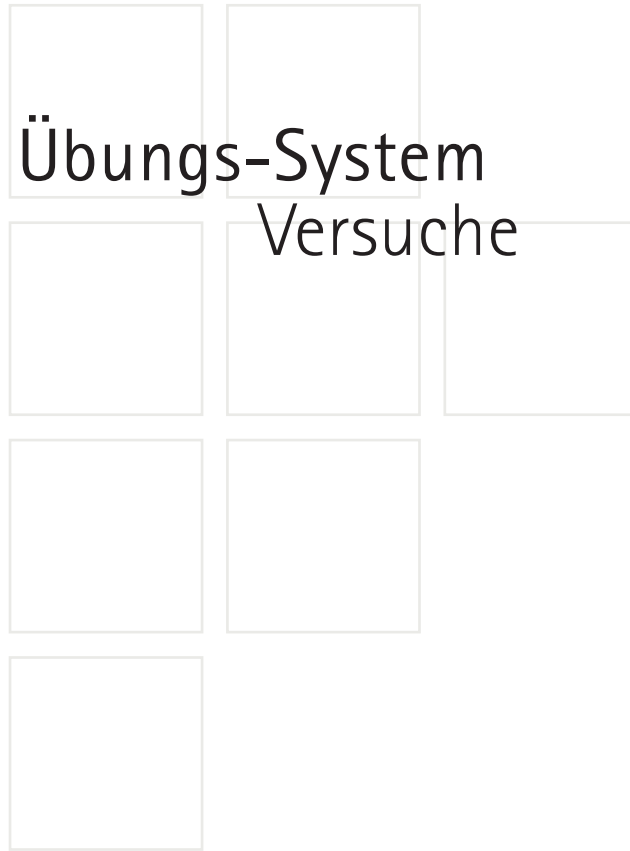




Übungs-System Versuche





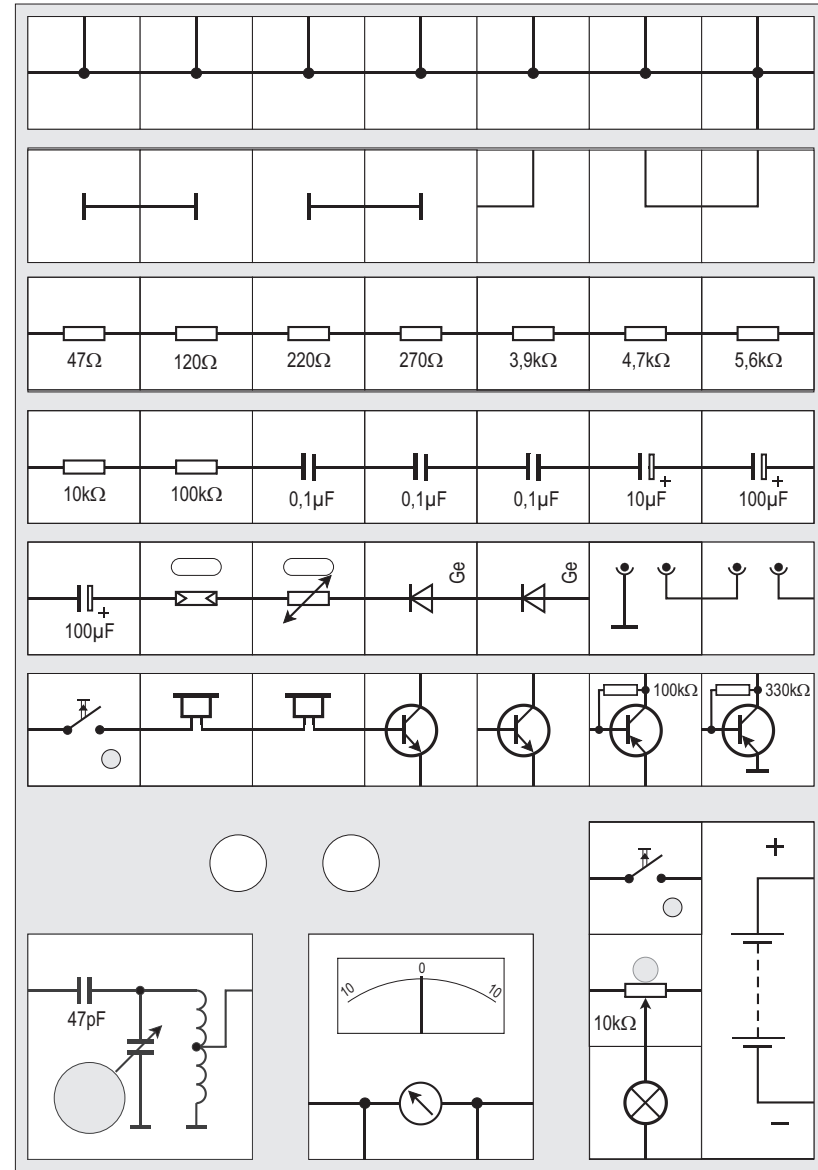
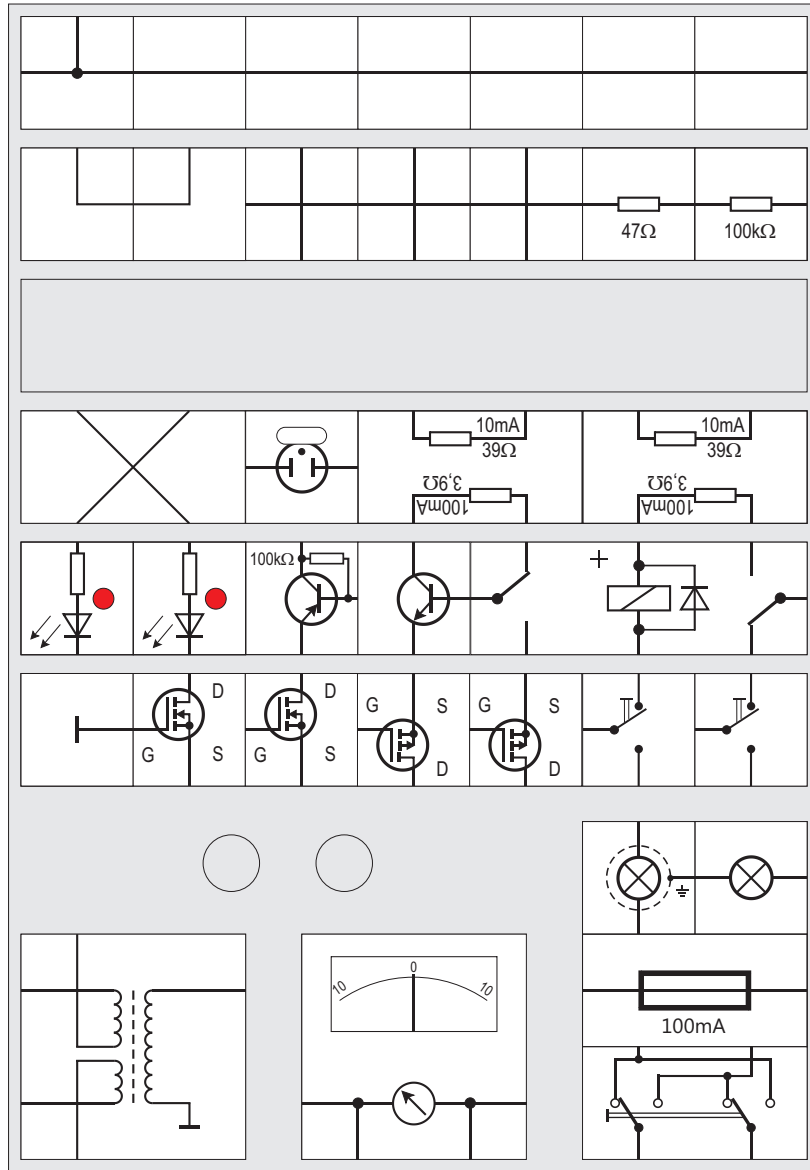
Lectron

Elektronik AG Vom einfachen Stromkreis zu Computerschaltungen

Autor
Gerd Kopperschmidt
Herausgeber
Reha Werkstatt Oberrad
Lectron
Buchrainstraße 18
60599 Frankfurt
Tel.: +49 (0)69 90 50 12 82
Fax: +49 (0)69 90 50 12 83



Experiment	Thema	Seite	Experiment	Thema	Seite	Vorbemerkung
	Verwendete Bausteine	4	31	Transistor im Stromkreis	37	<p>Die vorliegenden Experimente wurden für den Physikunterricht des 5. Schuljahres zusammengestellt und sind in der Praxis erfolgreich erprobt. Lerninhalte sind einfache und verzweigte Stromkreise mit verschiedenen Schaltern, logische UND, ODER - Verknüpfungsschaltungen, Leiter und Isolatoren, Kurzschluss und Überlast im Stromkreis sowie Schmelzsicherungen.</p> <p>Zu den aufgebauten Stromkreisen werden mit genormten Symbolen die Schaltpläne erarbeitet und umgekehrt Schaltpläne in Schaltungen umgesetzt. Alle Experimente bis Nr. 18 lassen sich für diese Unterrichtseinheit mit den Bausteinen des Schülerübungssystems aufbauen. Die vorhandenen Batteriebausteine wurden umgebaut, so dass Minus an Masse liegt. Empfehlenswert ist der Einsatz des LECTRON Netzgerätes, das Batterien zu sparen hilft.</p> <p>Auf diese Experimente aufbauend wurden für interessierte Schülerinnen und Schüler anschließend in einer halbjährigen Elektronik AG (1 Doppelstunde pro Woche) alle weiteren Versuche bis hin zu modernen Computer - Grundsaltungen in CMOS - Technik durchgeführt. Größere Experimente - wie beispielsweise das Zählflipflop - lassen sich jeweils mit Teilen zweier Übungskästen aufbauen, für einige Versuche sind allerdings auch zusätzliche LECTRON - Bausteine erforderlich; sie sind in einer Übersicht abgebildet und können von der LECTRON GmbH bezogen werden; dort ist ebenfalls ein Foliensatz zu allen Experimenten erhältlich.</p>
	Einleitung	5	32	Strom - Messungen an Emitterschaltung	38	
	Die Bausteine	6	33	Spannungs - Messungen an Emitterschaltung	39	
1	Ein einfacher Stromkreis	7	34	Messungen an Kollektorschaltung	40	
2	Das Wassermmodell	8	35	Transistor als Verstärker	41	
3	Messung der elektrischen Spannung	9	36	Arbeitspunkteinstellung	42	
4	Messung des elektrischen Stroms	10	37	Abschaltverzögerung	43	
5	Der unterbrochene Stromkreis	11	38	Anschaltverzögerung	44	
6	Die Parallelschaltung	12	39	Blinkschaltung	45	
7	Die Parallelschaltung im Modell	13	40	Helligkeitseinstellung	46	
8	Die Reihenschaltung im Modell	14	41	Weidezaungerät	47	
9	Reihenschaltung mit 3 Glühlampen	15	42	Fotowiderstand	48	
10	Widerstand im Stromkreis	16	43	Dämmerungsschalter	49	
11	Leitfähigkeit verschiedener Materialien	17	44	Lichtschranke	50	
12	Ein empfindlicher Nachweis	18	45	Blinkschaltung	51	
13	Umschalter und UND - Schaltung	19	46	Steuerung des pnp Transistors	52	
14	UND - Schaltung / UND - ODER - Schaltung	20	47	Zweistufiger Mikrofonverstärker	53	
15	Wechselschaltung / Kreuzschalter	21	48	Rückkopplungsarten beim Verstärker	54	
16	Schmelzsicherung	22	49	Rückkopplungsgenerator	55	
17	Schutzleiter	23	50	Anwendungen des Rückkopplungsgenerators	56	
18	Relais / Summer	24	51	Magnetstreifenleser	57	
19	Logik - Verknüpfungen mit Relais	25	52	Schwingungen und Modulation	58	
20	Diode	26	53	Detektor	59	
21	Leuchtdiode	27	54	Rundfunkempfänger	60	
22	Kondensator	28	55	Monostabile Kippstufe	61	
23	Kondensator laden und entladen	29	56	Bistabile Kippstufe (Flipflop)	62	
24	Kondensator an «Wechselspannung»	30	57	Zähl - Flipflop	63	
25	Kondensator an Wechselspannung	31	58	Binärzähler	64	
26	Ohrhörer	32	59	MOSFETs	65	
27	Ohrhörer an Wechselspannung	33	60	Dimmerschaltung	66	
28	Spannungsteiler	34	61	p - Kanal MOSFET	67	
29	Potentiometer	35	62	CMOS - Inverter	68	
30	Aufbau des Transistors	36	63	CMOS - NAND	69	
			64	CMOS - NOR	70	





Einleitung

Was geschieht eigentlich, wenn wir zu Hause eine Lampe einschalten und es hell wird? Was passiert, wenn wir eine CD auflegen oder das Radio anstellen und Musik hören?

Für alle diese Vorgänge wird »elektrischer Strom«, oder allgemeiner Energie, benötigt und transportiert. Sowohl Strom als auch Energie sind für uns schwer fassbar, weil wir sie nicht sehen können. Wir kennen zwar ihre Wirkungen und haben diffuse Vorstellungen davon, greifen aber, um beispielsweise Voraussagen treffen zu können, zu vereinfachten Vorgängen aus der Alltagswelt, zu MODELLEN, an Hand derer wir dies besser tun können. Ein solches Modell soll zunächst vorgestellt werden.

Dass die Energie in verschiedensten Formen auftritt gehört zum physikalischen Allgemeinwissen: Potentielle, kinetische, elektrische, chemische Energie und Wärme sind geläufige Beispiele. Wir sprechen ganz selbstverständlich von verschiedenen Energieformen und ihre Um-

wandlungen ineinander, haben allerdings Mühe, sie zu definieren. Dass man ohne diese Unterscheidungen trotzdem zu sinnvollen Ergebnissen gelangen kann, lässt vermuten, dass diese Einteilung belanglos ist. Wir werden deswegen darauf verzichten und uns statt dessen an einem Modell orientieren, das von der Abteilung für Didaktik der Physik an der Universität Karlsruhe entwickelte wurde: Dem Karlsruher Physikkurs [1].

Danach findet ein Energietransport immer nur mit Hilfe eines TRÄGERS statt. **Wenn Energie strömt, strömt noch mindestens eine weitere Größe, der Energieträger.**

Das kann Wärme (Entropie), Licht (Photonen), Impuls, Drehimpuls oder, womit wir uns hier hauptsächlich befassen wollen, ELEKTRISCHE LADUNG sein.

