen ihrer niedrigen Frequenz ungehindert durchfließen. Der Kondensator C 1 sorgt wieder dafür, daß die HF nicht durch die Wicklung des NF-Übertragers gesperrt wird, sondern direkt zwischen Katode und Gitter liegt. C 1 ist so klein, daß er diese Aufgabe erfüllt, aber für die NF-Spannung noch keinen merklichen Kurzschluß darstellt. Er hat also prinzipiell die gleiche Aufgabe wie in Abb. 168 und 169.

Der Anodenstrom wird also im Takt der NF verändert, außerdem natürlich im Takt der HF. Insgesamt ergibt er wieder den Verlauf nach Abb. 166 unten.

Den grundsätzlichen Aufbau eines Senders kennen wir nun. Wie er praktisch aussieht, wollen wir nicht näher untersuchen – das lernen wir kennen, falls wir später einmal die Amateurfunklizenz erwerben und daran denken können, selbst einen Sender zu bauen. Das ist an sich nicht schwieriger als der Bau eines Empfängers. Sender mittlerer Leistung kann man sogar mit normalen Radiobauteilen aufbauen.

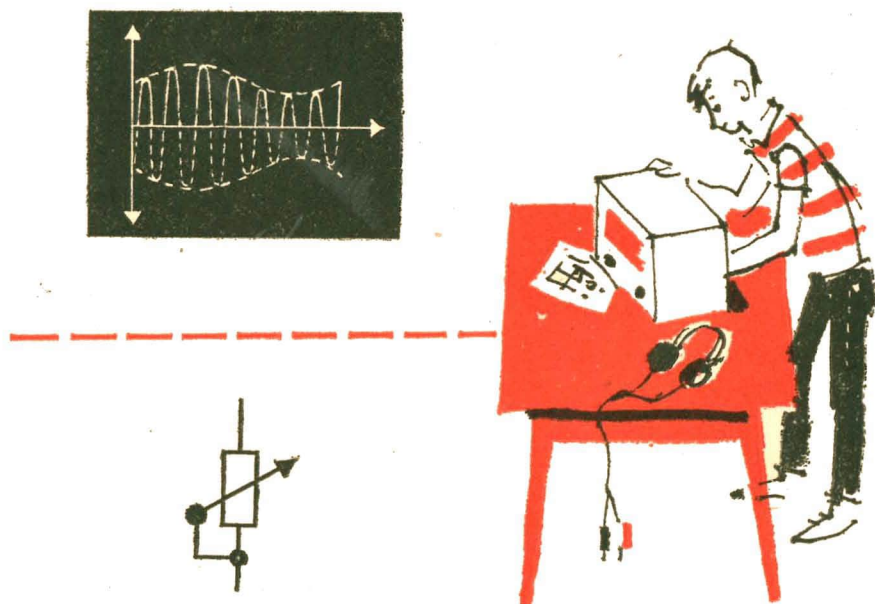
Für stärkere Sender, die bis in andere Länder oder sogar um die ganze Welt reichen, brauchen wir allerdings auch stärkere Röhren, als sie in Radios benutzt werden. Beispielsweise muß die Endröhre ja die Leistung für die Antenne aufbringen. Welche Dimensionen ein Sender dann annimmt, mag der folgende Hinweis zeigen: Es gibt heute große Senderöhren für Senderendstufen, die Leistungen von vielen hundert Kilowatt haben! Eine Sender-Endröhre für 300 kW hat die Leistung von rund 50 000 Lautsprecherröhren, wie wir sie für die NF-Endstufe im Radio benutzen! Solch eine Röhre wird sehr heiß (stellen wir uns einen Heizofen mit mehreren 100 000 Watt Leistung vor!), ihr Anodenblech ist ein kräftiger Metallblock und wird mit Wasser gekühlt. Solch eine Röhre wiegt nahezu 80 kg und ist fast mannshoch. Ihre Anodenspannung U_a beträgt 10 000 V (bei unseren Radios höchstens 300 V), ihr Anodenstrom fast 50 A! Der Heizfaden ist kein Faden und auch kein Glühdraht mehr, sondern ein massives Gebilde, das bei einer Heizspannung von 15 . . . 20 V fast 2000 A braucht, um zum Glühen zu kommen! Ähnlich sehen die anderen Bauteile aus. Der Ausgangsübertrager für die Antenne wird aus dickem Kupferrohr „gewickelt“, seine Windungen haben einen Durchmesser von gut einem Meter! Der NF-Modulationsübertrager ähnelt auch mehr einem Hochspannungstransformator aus der Starkstromtechnik als dem uns bekannten NF-Übertrager: Selbst in die größte Wohnstube würde er kaum hineinpassen!

Das Gegenstück dazu sind moderne Kleinsender, die komplett mit Mikrofon und Batterien in die Jackentasche passen. Beide Typen – sowohl der größte als auch der kleinste Sender – arbeiten aber grundsätzlich so, wie wir es hier beschrieben haben.

So arbeitet ein Empfänger

Die Funktion der gesamten sogenannten Senderseite – vom Mikrofon und Oszillator bis zur Sendeantenne und drahtlos bis zur Empfangsantenne – kennen wir nun. Wir wissen auch, was für eine Spannung wir am Anschluß unserer Empfangsantenne vorfinden: Es ist die modulierte HF-Spannung (Abb. 166 unten) – aber eine winzige Spannung, die bestenfalls $\frac{1}{1000}$ V, oft nur einige millionstel Volt beträgt. Sie läßt sich zunächst mit einem HF-Verstärker wieder verstärken.

Zuvor wollen wir uns ansehen, wie aus der modulierten HF-Spannung die NF zurückgewonnen wird. Man nennt den Vorgang der Rückgewinnung der NF-Spannung aus der HF – in der Anlehnung an den Modulationsbegriff – Demodulation.



Die Demodulation

Wir könnten daran denken, die demodulierte HF-Spannung (Abb. 166 unten) einem Kopfhörer zuzuleiten, um sie so direkt hörbar zu machen. Wir würden die HF-Schwingung aber nicht hören, weil ihre Frequenz weit oberhalb des hörbaren Bereiches liegt und außerdem die Kopfhörermembran zu träge wäre, um den schnellen HF-Schwingungen zu folgen. Aber den langsamen Schwingungen der Hüllkurve (dem Abbild der NF-Spannung) könnte sie doch folgen? Auch das ginge nicht, weil die obere und untere Hüllkurve zugleich vorhanden sind und spiegelbildlich zueinander liegen – sie heben sich in ihrer Wirkung auf!

Hieraus erkennen wir schon, was zu tun ist: Nehmen wir eine der Hüllkurven weg – beispielsweise, indem wir alle negativen Halbwellen der modulierten HF-Schwingung und damit auch die untere Hüllkurve beseitigen – dann bleibt nur die andere Hüllkurve übrig und damit das genaue Abbild der NF-Spannung! Aber wie macht man das? Ganz einfach: Wir müssen die HF-Spannung gleichrichten!

Betrachten wir Abb. 118. Dort hatten wir eine Wechselspannung mit einer Diode gleichgerichtet; die entstandene Kurvenform zeigte die

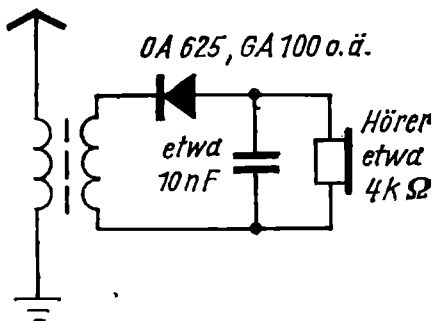
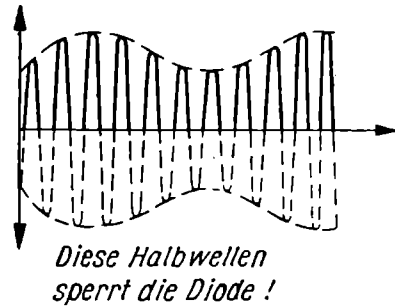
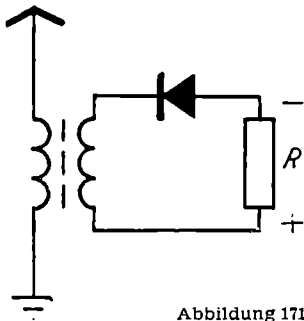


Abb. 119. Das gleiche machen wir jetzt mit der modulierten HF-Schwingung. Abb. 171 zeigt die Schaltung dafür.

Die von der Antenne aufgenommene Spannung wird induktiv in den Gleichrichterkreis übertragen. Als Gleichrichter ist eine Halbleiterdiode eingezeichnet – wir können beispielsweise eine kleine Germanium-Spitzendiode verwenden. Mit einer Vakuumdiode ginge das natürlich genauso, aber der Aufbau wäre dann umständlicher.

Am Widerstand kommt jetzt eine pulsierende Gleichspannung zustande, wie wir das bereits bei Abb. 118 und 119 sahen. Die Diode läßt stets nur eine Halbwelle der HF-Spannung durch, und am Widerstand ergibt sich dann ein Spannungsverlauf nach Abb. 172.

Wir schließen nun an Stelle des Widerstandes einen Kopfhörer an. Warum hören wir fast nichts? Wir haben übersehen, daß die Wicklung des Kopfhörers für die HF wie eine Drossel wirkt. Deshalb müssen wir den Kopfhörer für die HF mit einem kleinen Kondensator überbrücken. Die endgültige Schaltung sieht dann so aus, wie sie in Abb. 173 zu sehen ist.

Für die HF ist der Stromkreis zur Diode über den Kondensator geschlossen. Der gleichgerichtete Stromfluß pendelt in dem Maße, wie sich die HF-Amplitude ändert – er pendelt daher im Takt der Hüllkurve aus Abb. 172 und ist ein genaues Abbild der NF-Spannung, die wir dem Modulator senderseitig zugeführt haben!

Versuchsweise sollten wir die Schaltung nach Abb. 173 nun einmal aufbauen. Dazu ist eine gute Hochantenne und Erdung notwendig, denn die winzige Antennenenergie wird ja hier nicht verstärkt. Wir müssen also von vornherein versuchen, mit der Antenne so viel Energie wie möglich aufzunehmen.

Für die Spule verwenden wir einen beliebigen, kleinen HF-Eisenkern. Beide Wicklungen erhalten ungefähr 100 . . . 150 Drahtwindungen. Die Typenbezeichnung für die Germaniumdiode ist in Abb. 173 angegeben, aber auch alle ähnlichen Typen eignen sich. Der angegebene Wert für den Kondensator ist nicht sehr kritisch, er darf zwischen etwa 1 nF und höchstens 100 nF (= 0,1 μ F) liegen. Als Kopfhörer dient ein hochohmiger Radiokopfhörer mit ungefähr 4000 Ω Widerstand (haben alle üblichen Doppelkopfhörer).

Wir werden mit unserem Experiment zufrieden sein oder vielleicht auch nicht, denn wir hören wahrscheinlich gleich mehrere Sender auf einmal. Das ist kein Wunder, denn die Diode richtet ja alles gleich, was an HF-Spannungen auf die Antenne trifft – ganz egal, von welchem Sender die HF kommt! Wir müssen also noch eine Vorkehrung treffen, um nur eine einzige Frequenz zu empfangen. Dazu erinnern wir uns wieder einer Schaltung, die wir vom Senderoszillator her schon kennen: des Schwingkreises.

Die Abstimmung

Wir erweitern jetzt unsere Schaltung entsprechend der Abb. 174. Hinzugekommen ist ein Drehkondensator mit 500 pF Kapazität. Wenn wir Spulen und Drehko mit Abb. 159 vergleichen, wird uns der Zusammenhang gleich klar. In Abb. 159 ist Spule L 2 jetzt die Antennenspule, und L 1 ist die Schwingkreisspule. Am besten verwenden wir für die Spule einen kleinen Spulenkörper mit HF-Eisenkern (jede Rundfunkwerkstatt hat in der Abfallkiste Dutzende alter Spulen, die wir nur abwickeln und neu zu bewickeln brauchen, um eine für unsere Zwecke geeignete Spule zu erhalten!), auf den wir beide Spulen nebeneinander mit den in Abb. 174 angegebenen Windungszahlen wickeln. Mit einem 500-pF-Drehko wird dann mit der einstellbaren Resonanzfrequenz gerade der Rundfunk-Mittelwellenbereich erfaßt. Alle anderen Teile der Schaltung entsprechen wieder Abb. 173.

Da sich bei der Resonanzfrequenz die Spannung im Schwingkreis auf recht hohe Werte aufschauelt, stellen wir mit dem Drehko die Resonanzfrequenz genau auf den Sender ein, den wir hören wollen. Er ist dann bedeutend lauter als andere Sender zu hören.

Damit haben wir bereits einen kompletten kleinen Empfänger gebaut! Die verwendete Schaltung nennt man Detektorschaltung – ihr Name stammt noch aus den Anfängen des Rundfunks, denn die damals üblichen Halbleitergleichrichter – Vorläufer unserer heutigen Germanium-Spitzendiode – nannte man Detektoren.

Die Trennschärfe unseres Empfängers ist noch nicht sehr gut. Der eingestellte Sender ist lauter zu hören als die gleichzeitig empfangenen anderen Sender, aber der Schwingkreis trennt die einzelnen Sendefrequenzen noch schlecht voneinander. Was ist die Ursache der geringen Trennschärfe?

Bei der Besprechung des Schwingkreises (Seite 240 bis 247) hatten wir gesehen, daß sich die Spannung um so weiter aufschaueln kann, je mehr Energie wir in den Kreis einkoppeln – aber das hilft uns wenig, weil wir die Antennenenergie nicht vergrößern können. Außerdem ist sehr wichtig, daß die Verluste im Schwingkreis möglichst gering bleiben, und hier liegt die Ursache für die schlechte Trennschärfe unseres Gerätes. Der Demodulator mit Diode und Kopfhörer ist dem Schwingkreis parallelgeschaltet, er entzieht ihm Energie und wirkt wie ein parallelgeschalteter Verlustwiderstand – man sagt, der Demodulator bedämpft den Schwingkreis.

Wir können diesen störenden Einfluß etwas verringern, indem wir die Schwingkreisspule anzapfen. Die Schaltung dafür zeigt uns Abb. 175. Dabei ändert sich die Windungszahl insgesamt nicht, aber

Abbildung 174

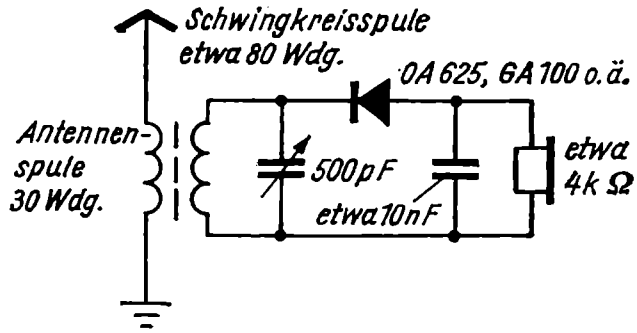
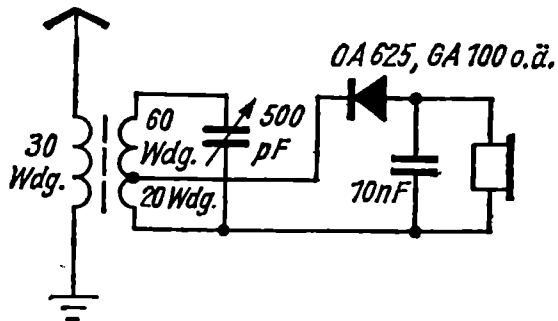


Abbildung 175



bei der 20. Windung wird eine Anzapfung angebracht, an die wir den Demodulator anschließen. Jetzt bekommt die Diode zwar nur noch ein Viertel der Schwingkreisspannung (Trafo-Prinzip!), aber an der Anzapfung ist jetzt für den Demodulator ein geringerer Quellenwiderstand vorhanden. Das müssen wir genauer erklären.

Für den Demodulator ist der Schwingkreis die Spannungsquelle. Sie hat – wie jede Spannungsquelle – einen Innenwiderstand, nämlich den Scheinwiderstand des Schwingkreises (das ist vereinfacht ausgedrückt). Der Innenwiderstand einer Spannungsquelle spielt eine große Rolle. Je höher er ist, um so geringer wird die abgegebene Spannung beim Anschluß eines Verbrauchers mit gleichbleibendem Widerstand (den Widerstand unseres Verbrauchers, des Demodulator-Stromkreises, können wir ja nicht beeinflussen!).

Wenn wir den Demodulator nun an die Anzapfung anschließen, dann haben wir dort nicht $\frac{1}{4}$, sondern nur $\frac{1}{10}$ des Schwingkreis-Scheinwiderstandes als Quellwiderstand! Der Scheinwiderstand des Schwingkreises ist ja als zwischen den Spulenden vorhanden zu denken! Die unteren 20 Windungen der Spule bilden aber zur gesamten Wicklung einen Transformator.

Da Widerstände mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses transformiert werden, liegt die Anzapfung bei $\frac{1}{4}$ der Gesamtwindungszahl, das Übersetzungsverhältnis beträgt also 1:4. Im gleichen Maße wird die Schwingkreisspannung herabtransformiert, doch der Schwingkreiswiderstand wird im Verhältnis $1:4 \cdot 4 = 1:16$ herabgesetzt! Wir haben also an der Anzapfung nur noch $\frac{1}{16}$ des Quellenwiderstandes gegenüber der Schaltung nach Abb. 174!

Die Spannung geht also beim Anschluß des Demodulators weit weniger zurück als zuvor — das heißt, daß der Schwingkreis jetzt viel weniger bedämpft wird! Er schaukelt sich auf viel höhere Resonanzspannung auf als zuvor, so daß wir im Endeffekt bei der Anzapfung doch wieder die gleiche NF-Spannung (und damit gleiche Lautstärke) haben wie vorher (oder sogar noch mehr). Das Weiteraufschaukeln der Schwingkreisspannung gilt aber nur für die Resonanzfrequenz, nicht für die anderen Frequenzen! Deshalb wird sich die Resonanzfrequenz aus den anderen Frequenzen weiter herausheben — die Trennschärfe wird besser!

Das Audion

Der Schwingkreis muß möglichst verlustfrei arbeiten und darf vom Demodulator möglichst wenig bedämpft werden. Die Dämpfung durch den Demodulator läßt sich durch Anzapfung des Schwingkreises verringern. Trotzdem bleibt eine Dämpfung bestehen, weil der Demodulator dem Schwingkreis in jedem Falle eine Leistung entzieht. Außerdem hat auch der Schwingkreis selbst unvermeidliche Verluste, nicht zuletzt durch den Drahtwiderstand der Spule. Die Verluste machen sich besonders bei höheren Frequenzen bemerkbar. Hochfrequente Wechselströme fließen nämlich nicht im gesamten Drahtquerschnitt, sondern vorwiegend an der Oberfläche des Drahtes — dies um so mehr, je höher die Frequenz ist. Für sehr hohe Frequenzen (im UKW-Bereich) benutzt man deshalb dicke Drähte, manchmal sogar mit versilberter Oberfläche, denn Silber leitet noch besser als Kupfer, und die Drahtstärke hat hier nur den Zweck, die Oberfläche zu vergrößern. Da das Drahtinnere an der Leitung des Stromes nicht mehr beteiligt ist, sind beispielsweise die Spulen in UKW-Großsendern meist aus versilberten hohlen Rohren aufgebaut.

Im Mittel- und Kurzwellenbereich benutzt man für Rundfunkempfänger die sogenannte Hochfrequenzlitze. In ihr sind mehrere dünne Drähtchen vereinigt, die lackiert (also gegeneinander isoliert) sind. Dadurch erreicht man, daß die Ströme in den im Litzen-

innern fließenden Drähtchen nicht zur Litzenoberfläche wandern und der ganze Litzenquerschnitt ausgenutzt wird. Mit HF-Litze lassen sich deshalb Spulen aufbauen, die gegenüber gleichartigen, aus Volldraht gewickelten Spulen geringere Verluste haben. Das gilt allerdings nur dann, wenn beim Anlöten der HF-Litze wirklich sämtliche Drähtchen erfaßt werden. Ist nur ein Drähtchen der Litze gebrochen oder hat es beim Anlöten nicht einwandfreien Kontakt bekommen, so ist die ganze Spule schlechter als eine solche aus Volldraht! Weil das Anlöten und Verarbeiten der HF-Litze Übung erfordert, wollen wir zu Anfang noch auf sie verzichten und unsere Spulen aus normalem Draht wickeln, der es für unsere Zwecke auch tut.

Die Erscheinung, daß HF-Ströme bei höheren Frequenzen sich mehr und mehr an der Drahtoberfläche konzentrieren, wird Skineneffekt genannt. Sie hängt eng mit den elektromagnetischen Erscheinungen beim Stromfluß zusammen.

Für die einfache Schaltung nach Abb. 175 gibt es also eine leistungsmäßige Grenze. Die Schwingkreisverluste lassen sich nicht beliebig verringern, und wenn der Kopfhörer noch ausreichend NF-Spannung bekommen soll, darf auch ein gewisser Mindestwert der HF-Spannung an der Antenne nicht unterschritten werden. Den Ausweg bringt eine Schaltung, die wir bereits in Abb. 163 kennenlernten: die Rückkopplung.

Ein Vergleich der Abb. 176 mit Abb. 163 zeigt uns, daß wir es wieder mit einer Oszillatorschaltung zu tun haben. Wir wollen den Rückkopplungskondensator C_R jedoch jetzt nicht so weit vergrößern, bis die Schwingungen einsetzen, sondern ihn ein wenig kleiner halten, als dazu erforderlich wäre: Die in der Röhre verstärkte HF-Spannung wird dann zwar wieder in den Schwingkreis transformiert (von L_2 auf L_3), doch dieser rückgekoppelte Teil reicht nicht

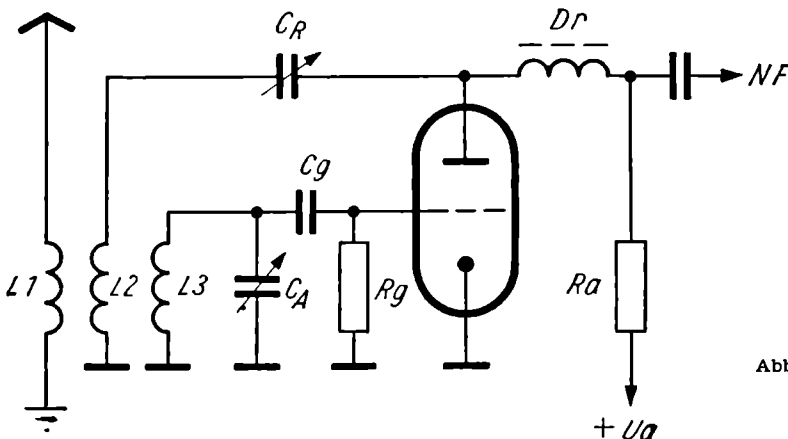


Abbildung 176

aus, die Schwingkreisverluste völlig auszugleichen und die Schwingungen aufrechtzuerhalten. Es entstehen keine selbständigen Schwingungen, aber immerhin wird ein Teil der Kreisverluste durch die rückgekoppelte Spannung ausgeglichen – die verbleibenden Kreisverluste sind also geringer, oder anders gesagt: Wir haben den Schwingkreis entdämpft! Wenn der Rückkopplungsdrehko vorsichtig weiter vergrößert wird, können die Schwingkreisverluste sogar fast vollständig ausgeglichen werden. Es wird dann gerade soviel Energie rückgekoppelt, wie dem Kreis durch die Kreisverluste und sonstigen Verluste der Schaltung entzogen werden. So erreicht der Kreis seine maximale Resonanzwirkung. Drehen wir allerdings den Rückkopplungskondensator C_R nur noch ein klein wenig weiter auf, dann gelangt mehr Energie auf den Schwingkreis zurück, als in ihm verlorengeht. Die Schwingungen klingen dann nicht mehr ab – die Schaltung ist zum HF-Generator geworden. Das hatten wir im Falle des Senders beabsichtigt, aber für Empfangszwecke ist das unerwünscht. Die Rückkopplungsschaltung soll ja nicht als Oszillator arbeiten, sondern lediglich die Kreisverluste möglichst weitgehend ausgleichen.

Die Spulen L 1, L 2 und L 3 sitzen auf dem gleichen Spulenkörper. L 1 transformiert die Antennenspannung in den Schwingkreis $L 3/C_A$; die Rückkopplungsspule L 2 transformiert die von der Röhrenanode abgenommene verstärkte HF-Spannung, deren Rückkopplungsanteil mit C_R eingestellt wird, in den Schwingkreis. Bei geschickter Einstellung von C_R (so, daß möglichst alle Kreisverluste ausgeglichen werden, aber die Schaltung noch nicht selbständig zu schwingen beginnt) wird die von L 1 eingekoppelte Antennenspannung kaum noch durch Verluste gemindert. Im Gegenteil, die Verstärkerwirkung der Röhre bewirkt eine ganz beträchtliche Erhöhung der Schwingkreisspannung gegenüber der einfachen Schaltung in Abb. 175. Sie reicht dann aus, um sogar geringste Antennenspannungen (sehr schwach ankommende Sender) noch ausnutzen zu können. Ausnutzen bedeutet demodulieren, denn wir wollen zu einer NF-Spannung kommen. Wo erfolgt hier die Demodulation?

Lesen wir noch einmal, was auf Seite 251 zum Entstehen der Gittervorspannung bei dieser Schaltung gesagt wurde. Gitter und Katode bilden eine Diodenstrecke! Tatsächlich wird die Schwingkreisspannung zwischen Gitter und Katode gleichgerichtet. Die am Gitter auftretende HF-Spannung bewirkt also nicht nur eine Steuerung des Anodenstromes – eine Verstärkungswirkung für die HF-Spannung –, sondern sie wird gleichzeitig gleichgerichtet und dadurch kommt am Gitter bzw. am Gitterwiderstand R_g eine negative Spannung zustande.

Hatten wir aber nicht durch richtige Einstellung von C_R dafür gesorgt, daß der Oszillator nicht schwingt? Darauf kommt es hier nicht an, denn jetzt wird ja die Antennenspannung gleichgerichtet. Sie ist zwar sehr gering, aber die Rückkopplung bewirkt, daß sich die Schwingkreisspannung zu beträchtlichen Werten (einigen zehntel Volt) aufschaukelt; außerdem können wir den Wert von R_g jetzt sehr hoch wählen (1 ... 2 M Ω), höher als in der Schaltung nach Abb. 163. Nun reicht bereits die Antennenspannung aus, um am Gitter eine ausreichende negative Vorspannung entstehen zu lassen. Da diese Vorspannung aus der Antennenspannung gewonnen wird, ändert sich ihre Höhe im Takt der HF-Amplitude. Die Gleichrichtung zwischen Gitter und Katode entspricht deshalb derjenigen, die wir in Abb. 171 und 172 vorgenommen haben – die HF-Spannung wird demoduliert, und die Schwankungen der Gittervorspannung an R_g sind nichts anderes als die NF-Spannung!

Die Röhre bewirkt also die HF-Verstärkung zum Zwecke der Rückkopplung und dient außerdem der Demodulation. Sie erfüllt sogar noch eine dritte Aufgabe: Sie verstärkt die NF! Die NF-Spannung tritt ja am Widerstand R_g , also zwischen Gitter und Katode auf – ebenso wie die HF-Spannung. Demzufolge wird auch die NF-Spannung gleichzeitig verstärkt und ist an der Röhrenanode weit stärker vorhanden!

Wir sehen, daß diese Schaltung gleich mehrere Aufgaben erfüllt. Sie entdämpft den Schwingkreis und sorgt dafür, daß wir auch bei sehr schwachen Sendern noch ausreichende Resonanzspannung und gute Trennschärfe erhalten. Sie demoduliert die HF-Spannung und verstärkt die NF-Spannung ebenfalls noch einmal. An der Anode kann die NF-Spannung dann mehr als den tausendfachen Wert der Antennenspannung haben, während die NF-Spannung in den bisherigen Schaltungen (Abb. 174 und 175) bestenfalls so groß wie die Antennenspannung oder nur geringfügig höher sein kann (durch die Transformationswirkung der Antennen- zur Schwingkreisspule).

Ein wesentlicher Unterschied zu den vorangegangenen Schaltungen besteht darin, daß die Energie für den Kopfhörer jetzt nicht mehr unmittelbar von der Antenne geliefert werden muß, sondern diese nur noch die Röhre steuert. Die NF-Leistung wird jetzt von der Röhre aufgebracht. Allerdings haben wir an deren Anode zwei Frequenzen, nämlich die HF und die NF. Abb. 176 zeigte bereits, wie sie getrennt werden: Die HF-Spannung wird durch die HF-Drossel D_r daran gehindert, „falsche Wege“ zu gehen. Für die NF-Spannung bildet die Drossel keinen nennenswerten Scheinwiderstand.

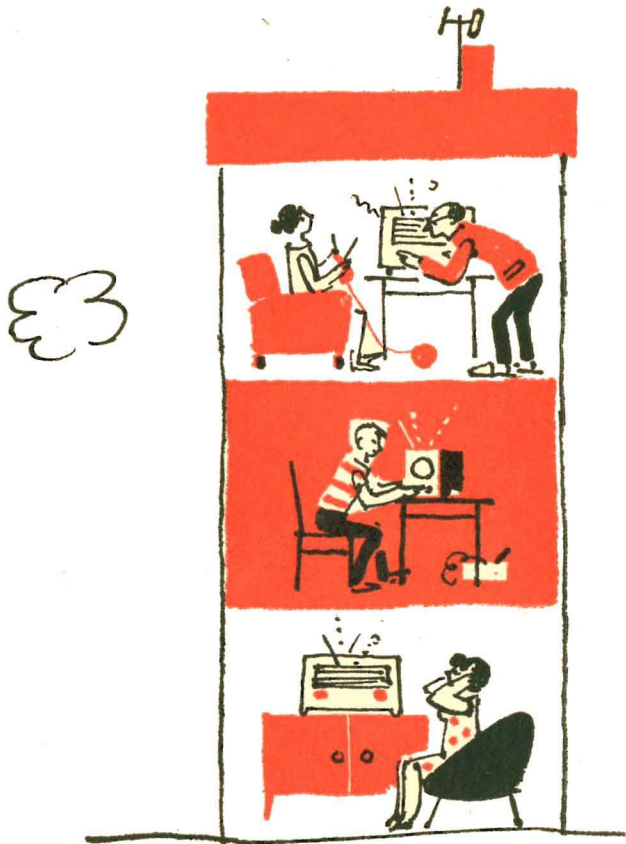
Damit auch bei NF eine Verstärkung zustande kommt, ist der

Anodenwiderstand R_a vorhanden, dessen Wirkung uns bekannt ist. An ihm können wir die NF über einen Kondensator auskoppeln. Die HF kann deshalb nur in den Rückkopplungszweig fließen. Der NF ist dieser Weg versperrt, weil C_R zu klein ist, um niedrige Frequenzen noch merklich durchzulassen; für NF ist sein Scheinwiderstand zu hoch. Tatsächlich gelangt also jede Frequenz dorthin, wo sie gebraucht wird.

Eine solche Schaltung wird als Audionschaltung bezeichnet. Sie ist für einfache Empfänger ganz vorzüglich geeignet und wurde daher in früheren Jahren in vielen billigen Geräten benutzt. Leider hat sie zwei Nachteile, und deshalb wird industriell von ihr kein Gebrauch mehr gemacht: Erstens ist sie für den Laien in der Bedienung zu kompliziert. Beim Einstellen ist es ja nicht damit getan, am Abstimmknopf C_A zu drehen, sondern gleichzeitig muß ein zweiter Knopf für C_R bedient werden. Wird C_R auf zu geringen Wert eingestellt, so wird der Schwingkreis nicht ausreichend entdämpft, und die NF-Spannung (damit die Lautstärke) geht sehr zurück. Wird aber C_R auf zu großen Wert gestellt, so beginnt die Schaltung als Oszillator zu arbeiten! Ein Empfang ist dann kaum noch möglich. Aber was schlimmer ist: Die im Oszillator erzeugte HF-Spannung wird von L2 und L3 auf L1 transformiert, gelangt damit an die Antenne und wird abgestrahlt! Aus dem Audion wird ein Sender, der den Empfang in der ganzen Nachbarschaft stören kann, und das ist, wie wir wissen, streng verboten!

Bei der Bedienung des Audions kommt es also darauf an, C_R mit Geschick immer auf den kritischen Punkt einzustellen, in dem das Audion die höchste Empfindlichkeit hat, aber noch nicht selbständig schwingt. Kann man C_R nicht auf diesen Punkt fest einstellen? Das geht leider nicht, weil die Einstellung bei jeder Frequenz ein klein wenig anders sein muß. Auf dieses „klein wenig“ kommt es jedoch gerade an: Bei höherer Frequenz hat C_R geringeren Scheinwiderstand, und deshalb wird die Rückkopplung stärker! Zweitens ist die Röhrenverstärkung nie über längere Zeit genau gleich. Wenn U_a etwas schwankt, ändert sich auch die Verstärkung der Röhre. Das gleiche geschieht, wenn sich die Katodentemperatur etwas ändert, weil die Heizspannung etwas schwankt. Beide Spannungen entnehmen wir aber fast immer dem Lichtnetz, und dort kommen manchmal recht große Abweichungen von den vorgeschriebenen 220 V vor. Auch deshalb ist es nicht möglich, C_R fest einzustellen.

Für unsere Bastelzwecke ist die Audionschaltung wegen ihrer Einfachheit und guten Leistung jedoch geradezu ideal. Uns stört die Rückkopplungseinstellung nicht – wir wissen ja, worauf es dabei ankommt. Wenn wir mit einem Audion experimentieren, wollen wir



aber immer an die Nachbarn und die Vorschriften denken! Die Rückkopplung darf niemals so stark gemacht werden, daß das Audion „pfeift“ – denn das ist ein Zeichen dafür, daß es selbständig schwingt.

Ein Audion läßt sich anstatt mit einer Röhre natürlich ebensogut mit einem Transistor aufbauen. Transistoren haben ja ebenfalls Verstärkerwirkung und können deshalb hier die Röhrenfunktion übernehmen. Auch die Demodulation kann erfolgen, da im Transistor die Basis-Emitter-Strecke und die Basis-Kollektor-Strecke nichts anderes als Dioden sind. Ein Transistor-Audion sieht deshalb ähnlich aus wie ein Röhren-Audion. Ein Schaltbeispiel dafür gibt die Abb. 177, deren Ähnlichkeit mit Abb. 176 unverkennbar ist.

Die Bedeutung der Widerstände R_b und R_c ist uns von der Grundschaltung der Transistor-Verstärkerstufe her bekannt (Abb. 145). R_b hat hier außerdem eine ähnliche Funktion wie R_g in Abb. 176. Dieser Widerstand muß aber (um dem Transistor einen ausreichend kräftigen Basisstrom zu geben) kleinere Werte haben als R_g in Abb. 176. Damit er den Schwingkreis nicht unnötig bedämpft, ist die Schwingkreisspule L_3 wieder angezapft (siehe Abb. 175). Die HF-

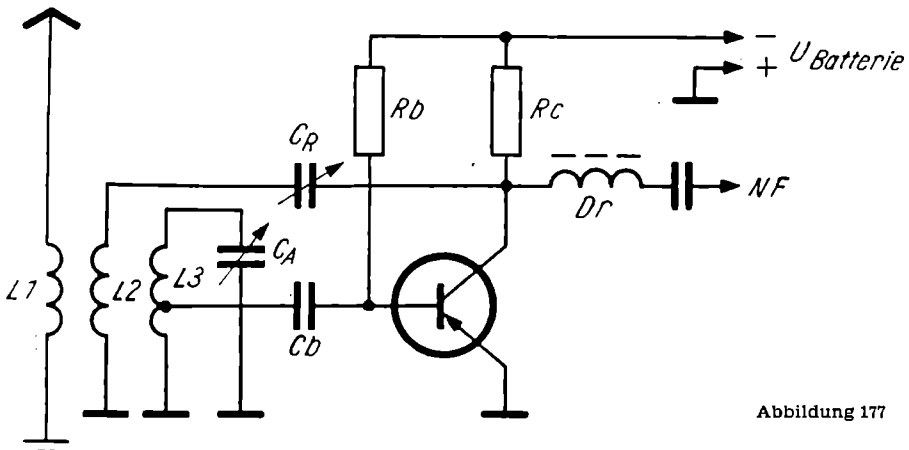


Abbildung 177

Drossel D_r ist etwas anders geschaltet als in Abb. 176: R_c wirkt jetzt als Kollektorwiderstand zugleich für HF und NF; die Drossel verhindert nur noch das Abfließen der HF über die NF-Leitung. Ebenso könnte man in Abb. 176 verfahren, umgekehrt wäre die Anschaltung der Drossel in Abb. 176 auch bei Abb. 177 möglich (die Drossel läge dann in Serie mit R_c , zwischen ihr und R_c wäre nur der NF- Auskoppel-Kondensator anzuschließen).

Für Röhren-Audions und erst recht für Transistor-Audions gibt es zahlreiche Abwandlungen der Audionschaltung. Oft haben sie auf den ersten Blick keine Ähnlichkeit mit den beiden hier gezeigten Schaltungen. Jede Schaltung hat Vor- und Nachteile, die wir hier natürlich nicht alle besprechen können. Wir werden aber jede andere Schaltung verstehen, wenn wir wissen, wie ein Audion grundsätzlich arbeitet.

Mehrkreisempfänger

Unser Audion hat durch den Schwingkreis bereits recht gute Trennschärfe erhalten. Sie reicht aber noch nicht aus, weil viele Sender auf einander dicht benachbarten Frequenzen arbeiten.

Um die Trennschärfe weiter zu verbessern, kann man mehrere Schwingkreise verwenden. Je mehr es sind, um so besser ist die Trennschärfe.

Bisher hatten wir stets nur einen Schwingkreis in unserer Schaltung angewendet — es waren Einkreis-schaltungen, oder wie man dafür kurz sagt: Einkreiser.

Mehrkreisempfänger waren in früheren Jahren üblich und sind, seitdem die Technik der Superhetempfänger ausgereift ist, technisch veraltet. Wir wollen ihren Aufbau nur kurz in Abb. 178 studieren.

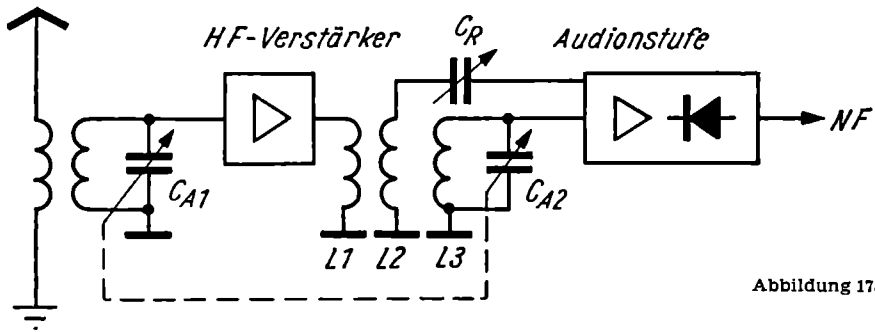


Abbildung 178

Von der Antenne gelangt die HF auf den ersten Schwingkreis mit C_{A1} , aber diesem ist nicht wie bisher der Demodulator nachgesetzt, sondern ein einfacher HF-Verstärker mit einer Verstärkerstufe. Geschaltet ist er so ähnlich wie die HF-Verstärkerstufe in Abb. 164. Die verstärkte HF-Spannung gibt er an das eigentliche Audion bzw. an dessen frühere Antennenspule L_1 ab. Es handelt sich also um den Spulensatz der Abb. 176.

Das Audion enthält den zweiten Schwingkreis mit C_{A2} , die rechte Hälfte der Schaltung aus Abb. 176 müssen wir uns in dem mit Audionstufe bezeichneten Kästchen denken. Da diese Stufe sowohl verstärkt als auch demoduliert, ist außer dem Verstärkerzeichen (Dreieck) auch das für die Demodulation typische Organ, die Diodenstrecke, angedeutet. Das ist der Aufbau eines Zweikreisers.

Würde man vor dem HF-Verstärker nochmals eine HF-Vorstufe vorsehen, käme man zum Dreikreiser. Praktisch ist ein solches Gerät jedoch schwierig aufzubauen.

Erstens würde die Gefahr der Selbsterregung bestehen — das ist eine unbeabsichtigte Rückkopplung. Denken wir daran, daß im zweiten Kreis (Ausgang des HF-Verstärkers) die gleiche Frequenz wie im ersten Eingang des HF-Verstärkers, jedoch mit beträchtlich höherer Spannung, vorhanden ist. Stehen die Spulen des zweiten Kreises denen des ersten zu nahe, so koppeln sie magnetisch aufeinander — es entsteht eine Rückkopplung vom Ausgang des HF-Verstärkers zurück zum Eingang! Die HF-Stufe beginnt dann wie ein Oszillator zu schwingen und kann natürlich nicht mehr verstärken. Die Rückkopplung kann aber auch kapazitiv entstehen, wenn die Ausgangsleitungen des HF-Verstärkers oder des Audions der Eingangs- und Antennenleitung zu nahe kommen. Benachbarte Leitungen wirken zueinander wie ein Kondensator! Bei den hohen Frequenzen genügen dann schon sehr kleine Kapazitäten (kurze Lei-

tungen in größerem Abstand!), um von der HF-Ausgangsspannung des HF-Verstärkers oder Audions so viel zum Eingang zurückkommen zu lassen, daß die Rückkopplungsbedingung erfüllt ist. Dieses Problem muß umständlich durch Abschirmung gelöst werden – zwischen den einzelnen Stufen werden Metallwände gezogen, und die Leitungen werden mit einem Metallgespinst umgeben, das an Masse gelegt wird (diese Leitungen nennt man abgeschirmte Leitungen). Bedeutsamer noch ist ein zweites Problem. Beide Schwingkreise müssen immer auf die genau gleiche Resonanzfrequenz eingestellt, also bei allen Frequenzen im „Gleichlauf“ sein. Nun kann man zu diesem Zweck C_{A1} und C_{A2} auf eine gemeinsame Drehachse montieren und mit einem Knopf bedienen. Beide bilden dann einen Doppeldrehko (dieser Zusammenhang wird im Schaltbild stets durch eine punktierte Linie angegeben, wie wir in Abb. 178 sehen). Doch mehrere Kondensatoren so gleichartig zu bauen, daß sie in allen Stellungen wirklich gleiche Kapazität haben, ist sehr schwierig. Mit zwei Kondensatoren gelingt es gerade noch einigermaßen ausreichend; bei einem Dreikreiser oder auch noch mehr Schwingkreisen würden wir jedoch einen Dreifachdrehko bzw. sogar Drehkos mit noch mehr Einzelkondensatoren brauchen. Da sie kaum untereinander gleichmäßig wären, ist das Gleichlaufproblem bei drei Kreisen nur sehr, sehr schwer, bei mehr als drei Kreisen kaum noch befriedigend lösbar.

Den Ausweg bietet das Superhetprinzip, mit dem wesentlich höhere Kreiszahlen erreichbar sind. Die Mehrkreiser haben deshalb mit Ausnahme des Superhetempfängers ihre Bedeutung heute vollständig verloren. Lediglich in Sonderfällen werden sie von erfahrenen Funkamateuren gelegentlich noch gebaut.

Der Superhetempfänger

Der Aufbau eines Empfängers mit mehreren abstimmbaren Kreisen scheidet am schwer erreichbaren Gleichlauf der Kreise. Es ist aber leicht möglich, beliebig viele Kreise auf eine gleiche Frequenz abzustimmen, wenn diese Frequenz konstant bleibt. Die Kreise können dann fest eingestellt werden, so daß das Gleichlaufproblem entfällt. Da wir jedoch mehrere Frequenzen empfangen wollen, nützt uns das wenig.

Es gibt aber eine Möglichkeit, die von der Antenne aufgenommene Frequenz in eine andere Frequenz umzuwandeln. Dabei kann erreicht werden, daß diese neue Frequenz immer die gleiche ist. Für sie können festabgestimmte Kreise benutzt werden, die nicht mehr

verstellt werden müssen. Diesen Vorgang der Frequenzumwandlung nennt man Überlagerung.

Da die einzelnen Vorgänge bei der Überlagerung verhältnismäßig kompliziert sind, müssen wir uns in diesem Buch — das ja nur Grundlagen nahebringen soll — damit begnügen, nur das Prinzip kennenzulernen.

Die Überlagerung

Wir wollen feststellen, was geschieht, wenn einer Röhre gleichzeitig zwei verschiedene Frequenzen zugeführt werden. Zu diesem Zweck verwenden wir eine spezielle Röhre mit zwei Steuergittern (Abb. 179). Beide Gitter haben die gleiche Wirkung. Dem einen wird die Frequenz f_1 , dem anderen die zweite Frequenz f_2 zugeführt. Beide Wechselspannungen steuern nun den gleichen Anodenstrom. In der Röhre werden sie gemischt.