Die wichtigste Eigenschaft von Energie ist, dass man sie weder erzeugen noch vernichten kann; in einem »Verbraucher« wird sie also nicht verbraucht, sondern von einem Träger auf einen anderen umgeladen. In einem elektrischen Stromkreis fließt zum Beispiel die Energie von

einer Quelle (Netzgerät, Batterie, Solarzelle, Dynamo) zu einer Glühlampe und wird dort von elektrischen Ladungsträgern auf die Träger Photonen und Entropie umgeladen. Auch die elektrischen Ladungsträger lassen sich weder erzeugen noch vernichten. Wenn sie die Energie abgeladen haben, fließen sie »leer« zur Quelle zurück und werden neu beladen. Der Energieträger Elektrizität fließt immer im Kreis und wir sprechen von einem geschlossenen Stromkreis.

Im LECTRON System legen wir den Minuspol der Batterie an die Aufbauplatte, an Masse. Immer, wenn die Ladungsträger auf ihrem Weg vom Pluspol durch verschiedene Schaltungsteile hier angekommen sind, haben sie auf ihrem Weg Energie umgeladen und strömen leer zur Batterie zurück. Die aus den LECTRON – Bausteinen aufgebauten Schaltungen zeigen deutlich den Stromkreis.

Auch ist es mit ihnen sehr leicht zu experimentieren: Normalerweise benötigt man Klemmen und Stecker, häufig sogar den Lötkolben, um Versuchsaufbauten herzustellen und zu experimentieren.

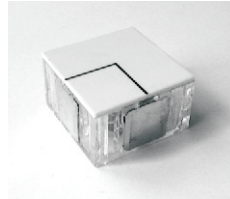
Bei den LECTRON – Bausteinen hingegen stellt sich magnetisch der Kontakt her; außerdem sind die Leitungszüge sichtbar aufgeprägt. Damit werden der Aufbau und das Verändern einer elektrischen Schaltung ganz einfach und übersichtlich.

Bevor wir das Modell vorstellen, wollen wir uns zunächst einige Grundbausteine des LECTRON System anschauen.

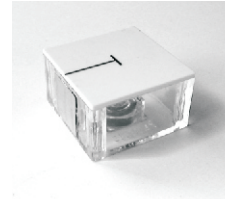
[1] Der Karlsruher Physikkurs KPK Schülerband 1 (Energie, Strömungen, Mechanik, Wärmelehre), AULIS Verlag Deubner & Co KG, Antwerpener Str. 6-12, 50672 Köln, ISBN: 3-7614-2095-1

Wer sich über Elektrotechnik hinaus für Physik interessiert, dem seien auch noch die folgenden Publikationen der Abteilung für Didaktik der Physik an der Uni Karlsruhe wärmstens empfohlen:

- ! Schülerband 2 (Daten, Elektrizitätslehre, Optik), ISBN: 3-7614-2096-X
 - ! Schülerband 3 (physikalische Chemie, Wellen, Photonen, Atome, Festkörper, Kerne), ISBN: 3-7614-2097-8
 - ! Unterrichtshilfen (Gesamtband) mit Lösungen aller Aufgaben der Schülerbände ISBN: 3-7614-2098-6 alle ebenfalls AULIS Verlag Deubner & Co KG, Antwerpener Str. 6-12, 50672 Köln
- Weitere Materialien unter:
www-tfp.physik.uni-karlsruhe.de/~didaktik



Das einfachste Schaltzeichen ist eine UN-UNTERBROCHENE LINIE; sie bedeutet eine direkte Verbindung. Diese Linie kann natürlich auch abgewinkelt sein. Im LECTRON - System wird sie durch den WINKELBAUSTEIN realisiert.



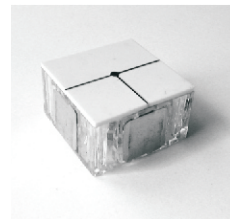
Eine direkte elektrische Verbindung zur Aufbauplatte (Chassis) stellt der MASSE-BAUSTEIN her: Bei diesem Baustein ist das Bodenkontaktplättchen mit dem seitlichen Plättchen elektrisch verbunden. Da der Leitungszug direkt nach Masse führt, ist auf ihm das Symbol für die Masseverbindung dargestellt.

Die treibende Kraft für alle Versuche ist die im Batteriebaustein einzusetzende Batterie. Es handelt sich um eine handelsübliche Batterie für Transistorradios mit einer Spannung von 9 Volt. Der Minuspol ist mit dem Bodenkontakt fest verbunden und liegt deswegen an der Aufbauplatte. Es gibt auch eine andere Ausführung, bei der er ebenfalls seitlich herausgeführt ist. Durch vorsichtiges Zusammendrücken der Seitenwände des weißen Oberteils kann der Batterie - Baustein geöffnet werden. Beim Schließen des Deckels ist darauf zu achten, dass die abgewinkelte Plus - Leitung beim Schaltsymbol auf das seitlich angebrachte Kontaktplättchen hinweist.

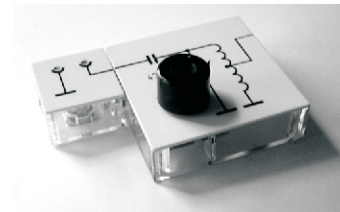
Die Bausteine

Es ist allgemein bekannt, dass Metalle sehr gut den elektrischen Strom leiten. Im Gegensatz dazu sind Kunststoffe, Papier, Gummi oder Porzellan nichtleitend und dienen als ISOLATOREN.

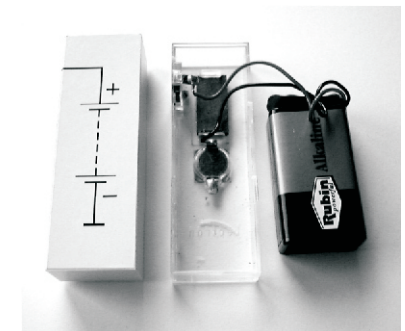
Elektrische Schaltungen werden zur Vereinfachung auf das Wesentliche durch SCHALTBILDER, auch STROMLAUFPLÄNE genannt, dargestellt. Mit international genormten Zeichen sind dabei die einzelnen Bauteile festgelegt und Fachleute erkennen mit einem Blick am Schaltzeichen, um welches Bauteil es sich jeweils handelt.



Wird an einer direkten Verbindung noch ein weiterer Schaltungsweg abgezweigt, so ist dies durch einen Punkt an der Verbindungsstelle gekennzeichnet. Wegen seines T - förmigen Leitungsstück heißt der entsprechende Baustein T - VERBINDUNG.



Auch bei manchen Bauteilen führen Anschlüsse direkt nach Masse; ihre Deckelschaltbilder zeigen dann das Massesymbol.



Die Bedeutung der anderen Bausteine lernen wir bei den Experimenten kennen.



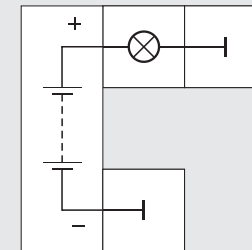
Experiment 1

Ein einfacher Stromkreis

Nun bauen wir unser erstes Experiment auf.

Als Energiequelle steht uns der Batteriebaustein zur Verfügung. An den Plusanschluss des Batteriebausteins setzen wir den Glühlampenbaustein und an diesen einen Verbindungsbaustein (Massebaustein), der als Rückleiter zur Aufbauplatte dient; der Minuspol der Batterie wird über einen weiteren Massebaustein ebenfalls mit der Aufbauplatte verbunden, dann ist der Stromkreis über sie geschlossen und die Glühlampe leuchtet.

Wir haben über die Punkte: Pluspol des Batteriebausteines - Glühlampe - Massebaustein - Aufbauplatte - durch die Aufbauplatte zum Masseanschluss des Batteriebausteins und zum Minuspol der Batterie eine leitende Verbindung hergestellt. Damit transportieren uns elektrische Ladungsträger (Strom) Energie von der Batterie zur Glühlampe. Ihr Glühfaden lädt die Energie auf andere Transportmedien um, nämlich den größeren Teil auf Entropie (Wärme) und den Rest auf Photonen (Licht). Die Ladungsträger gehen »leer« zur Batterie zurück und werden dort wieder neu beladen. Wie sieht nun unser Modell zu diesem einfachen Versuch aus?



Experiment 2

Das Wassermodell nach [1]

Wir stellen uns vor, dass wir nicht Energie sondern Wasser transportieren wollen, und zwar von einem Fass in ein anderes. Wir sind 17 Leute und transportieren das Wasser mit Bechern, wie es das Bild zeigt: Jeder hat einen Becher in der Hand und bleibt an seinem Platz stehen. Derjenige, der dem linken Fass am nächsten steht, schöpft mit seinem Becher Wasser aus dem Fass und reicht den Becher seinem Nachbarn weiter. Dieser gibt den Becher dem nächsten und so weiter. Der letzte in der Kette schüttet den Becher aus, in das rechte Fass. Die leeren Becher wandern durch eine zweite Kette zurück. Wir erkennen, dass der Becherstrom einen geschlossenen Kreislauf bildet, während das Wasser von links nach rechts transportiert wird.

In unserem Modell entspricht das Wasser der Energie; immer wenn Energie strömt, gibt es einen ENERGIETRÄGER, hier haben wir Wasserträger: die Becher.

Nun stellen wir uns die Frage: Wie können wir erreichen, dass mehr oder weniger Wasser in einer Minute vom linken ins rechte Fass gelangt? Die Antwort ist einfach: Wir füllen die Becher einmal sehr schnell und geben sie schnell weiter; so erhalten wir einen großen Was-

serstrom. Danach füllen wir sie langsam und geben sie langsam weiter, so erhalten wir einen kleinen Wasserstrom.

Der Wasserstrom ist umso größer, je größer der Strom der Wasserträger ist.

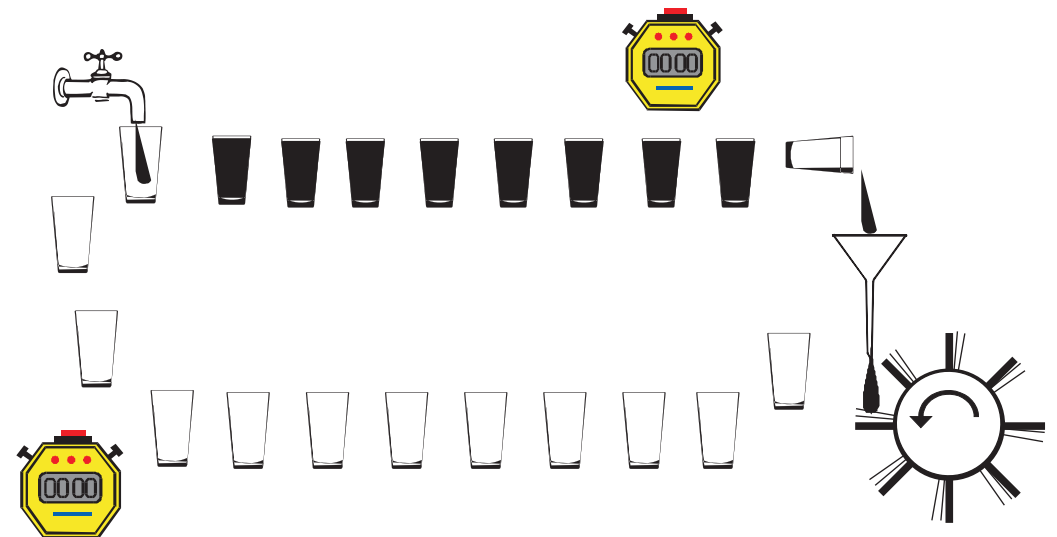
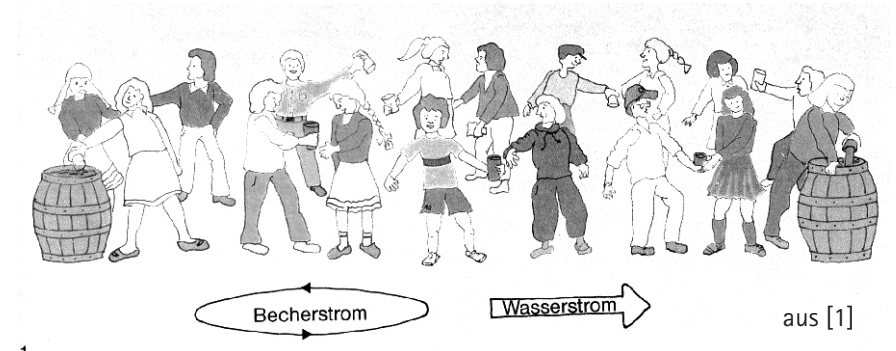
Es gibt noch eine zweite Möglichkeit, den Wasserstrom groß und klein zu machen. Wir lassen den Becherstrom immer gleich, z. B. alle zwei Sekunden ein Becher, also 30 Becher pro Minute. Aber zuerst füllen wir die Becher nur halbvoll; wir erhalten so einen kleinen Wasserstrom. Danach füllen wir die Becher ganz voll, und bekommen einen Wasserstrom, der doppelt so groß ist wie vorher.

Der Wasserstrom ist also umso größer, je mehr Wasser in jedem Becher ist; oder anders ausgedrückt: Der Wasserstrom ist umso größer, je mehr die Wasserträger (Becher) mit Wasser beladen sind.

Nun ersetzen wir das Wort WASSER durch das Wort ENERGIE:

Der Energiestrom ist umso größer, je mehr der einzelne Energieträger mit Energie beladen ist und je stärker der Energieträgerstrom ist.

Im nächsten Experiment wollen wir die Beladungsmenge und die Größe des Trägerstroms messen.





Experiment 3

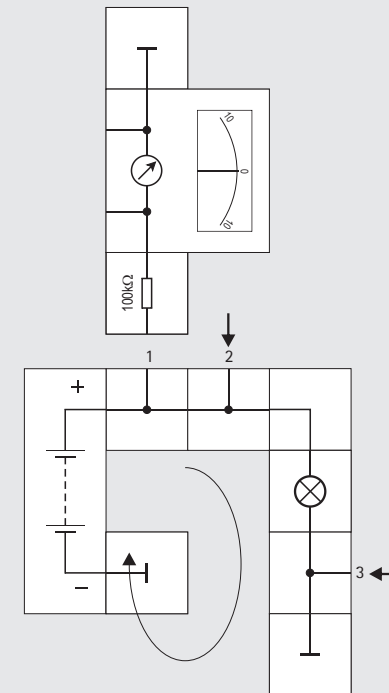
Messung der elektrischen Spannung

In unserem Modell ist die Batterie das linke Wasserfass und die Glühlampe das rechte. Bei ihr als »Verbraucher« wird die Energie auf die neuen Träger Licht und Wärme umgeladen, also keineswegs verbraucht.