Die Einzelheiten dieses Mischvorganges sind sehr kompliziert, der Techniker unterscheidet auch zwischen mehreren Mischungsarten. Wir wollen uns ohne besondere Erklärung nur merken, daß an der Anode dieser Mischröhre jetzt mehrere Frequenzen vorhanden sind.

Es tritt dort die Frequenz f_1 auf, ferner die Frequenz f_2 ; für beide Frequenzen wirkt die Röhre ganz normal als Verstärkerröhre. Außerdem treten dort aber noch zwei weitere, neue Frequenzen auf! Es ist einmal die Differenz beider Frequenzen ($f_1 - f_2$), zum anderen die Summe beider ($f_1 + f_2$). Ferner treten mit geringerer Spannung noch zahlreiche weitere neue Frequenzen auf, die sich ebenfalls rechnerisch ableiten lassen und uns hier nicht weiter kümmern sollen.

Alle diese neuen Frequenzen werden Mischprodukte genannt. Für uns sind dabei nur die Summen- und die Differenzfrequenz von Interesse.

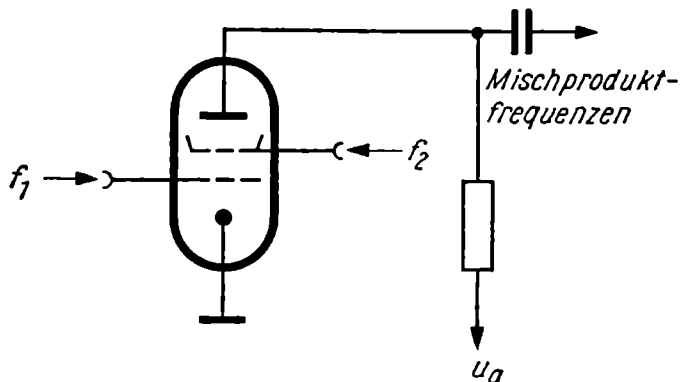


Abbildung 179

Zunächst soll uns ein Zahlenbeispiel diesen Zusammenhang verständlich machen.

Nehmen wir an, f_1 soll 500 kHz betragen und f_2 200 kHz. Dann treten an der Anode außer diesen beiden Frequenzen noch die neuen Frequenzen 300 kHz ($f_1 - f_2$) und 700 kHz ($f_1 + f_2$) auf! Ändern wir eine Frequenz ab: $f_1 = 450$ kHz, $f_2 = 200$ kHz. Die neuen Frequenzen lauten nun 250 kHz und 650 kHz. Die Verringerung um 50 kHz bei f_1 finden wir also in den beiden Mischfrequenzen wieder im gleichen Betrag vor. Ändern wir nun gegenüber dem ersten Beispiel beide Frequenzen um den gleichen Betrag: $f_1 = 450$ kHz, $f_2 = 150$ kHz. Ergebnis für die Mischfrequenzen: 300 kHz ($f_1 - f_2$) und 600 kHz ($f_1 + f_2$). Die Differenzfrequenz ist also die gleiche wie im ersten Beispiel. Daraus ergibt sich eine interessante Möglichkeit: Wenn wir f_2 im gleichen Maße ändern wie f_1 , bleibt die Differenzfrequenz $f_1 - f_2$ konstant! Und das brauchen wir für den Mehrkreisempfänger – eine konstante Frequenz!

Unser Empfänger könnte dann so aussehen, wie Abb. 180 zeigt. Die Frequenz f_1 wird von der Antenne geliefert – es ist die Frequenz des zu empfangenden Senders. Die zweite Frequenz f_2 wird von einem Oszillator geliefert. Wir haben im Empfänger jetzt gewissermaßen ein Miniatursenderchen, mit dem wir diese zweite Frequenz erzeugen. Wie der Oszillator geschaltet ist, wissen wir von Abb. 163 und 164 her.

In der Anodenleitung liegt ein Schwingkreis 1, der fest auf eine Frequenz abgestimmt ist (beispielsweise auf 300 kHz). Aus den zahlreichen in der Anodenleitung vorhandenen Mischproduktion filtert dieser Kreis nur seine Resonanzfrequenz heraus und gibt sie an Schwingkreis 2 weiter (beide Spulen sind induktiv gekoppelt!). Schwingkreis 2 soll ebenfalls auf 300 kHz abgestimmt sein.

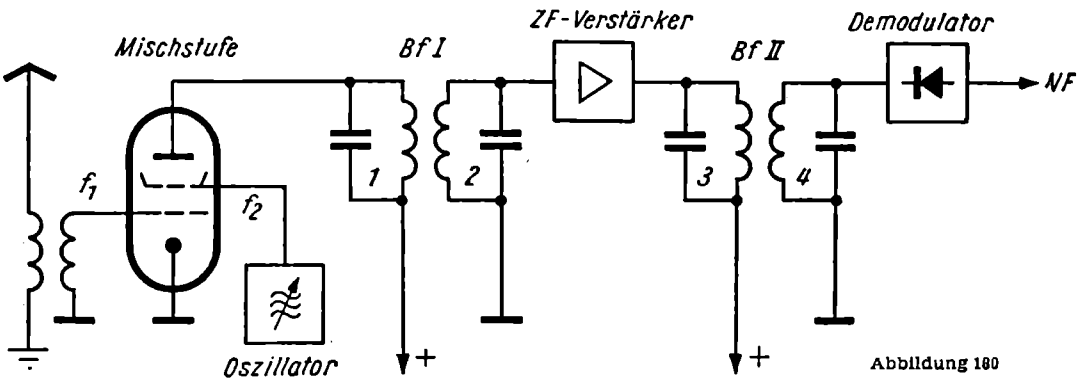


Abbildung 180

Der Oszillator braucht nun immer nur so eingestellt werden, daß seine Frequenz von der des zu empfangenden Senders genau 300 kHz abweicht, dann wird die Senderfrequenz nach ihrer Mischung mit der Oszillatorfrequenz in der Mischstufe genau die Differenzfrequenz von 300 kHz ergeben. Wenn andere Senderfrequenzen gleichzeitig auftreten, geben diese mit der Oszillatorfrequenz auch eine andere Differenzfrequenz – und für diese sind Schwingkreis 1 und 2 nicht in Resonanz! Soll ein anderer Sender eingestellt werden, so brauchen wir eigentlich nur die Oszillatorfrequenz zu ändern. Erhöhen wir sie beispielsweise um 100 kHz, so muß auch die Senderfrequenz um 100 kHz höher sein, um wieder die gleiche Differenzfrequenz von 300 kHz zu ergeben, auf die die Schwingkreise 1 und 2 abgestimmt sind.

Die so gewonnene, immer gleichbleibende Frequenz nennt man Zwischenfrequenz – sie ist gewissermaßen ein Zwischenglied zwischen der Empfangsfrequenz und der Niederfrequenz.

Die Zwischenfrequenz wird mit den Buchstaben ZF abgekürzt; sie ist aber ebenfalls noch eine Hochfrequenz. Aus dem Mischvorgang ergibt sich, daß diese ZF ebenso moduliert ist wie die Empfangsfrequenz. Wenn wir also die ZF demodulieren, erhalten wir die NF wie beim Audion und den vorangegangenen Empfangsschaltungen.

Für die konstante ZF kann man mehrere Schwingkreise hintereinanderschalten, die auf eine einzige Frequenz fest eingestellt werden – damit ist das Gleichlaufproblem zunächst gelöst.

Abb. 180 zeigt uns, daß man die Zwischenfrequenz nach dem zweiten Kreis noch mit einem HF-Verstärker verstärkt. Es folgen dann zwei weitere, auf die ZF abgestimmte Kreise. Die ZF wird also, bevor sie demoduliert wird, vierfach gesiebt, und das ergibt eine gute Trennschärfe.

Die Kombination zweier Schwingkreise nennt man hier Bandfilter, in Abb. 180 sind die Kreise 1 und 2 zum Bandfilter Bf I, die Kreise 3 und 4 zum Bandfilter Bf II zusammengefaßt.

Der Vorgang der Mischung zweier Frequenzen wird auch als Überlagerung bezeichnet; deshalb heißt dieser Empfängertyp Überlagerungsempfänger. Für diese deutsche Bezeichnung hat sich leider das gewaltiger klingende, aber unschöne Fremdwort Superheterodynempfänger eingebürgert. Es wurde im Laufe der Zeit zu Superheterodynempfänger abgekürzt, und heute sagen wir nur noch Super dazu, ohne daran zu denken, daß „Super“ wörtlich übersetzt nur „über ...“ bedeutet.

Die Mischröhre hat so, wie sie in Abb. 179 und 180 eingezeichnet ist, einen Mangel: Die Steuergitter stehen in der Röhre dicht beisam-

men; sie haben also wieder eine Kapazität gegeneinander. Über diese Kapazität kann die Oszillatorfrequenz auf den Eingang und zur Antenne kommen und abgestrahlt werden – das ist jedoch verboten, denn die unbemerkt abgestrahlte Oszillatorfrequenz könnte leicht mit der Frequenz eines anderen Senders zusammenfallen, den vielleicht der Nachbar gerade hört. Wenn sie sich von dieser Senderfrequenz nur ganz wenig (vielleicht um einige hundert oder tausend Hz) unterscheidet, gelangt sie mit der Senderfrequenz zusammen in die Mischstufe des nachbarlichen Empfängers, wo beide Frequenzen – der Sender, den der Nachbar hört, und unsere fast gleiche Oszillatorfrequenz – miteinander gemischt werden! Die so entstehende Differenzfrequenz hat nur einige hundert oder tausend Hz, gehört damit zum Hörbereich und wird – das ist das Schlimme dabei – der ZF aufmoduliert! Mit dieser zusammen durchläuft sie alle ZF-Kreise. Nach der Demodulation ist dann in der NF ein übler Pfeifton in der Höhe der Frequenzdifferenz zwischen dem eingestellten und dem störenden Sender zu hören.

Der störende Sender kann ein zweiter, auf dicht benachbarter Frequenz arbeitender Rundfunksender sein (das ist der Grund, weshalb heute viele Mittelwellensender „verpiffen“ sind – dieser Bereich ist mit Sendern längst überfüllt); der „Störsender“ kann aber auch unser Oszillator sein – und das muß vermieden werden.

Ein Super muß also so gebaut sein, daß die Oszillatorfrequenz auf keinen Fall zur Antenne gelangen kann. Das wird erreicht, indem in der Mischröhre zwischen den Steuergittern ein Schirmgitter angeordnet wird.

Der Aufbau nach Abb. 180 hat noch einen zweiten Mangel. Weil die ZF als Differenz zwischen Empfangsfrequenz und Oszillatorfrequenz entsteht, gibt es nämlich zu jeder Empfangsfrequenz grundsätzlich zwei Oszillatorfrequenzen, mit denen die ZF gebildet werden kann. Beträgt die ZF beispielsweise 300 kHz und die Empfangsfrequenz 700 kHz, dann kann die Oszillatorfrequenz entweder geringer sein als die Empfangsfrequenz und würde dann 400 kHz betragen ($700 - 400 = 300$ kHz), oder sie liegt über der Empfangsfrequenz und beträgt dann 1000 kHz ($1000 - 700$ ergibt wiederum die ZF mit 300 kHz). Von diesen beiden Möglichkeiten wird heute fast ausschließlich die benutzt, bei der die Oszillatorfrequenz höher ist als die Empfangsfrequenz.

Aus dem gleichen Zusammenhang geht hervor, daß es zu einer Oszillatorfrequenz auch zwei Empfangsfrequenzen gibt, die die ZF ergeben! Wollen wir beispielsweise einen Sender auf 600 kHz empfangen und die ZF beträgt 300 kHz, muß die Oszillatorfrequenz daher 900 kHz betragen ($900 - 600 = 300$ kHz). Arbeitet jedoch auch

ein zweiter Sender auf der Frequenz 1200 kHz, so wird er ebenfalls hörbar, weil die Oszillatorfrequenz für ihn gerade um den Betrag der ZF tiefer liegt: $1200 - 900 = 300$ kHz! Beide Sender geben die gleiche ZF und sind nicht mehr zu trennen!

Da die zweite unerwünschte Frequenz in bezug auf die Oszillatorfrequenz gewissermaßen „spiegelbildlich“ zur Empfangsfrequenz liegt, wird sie Spiegelfrequenz genannt. Die Spiegelfrequenz des Senders, den wir hören wollen, liegt deshalb stets um den doppelten Betrag der ZF höher als die Empfangsfrequenz, auf der wir unseren Sender empfangen. Sie ist weit genug von der Empfangsfrequenz entfernt, die nun mit einem einzigen Kreis vor der Mischstufe ausgefiltert werden kann.

Zwischen Mischstufe und Antenne ist deshalb ein Vorkreis erforderlich, den wir zugleich mit dem Oszillator auf die Frequenz, die wir hören wollen, abstimmen müssen. Die Spiegelfrequenz wird dann ausreichend unterdrückt; in den Kurzwellenbereichen ist sie aber oft noch merklich vorhanden.

Wir verbessern nun das Prinzipschaltbild, wie es einem betriebsfähigen Super wirklich entspricht. Abb. 181 zeigt die endgültige Zusammensetzung des Supers mit allen seinen Baugruppen.

Die Empfangsfrequenz wird als f_e , die Oszillator-Frequenz als f_o bezeichnet. Unsere Gleichung zur Bildung der ZF lautet nun: $f_o - f_e = ZF$. (Für die Spiegelfrequenz f_s würde sie lauten: $f_s - f_o = ZF$, und aus beiden Gleichungen ergibt sich: $f_s = 2 \cdot ZF + f_e$, d. h. die Spiegelfrequenz liegt tatsächlich um den doppelten Betrag der ZF über f_e .)

Bei modernen Supern liegt die ZF meist nicht bei 300 kHz (diesen Wert haben wir nur zum bequemeren Rechnen angenommen), son-

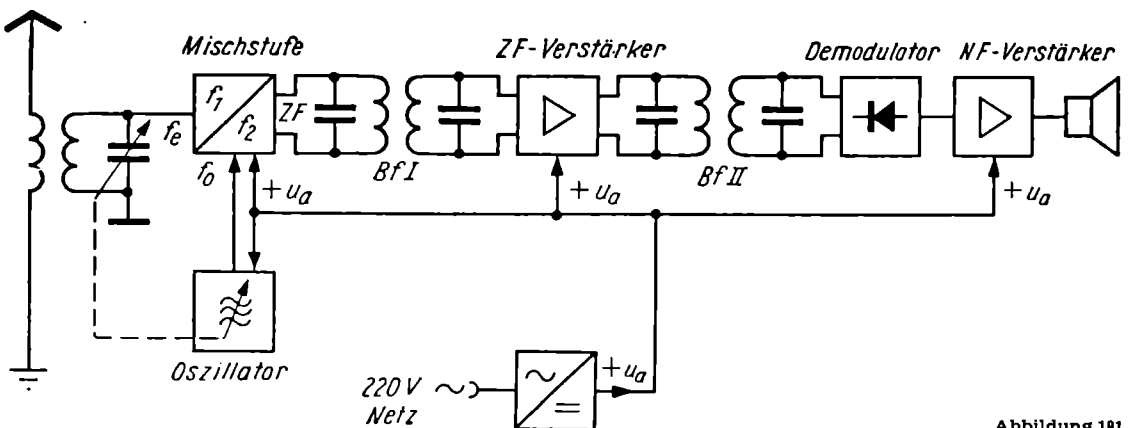


Abbildung 181

dern meist zwischen 450 bis 480 kHz. Üblich sind besonders die Werte 465 kHz, 468 kHz und 473 kHz. Warum man gerade diese Frequenzen für die ZF gewählt hat, soll uns hier nicht weiter beschäftigen.

In Abb. 181 sehen wir nun den Eingangsschwingkreis oder, wie wir ihn bisher genannt haben, den Vorkreis. Er muß stets auf den Wert von f_e abgestimmt werden.

Im Oszillator wird f_o erzeugt, demzufolge sitzt auch in ihm ein Schwingkreis mit Drehko.

Wir müssen nun doch wieder zwei Drehkos in Gleichlauf bringen; doch zwei Kreise lassen sich immerhin noch einigermaßen genau gleich machen. (Da beide Drehkokapazitäten gleich groß sind – meist je 500 pF –, läßt sich das verhältnismäßig einfach bewerkstelligen. Die Schwingkreisspule im Oszillator hat dann etwas geringere Induktivität als die Vorkreisspule, da die Oszillatorfrequenz ja um den Betrag der ZF höher sein muß als die Frequenz des Vorkreises!)

Vorkreisdrehko und Oszillatordrehko sitzen auf einer Achse und bilden einen Doppeldrehko oder Zweifachdrehko.

Die Mischstufe gibt die ZF ab, die in den Bandfiltern Bf I und – nach einer ZF-Verstärkung – Bf II gesiebt wird. Mit den Bandfiltern wird die bestmögliche Trennschärfe erreicht; sie sind alle auf die ZF des Gerätes abgestimmt.

Vom ZF-Verstärker hängt die Empfindlichkeit des Gerätes in hohem Maße ab. Spitzenempfänger, die auch sehr schwache Stationen bringen, haben deshalb oft hinter dem Bf II einen zweiten ZF-Verstärker und danach ein drittes Bandfilter. Der Empfänger in Abb. 181 hat 2 Bandfilter; das sind vier Schwingkreise. Hinzu kommt der Vorkreis, und auch der Oszillatorschwingkreis wird (obwohl er mit der Trennschärfe nichts zu tun hat) mitgezählt: Unser Empfänger ist ein 6-Kreis-Super. Hochwertige Empfänger haben mitunter 13 und noch mehr Kreise und entsprechend mehr Bandfilter und ZF-Stufen.

Hinter dem letzten Bandfilter folgt (Abb. 181) der Demodulator. Dafür reicht schon eine einfache Diode aus – wir haben ja hier bereits mehr als genug HF-Spannung und können daher auf solche raffinierten Dinge wie die Audionschaltung verzichten.

Vom Demodulator wird die NF an den NF-Verstärker abgegeben – auch sein Aufbau ist uns kein Geheimnis mehr (Abb. 128).

Alle Röhrenstufen werden vom Netzteil mit den nötigen Spannungen versorgt, also mit der Anodenspannung ($+U_a$) und der – hier nicht eingezeichneten – Röhrenheizspannung.

Das ist der grundsätzliche Aufbau eines Supers. Damit wir uns später in dem kompliziert scheinenden Gesamtschaltbild eines Supers

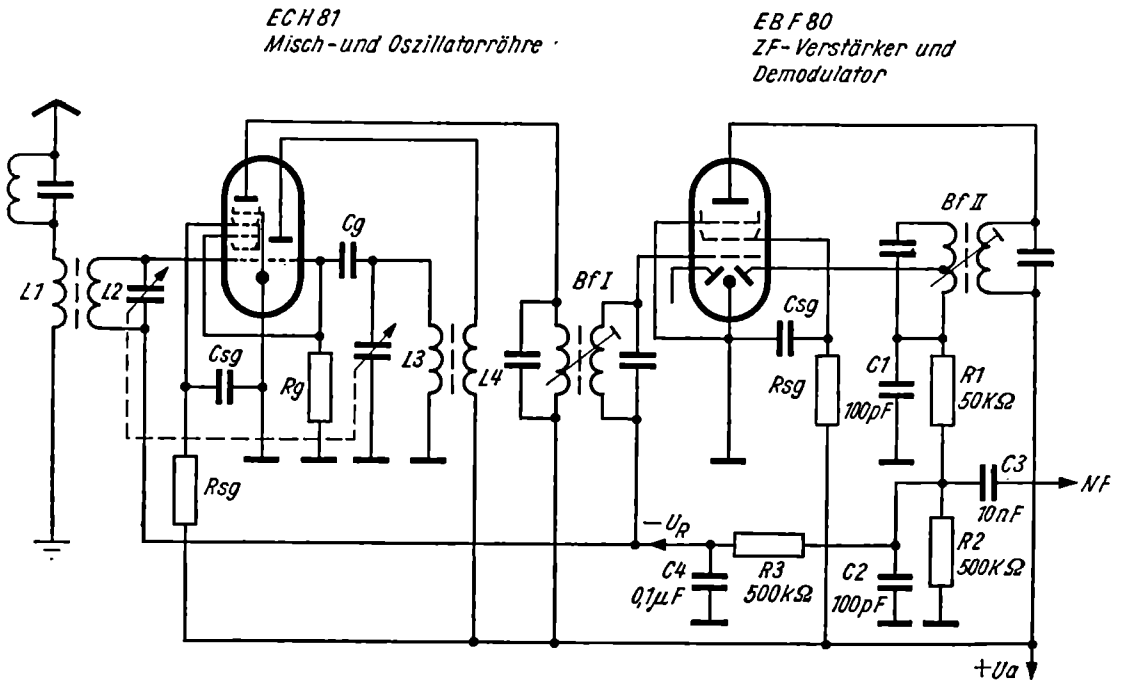


Abbildung 182

zurechtfinden, wollen wir noch die Schaltungen einiger Baugruppen näher betrachten. Wir beginnen mit dem HF- und ZF-Teil eines einfachen 6-Kreis-Supers, zu dem also die Baugruppen Oszillator, Mischstufe und ZF-Verstärker mit Bf I und Bf II sowie der Demodulator aus Abb. 181 gehören. Netzteil und NF-Verstärker lassen wir zunächst noch weg. Der HF- und ZF-Teil sehen etwa so aus, wie es Abb. 182 zeigt.

L1 ist die Antennenspule, über der wir in der Antennenzuleitung noch einen Schwingkreis sehen, der auf die ZF fest abgestimmt ist. Er soll das Abwandern der ZF über die Antenne zusätzlich verhindern (sonst würden alle Empfänger der Umgebung, die die gleiche ZF benutzen, gestört) sowie das Eindringen fremder Sender, die zufällig auf dieser ZF arbeiten.

L2 ist die Vorkreissspule, die mit dem ihr parallelliegenden Drehko auf den jeweils empfangenen Sender abgestimmt wird. Der Oszillatordrehko ist mit diesem Drehko mechanisch verbunden; L3 ist die Oszillatordrehko.

Mit der Achse dieses Doppeldrehkos ist dann der Skalenzeiger gekoppelt.

Man versucht mit möglichst wenig Röhren auszukommen und

benutzt deshalb weitgehend Doppelröhren. Eine solche Doppelröhre ist die ECH 81; sie besteht aus einer Mischhexode und einer Triode.

Die Triode bildet die Oszillatorröhre; L 4 in ihrer Anodenleitung ist die Rückkopplungsspule des Oszillators (vergleiche Abb. 163). Auf den Rückkopplungskondensator C_R wird verzichtet; man legt die Rückkopplungsspule direkt in die Anodenleitung und bemißt ihre Windungszahl so, daß sich gerade die richtige Stärke der Rückkopplung ergibt. Die Funktion von C_g und R_g im Oszillator ist uns bekannt.

Das linke Röhrensystem der ECH 81, die Hexode, bildet die Mischröhre. Am unteren Steuergitter (Gitter 1 – wir denken daran, daß die Gitter von Katode zu Anode fortlaufend gezählt werden) wird die Antennenspannung (Empfangsspannung bzw. Empfangsfrequenz f_e) zugeführt. Das obere Steuergitter (Gitter 3) ist mit dem Gitter der Oszillatortriode verbunden und erhält die Oszillatorfrequenz f_o . Dazwischen sitzt ein Schirmgitter (Gitter 2) und zwischen Gitter 3 und dem Bremsgitter (Gitter 5) nochmals ein Schirmgitter (Gitter 4). Das Bremsgitter ist innerhalb der Röhre mit der Katode verbunden.

Die Schirmgitter erhalten ihre Spannung über den Schirmgitterwiderstand R_{sg} ; für HF liegen die Schirmgitter über C_{sg} an Masse (vergleiche mit Abb. 129).

In der Anodenleitung der Hexode liegt der erste ZF-Schwingkreis; er ist mit dem zweiten Kreis induktiv gekoppelt und zum Bandfilter Bf I vereinigt.

Um diese Filter genau auf die ZF abstimmen zu können, sind ihre Spulenkerne verstellbar angeordnet. Die Filter werden also durch Änderung der Induktivität auf die ZF abgeglichen.

Der zweite Kreis des Bf I gibt die ZF an den ZF-Verstärker ab. Auch hier wird eine Mehrfachröhre benutzt, die aus einer Pentode und zwei Dioden besteht. Die Pentode dient der ZF-Verstärkung. Sie hat gegenüber den uns bisher bekannten HF-Verstärkern sowohl am Gitter als auch in der Anodenleitung Schwingkreise, kann also nur die eine Frequenz – die ZF – verstärken, auf die diese Kreise abgeglichen sind, und darauf kommt es ja an.

Nach der Pentode folgen die letzten zwei ZF-Kreise in Gestalt des Bandfilters Bf II, das eine Besonderheit aufweist: Die Spule des letzten Kreises ist für den Anschluß der Demodulatordiode angezapft, damit eine allzu starke Bedämpfung dieses Kreises durch den Demodulator vermieden wird (vergleiche Abb. 175).

Als Demodulator dient hier eine Diode der EBF 80.

Die zweite Diode ist in dieser Schaltung unbenutzt.

Wie arbeitet dieser Demodulator hier? Grundsätzlich nicht anders, als wir das schon kennen; die Schaltung sieht zunächst nur etwas ungewohnt aus.

C 1 schließt den Stromkreis für die ZF; er hat die gleiche Aufgabe wie der Kondensator parallel zum Kopfhörer in den Abb. 173 bis 175. Damit die ZF nicht unerwünschte Wege gehen kann, ist ein RC-Tiefpaß (R 1/C 2) vorgesehen (vergleiche Abb. 155).

C 2 ist so bemessen, daß er die ZF-Schwingung praktisch kurzschließt, die NF-Schwingung aber nicht wesentlich schwächt.

Betrachten wir den Gleichrichtungsvorgang: Wenn die Diodenanode positiv ist (positive Halbwelle der ZF-Schwingung), kommen Elektronen von der Katode zur Diodenanode und über die Bandfilterspule zu R 1. In der umgekehrten Halbwelle sperrt die Diode. Am oberen Ende von R 1 entsteht also ein Elektronenstau. Die gleichgerichtete ZF-Spannung (wir wollen sie nunmehr genauer als Diodenrichtspannung bezeichnen) tritt also mit Minus oben an R 1 auf, ihre Größe pendelt im Takt der NF. Das ist derselbe Vorgang, den wir bei Abb. 171 und 172 kennenlernten.

R 1 hat nur $\frac{1}{10}$ des Wertes von R 2. Zwischen R 1 und R 2 kommt es zu einer Spannungsteilung, und $\frac{9}{10}$ der gesamten Richtspannung treten deshalb am oberen Ende von R 2 auf – praktisch also fast die gesamte Richtspannung. Das ist erwünscht, denn R 1 hat ja nur den Zweck, zusammen mit C 2 den Tiefpaß zu bilden, damit die Richtspannung an R 2 frei von ZF-Resten ist und nur im Takt der NF pendelt. Über C 3 können wir nun die NF-Spannung abnehmen und dem NF-Verstärker zuführen.

Uns fällt sicher die merkwürdige Schaltung mit R 3 und C 4 auf, und außerdem auch, daß die unteren Enden der Vorkreisspule und der zum Gitter führenden Bandfilterspule in Bf I (das sind die kalten Enden dieser Spulen) nicht an Masse liegen, wie es eigentlich sein muß. Auch hat weder die Pentode noch die Hexode einen Katodenwiderstand. Brauchen diese Röhren hier keine Gittervorspannung? Doch, aber sie bekommen sie nicht über einen Katodenwiderstand! Wir lernen nun eine in jedem Super vorhandenen Zusatzschaltung kennen, die jedoch nicht unmittelbar zum Superaufbau gehört. Es handelt sich um den Schwundausgleich, auch Schwundregelung oder Fadingausgleich genannt.

Diese Begriffe kommen uns bekannt vor. Wenn wir uns Abb. 95 ansehen und noch einmal auf Seite 161 nachlesen, wissen wir wieder: Es handelt sich um eine Schaltung, die die Schwankungen der Empfangsfeldstärke automatisch ausgleicht. Diese automatische Verstärkungsregelung verringert die ZF-Verstärkung des Supers um so mehr, je stärker der Sender ankommt, und läßt die ZF-Verstärkung

um so größer werden, je schwächer der Sender wird. Wenn diese Regelung nur wirksam genug arbeitet, lassen sich die Empfangsschwankungen soweit ausgleichen, daß wir kaum noch etwas davon bemerken — wenn der Sender nicht ganz und gar verschwindet. In diesem Falle kann auch die beste Schwundregelung nicht helfen — wo kein Sender ist, kann auch keiner empfangen werden! Da wir wissen, in welchem großem Verhältnis diese Schwankungen auftreten können, sollten wir die Leistungsfähigkeit einer modernen Schwundausgleichsschaltung lieber bewundern, anstatt zu schimpfen, wenn ein Sender — der bisher schön gleichmäßig hörbar war, obwohl seine Empfangsfeldstärke um enorme Beträge schwankte — einmal wenige Sekunden ganz wegbleibt.

Wie die Verstärkung einer Röhre automatisch regelbar ist, können wir hier nur kurz erwähnen: Es geschieht durch Änderung der Gittervorspannung. Machen wir sie (also die Gleichspannung, die wir bisher mit dem Katodenwiderstand oder noch früher mit Batterien erzeugten, siehe Abb. 123 bis 127) größer, so verringert sich nicht nur der Anodenstrommittelwert, sondern auch eine Röhrengröße, die wir bisher als konstant angenommen hatten: die Steilheit. Man kann Röhren so bauen, daß die Steilheit vom Wert der negativen Gittervorspannung abhängt. Je größer die negative Vorspannung ist, desto geringer die Steilheit und damit die Verstärkung der Röhre. Geregelt wird sie durch Veränderung der Höhe der Gittervorspannung. Röhren, die sich dazu besonders gut eignen, werden als Röhren mit Regelkennlinie oder kurz als Regelröhren bezeichnet. Die Hexode der ECH 81 und die Pentode der EBF 80 gehören zu diesen Röhrentypen.

Für die automatische Regelung wird also eine Gittervorspannung gebraucht, die um so größer wird, je stärker der Sender ankommt. Im gleichen Maße wird dabei die Verstärkung geringer. Wenn der Sender schwächer wird, so muß auch die Gittervorspannung geringer werden. Dadurch steigt die Verstärkung, und am Demodulator haben wir im Endeffekt immer die nahezu gleiche ZF-Spannung stehen. Infolgedessen haben wir am NF-Ausgang fast gleichbleibende Lautstärke.

Wie wird die von der Senderfeldstärke abhängige negative Spannung erzeugt? Sie braucht gar nicht erzeugt zu werden, weil sie gewissermaßen als Abfallprodukt der Demodulation bereits vorhanden ist! Betrachten wir noch einmal genau den Vorgang der HF- oder ZF-Gleichrichtung in Abb. 171 und 172!

Abb. 172 zeigt, daß die Richtspannung — die in Abb. 171 am Widerstand R auftritt — zwar im Takt der NF-Modulation pendelt, aber nie ganz Null wird. Sie ist also ständig vorhanden, und ihr Durch-

schnittswert (um den herum sie im Takt der NF schwankt) hängt ab von der Größe der HF-Spannung – damit aber von der Stärke des empfangenen Senders! Die negative Spannung am Widerstand R ist also im Durchschnittswert um so größer, je stärker der empfangene Sender ist. Und das ist genau das, was wir für die automatische Regelung brauchen!

Wir können die in Abb. 171 an R abfallende Spannung, deren Verlauf Abb. 172 zeigt, auch als eine Zusammensetzung einer Gleichspannung und einer ihr überlagerten NF-Spannung auffassen. Gelingt die Trennung beider Anteile, so läßt sich die NF-Spannung für den Lautsprecher verwenden (der Gleichspannungsanteil interessiert uns da ja nicht) und der Gleichspannungsanteil für die Regelung.

Betrachten wir noch einmal Abb. 182. Die Richtspannung nach Abb. 172 steht hier fast in voller Höhe an R 2. Der NF-Anteil wird über C 3 abgenommen; dieser Kondensator sperrt gleichzeitig den Gleichspannungsanteil der Richtspannung.

Den Gleichspannungsanteil nehmen wir jetzt über einen weiteren RC-Tiefpaß R 3/C 4 ab, der so bemessen ist, daß er die NF-Spannung sperrt. Wir erkennen das schon daran, daß R 3 und C 4 wesentlich größer sind als die Werte des ersten Tiefpasses mit R 1 und C 2, der ja nur die ZF unterdrücken, aber die NF noch durchlassen muß. Hinter R 3, an C 4, ist nun keine NF mehr vorhanden, sondern nur noch der Gleichspannungsanteil der Richtspannung, dessen Höhe – wie wir eben feststellten – der Stärke des empfangenen Senders entspricht! Wir führen diese negative Gleichspannung also von C 4 aus dem Gitter der Hexode und der Pentode zu. Aus diesem Grunde liegen die Gitterspulen nicht an Masse, sondern an C 4, und die Gleichspannung gelangt über die Gitterspulen als negative Vorspannung an die Gitter! Diese Spannung wird deshalb auch als Regelspannung bezeichnet (U_R in Abb. 182; das Minuszeichen davor besagt, daß sie gegen Masse negativ ist).

Bei einem stärkeren Sender wird die ZF-Spannung und damit die Regelspannung höher, dadurch sinkt die Verstärkung von Hexode und Pentode. Da sich die Verstärkungszahlen beider Stufen wie bei jedem zweistufigen Verstärker multiplizieren, erhalten wir, indem wir beide Röhren „regeln“, eine sehr große Verstärkungsänderung, die bei modernen Geräten 1:10 000 betragen kann. Wenn die ZF-Verstärkung jedoch durch diese Regelung schwächer wird, so verringert sich damit auch die Regelspannung. Dadurch würde sich die Verstärkung erhöhen, wenn nicht auch die Regelspannung wieder steigen würde. Beides beeinflußt sich also gegenseitig und spielt sich infolgedessen auf einen Mittelwert ein, d. h., die ZF-Spannung am

Demodulator wird automatisch immer auf etwa dem gleichen Wert gehalten!

Erwähnt sei noch, daß C 4 eine weitere wichtige Aufgabe erfüllt: Für die HF und ZF müssen die unteren Enden der Gitterspulen kalt sein, d. h. HF-mäßig an Masse liegen. C 4 ist so groß, daß er für diese Frequenzen einen vollständigen Kurzschluß bildet. Für die HF- und ZF-Spannung liegen also die gleichen Verhältnisse vor, als wenn die Gitterspulen direkt an Masse liegen würden.

Wir haben bisher noch nicht untersucht, wie die Wellenbereichsumschaltung gehandhabt wird — unsere Rundfunkgeräte verfügen ja über mehrere Wellenbereiche. Für jeden Bereich sind andere Spulen vorhanden, deren Induktivitäten so bemessen sind, daß sie mit dem Drehko — der für alle Bereiche beibehalten wird — Resonanz in dem betreffenden Bereich ergeben. Mit einem Stufenschalter (in modernen Geräten als Tastenschalter ausgebildet) werden die dem jeweiligen Bereich zugehörigen Spulen angeschaltet. Die ZF bleibt natürlich für alle Bereiche gleich; dennoch müssen Antennenspule L 1, Vorkreissspule L 2, Oszillatorspule L 3 und Rückkopplungsspule des Oszillators L 4 umgeschaltet werden — vier Spulen für jeden Bereich!

Die Bereichsumschalter (auch Wellenschalter genannt) sind daher ziemlich kompliziert aufgebaut und meist fest zu einem Spulensatz oder Spulenaggregat zusammengebaut, in dem sämtliche Spulen für Vorkreis und Oszillator enthalten sind. Dieses Spulenaggregat bildet das Herz eines modernen Supers.

Es soll noch eine weitere Zusatzschaltung kurz erwähnt werden, die bei fast allen modernen Geräten vorhanden ist: die Abstimmanzeige. Sie hat nichts mit der Empfangsleistung zu tun, sondern dient nur der bequemeren Bedienung. Mit ihr kann man den Empfänger genau auf den empfangenen Sender einstellen.

Nur bei genauer Einstellung des Empfängers bildet der Oszillator mit der Senderfrequenz genau die ZF, und nur dann erreicht die Regelspannung ihren Höchstwert. Sie ist bei ungenauer Einstellung geringer. Infolgedessen ist es möglich, die Größe der Regelspannung als Einstellhilfe zu benutzen, indem man sie zur Anzeige bringt. Dazu wurden besondere Röhren entwickelt, die zwar äußerlich wie Rundfunkröhren aussehen und ähnlich wie diese arbeiten, aber reine Anzeigeeinstrumente darstellen.

Die Abstimmanzeigeröhren (vom Laien als „Magisches Auge“ und ähnlich bezeichnet) haben einen Leuchtschirm, der als Anode für einen Elektronenstrahl wirkt und mit einer Schicht überzogen ist, die dort, wo die Elektronen auftreffen, hellgrün aufleuchtet. Infolge des besonderen Aufbaus der Röhre kann die Richtung des Elektro-

nenstrahls geändert werden, so daß er dann eine mehr oder weniger breite Fläche der Anode trifft — dort entsteht also eine mehr oder weniger große grün aufleuchtende Fläche. Die Richtungsänderung der Elektronen wird durch eine negative Gittervorspannung der Anzeigeröhre bewirkt — und dieses Gitter wird mit an die Regelspannung angeschlossen. Steigt die Regelspannung beim Einstellen auf einen Sender an, so wird das an der Änderung der Leuchtfläche sichtbar. Man kann danach gut auf das Maximum der Regelspannung einstellen.

Der Niederfrequenzverstärker

Der NF-Verstärker ist uns bereits von der Abb. 128 her bekannt. Die dort mit dem allgemeinen Symbol U_e angegebene NF-Spannungsquelle ist die vom Demodulator kommende NF-Leitung (Abb. 182 oder, wenn wir mit einem Einkreis-Audion empfangen, Abb. 176), die aber nicht ohne weiteres zum NF-Verstärker führt — wir müssen ja eine Möglichkeit haben, die Lautstärke zu regeln! Wie arbeitet ein Lautstärkereglер? Sehen wir uns dazu Abb. 183 an.

Der eigentliche Lautstärkereglер ist das Potentiometer P, ein veränderlicher Widerstand, der meist aus einer kreisförmig angeordneten Kohleschichtgleitbahn besteht, die den Widerstand bildet. In Abb. 183 ist ihr Anfang mit A, das Ende mit E bezeichnet. Diese Bezeichnungen finden wir oft auch an den Anschlüssen des Potentiometers. Das Ende E ist dann immer der Anschluß, den der Schleifer S beim Rechtsanschlag der Potentiometerachse erreicht. Schleifer S ist ein Kontakt, der auf der Widerstandsbahn schleift und dessen Stellung wir mit einer Drehachse einstellen können.

Größere Potentiometer (für höhere Strombelastungen, für Anwendungen außerhalb normaler Rundfunkempfänger) haben an Stelle

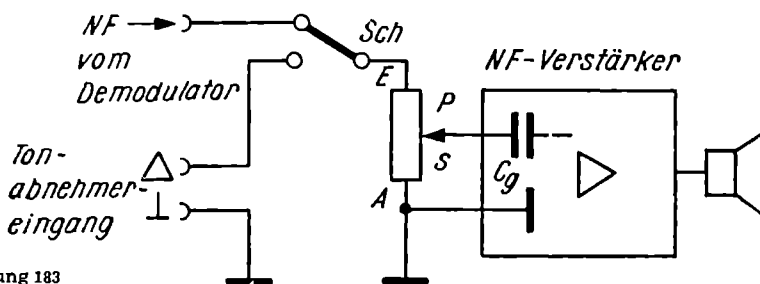


Abbildung 183

der Widerstandsschicht aus Kohle eine ebenso angeordnete Kreisbahn mit Widerstandsdrahtwicklung.

Ein Potentiometer ist nichts weiter als ein veränderlicher Spannungsteiler, wenn wir es so anschließen wie in Abb. 183. Benutzen wir nur Schleiferanschluß S und ein Ende der Widerstandsbahn (das andere Ende bleibt dann frei), so haben wir einen Regelwiderstand vor uns.

Wenn der Schleifer in Abb. 183 ganz oben bei E steht, so können wir an S die volle NF-Spannung abnehmen. Steht S ganz unten, so ist die abgenommene Spannung Null. Steht S in einer Zwischenstellung, so bilden die beiden Teilwiderstände E–S und S–A einen Spannungsteiler.

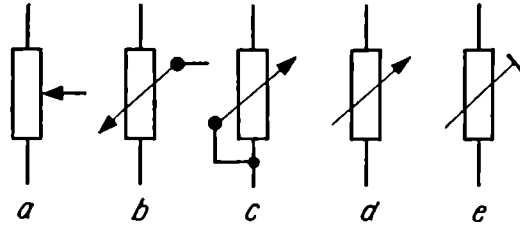
Mit einem Potentiometer kann man also jede Spannung zwischen Null und ihrem Höchstwert einstellen. Bei höheren Spannungen muß dabei natürlich die zulässige Belastbarkeit des Potentiometers (in Watt) beachtet werden, denn zwischen E und A liegt die volle Spannung an, und je nach Höhe der Spannung und dem Widerstandswert des Potentiometers fließt ein bestimmter Querstrom — zu dem für die obere Widerstandshälfte E–S noch der Strom hinzukommt, den wir eventuell bei S entnehmen. Dieser Querstrom erzeugt im Widerstand eine bestimmte Wärmeleistung, die das Potentiometer vertragen muß. Wie sie errechnet wird, haben wir im ersten Teil des Buches schon erfahren.

In Abb. 183 ist auch ein Schalter Sch eingezeichnet. Meist wird er mit auf dem Wellenbereichsschalter untergebracht und trägt dann dort die Beschriftung „Tonabnehmer“. Die zum Lautstärkeregler P führende Eingangsleitung des NF-Verstärkers wird dabei vom Demodulator abgeschaltet und auf Anschlüsse an der Rückseite des Empfängers umgeschaltet. Dort kann ein Plattenspieler oder die Wiedergabeleitung eines Magnettongerätes angeschlossen werden. Moderne Rundfunkgeräte haben für Magnettongeräte den sogenannten Diodenanschluß. Er hat drei Pole in der Form von Stiften. Der mittlere ist die Masseleitung, und einer der beiden äußeren Stifte hat Verbindung mit der vom Demodulator kommenden NF-Leitung (also mit C 3 in Abb. 182), über die das Rundfunkprogramm auf Band aufgenommen werden kann. Die andere Leitung — für die Wiedergabe des Bandes — führt zu den Anschlüssen Tonabnehmer in Abb. 183.

Für Potentiometer sind verschiedene Schaltsymbole üblich. Abb. 184 zeigt die beiden gültigen Schaltsymbole (a und b); im allgemeinen wird b verwendet.

Symbol c stellt ein als regelbaren Widerstand geschaltetes Potentiometer dar. Der Schleifer wird mit einem Ende der Widerstandsbahn

Abbildung 184



verbunden und schließt daher je nach seiner Stellung einen mehr oder weniger großen Teil des Widerstandes kurz.

Oft wird diese Verbindung – obwohl das eigentlich nicht richtig ist – nicht mitgezeichnet; das Symbol stellt dann einen Widerstand mit Schrägpfeil dar (d) und bedeutet ebenfalls einen regelbaren Widerstand.

Bei e sehen wir die Pfeilspitze durch einen Querstrich ersetzt. Dieser Querstrich an Stelle der Pfeilspitze wird nicht nur bei Widerständen und Potentiometern, sondern auch bei allen anderen regelbaren Bauteilen angewendet. Siehe zum Beispiel die entsprechenden Schrägstriche an den Bandfiltern Bf I und Bf II in Abb. 182, wo sie eine regelbare Induktivität (verstellbarer Spulenkern) bedeuten.

Eine Pfeilspitze gibt immer an, daß dieses Organ zwecks ständiger Bedienung mit einem Bedienungsknopf versehen ist; ein Querstrich an Stelle des Pfeils besagt, daß das Organ zwar einstellbar, jedoch nicht zur ständigen Bedienung vorgesehen ist. Es befindet sich im Geräteinnern und weist an Stelle des Drehknopfes meist einen Schlitz für den Schraubenzieher auf. Die Bandfilter in Abb. 182 beispielsweise werden nur einmal nach Fertigstellung des Gerätes genau auf die ZF eingestellt und höchstens bei Reparaturen am Gerät korrigiert. (Von den Spulenkernen in Radiogeräten lassen wir die Finger! Sie können nur mit bestimmten Meßgeräten wieder genau eingestellt werden!)

Wir haben bisher immer angenommen, daß die NF-Spannung einfach eine Wechselspannung mit einer Frequenz zwischen 16 Hz und 15 oder 20 kHz sei – aber eben mit einer einzigen Frequenz. In Wirklichkeit haben wir es jedoch mit einem Frequenzgemisch zu tun, in dem viele Frequenzen des NF-Bereiches gleichzeitig vorhanden sind. Wir übertragen ja nicht nur einzelne Töne, sondern komplizierte Tongemische bei Musik und Sprache! Ein Gemisch verschiedener Töne nennt man entweder einen Klang (wenn die Töne in bestimmtem, „musikalischem“ Verhältnis zueinander stehen) oder ein Geräusch (wenn das Tongemisch kein bestimmtes Verhältnis der Einzeltöne zueinander hat).