Wenn wir uns jetzt die Batterie genauer anschauen, entdecken wir auf ihr die Angabe 9 V (Volt). Dies ist das Maß dafür, wie stark sie elektrische Ladungsträger mit Energie beladen kann. Je größer die Zahl ist, desto höher kann sie sie beladen. Ab 24 V wird es für einen Menschen gefährlich, wenn er sich an Stelle der Glühlampe im Stromkreis befindet. Die 9V geben den POTENTIALUNTERSCHIED oder die POTENTIALDIFFERENZ zwischen dem

PLUS- und dem MINUSPOL der Batterie an. Wir legen den Minuspol (Aufbauplatte oder Erde) willkürlich als BEZUGSPOTENTIAL mit 0 V fest und können nun mit Hilfe eines Messinstruments die POTENTIALDIFFERENZ (auch SPANNUNG genannt) an verschiedenen Stellen in unserem einfachen Stromkreis messen. Die Angabe ist ebenfalls in Volt.

Wir erwarten, dass am Pluspol der Batterie 9 V sind und tatsächlich zeigt der Zeiger unseres Instruments circa 9 Skalentteile bei Punkt 1 an, wenn die Batterie frisch ist. Da in unserem Modell bis zur Glühlampe (rechtes Fass) die Becher nicht entleert sind, werden wir auch an der Glühlampe (Punkt 2) 9V messen können. Anders sieht es nach der Lampe aus: Im Modell sind die Becher leer, was im Stromkreis gleichbedeutend mit 0 V ist. Das Instrument zeigt am Punkt 3 nichts mehr an.

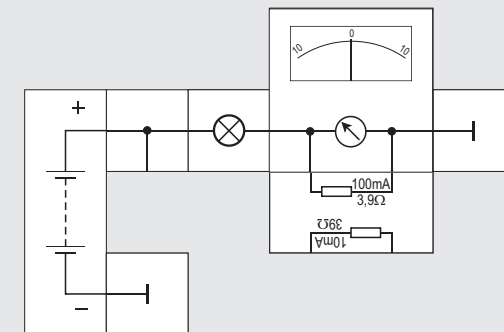
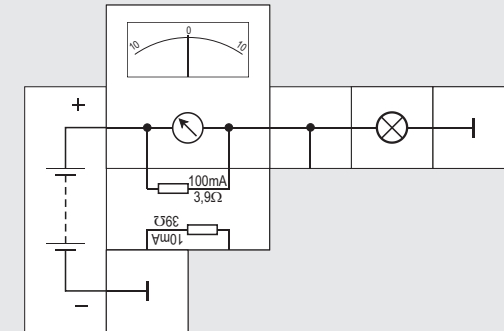
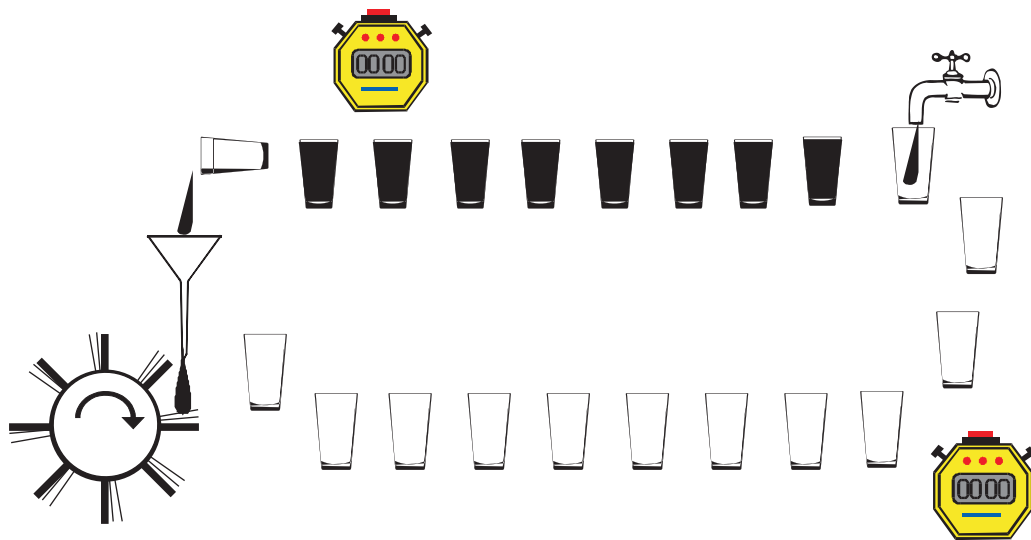


Experiment 4

Messung des elektrischen Stroms

Nun wollen wir die Stärke des Ladungsträgerstroms messen. Von unserem Modell wissen wir, dass der Becherstrom überall im Becherkreislauf gleich groß ist: Wir können uns an eine beliebige Stelle mit der Stoppuhr hinstellen und zählen, wie viele Becher beispielsweise in einer Minute vorbei kommen. Die Zahl der Becher pro Minute ist unabhängig vom Ort immer dieselbe. Wenn unser Modell stimmt, muss die Stromstärke der Ladungsträger also im gesamten Strom-

kreis gleich groß sein. Wie misst man sie nun? Auch das ist wieder ganz einfach: An der zu messenden Stelle trennen wir den Stromkreis auf und schalten das Messinstrument ein. Es wird in unserem Fall circa 6 Skalenteile anzeigen, was 60 mA (Miliampere) entspricht. Die Stromstärke wird in AMPERE gemessen, 1 mA ist der tausendste Teil davon. Wir messen zuerst zwischen der Batterie und der Glühlampe den Strom der »beladenen« Träger und anschließend zwischen Glühlampe und Aufbauplatte den Strom der »leeren« Träger und stellen fest, dass das Messgerät zeigt beide Male das gleiche an, wie unser Modell es voraussagte.



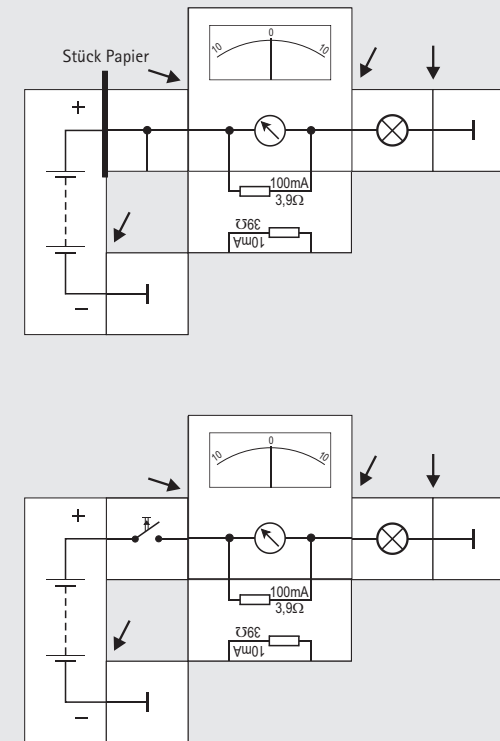
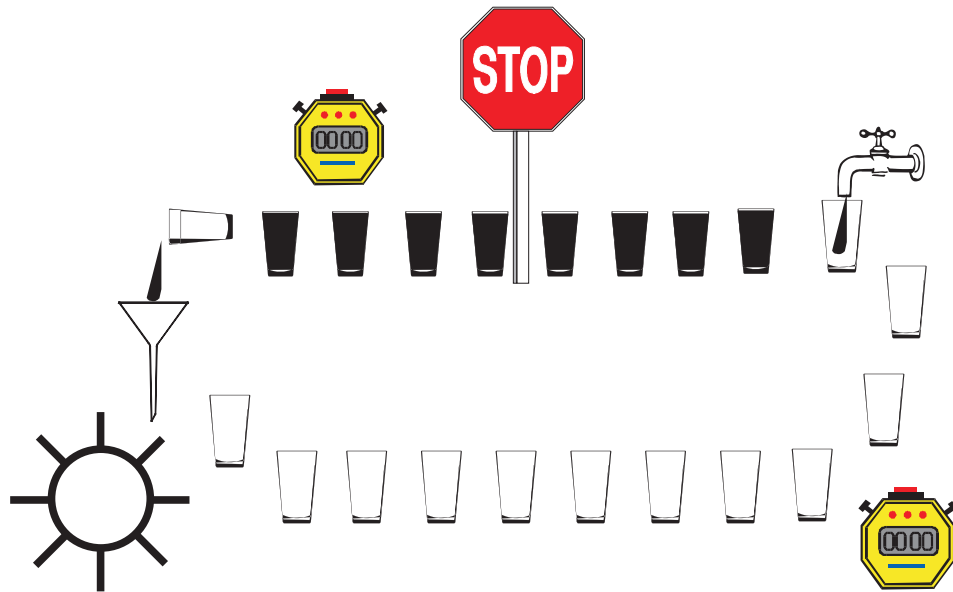
Experiment 5

Der unterbrochene Stromkreis

Wir verwenden den Stromkreis aus Experiment 4 und schieben an verschiedenen Stellen ein Stück Papier zwischen die Bausteine; Papier leitet den Trägerstrom nicht und er kommt sofort zum Erliegen. Wir sehen das am Messinstrument, das nichts mehr anzeigt, und natürlich kommt mit dem Erliegen des Trägerstroms -wie unser Modell es voraussagt - auch der Energiestrom zum Erliegen und die Lampe geht aus. Im Modell entspricht das dem Zustand, dass ein Kind

den Becher nicht mehr weiter gibt und deswegen auch keinen neuen annehmen kann. Der Becherstrom kommt sofort zum Erliegen. Jedes beliebige Kind kann sich so verhalten, das Ergebnis ist immer das gleiche.

Es ist nun nicht besonders elegant, den Stromkreis mit einem Stück Papier zu unterbrechen. Es gibt dafür ein besonderes Bauteil, nämlich den SCHALTER. Im LECTRON Experimentierkasten ist es ein Schalter mit der Vorzugsstellung im geöffneten Zustand: ein EIN - TASTER. Wir können ihn an verschiedenen Stellen in unserem Stromkreis anordnen und mit Tastendruck den Strom unterbrechen.





Experiment 6

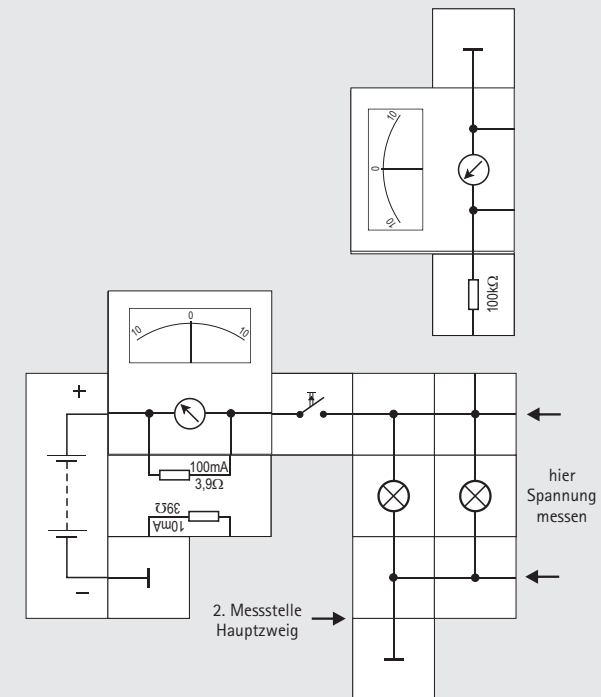
Die Parallelschaltung

Wir wollen nun den Stromkreis mit einer zweiten Glühlampe erweitern und bauen mit T-Abzweig - Bausteinen die nebenstehende Schaltung auf. Damit die Lampen nicht ständig leuchten und die Batterie unnötig verbraucht wird, bauen wir einen Schalter ein, mit dem beide eingeschaltet werden können. Er muss deswegen in einem Hauptzweig vor der Verzweigung oder nach der Vereinigung liegen. Betätigen wir den Taster, so leuchten beide Lampen hell auf. Der Energiestrom, der zuvor zu einer Lampe geflossen ist, fließt in seiner Stärke weiter zur ersten Lampe. Da die zweite Lampe gleich hell leuchtet, muss zu ihr ein gleich großer Energiestrom fließen. Wie kommt er zustande?

Die Antwort gibt uns unser Modell. Wir müssen es natürlich an die Schaltung anpassen, die Kinder also so anordnen, dass es ebenfalls eine Verzweigungsstelle und nach den Lampen / Wasserrädern eine Vereinigungsstelle gibt. Die Batterie kann weiterhin die elektrischen La-

dungsträger nur mit 9 V beladen; im Modell entspricht das vollen Bechern. Da jede der beiden Lampen jetzt aber die Energie umsetzt, die vorher eine Lampe umsetzte, muss in den Hauptzweigen der Becherstrom doppelt so groß sein, was man nur dadurch erreicht, dass dort die Becher schneller weitergegeben werden müssen. In der Minute kommen dort also doppelt so viele Becher vorbei wie in den Nebenzweigen und das Kind an der Verzweigungsstelle muss die entgegengenommenen Becher abwechselnd in die beiden Nebenzweige verteilen. Am Vereinigungspunkt geschieht das Umgekehrte: Das dort stehende Kind nimmt abwechselnd aus einem und dann aus dem anderen Nebenzweig einen Becher und gibt sie dem Kind im Hauptzweig weiter, wo der Strom wieder doppelt so stark wird.

Die Becherströme lassen sich wieder mit dem Instrument messen: In den Hauptzweigen ist der Strom doppelt so groß wie in den Nebenzweigen. Die Beladung (Spannung) ist zwischen dem Pluspol der Batterie und den Lampen 9 V und zwischen den Lampen und Masse (Aufbauplatte) 0V.

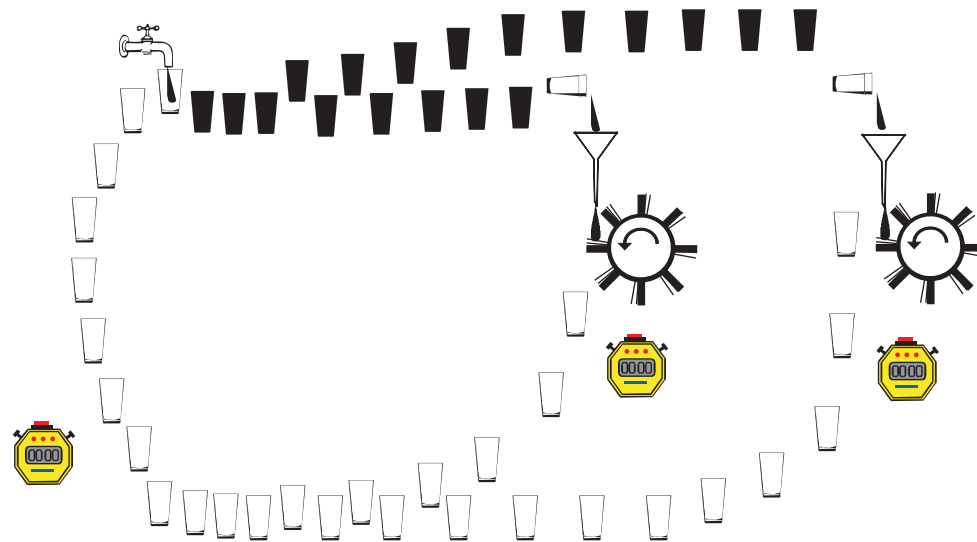
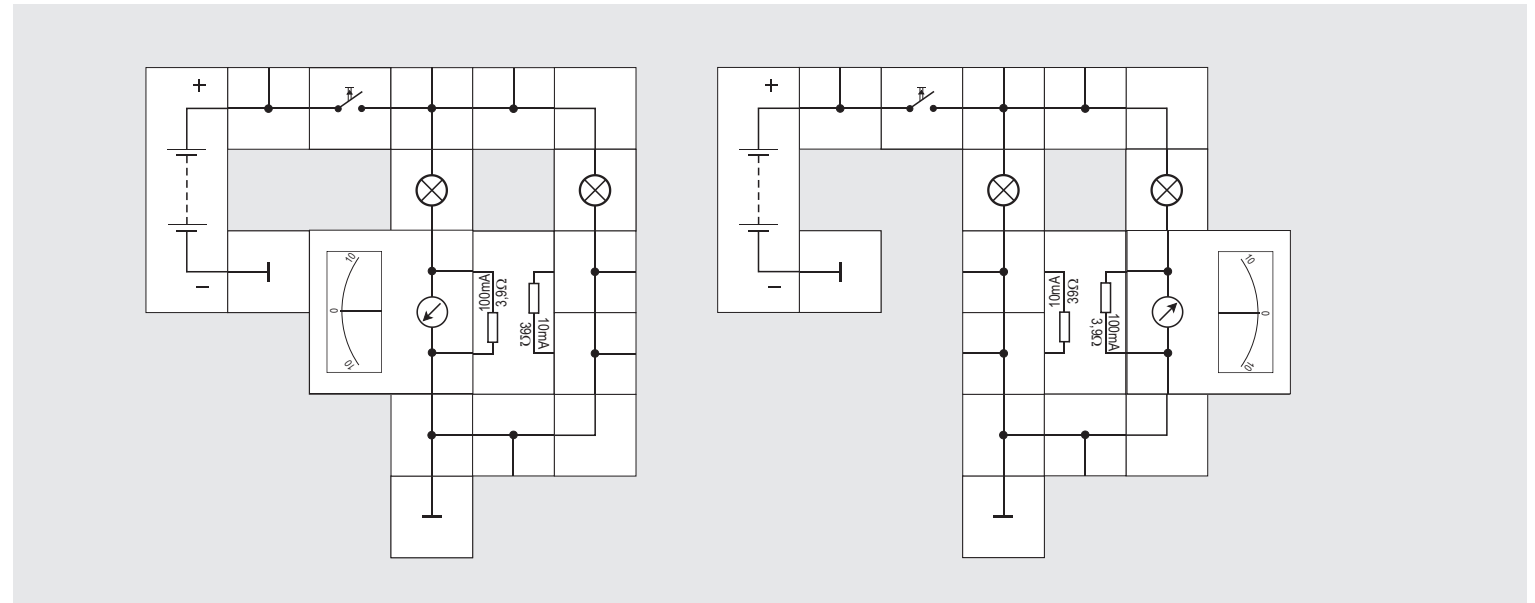




Experiment 7

Die Parallelschaltung im Modell

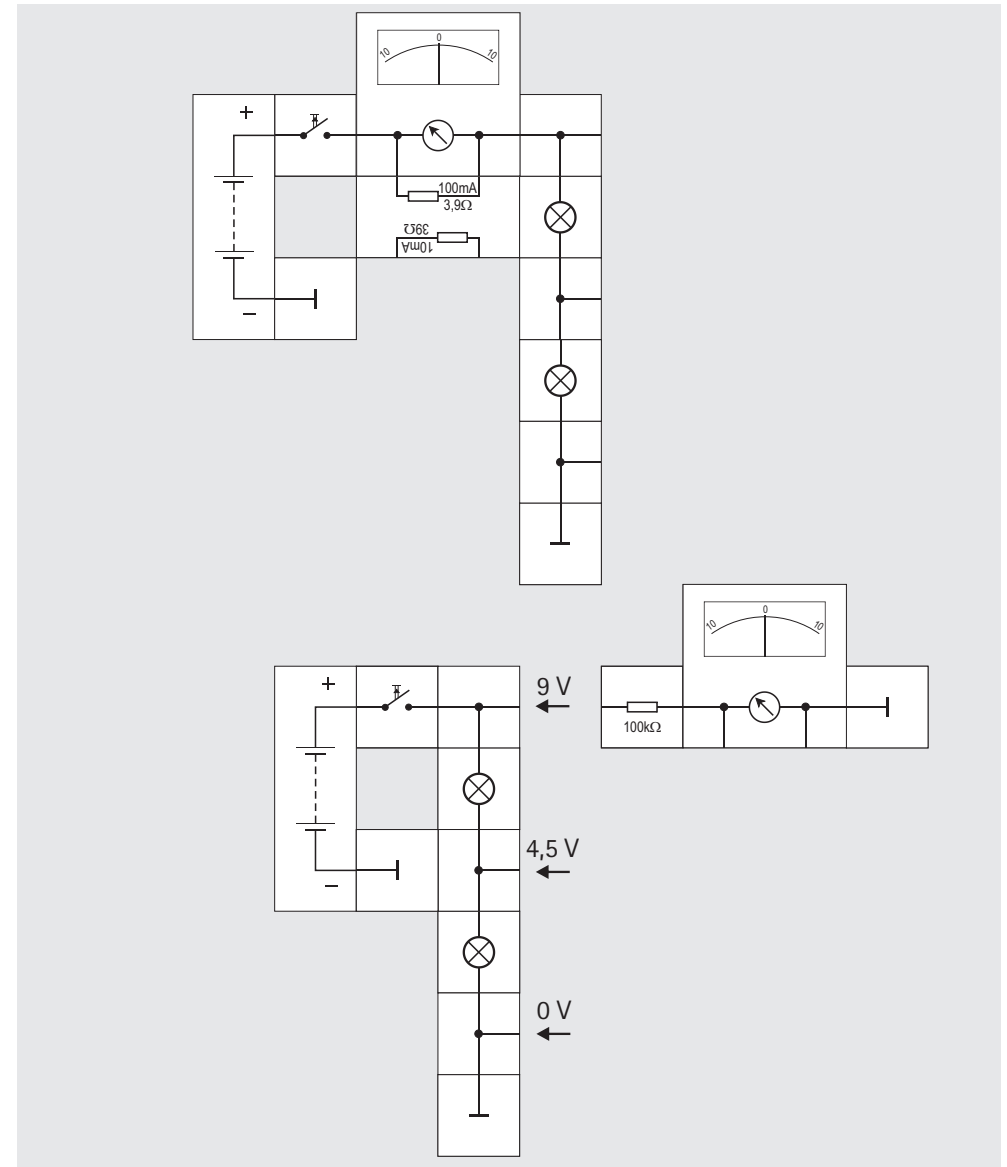
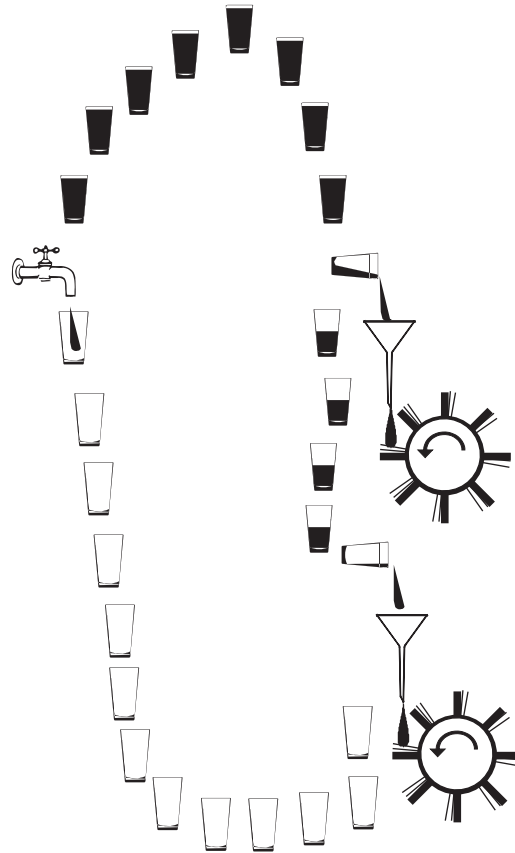
Die beiden Schaltungen zeigen, wie wir in den beiden Nebenzweigen den Strom messen können. Die beiden Ströme sind mit circa 6 Skalenteilen (60 mA) gleich groß und halb so groß wie der Strom in den Hauptzweigen (über 10 Skalenteile, der Zeiger ist am Anschlag).



Experiment 8

Die Reihenschaltung im Modell

Wir können zwei Glühlampen auch noch anders in einem Stromkreis anordnen, nämlich hintereinander, in Reihe oder in Serie. Es entsteht die abgebildete Schaltung. Betätigen wir den Taster, leuchten beide Lampen gleich hell, allerdings nur noch schwach; der Energiestrom zu ihnen ist offensichtlich kleiner geworden. Wir wollen das durch Messungen nachprüfen. Da wir nur einen Kreis haben, wird der Strom in ihm wieder überall gleich groß sein. Die Messungen bestätigen das, zeigen aber auch, dass der Strom gegenüber dem Kreis mit nur einer Lampe kleiner geworden ist. Interessant ist nun die Spannungsmessung: Vor der ersten Lampe messen wir ein Potential von 9 V, zwischen den beiden Lampen eins von 4,5 V und nach der zweiten Lampe 0 V. Das Modell zeigt uns, wie dieses Ergebnis zustande kommt. Die vollen Becher werden bei der ersten Lampe bis zur Hälfte geleert und erst bei der zweiten ganz. Beide Lampen erhalten also den gleichen schwächeren Energiestrom; schwächer deshalb, weil wie die Messung zeigte, weniger Becher vorbeikommen und darüber hinaus jede Lampe nur die Hälfte der »Beladung« (nämlich 4,5 V) bekommt.





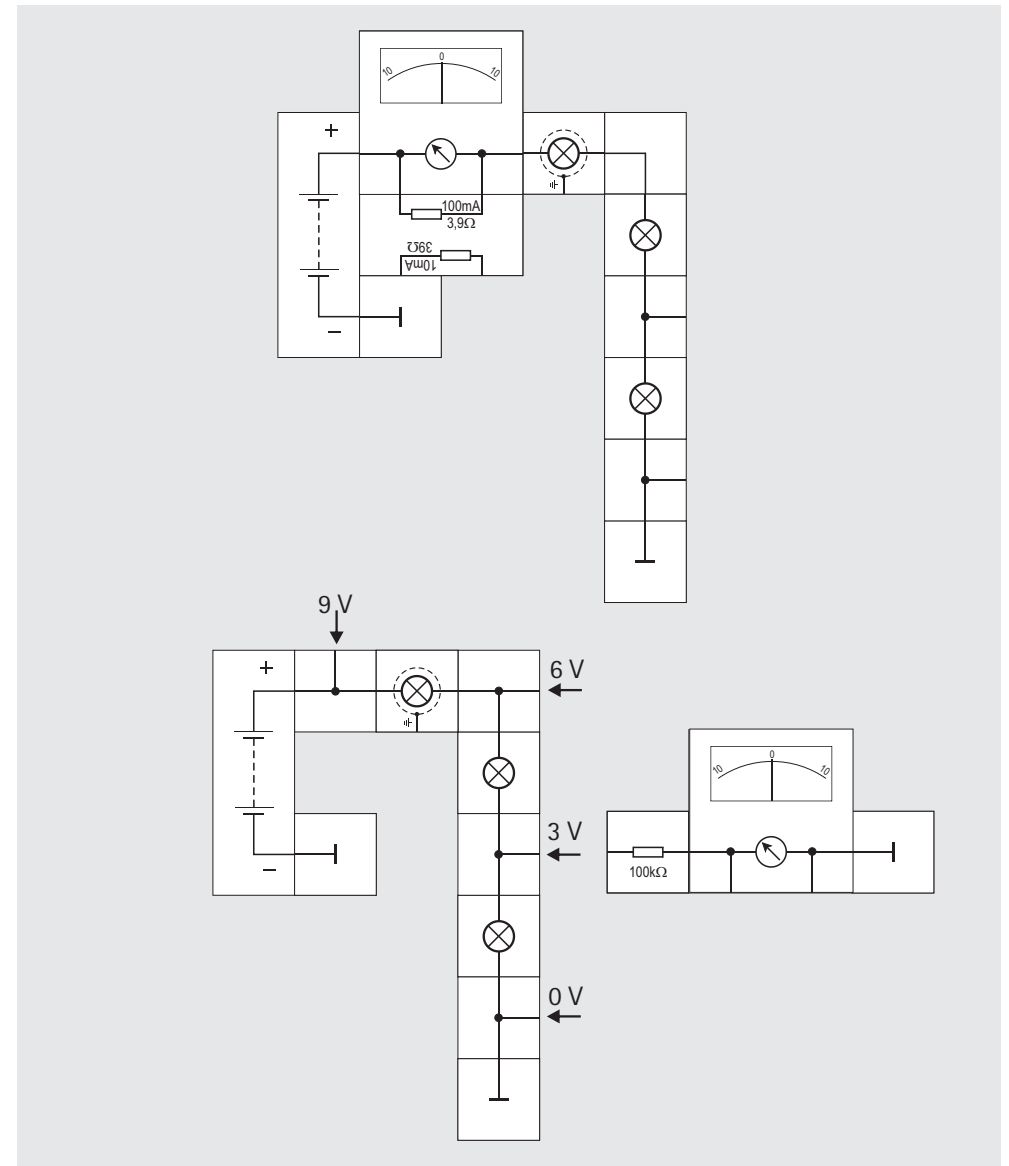
Experiment 9

Reihenschaltung mit 3 Glühlampen

Schalten wir drei Glühlampen in Reihe (seitlichen Kontakt bei der dritten nicht anschließen), verstärkt sich der Effekt aus dem vorangegangenen Experiment: Das Messinstrument zeigt einen noch kleineren Strom im Kreis an, die Lampen

leuchten noch schwächer und die Spannungsmessung ergibt die Potentiale 9 V, 6 V, 3 V und 0 V; die drei Lampen teilen die »Beladung« gleichmäßig unter sich auf.