Die NF-Spannungskurve ist dann keine Sinuskurve mehr; das ist sie nur bei einem einzelnen Ton. Die Kurvenform der NF-Spannung eines Klanges oder Geräusches dagegen ist sehr kompliziert und bei den ständig wechselnden Klängen und Geräuschen ganz unregelmäßig.

Abb. 185 zeigt die unregelmäßige Kurve eines Frequenzgemisches. Die Membranen unserer Schallwandler (Mikrofone, Lautsprecher und so weiter) müssen die gleichen unregelmäßigen Schwankungen mitmachen, und auch die Hüllkurve der amplitudenmodulierten HF sieht dann so aus.

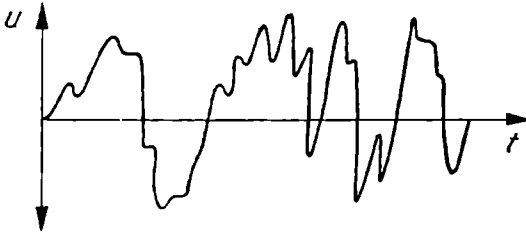


Abbildung 185

Wenn wir nun aus einem solchen Frequenzgemisch die hohen Frequenzen (vielleicht ab 1000 oder 2000 Hz) ausfiltern und unterdrücken, so wird der Klangeindruck „dunkler“, dumpfer. Umgekehrt ist es, wenn wir die tiefen Töne (vielleicht bis zu einigen 100 Hz) ausfiltern – dann wird der Klangeindruck „heller“. Der Klangcharakter läßt sich also ändern, indem die hohen oder die tiefen Frequenzen (oder auch beide – es bleiben dann nur die mittleren Tonfrequenzen übrig) abgeschwächt werden.

Wir können uns das Frequenzgemisch gewissermaßen als Summenkurve aller einzelnen Frequenzen vorstellen, als eine ganze Anzahl übereinander gezeichnet zu denkender Sinusschwingungen verschiedener Frequenz und verschiedener Amplitude. Aus solch einem komplizierten Frequenzgemisch besteht die NF-Spannung.

Der NF-Verstärker muß dieses Frequenzgemisch – also einen unregelmäßigen Kurvenverlauf, wie ihn Abb. 185 zeigt – völlig unverändert übertragen können. Deshalb müssen wir darauf achten, daß im Verstärker keine Schaltglieder auftreten, die im NF-Bereich ein frequenzabhängiges Verhalten zeigen. So etwas könnte zum Beispiel durch zu klein bemessene Gitterkondensatoren geschehen – der Gitterkondensator würde dann zusammen mit dem Gitterwiderstand einen RC-Hochpaß bilden (Abb. 155 und Seite 200, 202 und 239), den die hohen Tonfrequenzen besser überwinden könnten als die tiefen – der Klang würde heller, und damit wäre es mit der schönen kräftigen Baßwiedergabe des Lautsprechers vorbei. Doch es gibt Möglichkeiten, den Klang des NF-Verstärkers zu regeln.

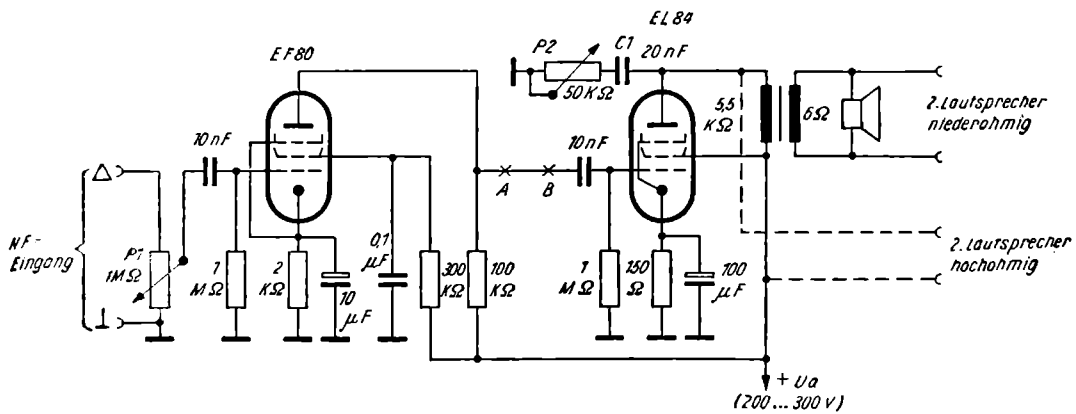


Abbildung 186

Sehen wir uns das Schaltbild eines solchen NF-Verstärkers jetzt einmal mit allen Werten an (Abb. 186). Am Eingang sitzt das Potentiometer P 1, der Lautstärkeregler.

Die erste Verstärkerstufe wird hier mit einer Pentode aufgebaut; deshalb ist außer dem 100-k Ω -Anodenwiderstand noch der 300-k Ω -Schirmgitterwiderstand und der Schirmgitterkondensator (0,1 μ F) vorhanden. Der Katodenwiderstand muß für diese Röhre 2 k Ω betragen (er ist für jede Röhrentype anders, sein Wert hängt ja vom Katodenstrom der Röhre ab). Um Gegenkopplung zu verhüten (Seite 202), liegt ihm ein Katodenkondensator parallel. Es ist ein Elektrolytkondensator – ein Elko; er wirkt wie jeder andere Kondensator. Siehe dazu Seite 303.

Als zweite Stufe folgt die Endröhre EL 84. Sie ist an die Anode der Vorröhre über einen 10-nF-Gitterkondensator angekoppelt. Ihr Katodenwiderstand ist bedeutend niedriger als der der Vorröhre, weil sie einen wesentlich höheren Anodenstrom hat als die Vorröhre. Im Anodenkreis der Endröhre liegt der Ausgangsübertrager, an dem die für diese Röhre und den vorgesehenen Lautsprecher erforderlichen Impedanzen angegeben sind. (Wir erinnern uns: Die Impedanz ist der Scheinwiderstand der Wicklung bei einer Frequenz von 1000 Hz.) Das Schirmgitter der Endröhre darf bei der EL 84 direkt an Plus gelegt werden. Für einen zweiten Lautsprecher sind Buchsenanschlüsse vorgesehen. Er ist – wie die Schaltung zeigt – dem eingebauten Lautsprecher auf der Sekundärseite des Ausgangstrafos parallelgeschaltet und muß ebenfalls ungefähr 6 Ω haben – der Ausgang für den zweiten Lautsprecher ist, wie der Techniker sagt, niederohmig. Das hat Vorteile (der zweite Lautsprecher braucht keinen eigenen Übertrager zu haben) und Nachteile.

Die Leitung zum zweiten Lautsprecher darf nicht zu lang werden, sonst kommt ihr unvermeidlicher Widerstand (der ja in Serie mit

dem Zweitlautsprecher liegt) in die Größenordnung des Lautsprecherwiderstandes, und es geht Lautstärke verloren. Dies könnte man vermeiden, indem man den Anschluß für den Zweitlautsprecher parallel zur Primärwicklung des Übertragers legt, wie es in Abb. 186 punktiert gezeichnet ist. Dann ist die Ausgangsspannung bedeutend höher (sie kann hier 100 V NF-Spannung und mehr erreichen, während sie am niederohmigen Ausgang nur wenige Volt beträgt; vergleiche Seite 174 und 204). Die Leitung kann einen höheren Widerstand haben, da der zweite Lautsprecher jetzt natürlich ebenfalls einen Ausgangsübertrager braucht! Der punktiert gezeichnete hochohmige Ausgang ist aber nur noch bei alten Geräten vorhanden und heute für Industriegeräte verboten, weil er eine große Gefahr in sich birgt: An diesen Anschlüssen ist nicht nur die NF-Spannung vorhanden, sondern auch die hohe Anodenspannung, die immerhin 300 V betragen kann! Der Umgang mit einer hochohmigen Lautsprecherleitung kann daher leicht lebensgefährlich werden.

In C 1 und P 2 haben wir eine ganz einfache Tonblende vor uns, eine Schaltung, mit der die hohen Töne abgeschwächt werden können, so daß der Klang dunkler wird. Je mehr wir den Wert von P 2 verringern, um so mehr wird C 1 wirksam, und dieser Kondensator leitet die hohen Töne gegen Masse ab, so daß sie nicht durch den Übertrager fließen. Je höher also die Tonfrequenz ist, um so geringer ist für sie der Scheinwiderstand von C 1 und um so größer der Anteil, der über C 1 abfließt und für den Lautsprecher verlorengeht. Verstellen wir den Klangregler P 2 in Richtung auf höheren Widerstandswert, so müssen die abzuleitenden Frequenzen außer C 1 noch bei P 2 einen größeren Widerstand passieren, so daß der am Übertrager vorbeigeleitete Teil geringer und die Klangveränderung nicht so stark ist.

Das ist freilich eine sehr primitive Art der Klangregelung; wir können so nur die hohen Töne mehr oder weniger schwächen. Moderne Klangregler sind dagegen oft sehr kompliziert aufgebaut, ihre Funktion ist bei komplizierten Schaltungen manchmal selbst für den Fachmann nicht gleich auf den ersten Blick erkennbar. Man benutzt dazu stets Kombinationen aus Widerständen und Kondensatoren, also RC-Hoch- oder Tiefpässe. Auch die Klangregistertasten moderner Empfänger gehören hierher. Sie sind nichts weiter als umschaltbare RC-Kombinationen.

Eine für den Selbstbau gut geeignete einfache Klangregelschaltung zeigt die Abb. 187. In den Verstärker der Abb. 186 wird diese Schaltung bei A und B eingefügt. Sie eignet sich auch gut zum nachträglichen Einbau in vorhandene Verstärker und wird dann dort ebenso eingeschaltet.

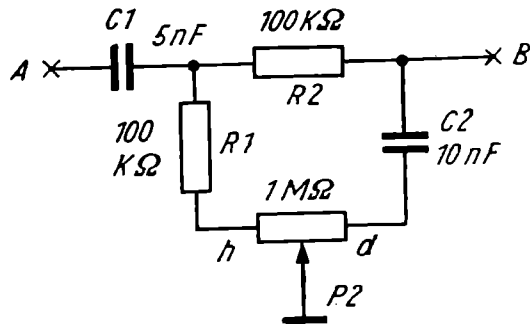


Abbildung 187

P 2 ist der Klangregler. In der linken Endstellung „h“ ist der Klang hell; die tiefen Frequenzen werden geschwächt, da das untere Ende von R 1 über den Potentiometerschleifer an Masse liegt und C 1 mit R 1 einen RC-Hochpaß für die von A kommende NF-Spannung bildet. Sie gelangt über R 2 weiter zum Gitter der Endröhre (Abb. 186). R 2 und C 2 machen sich jetzt nicht bemerkbar, weil hinter C 2 noch der hohe Wert von P 2 ($1\text{ M}\Omega$) gegen Masse liegt.

Drehen wir P 2 in die rechte Stellung „d“, so erhalten wir einen dunklen Klang, weil jetzt C 2 direkt an Masse liegt und R 2 und C 2 einen Tiefpaß bildet, der die hohen Frequenzen schwächt. C 1 und R 1 machen sich jetzt nicht mehr bemerkbar, weil der Wert von P 2 mit R 1 in Serie liegt.

In Mittelstellung von P 2 werden weder die hohen noch die tiefen Frequenzen geschwächt, da von P 2 je eine Widerstandshälfte in Serie mit R 1 bzw. C 2 liegt, so daß weder der Hochpaß noch der Tiefpaß wirksam wird. Mit P 2 können wir also beliebig zwischen beiden Erscheinungen wechseln. Die Werte für R 1, R 2, C 1, C 2 und P 2 sind so bemessen, daß sich der gewünschte Effekt einstellt.

Ein wichtiger Begriff für NF-Verstärker ist die Ausgangsleistung. Damit ist die Leistung gemeint, die der Lautsprecher zugeführt erhält und in Schalleistung umsetzt. Sie wird meist überschätzt: Gute Zimmerlautstärke bekommen wir bereits mit einer Ausgangsleistung von $0,05 \dots 0,1\text{ W}$, und mit $2 \dots 3\text{ W}$ erhalten wir bereits eine Lautstärke, die die Nachbarn in Zorn bringt.

Wo kommt die Ausgangsleistung her? Nicht etwa „aus der Endröhre“, obwohl sie damit zu tun hat. Um dem Lautsprecher höhere Leistung zuführen zu können, muß die Schwingspule und demnach der Übertrager entweder eine höhere NF-Spannung bekommen (das hat seine Grenzen, da die NF-Spannung nicht höher als die Anodenspannung sein kann), oder der Übertrager muß bei gleicher NF-Spannung mehr NF-Strom aufnehmen — also niedrigere Impedanz haben. Das bedeutet aber wiederum (vergleiche Seite 193 bis 196



und 203/204), daß der Anodenstrom stärker schwanken muß – und deshalb muß sein Mittelwert ebenfalls zunächst einmal größer sein. Um eine hohe Ausgangsleistung zu erhalten, muß eine hohe Anodenspannung angewendet werden, zum anderen aber muß die Endröhre hohen Anodenstrom haben und entsprechend kräftig gebaut sein. Wir finden deshalb bei Endröhren Anodenströme zwischen 20 und 60 mA (die EL 84 hat etwa 35 ... 40 mA), bei Vorröhren dagegen selten mehr als 1 mA, da hier ja höhere Anodenwiderstände benutzt werden können.

Abb. 186 ermöglicht uns einen guten Vergleich: Wir haben dort für alle Teile Werte der durchschnittlichen Größenordnung für solche NF-Verstärker benutzt. Der Verstärker nach Abb. 186 entspricht ungefähr einem normalen Radio-NF-Verstärker mit rund 3 W Ausgangsleistung. Natürlich sind diese 3 W als Maximalwert zu verstehen, der nur kurzzeitig an den lautesten Stellen der Übertragung erreicht wird.

Auf Transistorverstärker wollen wir an dieser Stelle nicht näher eingehen. Sie arbeiten im Prinzip ganz ähnlich, nur unterscheiden sich die einzelnen Werte entsprechend den anderen Verhältnissen bei Transistoren.

Der Netzteil

Wir kennen nun alle Stufen eines Empfängers außer einer: der Stromversorgung. Bisher haben wir nicht danach gefragt, woher denn nun die Anodenspannung und die Heizspannung kommen. Bei Kofferempfängern werden beide aus Batterien mit entsprechen-

der Spannung entnommen. Beim Netzempfänger haben wir nur eine Spannung zur Verfügung, die des Lichtnetzes mit (meist) 220 V Wechselfspannung. Aus ihr müssen wir die nötigen Betriebsspannungen ableiten.

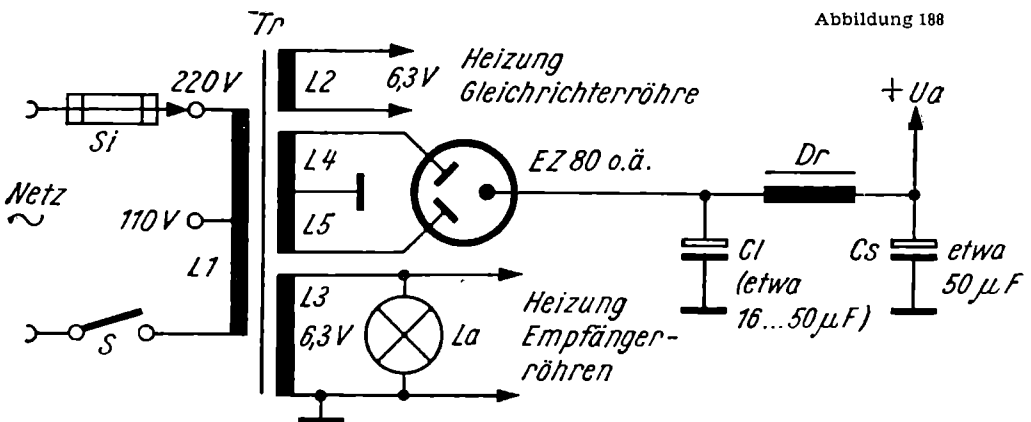
Abb. 188 zeigt, wie das gemacht wird. Ein Netztransformator Tr hat mehrere Sekundärwicklungen $L 2$ bis $L 5$. Der Primärwicklung $L 1$ wird die Netzspannung über Sicherung Si und Schalter S zugeführt. Der Schalter, mit dem wir den ganzen Empfänger ein- und ausschalten, ist oft mit auf der Achse des Lautstärkereglers oder auch auf dem Tastenschalter des Spulensatzes untergebracht. Die Sekundärwicklungen erzeugen die erforderlichen Betriebsspannungen.

$L 3$ erzeugt die Heizspannung für die Empfängerröhren, und zwar für E-Röhren 6,3 V. An diese Wicklung ist auch die Skalenbeleuchtung angeschlossen (hier durch das Lämpchen La angedeutet). Die Gleichrichterröhre $EZ 80$ hat eine eigene Heizwicklung $L 2$.

$L 4$ und $L 5$ erzeugen die Anodenspannung. Es handelt sich hierbei um eine Zweiweggleichrichtung. Sehen wir uns dazu noch einmal Abb. 118 an, denn dort hatten wir bereits eine Gleichrichterschaltung kennengelernt. Diese zeigt aber den Mangel, daß stets nur während einer Halbwelle der Wechselfspannung Strom vom Trafo entnommen wird; die andere Halbwelle wird nicht ausgenutzt. Demzufolge haben wir in der Gleichspannung am Widerstand R zwischen den Spannungshalbwellen immer lange Pausen (Abb. 119), und deshalb findet die Wechselfspannung stets nur in einer Halbwelle einen Weg – man spricht hier von einer Einweggleichrichtung.

Abb. 188 zeigt, wie man das verbessern kann.

Betrachten wir zunächst die Halbwelle, in der die Elektronen in $L 4$ und $L 5$ (diese Wicklungen sind gleich groß und liegen in Serie) von oben nach unten getrieben werden. In $L 5$ kann dann kein Strom



fließen – die untere Anode der Gleichrichterröhre EZ 80 ist jetzt negativ, also gesperrt. Dagegen fließen Elektronen von der Katode zur oberen Anode (die ja gerade positiv ist) und über L 4 nach Masse. Kondensator C1 wird also aufgeladen, und zwar mit Pluspol oben an der Katode.

Nun die andere Halbwelle. Die Elektronen in L 4 und L 5 strömen jetzt nach oben; in L 4 ist das aber nicht möglich, da jetzt die obere Anode negativ wird und daher sperrt. Der Katodenstrom fließt jetzt zur unteren Anode und über L 5 nach Masse. Nun fließt in beiden Halbwellen Katodenstrom, und zwar abwechselnd zur oberen Anode und L 4, dann wieder zur unteren Anode und L 5. Wir haben beide Halbwellen ausgenutzt, um den Kondensator C1 aufzuladen. Der Stromfluß in der Katodenleitung hat jetzt den Verlauf, wie ihn Abb. 189 bei a zeigt. Der Vergleich mit Abb. 119 läßt die erreichte Verbesserung deutlich erkennen.

Die Spannung fällt trotzdem kurzzeitig immer wieder auf Null ab. Dazu kommt es jedoch nicht, da die Ladung des Kondensators C1 diese Zeiten überbrückt. Während der „Nullstellen“ der Kurve gibt er einen Teil seiner gespeicherten Ladung ab und verhindert, daß die Spannung allzuweit zurückgeht. An C1 – der deshalb Ladekondensator genannt wird – ergibt sich dadurch ein Spannungsverlauf, wie ihn Abb. 189 unten bei b zeigt. Die Spannung pulsiert jetzt nur noch wenig um ihren Mittelwert – wir haben eine nahezu gleichmäßige Gleichspannung erhalten.

Das leichte Pulsieren stellt jedoch nichts anderes dar als eine der Gleichspannung überlagerte Wechselfrequenz mit der doppelten Netzfrequenz, also mit 100 Hz (vergleiche Abb. 189). Diese Frequenz könnte in den NF-Verstärker gelangen und dort mit verstärkt werden. Wir würden dann im Lautsprecher den berühmten Netzbrummtönen hören. Wie beseitigen wir die Brummspannung? Mit

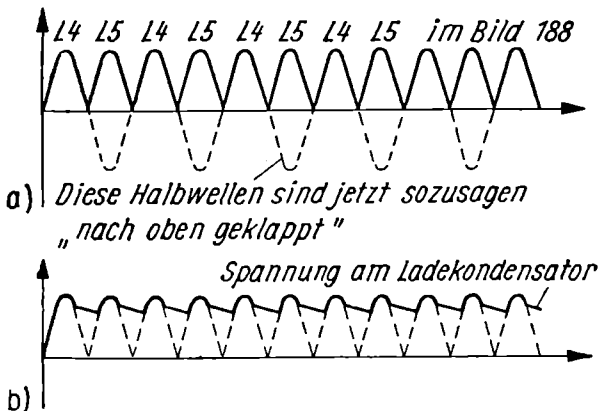


Abbildung 189

einem Tiefpaß! Drossel D_r – die Netzdrossel, so genannt, weil sie zum Netzteil gehört – setzt dieser Brummspannung einen großen Widerstand entgegen; für den Gleichstrom ist ihr Widerstand weit geringer. Hinter ihr schließt Siebkondensator C_s die letzten Brummspannungsreste gegen Masse kurz. Diese drei Bauteile – C_l , D_r und C_s – werden deshalb auch als Siebkette bezeichnet. An C_s können wir nun die Anodenspannung $+U_a$ abnehmen und den einzelnen Röhrenstufen zuführen.

In wenigen Orten sind noch die alten Gleichstromnetze vorhanden. Hier kann man natürlich nicht mit Netztrafos arbeiten, und wir erwähnen deshalb kurz den sogenannten Allstromnetzteil.

Abb. 190 zeigt die grundsätzliche Schaltung eines Allstromnetzteiles. Hier kann man nur die ungünstigere Einweggleichrichtung anwenden. Als Gleichrichter G_l ist ein Selengleichrichter vorgesehen (auch in Abb. 188 könnte man die Gleichrichterröhre durch zwei Selengleichrichter ersetzen; manchmal wird das auch gemacht). Hinter dem Selengleichrichter folgt wieder die Siebkette, bestehend aus Ladekondensator C_l , Siebwiderstand R_s und Siebkondensator C_s . Der Tiefpaß ist als RC-Tiefpaß aufgebaut, an Stelle der Drossel ist ein Widerstand vorhanden (das wäre in Abb. 188 ebenso möglich). Dem Vorteil – geringes Gewicht und geringerer Preis – steht aber ein großer Nachteil gegenüber: Die Siebwirkung ist schlechter als mit der Drossel, und außerdem verlieren wir an R_s einen Teil der Anodenspannung, weil der durch R_s fließende Anodenstrom des ganzen Gerätes natürlich einen Spannungsabfall verursacht. Das ist hier besonders schlimm, da die Anodenspannung infolge des fehlenden Trafos ohnehin nicht höher sein kann als die Netzspannung, was wieder im Hinblick auf den Betrieb kräftiger NF-Endstufen sehr ungünstig ist. Ein Allstromgerät hat deshalb kaum mehr als 2...3 W NF-Endleistung.

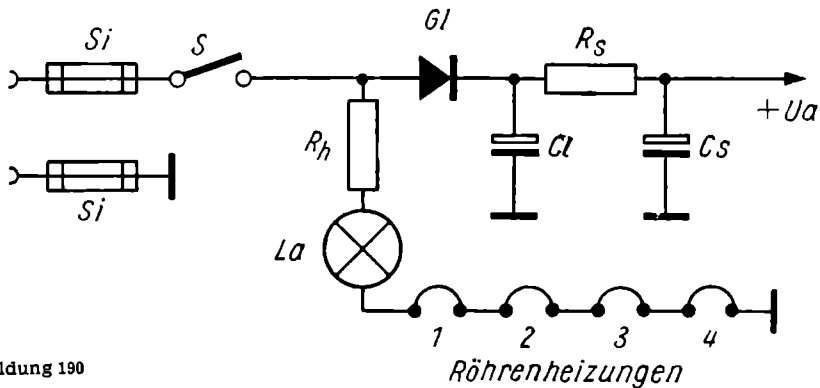


Abbildung 190

Die Röhren müssen hier ebenfalls in Serie geschaltet und direkt aus dem Netz geheizt werden; sie haben alle gleichen Heizstrom und dürfen dafür unterschiedliche Heizspannungen haben.

Die Skalenlampe La liegt in Serie mit den Röhrenheizungen. Brennt sie einmal durch, so sind alle Heizungen stromlos und das ganze Gerät fällt aus (Unterschied zum Wechselstromnetzteil!) Dagegen gibt es als Schutz sogenannte Heißleiter, die der Skalenbeleuchtung parallelgeschaltet sind und sie bei deren Ausfall kurzschließen. Neuere Allstromgeräte spielen deshalb auch in diesem Fall weiter. Der Heizwiderstand Rh vernichtet die Spannungsdifferenz, die noch zwischen der Summe aller Röhrenheizspannungen nebst Skalenlampen und der Netzspannung verbleibt.

Ein großer Nachteil der Allstromgeräte ist, daß hier das Netz direkte Verbindung mit der Masseleitung und damit dem Chassis des Gerätes hat. Das Chassis steht also unter Starkstrom! Es darf daher nirgends von außen zugänglich sein (auf die Befestigungsschrauben der Drehknöpfe achten)! Deshalb ist auch der Anschluß von Plattenspielern und Tonbandgeräten nicht ohne weiteres möglich – deren Anschluß hat ja ebenfalls Masseverbindung, so daß die Gehäuse dieser Geräte dann unversehens unter Netzspannung stehen können! Aus allen diesen Gründen werden heute Allstromempfänger nicht mehr gefertigt.

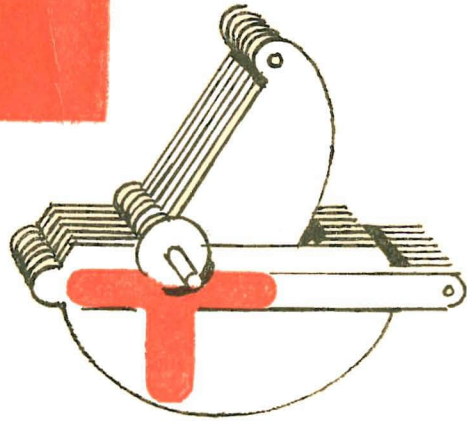
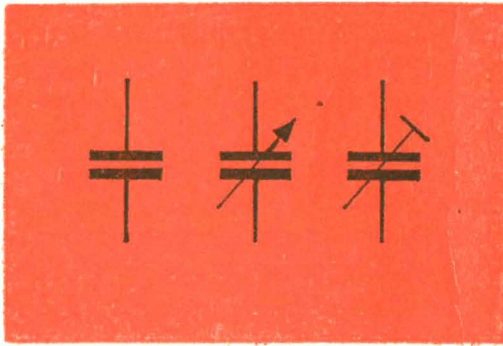
Kleine Einzelteilkunde

Nachdem wir nun alle Baugruppen eines Empfängers kennengelernt haben, sollen noch Hinweise zu verschiedenen Bauteilen gegeben werden, die wir bisher nur kurz besprochen haben.

Widerstände und Potentiometer

Ein Widerstand wird durch zwei Werte gekennzeichnet: den Ohmwert und die Belastbarkeit. Der Wert der Belastbarkeit ist in Schaltbildern oft nicht angegeben, weil es nicht notwendig ist. Falls wirklich Zweifel auftreten, kann man sich mit etwas Geschick selbst helfen.

Ein Beispiel: Wie hoch belastbar müßte der 100-k Ω -Anodenwiderstand der EF 80 im Bild 186 sein? Um das zu errechnen, müßten wir entweder den durchfließenden Strom oder die am Widerstand liegende Spannung kennen (siehe Seite 64/65); doch beide Werte sind nicht angegeben!



Es ist uns aber bekannt, daß die Anodenspannung bei einem derartigen Verstärker höchstens 300 V betragen wird. Ein Teil davon tritt als Anodenspannung für die EF 80 auf, hierfür könnten wir 100 V veranschlagen. Wir sind jedoch vorsichtig und nehmen nur 50 V an. Dann stehen am Anodenwiderstand höchstens 250 V, vermutlich sogar noch weniger. Nach dem bekannten Rechengang kommen wir für 100 k Ω und 250 V auf 0,625 W. Da wir vorsichtig hohe Werte veranschlagt hatten, dürfen wir auf 0,5 W abrunden. Diese Größe reicht also in jedem Fall aus!

Ein anderes Beispiel: Der Katodenwiderstand der EL 84 in Abb. 186 hat 150 Ω . Wie hoch muß er belastbar sein? Hier schauen wir in einem Röhrenbuch nach, welchen Anoden- und Schirmgitterstrom diese Röhre hat. Beide zusammen ergeben den Katodenstrom, der durch diesen Widerstand fließt.

Wir finden für die EL 84 rund 50 mA. Mit 150 Ω und 50 mA errechnen wir die Belastung zu 0,375 W. Wir runden sicherheitshalber auf den nächsthöheren Wert von 0,5 W auf. Hierfür muß der Widerstand bemessen sein. Wir sehen, daß die Belastungsangaben tatsächlich fast immer überflüssig sind – schon nach kurzer Zeit wissen wir aus Erfahrung, welche Belastungen ungefähr nötig sind, so daß nur noch selten nachgerechnet werden muß.

Welche Rechenwerte legen wir aber beispielsweise für die 1-M Ω -Gitterwiderstände zugrunde? Keine! Die am Gitter auftretende NF-

Spannung ist so gering, daß selbst der kleinste Widerstand nicht annähernd voll belastet ist. Also — erst nachdenken, dann rechnen! Die Potentiometer hatten wir bei Abb. 183 und 184 bereits behandelt. Es gibt zwei Arten: mit logarithmischen und linearen Kennlinien. Im Schaltbild wird, wenn das von Bedeutung ist, der Wertangabe der Zusatz *log* oder *lin* nachgesetzt.

Beim linearen Potentiometer steigt der Widerstandswert zwischen Anfang A und Schleifer S (Abb. 183) bei Rechtsdrehung ganz gleichmäßig an. Ist der halbe Drehweg zurückgelegt, so ist auch der halbe Wert des Gesamtwiderstandes erreicht.

Beim logarithmischen Potentiometer steigt der Widerstandswert zunächst langsam, dann immer schneller an. Der Hauptanteil des Gesamtwiderstandes konzentriert sich also in Nähe des Endes E der Widerstandsbahn. Vor allem für Lautstärkereglern werden meist logarithmische Potentiometer benutzt.

Eine Miniaturausführung von Potentiometern, die ohne Befestigung direkt eingelötet werden, sind die Abgleichregler oder Trimmregler. Sie sind für einmalige Schraubenziehereinstellung bestimmt. Ihr Schaltsymbol entspricht Abb. 184e.

Kondensatoren

Kondensatoren gibt es als Festkondensatoren und variable Kondensatoren. Die letzteren kennen wir als Drehkos; ihr Schaltsymbol ist in Abb. 191 a nochmals gezeigt. Sie sind entweder als Luftdrehkos (zwischen den kammförmig ineinandergreifenden Platten befindet sich Luft als Dielektrikum) oder als Quetscherdrehkos (mit Kunstfolie oder Hartpapier zwischen den Platten) ausgeführt. Die Quets-

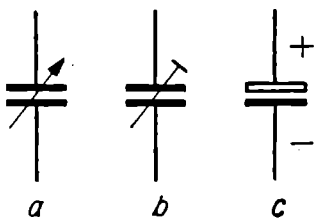
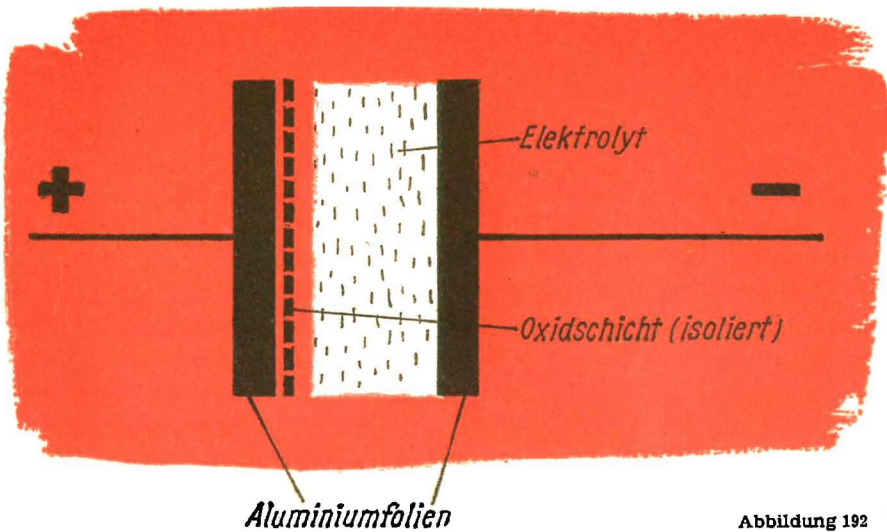


Abbildung 191

scherdrehkos sind bei gleicher Kapazität kleiner, haben aber höhere Verluste (Schwingkreis!). Kapazitätswerte für Drehkos: 10... 500 pF. Größere Kapazitäten lassen sich nicht mehr regelbar herstellen. Kleine keramische Drehkos (für Schraubenziehereinstellung), die für Abgleichzwecke bestimmt sind, werden Trimmkondensatoren, kurz



Trimmer genannt. Das Symbol für Trimmkondensatoren zeigt Abb. 191 b.

Festkondensatoren können als Rollkondensatoren (auch Foliekondensatoren wegen der Form des Dielektrikums genannt) hergestellt werden (Abb. 77). Als Dielektrikum diente früher Paraffinpapier, heute verwendet man meist Kunstfolien (Polyester, Styroflex usw.). Bei keramischen Festkondensatoren ist ein Keramikröhrchen als Dielektrikum innen und außen mit je einer aufgebrannten Metallschicht versehen, die die Beläge bilden. Diese Form ist Widerständen äußerlich ähnlich.

Viel verwendet werden auch keramische Kondensatoren in Scheibenform.

Speziell zum Erreichen hoher Kapazitätswerte ($1 \dots 1000 \mu\text{F}$) werden Elektrolytkondensatoren – kurz Elkos genannt – hergestellt. Abb. 191 c zeigt ihr Schaltsymbol, Abb. 192 skizziert ihren Aufbau. Als Beläge dienen zwei Aluminiumfolien, deren eine mit einer äußerst dünnen Aluminiumoxidschicht überzogen ist – sie bildet elektrochemisch das Dielektrikum [zwischen den Belägen befindet sich ein Elektrolyt (wasserhaltiges Chemikaliengemisch), der beim Anlegen einer Spannung die Oxidschicht ständig neu bildet]. Die negative Aluminiumfolie ergibt zusammen mit dem Elektrolyten den zweiten Belag des Kondensators.

Damit die Oxidschicht ständig nachgebildet (formiert) wird, muß am Kondensator während des Betriebes ständig eine Gleichspannung

liegen, und es fließt — das ist bei der Verwendung zu beachten — ständig ein kleiner Reststrom durch den Kondensator. Seine Größe hängt von der Kapazität des Kondensators (Fläche der Beläge) ab und liegt bei guten Kondensatoren sehr niedrig. Die Größe dieses Reststromes ist ein Maß für Qualität und Zustand des Elkos.

Längere Zeit stromlos gelagerte Elkos haben eine teilweise zersetzte Oxidschicht und zeigen beim Anschluß deshalb zunächst sehr hohen Reststrom. Er geht innerhalb der ersten 10 bis 15 Minuten durch Neubildung der Oxidschicht auf den normalen Wert zurück, wenn der Elko noch einwandfrei ist. Es empfiehlt sich daher bei Verwendung lange gelagerter Elkos, sie vor dem Einbau zunächst an eine geringe, und erst nach etwa 30 Minuten an die volle Betriebsspannung anzuschließen (bei Niedervolt-Elkos für Transistorgeräte: direkt mit Batterie verbinden) und sie auf diese Weise noch etwa 1 bis 2 Stunden nachzuformieren. Infolge der sehr dünnen Oxidschicht ergeben sich hohe Kapazitätswerte, andererseits muß die angegebene Maximalspannung beachtet werden. Kurzzeitige Überschreitung kann bereits zur Zerstörung führen!

Elkos werden als Niedervolt-Elkos für Spannungen zwischen 1... 35 V, als Hochvolt-Elkos für Spannungen bis 550 V hergestellt. Die zulässige Spannung ist aufgedruckt. Beim Anschluß ist auf richtige Polung zu achten! Falschpolung führt zur Zersetzung der Oxidschicht und baldiger Zerstörung, deshalb ist auch ein Betrieb an reiner Wechselspannung nicht zulässig (lediglich für Versuchs- und Meßzwecke dürfen für einige Sekunden Dauer einige Volt Wechselspannung angelegt werden). Die Polung ist meist aufgedruckt (bei Rollkondensatoren); in der Ausführung als Becherkondensator liegt der Minuspol fast immer am Gehäuse.

Alle Kondensatoren werden durch zwei Werte gekennzeichnet: Kapazitätswert und maximal zulässige Spannung. Diese darf auch nicht kurzzeitig überschritten werden, da das auch bei keramischen und Foliekondensatoren zum Durchschlagen der Isolierung führen kann. Der Kondensator hat dann Schluß und ist unbrauchbar.

Ultrakurzwellen-Rundfunk (UKW)

Seit einigen Jahren ist der Ultrakurzwellenrundfunk oder, wie man vereinfacht sagt, der UKW-Rundfunk, nicht mehr aus der Rundfunktechnik wegzudenken. Gegenüber den herkömmlichen Wellenbereichen der Lang-, Mittel- und Kurzwelle hat der UKW-Bereich zahlreiche Vorzüge, so daß wir ihn hier wenigstens kurz erwähnen müssen. Seine technischen Grundlagen sind allerdings so kompli-



ziert, daß wir sie im Rahmen dieses Buches nicht besprechen können.

Aus diesem Grunde kommt eine praktische Betätigung auf dem UKW-Gebiet nur für fortgeschrittene, erfahrene Bastler und Amateure in Betracht. Wir wollen deshalb nur kurz die Verbesserungen aufzählen, die der UKW-Bereich mit sich bringt.

Ultrakurzwellen — der Name sagt schon, daß wir es hier mit sehr hohen Sendefrequenzen zu tun haben (vergleiche Seite 163). Derartig hohe Frequenzen nähern sich in ihren Ausbreitungseigenschaften bereits denen des Lichtes — große Reichweiten lassen sich also damit im allgemeinen nicht erzielen, aber das ist im Falle der Rundfunkversorgung eines Landes eher ein Vorteil. Es kann dann nicht so leicht geschehen, daß sich verschiedene Sender gegenseitig stören.

Die Technik — insbesondere die der Empfänger — ist bei UKW prinzipiell nicht anders, als wir sie kennen (vom Modulationsverfahren abgesehen, wie wir gleich sehen werden), aber praktisch bestehen doch große Unterschiede.

Die Bauteile eines UKW-Empfängers haben elektrisch sehr kleine Werte. Spulen bestehen oft nur noch aus zwei oder drei Drahtwin-

dungen. Jede noch so kurze gerade Leitung wirkt schon wie eine kleine HF-Drossel, so daß es schwierig wird, zwei etwas auseinanderliegende Anschlüsse so miteinander zu verbinden, daß sie wie bisher als elektrisch einwandfrei verbunden angesehen werden können. Schwingkreise enthalten oft keinen Kondensator mehr, denn die erforderliche geringe Kapazität wird schon durch die Kapazität der Sockelstifte der angeschlossenen Röhre und deren Elektroden gegeneinander gebildet.

Verbiegen wir bei einem solchen Schwingkreis eine der Zuleitungen um wenige Millimeter, so hat das die gleiche Wirkung, als hätten wir im Mittelwellenschwingkreis den Drehkondensator verstellt! Auch ein Widerstand kann wie eine HF-Drossel wirken und mit seinen eigenen Zuleitungsdrähten (die gegeneinander eine wenn auch winzige Kapazität bilden) sogar einen regelrechten Schwingkreis ergeben, wenn die Kohleschicht auf dem Widerstand spiralförmig geschliffen ist!

Sogar das harmlose Metallchassis des UKW-Empfängers kann unversehens Schwingkreiseigenschaften bekommen und der UKW-ZF-Teil zum ungewollten Sender werden, falls ein einziger Masseanschluß falsch gewählt wird! Der UKW-Bereich ist deshalb sozusagen die „Hohe Schule der Rundfunkbasterei“.

Die Vorzüge des UKW-Rundfunks ergeben sich vor allem aus der wesentlich besseren Klangqualität und weitgehender Störungsfreiheit. Während auf Lang-, Mittel- und Kurzwelle nur die NF-Schwingungen bis höchstens 4,5 kHz übertragen werden können – das hängt mit dem gegenseitigen Frequenzabstand der Rundfunksender und dem Begriff der Bandbreite zusammen, auf dessen Erklärung wir zur Vereinfachung in diesem Buch verzichten mußten –, können beim UKW-Sender auch die höchsten Töne bis zu 15 kHz übertragen werden. UKW-Empfang klingt deshalb bedeutend natürlicher.

Die größere Freiheit von atmosphärischen und sonstigen Störungen hängt vor allem damit zusammen, daß für UKW ein anderes Modulationsverfahren benutzt wird. Bisher haben wir nur die Amplitudenmodulation (abgekürzt AM) besprochen. Sie wird auf dem Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich angewendet, weshalb diese Bereiche zusammen auch als AM-Rundfunkbereiche bezeichnet werden. Für UKW benutzt man jedoch die Frequenzmodulation (abgekürzt FM). Deshalb ist die Wirkungsweise eines FM-Demodulators im Empfänger auch ganz anders und komplizierter als die des AM-Demodulators, den wir kennenlernten, und der im Prinzip nichts weiter als eine Gleichrichtung ist. Eine UKW-Sendung könnte man also mit unseren hier erklärten Schaltungen nicht empfangen,

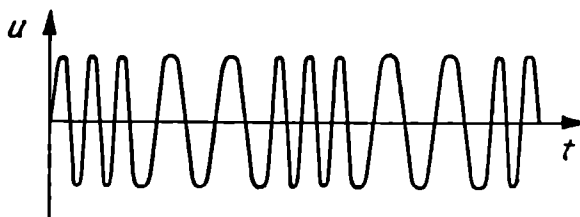
auch nicht, wenn wir alle Schwingkreise für die UKW-Frequenzen auslegen würden.

Während bei der AM die Amplitude der HF-Trägerwelle im Takt der NF geändert wird, bleibt die Amplitude beim FM-Verfahren konstant. Die NF ändert die Frequenz des UKW-Senders um einen geringen Betrag. Eine frequenzmodulierte HF-Schwingung sieht dann so aus, wie es Abb. 193 zeigt. Ein Vergleich mit der amplitudenmodulierten HF-Schwingung des AM-Verfahrens (Abb. 166 unten) macht die Unterschiede beider Verfahren deutlich.

Auf nähere Einzelheiten der FM-Modulation und FM-Demodulation können wir hier nicht eingehen. Wir wollen uns nur merken, daß ein UKW-Empfänger (man benutzt dafür nur Super) grundsätzlich aus den gleichen Stufen besteht wie der AM-Super. Die Reihenfolge der Baugruppen ist also ähnlich der in Abb. 181, lediglich vor der Mischstufe ist oft noch eine HF-Vorstufe (HF-Verstärker) angeordnet, außerdem ist die Schaltung des ZF-Verstärkers etwas anders (eine Schwundregelung ist dort nicht vorhanden, dieses Problem ist bei UKW nicht ganz so kritisch und wird bei dem FM-Verfahren anders gelöst). Auch der Demodulator ist anders und komplizierter aufgebaut. Die ZF ist beim UKW-Empfang meist auf 10,7 MHz festgelegt.

Für UKW sind bestimmte spezielle Antennenformen erforderlich. Wir kennen sie alle als Dipolantennen – sie sind heute ja auf fast jedem Hausdach zu sehen. Die Antennentechnik ist bei UKW wegen des besonderen Verhaltens dieser sehr hohen Frequenzen ebenfalls komplizierter als bei den AM-Bereichen. Tatsächlich hat die UKW-Antenne in ihren Eigenschaften viele Ähnlichkeiten mit dem Verhalten eines Schwingkreises.

Abbildung 193



TEIL III



WIR WOLLEN ZEIGEN, WAS WIR GELERNT HABEN

(Bauanleitungen)

Allgemeine Hinweise

Im letzten Teil dieses Buches sollen nun einige Bauanleitungen gegeben werden, bei deren Nachbau wir das in den ersten beiden Teilen Gelernte unmittelbar anwenden können. Wir werden uns dabei zunächst in der Transistortechnik üben, weil sie für Bastelzwecke einfacher und weniger materialaufwendig ist. Danach folgen einige Bauanleitungen mit Röhren. Die Schaltungen beschreiben wir nur kurz, und für Aufbau und Inbetriebnahme geben wir nur wichtige Hinweise, da uns die grundsätzlichen Funktionen bereits bekannt sind. Voraussetzung ist natürlich, daß wir den ersten und zweiten Teil dieses Buches gründlich studiert haben — es hat keinen Zweck und bringt uns nur Enttäuschungen, wenn wir Schaltungen nachbauen, deren Wirkungsweise wir nicht vollständig verstanden haben. So sehr es uns auch verlockt, gleich mit dem Bau eines fertigen Gerätes zu beginnen, so wichtig sind die Versuche, die wir in den ersten beiden Teilen beschrieben haben. Ihre praktische Durchführung bringt uns nämlich die ersten praktischen Erfahrungen, ohne die wir hier nicht auskommen können!

Auf mechanische Fragen, wie Chassisbau und Blechbearbeitung, gehen wir hier nicht ein. Viele ausführliche Hinweise und alles, was wir dazu sonst wissen müssen, finden wir in dem im Anhang aufgeführten Buch „Amateurtechnologie — von der Schaltung zum Gerät“, das sich gut als Ergänzung zu unserem Buch eignet und alle nötigen Anleitungen auch für Gehäusebau, Konstruktionsfragen und vieles andere mehr bietet.

Der wichtigste Arbeitsgang, den ein Radiobastler beherrschen muß, ist das saubere Löten aller Verbindungen. Andere Verbindungsarten als Lötverbindungen darf es in unserem fertigen Gerät nicht geben! Bei Geräten, die wir längere Zeit betreiben wollen, soll als Löt Hilfsmittel nur Kolophonium benutzt werden.

In allen Radiobastelbüchern wird vor der Anwendung von Lötfett zu Recht gewarnt. Trotzdem wollen wir hier ein Zugeständnis machen: Versuchsgeräte, die wir bald wieder zerlegen und die keine besonders kostbaren Bauteile enthalten, dürfen wir ausnahmsweise auch einmal mit Lötfett löten. Aber nur unter der einen Bedingung: Auf eine Lötstelle gehört nur eine winzige Spur Lötfett! Wenn wir beobachten, daß während der Lötung auch nur geringe Spuren des

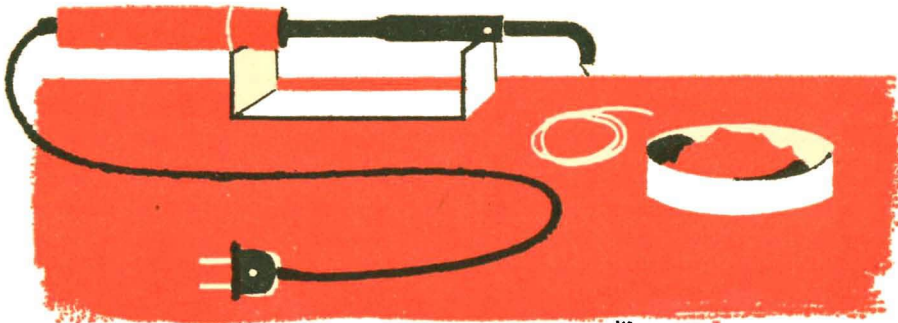
Lötfettes beiseitelaufen, dann haben wir schon zuviel Lötfett genommen. Die Reste müssen wir dann mit einem Lappchen sorgfältig abwischen. Der Vorteil bei der Verwendung von Lötfett ist gerade für den Bastelanfänger eine bedeutende Sicherheit dafür, daß die Lötstelle auch wirklich guten Kontakt gibt. Das zu erreichen, ist bei der Verwendung von Kolophonium Übungssache, dann aber nicht schwierig. Nur — es will eben gelernt sein. Sobald wir im Löten sicher sind, benutzen wir nur noch Kolophonium und lassen das Lötfett ganz und gar von unserem Arbeitsplatz verschwinden.

Was wir im Umgang mit Halbleitern zu beachten haben, ist auf Seite 228 schon gesagt worden. Hier wollen wir nur noch einen Tip für Versuchsaufbauten mit Transistoren geben: Als Chassis für Transistorschaltungen genügt schon eine zweireihige Lötösenleiste, die es im Handel zu kaufen gibt. Fast alle Teile können auf ihr durch Anlöten befestigt werden, so daß wir kaum Befestigungsarbeiten durchzuführen brauchen.

Hingewiesen sei auch auf die richtige Messung von Spannungen mit dem Voltmeter. Wir wissen, daß der Eigenstromverbrauch des Voltmeters dabei eine Rolle spielt. Trotzdem wird das in der Praxis oft übersehen, und dadurch kommen große Meßfehler zustande. Deshalb soll hier noch einmal ausdrücklich auf die Seiten 57 bis 62 und 99 bis 101 hingewiesen werden; dort sind diese Zusammenhänge bereits erklärt worden.

Wenn wir Spannungen hinter hohen Widerständen messen (zum Beispiel die Anoden- und Schirmgitterspannungen der EF 80 in Abb. 186), dann müssen wir vorher überlegen, mit welchem Meßfehler wir zu rechnen haben — das kann man nach einiger Übung auch ohne Rechnen ziemlich genau abschätzen, wenn man weiß, worauf es dabei ankommt.

Oft lassen sich Messungen auch indirekt durchführen. Wenn wir beispielsweise wissen wollen, mit welchen Gittervorspannungen die beiden Röhren in Abb. 186 arbeiten, dann messen wir nicht am Git-



ter, sondern am Katodenwiderstand, da die dort abfallende Spannung ja als Gittervorspannung wirksam wird! Wir vermeiden dadurch die Messung am hochohmigen Gitterwiderstand. Bei Röhrenschaltungen müssen wir immer daran denken, daß wir es hier mit gefährlich hohen Spannungen zu tun haben. Deshalb gilt grundsätzlich: Netzstecker heraus, ehe wir das offene Gerät berühren! Dann müssen wir immer noch daran denken, daß in den Elkos im Netzteil (z. B. Abb. 188) auch nach dem Ausschalten noch Spannung gespeichert sein kann, die dazu ausreicht, uns einen empfindlichen Denkkzettel zu verpassen. Deshalb ziehen wir nicht nur den Netzstecker ab, sondern überbrücken danach (nicht etwa, wenn noch eingeschaltet ist!!!) kurze Zeit den Siebkondensator und entladen ihn so. Das Überbrücken kann mit der Schraubenzieherklinge geschehen.

Ein unverschlossenes Gerät darf nicht am Netz angeschlossen sein, wenn wir nicht dabei sind; das größte Unheil kann geschehen, wenn zufällig ein anderer das Gerät berührt!

Manchmal werden wir bei unseren Geräten nicht ohne Abschirmungen auskommen. Deshalb dazu noch ein Hinweis. Leitungen, die sehr hochohmig sind und geringe NF-Spannungen führen (also besonders die Steuergitterzuleitungen in NF-Verstärkern), fangen leicht Netzbrummen ein. Die in der Nähe vorhandenen Netzleitungen oder auch die Heizspannungsleitungen streuen ihre Spannung kapazitiv auf diese Leitungen ein. Wir müssen sie deshalb so kurz wie möglich machen. Gitterwiderstände und Gitterkondensatoren werden deshalb immer ganz kurz direkt an die Röhrenfassung gelötet. Wo einmal längere NF-Leitungen nicht zu umgehen sind (Zuleitungen zu Potentiometern zum Beispiel), verwenden wir Abschirmleitung – das ist mit Metallgeflecht umspinnene Leitung. Das Metallgeflecht kommt dann an *einem* Ende der Leitung an Masse.

HF-Leitungen können wir auf diese Art allerdings kaum abschirmen, denn der Metallmantel des Abschirmkabels wirkt gegen die eigentliche Leitung wie ein Kondensator, der immerhin je nach Leitungslänge einen Wert von einigen 100 pF annehmen kann! Hohe Frequenzen fließen dann über diese Leitungskapazität nach Masse ab!

Wo kritische Anschlüsse dicht nebeneinanderliegen (vor allem an den Röhrensockeln, dort sind z. B. der Heizanschluß und der Gitteranschluß mit seinen Bauteilen dicht benachbart!) schirmen wir diese notfalls gegeneinander mit kleinen zwischengelöteten und mit Masse verbundenen Blechwänden ab. Konservenblech eignet sich dazu vorzüglich, es läßt sich mit der Schere schneiden und leicht löteten.

Noch eine kritische Leitung kann es in unserem NF-Verstärker geben: die Anodenleitung von der Endröhre zum Ausgangsübertrager (z. B. in Abb. 186). Sie führt gegen Masse eine ziemlich hohe NF-Spannung, die bei ungünstiger Leitungsführung kapazitiv auf die Bauteile des Verstärkereinganges (in Abb. 186 vom NF-Anschluß über P 1 und Gitterkondensator bis zum Gitter der EF 80) rückkopplern kann. Rückkopplung bedeutet aber Selbsterregung – der Verstärker beginnt als Oszillator zu schwingen und pfeift oder heult dann unerträglich. Mitunter liegt diese „wilde Schwingung“ frequenzmäßig über dem hörbaren Bereich. Daß der Verstärker schwingt, merken wir dann manchmal nur an der sehr leisen und völlig verzerrten Wiedergabe. Vorsicht – beim Auftreten von Selbsterregung kann die Endröhre zu Schaden kommen! Zum Netzteil ist ebenfalls noch ein Hinweis nötig. In Abb. 188 verbinden wir stets die Mittelanzapfung der Netztrafo-Anodenwicklung (L 4/L 5) dort mit Masse, wo auch der Ladekondensator C1 an Masse liegt.

Alle anderen Bauteile des Verstärkers, die an Masse liegen, löten wir nicht einfach irgendwo an das Chassis, sondern sehen bei jeder Röhrenfassung einen vom Chassis isolierten Massepunkt vor (bei den Fassungen für die 80er E-Röhren ist dafür der starke Mittelstift bestimmt!), an den alle zu dieser Stufe gehörenden Bauteile an Masse gelegt werden. Die einzelnen Massepunkte der Stufen (bei 80er E-Röhren also die Mittelstifte der Sockel) verbinden wir mit einem dicken isolierten Draht untereinander.

Lade- und Siebkondensator im Netzteil sitzen als einzige Bauteile direkt auf dem Chassis, und an dieser Stelle werden auch die Stufenmassepunkte mit dem Chassis verbunden. Das Chassis hat also nur an einer einzigen Stelle Verbindung mit den in der Schaltung angegebenen Massepunkten! Dadurch vermeiden wir von vornherein den sogenannten Erdschleifenbrumm, der sonst durch die im Chassisblech kreisenden Ströme (Rückstrom vom Ladekondensator!) in die Schaltung geraten könnte und dann schwer zu beseitigen ist. Diese Darlegungen gelten nur für Röhrengeräte. Transistorschaltungen sind weit niederohmiger und daher unkritischer aufzubauen.

Alle hier gezeigten Schaltungen sind erprobt und haben keine besonders kritischen Bestandteile. Wenn wir also nicht gleich Erfolg haben, dann kann das nur an einem Mangel im Aufbau liegen. Entweder haben wir nicht sorgfältig gearbeitet oder die Einzelteilanordnung nicht gut getroffen (wir ordnen alle Teile so an, daß sich überall die kürzeste Leitungsführung ergibt; stets nach dem Grundsatz: Zweckmäßigkeit geht vor Schönheit!), oder eines der benutzten Einzelteile ist nicht einwandfrei. Deshalb wollen wir grundsätz-

lich nur neue, unbenutzte Teile verwenden, soweit es sich um billige Artikel, wie Widerstände und Kondensatoren, handelt.

Damit wir uns über die eine oder andere Einzelheit Klarheit verschaffen können, ist in den Baubeschreibungen überall dort ein Hinweis auf vorangegangene Buchstellen angegeben, wo wir weitere Hinweise zu dieser Schaltung finden. Einfachheit halber geben wir dann nur jeweils die Seitenzahl in Klammer an, bei der wir nachschlagen können.

Transistorschaltungen

Einfacher Detektorempfänger mit einer Diode

Eine zum Nachbau geeignete Schaltung lernten wir bereits kennen (Abb. 175 und Seite 265 bis 268). In Abb. 194 wird die Schaltung nochmals gezeigt. Die Windungszahl der Schwingkreisspule ist etwas vom verwendeten Spulenkern abhängig. Sollten wir nicht den ganzen Mittelwellenbereich erfassen, so wickeln wir beim Anschluß 3 einige Windungen ab oder zu. Geeignet sind alle Spulenkörper mit HF-Eisenkern 8 mm \varnothing , 10 ... 20 mm lang.

Abb. 195 zeigt, wie wir die Einzelteile etwa anordnen können. Als Gehäuse eignet sich eine kleine Pappschachtel oder Seifendose in der Größe einer Zigarettenpackung. Für die Verbindung Diode zu Spulenanschluß 5 können wir im Gehäuse einen Lötstützpunkt (Schraube mit untergelegter Lötöse) anbringen, damit die Diode festliegt. Für den Anschluß von Antenne, Erde und Kopfhörer verwenden wir Steckbuchsen und Bananenstecker.

Dieser Empfänger hat keine hohe Leistung. Für Behelfsantennen eignet er sich nicht, sofern wir nicht dicht bei einem Ortssender wohnen. Bei Verwendung einer kräftigen Außenantenne und der Wasserleitung als Erde können wir aber mit einem guten Kopfhörer außer dem Ortssender noch mehrere andere Stationen empfangen. Wer besonders klein bauen will, kann auf den Drehko ver-

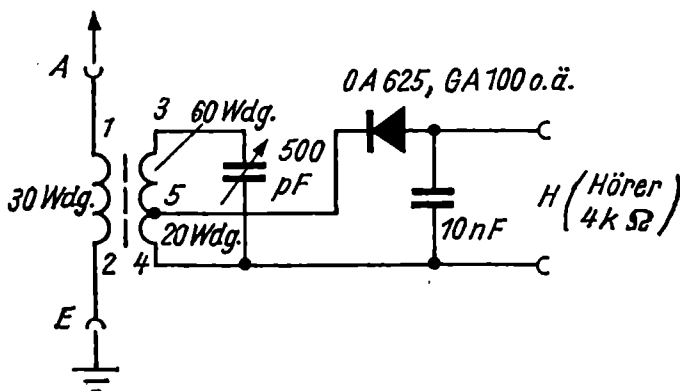


Abbildung 194

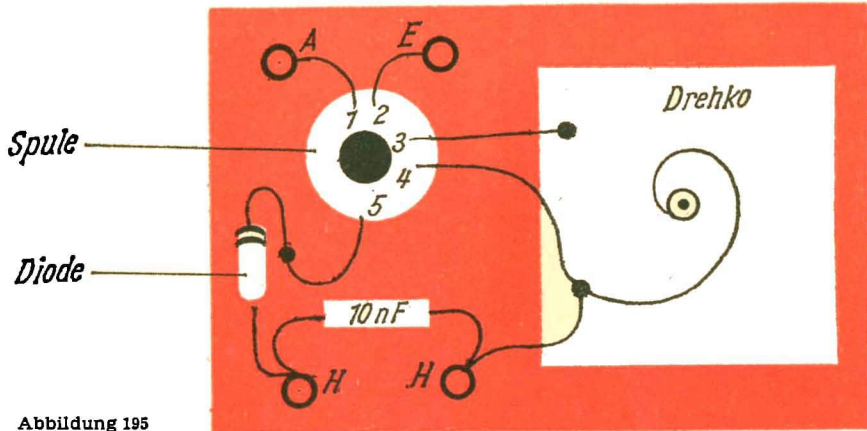


Abbildung 195

zichten und ihn durch einen Festkondensator ersetzen. Wenn die Frequenz des Ortssenders – der dann als einziger empfangen werden kann – bekannt ist (Rundfunkzeitung nachsehen!), können wir den Wert des Festkondensators nach der Gleichung Seite 241 errechnen, wobei wir L in die Formel mit $0,2 \text{ mH}$ einsetzen. Infolge der Ungenauigkeit der Rechnung und der Fertigungstoleranzen der Einzelteile stimmt der errechnete Wert für C nur ungefähr. Wir stimmen den Schwingkreis dann nach Gehör durch Zu- oder Abwickeln einiger Windungen (Anschluß 3) oder auch durch Verstellen des Spulenkernes genau ab. Der ganze Empfänger findet dann bequem in einer Streichholzschachtel Platz.

Detektorempfänger mit einer Transistor-NF-Stufe

Abb. 196 zeigt, wie die Lautstärke des Empfängers aus Abb. 194 durch Nachfügen einer Transistor-NF-Verstärkerstufe gesteigert werden kann. Die Verstärkerstufe ist hier sehr einfach aufgebaut.

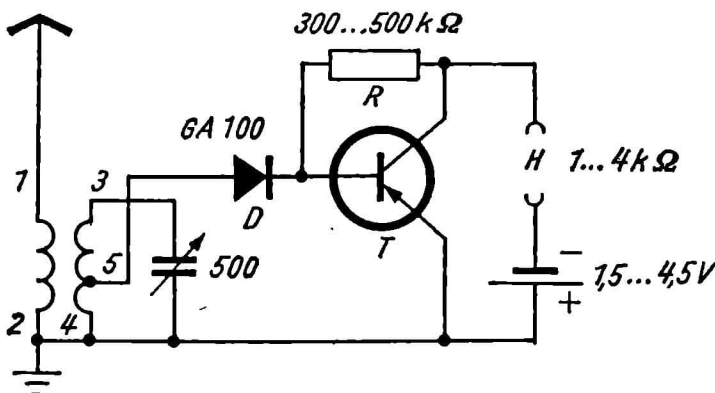


Abbildung 196

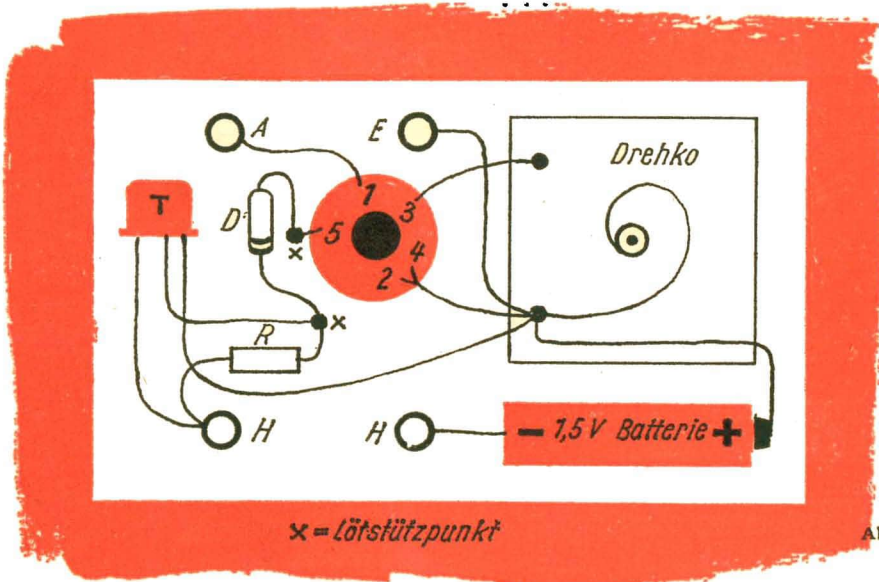


Abbildung 197

Widerstand R hängt vom Wert der Stromverstärkung des benutzten Transistorexemplars ab (Seite 226), er wird innerhalb der angegebenen Grenzwerte nach Versuch ausprobiert, ist aber nicht sehr kritisch. Hörer H liegt direkt im Kollektorkreis des Transistors und soll ein hochohmiger Radiokopfhörer, eventuell auch ein hochohmiger Klein-Ohrhörer (ungünstiger!) sein. Als Batterie reicht bereits eine 1,5-V-Kleinstabzelle (Gnomzelle) aus, die wenigstens 100 Betriebsstunden ergibt, da das Gerät weit weniger als 1 mA aufnimmt. Ein Einschalter ist überflüssig, da die Batterie beim Abziehen des Kopfhörers abgetrennt ist.

Als Transistoren eignen sich alle beliebigen Kleintypen zwischen 25 mW und 150 mW Belastbarkeit; deshalb wird hier keine bestimmte Type vorgeschrieben. An Stelle der Diode GA 100 können auch alle ähnlichen Diodentypen benutzt werden. Abb. 197 gibt wieder einen Aufbauvorschlagn, hierbei ist als Batterie eine 1,5-V-Gnomzelle angenommen worden. Für die eigentliche Detektorschaltung gilt alles bei Abb. 194 Gesagte.

Detektorempfänger mit drei Transistoren für Lautsprecherempfang

Für Lautsprecherbetrieb ist eine wenigstens 3stufige NF-Verstärkung erforderlich. Abb. 198 zeigt eine Schaltung dafür.

Der Schwingkreis arbeitet wie in den vorangegangenen Beispielen.

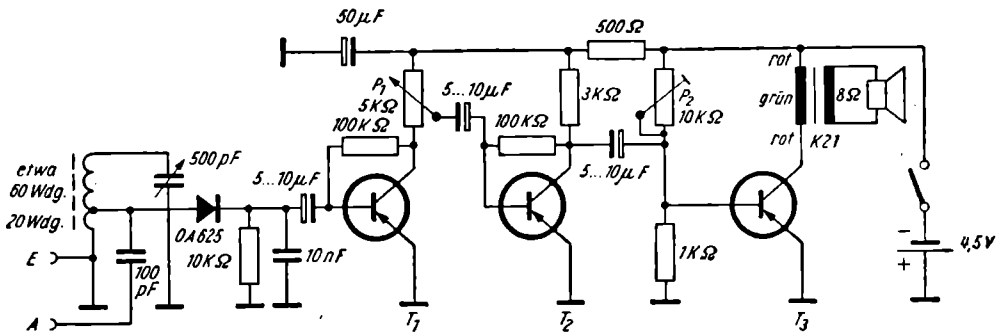


Abbildung 198

Die Antenne ist direkt an den Schwingkreis angekoppelt, dessen untere 20 Windungen hier gleichzeitig als Antennenspule arbeiten. Die Spule wird dadurch einfacher.

Hinter der Diode liegt der bekannte 10-nF-Kondensator gegen Masse (Seite 265). Der ihm jetzt noch parallel liegende Widerstand hat die Aufgabe, den Gleichstromkreis der Diode zu schließen, da die NF-Spannung jetzt über einen Elko abgenommen wird. Ohne den 10-k Ω -Widerstand würde der 10-nF-Kondensator vom Gleichspannungsanteil der gleichgerichteten HF aufgeladen werden und dann die Diode sperren.

Die drei NF-Verstärkerstufen T 1, T 2 und T 3 arbeiten nach dem bei Abb. 145 besprochenen Prinzip. Die Basiswiderstände von T 1 und T 2 sind nicht an Minus, sondern am Kollektor angeschlossen. Dadurch wird eine leichte, die Verzerrungen mindernde Gegenkopplung erzielt, die vor allem die hier durch Temperaturschwankungen entstehenden Kollektorstromänderungen der Transistoren ausgleicht. (Halbleitersperrschichten ändern ihre Daten bei Temperaturänderungen, Seite 225 und 228!)

Die mit 100 k Ω angegebenen Basiswiderstände hängen im Wert von den Exemplardaten der Transistoren ab und sind nach Versuch auf geringste Verzerrungen bei größter Lautstärke auszuprobieren. Die in Abb. 198 angegebenen Werte sind Richtwerte und gelten für mittlere Werte der Stromverstärkung des Transistors.

Der Kollektorwiderstand von T 1 dient gleichzeitig als Lautstärkeregler (Potentiometer P 1). Schleifer zum Kollektor: Größte Verstärkung. Im Kollektorkreis von T 3 liegt der Anpaßübertrager für den Lautsprecher. Wenn wir dafür einen Lautsprecher mit 6...8 Ω Impedanz verwenden, ist als Übertrager der Typ K 21 (aus dem „Sternchen“-Kleinempfänger) oder K 31 geeignet. Die Mittelanzapfung (grüner Draht) bleibt dann frei. Sehr günstig dazu der „Sternchen“-Kleinlautsprecher Typ LP 559, der bei guter Qualität auch sehr preiswert ist, oder andere Kleinlautsprecher (Typ 121 K vom „Mikki“ usw.).

P 2 ist der Einstellregler für den Kollektorstrom von T 3. Zur Einstellung wird in die Kollektorleitung von T 3 ein Milliampereometer eingeschaltet und mit P 2 auf etwa 10 ... 12 mA Kollektorstrom eingestellt. Für etwas geringere Lautstärken genügen auch bereits 6 ... 8 mA, wodurch die Lebensdauer der Batterie fast verdoppelt wird. Vorsicht, wenn P 2 zu geringen Wert annimmt, wird T 3 überlastet und zerstört, deshalb P 2 vor dem Einschalten auf höchsten Widerstandswert und nicht ohne Instrument einstellen! Nach Einstellung P 2 mit einem Lacktropfen festlegen oder durch gleichgroßen Festwiderstand ersetzen. (Zu diesem Zweck wird P 2 nach beendeter Einstellung – ohne ihn zu verstellen! – ausgebaut und durch Strommessung an bekannter Spannung nach dem Ohmschen Gesetz dessen Widerstand ermittelt. Dabei genau arbeiten!)

Als Batterie eignet sich eine Taschenlampenbatterie, mit der etwa 100 ... 120 Betriebsstunden erreichbar sind.

Der Elko 50 μF und Widerstand 500 Ω bilden zusammen ein Siebglied (RC-Tiefpaß, Funktion entspricht Netzteilsiebung ähnlich Abb. 190 und 189b). Dadurch wird vermieden, daß die Spannungsschwankungen der Batterie beim Betrieb der Endstufe auf die Vorstufen zurückwirken und dort zu Rückkopplung über die Speiseleitung (Minusleitung) und Blubbern führen.

Abb. 199 gibt einen Aufbauvorschlag mit günstiger Anordnung der Einzelteile. Angenommen ist die Verwendung des „Sternchen“ Kleinlautsprechers. Als Drehko genügt hier wie in den vorangegan-

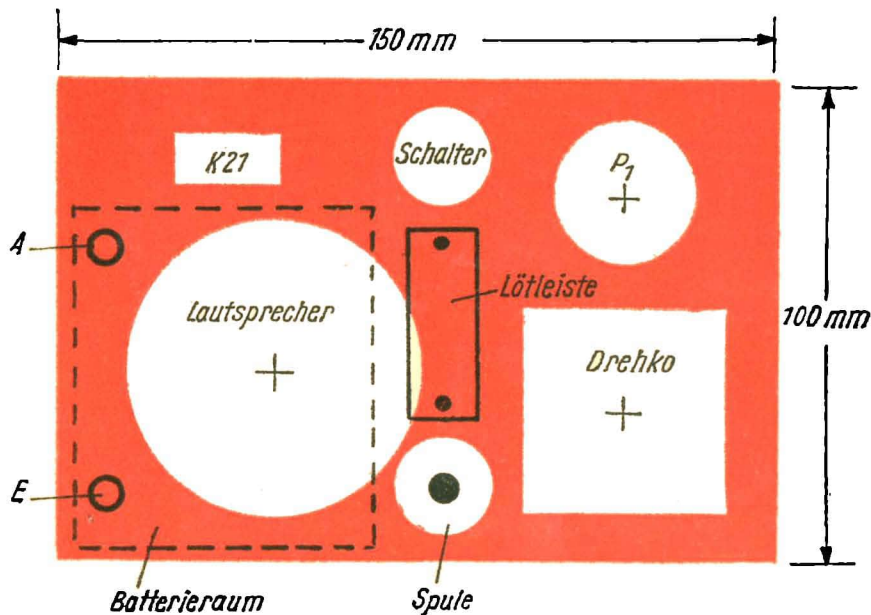


Abbildung 199

genen Schaltungen eine 500-pF-Hartpapier- oder Folieausführung (Quetscherdrehko). Die gesamte NF-Verdrahtung findet auf der Lötösenleiste Platz. Die Batterie liegt flach hinter dem Lautsprecher an dessen Rückwand an. Sie kann am rückwärtigen Deckel mit einem Blechbügel gehalten werden. Als Steckanschlüsse für die Batterie-fahren eignen sich Büroklammern.

Transistoren: Für T 1 und T 2 alle beliebigen Germanium-Kleintransistoren bis 150 mW. Für T 3 ein beliebiger Typ für mindestens 100 mW, besser 150 mW. Nicht geeignet sind Typen unter 100 mW und über 400 mW.

Transistor-Reflex-Audion

Um höhere Empfindlichkeit des Empfängers zu erhalten und ohne Außenantenne auszukommen, muß eine Audionschaltung benutzt werden.

Abb. 200 zeigt eine sehr leistungsfähige und einfache Reflex-Audionschaltung.

Als Antenne wird ein Ferritstab 8×100 mm benutzt (bei längeren oder dickeren Stäben ändern sich die Windungszahlen geringfügig; dann ausprobieren!). Bei A kann zusätzlich eine Außenantenne (2...3 m loser Draht genügt!) angeschlossen werden, wenn die Empfangsbedingungen ungünstig sind.

Diese Schaltung hat zunächst keine Ähnlichkeit mit unserem Beispiel für ein Transistor-Audion (Abb. 177), arbeitet aber im Prinzip ähnlich.

Die Rückkopplung erfolgt über C 1; dieser Trimmer wird nach Versuch einmalig so eingestellt, daß die Rückkopplung sich mit P 1 dicht an den Schwingeneinsatz bringen läßt und bei weiterem Aufdrehen von P 1 die Rückkopplungsschwingungen (Pfeifton bei eingestelltem Sender) nicht schlagartig hart einsetzen, sondern weich anschwingen. Dann kann im Betrieb die Rückkopplung mit P 1 stets bis zum Punkt der fast restlosen Schwingkreisendämpfung und damit der höchsten Empfindlichkeit gebracht werden (Seite 272), ohne daß die Schwingungen einsetzen. C 1 bleibt dann unverändert, und die Rückkopplungsregelung erfolgt betrieblich durch Veränderung der Basisspannung des Transistors über P 1, was eine Verstärkungsänderung des Transistors bewirkt.

Die Demodulation erfolgt hier nicht im Transistor selbst, sondern die verstärkte HF wird vom Kollektor abgenommen und mit zwei Dioden demoduliert (es handelt sich dabei um eine spezielle Spannungsverdopplerschaltung; die dabei aus der HF gewonnene NF-

Spannung hat gegenüber der einfachen Demodulation mit einer Diode den doppelten Wert).

Am Schleifer von P 1 – wo die Basisvorspannung des Transistors abgegriffen wird – steht die NF-Spannung; sie gelangt über den $3\text{-k}\Omega$ -Basiswiderstand zur Transistorbasis zurück, wird dort nochmals verstärkt und vom Kollektor über das Tiefpaßglied $5\text{ k}\Omega/10\text{ nF}$ (das ein Abwandern der HF in den NF-Teil verhindert) abgenommen.

Der Transistor hat hier zugleich zwei Funktionen (deshalb der Name Reflex-Schaltung!): die Verstärkung der HF zum Zwecke der Rückkopplung über C 1 und unabhängig davon eine NF-Verstärkung. Vorteile dieser Schaltung: Einsparung einer zusätzlichen NF-Verstärkerstufe im nachfolgenden NF-Verstärker; außerdem kann die Rückkopplung mit Potentiometer anstatt Drehko geregelt werden. Da das Potentiometer nur Gleichspannung führt, sind seine Zuleitungen nicht kritisch, so daß es an beliebiger Stelle des Gerätes montiert werden kann.

Das Potentiometer regelt die Verstärkung des Transistors und damit auch die NF-Verstärkung. Es wirkt dadurch gleichzeitig als Lautstärkeregler, so daß im NF-Verstärker auch auf diesen verzichtet werden kann und damit ein Bedienungsorgan eingespart wird. Das Siebglied $500\ \Omega$ und $50\ \mu\text{F}$ hat (vergleiche vorhergehende Beschrei-

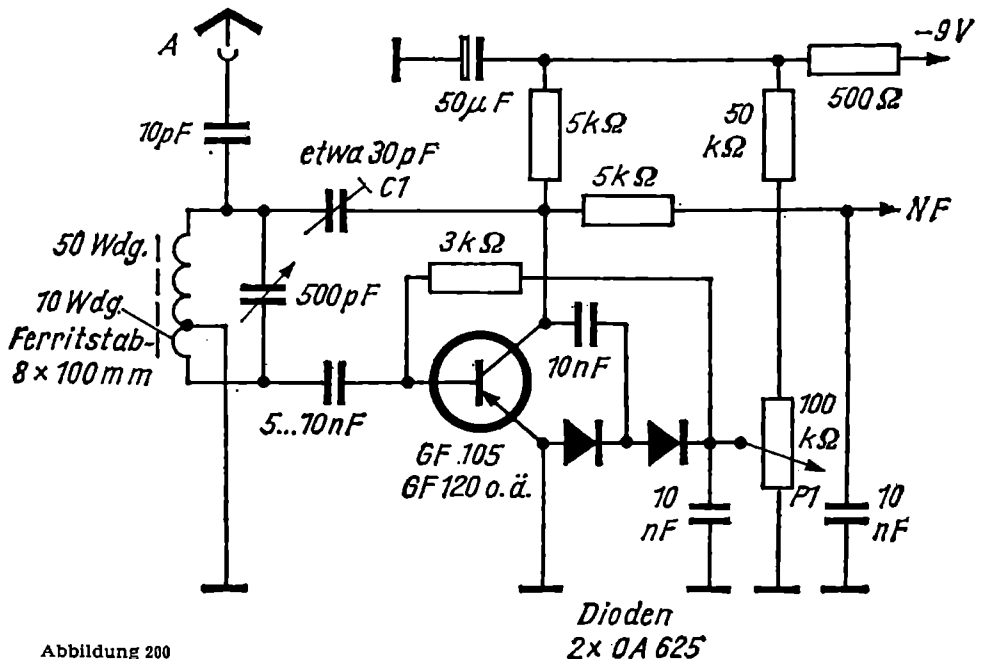
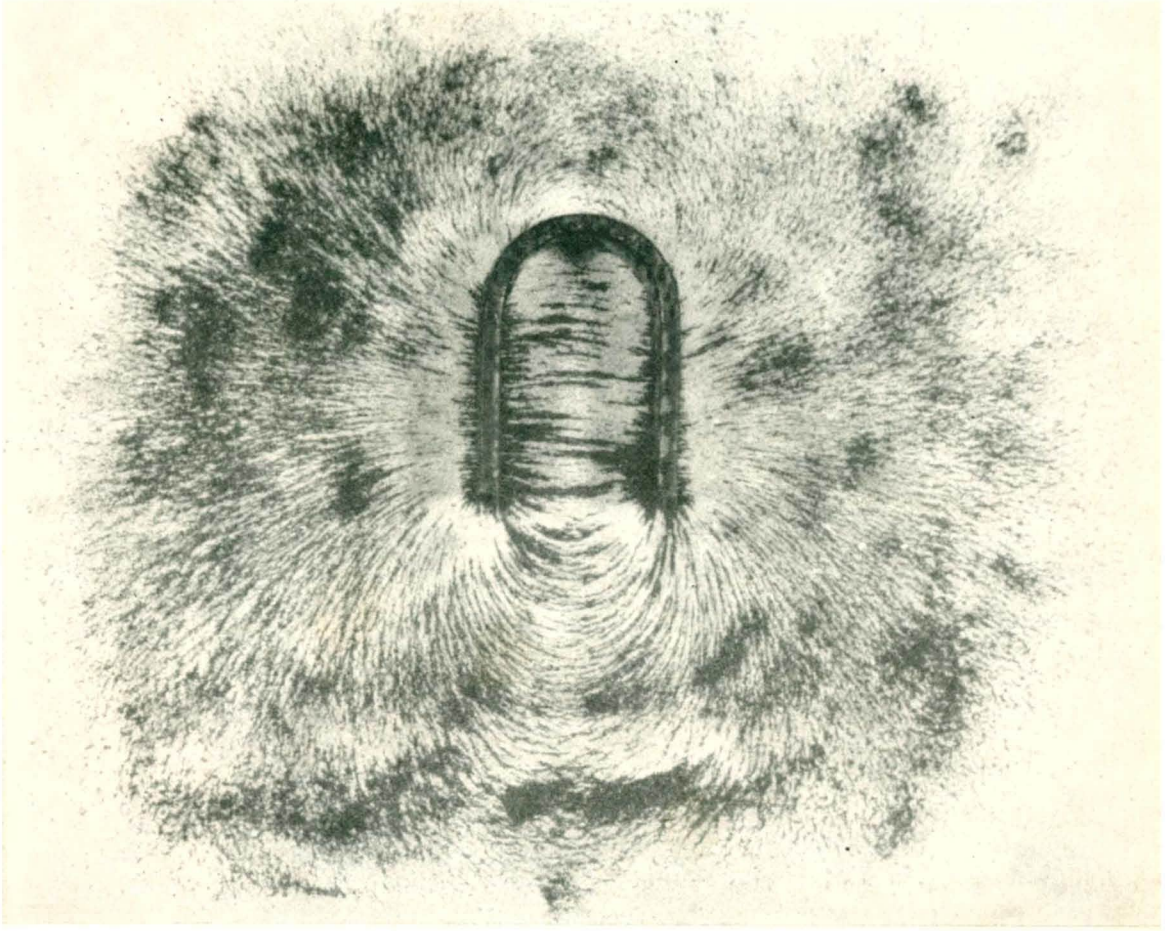
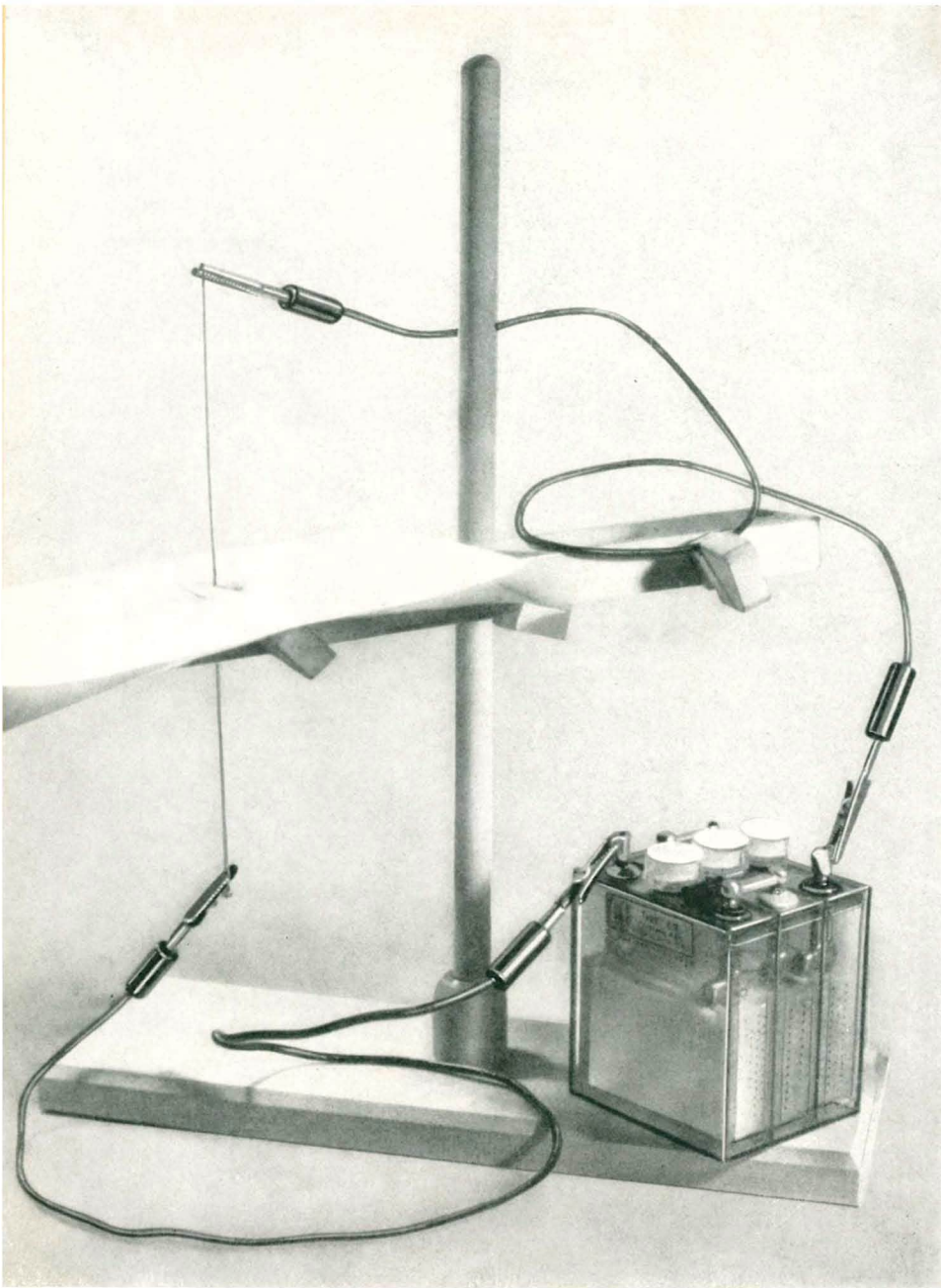


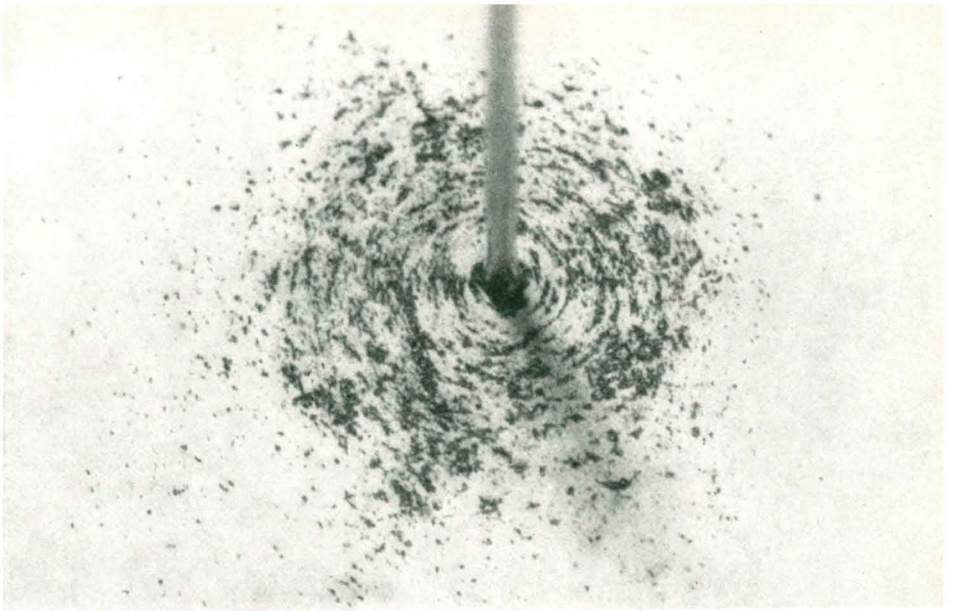
Abbildung 200



Kraftlinienfeld eines Hufeisen-Permanentmagneten, durch Eisenpulver sichtbar gemacht (zu Seite 25 und Abb. 6)