In unserem Modell bedeutet das, zum ersten Wasserrad gelangen volle Wasserbecher, ein Drittel der Wassermenge wird ausgegossen, bei nächsten Rad wird das zweite Drittel abgegeben und beim dritten Rad werden die Becher ganz geleert.





Experiment 10

Widerstand im Stromkreis

Schrauben wir eine Glühlampe aus der Fassung und versuchen zu erkennen, was auf ihrem Sockel steht, so finden wir dort die Angabe 6 V / 0,05 A. Das bedeutet, die Lampe ist für einen Betrieb an 6 V Spannung gebaut und durch sie fließen, wenn man sie an diese Nennspannung legt, 50 mA Nennstrom. Aus den vorangegangenen Experimenten wissen wir, dass die Batterie nun aber nicht 6 V, sondern 9 V Spannung hat. Die Lampe leuchtet auch sehr hell, weil der Energiestrom, den sie empfängt, zu groß ist, was sich nachteilig auf ihre Lebensdauer auswirkt. Der Fachausdruck für ENERGIE-STROM ist LEISTUNG, sie wird in Watt (W) gemessen und ergibt sich, wenn man den Strom mit der Spannung multipliziert. Die Nennleistung der Lampe ist also

$$6 \text{ V} \times 50 \text{ mA} = 300 \text{ mW.}$$

Verglichen mit unserem Modell bedeutet das nichts weiter, dass um den Wasserstrom auszurechnen, wir den Becherstrom mit der Füllmenge eines einzelnen Bechers multiplizieren müssen.

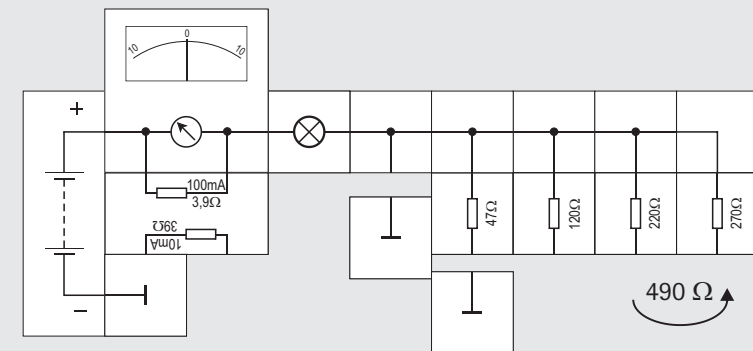
Was können wir nun tun, um den Energiestrom zu verringern? Einen Hinweis gibt uns die Reihenschaltung: Wenn wir mehrere Verbraucher in Reihe schalten, teilen sie die Energie unter sich auf und erhalten dadurch weniger. Der Widerstand im Stromkreis wird größer, es fließt weniger Strom und damit auch weniger Energie.

Wir legen also versuchsweise einen WIDERSTAND in Reihe zu der Lampe, in dem wir in der Schaltung den Massebaustein verschieben. Und tatsächlich zeigt das Instrument jetzt weniger Strom an und die Lampe leuchtet nicht mehr so grell.

Verschieben wir den Massebaustein weiter nach links gegen einen mit der Aufschrift 120 Ω , geht der Strom noch weiter zurück; beim Anlegen an den Widerstandsbaustein 270 Ω glimmt die Lampe gerade noch, bei einem Widerstand von über 500 Ω (270 Ω und 220 Ω in Reihe schalten) ist nichts mehr zu sehen.

Durch Einfügen von Widerständen sind wir jetzt in der Lage, die Größe des Stromes festzulegen.

Je größer der Widerstandswert ist, er wird in Ohm (Ω) gemessen, desto kleiner wird der Strom.





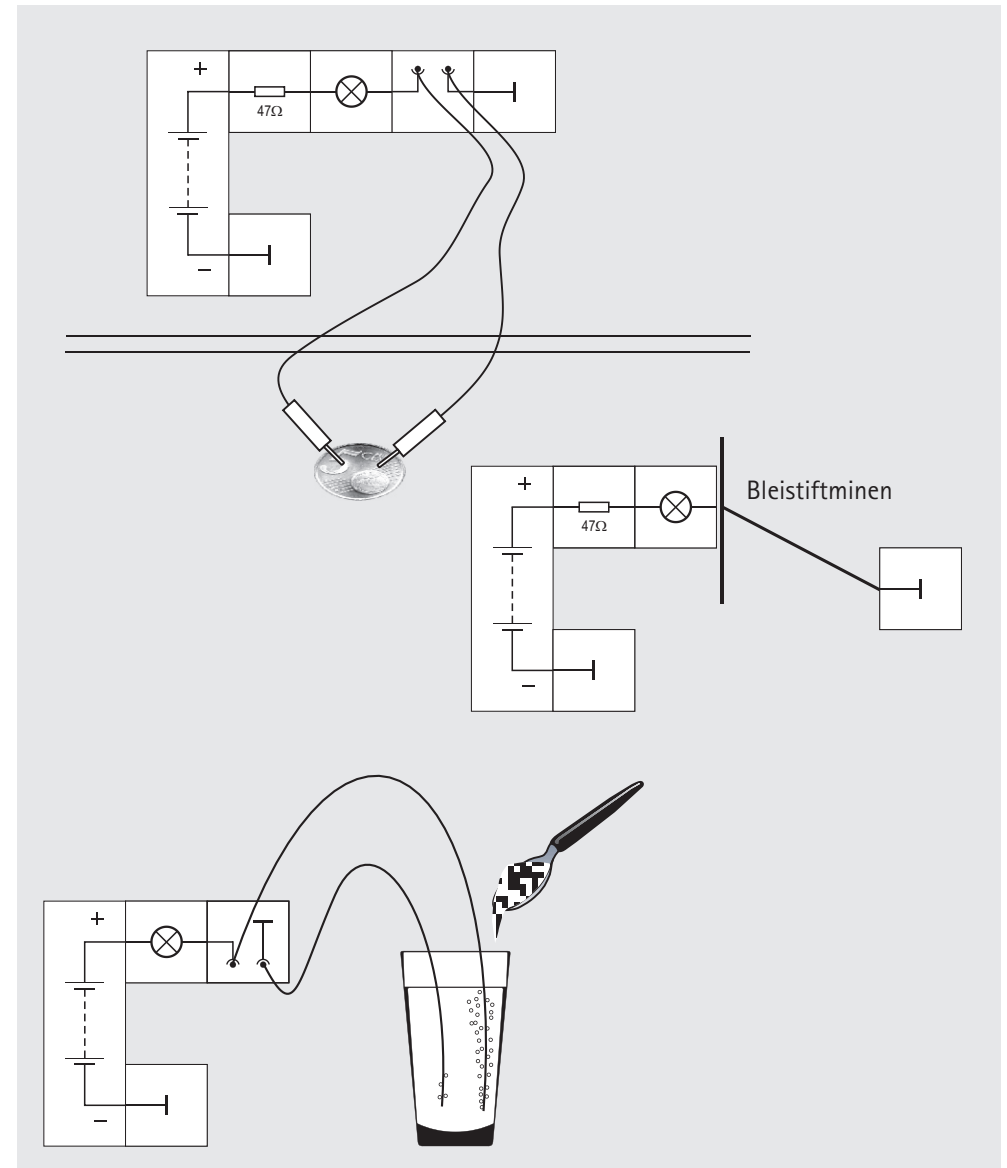
Experiment 11

Leitfähigkeit verschiedener Materialien

Wir können nun mit Hilfe der Glühlampe in der Versuchsschaltung untersuchen, ob Dinge aus dem Alltag gut leiten. Es dürfte allgemein bekannt sein, dass das für Metalle zutrifft; also untersuchen wir Münzen, Nägel, aber auch Materialien wie ein Lineal, unser Radiergummi, Plastikteile und Bleistiftminen. Gerade

bei Minen wird man überrascht sein, wie gut Graphit leitet, die Lampe leuchtet hell auf.

Auch Wasser wollen wir untersuchen und füllen dazu ein Glas mit Wasser, in das wir zwei abisolierte Drähte tauchen, die sich natürlich nicht berühren dürfen. Die Lampe leuchtet nicht auf, reines Wasser leitet erstaunlich schlecht. »Verunreinige«n wir es dagegen mit einem Löffel voll Kochsalz, so leitet es sehr gut, wobei es zersetzt wird (Bläschenbildung an den Drähten).





Experiment 12

Ein empfindlicher Nachweis

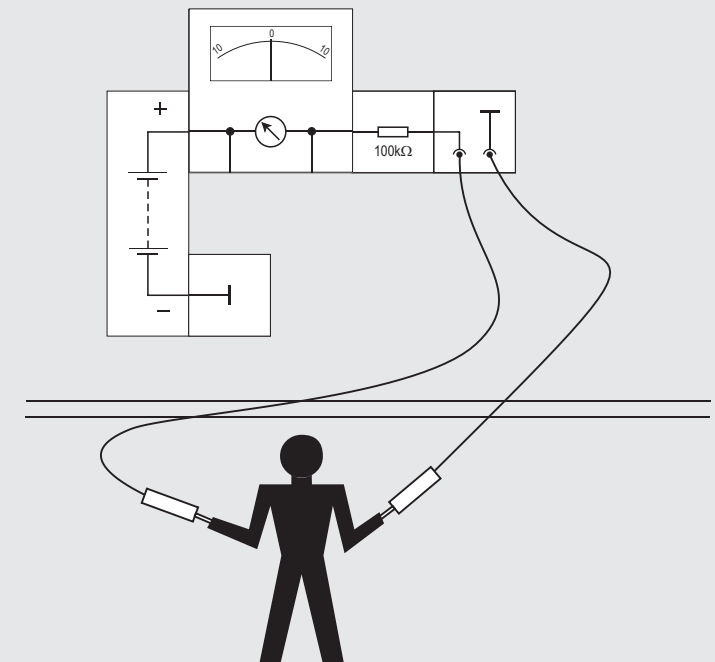
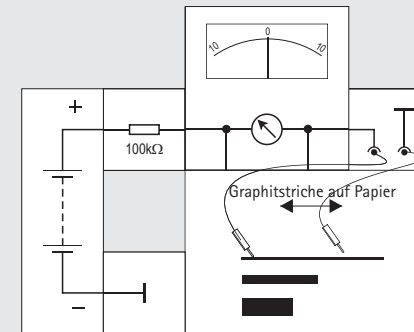
Wenn die Glühlampe bei der Untersuchung eines Materials nicht leuchtet, heißt das nur, der Stoff leitet den Strom nicht sehr gut, dass er gar nicht leitet, ist damit nicht gesagt. Um herauszufinden, ob er ein NICHTLEITER oder ISOLATOR ist, benötigen wir einen empfindlicheren Nachweis. Wir haben bereits damit gearbeitet, nämlich mit dem Messinstrument. Es ist so empfindlich, dass ein $100\text{ k}\Omega$ Widerstand in Reihe geschaltet werden muss, damit es durch den fließenden Strom nicht beschädigt wird.

Im Experiment 11 konnten wir die gute Leitfähigkeit von Bleistiftminen (Graphit) feststellen. Danach müsste auch ein Bleistiftstrich mehr oder weniger gut leiten. Wir probieren es mit verschiedenen

langen und breiten Strichen aus und finden, ein Bleistiftstrich leitet umso besser je breiter und kürzer er ist.

Zum Schluss wollen wir noch unseren Körperwiderstand feststellen. Wir fassen die beiden Stecker kräftig an und stellen einen Zeigerausschlag des Instrumentes fest. Feuchten wir unsere Finger an, wird er größer, wir leiten dann besser. Wir können auch mit der Zunge an beiden Steckern zugleich lecken, der Ausschlag wird dann noch größer werden.

Die Versuche zur Leitfähigkeit des menschlichen Körpers dürfen nur mit der 9 V Batterie ausgeführt werden. Spannungen, die größer als 24 V sind können unter Umständen einen so großen Strom durch unseren Körper fließen lassen, dass es für uns lebensgefährlich wird.





Experiment 13

Umschalter und UND - Schaltung

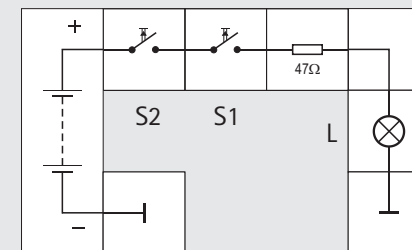
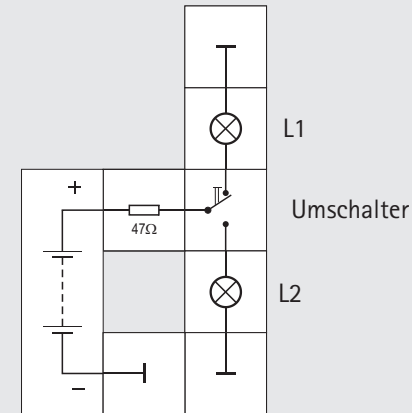
Um einen Stromkreis zu unterbrechen haben wir bisher immer unseren Taster (Schalter mit Vorzugsstellung AUS) eingesetzt. Sollen beide Schaltstellungen gleichberechtigt sein, müssen wir den Umschaltbaustein verwenden. Wir können den UMSCHALTER als einfachen EIN-AUS Schalter einsetzen, wenn wir einen Kontakt nicht beschalten; wir können ihn aber auch benutzen, um entweder die eine Lampe oder die zweite Lampe einzuschalten, wie beispielsweise bei einer Fußgänger - Ampel, bei der entweder das rote oder das grüne Licht leuchtet.