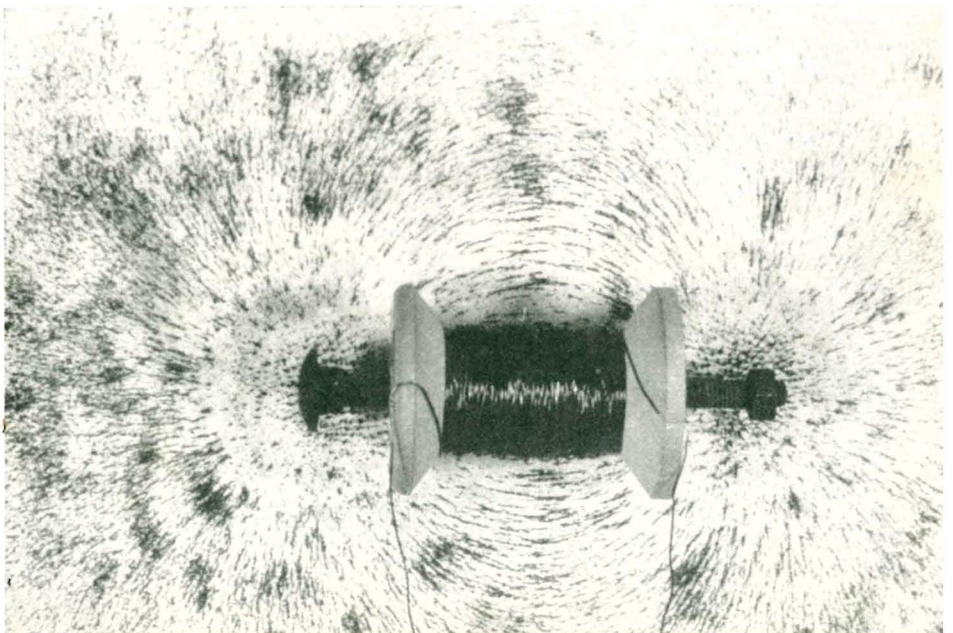


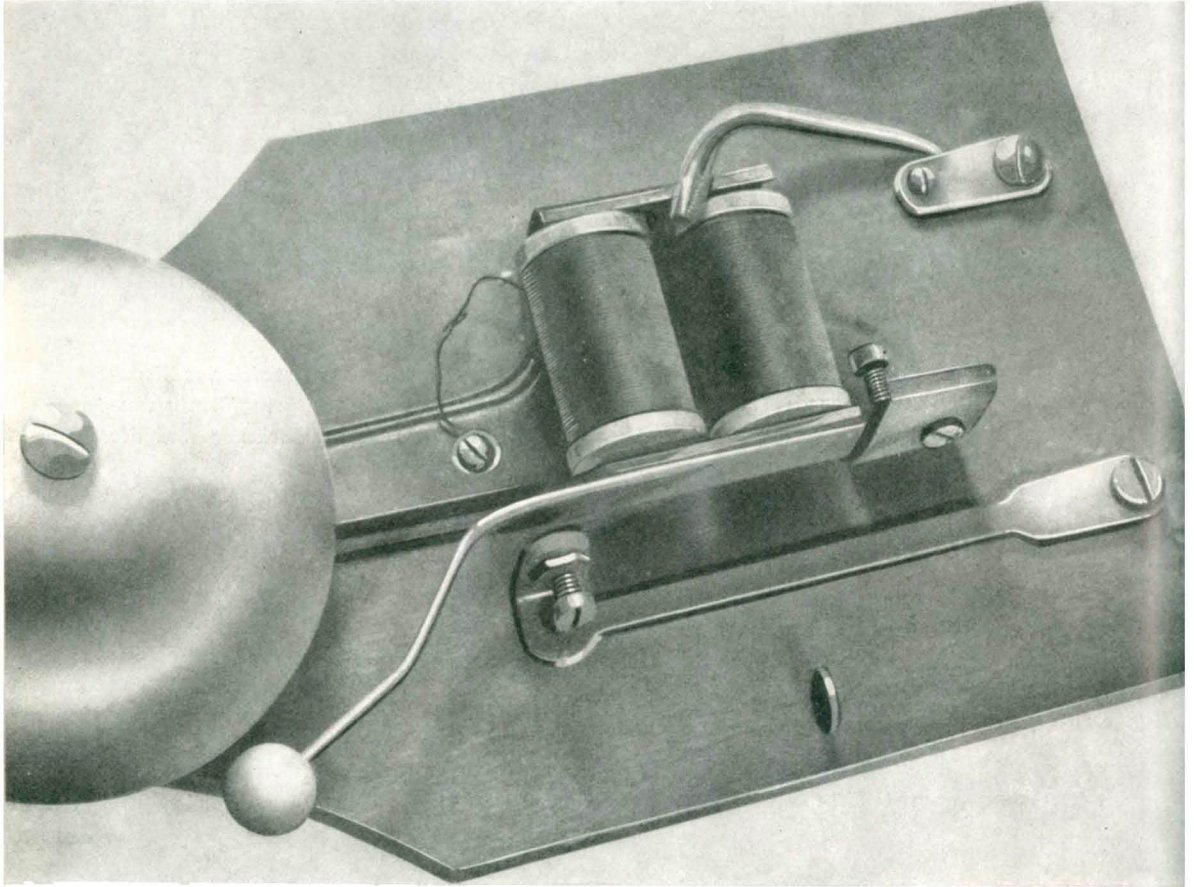
Versuchsaufbau zur Darstellung des magnetischen Kraftlinienfeldes um einen stromdurchflossenen Leiter. Um den senkrecht stehenden starken Draht ist Eisenpulver auf einem Papierblatt aufgestreut. Als Stromquelle dient ein Akkumulator (zu Seite 26 und Abb. 7)



In nächster Umgebung des stromdurchflossenen Drahtes ordnet sich das Eisenpulver längs der magnetischen Kraftlinien, die den Draht ringförmig umgeben. In etwas größerem Abstand ist das Magnetfeld schwächer und die Abbildung im Eisenpulver daher nur noch undeutlich sichtbar

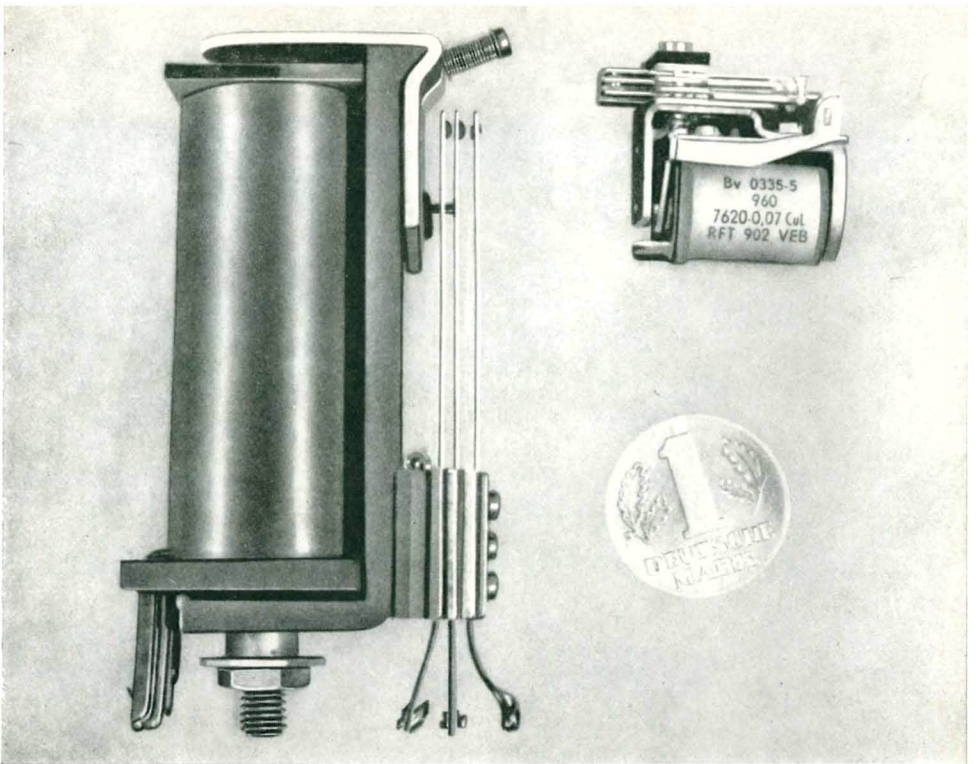
Das magnetische Kraftfeld eines Elektromagneten. Als Spule dient eine drahtbewickelte Garnrolle. Die Bündelung der Kraftlinien und Verstärkung des Magnetfeldes durch einen Eisenkern — hier einen Schraubenbolzen — ist deutlich sichtbar (zu Seite 82 und Abb. 39)



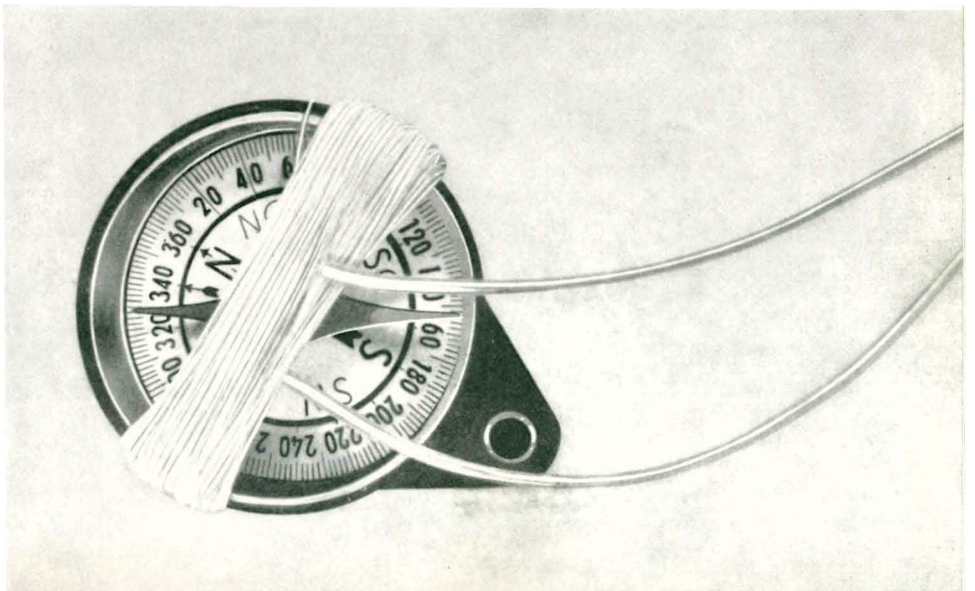


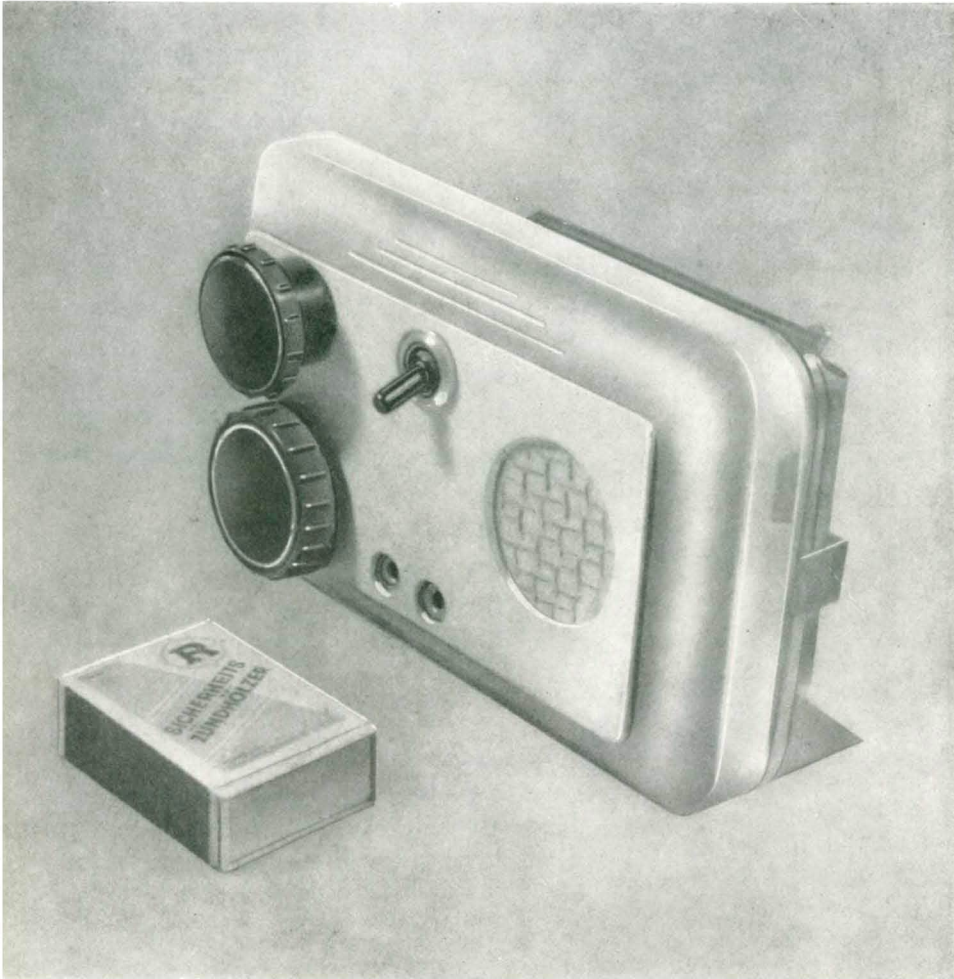
Aufbau eines Gleichstromweckers (Haube abgenommen). Im Vordergrund sind der Anker mit Klöppel und der Unterbrecherkontakt deutlich sichtbar. Beide Spulen auf den Schenkeln des U-förmigen Eisenkerns sind in Serie geschaltet (zu Seite 87 und Abb. 44)

Das Kompaßgalvanometer — ein Hilfsmittel für die in diesem Buch beschriebenen Versuche. Ein einfacher Schülerkompaß erhält eine Drahtbewicklung und dient zum Nachweis von Strömen ►



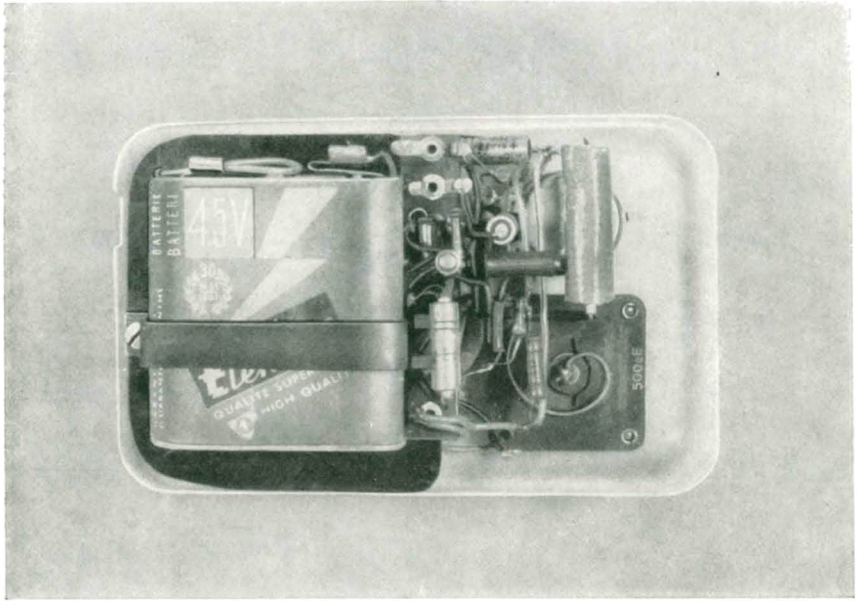
Ausführungsformen von Schwachstromrelais. Links ein Fernmelderelais älterer Bauart. Über der langgestreckten Spule sitzt der winkelförmige Anker auf dem äußeren Schenkel des U-förmigen Eisenkernes. Rechts am Kern ist ein Umschaltkontakt sichtbar. Die mittlere Kontaktfeder berührt bei stromloser Spule die linke. Der anziehende Anker drückt diese Feder über einen gut sichtbaren Isolierstift nach rechts und gegen die rechte Kontaktfeder. Oben im Bild ein modernes Miniaturrelais mit zwei derartigen Umschaltkontakten. Als Größenvergleich dient die Münze (zu Seite 88)



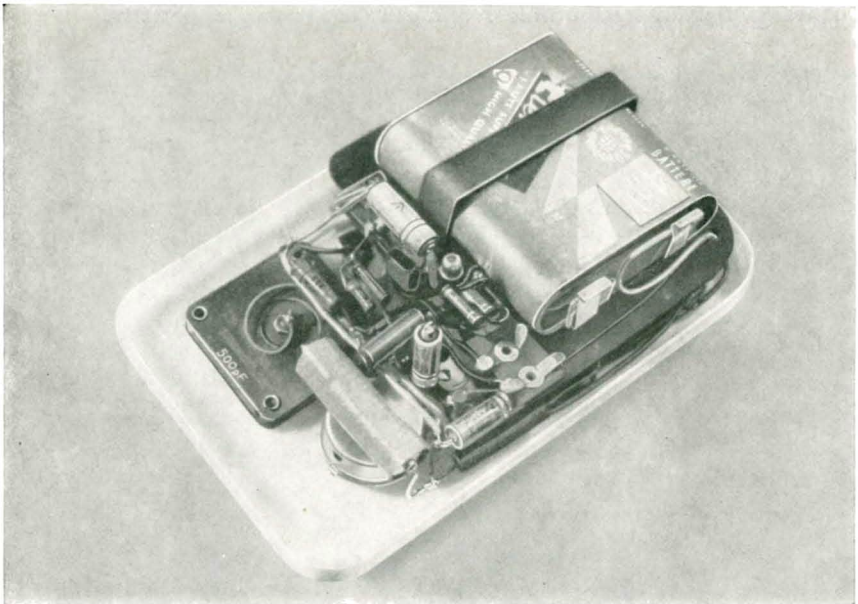


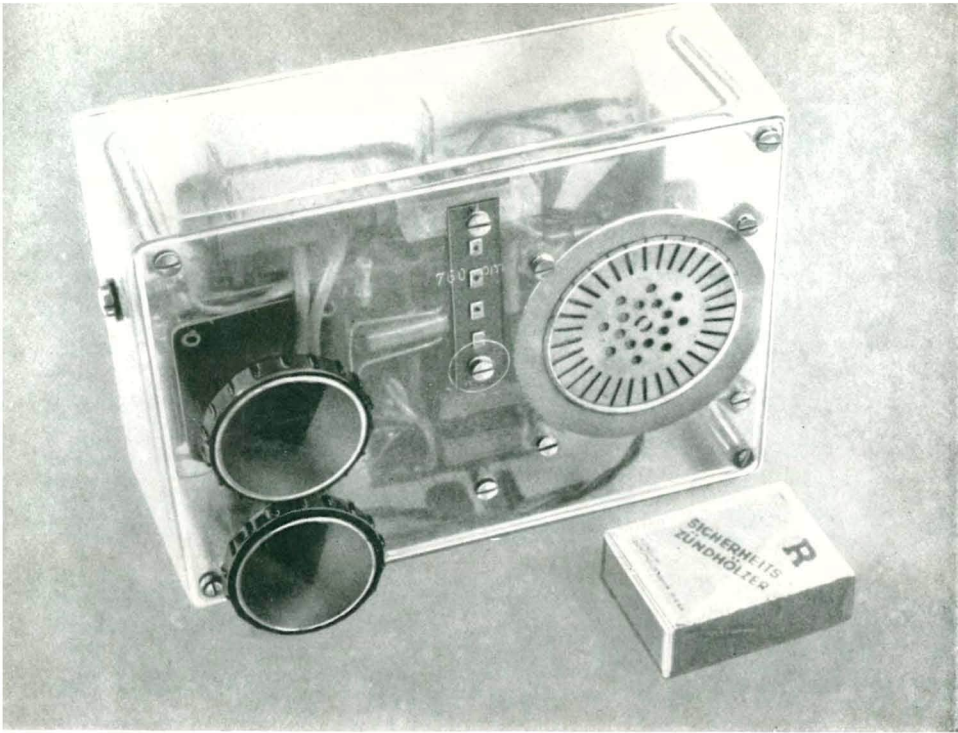
Detektorempfänger mit drei Transistoren für Lautsprecherempfang entsprechend der Bauanleitung in diesem Buch. Das Gerät wurde in eine durchsichtige Haushaltdose eingebaut. Links oben der Lautstärkereglер, darunter der Abstimm-drehkondensator, Mitte oben der Einschalter, darunter Buchsenanschlüsse für Antenne und Erde. Rechts die Lautsprecheröffnung. Streichholzschachtel zum Größenvergleich (zu Seite 314)

Einzelteilanordnung des Detektorempfängers für Lautsprecherbetrieb. Links hinten Abstimm-drehkondensator, davor der Lautstärkereglер. Unter der Batteriehalteplatte liegt der Lautsprecher, der durch die Batteriehalteplatte angepreßt wird. Die Batterie wird durch einen Bügel gehalten. Die Verstärkerverdrahtung ist in Gerätemitte auf einer Lötösenleiste angeordnet (zu Seite 316)



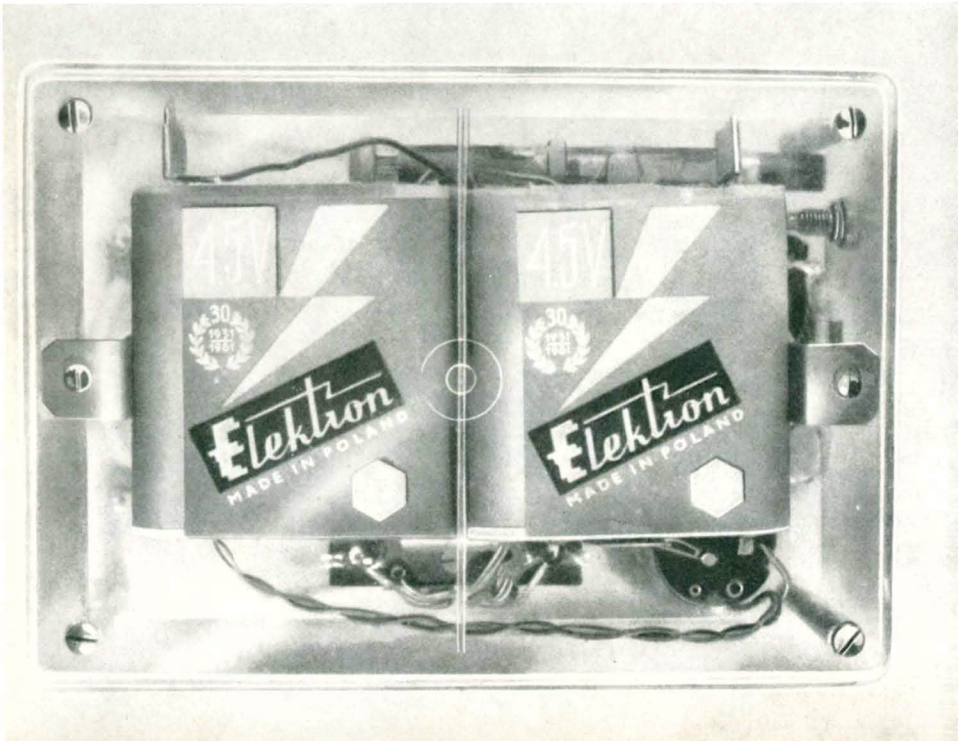
Einzelteilanordnung im Detektorempfänger. Vergleiche mit Abb. 199! Unter der Taschenlampenbatterie, die hier als Stromquelle für mehrere hundert Betriebsstunden ausreicht, liegt verdeckt der Lautsprecher (zu Seite 314 und Abb. 199)



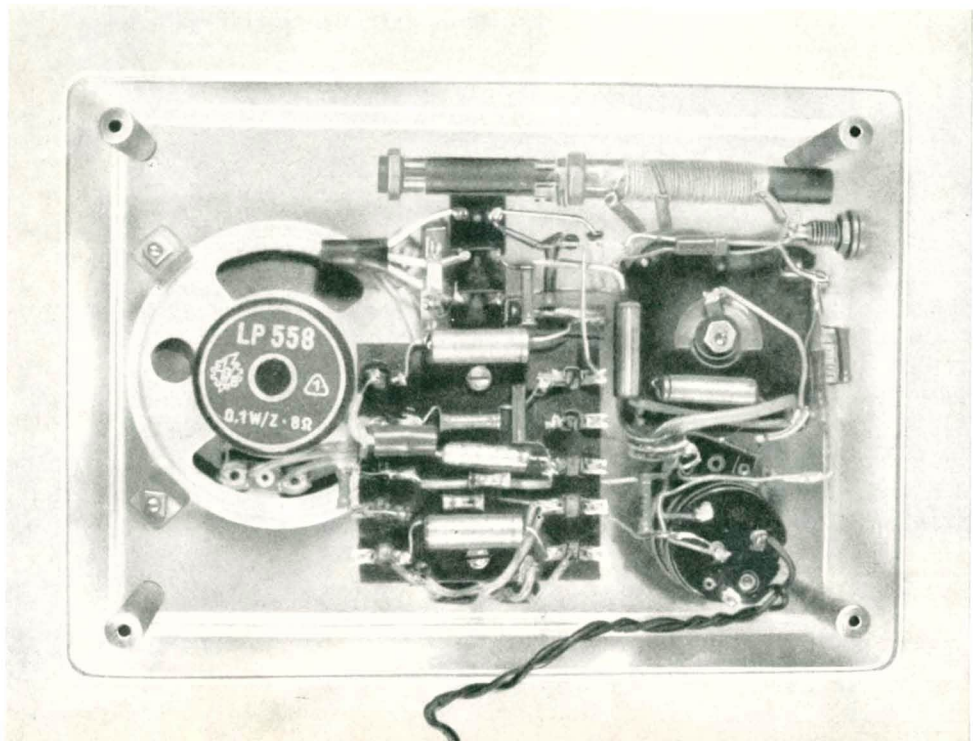
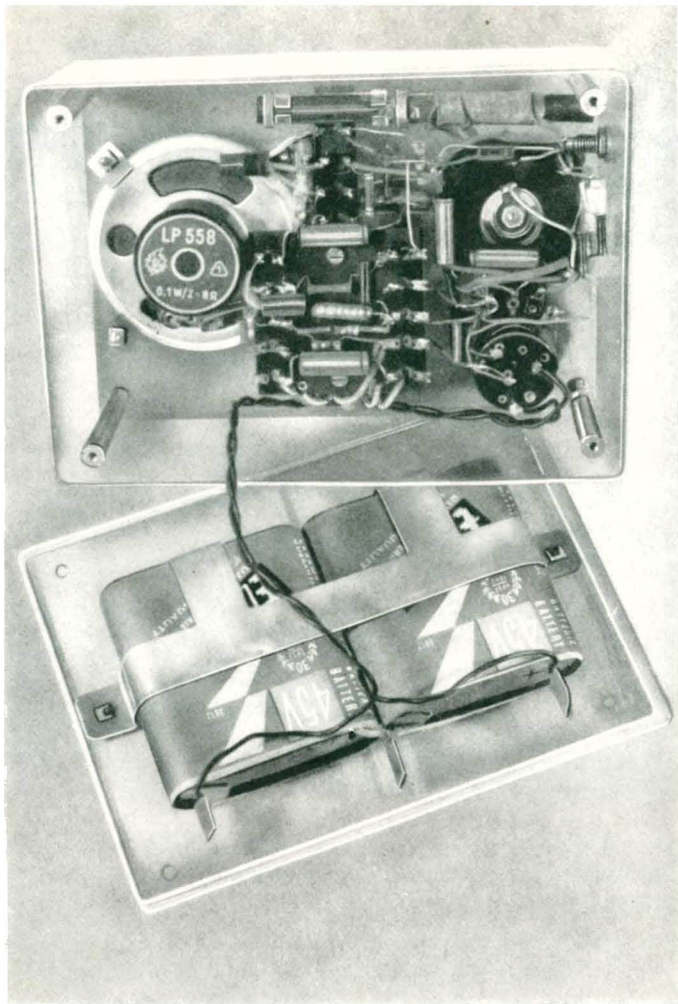


Transistor-Audionempfänger mit Ferritstabantenne. Als Gehäuse dient eine durchsichtige Polystyrol-Haushaltsdose, die den Innenaufbau erkennen läßt. Links unten Lautstärkereglere, darüber Abstimmung. Rechts die Lautsprecher- verkleidung (zu Seite 317)

Die Batterien für diesen Empfänger (zwei in Serie geschaltete Taschenlampen- batterien) sind an der abnehmbaren Rückwand des Gerätes befestigt



Der Transistor-Audionempfänger mit abgenommener Rückwand. Einzelteilanordnung im Audionempfänger. Das Gerät setzt sich zusammen aus einer Reflexaudionschaltung nach Abb. 200 und einem Transistor-NF-Verstärker nach Abb. 203. Oben quer die Ferritstabantenne mit der Schwingkreisspule; rechts darunter der Drehkondensator; rechts unten Lautstärkeregler mit Einschalter. Links der Kleinlautsprecher. Auf dem quadratischen Lötösenbrettchen in Gerätemitte ist der NF-Verstärker untergebracht, dessen Übertrager unterhalb des Brettchens sitzen. Darüber auf schmaler Lötleiste die Audionschaltung (zu Seite 317)



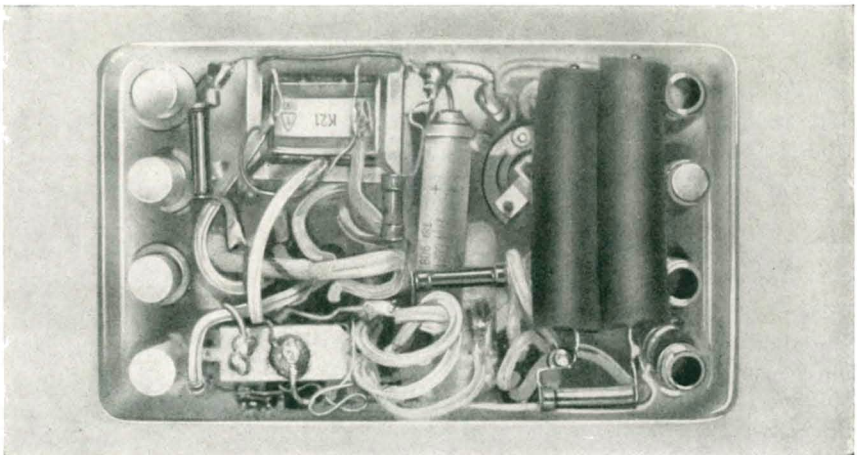


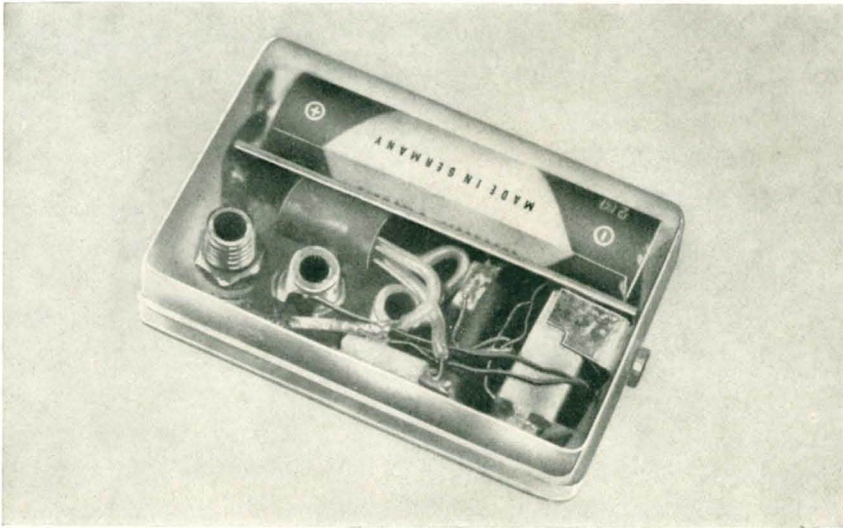
Ein kompletter Transistor-NF-Verstärker nach der Bauanleitung in diesem Buch. Hier zum Abhören von Schallplatten benutzt Der Tonarm gibt einen Größenvergleich (zu Seite 319)

Innenaufbau des Transistor-NF-Verstärkers. Als Gehäuse dient eine durchsichtige Polystyrol-Tablettenschachtel. Links senkrecht die Steckbuchsen für Batterie und Lautsprecher, rechts senkrecht die Buchsen für Eingang E 1 und E 2. An der oberen Kante der Ausgangsübertrager K 21, darunter an der Unterkante der Treiberübertrager K 20. Rechts senkrecht die beiden 50- μ F-Elkos, darunter (halb verdeckt) der Lautstärkeregler P 1, für den hier ein Einstellregler mit aufgelötetem Drahtstift als Achse und Tubenverschlußkappe als Drehknopf benutzt wurde. P 2 in Abb. 203 wurde hier durch einen zuvor ausprobierten Festwiderstand ersetzt (links oben neben dem Ausgangsübertrager). Die Transistoren stehen senkrecht unter ihren spiralig gefalteten Zuleitungsdrähten zwischen den Übertragern (zu Abb. 203)



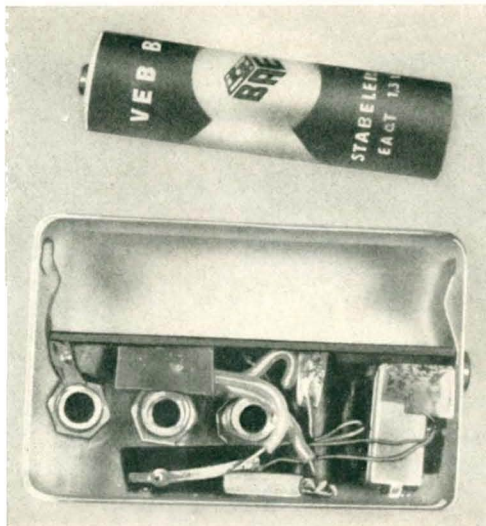
NF-Generator entsprechend der Bauanleitung in diesem Buch, ausgeführt in Kleinbauweise. Anschluß der Ausgangsleitung und des Einschalters (das Gerät war als Morse-Übungssummer bestimmt) erfolgt über Bananenstecker an die Steckbuchsen der Oberseite. Fast das halbe Gehäusevolumen wird bereits von der 1,5-V-Kleinstabbatterie ausgefüllt. Als Gehäuse dient eine Tablettenschachtel aus durchsichtigem Kunststoff in den Maßen 35×55×15 mm. Streichholzschachtel zum Größenvergleich. Das Volumen des Gerätes ist geringer als das der Schachtel (zu Seite 332 und Abb. 208)





Innenansicht (Rückseite) des NF-Generators nach Abb.208 bei entferntem Deckel. Rechts vorn der Übertrager. Zwischen ihm und den Buchsen der Elko. Transistor und Widerstand liegen beiderseits der Steckbuchsen. Oben die Batterie

Der NF-Generator (Rückansicht) mit entfernter Batterie. Das Batteriefach ist durch eine dünne Pertinaxzwischenwand vom Generatöraufbau getrennt. Zwei federnde Kontaktfahnen halten stramm die eingesetzte Batterie. Die linke Kontaktfahne ist unmittelbar an der linken Steckbuchse befestigt, die zum Schalteranschluß führt. Die rechte Kontaktfahne ist an der Gehäusewand befestigt und hält gleichzeitig den Übertrager. Dieser und die Zwischenwand sind zusätzlich mit Duosan-Kleber fixiert. Die Fotos zeigen, daß eine bedeutende Verkleinerung von Transistorgeräten auch dem Bastler mit einfachen Mitteln und handelsüblichen Einzelteilen möglich ist (zu Seite 32 und Abb.208)



bung) wieder die Aufgabe, Rückwirkungen der Endstufe durch schwankende Batteriespannung über die gemeinsame Minusleitung zu verhindern. Als Transistor ist nur der GF 105 oder ein ähnlicher Transistor (z. B. GF 126) mit mindestens 7 MHz Grenzfrequenz (HF-Transistor) und nicht zu geringer Stromverstärkung geeignet. Ob sich die verbilligten „HF-Bastlertypen 30 mW“ hier eignen, muß von Fall zu Fall probiert werden. Ebenfalls ungeeignet: HF-Typen > 50 MHz („UKW-Typen“ u. ä.).

Für den aufmerksamen Leser noch ein Hinweis: Über die beiden Dioden fließt tatsächlich vom Schleifer P 1 ein geringer Strom in Durchlaßrichtung der Dioden gegen Masse. Das ist in dieser Schaltung günstig für den Demodulationsvorgang. Deshalb jedoch Achtung auf richtige Diodenpolung! Bei Falschpolung sperren die Dioden und können nicht arbeiten.

Die Ferritstabantenne stellt gleichzeitig die Schwingkreisspule dar (bei fast allen Schaltungen mit Ferritstabantennen der Fall!). Zur Funktion der Ferritstabantenne siehe Abb. 90 bis 92 und Seite 155. Diesem Audion kann ein beliebiger NF-Verstärker nachgeschaltet werden, mit dem zusammen sich ein kompletter Taschenempfänger ergibt, dessen Leistung mit der eines einfachen Taschensupers vergleichbar ist (allerdings bei geringerer Trennschärfe, da das Audion nur ein Einkreiser ist!). Besonders geeignet ist der im übernächsten Abschnitt folgende Verstärker (Abb. 203).

Für Audion und Verstärker wird die gleiche Batterie benutzt. In Abb. 203 entfällt dann Eingang E 1. Am Eingang E 2 (der mit Leitung „NF“ in Abb. 200 verbunden wird) muß C 1 umgepolt werden und liegt dann mit Plus an Basis T 1. Regler P 1 in Abb. 201 entfällt, ebenso der $10\text{-}\mu\text{F}$ -Elko am Schleifer dieses Reglers. Vom Kollektor T 1 geht es in Abb. 201 über den $10\text{-}\mu\text{F}$ -Elko direkt an Basis T 2. Sinngemäß ebenso kann der einfache NF-Verstärker aus Abb. 198 nachgeschaltet werden (dort dann Elko an Basis T 1 umpolen, Plus nach T 1, Minus an Leitung „NF“ des Audions). Der Verstärker wird dann mit 9 V betrieben; die $100\text{ k}\Omega$ -Widerstände sowie P 2 in Abb. 198 werden für diese Spannung wie beschrieben eingestellt. P 2 in Abb. 198 muß für 9 V auf $50\text{ k}\Omega$ erhöht werden!

Universelles Transistor-Audion

Die in Abb. 201 gezeigte Audionschaltung kann zusammen mit beliebigen NF-Verstärkern (z. B. Abb. 196 oder 198, dort jeweils an die Stelle des HF-Teils bis zur Diode) benutzt werden. Besonders gut geeignet ist auch der NF-Verstärker nach Abb. 203 (er wird so,

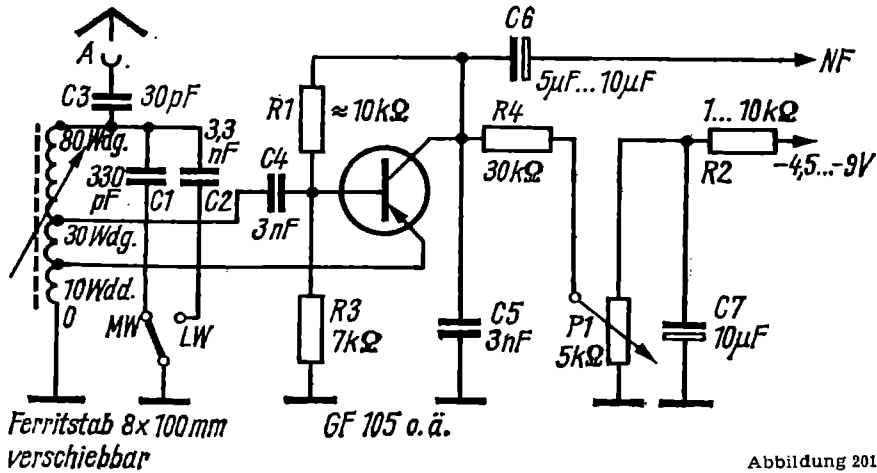


Abbildung 201

wie im vorigen Abschnitt erläutert, angeschlossen, wir können aber auch im NF-Verstärker den Lautstärkereger beibehalten. Dann führt Leitung „NF“ aus Abb. 201 an die Basis von T 1 in Abb. 203, dort entfallen C 1 und alle Teile links von ihm).

Auch diese Audionschaltung hat auf den ersten Blick kaum Ähnlichkeit mit der früher (Abb. 177) gezeigten Audionschaltung. Das Prinzip der Meißnerschen Rückkopplung (Seite 249, Abb. 163) trifft man nur bei Audionschaltungen mit Röhren (Abb. 176, 204 und 205). Für Transistorschaltungen ist diese Schaltungsart zwar auch anwendbar, aber sie hat hierbei vor allem den Nachteil der schwierigen Einstellbarkeit für die Rückkopplung. Diese Einstellung ist außerdem bei Transistoren wenig stabil, sie würde sich außer bei Verstellen der Abstimmung auch schon bei Nachlassen der Batterie und sogar bei geringen Temperaturschwankungen auf dem Umweg über eine Verstärkungsänderung des Transistors erheblich ändern. Man benutzt deshalb andere Schaltungsvarianten zur Entdämpfung des Schwingkreises. In Abb. 201 geschieht dies durch Rückführung der HF vom Emitter in den Schwingkreis. Die Stärke der Rückkopplung wird auf dem Umweg über eine Verstärkungsänderung des Transistors eingestellt, und zwar durch Verändern der Transistor-Betriebsspannung mittels P 1 – dies ist also der Rückkopplungsregler. Da die Transistor-Verstärkungsänderung auch die NF-Verstärkung betrifft, wirkt P 1 zusätzlich als Lautstärkereger (bei einfachen Verstärkern kann man also auf einen besonderen Lautstärkereger verzichten; besser ist es aber, die Lautstärke im nachfolgenden NF-Verstärker zu regeln, damit P 1 im Audion stets

auf maximale Trennschärfe und Empfindlichkeit kurz vor Schwingungseinsatz der Rückkopplung eingestellt werden kann).

Mit dem Schwingkreis in Abb. 201 befassen wir uns zuletzt. Die eigentliche Audionschaltung hat wenig Besonderheiten. R 4 ist der Kollektorwiderstand des Transistors, über C 6 wird die NF ausgekoppelt. Eine HF-Sperre in der NF-Leitung ist hier überflüssig, weil die HF vom Kollektor über C 5 nach Masse abgeleitet wird. Dies ist die Besonderheit dieses „emitterrückgekoppelten“ Audions: Im Kollektorkreis tritt keine HF-Spannung auf; die vom Schwingkreis über C 4 kommende, im Transistor verstärkte HF wird über die Emitterleitung auf den Kreis rückgekoppelt. Die Spule muß für diese Schaltung deshalb zwei Anzapfungen haben. R 2 und C 7 sind ein Siebglied zur Vermeidung von Rückwirkungen des NF-Verstärkers über die gemeinsame Batterie. R 2 wird je nach gewählter Batteriespannung (die man der für den NF-Verstärker benutzten Batterie entsprechend wählt) und Transistor-Exemplar so gewählt, daß sich ein leicht einstellbarer, weicher Rückkopplungseinsatz bei etwa $2/3$ des Drehwinkels von P 1 ergibt. Für P 1 wird ein kleines Knopfpotentiometer mit Rändelrad benutzt, wie sie als Lautstärkereglер üblich sind. Da an P 1 nur Gleichspannung auftritt, sind seine Zuleitungen unkritisch, was die Platzwahl bei der Einzelanordnung erleichtert. R 1 hängt ebenfalls vom Transistor-Exemplar ab, auch dieser Wert muß also ausprobiert werden, falls kein Schwingungseinsatz erreichbar ist.

Diese Audionschaltung ist gut geeignet für verschiedene Wellenbereiche. In Abb. 201 ist bereits die Ausführung für Mittel- und Langwelle angegeben. Die Abstimmung erfolgt dabei induktiv (ohne Drehko) — vgl. Abb. 160 und Seite 245 —, so daß die Materialbeschaffung leichter und billiger ist. Wie die Spule dazu beschaffen sein muß, wird anschließend erläutert.

Der Schwingkreiskondensator hat bei Induktiv-Abstimmung einen festen mittleren Wert. Für die in Abb. 201 angegebenen Spulendaten beträgt er für Mittelwelle 330 pF, für Langwelle 3,3 nF. Man kann beide Werte vorsehen (C 1, C 2 in Abb. 201) und mittels Schalter (S 1 ist der Bereichsumschalter) den C-Wert und damit den Wellenbereich wählen. Für S 1 kann ein kleiner Kippumschalter (kleinstmögliche Ausführung nehmen!) benutzt werden. Er wird dicht unterhalb der Spule angeordnet, so daß sich für C 1, C 2 (die direkt am Schalter anzulöten sind) und alle anderen Teile bis zum Kollektoranschluß des Transistors die kürzestmögliche Leitungsführung (ohne zusätzlichen Schalt draht!) ergibt. Mit etwas Geschick kann der Bereichsschalter S 1 auch als kleiner Schiebeschalter, mit dem sich zwei hinter dem Schiebeknebel angeordnete Kontaktfedern zusammen-

drücken lassen, selbst gebaut werden. Weil sich ein einfacher Ein/Aus-Schalter leichter selbst herstellen läßt als ein Umschalter, kann man in diesem Fall auch C 1 (Mittelwelle) direkt an Masse anschließen und über einen Einschalter für Langwellenempfang C 2 einfach parallel zu C 1 legen. Das würde zwar bei Langwelle einen „Fehler“ von rund 10% für L 2 ergeben, aber man kann dann entweder C 2 zu 3 nF statt 3,3 nF wählen (dann ist bei LW $C 2 + C 1 = 3,3$ nF) oder die wenigen % Skalenverschiebung für Langwelle unberücksichtigt lassen.

Über C 3 kann bei zu schwachem Empfang eine kleine Außenantenne angeschlossen werden.

Als Transistor kommt wie im vorigen Abschnitt nur der Typ GF 105 oder ein ähnlicher „HF-Bastlertyp“ für mindestens 7 MHz in Frage (für Mittel- und Langwelle). Bei der anschließend beschriebenen Ausführung für Kurzwellenempfang eignet sich auch der GF 105 nicht mehr, es kommt dann der Typ GF 126, besser noch GF 130 (für alle Wellenbereiche geeignet) in Betracht. Die Verwendung von „HF-Basteltypen“ bei Kurzwelle ist Glückssache, dann hilft nur das Ausprobieren, bis man ein „kurzwellentaugliches“ Exemplar gefunden hat. Abzuraten ist die Verwendung von sogenannten „UKW-Transistoren“ für Bastelzwecke oder ähnlicher UKW-tauglicher Typen. Sie können zwar gut geeignet sein, neigen aber manchmal zu „wilden Schwingungen“; eine Fehlerursache, die wir mit unseren Mitteln schwer feststellen und beseitigen könnten.

Bevor wir die Induktiv-Abstimmung betrachten, noch einige Hinweise für den Kurzwellenempfang. Bei Kurzwelle müssen wir auf Induktivabstimmung und mehrere Wellenbereiche verzichten. In Abb. 201 entfallen dann C 2 und S 1; die Spule wird fest auf der Mitte des Ferritstabes aufgewickelt. C 3 soll dann nur 10 pF haben, bei C 1 schließen wir den Abstimmtrieb (ohne Schalter direkt an Masse) an. Eine kleine Außenantenne wird für Kurzwelle meistens notwendig sein. Für den Abstimmtrieb haben wir jetzt zwei Möglichkeiten. Die bessere Möglichkeit ist, einen kleinen Kurzwellendrehko mit etwa 80 pF Kapazität zu verwenden. Falls wir dieses Bauteil nicht haben, können wir einen im Handel preiswert erhältlichen keramischen Scheiben-Trimmkondensator (mit dem Nennkapazitätsbereich 15 . . . 60 pF) verwenden, dem wir einen Keramik-kondensator mit 20 pF parallelschalten. Wir können mit dieser Ausführung die Abstimmkapazität zwischen etwa 35 und 80 pF ändern und erfassen damit gerade etwa den Frequenzbereich von 3 . . . 7 MHz (etwa 40 . . . 80 m Wellenlänge, darin die 41-m- und 49-m-Rundfunkbänder und das 80-m-Amateurfunkband, auf dem wir häufig Sprechfunkverkehr hören können). Die Sender liegen freilich sehr

dicht, so daß das Abstimmen etwas Fingerspitzengefühl – oder für mechanisch geübte Bastler: Übersetzungsgetriebe an der Drehko-Achse! – erfordert. Bei Verwendung eines Scheibentrimmers für die Abstimmung setzen wir dessen Einstellschraubenschlitz einen kleinen Achsstumpf mit möglichst großem, griffigem Drehknopf auf.

Die zweite Abstimmmöglichkeit besteht in der Verwendung eines Kleinstdrehkos für Mittelwelle, wie er für Taschenempfänger (z. B. „Sternchen“, „Mikki“ u. ä.) üblich ist. Da es sich hierbei um Doppel-drehkos für Super handelt, benutzen wir nur einen der beiden Statoranschlüsse. Diese Drehkos haben meist 180...200 pF, mit diesem Wert sind sie für uns geeignet. In Serie mit dem Stator schalten wir einen keramischen Kondensator mit 90...100 pF; die Serienschaltung ergibt wiederum den für unseren Kurzwellenbereich nötigen Wert. Übrigens sind diese Kleinstdrehkos auch für Mittelwellenbetrieb unserer Audionschaltungen (in allen Schaltungen dieses Buches) geeignet, wenn wir beide Statorpakete parallelschalten und dazu noch weitere 40 pF parallellegen.

Die Spule muß für Kurzwelle und einen Ferritstab 8 mm × 100 mm insgesamt 30 Windungen (Anzapfung bei der 3. und der 10. Windung ab Masse) haben. Für Mittel- und Langwelle gelten die in Abb. 201 angegebenen Windungszahlen. Für Kurzwelle – wobei meistens ohnehin eine Außenantenne benutzt wird – kann man als Spulenkern auch einen anderen etwa 8 mm dicken und wenigstens 20 mm langen Ferritspulenkern (evtl. Bruchstück eines defekten Ferritstabes!) verwenden. Die genaue Windungszahl muß dann eventuell erprobt werden. Wer bisher noch nie ein Transistoraudion gebaut hat, sollte diese Schaltung zunächst auf Mittelwelle erproben und erst, wenn alles funktioniert und einige Betriebserfahrung gesammelt ist, den Schwingkreis auf Kurzwelle umändern, weil in diesem Bereich die Einstellung von Rückkopplung und Abstimmung doch etwas Übung erfordert.

Abschließend einige Hinweise zur Induktiv-Abstimmung. Für den Mittel- und Langwellenbereich können wir diese Abstimmung sinngemäß auch in anderen Audionschaltungen (Abb. 200, 204, 205) anwenden, um den Drehko einzusparen. Der Drehko wird dann stets durch einen Festkondensator ersetzt (etwa 300 pF für Mittelwelle, etwa 3 nF für Langwelle, gültig für Ferritstab 8 mm × 100 mm mit 80 Wdg.).

Abb. 202 zeigt das Prinzip der Induktivabstimmung als Bauvorschlag für eine mögliche Lösung. Der Ferritstab ist in der Spule verschiebbar angeordnet. Dazu wickeln wir uns zunächst aus steifem, glattem Papier einen Spulenkörper. Das Papier wird in mehreren Lagen um den Ferritstab gerollt – Breite etwa 35...40 mm bei

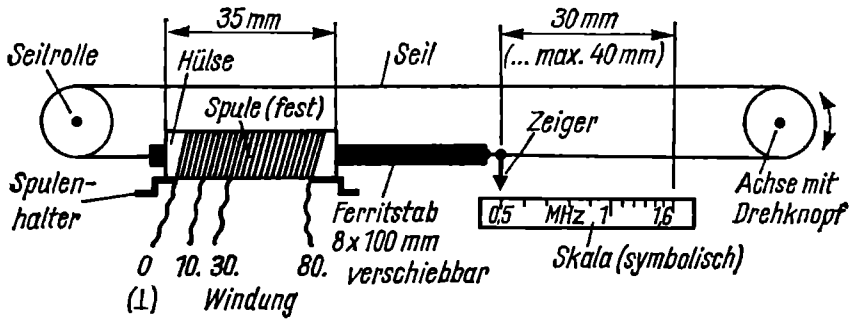


Abbildung 202

einer Stablänge von 100 mm – und die obersten Lagen werden mit Duosan-Alleskleber oder Kittifix verklebt. Der Ferritstab kann vorher leicht mit Kerzenwachs eingerieben werden, damit sich die Papierhülse nach dem Trocknen gut abziehen läßt. Falls der Stab später zu stramm in der trockenen Hülse gleitet, kann man die innerste Papierlage nachträglich wieder entfernen. Die Hülse muß auch ohne Stab steif genug sein, um die Spulenwicklung tragen zu können, ohne sich dabei zu verziehen. Nachdem die Spule aufgewickelt ist (wir wickeln einlagig; Anzapfungen als verdrehte Schleife herausführen und erst zuletzt blankmachen), wird sie mit Duosan- oder Nagellackanstrich versteift und gefestigt. Zwei seitlich an die Hülse geklebte Haltewinkel gestatten die Befestigung der Spule im Gehäuse unseres Empfängers. Der Ferritstab muß in der Spule leicht gleiten und so weit verschiebbar sein, daß er in den Endstellungen gerade die ganze Hülse ausfüllt – er soll also nicht bis zur Stabmitte durchgleiten! – bzw. gerade noch nicht aus der Hülse herausrutscht. Mit einem an beiden Stabenden angeklebten Seilzug (Seidenfaden) und kleinen Umlenkrollen können wir den Stab durch Betätigen eines Drehknopfes (Abb. 202) verschieben (gezeichnet ist die Endstellung für die tiefste Empfangsfrequenz). Wir erreichen damit ebenso wie mit einem Drehko einen Abstimmbereich von etwa 500 . . . 1600 kHz (Mittelwelle) bzw. etwa 150 . . . 450 kHz (Langwelle). Allerdings drängt sich die Skala bei hohen Frequenzen zunehmend zusammen, ist also nicht wie bei Drehkos einigermaßen gleichmäßig – ein kleiner Schönheitsfehler der Induktivabstimmung, den wir mit unseren Mitteln schlecht beseitigen können. Wenn wir einen Seilzug-Antrieb ähnlich wie in Abb. 202 vorsehen, können wir an einem Ende des Ferritstabs einen kleinen Zeiger anbringen (oder die Stirnkante des Stabes selbst, hell eingefärbt, als Zeigermarke benutzen, wenn der Stabweg durch einen Gehäuseschlitz sichtbar

ist!) und uns nach Fertigstellung des Gerätes selbst eine Skala zeichnen, wie das in Abb. 202 grob angedeutet ist. Im einfachsten Fall kann man auf Antriebsmechanismus und Skala (die bei Audionschaltungen ohnehin nur ungefähr stimmt) ganz verzichten und den stramm in der Spule gleitenden Stab (gut mit Wachs einreiben, evtl. bei zu locker gleitendem Stab einen Seidenfaden in die Hülse einlegen) ohne weiteres von Hand verschieben. Für Lang- und Mittelwelle reicht diese Einstellmöglichkeit ohne weiteres aus, und der ganze Aufbau wird dadurch sehr klein und einfach (die Gehäusemaße können dann für den kompletten Empfänger kleiner sein als für den zum Teil herausragenden Ferritstab!). Für Kurzwelle ist die Induktivabstimmung aber zu ungenau, hier kommen wir nicht ohne Drehko mit ausreichend großem Bedienungsknopf aus.

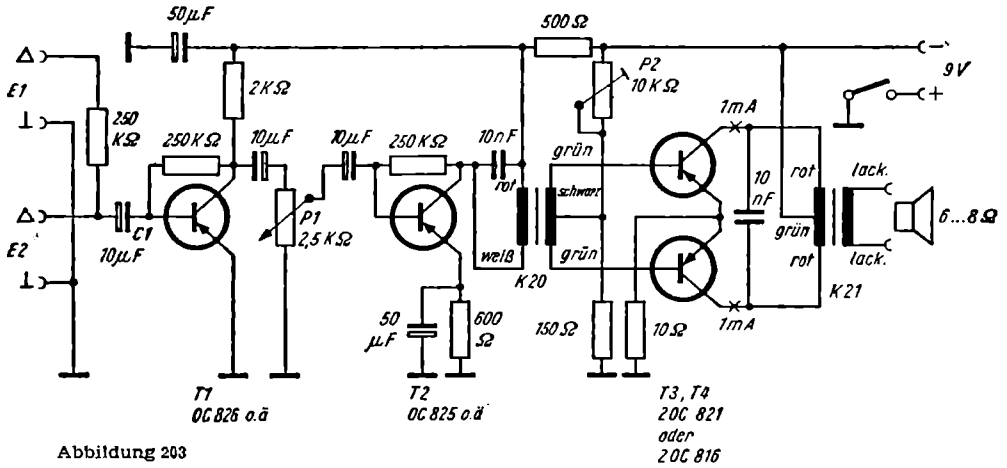
Übrigens wurde im Bastlerbedarfshandel vor einigen Jahren eine Baugruppe aus dem „Amateurelektronik-Programm“ des VEB Meßelektronik Berlin unter der Typenbezeichnung EBS 2 angeboten, die vielleicht hier oder da noch im Handel erhältlich ist. Ihre Schaltung entspricht der Abb. 201; sie wurde zusammen mit einer fertig bewickelten Spule mit Halterung und verschiebbarem Ferritstab — also für Induktivabstimmung, aber ohne Seilzug für den Ferritstab — geliefert und ist recht preiswert. Außerdem sind für diesen Bausatz alle Einzelteile zu den Daten des mitgelieferten Transistors passend ausgemessen, so daß der Zusammenbau auf der mitgelieferten Leiterplatte recht einfach ist. Die Bauteile S 1, P 1, R 2, C 6 und C 7 gehören allerdings nicht mit zum Bausatz EBS 2, sie müssen wir bei Bedarf extra kaufen.

Transistor-NF-Verstärker für universelle Verwendung

Abb. 203 zeigt die Schaltung eines universell verwendbaren Transistor-NF-Verstärkers. Eingang E 2 ist für niederohmige Quellen bestimmt; die Verstärkung reicht bereits zum Direktanschluß eines Tauchspulmikrofons aus (Seite 175); behelfsmäßig eignet sich als Mikrofon auch ein dynamischer Lautsprecher mit Übertrager (Seite 173 bis 175). Eingang E 1 ist für hochohmige Quellen, z. B. für Schallplattenspieler.

Die Basiswiderstände für T 1 und T 2 sind als Mittelwerte angegeben. Diese (mit 250 k Ω angegebenen) Widerstände werden je nach Transistorexemplar auf geringste Verzerrung bei größter Lautstärke eingestellt. P 1 ist der Lautstärkereglер. T 1 soll rauscharm sein.

T 2 hat eine zusätzliche Temperaturstabilisierung mit Emitterwider-



stand 600Ω und Emitterkondensator $50 \mu\text{F}$ (Mindestwert! $100 \mu\text{F}$ günstiger, wenn gute Baßwiedergabe gewünscht und ein großer Lautsprecher benutzt wird). Siehe dazu Abb. 146 und zugehörige Beschreibung (Seite 228 sowie Seite 202)!

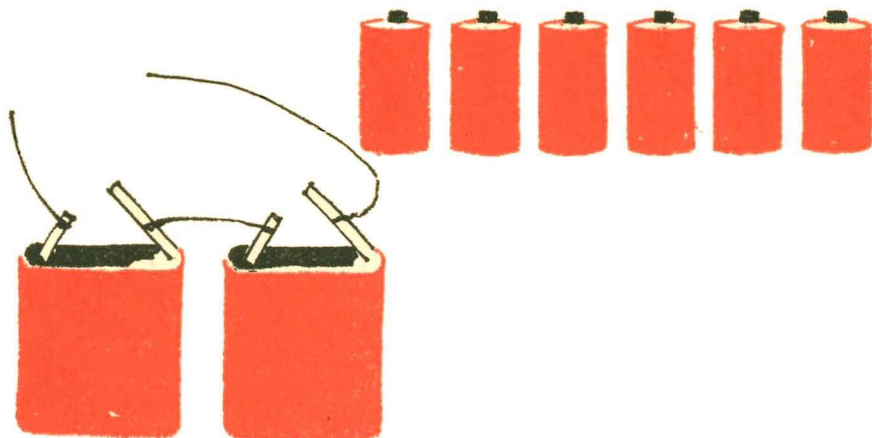
T 2 gibt die NF über den Treibertrafo Typ K 20 („Sternchen“-Treibertrafo) an die Endstufentransistoren ab. Hier wird eine sogenannte Gegentaktendstufe benutzt. Jeder der Transistoren verstärkt eine Halbwelle der NF-Spannung. Mit Gegentaktendstufen läßt sich bei Verwendung von zwei Endtransistoren die fast vierfache Endleistung (NF-Ausgangsleistung) einer Eintaktendstufe mit einem gleichartigen Transistor erreichen, wobei die Batterieausnutzung ökonomischer erfolgt. Deshalb sind für hochwertige Verstärker Gegentaktendstufen bedeutend vorteilhafter als Eintaktstufen gemäß Abb. 198. Gegentaktendstufen erfordern allerdings Spezialübertrager (Gegentaktübertrager) mit Mittelanzapfung. Die „Sternchen“-Empfängertypen K 20 (Treiber) und K 21 (Ausgangstrafo) sind für diesen Zweck bestimmt, ihre Anschlußfarben in Abb. 201 angegeben. Ersatzweise ist auch das Übertrager-Paar K 30/K 31 statt K 20/K 21 verwendbar. Voraussetzung für gute Leistung ist außerdem, daß beide Endtransistoren genau datengleich sind. Sie müssen deshalb auch innerhalb des gleichen Typs ausgemessen werden. Derartige zueinander passende Transistorpaare kommen unter den Typenbezeichnungen „2 GC 121“ (und ähnlich) als „Paar“ in den Handel. Zwei ungleiche Transistoren zu kombinieren, kann dazu führen, daß diese nicht ausreichend übereinstimmen und starke Verzerrungen in der Wiedergabe auftreten. Deshalb nach Möglichkeit diese Transistoren als Paar kaufen oder selbst zusammenstellen (Seite 342)!

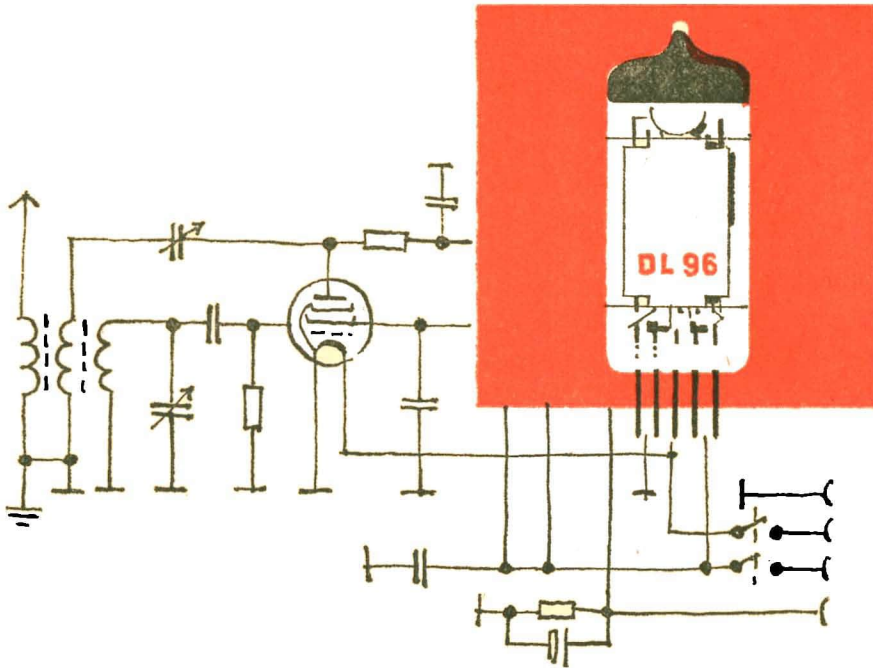
Mit P 2 wird der Endstufen-Kollektorstrom eingestellt. Er soll – in der Kollektorleitung gemessen – etwa 1 mA betragen und muß bei beiden Transistoren automatisch fast gleich sein, wenn diese als Paar übereinstimmen. Vorsicht beim Einstellen von P 2! Überlastungsgefahr für T 3 und T 4! Vergleiche dazu das zu Abb. 198 Gesagte.

Das Siebglied 500Ω und $50 \mu F$ in der Minusleitung entkoppelt auch hier wieder die Vorstufen gegen die Endstufe.

Mit diesem Verstärker ist eine Endleistung von etwa 0,2 W erreichbar, was auch für kräftige Wohnraumlautstärke ausreicht. Falls der Verstärker im Heim betrieben wird, lohnt sich die Verwendung eines normalgroßen, für 2... 4 W bestimmten Lautsprechers (Membrandurchmesser 120... 130 mm), der gegenüber einem Kleinlautsprecher bedeutend besseren Klang und höhere Lautstärke ergibt. Als Batterien eignen sich zwei in Serie geschaltete Taschenlampenbatterien oder sechs Monozellen. Auch eine 9-V-Transistorbatterie ist geeignet. Da sie bedeutend kürzere Betriebszeit (etwa 50 Stunden gegenüber 200... 250 Stunden mit Flachbatterien und 500 Stunden mit Monozellen) ergibt, sollte sie nur benutzt werden, wenn besonders klein gebaut werden soll.

Der Aufbau ist unkritisch, alle Teile können eng gedrängt auf einem zweireihigen Lötleistenbrett montiert werden.





Schaltungen mit Röhren

Batteriebetriebener Einkreiser mit zwei Röhren für Kopfhörer und Lautsprecher

Dieser Empfänger ist ein tragbarer Empfänger für Mittelwellenempfang und erfordert zwei Batterieröhren und Kopfhörer. Die Schaltung zeigt Abb. 204. Wenn ein umschaltbarer Spulensatz benutzt wird (im Handel als Einkreiser-Spulensatz erhältlich), können auch andere Wellenbereiche empfangen werden. Für Selbstanfertigung der Wickelspule sind Spulendaten und richtige Wicklungspolung in Abb. 204 angegeben, ebenfalls die Röhrenanschlüsse. Das Audion entspricht dem bereits beschriebenen (Seite 268 und folgende). Die Röhren sind direktgeheizte Batterieröhren (Seite 183 bis 186 und 211); bei der Endröhre sind beide Heizfadenhälften parallelgeschaltet. Heizspannung 1,5 V (Monozelle), gesamter Heizstrombedarf 75 mA. Die NF-Stufe hat keine Besonderheiten. Die Gittervorspannung für die Endröhre wird hier durch Spannungsabfall am 500- Ω -Widerstand in der Minusleitung der Anodenbatterie erzeugt. Die Verwendung eines Katodenwiderstandes ist hier nicht möglich, da auch der Heizstrom über diesen fließen müßte, was eine unnötige Erhöhung der Heizspannung bedeuten würde. In Abb. 204 fließt der Anodenstrom von $-U_a$ über 500 Ω nach Masse. An diesem Widerstand fällt daher eine gegen Masse negative Spannung ab,

deren Höhe vom Anodenstrom des gesamten Gerätes (hier etwa 5 mA) abhängt. Dieser Spannungsabfall dient als Gittervorspannung für die Endröhre. Der dem 500- Ω -Widerstand parallelliegende Elko 25 μ F hat die gleiche Funktion wie der Katodenwiderstand in Endstufen üblicher Schaltung. Siehe dazu Abb. 126, 127 und dazugehörige Beschreibung. Als Anodenbatterie eignet sich eine 67,5-V-Kofferanodenbatterie üblicher Ausführung. Beide Batterien werden mit einem doppelpoligen Schalter ausgeschaltet. Das Tiefpaßglied 100 k Ω /500 pF in der Anodenleitung des Audions verhindert ein Abfließen der HF in den NF-Verstärker. Der 10-nF-Kondensator parallel zum Ausgangstrafo verhindert zu starke Höhenwiedergabe und hochfrequente Selbsterregung des NF-Verstärkers durch ungewollte Rückkopplung. Die sekundärseitige Impedanz des Ausgangsübertragers richtet sich nach dem vorgesehenen Lautsprecher – allerdings reicht die Endleistung dieses Gerätes nur bei nicht zu schwachen Sendern für brauchbare Lautstärke aus; andernfalls wird ein Kopfhörer benutzt. Er ist über 0,5 μ F direkt an die Anode angekoppelt. Der Übertrager wird dann sekundär nicht angeschlossen.

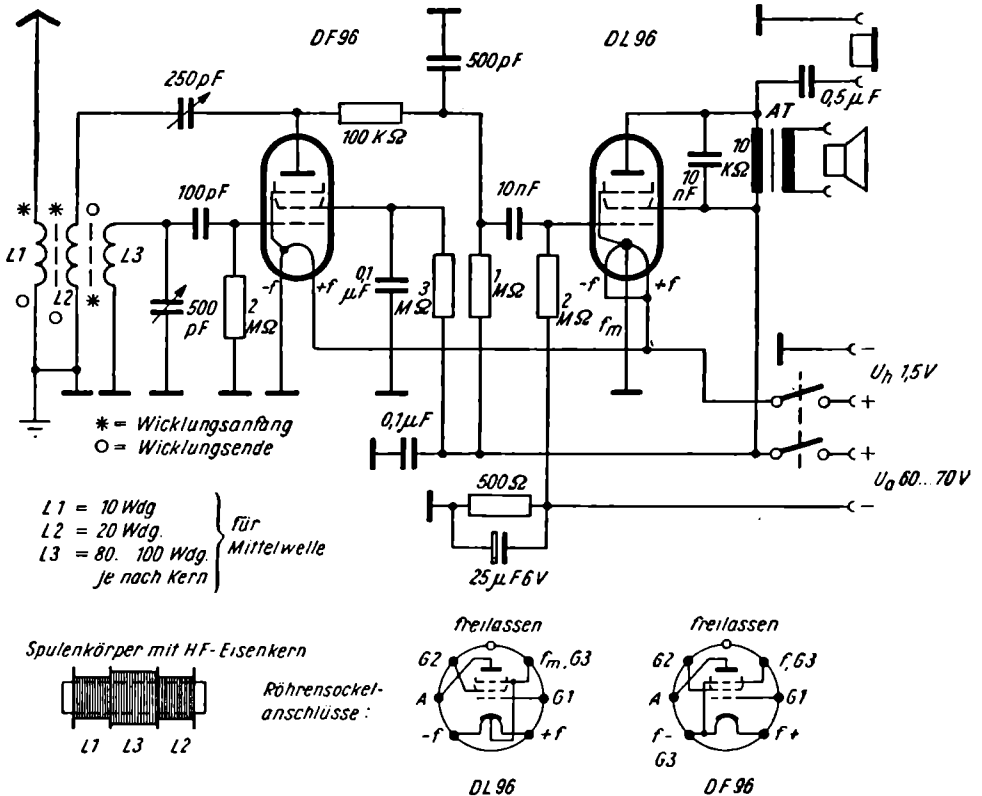


Abbildung 204

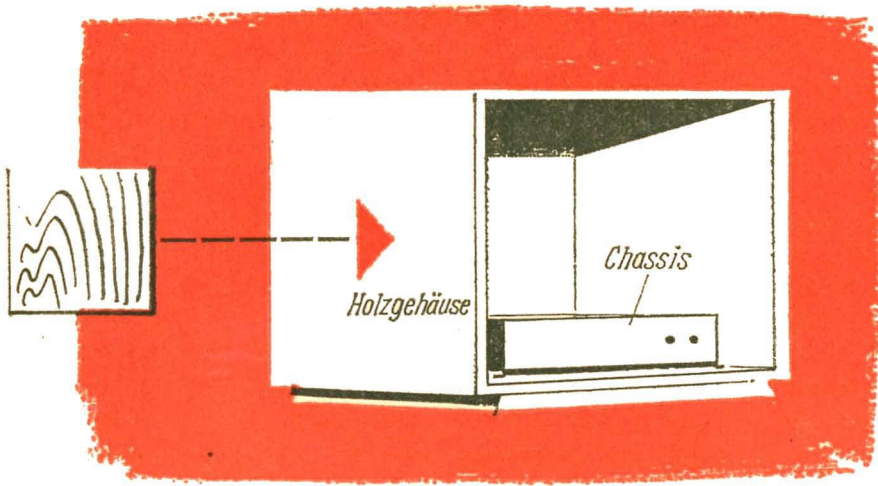
nach den Angaben in Abb. 204 gewickelt werden, oder es wird ein handelsüblicher umschaltbarer Einkreiser-Spulensatz benutzt. Zwischen Antenne und L 1 muß unbedingt ein 1-nF-Trennkondensator für 500 V \sim geschaltet sein, da das Chassis bei Allstromgeräten Netzverbindung hat und die Netzspannung sonst über L 1 auf die Antenne kommt, was zu schweren Unfällen führen kann! Für den Antennenkondensator nur erstklassige, garantiert einwandfreie Ausführungen benutzen! Eine Erdung entfällt, da das Gerät über die Netzleitung ausreichend geerdet ist.

Das Tiefpaßglied 10 k Ω /500 pF verhindert ein Abfließen der HF in die NF-Stufe. Vor Steuergitter und Schirmgitter der Endröhre sind Kleinwiderstände geschaltet (direkt am Sockel anlöten!), die nichts mit der Verstärkerfunktion zu tun haben und diese nicht beeinflussen. Es sind Schutzwiderstände gegen eine mögliche HF-Selbsterregung innerhalb der Röhre, zu der dieser Röhrentyp neigt. Die Anodenleitung der Endstufe ist bis zum Ausgangstrafo abgeschirmt (Seite 312), um Rückkopplung der NF auf das Audiongitter zu vermeiden.

Aus dem gleichen Grunde und zur Vermeidung von Brummeinstreuungen müssen Gitterkondensator 100 pF und Gitterwiderstand 2 M Ω ganz kurz unmittelbar am Röhrensockel angelötet werden (Anschlußdrähte dieser Teile auf 5 . . . 6 mm kürzen!).

Der Netzteil ist in Allstromschaltung ausgeführt (Abb. 190), um den Aufwand für das Gerät zu senken und den Betrieb auch am Gleichstromnetz zu ermöglichen. Es ist jedoch vorteilhafter und betriebs-sicherer, den Netzteil in Wechselstromschaltung mit Netztrafo aufzubauen, wie in Abb. 206 gezeigt. In diesem Fall wird an Stelle der UCL 82 die Röhre ECL 82 verwendet, die — bis auf die Heizung — gleiche Daten und gleiche Anschlüsse hat. In Audion und NF-Teil ändert sich daher bei Verwendung der ECL 82 nichts. Die Selen-gleichrichter sind dann ebenso wie in Abb. 203 mit 10 nF (500 V \sim) zu überbrücken. Dadurch werden Brummodulationen des empfangenen Senders vermieden, die sonst auftreten können, wenn die empfangene HF am Netzgleichrichter mit 50 Hz Netzfrequenz moduliert wird (ein häufig auftretender ungewollter Effekt). Bei NF-Verstärkern ist die Überbrückung des Gleichrichters natürlich nicht erforderlich, da dort keine HF empfangen wird.

In Abb. 205 ist die Sockelschaltung für die Röhren UCL 82 und ECL 82 angegeben. Da es sich um eine Doppelröhre handelt (Triode-Pentode mit getrennten Katoden; dazu Seite 207 bis 208), drängt sich die gesamte Verdrahtung eng um den einzigen Röhrensockel. Um Verkopplungen zu vermeiden, müssen daher Audion und NF-Stufe am Sockel gegeneinander abgeschirmt werden, indem am Sok-



kelmittelstift (der an Masse kommt; siehe dazu Seite 313) eine Abschirmblechwand zwischengelötet wird, die bis zwischen die Sockelstifte reicht. Ihre Lage ist am Sockelschaltbild in Abb. 205 angedeutet. Sockel bei der Montage so anordnen, daß die Seite der Triodenanschlüsse zu den Schwingkreisbauteilen weist, dann ergibt sich die kürzeste Leitungsführung!

Bei Aufbau und Betrieb muß beachtet werden, daß das gesamte Chassis Netzspannung führt! Es muß daher ein völlig verschlossenes isolierendes Gehäuse benutzt werden (Holz!), das außen keinerlei zugängliche Metallteile haben darf (auf Rückwandhalteschrauben und Befestigungsschrauben der Bedienungsknöpfe achten!).

Der Abstimmendrehko soll eine Skala erhalten, die man selbst zeichnet. Der Antrieb kann mit Seilzugübersetzung erfolgen. Hier können wir selbst viele mögliche Lösungen ausknobeln, wenn wir uns zuvor bei einigen Industrieempfängern ansehen, wie das im Prinzip erfolgt. Notfalls kann auf Übersetzung ganz verzichtet werden und die Drehkoachse direkt den Bedienungsknopf tragen.

Beim Aufbau auf ausreichende Luftlöcher im Gehäuse achten! Röhre und Heizwiderstand werden sehr heiß! Heizwiderstand R_h wird am günstigsten auf einem Schraubenbolzen mit reichlich Asbestunterlage montiert. Nicht in die Nähe von Gleichrichter und Elkos setzen, diese Teile sind wärmeempfindlich!

Wenn der Empfänger für Wechselstrom mit Netzteil nach Abb. 206 aufgebaut wird, erhält er einen Erdanschluß, der mit Masse verbunden wird.

NF-Verstärker für Netzbetrieb mit einer Doppelröhre

Abb. 206 zeigt die Schaltung eines universell verwendbaren NF-Verstärkers für Wechselstrombetrieb. Er kann beispielsweise für Plattenspieler- oder Magnettonband-Wiedergabe benutzt werden sowie für NF-Übertragungen und verschiedenste Versuchszwecke. Ein Allstromnetzteil ist hier nicht möglich bzw. darf keinesfalls benutzt werden! Über die Eingangsbuchsen würde sonst Netzverbindung zustande kommen, und alle angeschlossenen Geräte ständen mit ihren Gehäusen unter Netzspannung, was zu schweren Unfällen führen kann!

Ein ganz ähnlicher, jedoch mit zwei getrennten Röhren aufgebauter Verstärker wurde bereits beschrieben (Abb. 186 und dazugehöriger Text). Diese Schaltung kann ebenfalls nachgebaut werden; sie hat aufbaumäßig den Vorteil, daß sich die Verdrahtung auf zwei Röhrensockel verteilt und daher leichter durchzuführen ist. Das bei Abb. 186 und im folgenden Gesagte gilt daher sinngemäß für beide Schaltungen, die auch leistungsmäßig annähernd gleichwertig sind. Für die Schaltung nach Abb. 186 kann der Netzteil aus Abb. 206 benutzt werden. Der Verstärker in Abb. 206 benutzt die Klangregelschaltung, die bereits bei Abb. 187 besprochen wurde. Die Netzteil-schaltung der Abb. 206 entspricht der Schaltung Abb. 188. In Abb. 206

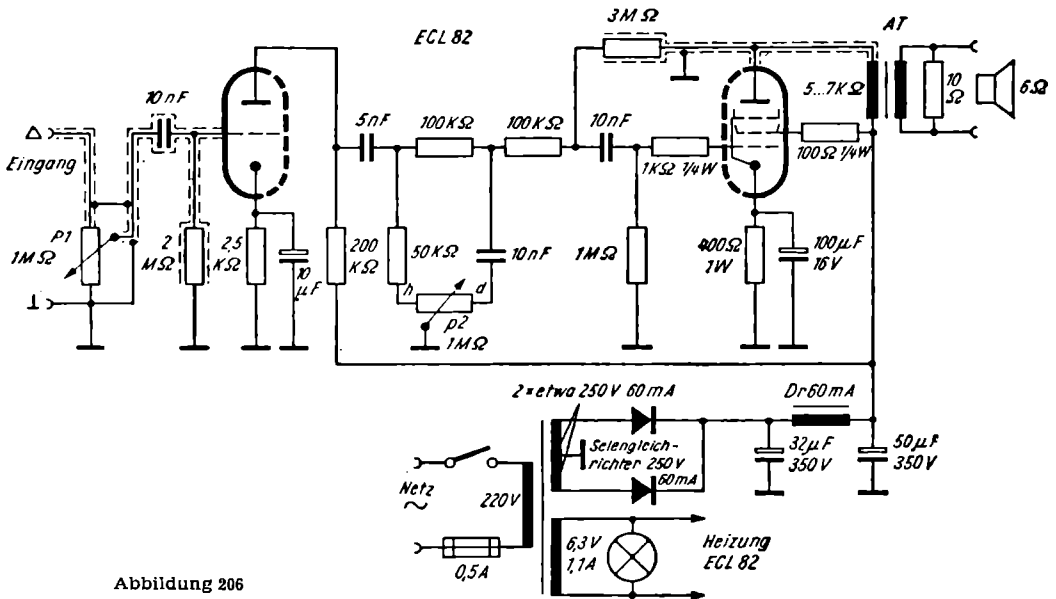


Abbildung 206

wurden an Stelle einer Gleichrichterröhre zwei Selengleichrichter benutzt; statt dessen ist ebensogut die Verwendung der EZ 80 gemäß Abb. 188 möglich, wenn der Netztrafo eine zweite Heizwicklung für diese Röhre hat. Je nach deren Spannung kann dann auch eine AZ 11 (4 V Heizung) oder ähnliche Röhre benutzt werden.

In Abb. 206 sind dem Steuer- und Schirmgitter der Endpentode die bei Abb. 203 bereits erwähnten Schutzwiderstände gegen mögliche Schwingneigung der Röhre vorgeschaltet. Diese Maßnahme empfiehlt sich auch bei der EL 84 in Abb. 186. In Abb. 206 sind die für Eingang und Ausgang erforderlichen Abschirmleitungen angedeutet, deren Mäntel an Masse zu legen sind. Von der Anode der Endstufe führt ein $3\text{-M}\Omega$ -Widerstand zur Gitterleitung zurück; es handelt sich hierbei um eine verzerrungsmindernde Gegenkopplung. Der Sekundärseite des Ausgangsrafos ist ein $10\text{-}\Omega$ -Widerstand parallelgeschaltet, der bei abgetrenntem Lautsprecher dafür sorgt, daß der Ausgangsrafo nicht unbelastet läuft. Falls der Lautsprecher fest angeschlossen wird, kann dieser Widerstand entfallen. NF-Endstufen mit Übertragern dürfen niemals ausgangsseitig unbelastet betrieben werden! Wenn sekundärseitig am Übertrager nichts angeschlossen ist, hat dessen Primärwicklung einen sehr hohen Scheinwiderstand, da der Trafo dann nicht mehr den Ausgangswiderstand (Lautsprecherwiderstand) als Scheinwiderstand in den Anodenkreis transformiert (Seite 204), sondern nur noch als Anodendrossel mit hohem Scheinwiderstand wirkt (Abb. 152 und dazugehöriger Text).

Bereits bei geringen NF-Spannungen am Verstärkereingang ergibt sich dadurch an der Anode der Endröhre eine sehr hohe NF-Wechselspannung, da die Spannungsverstärkung der Röhre ja mit der Höhe des Anodenwiderstandes zusammenhängt. Die entstehende NF-Spannung (man spricht dabei von Leerlaufspannung, da der Trafo „leer läuft“, also nicht belastet ist) kann so hoch werden, daß Trafo und Röhre sehr schnell beschädigt werden. Daher Ausgangsrafos niemals unbelastet laufen lassen! In Abb. 206 „ersetzt“ der $10\text{-}\Omega$ -Widerstand die Lautsprecherlast, falls der Lautsprecher abschaltbar ist oder über Steckverbindung angeschlossen wird.

Aus dem gleichen Grunde genügt es nicht, einen Lautsprecher dadurch abschaltbar zu machen, daß man einen Schalter in die Schwingspulenleitung legt. Dieser Schalter muß dann ein einpoliger Umschalter sein, der den Trafoausgang vom Lautsprecher auf einen gleichgroßen Ersatzwiderstand umschaltet. Eine primärseitige Abschaltung des Trafos mit Schalter in der Pluszuleitung ist technisch unvorteilhaft. Abschaltung nur der Anodenleitung ist darüber hinaus unzulässig, da das Schirmgitter sonst allein an Plus

bleibt, den gesamten Anodenstrom übernimmt und dadurch schnell zerstört wird (Seite 207).

Für den Aufbau des Verstärkers gilt das bei Abb. 205 Gesagte. Auch hier ist die Abschirmwand über dem Röhrensockel erforderlich. Die Verlegung der Masseleitungen und Wahl der Massepunkte (Seite 313) ist gut zu überlegen. Das ist hier besonders wichtig! Ebenfalls zur Vermeidung von Brummeinstreuungen über die Heizleitung wird ein Pol der Heizspannung geerdet (jedoch nicht bei Gleichrichterheizungen!).

Kleine Hilfsgeräte für den Radiobastler

Ganz ohne Prüf- und Meßhilfen kommt man auch bei einfachen Bastelobjekten bald nicht mehr aus. Einfache Durchgangs-Prüfeinrichtungen finden wir fast in jedem Bastelbuch beschrieben. Hier sollen abschließend noch einige Hilfsgeräte beschrieben werden, die einfach zu bauen, aber für uns nahezu unentbehrlich sind.



Erweiterung des Meßgerätes „Multiprüfer I“ zum Vielfachmesser

Ohne Meßinstrument kommen wir beim Bau von Verstärkern und Empfängern und beim eventuellen Fehlersuchen nicht mehr aus, und auch für das Einstellen von Transistorschaltungen wird oft ein Instrument gebraucht. Die erste teurere Anschaffung jedes Bastlers sollte deshalb ein Meßinstrument mit nicht zu hohem Eigenstromverbrauch (siehe Seite 57 bis 62 und 99 bis 101!) sein. Sie macht sich bald bezahlt. Zwei oder drei mangels Meßhilfen zerstörte Transistoren sind nicht viel billiger!

Gute Vielfachmesser sind für uns nicht erschwinglich. Es gibt jedoch ein recht preiswertes und für unsere Zwecke ausreichendes Meßinstrument, den „Multiprüfer I“, das zwei Spannungsbereiche (12 V und 400 V) und einen Strombereich (2 mA) hat, für Gleich- und Wechselstrom geeignet ist und außerdem noch über einen Widerstandsmeßbereich ($50 \Omega \dots 10 \text{ k}\Omega$) verfügt. Es kostet etwa 60,- M, und diese Anschaffung lohnt unbedingt.

Der „Multiprüfer I“ ist ein Drehspulinstrument (Seite 97) mit eingebautem Gleichrichter (Abb. 62). Leider reichen seine drei Bereiche für unsere Zwecke noch nicht aus, doch läßt sich mit der Schaltung nach Abb. 207 leicht Abhilfe schaffen.

Wir brauchen einen 12-Stufen-Schalter, der aber eine erstklassige Ausführung mit stabilen, zuverlässigen Kontakten sein muß. Hier ist das Beste gerade gut genug, denn von der Kontaktsicherheit die-

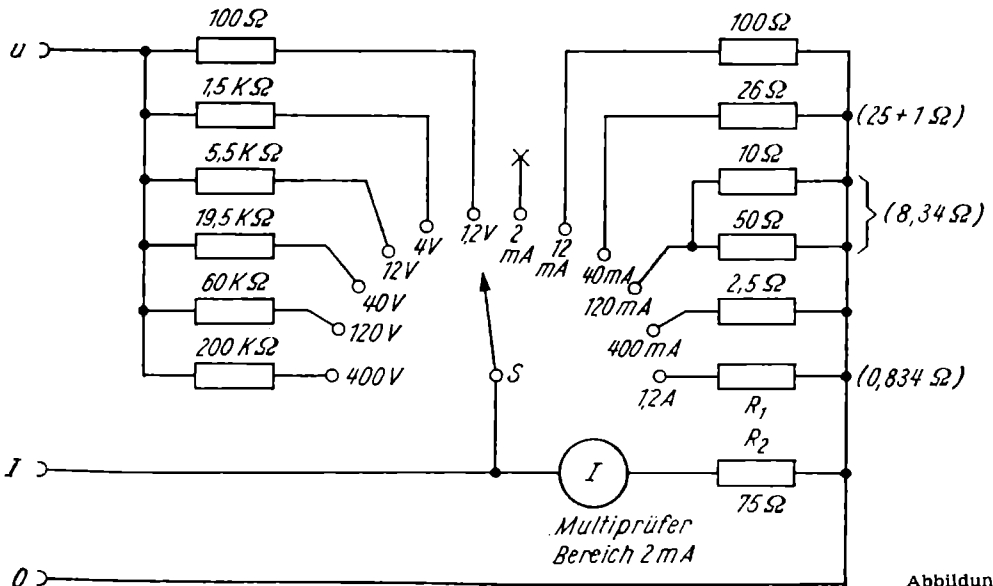


Abbildung 207

ses Schalters hängt die Meßgenauigkeit ab! Außerdem benötigen wir die in Abb. 207 angegebenen Widerstände. Von ihrer Genauigkeit hängt die Meßgenauigkeit ebenfalls ab; es kommen also nur Präzisionswiderstände (sogenannte Meßwiderstände) in Frage, die 1%, höchstens 2% Toleranz haben dürfen. Sie sind im Handel erhältlich und nur wenig teurer als übliche Widerstände.

Wir wählen Widerstandsgrößen für 0,5 W Belastung; für die Meßbereiche 400 V, 120 mA und 400 mA in Abb. 207 jedoch 2 W. Soweit „krumme Werte“ angegeben sind, setzen wir diese aus mehreren Teilwiderständen zusammen (Serienschaltung oder auch Parallelschaltung, Seite 59 bis 61). Bei den Bereichen 40 mA und 120 mA in Abb. 207 ist das bereits angedeutet.

Die ganze Schaltung bauen wir in ein kleines Kästchen ein, an das der Multiprüfer mit seinem 2-mA-Anschluß angeschlossen wird (in Abb. 207 als Instrument I eingezeichnet). Den Meßbereich wählen wir dann nur noch mit dem Stufenschalter S. Spannungen werden zwischen den Buchsen U und 0, Ströme zwischen I und 0 angeschlossen. Dabei muß der Schalter S vor Anschluß der Leitungen entweder auf 400 V oder auf 1,2 A — also stets auf dem höchsten Bereich — stehen, je nachdem, ob wir Strom oder Spannung messen wollen. Nur dann, wenn der Zeigerausschlag zu gering ist, schalten wir auf einen kleineren Bereich um.

Widerstand R 1 hat einen sehr geringen Wert. Derart geringe Widerstände gibt es nicht zu kaufen. Wir fertigen diesen Widerstand deshalb selbst aus einem kurzen Stück Widerstandsdraht, das von einer Heizspirale (Kocherspirale) abgeschnitten wird. Dann machen wir den Widerstand zunächst etwas zu groß und schicken einen Strom bekannter Stärke durch die Schaltung im Bereich 1,2 A. Der Strom soll etwa 1 A betragen; wir entnehmen ihn einer Batterie, der wir einen kleinen Widerstand vorschalten.

Wir brauchen jetzt ein Vergleichs-Amperemeter für 1 A, das wir beim Ausprobieren von R 1 in Serie mit Buchse I legen. Dann machen wir R 1 stückweise immer kleiner, bis unser Instrument genau den gleichen Wert zeigt wie das Vergleichsinstrument.