Ein Stromkreis braucht nicht nur einen Schalter oder Taster zu haben, es können auch mehrere vorkommen. Möchte man eine Lampe oder eine Maschine von meh-

rerer Stellen unabhängig ausschalten können, müssen die Schalter in Reihe zueinander liegen; die Lampe brennt dann nur, wenn beide betätigt sind. Solche Schaltungen kommen häufig als SICHERHEITSSCHALTUNGEN an Ständen vor. Der Bediener muss mit jeweils einer Hand eine Taste bedienen, nur dann arbeitet die Maschine. Zugleich ist sichergestellt, dass sich seine Hände nicht im Gefahrenbereich der Stanze befinden. Die Schaltung heißt auch UND - Schaltung.

Das Verhalten der UND - Schaltung kann man tabellarisch angeben. Man trifft die Zuordnung Schalter S ein = 1, Schalter S aus = 0, Lampe L ein = 1, Lampe L aus = 0 und erhält die folgende WAHRHEITSTAFEL.

S2	S1	L
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



UND - Schaltung



Experiment 14

ODER - Schaltung

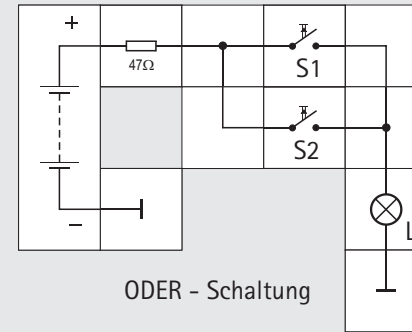
Möchte man dagegen von verschiedene Stellen eine Lampe oder Maschine unabhängig voneinander einschalten, benötigt man eine ODER - Schaltung; bei ihr sind die beiden Schalter oder Taster parallel geschaltet. Haustürklingeln, die man von außen an der Haustür oder an der Wohnungstür bedienen möchte, sind so geschaltet. Auch bei der ODER - Schaltung kann man eine Wahrheitstafel aufstellen. Sie sieht folgendermaßen aus:

S2	S1	L
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

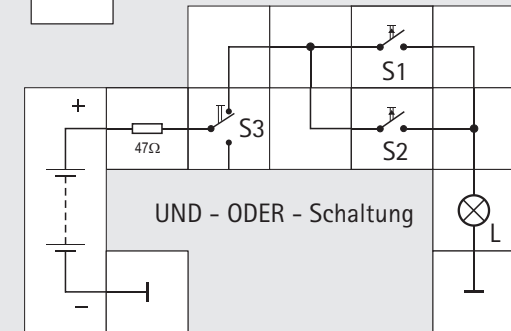
UND - ODER - Schaltung

Die Kombination aus einer UND - mit einer ODER - Schaltung ergibt eine UND - ODER - Schaltung. Der verwendete Umschalter kann als HAUPTSCHALTER angesehen werden; nur wenn er geschlossen ist, kann man mit dem einen oder dem anderen Taster die Lampe einschalten. Die Wahrheitstafel hat wegen der drei Schalter acht Zeilen:

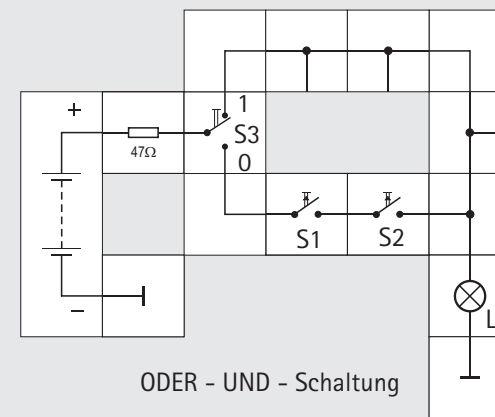
S3	S2	S1	L
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1



ODER - Schaltung



UND - ODER - Schaltung



ODER - UND - Schaltung



Experiment 15

Wechselschaltung

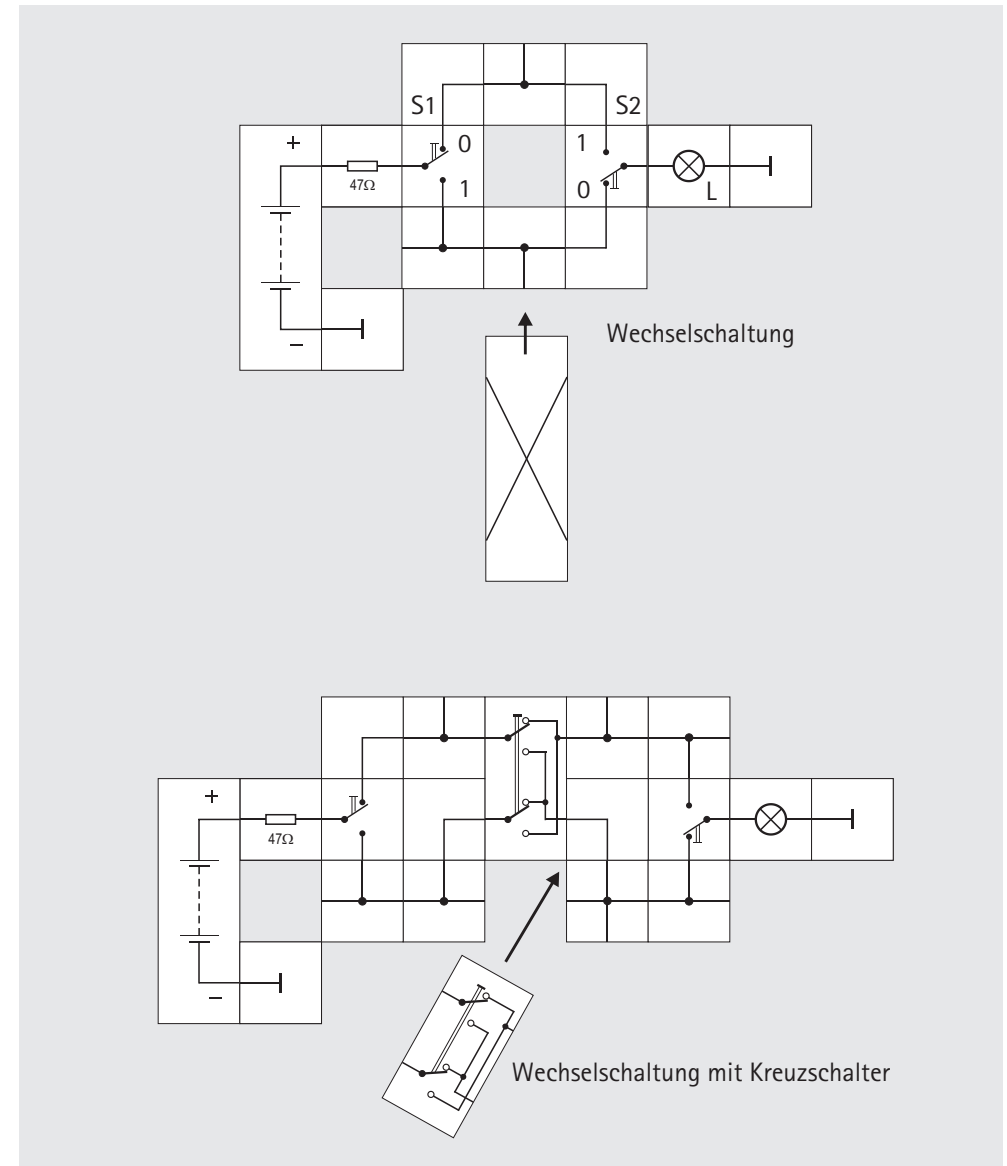
Eine häufig in Wohnungen oder Treppenhäusern vorkommende Schaltung ist die WECHSELSCHALTUNG; bei ihr kann man von zwei verschiedenen Stellen aus eine Lampe **unabhängig** voneinander aus- und einschalten. Die Wechselschaltung benötigt zwei Umschalter. Wollen wir eine Wahrheitstafel ihrer Funktion angeben, müssen wir zuerst die Schalterstellungen mit 1 und 0 festlegen.

S2	S1	L
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Kreuzschalter

Die Erweiterung auf drei oder noch mehr Schalter geschieht mit KREUZSCHALTERN, die zwischen den beiden Umschaltern angeordnet werden müssen. Im Prinzip kreuzt ein solcher Schalter bei Betätigung die beiden normalerweise gerade durchgehenden Leitungen miteinander und hat daher auch seinen Namen. Er ist aus zwei mechanisch miteinander gekoppelten Umschaltern aufgebaut.

Weitere Kreuzschalter werden einfach »in Reihe« zu dem ersten gesetzt.





Experiment 16

Schmelzsicherung

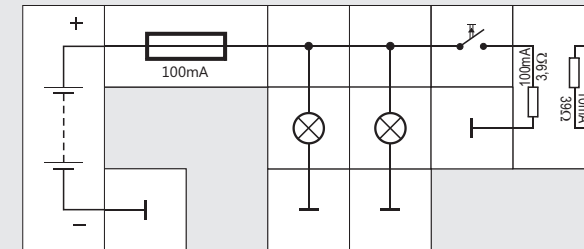
Wenn wir uns einen einfachen Stromkreis mit Batterie und Lampe vorstellen, so wissen wir, dass die elektrischen Ladungsträger Energie von der Batterie zur Lampe transportieren, die dort auf andere Energieträger (Photonen, Entropie) umgesetzt wird. Der Glühfaden der Lampe stellt in diesem Stromkreis einen Widerstand (ca. $100\ \Omega$) dar, der die Größe des Stroms bestimmt. Was passiert aber, wenn wir die Lampe mit einem gut leitenden Draht überbrücken?

Als erstes verlischt die Lampe; es gibt zwischen ihren Anschlüssen durch die gut leitende Überbrückung keinen Potentialunterschied mehr, der ausreichend groß ist, genügend Strom durch ihren Glühfadenwiderstand fließen zu lassen. Weiter wird der Strom sehr stark ansteigen, die Überbrückung der Lampe stellt für die Batterie einen KURZSCHLUSS dar. Die Umladung der Energie geschieht jetzt in der Batterie und auf den Leitungen, die zwar einen kleinen, aber doch von Null verschiedene Widerstand haben. Als Folge davon erwärmt sich alles sehr stark. Damit dies keine zerstörerischen Folgen hat, schützen wir uns da-

durch, dass wir in den Stromkreis eine SICHERUNG einbauen. Eine Sicherung ist im Prinzip eine gewollte Schwachstelle im Stromkreis, die aus einem dünnen WIDERSTANDSDRAHT besteht. Sie muss so ausgewählt sein, dass der normale Strom, der Nennstrom, diesen Draht kaum erwärmt, ein Strom deutlich über dem Nennstrom ihn jedoch zum Schmelzen bringt. Bevor also eine ungewollte Erwärmung der Zuleitungen infolge eines Kurzschlusses oder einer Überlastung einsetzt, ist der Sicherungsdraht bereits geschmolzen und hat den Stromkreis unterbrochen.

In unserem Versuch verwenden wir eine Schmelzsicherung mit $100\ \text{mA}$ Nennstrom. Wir schließen zwei Lampen direkt an und einen »Heizofen« über einen Schalter, nämlich einen kleinen Widerstand von $3,9\ \Omega$. Solange der Schalter nicht betätigt wird, fließt nur Strom durch die Lampen, welche hell leuchten. Der Gesamtstrom ist bereits $100\ \text{mA}$ groß. Der Sicherungsdraht ist bereits vorgewärmt. Schließen wir den Schalter, wird der Strom kräftig erhöht, der Sicherungsdraht schmilzt und unterbricht den Stromkreis, die Lampen erlöschen.

Bevor wir die Sicherung auswechseln, müssen wir natürlich den Kurzschluss oder die Überlast beseitigen, sonst passiert mit der neuen das Gleiche.



Experiment 17

Schutzleiter

Immer wenn ein Stromkreis geschlossen werden soll, benötigen wir zwei Anschlüsse, das ist auch im Haushalt so. Betrachten wir ein Anschlusskabel für unsere Haushaltsgeräte, so stellen wir fest, dass noch eine Leitung mehr in einem Kabel ist. Auch die Steckdose und der Gerätestecker haben drei Anschlüsse, vor allen Dingen dann, wenn das Gehäuse aus Metall, also leitfähig, ist.

Zwei (schwarz = Phase, blau = Null) der drei Leitungen bilden mit dem Elektrogerät den normalen Stromkreis. Die dritte Leitung ist direkt an das Gehäuse angeschlossen, hat eine grün - gelbe Isolierung und heißt SCHUTZLEITER.