Falls wir uns kein Vergleichsinstrument leihen können, müssen wir so vorgehen: Wir schalten einen Widerstand von etwa 5Ω in Serie mit einer frischen Taschenlampenbatterie. Infolge deren Innenwiderstand geht die Spannung nun zurück. Wir messen sie bei angeschlossenem Widerstand mit dem Multiprüfer (ohne unsere Zusatzschaltung). Zu dem gemessenen Wert zählen wir 15% hinzu (die Spannung steigt später beim Einschalten des Widerstandes R 1 etwas!) und errechnen aus dieser Spannung und dem Wert des Widerstandes (5Ω) den tatsächlich fließenden Strom. Dann schalten wir

unsere Meßeinrichtung ein und ändern R_1 solange ab, bis der errechnete Strom angezeigt wird. R_1 ist nun für unsere Zwecke ausreichend genau bemessen.

Zuvor ist noch ein Widerstand genau zu bemessen: R_2 . Er kann zwischen null Ohm (dann entfällt er) und etwa $150\ \Omega$ liegen. Hierzu brauchen wir eine Spannung von etwa $0,9 \dots 1\ \text{V}$, die wir einer 1,5-V-Monozelle entnehmen und mit zwei als Spannungsteiler (Seite 57 bis 62) geschalteten Widerständen zu $10\ \Omega$ und $5\ \Omega$ auf etwa $1\ \text{V}$ herabsetzen. An diese Spannung schließen wir nun unser Gerät abwechselnd mit den Buchsen 0 und I (!) und 0 und U an. Dabei wird R_2 so verändert, daß bei Anschluß I genau 20% mehr angezeigt werden als bei Anschluß U und Bereich (Schalter S) 1,2 V. Aufgabe von R_2 ist, den Innenwiderstand des Instrumentes im 2-mA-Bereich (der von Exemplar zu Exemplar schwankt) auf genau $500\ \Omega$ zu ergänzen; nur dann stimmen alle anderen Widerstandswerte.

Das alles hört sich komplizierter an, als es ist. Trotzdem werden wir versuchen, unser Instrument späterhin mit einem anderen Vielfachmesser in allen Bereichen sicherheitshalber zu vergleichen.

Abgelesen wird auf dem Multiprüfer stets auf der dafür geeigneten Skala und je nachdem, ob wir Gleich- oder Wechselspannung und -strom messen, auf der schwarzen Skala (=) oder der roten (~). Die Strombereiche 12, 120 mA und 1,2 A werden auf der 12-V-Skala abgelesen.

Die Schaltung in Abb. 207 ist auch für jedes andere Milliampere-meter mit 2 mA Vollausschlag und höchstens $500\ \Omega$ Innenwiderstand geeignet. Wenn wir ein 1-mA-Meter haben, verringern sich alle Bereiche auf die Hälfte.

Drehspul-Meßinstrumente für 1 mA oder 2 mA gibt es im Handel auch als Einbauinstrumente zu kaufen. Wir können uns damit auch ohne den „Multiprüfer“ behelfsweise ein ganz brauchbares Vielfachmeßinstrument selbst bauen, das dann freilich nur für Gleichspannung und Gleichstrom geeignet ist. (Der Einbau von zusätzlichen Gleichrichtern wäre für uns im Hinblick auf die Meßgenauigkeit, Eichung und Berechnung der Widerstände zu problematisch!). R_2 in Abb. 207 kann dann je nach Meßwerktyp bis zu $400\ \Omega$ betragen.

Alle Widerstände lassen sich nach dem Ohmschen Gesetz berechnen, so daß bei Umrechnung der Widerstände auch jedes andere Instrument, so auch die neueren, allerdings etwas teureren „Multiprüfer II und III“, erweitert werden kann. Wenn man dann alle Widerstände neu berechnet, sollte man auf R_2 verzichten und vom tatsächlichen Innenwiderstand des vorhandenen Instrumentes sowie bei der Unterteilung der Meßbereiche von dessen Skaleneinteilung ausgehen.

Transistor-NF-Generator für universelle Anwendung

In Abb. 208 ist die Schaltung eines einfachen NF-Generators mit einem Transistor gezeigt, der bereits zum Betrieb eines Lautsprechers ausreicht. Es handelt sich um eine etwas abgewandelte Rückkopplungsschaltung. Als Übertrager wird der „Sternchen“-Ausgangstrafo Typ K21 benutzt, der sich hierfür gut eignet. Eine Wicklungshälfte der Primärwicklung arbeitet dabei als Rückkopplungswicklung. Die Rückkopplung erfolgt über Kondensator C, dessen Wert die erzeugte Tonhöhe bestimmt und daher nach Belieben zwischen $1 \dots 10 \mu\text{F}$ abgeändert werden kann. Widerstand R (der auch mit Festwiderständen ausprobiert werden kann – mit einem Trimmregler läßt sich aber genauer arbeiten) wird so eingestellt, daß der Generator gerade kräftig ertönt. R soll nicht geringer sein als erforderlich ist, sein Wert hängt von den Daten des benutzten Transistors ab. Vorsicht beim Einstellen; wenn R zu gering wird, kann der Transistor überlastet werden! In die Batteriezuleitung soll beim Einstellen ein Strommesser eingeschaltet werden. Eingestellt wird bei 4,5 V Batteriespannung. Dabei darf der Batteriestrom höchstens 100 mA betragen. R wird später nicht mehr verändert. Die Betriebsspannung kann beliebig niedrig sein, solange der Generator noch anschwingt (dazu reichen meist schon 1,5 V aus), jedoch nicht höher als 4,5 V. Bei A und B darf entweder ein Lautsprecher angeschlossen werden, oder die NF-Spannung wird abgegriffen und beliebigen Verbrauchern (Kopfhörern aller Art, NF-Verstärker-

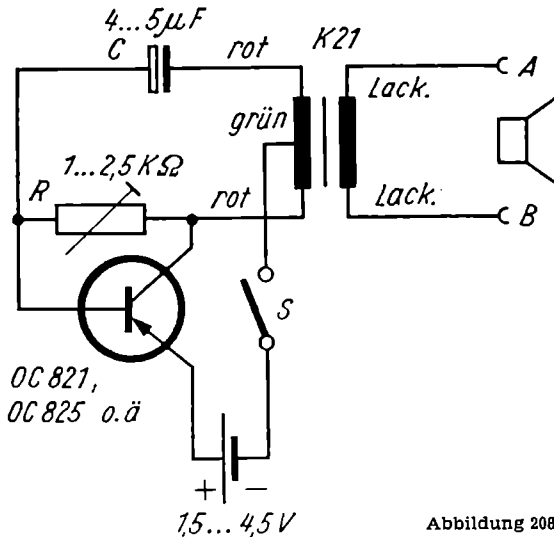


Abbildung 208

Eingängen usw.) zugeführt. Auch der Anschluß an den Tonabnehmereingang von Radios ist möglich.

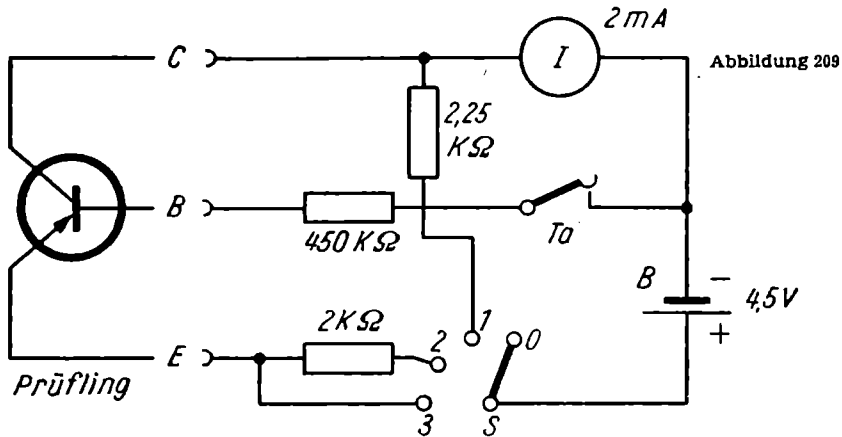
Für Prüfzwecke kann man B mit Masse des zu prüfenden NF-Verstärkers verbinden. Mit A wird ein Kondensator ($0,1 \mu\text{F}$ bei Röhrengeräten, $2 \dots 5 \mu\text{F}$ -Elko mit Plus nach A bei Transistorgeräten) in Serie geschaltet und der andere Kondensatorpol dem Gitter der zu prüfenden Röhrenstufe (oder der Basis bei Transistorstufen) angeschlossen. So kann die NF-Schwingung zur Prüfung in die betreffende Stufe eingespeist werden. Über längere Leitung ist bei A und B auch der Anschluß mehrerer Kopfhörer möglich. Schalter S wird dann durch eine Morsetaste ersetzt. Das Ganze stellt dann eine Morseanlage dar.

Der NF-Generator ist also vielseitig verwendbar; er kann auch sehr klein aufgebaut werden (Streichholzschachtelgröße oder noch kleiner). Als Transistor kommt ein beliebiger 150-mW-Typ in Frage; gut geeignete Typen sind z. B. die billigen „Bastlertransistoren 150 mW“ und „400 mW“, auch GC 121 bis 123 und GC 301.

Ein einfaches Transistorprüfgerät

Abb. 209 zeigt die Schaltung eines einfachen Transistorprüfgerätes, dessen Bau sich lohnt, wenn wir oft mit Transistoren basteln. Dabei kann es nämlich leicht geschehen, daß ein Transistor überlastet wird. Dann müssen wir feststellen, ob er zu Schaden gekommen ist. Die hauptsächlichsten Schäden sind: Unterbrechung einer Zuleitung im Transistor (meist durch Abschmelzen der Kollektor- oder Emitterperlen-Zuführung im Transistor) und durchgeschlagene oder beschädigte Kollektor-Sperrschicht. Der Transistor ist dann natürlich unbrauchbar. Diese Fehler können wir mit unserem Prüfgerät feststellen. Außerdem ist es oft wichtig zu wissen, welche Daten der betreffende Transistor ungefähr hat. Für manche Schaltungen werden Transistoren mit möglichst geringem Kollektorreststrom (I_{ceo}) oder hoher Stromverstärkung (β) gefordert. Siehe dazu auch Seite 223 und 226! Auch diese Werte können wir mit dem Prüfgerät für unsere Zwecke ausreichend genau messen.

Der zu prüfende Transistor wird in Abb. 207 bei B, E und C angeschlossen. Das Prüfgerät selbst besteht nur aus einem vierstufigen Schalter S, einer Drucktaste Ta (dafür eignet sich ein normaler Einbau-Klingelknopf), der Batterie B (wir benutzen eine Taschenlampenflachbatterie) und einem Milliampereometer mit 2 mA Vollausschlag des Zeigers. Dazu kommen noch drei Kleinwiderstände, deren in Abb. 209 angegebene Werte wir genau einhalten müssen. Den



„krummen“ Wert von $2,25\text{ k}\Omega$ setzen wir am besten aus mehreren Teilwiderständen mit handelsüblichen Werten zusammen (zum Beispiel Serienschaltung von $2\text{ k}\Omega$ und $250\ \Omega$); auch für den Wert $450\text{ k}\Omega$ können wir, wenn wir ihn nicht passend bekommen, mehrere Widerstände kombinieren (zum Beispiel $300\text{ k}\Omega$ und $150\text{ k}\Omega$ in Serie, oder $500\text{ k}\Omega$ und $5\text{ M}\Omega$ parallel, siehe dazu die Formel auf Seite 61). Für alle Widerstände genügen schon 0,1-Watt-Typen.

Alle Teile bauen wir zusammen mit der Batterie in ein kleines Kästchen ein, das auf der Deckplatte Ta, S, I und die drei Anschlüsse für den Prüfling trägt. Zum Anschließen des Prüflings eignen sich gut Krokodilklemmen, die wir auf der Deckplatte flach befestigen und in die wir die Transistordrähte dann einklemmen. Das einzige kostspielige Einzelteil ist das Meßinstrument.

Wir können aber auch ein vorhandenes Vielfachinstrument, zum Beispiel den Multiprüfer, benutzen. Es wird dann nicht fest eingebaut; wir sehen am Prüfgerät zwei Steckbuchsen an Stelle von I in Abb. 209 vor, an die wir das Instrument mit kurzen Verbindungsleitungen anstecken. Dann bleibt es auch noch für andere Zwecke benutzbar.

Mit diesem Prüfgerät können wir alle Typen von pnp-Kleintransistoren zwischen 25 mW und 4 W Belastbarkeit prüfen, praktisch also alle Typen, mit denen wir zu tun haben. Zur Prüfung von npn-Typen müßten Batterie und Instrument umgepolt werden; für Siliziumtypen wäre außerdem der $450\text{-k}\Omega$ -Widerstand auf $400\text{ k}\Omega$ zu verringern.

Schalter S beschriften wir am besten bei 0 mit „Aus“, bei 1 mit „Batteriekontrolle“, bei 2 mit „Schlußprüfung“ und bei 3 mit „Messen“. Bevor wir einen Prüfling anschließen, muß S immer in Nullstellung („Aus“) stehen. Danach wird zunächst in Stellung 1 geschal-

tet. Der Instrumentzeiger muß dann gerade bis zum Ende der Skala ausschlagen (also 2 mA anzeigen), wenn die Batterie noch brauchbar ist. Diese Batteriekontrolle ist wichtig, weil die Meßwerte bei zu geringer Batteriespannung nicht stimmen würden. Wenn der Zeiger also in Stellung 1 das Skalenende nicht mehr erreicht, muß die Batterie erneuert werden. Der Stromverbrauch des Gerätes ist aber so gering, daß eine frische Batterie fast ein Jahr lang hält, selbst wenn wir das Gerät oft benutzen. Deshalb können wir die Batterie sogar im Gerät fest einlöten und uns die Anfertigung von Anschlußklammern für die Batterie sparen. Es kann dann auch nicht vorkommen, daß durch eine locker sitzende Batterie-Anschlußklemme etwa Stromschwankungen und falsche Meßwerte zustande kommen.

Nach der Batteriekontrolle wird S auf Stellung 2 geschaltet. Jetzt liegt die Batteriespannung am Emitter und Kollektor des Transistors; die Basis bekommt zunächst noch keinen Strom. Der 2-k Ω -Widerstand dient jetzt als Schutzwiderstand für das Meßinstrument, falls der Transistor defekt ist und eine durchgeschlagene Sperrschicht hat. In diesem Fall besteht Durchgang zwischen Kollektor und Emitter, und die Stärke des fließenden Stromes wird nur vom 2-k Ω -Widerstand bestimmt. Der Zeiger des Instrumentes schlägt jetzt bis zum Skalenende oder sogar ein wenig darüber hinaus aus; daran erkennen wir diesen Fehler. Die Prüfung darf in diesem Falle nicht fortgesetzt werden (nicht auf Stellung 3 schalten, sonst wird das Instrument überlastet!). Bei einem einwandfreien Transistor fließt in Stellung 2 nur ein geringer Kollektorreststrom (vergleiche Seite 225); der Zeiger darf daher nur wenig (höchstens bis knapp zur Skalenmitte!) ausschlagen. Um den Kollektorreststrom genau zu messen, schalten wir dann in Stellung 3 und können jetzt den Wert für I_{ceo} am Instrument ablesen. Bei Germanium-Transistoren der Leistungsklasse bis 400 mW muß er unter 1 mA liegen. Gute Germanium-Transistoren haben nur 0,1 ... 0,3 mA Reststrom, geben also nur einen geringen Zeigerausschlag; bei Siliziumtypen ist er so gering, daß unser Instrument Null anzeigt. Wir müssen aber bei dieser Messung beachten, daß der Reststrom sehr temperaturabhängig ist; er steigt mit der Temperatur. Wir nehmen daher die Messung bei normaler Raumtemperatur (ungefähr 20 °C) vor und fassen den Transistor vorher nicht mit den Fingern an, um ihn nicht zu erwärmen und dadurch zu hohen Reststrom zu messen. Zeigt ein Transistor in Stellung 3 keinerlei Strom an und kommt auch beim Drücken der Taste Ta kein Strom zustande, so ist im Transistor eine Zuleitung unterbrochen, und der Transistor ist unbrauchbar.

Noch eine Besonderheit mancher Transistoren müssen wir kennen:

Wenn wir beobachten, daß das Instrument in Stellung 2 oder 3 zunächst einen geringen, scheinbar normalen Reststrom anzeigt, der Strom aber nicht konstant ist (der Zeiger pendelt dann um geringe Beträge unruhig hin und her oder beginnt sogar langsam, aber unaufhaltsam anzusteigen), dann läßt das auf eine schon beschädigte Sperrschicht schließen. Meist ist dann das Gehäuse des Prüflings undicht geworden, und eingedrungene Feuchtigkeit hat den Germaniumkristall angegriffen. Diese Transistoren rauschen meist auch sehr stark, wenn wir sie in Empfängern oder Verstärkern verwenden. Wenn der Reststrom allmählich immer weiter ansteigt, müssen wir die Prüfung schleunigst beenden, um das Instrument nicht zu gefährden. Der Transistor ist dann nicht mehr verwendbar. Rauschende Transistoren, deren Reststrom pendelt, ohne anzusteigen, können wir höchstens noch für einfache Schaltungen verwenden, bei denen es nicht auf gute Verstärkung ankommt, zum Beispiel für den NF-Generator (Abb. 208).

Wenn die Reststromprüfung in Stellung 3 einwandfrei verlaufen ist, drücken wir – ebenfalls in Schalterstellung 3 – die Taste Ta. Dadurch bekommt die Basis einen Strom von $10 \mu\text{A}$ ($= 0,01 \text{ A}$); dieser Wert ergibt sich nach dem Ohmschen Gesetz aus Batteriespannung und dem $450\text{-k}\Omega$ -Widerstand. Der Basisstrom führt zu einer Erhöhung des Kollektorstromes. Der Betrag dieser Erhöhung ist das Maß für die Stromverstärkung β des Prüflings. Erhöht sich beispielsweise der Kollektorstrom um 1 mA , so ist der Basisstrom 100fach verstärkt worden, denn $10 \mu\text{A} \cdot 100 = 1000 \mu\text{A} = 1 \text{ mA}$. Eine Stromerhöhung um $0,2 \text{ mA}$ würde demnach ein β von 20, eine Erhöhung um $1,5 \text{ mA}$ ein β von 150 bedeuten. Wenn wir uns nur merken, daß jeweils $0,1 \text{ mA}$ Stromanstieg einem β -Wert von 10 entsprechen, dann können wir β unmittelbar vom Instrument ablesen. Dazu ziehen wir von dem bei gedrückter Taste angezeigten Strom den Wert des vorher (Ta losgelassen) abgelesenen Reststromes ab. Der Rest ergibt den Wert für β , wobei „Stromzunahme in mA mal $100 = \beta$ “ gilt. Ein Beispiel: Reststrom (Stellung 3, Ta offen) = $0,3 \text{ mA}$, Anzeige bei gedrückter Taste = $1,1 \text{ mA}$. Wir rechnen: $1,1 - 0,3 = 0,8 \text{ mA}$ Stromzunahme. $0,8 \cdot 100 = 80$. Der Transistor hat die Daten $I_{\text{ceo}} = 0,3 \text{ mA}$ und $\beta = 80$. Die ganze Messung ist also recht einfach. Mit unserem 2-mA-Instrument können wir bei Transistoren mit geringem Reststrom β -Werte bis knapp 200 messen. Höhere Werte kommen selten vor. Als ungefähre Durchschnittswerte für die Transistoren, die wir für Bastelzwecke verwenden, können wir (bei Kleintransistoren bis 400 mW Belastbarkeit) rechnen: I_{ceo} ungefähr $0,3 \dots 0,5 \text{ mA}$, β ungefähr $30 \dots 80$. Je geringer I_{ceo} und je höher β ist, desto wertvoller ist der Transistor. Weniger gute Exemplare haben einen Reststrom

I_{ceo} zwischen 0,5 ... 0,8 mA (noch höhere Werte sind schon unnorm!) und ein β von 15 oder gar noch weniger. Sie sind oft nicht verwendbar. Die entsprechenden Werte für Leistungstransistoren über 400 mA (etwa die 1 ... 4-W-Typen GD 100, GD 160 u. ä.) sind im Durchschnitt: I_{ceo} = 1 ... 1,2 mA, β = 12 ... 30. Wie auf Seite 226 bereits gesagt wurde, können diese Daten innerhalb eines Typs ziemlich stark streuen, deshalb sind zwei Transistoren längst nicht als gleichwertig anzusehen, wenn sie die gleiche Typenbezeichnung tragen! Wer ein Instrument mit höherem Strommeßbereich (z. B. 3 mA) verwendet, kann entsprechend höhere β -Werte messen, allerdings wird dann das Ablesen geringer Reststromwerte schon schwierig. Umgekehrt kann man mit einem 1-mA-Instrument den Wert für I_{ceo} sehr genau ablesen, aber keine sehr hohen β -Werte messen. Ein 2-mA-Meßgerät ist die günstigste Lösung.

Experimentiernetzteil mit Durchgangsprüfeinrichtung

Um Sicherungen, Lampen, Spulen aller Art, Widerstände auf Stromdurchgang oder Kondensatoren auf Isolation prüfen zu können, brauchen wir eine Durchgangsprüfeinrichtung. Damit können wir Sicherungen, Lämpchen, Röhrenheizungen usw. auf Unterbrechung prüfen. Die Prüfung von Widerständen oder Spulen mit hohem Widerstand erfordert eine verhältnismäßig hohe Prüfspannung. Wir bauen das Ganze gleich als Universalgerät auf, damit wir auch Spannungen für Experimentierzwecke entnehmen können. Eine direkte Verbindung mit dem Starkstromnetz ist aus Sicherheitsgründen verboten; wir brauchen also einen Netztransformator.

Abb. 210 zeigt eine Schaltung, die bei geringem Aufwand sehr vielseitige Anwendung ermöglicht. Für den Netztrafo NT verwenden wir einen handelsüblichen Radiogerättrafo, der eine Anodenspannungswicklung für 200 ... 250 V \sim und 80 ... 100 mA Belastbarkeit haben soll und eine Heizwicklung für 6,3 V \sim und wenigstens 1 A. Es genügt also schon eine kleine einfache Ausführung. Größere Netztrafos haben (für Zweiweggleichrichtung, vergleiche Abb. 188) zwei Anodenwicklungen; wir verwenden nur eine davon. Sind mehrere Heizwicklungen vorhanden, so können wir sie nach Belieben an zusätzliche Anschlußbuchsen herausführen.

La 1 in Abb. 210 dient als Einschaltkontrolle. S 1 ist der Netzeinschalter; die Netzsicherung soll nicht stärker als 0,5 A sein. Bei den Buchsenanschlüssen II können wir die Heizspannung für beliebige Zwecke (etwa zur Röhrenheizung bei Versuchsschaltungen, die wir dann ohne Netzteil aufbauen können) abnehmen.

La 2 ist eine Durchgangsprüflampe für niederohmige Prüflinge. Sie leuchtet auf, wenn zwischen den Buchsen III (DP: Durchgangsprüfer für 6 V~) Verbindung besteht. Hier schließen wir zwei „Prüfstrippen“, also kurze, gut isolierte Litzen mit Bananensteckern an, die wir an den Prüfling halten. Mit diesem Durchgangsprüfer können wir Sicherungen, Leitungen, Schalterkontakte und ähnliche Dinge, die keinen merklichen Widerstand haben dürfen, prüfen. Bei Prüfobjekten mit geringem Widerstand – etwa Trafowicklungen oder Spulen mit geringer Windungszahl und starkem Draht – brennt La 2 merklich dunkler, woraus wir den Widerstand des Prüfobjektes schon ungefähr abschätzen können. Liegt er über etwa $40 \dots 50 \Omega$, so leuchtet La 2 nicht mehr erkennbar auf.

Derartig „hochohmige“ Prüfobjekte benötigen also eine höhere Prüfspannung und eine empfindlichere Prüflampe, die mit geringem Strom auskommt. Dafür verwenden wir eine Neon-Glimmlampe La 4, die möglichst eine 110-V-Ausführung sein soll. Diese Lampen gibt es als „Signalglimmlampen“ mit Schraubgewinde. Der Prüfling wird demzufolge mit den „Prüfstrippen“ an Buchsenan-

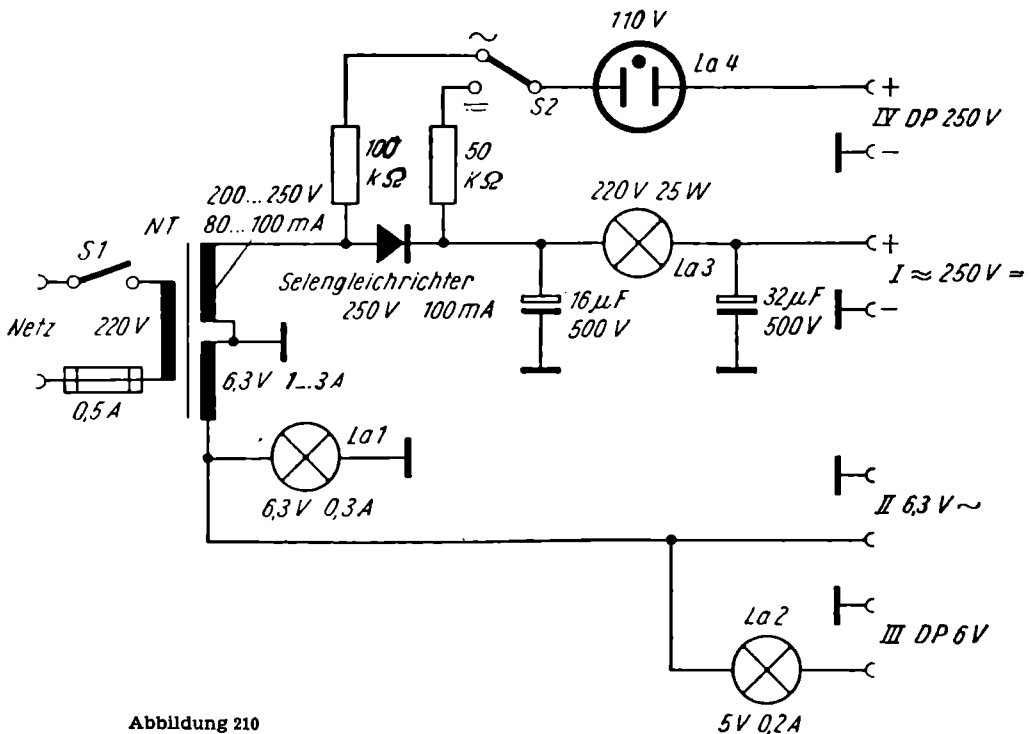


Abbildung 210

schluß IV angeschlossen. Die Glimmlampe La 4 zeigt dann noch bei Widerständen in Höhe von mehreren Megohm ein deutliches Glimmlicht. Mit ihr werden wir also Widerstände mit höheren Ohmwerten, Spulen mit hoher Windungszahl und ähnliches auf Unterbrechung prüfen.

Wie wir gleich sehen werden, muß die Glimmlampe je nach dem zu prüfenden Gegenstand mit Gleichspannung oder Wechselspannung betrieben werden. Zwischen diesen beiden Stromarten wählen wir mit Schalter S 2, einem kleinen einpoligen Kippumschalter.

Die Wechselspannung wird über den zum Schutz der Glimmlampe erforderlichen 100-k Ω -Widerstand direkt vom Trafo abgenommen (Glimmlampen dürfen niemals ohne Vorwiderstand betrieben werden, sonst werden sie sofort zerstört!), die Gleichspannung stellen wir uns durch die schon bekannte Einweggleichrichtung her (vergleiche Seite 187 und 299). Als Gleichrichter ist hier ein Selengleichrichter für 250 V 100 mA am billigsten und dauerhaftesten. Die Gleichspannung für La 4 greifen wir am Ladekondensator 16 μ F ab. Außerdem können wir die Gleichspannung für Versuchszwecke noch am Buchsenanschluß I direkt abgreifen. Wie wir sehen, hat das Ganze starke Ähnlichkeit mit einem üblichen Radionetzteil.

Der 32- μ F-Elko ist der Siebkondensator, und an Stelle eines Siebwiderstandes oder einer Siebdrossel (vergleiche Abb. 188 bis 190) verwenden wir die Lampe La 3, eine normale Glühlampe für 220 V und 15 W. Das hat in diesem Fall einen Vorteil: Erstens ist diese Lampe – wie wir wissen – nichts anderes als ein Widerstand, sie wirkt also ebenso wie zum Beispiel Widerstand Rs in Abb. 190. Freilich ist die Siebwirkung nicht so gut wie bei einem normalen Radionetzteil, dazu ist der Lampenwiderstand noch zu gering.

Zweitens können wir bei Stromentnahme an der Helligkeit von La 3 ungefähr abschätzen, welche Stromstärke wir bei I entnehmen. Wir sind gleich gewarnt, wenn einmal eine Versuchsschaltung mehr Strom aufnimmt, als sie darf.

Drittens ist Anschluß I dadurch „kurzschlußfest“; wenn wir die Buchsen nämlich direkt verbinden, bekommt La 3 die volle Spannung und leuchtet hell auf, ohne daß etwas zu Schaden kommt. Die bei I abgegebene Spannung hängt wegen des Spannungsabfalls an La 3 natürlich sehr von der entnommenen Stromstärke ab. Wir können hier also keine bestimmte Spannung angeben und schreiben am besten den Höchstwert von 250 V an. Mit diesem Anschluß müssen wir sehr vorsichtig sein, weil die abgegebene Spannung und Stromstärke wie bei jedem Radionetzteil nicht mehr ungefährlich ist! Wir kennzeichnen diesen Anschluß am besten rot und montieren ihn etwas entfernt von den anderen, damit wir hier nicht einmal die

„Prüfstrippen“ versehentlich anstecken. Diese Buchsen dürfen außen nicht blank oder berührbar sein! Einen absichtlichen Kurzschluß bei I wollen wir vermeiden. Zwar kann nichts zu Schaden kommen, aber der Siebkondensator wird dabei mit einem kräftigen Stromstoß plötzlich entladen, und das gibt an der Kontaktstelle einen kräftigen, laut knallenden Funken, der die Steckerstifte etwas verschmoren kann.

Ungefährlich ist dagegen der Glimmlampenanschluß IV. Hier kann höchstens eine Stromstärke von ungefähr 1 mA zustande kommen. Es besteht also kaum Gefahr, daß ein Bauteil durch zu starken Prüfstrom beschädigt wird, auch bekommen wir beim versehentlichen Berühren dieses Anschlusses oder der Prüfleitungen zwar einen recht empfindlichen Schlag, der aber nicht gefährlich werden kann. Die Bezeichnung + und - an den Buchsen IV stimmt natürlich nur, wenn S 2 auf Gleichspannung geschaltet ist.

Die Prüfung mit der Glimmlampe muß mit Überlegung geschehen. Spulen und Wicklungen aller Art prüfen wir mit Gleichstrom auf Durchgang. Bei Wechselstrom könnte der vielleicht sehr hohe Scheinwiderstand der Spule eine Unterbrechung oder unnormal hohen Widerstand vortäuschen! Ebenfalls mit Gleichstrom prüfen wir alle Isolatoren, etwa die Isolation zweier Kabeladern gegeneinander oder die Isolation einer Trafowicklung gegen den Eisenkern. Wir müssen bedenken, daß zwei Leitungsadern gegeneinander oder die Trafowicklung gegen den Kern eine Kapazität bilden. Prüfen wir mit Wechselstrom, so kann über diese Kapazität ein geringer Stromfluß zustande kommen, der einen Isolationsfehler vortäuscht! Natürlich wird auch die Isolation von Kondensatoren mit Gleichstrom geprüft, wenn wir feststellen wollen, ob der Kondensator durchgeschlagen ist. Bei Kondensatoren mit Werten über ungefähr 1 μF kann es vorkommen, daß die Glimmlampe regelmäßig kurz aufblitzt. Das ist normal, solange das Blinken nicht sehr schnell aufeinander folgt oder gar in Dauerlicht übergeht. Elkos können ein schwaches Dauerlicht zeigen, das von deren Reststrom herrührt (siehe Seite 304). Die Helligkeit des Dauerlichtes ist dann ein Maß für die Größe des Elkestromes und damit für die Güte des Elkos. Normale Folie- oder Rollkondensatoren oder keramische Kondensatoren, Drehkos usw. dürfen dagegen kein Dauerleuchten zeigen, andernfalls ist ihre Isolation mangelhaft.

Beim Anschluß von Kondensatoren deren zulässige Spannung beachten! Kondensatoren für weniger als 250 V dürfen natürlich hier nicht angeschlossen werden, sie würden beschädigt werden. Insbesondere die Niedervoltelkos von Transistorgeräten können wir hier also nicht prüfen.

Wollen wir aber feststellen, ob ein Kondensator noch seine Kapazität hat, so wird die Glimmlampe auf Wechselfspannung geschaltet und zeigt dann den vom Scheinwiderstand des Kondensators herrührenden Stromfluß an. Die Helligkeit ist dann ein Maß für die Kapazität. Das Aufleuchten ist noch bis herab zu Kapazitätswerten von einigen 100 pF deutlich erkennbar.

Da die Glimmlampe schon geringste Ströme – oder, was dasselbe bedeutet, sehr hohe Widerstände zwischen den Buchsen IV – anzeigt, können bei Durchgangsprüfungen von Leitungen, Kontakten und ähnlichen niederohmigen Gegenständen leicht Irrtümer vorkommen. Wenn ein Schalterkontakt nicht einwandfrei schließt, aber zwischen seinen Anschlüssen Staub, Feuchtigkeit o. ä. sitzen, kann der Widerstand dieser Verunreinigungen oft schon eine scheinbare Verbindung vortäuschen. In diesem Fall ist also die Durchgangsprüfung mit La 2 und Anschluß III sicherer, da sie auf solche hohe Widerstände noch nicht reagiert. Es kommt also immer darauf an, je nach der Prüfaufgabe die zweckmäßige Prüfeinrichtung zu wählen.

Transistoren und Germaniumdioden dürfen mit diesen Einrichtungen nicht geprüft werden!

Dagegen können wir über Anschluß IV Netzgleichrichter für 250 V prüfen; je nachdem, mit welcher Polarität wir sie anschließen, zeigen sie entweder Durchgang oder einen sehr hohen Sperrwiderstand (nur schwaches Aufleuchten) an, wenn wir mit Gleichspannung prüfen.

Da die Polarität der Buchsen IV gekennzeichnet ist, können wir bei unbekanntem Gleichrichter auch die Katode und Anode feststellen (siehe Abb. 133 und 134 sowie Seite 188 und 214). Ob der unbekanntem Gleichrichter für 250 V zugelassen ist, stellen wir bei Selengleichrichtern an der Anzahl der Selenplatten fest (Seite 215).

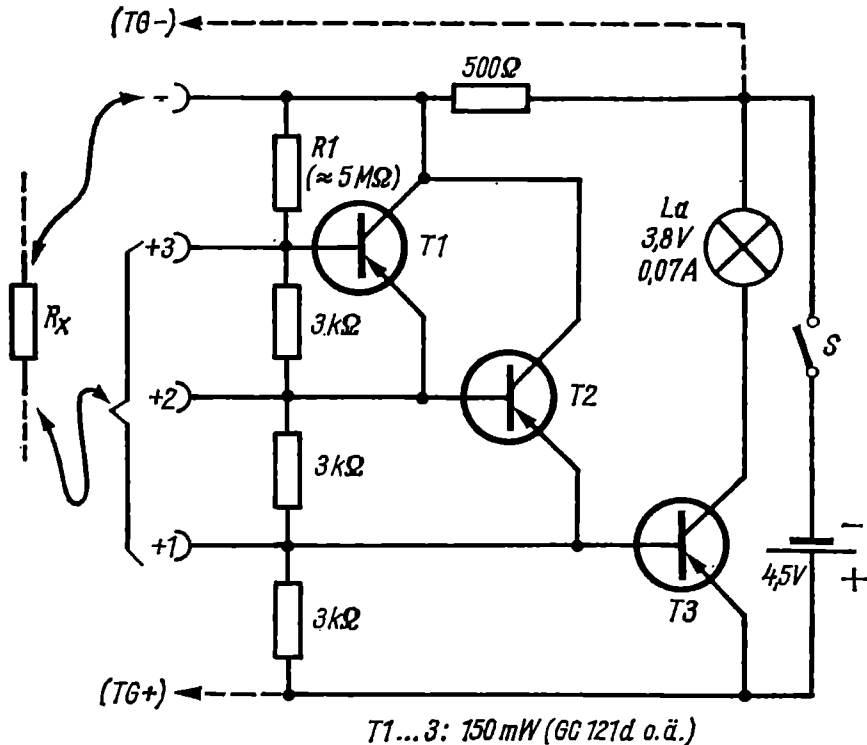
Das komplette Prüfgerät nach Abb. 210 bauen wir in ein nicht zu kleines Holzkästchen ein, das an der Frontplatte S 1, S 2 und die Anschlußbuchsen sowie La 1 trägt. La 2 und La 4 setzen wir etwas vertieft hinter Öffnungen in der Frontplatte, so daß diese Lampen abgedunkelt sind. Wir können dann auch schwaches Aufleuchten noch gut erkennen. La 3 wird innerhalb des Kastens montiert; es genügt, für diese Lampe ein kleines Fensterchen in der Frontplatte anzubringen, durch das ihr Aufleuchten sichtbar ist. Beim Anschluß der Elkos und des Gleichrichters auf die richtige Polung achten! Ein Metallchassis für die Einzelteile ist nicht unbedingt nötig, wir können alle Teile direkt innen im Holzgehäuse anschrauben. Die Elkos werden dann auf kleine Metallwinkel montiert und alle in Abb. 210 angegebenen Masseanschlüsse mit starkem Draht verbunden. Wir

müssen darauf achten, daß keine Befestigungsschrauben oder andere stromführende Metallteile durch das Gehäuse hindurchragen. In der Rückwand bringen wir reichlich Lüftungslöcher an, weil sich der Trafo etwas erwärmen kann und vor allem La 3, wenn sie längere Zeit leuchtet, einige Wärme entwickelt. Die Elkos ordnen wir so an, daß sie möglichst nicht erwärmt werden. Wer sich einen ständigen Arbeitstisch mit einer kleinen Schalttafel einrichtet, kann die ganze Prüfeinrichtung nach Abb. 210 auf und hinter der Schalttafel anbringen.

Durchgangsprüfer mit Transistoren für Batteriebetrieb

Um bei Durchgangsprüfungen auch für Bauteile mit hohem Widerstand ohne gefährlich hohe Spannungen und ohne Netzbetrieb auszukommen, können wir uns die Verstärkereigenschaft von Transistoren zunutze machen. Die vielseitigen Möglichkeiten des im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Experimentiernetzteils kann dieser Durchgangsprüfer – Abb. 211 zeigt seine Schaltung – nicht

Abbildung 211



ersetzen. Wir können damit aber immerhin schon Widerstände, Isolationen aller Art – und wegen der geringen Betriebsspannung auch Transistoren und Dioden! – auf Durchgang prüfen. Wenn wir für die drei Transistoren T 1... T 3 in Abb. 211 Exemplare mit möglichst hohem Stromverstärkungsfaktor (je höher, desto besser!) und – wenigstens für T 1 – geringem Kollektorreststrom verwenden, können bereits Widerstandswerte um 5 Megohm und höher durch deutliches Aufleuchten des Lämpchens La sichtbar gemacht werden. Für T 1 bis T 3 sind alle üblichen 150-mW-Transistorarten geeignet (GC 121 und ähnliche, natürlich auch Bastlertypen), wenn sie dem soeben Gesagten genügen.

Den Widerstand R 1 – dessen Wert sehr von unseren Transistor-Exemplardaten abhängt, er kann zwischen 0,1 und 10 Megohm liegen – bemessen wir so, daß Lampe La (für die sich nur der angegebene Typ eignet; er ist üblich für Taschenlampen!) gerade noch nicht sichtbar aufglimmt.

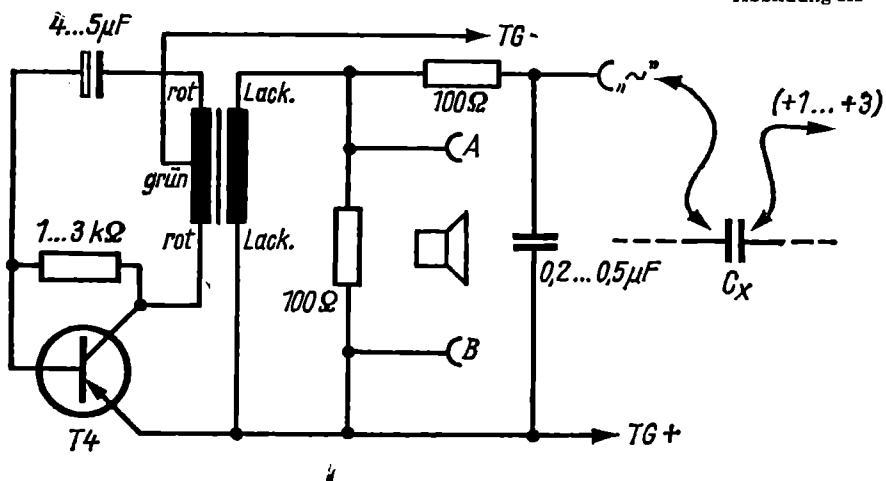
Unsere Prüflösungen schließen wir zwischen Buchse „–“ und einer der Buchsen + 1 bis + 3 an. Der von „–“ über das zu prüfende Objekt „Rx“ fließende Strom wird (je nachdem, ob wir die Buchse + 3, + 2 oder + 1 benutzen) ein- bis dreistufig verstärkt und reicht dann aus, um La zum Aufleuchten zu bringen. Da die 3 Prüfbuchsen unterschiedliche Empfindlichkeit haben, ist zusammen mit der Lampenhelligkeit eine grobe Abschätzung des Durchgangswiderstandes von Rx möglich. Eingangsbuchse + 3 hat die höchste Empfindlichkeit (geeignet für hohe Widerstandswerte bei Rx). Falls wir keine so hohe Empfindlichkeit benötigen und mit nachweisbaren Werten bis etwa 100 k Ω zufrieden sind, können wir T 1, Buchse + 3 und einen 3-k Ω -Widerstand weglassen. R 1 kommt dann an + 2; sein Wert wird wie beschrieben ausprobiert und ist dann ebenfalls geringer als 1 M Ω .

Der 500- Ω -Widerstand sorgt dafür, daß durch Rx niemals mehr als knapp 10 mA fließen können. Dieser geringe Prüfstrom wird auch von Halbleitern aller Art noch vertragen. Wir können also an Stelle von Rx auch Dioden oder die einzelnen Diodenstrecken von Transistoren (Basis-Emitter und Basis-Kollektor) auf Durchgang prüfen (über die Exemplardaten eines Transistors ist damit nichts ausgesagt!) und deren Polung feststellen. Bei Dioden wird die Lampe z. B. nur dann aufleuchten, wenn die Katode mit Buchse „–“, die Anode mit einer Buchse „+1“ bis „+3“ in Verbindung steht. Bei umgekehrter Polung sperrt die Diode. Wir können so die Diodenanschlüsse und bei Transistoren auch den Basisanschluß ermitteln. Der Anschluß + 3 ist so empfindlich, daß bei Halbleitern schon der Diodensperrstrom (bei Elkos u. U. der Elkestrom!) ausreicht, La zum

Aufleuchten zu bringen. Dies läßt sich unterscheiden, indem mit +2 oder +1 die Prüfung wiederholt wird.

Ein Nachteil dieser Anordnung ist, daß wir damit keine Kapazitätsprüfung vornehmen können; dazu wäre Wechselspannung erforderlich. Mit einer kleinen Erweiterung können wir aber die notwendige Wechselspannung auch mit aus der Batterie erzeugen. Wir verwenden dazu die Schaltung des bereits beschriebenen NF-Generators (Abb. 208, Seite 341!). Er kann mit dem Durchgangsprüfer zu einem Gerät in gemeinsamem Gehäuse zusammengefaßt werden und bleibt trotzdem noch als selbständiger NF-Generator verwendbar. Abb. 212 zeigt nochmals die Schaltung des NF-Generators mit den notwendigen Ergänzungen für den Durchgangsprüfer. Die Schaltung mit T 4, Elko und Widerstand an dessen Basis sowie Übertrager K 21 bleibt unverändert; bei A, B kann auch künftig ein Lautsprecher, Kopfhörer, NF-Verstärker oder dergleichen angeschlossen werden. Die Leitungen -TG und +TG führen zu den in Abb. 211 punktiert gezeichneten Anschlußstellen. Der NF-Generator wird dann zusammen mit dem Durchgangsprüfer aus dessen Batterie mitgespeist und über dessen Schalter S mit eingeschaltet. Die Widerstände $100\ \Omega$ und der (im Wert nicht sehr kritische) Kondensator $0,2 \dots 0,5\ \mu\text{F}$ in Abb. 212 sorgen für eine sinusähnliche, dem Prüfzweck angeglichene NF-Spannung und für eine Strombegrenzung, um die Transistoren nicht zu überlasten.