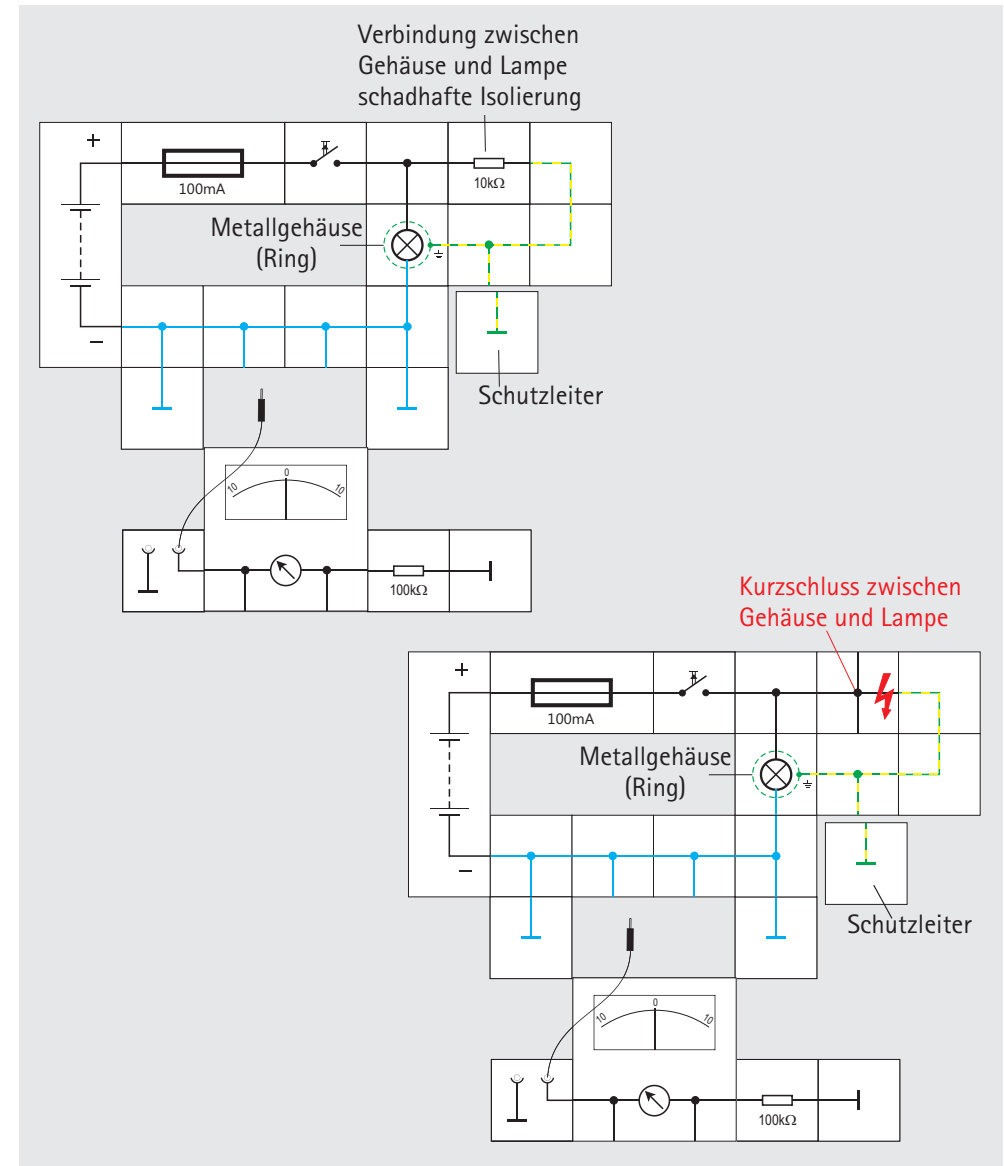
Dieser Schutzleiter führt keinen elektrischen Strom, er ist für den Schutz des Benutzers gegen lebensgefährliche Spannungen vorhanden: Sollte einmal durch einen Schaden ein anderes stromführendes Kabel das Gehäuse berühren, dann sorgt der Schutzleiter dafür, dass der Strom in dieser Leitung zur Erde als großem Bezugspotential abfließt und nicht durch den Menschen.

In unserer Schaltung finden wir das Elektrizitätswerk (Batterie), die beiden Leitungen, welche ins Haus kommen, die Sicherung, den Schalter, einen Verbrau-

cher (Glühlampe) mit Metallgehäuse. Die Aufbauplatte stellt die Erde dar. Wie in Wirklichkeit ist jetzt auch eine Leitung sowohl an der Batterie als auch am Verbraucher mit Erdpotential verbunden, also geerdet. Das Gehäuse ist zusätzlich über den Schutzleiter geerdet. Das Messinstrument stellt einen Menschen dar, der einseitig mit der Erde verbunden ist. Mit dem losen Kabel können wir an verschiedene Teile der Schaltung gehen (zusätzlich Messsonde verwenden). Schlägt der Zeiger aus, wäre die Berührung lebensgefährlich.

Wir schließen zunächst den Schutzleiter nicht an Erde an und stellen mit dem Widerstand ($10\text{ k}\Omega$) eine hochohmige Verbindung zum Gehäuse her (schadhafte Isolation). Prüfen wir mit dem Messgerät das Gehäuse bei betätigtem Taster, so schlägt der Zeiger aus. Ist dagegen der Schutzleiter angeschlossen, zeigt das Instrument nichts an.

Wir schließen jetzt den Schutzleiter wieder nicht an (unteres Bild) und stellen nun eine direkte Verbindung ($10\text{ k}\Omega$ entfernen, Kreuzungsbaustein einsetzen) her. Bei betätigtem Taster ergibt die Prüfung am Gehäuse einen Ausschlag. Ist der Schutzleiter dagegen angeschlossen, gibt es einen Kurzschluss gegen Erde, die Sicherung schmilzt und schützt uns so vor einem lebensgefährlichen Stromschlag.



Experiment 18

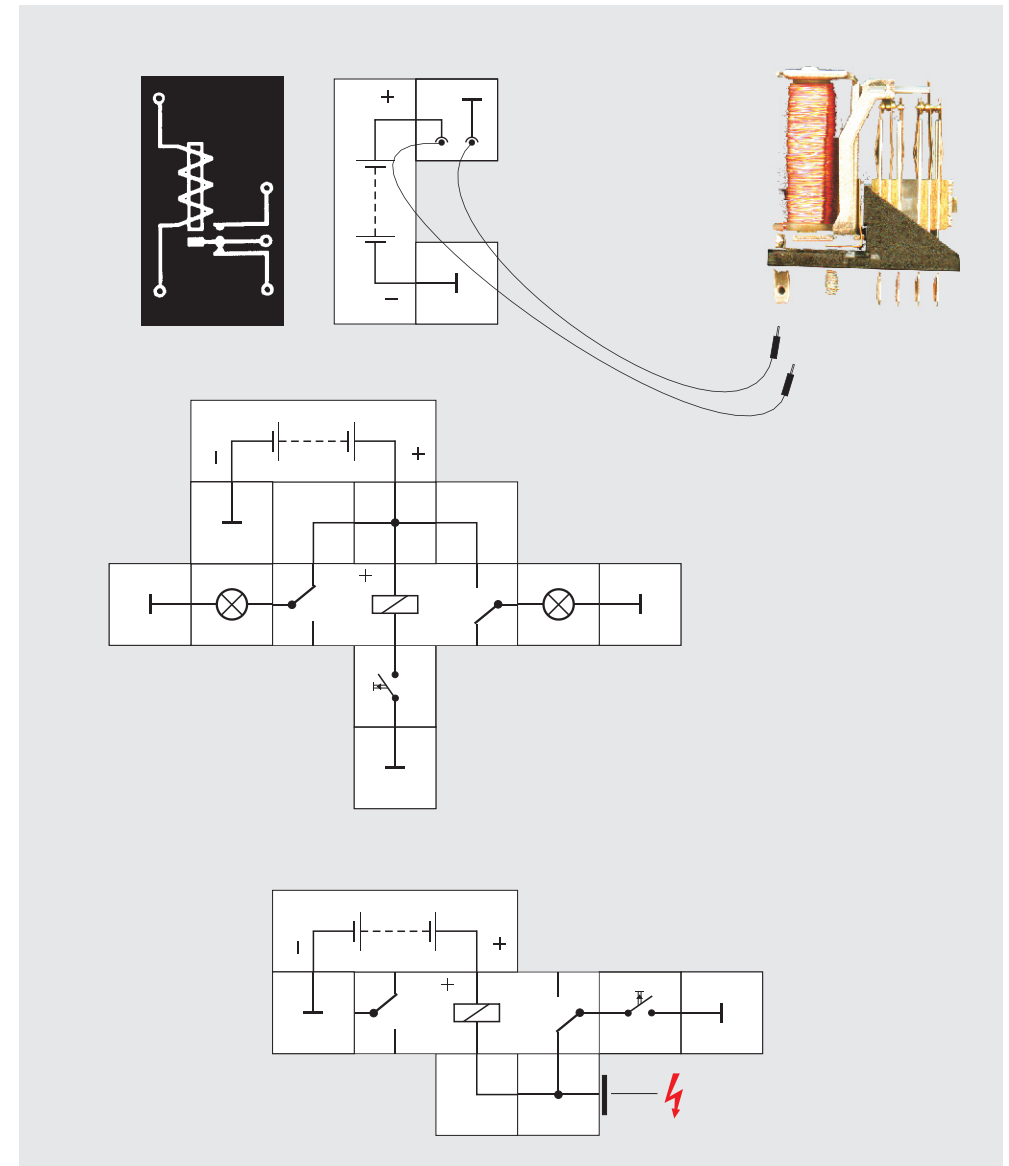
Relais

Wenn Strom durch einen Leiter fließt, bildet sich um den Leiter ein Magnetfeld. Wir erhalten ein starkes Magnetfeld, wenn wir den Leiter zu einer Spule wickeln und ihr zur Konzentrierung des Feldes einen Weicheisenkern geben. Wir erhalten dann im Gegensatz zu einem DAUER-ERMAGNETEN einen ein- und abschaltbaren Magneten, einen ELEKTROMAGNETEN. Dieser Elektromagnet kann nun nicht nur Eisenteile anziehen, wir können ihn auch einen Schalter betätigen lassen, mit dem wir viel größere Energieströme ein- und ausschalten können als wir zur ERREGUNG des Magneten benötigen. Das so konstruierte Bauteil heißt RELAIS.

Legen wir Spannung an ein käufliches Relais, so zieht es einen Anker an, der wiederum einen Kontaktsatz mit Schaltern betätigt. Beim LECTRON Relais können wir das nicht sehen, weil es vergossen ist; wir hören es aber klicken (auf richtige Polung / Plus - Zeichen achten). Das Relais kann nun zwei Lampen schalten.

Summer

Eine interessante Anwendung entsteht, wenn wir den Erregerstromkreis vom eigenen Relais unterbrechen lassen: Betätigen wir den Taster, zieht das Relais an, unterbricht damit seinen Erregerstrom, der Anker fällt ab und schließt damit den Erregerstromkreis, das Relais zieht wieder an, usw. Dies geschieht in so schneller Folge, dass wir einen Summen oder Schnarren hören. Würden wir den Anker gegen eine Glocke schlagen lassen, hätten wir eine Klingel. Bei diesem Summer, auch WAGNERSCHER HAMMER genannt, entstehen recht hohe, aber trotzdem ungefährliche Spannungen: Wenn der Erregerstrom unterbrochen wird, kann das Magnetfeld nicht mehr fortbestehen und wird abgebaut. Dieser Abbau oder diese Veränderung des Magnetfeldes erzeugt in der Spule eine INDUKTIONSSPANNUNG, die den Strom aufrecht erhalten will. Sie ist so hoch, dass es zur Funkenbildung am Unterbrecherkontakt kommt, damit der Strom in der ursprünglichen Richtung weiterfließen kann. Wir merken das als Kribbeln, wenn wir mit dem Finger das freie Kontaktplättchen und gleichzeitig die Aufbauplatte berühren.

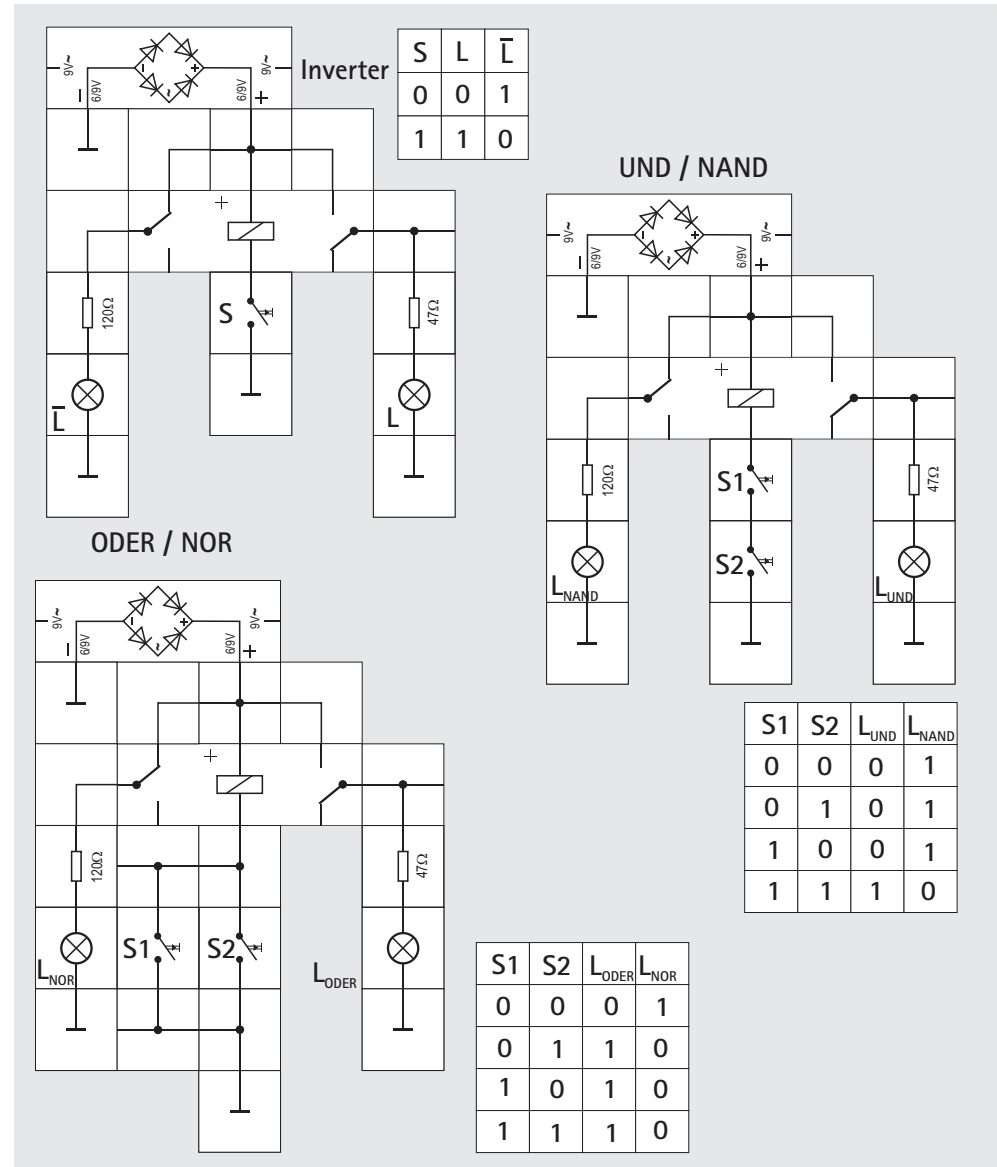


Experiment 19

Logik - Verknüpfungen mit Relais

Mit Hilfe der beiden Relais - Umschalter sind wir nun in der Lage, beim Betätigen des Tasters eine Lampe ein- und gleichzeitig eine zweite Lampe auszuschalten. Die linke Lampe \bar{L} führt immer die gegenteilige Aktion der rechten Lampe L aus; sie verhält sich INVERS zur rechten und wir erhalten eine INVERTIERUNG oder NEGIERUNG, was wir in einer kleinen Wahrheitstafel angeben können. Schalten wir in Reihe zu dem Taster S einen weiteren und nennen sie zur Unterscheidung $S1$ und $S2$, dann leuchtet die rechte Lampe L_{UND} natürlich nur, wenn beide Taster betätigt werden, da nur dann das Relais schaltet. Das Schalten bewirkt weiter, dass die linke Lampe L_{NAND} verlischt, da sie sich invers zur rechten verhält. L_{UND} folgt einer UND - Verknüpfung, weil sie nur dann leuchtet, wenn $S1$ und $S2$ betätigt sind. Die linke Lampe folgt dagegen einer NICHT - UND - Verknüpfung oder englisch NOT AND,

was zu NAND verkürzt wird: Nur wenn beide Taster betätigt werden, leuchtet sie nicht. Diese NAND - Verknüpfung ist ein Grundelement moderner Computer. Die Wahrheitstafel gibt das Verhalten der Schaltung an. Statt in Reihe oder seriell können wir $S1$ und $S2$ auch parallel schalten. Damit die rechte Lampe L_{ODER} brennt, muss $S1$ oder $S2$ betätigt sein; es können natürlich auch beide betätigt werden. Die Lampe verhält sich deswegen wie eine ODER - Verknüpfung. Da die linke Lampe weiterhin das Gegenteil der rechten macht, folgt sie einer NICHT - ODER - Verknüpfung. Auf englisch heißt das NOT OR oder kurz NOR - Verknüpfung. Dies ist die andere wichtige Grundverknüpfung moderner Computer. Auch das Verhalten dieser Verknüpfung ist tabellarisch angegeben. Wir werden in späteren Experimenten sehen, wie diese beiden Verknüpfungen mit elektronischen Bauelementen, nämlich den sogenannten MOS - Feldeffekttransistoren, ohne bewegliche mechanische Teile aufgebaut werden.