Ein auf Kapazität zu prüfendes Objekt – in Abb. 212 als C_x angedeutet – wird nun zwischen Buchse „~“ (die wir im Durchgangsprüfer neben Buchse „-“ anordnen) und einer der Buchsen +1 bis +3 (je nach Größe von C_x) angeschlossen. C_x erhält bei dieser Prü-



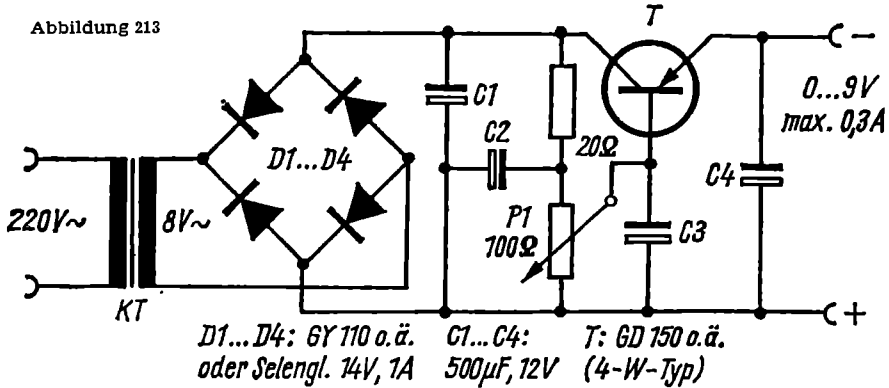
fung eine Wechselspannung von höchstens 1 V, wobei der Prüfstrom wieder unter 10 mA bleibt, so daß der Prüfling nicht gefährdet wird. Je nach Empfindlichkeit des Durchgangsprüfers (abhängig von den Stromverstärkungsfaktoren T 1 bis T 3) kann man an +3 damit noch Kapazitätswerte um 500 pF nachweisen. Eine Gleichrichtung der Prüfwechselspannung erfolgt automatisch durch die Transistoren T 1 bis T 3; da es sich um Einweggleichrichtung handelt, wird La bei Wechselspannungsprüfung nur mit etwa halber Helligkeit aufleuchten. Das ist normal, aber beim Prüfen zu beachten. Für T 4 eignet sich jeder beliebige 150-mW-Transistor, Typ (innerhalb der Leistungsklasse 150 . . . 400 mW) und Exemplardaten sind ganz gleichgültig. R und C an seiner Basis werden so bemessen, daß der NF-Generator sicher anschwingt und sich eine Frequenz von etwa 500 Hz ergibt (mit Kopfhörer oder Lautsprecher am Ausgang A–B abschätzen; „musikalischer“ Kammerton a^1 bis c^1 ungefähr).

Transistor-Netzteil als Batterie-Ersatz für Transistorgeräte

Wenn wir viel mit Transistorschaltungen experimentieren, so werden die benötigten Batterien auf die Dauer kostspielig. Es lohnt sich dann, wenn wir uns ein Netzteil bauen, das universell für alle Transistorgeräte bis zu 9 V Betriebsspannung und maximal etwa 0,3 A Stromaufnahme – also auch zum Betrieb industriell gefertigter Batterieempfänger am Netz – geeignet ist. Abb. 213 zeigt eine Schaltung hierfür.

Bei einem solchen Gerät müssen wir ganz besonders genau auf sorgfältige Trennung des Netzstromkreises von der Transistorschaltung und der Ausgangsspannung achten. Anderenfalls wäre das angeschlossene Transistorgerät unter Umständen mit dem Netz direkt verbündet; mit ihm sein Gehäuse, angeschlossene Leitungen, Antennen usw., so daß es zu sehr schlimmen Unfällen kommen könnte. Wir umgehen das dadurch und halten alle Sicherheitsbestimmungen ein, indem wir einen handelsüblichen Klingeltransformator für 8 V Wechselspannung verwenden. Die Netzzuleitung schließen wir ohne Schalter oder andere Organe direkt an den Trafo an, so daß von vornherein Berührungssicherheit für alle netzspannungsführenden Teile gegeben ist. Klingeltrafos sind für Dauerbetrieb am Netz zugelassen und kurzschlußfest gebaut, eine Sicherung in der Netzzuleitung ist daher überflüssig und hier sogar nachteilig. Wir dürfen aber aus diesem Grunde nur einen vorschriftsmäßigen Klingeltrafo, keine andere Netztrafo-Ausführung verwenden! Noch aus einem anderen Grunde ist hier ein Klingeltransformator – der außerdem

Abbildung 213



In Abb. 213 ist der Anschluß der Gleichrichter $D1 \dots D4$ versehentlich falsch gezeichnet. Die von KT kommenden Leitungen (8 V) gehören an den oberen und unteren Verbindungspunkt der Dioden. Die Plusleitung ($C1$, $C2$, $P1$ usw.) muß an der linken Seite (Diodenkathoden), die zum Minuspol von $C1$ und Kollektor von T führende Leitung an der rechten Seite (Diodenanoden) angeschlossen sein, wenn $D1 \dots D4$ in der gezeichneten Lage sind.

die preisgünstigste Lösung darstellt – erforderlich: Diese Trafos sind durch ihre besondere Konstruktion nicht nur gegen das Netz besonders gut isoliert, sondern außerdem sekundärseitig kurzschlußfest. Ihr Kurzschlußstrom kann einen bestimmten Maximalwert nicht überschreiten – das ist hier wichtig bei möglichen Kurzschlüssen der Ausgangsspannung. Nur dadurch läßt sich ein Netzteil-Aufbau schaffen, der für unsere Zwecke universell genug und trotzdem einfach ist.

Mit dem Potentiometer $P1$ stellen wir die gewünschte Ausgangsspannung je nach dem damit betriebenen Gerät ein. Wir verwenden für $P1$ ein drahtgewickelt Potentiometer (z. B. ein sogenanntes „Entbrummer-Potentiometer“) für wenigstens 1 W Belastbarkeit. Die Trafo-Sekundärspannung wird mit vier 1-A-Germaniumdioden oder Selengleichrichtern gleichgerichtet (Prinzip nach Abb. 62), danach folgt der Ladekondensator $C1$ (entspricht $C1$ in Abb. 188 und 190). $C4$ ist der Ausgangs-Siebcondensator (C_s in Abb. 188 und 190). Siebwiderstand bzw. Siebdrossel werden hier durch einen Leistungstransistor (es muß ein 4-W-Typ sein wegen des notwendigen recht hohen Ausgangsstromes, der von manchen Geräten benötigt wird) „ersetzt“, der gleichzeitig das Regelglied für die Ausgangsspannung darstellt. Wie arbeitet dieses Regelglied?

Zunächst entstehen durch die Gleichrichtung an $C1$ nicht nur 8 V, sondern etwa 10 ... 11 V Gleichspannung. Betrachten wir dazu nochmals Abb. 66. Die Spannungsangabe sekundär am Klingeltrafo „8 V“ bedeutet den „durchschnittlichen“ Wert (genau: Effektivwert) der

Wechselspannung. Tatsächlich schwankt sie jedoch periodisch zwischen Null und ihrem Maximalwert. An einem angeschlossenen Verbraucher – etwa einer Glühlampe – wird aber der Effektivwert, nicht der immer nur kurzzeitig erreichte Maximalwert wirksam! Der Effektivwert verhält sich zum Maximalwert wie 1:1,41, deshalb erreichen die Maximalamplituden unserer Netzwechselspannung bei 220 V (Effektivwert!) in jeder Periode kurzzeitig $1,4 \cdot 220 = 310\text{V}$! Der Maximalwert unserer Trafo-Sekundärspannung mit 8 V effektiv beträgt daher $8 \cdot 1,41 =$ rund 11 V. Der Ladekondensator C 1 wird aber (vgl. dazu Abb. 189!) auf die Maximalspannung aufgeladen, so daß wir dort zunächst reichlich 11 V messen, die bei Belastung (Stromentnahme) auf einen Wert zwischen 10 und 11 V zurückgehen. Der Transistor T in Abb. 213, der zusammen mit C 4 eine Art Siebglied bildet, kann also (zwischen Kollektor-Emitter) noch 1...2 V Spannungsabfall erzeugen, trotzdem haben wir am Ausgang noch 9 V verfügbar. Andererseits kann die Ausgangsspannung niemals höher sein als die Basisspannung des Transistors – dann würde der Emitter negativ gegen die Basis, und der Transistor sperrt! Die Basisspannung greifen wir an dem – als Spannungsteiler geschalteten – Potentiometer P 1 ab. Die Emitterspannung, und mit ihr die Ausgangsspannung, kann dann stets nur gerade auf einen Wert etwas unterhalb der Basisspannung ansteigen, und zwar unabhängig von dem Stromwert durch den Emitter, der zugleich der Strom des angeschlossenen Gerätes ist. Das bedeutet aber, daß die Ausgangsspannung unabhängig vom Wert des Ausgangsstromes fast konstant ist – und das wiederum bedeutet, vom Verbraucher-Gerät her gesehen, einen sehr geringen Innenwiderstand unserer „Stromquelle“ Netzteil! Wir haben dadurch auf einfache Weise eine recht gut gegen Belastungsschwankungen stabilisierte Spannungsquelle, wie sie etwa einer frischen, unverbrauchten Batterie entspricht. P 1 kann grob in Volt geeicht werden, eventuell durch Vergleich mit einem am Ausgang angeschlossenen Voltmeter. Später können wir dann an P 1 nach dessen Skala die gewünschte Ausgangsspannung einstellen. – Wichtig sind auch noch C 2 und C 3. Beide Elkos sieben die Basisspannung für T, die deshalb sehr weitgehend brummfrei ist. Wenn aber die Basisspannung brummfrei, also konstant ist, muß es wegen der Transistorfunktion auch die Emitter- und damit die Ausgangsspannung sein! Die am Kollektor noch stehende Brummspannung vom Ladekondensator – sie ist in Abb. 189 und auf Seite 298 schon erklärt worden – kann deshalb am Emitter nicht wirksam werden, sie wird automatisch geregelt. Der Transistor erfüllt also neben seiner spannungsregelnden und stabilisierenden Wirkung noch die Funktion eines Siebgliedes.

Dabei ist C 3 besonders ausschlaggebend; dieser Elko hat hier die gleiche Wirkung wie ein etwa 30fach größerer Elko an Stelle von C 4! Der Hauptanteil der Siebwirkung liegt also in C 3 begründet; C 4 unterstützt die Siebwirkung zusätzlich und hat vor allem die Aufgabe, kurzzeitige Stromspitzen von mehr als 0,3 A, die gelegentlich auftreten könnten, auszugleichen.

Mehr als 0,3 A können wir dem Netzteil nicht entnehmen. Dabei wird der Regelbereich des Transistors überschritten, und es kommt zu absinkender Ausgangsspannung und ähnlichen Störungseffekten wie bei Verwendung erschöpfter Batterien. Vor allem aber wird bei mehr als 0,3 A die maximal zulässige Belastbarkeit des Transistors überschritten! Da das sehr schnell zu seiner Zerstörung führen kann, wollen wir streng darauf achten, daß es niemals zu Kurzschlüssen der Ausgangsspannung kommt; auch die bei Klingeltrafos vorhandene Strombegrenzung (auf 0,5 A oder 1 A je nach Typ des Trafos) schützt unseren Transistor nicht ganz zuverlässig. Wer mit häufigen Kurzschlüssen beim Experimentieren rechnen muß, kann in die Emitterleitung noch eine Radio-Schmelzsicherung „0,25 A flink“ einschalten. Unbedingt notwendig ist das aber nicht — denn unbedingt zuverlässig ist der Transistor auch dann noch nicht gegen extreme Kurzschlüsse gesichert!

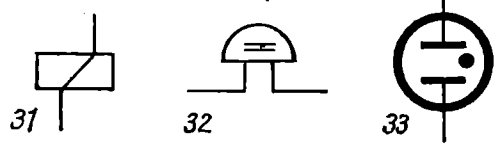
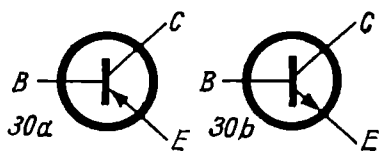
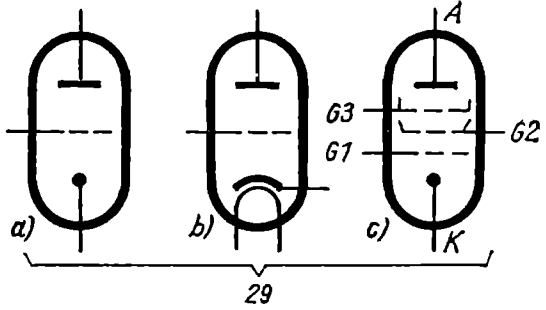
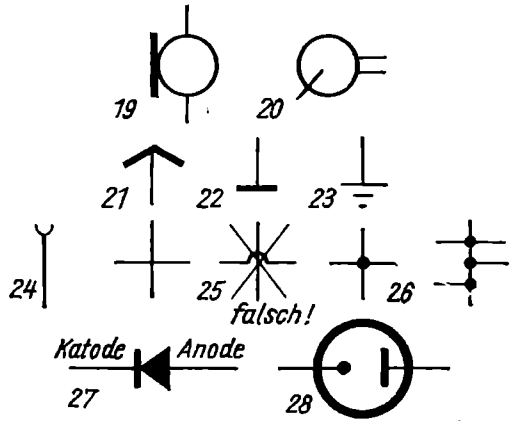
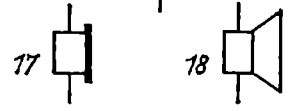
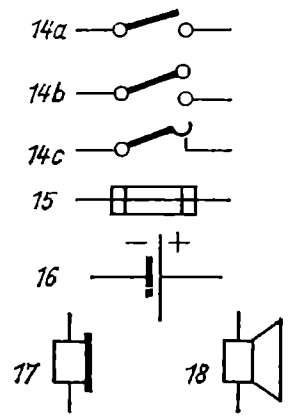
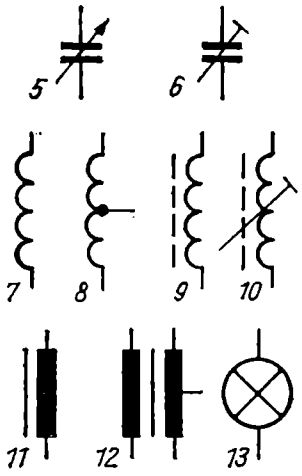
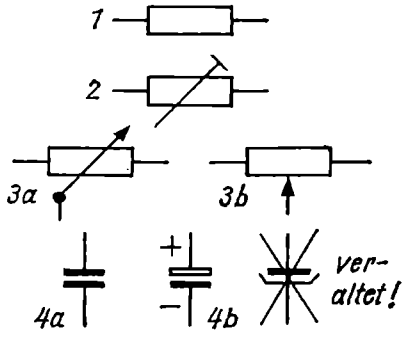
Der Transistor soll auf ein Kühlblech (Aluminium $100 \times 100 \times 2$ mm) montiert werden, da er bei längerer Entnahme des vollen Stromes sonst schon zu warm wird. Wenn nicht mehr als 0,1 A Strom entnommen wird (für die Kleinempfänger dieses Buches reicht das!), genügt für T bereits ein 1-W-Typ (GD 100, GD 110 u. ä.).

ANHANG

Die wichtigsten Schaltsymbole der Rundfunktechnik und Kurzhinweise zu den Einzelteilen

1. Widerstand allgemein. Wertangabe in Ohm (Ω), Kiloohm ($k\Omega$) oder Megohm ($M\Omega$)
 $1 M\Omega = 1000 k\Omega = 1\,000\,000 \Omega$
2. Regelbarer Widerstand nur für Abgleichzwecke. Nicht zur ständigen Bedienung (Trimmregler)
3. Regelbarer Widerstand zur ständigen Bedienung: Potentiometer (Spannungsteiler). Üblich sind beide Symbole (3a und 3b). Falls nur für Abgleichzwecke bestimmt (Trimpotentiometer), wird bei 3a die Pfeilspitze durch Querstrich ersetzt, wie in Abb. 2
4. a): Kondensator allgemein. Kapazitätsangabe in μF , nF, oder pF (Mikrofarad, Nanofarad, Pikofarad). $1 \mu F = 1000 nF = 1\,000\,000 pF$
b): Elektrolytkondensator (Elko). Vorzug: Hohe Kapazitätswerte auf kleinem Raum. Nachteil: Geringer ständiger Reststrom, nicht für reine Wechselspannung. Beim Anschluß auf richtige Polung achten! Polaritätsangabe kann entfallen. Durchkreuztes Schaltzeichen noch in älterer Literatur (unzulässig!)
5. Regelbarer Kondensator (Drehkondensator, Drehko; Abb. 162 und dazugehöriger Text). Als Abstimm-drehko Rotor an Masse bzw. kaltes Schwingkreisende. Als Rückkopplungsdrehko Rotor nach Anode bzw. Kollektor. Werte von Drehkos bei 10 pF... 500 pF
6. Regelbarer Kondensator für Abgleichzwecke, nicht für ständige Bedienung (Trimmkondensator, Trimmer). Meist für Schraubeneinstellung ausgebildet und aus Keramik gefertigt. Werte: 3... 100 pF, selten bis 200 pF
7. Spule allgemein, für Hochfrequenz (HF-Spule). Besonders Luftspule
8. Wie 7. mit Anzapfung (Abgriff). Zeichnerische Lage der Anzapfung nicht maßgebend für tatsächliches Windungszahl-Verhältnis
9. wie 7., aber mit HF-Eisenkern
10. wie 9., HF-Eisenkern für Abgleichzwecke verstellbar. Praktisch bei den meisten Spulenkernen der Radiotechnik der Fall. Abgleichsymbol nur notwendig, wenn Spule tatsächlich zum Abgleich bestimmt ist

11. Spule mit Eisenkern und hoher Induktivität, für NF. Induktivitätsangaben in Henry (H), Millihenry (mH). $1 \text{ H} = 1000 \text{ mH}$
12. Transformator (Trafo) mit Eisenkern und zwei Wicklungen, für NF-Anwendungen und Starkstrom. Rechte Wicklung hier angezapft
13. Glühlampe allgemein. Nur für Lampen mit Glühfaden
14. a): Schalter allgemein, einpoliger Ausschalter
b): einpoliger Umschalter
c): Taster, Druckschalter. Kontaktgabe, solange gedrückt wird
15. Sicherung. Speziell Feinsicherung (Radiosicherung)
16. Chemische Stromquelle allgemein. Soweit nichts anderes angegeben, ist Primärelement gemeint (ein oder mehrere Elemente), aber auch Sekundärelement (Akku) möglich. Polaritätsangabe kann entfallen. Angabe der Spannung erforderlich, wenn die Schaltung dimensioniert ist. Das Symbol bedeutet keinen bestimmten Spannungswert
17. Hörmuschel allgemein. Kopfhörer, Ohrhörer
18. Lautsprecher allgemein. Wird, soweit nichts anderes angegeben, als permanentdynamischer Lautsprecher verstanden
19. Mikrofon allgemein. Mikrofonart und Impedanz ohne zusätzliche Angabe nicht unterscheidbar
20. Tonabnehmer (für Schallplatten) allgemein. Alle Bauarten
21. Antenne allgemein (Rundfunktechnik). In älterer Literatur oftmals auch Steckerstift. Je nach Vorkommen leicht zu unterscheiden
22. Masse, Masseanschluß (Abb. 147). Bedeutet meist, aber nicht immer Verbindung mit Metallchassis bzw. Gehäuse des Gerätes. Alle Massezeichen einer Schaltung sind untereinander verbunden zu denken
23. Erde, Erdverbindung, Erdanschluß allgemein
24. Steckbuchse allgemein. Symbol in Literatur nicht einheitlich
25. Leitungskreuzung. Die kreuzenden Leitungen haben keine Verbindung. Durchkreuzte Darstellung ist unzulässig
26. Leitungsverbindung. Verbindungsstellen werden durch Punkte gekennzeichnet. Unterschied zu 25.
27. Gleichrichter allgemein. Heute meist speziell für Halbleiterdioden benutzt. Elektronen-Durchlaßrichtung von Katode zu Anode, also entgegen der Pfeilspitze! Katode bei Halbleiterdioden meist farbig gekennzeichnet. Bei Selenplatten: Katode am Federkontaktring
28. Vakuungleichrichter (Röhrendiode; Seite 186). Elektronendurchlaßrichtung von Katode zu Anode. Katode Punkt, Anode Strich



29. Vakuumröhre (Rundfunkröhre)
 - a): Triode ohne besondere Angabe der Heizungsart (wenn Heizungsart ohne Bedeutung, auch für direktgeheizte Röhren!)
 - b): wie a) mit Angabe der Heizung
 - c): Mehrgitterröhre, hier: Pentode. Buchstaben können entfallen. Gitter werden gezählt von Katode zu Anode
30. Transistor. Basis B, Kollektor C, Emitter E. Buchstaben können entfallen.
 - a): pnp-Typ,
 - b): npn-Typ
31. Kraftmagnet (Elektromagnet) allgemein. Beispiel: Relaiswicklung
32. Wecker allgemein. Angabe der Stromart = oder \sim . Hier Gleichstromwecker entsprechend Klingel in Abb. 44
33. Glimmlampe. Punkt deutet Gasfüllung an. Allgemein auch Gasentladungsröhre. Bei gasgefüllten Spezialröhren wird Gasfüllung mit Punkt auch in Symbolen nach Abb. 28 und 29 angegeben

Farbkennzeichen auf Kleinstwiderständen (siehe Rückseite des Einbandes)

Für Transistorgeräte und andere besonders klein zu bauende Geräte benötigen wir oftmals die modernen Kleinstwiderstände für 0,1 W bis 0,125 W oder 0,05 W Belastbarkeit. Wegen der Kleinheit dieser Widerstandskörper lassen sich die Wertangaben nicht mehr wie bei größeren Widerständen als Zahlenwerte aufdrucken. Deshalb wird für die Angabe des Ohmwertes eine Farbpunktzeichnung angewendet.

Die Wertangabe erfolgt bei der Farbkennzeichnung stets in Ohm (Ω), niemals in Kiloohm ($k\Omega$) oder Megohm ($M\Omega$), wie wir das von Zahlenaufdrucken kennen. Es sind stets drei Farbpunkte vorhanden (Ausnahme: kleine Werte von 1...9 Ω , die mit nur zwei Punkten gekennzeichnet werden), von denen stets einer auf der Anschlußkappe des Widerstandes sitzt. Dies ist der „1. Punkt“, der Wert ist also beginnend bei diesem Punkt zu „lesen“. Bei der ersten Übung halten wir den Widerstand am besten so vor uns, daß der auf der Kappe markierte 1. Punkt links ist, wir können dann in normaler Leserichtung „lesen“. Hinter diesen Farbpunkten folgen oft noch 1...2 Gold- oder Silberpunkte, die die Toleranz angeben, also nichts mit dem Widerstandswert zu tun haben. Diese Punkte – oder einer von ihnen – können auf der anderen Kappe des Widerstandes sitzen,

bei „in Leserichtung“ richtig gehaltenem Widerstand finden wir diese Toleranzpunkte also am rechten Widerstandsende vor.

Die Toleranz gibt an, um wieviel Prozent der Widerstand durch Fertigungsabweichungen vom aufgedruckten Wert abweichen kann.

Die Farben haben folgende Bedeutung:

Schwarz	= 0	Grün	= 5
Braun	= 1	Blau	= 6
Rot	= 2	Violett	= 7
Orange	= 3	Grau	= 8
Gelb	= 4	Weiß	= 9

Die Toleranz wird angegeben mit

1 Goldpunkt = 1% 2 Goldpunkte = 2%

1 Silberpunkt = 5% 2 Silberpunkte = 10%

ohne Toleranzpunkte = 20%

Beginnend beim 1. Farbpunkt (Kappenpunkt) bezeichnet der 1. Farbpunkt die erste Ziffer, der 2. Farbpunkt die zweite Ziffer, der 3. Farbpunkt die Anzahl der nachfolgenden Nullen. Die so erhaltene Zahl gibt den Wert in Ohm (Ω) an.

Beispiel: 1. Punkt grün, 2. Punkt braun, 3. Punkt rot. Ziffernfolge also: 5-1-00 (3. Punkt sagt: 2 Nullen!), der Widerstand hat also $5100 \Omega = 5,1 \text{ k}\Omega$.

Zweites Beispiel: 1. Punkt braun, 2. Punkt schwarz, 3. Punkt gelb. Ziffernfolge: 1-0-0000, also $100\,000 \Omega$ oder $100 \text{ k}\Omega$.

Drittes Beispiel: 1. Punkt braun, 2. Punkt schwarz, 3. Punkt schwarz. Ziffernfolge: 1-0-Null Nullen, also 10Ω .

Demzufolge kann niemals schwarz als 1. Punktfarbe auf der Kappe enthalten sein, da eine Wertangabe nicht mit Null beginnen kann. Jetzt ist auch erkennbar, weshalb Werte unter 10Ω nur zwei Farbpunkte haben. 5Ω wird dargestellt mit: grün, schwarz. Hier bezeichnet also der zweite Punkt die Anzahl der Nullen – nämlich keine. Ein dritter schwarzer Punkt in der Reihenfolge grün, schwarz, schwarz würde nämlich „5-0-keine Null“, also 50Ω ergeben. Die Farbe des dritten bzw. letzten Punktes muß besonders beachtet werden, da sie die Größenordnung des Wertes bestimmt. Außerdem ist besonders bei den Farben rot/orange/gelb auf sorgfältige Unterscheidung zu achten.

Besonders wertvolle Widerstände zeichnen sich durch geringe Toleranzen aus, sie sind sofort an der Goldpunktzeichnung erkennbar. Ein Widerstand mit folgender Farbkennzeichnung:

orange-rot-gelb-gold-gold

hat also den Wert 3-2-0000, d. s. $320\,000 \Omega$ oder $320 \text{ k}\Omega$ und die Toleranz 2%. Sein tatsächlicher Wert kann dann bis zu $6,4 \text{ k}\Omega$ über

oder unter dem Nennwert liegen. Ein Widerstand mit den Farben:
rot-schwarz-grün-gold

hat demzufolge die Ziffernfolge 2-0-00 000, das sind 2 Millionen Ω = $2M\Omega$ und 1% Toleranz, weicht also von $2M\Omega$ um höchstens 20 k Ω ab. Würde die Gold- oder Silberkennzeichnung ganz fehlen, so könnte er bis zu 20% vom Nennwert abweichen und in unserem Beispiel dann zwischen 1,6 ... 2,4 M Ω liegen.

Die Grundfarbe der Widerstandskörper ist bei Widerständen aus der DDR-Produktion immer grün, wenn die Farbkennzeichnung benutzt wird. Ausländische Widerstände haben manchmal auch braune Grundfarbe, an Stelle der Farbpunkte werden dort häufig Farbringe angebracht, so daß der Wert auch beim eingebauten Widerstand von allen Seiten erkennbar ist.

Seit einigen Jahren haben die handelsüblichen Widerstände sehr oft „krumme Werte“, die nicht genau mit den Angaben in unseren Schaltbildern übereinstimmen. Ähnliche „krumme Werte“ findet man auch in Industrieschaltbildern der letzten Jahre zunehmend, also beispielsweise 4,7 k Ω oder auch 5,1 k Ω statt 5 k Ω . (Das Ohm-Zeichen Ω wird übrigens in manchen technischen Veröffentlichungen weggelassen – 4,7 k bedeutet dann 4,7 k Ω , 2,2 M bedeutet 2,2 M Ω usw.). Diese „ungeraden“ Zahlen bedeuten nicht etwa, daß der Widerstandswert unbedingt so genau sein muß, sondern diese Wertangaben rühren ganz einfach davon her, daß die Staffelung der in Großserien gefertigten Werte bis vor einigen Jahren nach der – inzwischen veralteten – DIN-Norm erfolgte (die im allgemeinen abgerundete, „glatte“ Zahlenwerte aufwies). Inzwischen hat sich aber international die IEC-Norm durchgesetzt, deren Zahlenstaffelung nach bestimmten mathematisch formulierbaren Verhältnissen erfolgt, so z. B. 1 – 1,6 – 2,2 – 2,7 – 3,3 – 3,6 – 3,9 – 4,7 – 5,1 – 6,8 – 8,2 usw. Dies hat Vorteile für den Gerätekonstrukteur und vor allem auch für die Herstellung, auf die wir hier nicht näher eingehen können. Für uns ist das nur insofern von Bedeutung, als wir beim Einkauf unserer Widerstände (und Kondensatoren, die zum Teil ebenfalls nach IEC-Norm wertgestaffelt sind) statt eines in einem Schaltbild angegebenen runden Wertes ohne weiteres auch den nächstbenachbarten Normwert verwenden können (natürlich nur, wenn die Schaltung und Beschreibung nicht ausdrücklich genaue Einhaltung eines Widerstandswertes vorschreibt). Der Bastelanfänger läßt sich durch diese IEC-Normwerte leicht täuschen und vermutet in Schaltbildern mit solchen „krummen“ Wertangaben eine Genauigkeitsforderung auch dort, wo es schon ein annähernd stimmender Wert tut. Deshalb sind in diesem Buch alle Schaltungen mit abgerundeten Werten angegeben, die nicht immer mit der handelsüblichen Staffelung der IEC-

Normwerte übereinstimmen. Wir können dann ohne weiteres etwa für einen mit $2\text{ k}\Omega$ angegebenen Wert einen Widerstand mit dem handelsüblichen Wert von $2,2\text{ k}\Omega$ verwenden; statt $5\text{ k}\Omega$ also auch $5,1\text{ k}\Omega$ oder gar $4,7\text{ k}\Omega$. Grundsätzlich dürfen wir mit dem gekauften Wert um $\pm 10\%$, meistens sogar noch etwas mehr, von dem im Schaltbild angegebenen Wert abweichen. Das gleiche gilt auch im Rahmen unserer Basteleien für Kondensatoren (allerdings mit Ausnahme von Schwingkreiskondensatoren, die in unserem Schwingkreis frequenzbestimmend sind – sie sollen möglichst genau dem Schaltbild entsprechen!).

Empfehlenswerte Bücher

Wir haben viele wichtige Zusammenhänge kennengelernt, aber auch vieles weglassen müssen oder zum besseren Verständnis vereinfacht.

Manche Frage wird noch unbeantwortet sein, und neue Fragen werden auftauchen, je eingehender wir uns mit der Rundfunktechnik beschäftigen.

Mit dem erworbenen Grundwissen können wir auch andere Bücher lesen, die das eine oder andere Sachgebiet gründlicher behandeln. Wir können uns nun auch allmählich an größere Bauanleitungen wagen.

Hier sind einige Bücher zusammengestellt, die dieses Buch ergänzen. Damit wir uns in diesen Büchern besser zurechtfinden, ist für jeden Titel der Inhalt in Stichworten angegeben, so daß sich jeder das Gewünschte herausuchen kann.

1. Ladislav Smrž „Elektrotechnik – leicht gemacht“ (Der Kinderbuchverlag Berlin). Elektrotechnische Grundlagen. Viele Experimente und Bastelaufgaben. Besonders Erläuterung derjenigen elektrotechnischen Zusammenhänge, die für die Rundfunktechnik weniger Bedeutung haben und daher in diesem Buch wegfallen mußten. Geeignet zur Vertiefung der hier im Teil I erworbenen Kenntnisse.
2. Walter Conrad „Einführung in die Funktechnik“ (Fachbuchverlag Leipzig). Rundfunktechnische Grundlagen. Kurzgefaßte, aber reichhaltige Erklärung der Funktion von Empfängern und Sendern. Geeignet zur Vertiefung und Ergänzung der hier in Teil I und II erworbenen Kenntnisse. Allerdings nur Röhrentechnik
3. Karl-Heinz Schubert „Das große Radiobastelbuch“ (Deutscher Militärverlag Berlin). Ausschließlich Bastelpraxis für Anfänger

und Fortgeschrittene. Sehr ausführliche Hinweise zu allen mechanischen Arbeitsgängen, zum Selbstbau von Einzelheiten (u. a. Spulen und Trafos), Konstruktionshinweise. Umfangreiche Schaltungssammlung für Geräte aller Art (Empfänger, Meß- und Prüfgeräte, Verstärker, Spezialgeräte aller Art), sowohl Röhrentechnik als auch Transistortechnik. Tabellensammlung für den Praktiker. Dieses Buch schließt als praktische Anleitung sehr gut an das vorliegende Buch an. Die Schaltungsfundgrube für fast alle Gelegenheiten der Radio- und Verstärkerbastelei

4. Hagen Jakubaschk „Das große Elektronikbastelbuch“ (Deutscher Militärverlag Berlin, 4., erweiterte Auflage). Für alle, die sich für das weite Gebiet der Elektronik interessieren. Einführende Grundlagen und spezielle Bauelemente der Elektronik. Die derzeit umfassendste Elektronik-Schaltungssammlung für Bastler (rund 200 Schaltungen aus allen Anwendungsbereichen der Elektronik) mit praktischen Anwendungsbeispielen für alle Gelegenheiten und Bereiche (ausgenommen Rundfunk- und Verstärkertechnik). Geeignet sowohl für Anfänger als auch für Fortgeschrittene
5. Hagen Jakubaschk „Amateurtontechnik“ (Deutscher Militärverlag Berlin). Speziell geeignet für Bastler und auch Gerätebesitzer ohne Bastelinteressen, die mit ihren Geräten vielseitig arbeiten wollen. Alle mit Magnetontechnik, Bandgeräten und Verstärkern, Anpassungs- und Leitungsfragen der NF-Technik zusammenhängenden Dinge werden hier zusammenfassend behandelt. Für alle Leser, die sich nicht für Elektronik und auch nicht für Funktechnik (HF-Technik) interessieren, sondern sich auf Tonaufnahme, Tonwiedergabe und Elektroakustik „spezialisieren“ wollen, schließt dieses Buch gut an „Radiobasteln — leicht gemacht“ an. Es enthält Hinweise für Umgang mit Mikrofonen, Aufnahmepraxis, Stereofonie und zahlreiche Spezialgebiete der Elektroakustik sowie viele Bauanleitungen für die dazu notwendigen Geräte, sowohl mit Röhren als auch mit Transistoren.
6. Autorenkollektiv „Spannung — Widerstand — Strom“ (Fachbuchverlag Leipzig). Eine gründliche Einführung in die Elektrotechnik. Gute Ergänzung zum Teil I dieses Buches. Auch Nachrichtentechnik und Randgebiete sowie alles, was der Radiobastler von der Starkstromtechnik wissen muß.
7. Hans-Joachim Fischer „Transistortechnik für den Funkamateurl“ (Deutscher Militärverlag Berlin). Eingehende Einführung in die theoretischen Grundlagen der Halbleitertechnik und umfangreiche Transistorschaltungssammlung

8. Reihe „Der junge Funker“ (Deutscher Militärverlag Berlin). Die Hefte behandeln Einzelthemen für den Anfänger. Besonders geeignet: Heft 1 (Jakubaschk, Experimente für den Anfänger); Heft 6 (Schubert, Mit Transistor und Batterie); Heft 3 (Jakubaschk, Transistortechnik leicht verständlich), Heft 5 (Jakubaschk, Messen – aber wie?)
9. Reihe „Der praktische Funkamateurl“ (Deutscher Militärverlag Berlin). Als Ergänzung zum vorliegenden Buch besonders geeignet: Heft 5, Brauer, Vorsatzgeräte für den Kurzwellenempfang; Heft 8 und 9, Schubert, Praktisches Radiobasteln I und II (mechanische Grundlagen und Konstruktionshinweise usw.); Heft 10, Morgenroth, Vom Schaltzeichen zum Empfängerschaltbild (Einführung in das Schaltunglesen) und viele weitere.
Diese Reihe – seit Heft 80 in „Amateurreihe electronica“ umbenannt – umfaßt inzwischen weit über 100 Bände mit den verschiedensten Themen; ein großer Teil davon ist allerdings für den fortgeschrittenen Amateur bestimmt. Die Hefte 50 und 100 dieser Reihe sind Stichwort-Sammelbände und Übersicht (Registerbände) für alle Hefte dieser Reihen bis Nr. 100; auch der Buchhändler kann uns das vollständige Titelverzeichnis dieser ständig fortgesetzten Reihe zeigen.
10. „funkamateurl“ (Zeitschrift für Anfänger und Fortgeschrittene)
11. „Original-Bauplan“-Reihe (Deutscher Militärverlag Berlin); daraus für KW-Amateure besonders: Nr. 9, U. Fortier/K. Schlenzig „Fuchsjagdempfänger Reineke 1 bis 3 mit Variante für das 49-m-Kurzwellenband“, für NF-Amateure: Nr. 10, K. Schlenzig „Dialog-Kombi“, vielseitige Wechselsprechanlage + Rundfunkgerät, für fortgeschrittene Radiobastler: Nr. 11, L. Knapschinsky/K. Schlenzig „UKW-Super Senior“ und für Freunde der Miniaturbauweise: Nr. 15, K. Schlenzig „Transistor-Kleinstempfänger mini 1 und mini 2“
Zur Einarbeitung in die Besonderheiten von Siliziumhalbleitern: Nr. 18, R. Oettel/K. Schlenzig „Siliziumschaltungs mosaik“
12. Besonders zu empfehlen als universeller Ratgeber zu allen Konstruktions- und Gehäusefragen, Leiterplattenherstellung, Löt- und Montagehinweise und alle anderen Fragen zu Entwurf und Konzeption moderner Gerätegestaltung, Bausteintechnik usw. ist das Buch von Dipl.-Ing. K. Schlenzig „Amateurtechnologie – Von der Schaltung zum Gerät“ (Deutscher Militärverlag Berlin 1969). Dieses Buch eignet sich vor allem für den vorwiegend handwerklich Interessierten und erschließt dem Amateur die moderne Technologie.

Peter Klemm

TRÄUMER, KETZER UND REBELLEN

Illustrationen von Horst Bartsch

192 Seiten · Leinen mit Schutzumschlag · 8,50 M

Best.-Nr. 629 088 3

Für Leser von 12 Jahren an

Erzählt werden Geschichten aus den großen Utopien, vom „Schlaraffenland“ der leibeigenen Bauern bis zu den Idealen und Kämpfen der Hussiten, Taboriten und Wiedertäufer. Der Autor verfolgt Schicksale jener Menschen, die für ideale Zustände kämpften und litten.

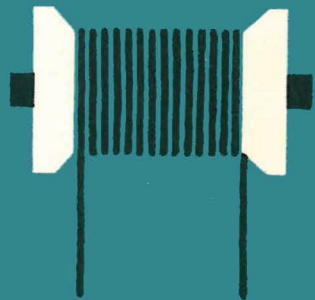
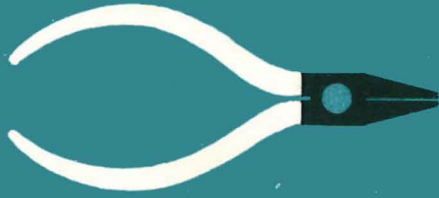
Sie erlebten Erfolge, schreckliche Niederlagen und fanden oft ein grausames Ende auf Scheiterhaufen oder hinter Kerkermauern.

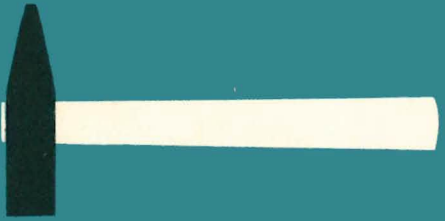
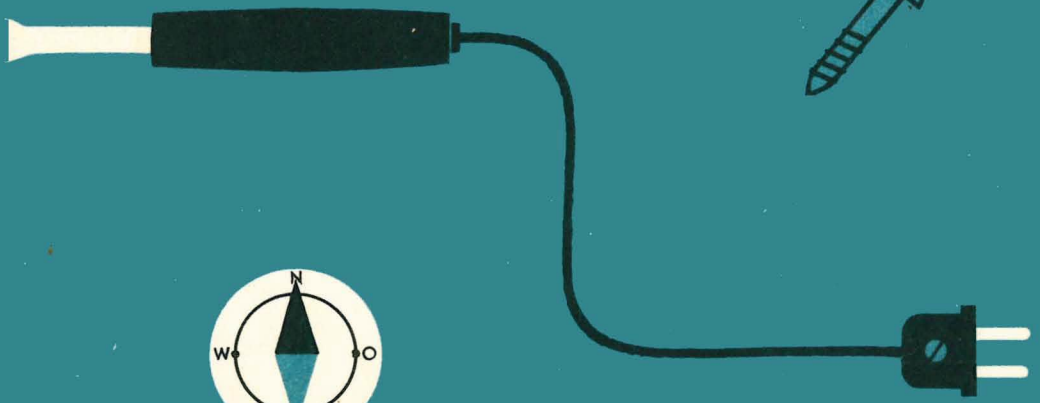
Es ist wichtig und erlebnisreich zugleich, diese Vorläufer und Verkünder großer Menschheitsträume kennenzulernen, in der Gewißheit, daß ihr Traum vom besseren Leben heute Gestalt annimmt.

Der Kinderbuchverlag Berlin

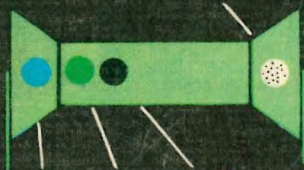
Einbandvorderseite: Konrad Golz
Einbandrückseite: Heinz-Karl Bogdanski
Illustrationen: Heinz-Karl Bogdanski
Schaltzeichnungen: Günter Reimann, Heinz Grothmann

Alle Rechte vorbehalten
Printed in the German Democratic Republic
Издано в Германской Демократической Республике
Lizenz Nr. 304-270/298/75-(50,5)
Satz und Druck: Karl-Marx-Werk Pößneck V 15/30
5. Auflage
LSV 7891
Für Leser von 13 Jahren an
Best.-Nr. 623 192 8
EVP 9,50





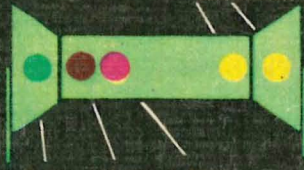
4. Punkt (Silber)
Toleranz 5%



1. Ziffer (blau) 2. Ziffer (grün) Anzahl der Nullen (schwarz) keine Null
6 - 5 -

65 Ω

4. und 5. Punkt (Gold)
Toleranz 2%

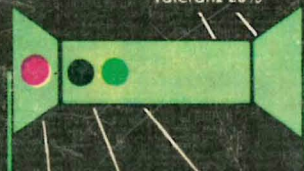


1. Punkt (grün) 2. Punkt (braun) 3. Punkt (rot)
5 - 1 - 00

5100 Ω

5,1 k Ω

4. und 5. Punkt fehlen
Toleranz 20%

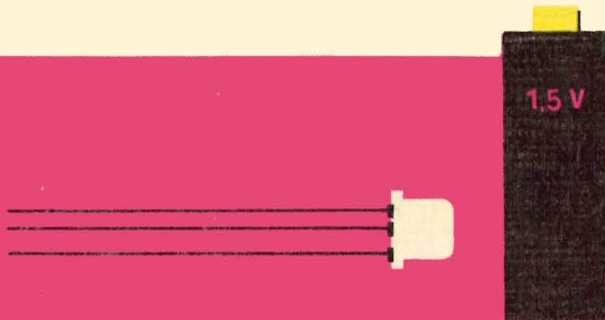
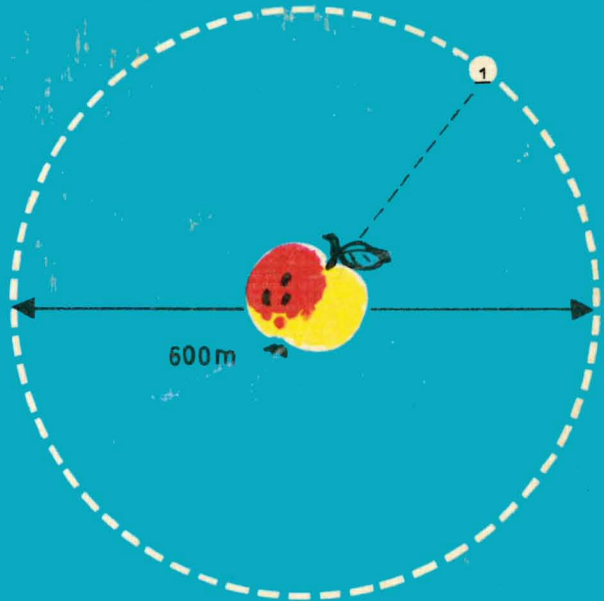


1. Punkt (rot) 2. Punkt (schwarz) 3. Punkt (grün)
2 - 0 - 00 000

2000000 Ω

2 M Ω

Farbkennzeichen für Kleinstwiderstände



Ein Buch zum Basteln und Bauen für Jungen und Mädchen