Experiment 20

Diode

Bei den verschiedenen Widerständen haben wir bereits gesehen, dass ihre Leitfähigkeit unterschiedlich groß ist und durch den sogenannten Widerstandswert in Ohm (Ω) angegeben wird. Je größer dieser Wert ist, desto schlechter leitet der Widerstand. Dabei spielt es keine Rolle, wie herum er im Stromkreis angeordnet ist.

Das ist bei dem Bauelement, dessen Eigenschaften wir jetzt untersuchen wollen, ganz anders.

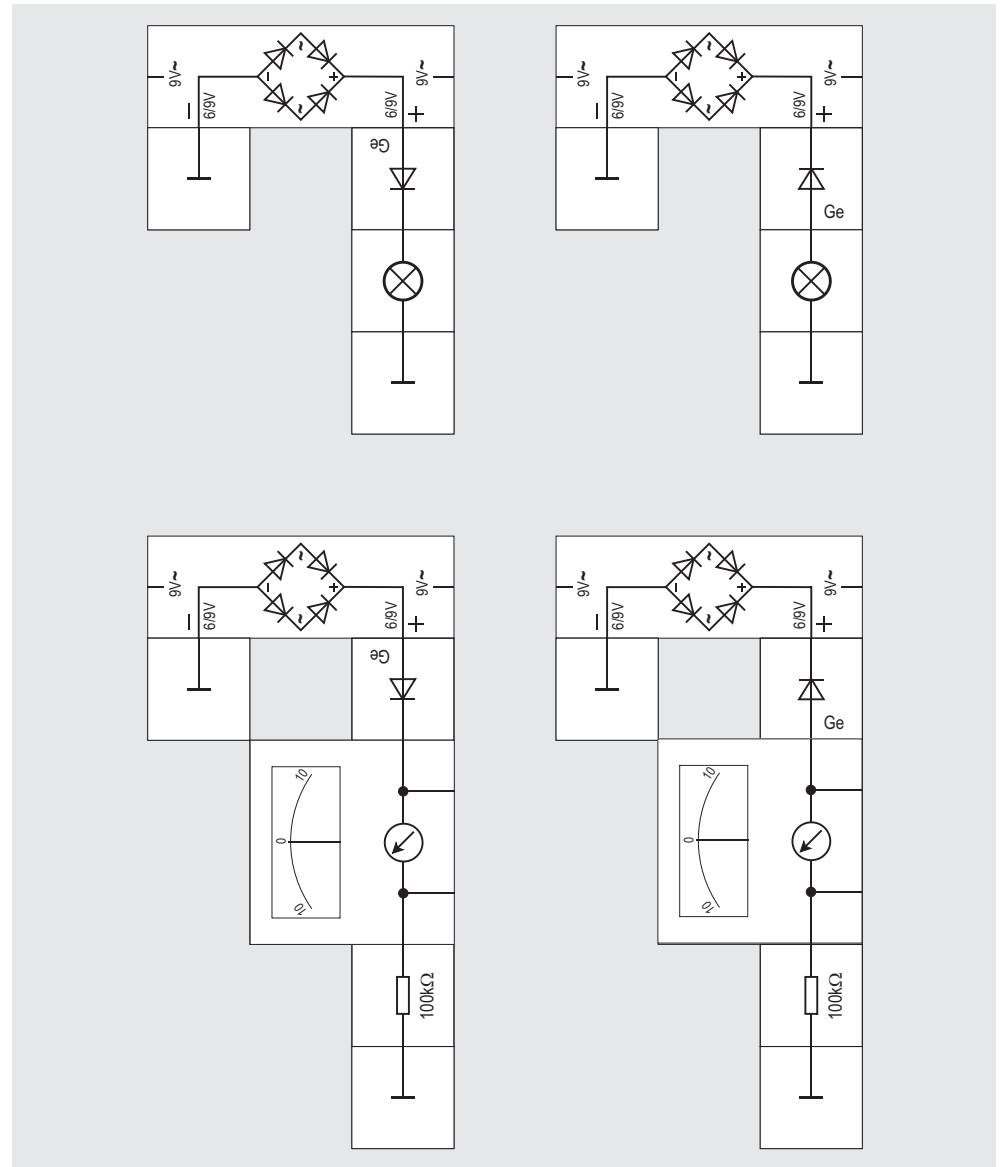
Dieses Bauelement heißt DIODE und da es aus dem Halbleitermaterial Germanium hergestellt ist, GERMANIUMDIODE. Sein Schaltzeichen ist ein Pfeil, der Anschluss auf den die Pfeilspitze zeigt, heißt KATODE, der andere ANODE. Legen wir eine Diode in Reihe zu unserer Glühlampe in

einen geschlossenen Stromkreis und die Anode an den Pluspol, so werden wir sehen, dass die Lampe kräftig leuchtet, die Diode hat offensichtlich nur einen kleinen Widerstand.

Drehen wir den Diodenbaustein in der Schaltung um 180° , verlöscht die Glühlampe. Ihr Widerstand ist bei dieser Polung sehr viel größer.

Wir können beide Versuche statt mit der Glühlampe mit dem empfindlicheren Messinstrument wiederholen und werden sehen, dass die Diode in Sperrrichtung nur einen sehr kleinen Strom durch lässt.

Die Diode verhält sich wie ein elektrisches Ventil: Sie leitet in Durchlassrichtung sehr gut und lässt nur einen kleinen Sperrstrom in der dazu umgekehrten Richtung durch. Es gibt auch Dioden aus dem Halbleitermaterial Silizium, bei denen der Sperrstrom noch viel kleiner ist.





Experiment 21

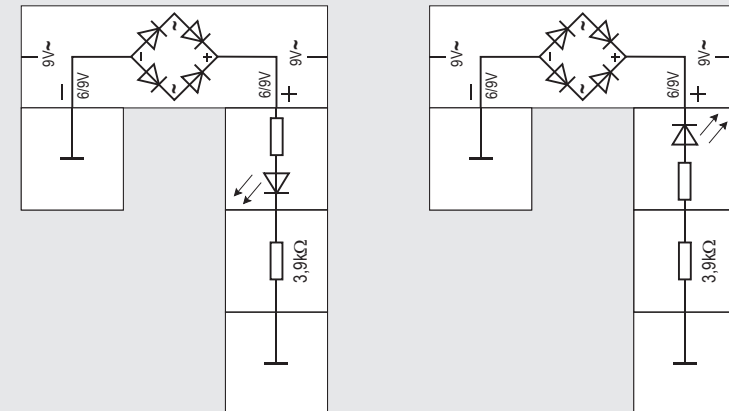
Leuchtdiode

Wenn wir uns unsere Bausteine betrachten, werden wir einen weiteren finden, auf dem das Diodensymbol mit zwei zusätzlichen Pfeilen abgebildet ist. Dies ist ein Baustein, der eine LEUCHTDIODE, kurz LED vom Englischen light emitting diode enthält. Auch diese Diode lässt Strom nur in einer Richtung fließen, wobei sie in Abhängigkeit von der Stromstärke mehr oder weniger stark leuchtet. Die Leuchtfarbe hängt von dem verwendeten Halbleitermaterial ab: Galliumarsenid (rot), Galliumphosphid (grün), Galliumnitrid (blau).

Da eine Diode im Gegensatz zur Glüh-

lampe keine strombegrenzende Durchlasscharakteristik hat, muss bei ihrem Betrieb an einer Spannungsquelle unbedingt ein Vorwiderstand in Reihe geschaltet werden; ohne Widerstand würde sie durch zu hohen Strom zerstört. Damit das versehentlich nicht doch passiert, ist der Baustein bereits mit einem $220\ \Omega$ Vorwiderstand bestückt.

Zur Schonung von Batterie und Diode können wir einen weiteren in Reihe schalten und seine Größe variieren. Wir werden bemerken, dass die Diode noch erkennbar leuchtet (evtl. etwas abschwächen), wenn wir einen $10\ \text{k}\Omega$ Widerstand in Reihe schalten. Sie kann somit als empfindlichere Anzeige als die Glühlampe eingesetzt werden.



Experiment 22

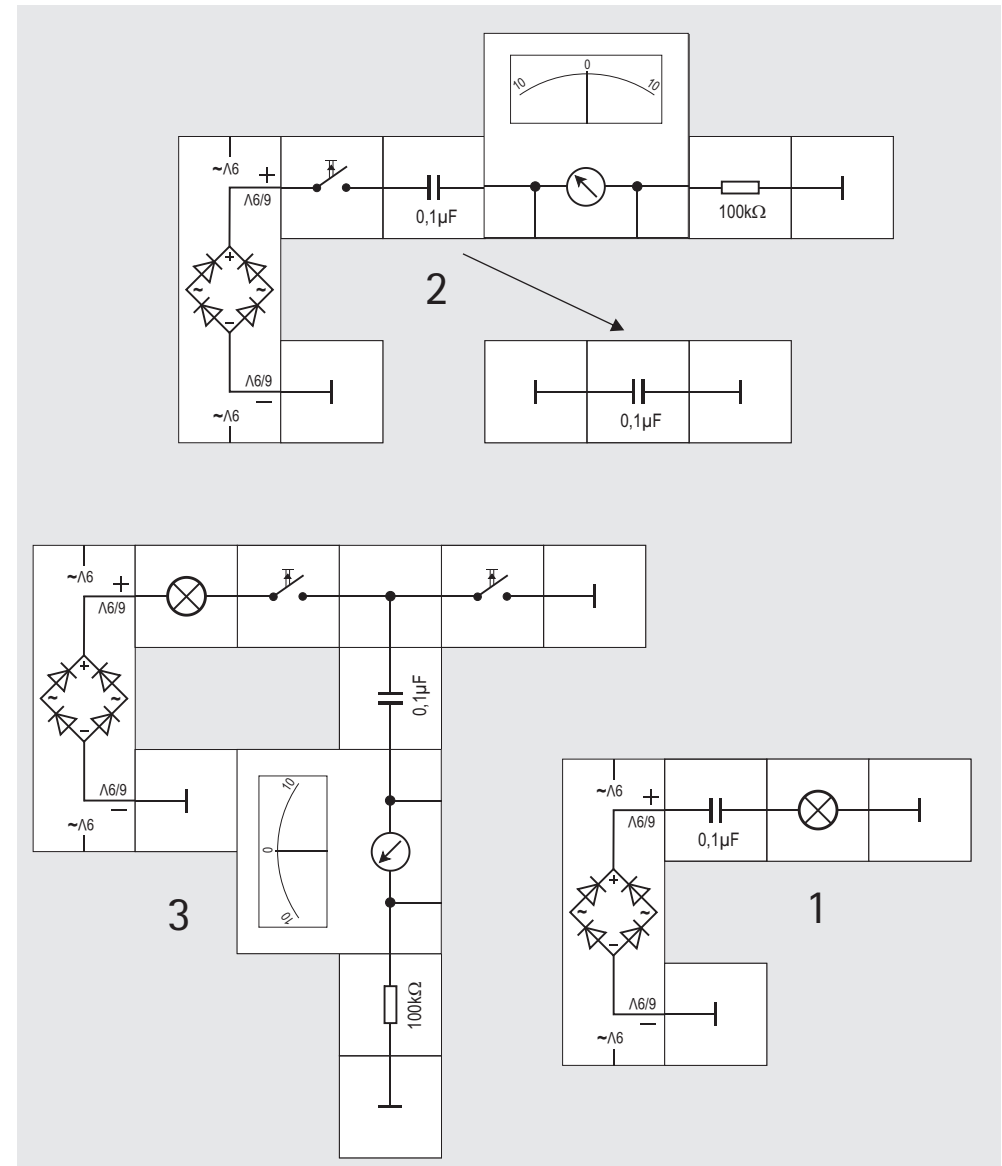
Kondensator

Wir wollen nun einen weiteren Baustein aus dem Experimentierkasten untersuchen, den KONDENSATOR. Sein Schaltsymbol sind zwei Platten mit einem Zwischenraum. Das deutet darauf hin, dass es keine leitende Verbindung zwischen den beiden Platten gibt, und tatsächlich bleibt das Lämpchen dunkel, wenn wir den Kondensatorbaustein in Reihe zu dem Lampenbaustein und dem Batteriebaustein legen und mit einem Massebaustein den Stromkreis schließen (1). Der Kondensator ist zumindest nicht niederohmig für Gleichstrom. Deswegen wollen wir mit dem empfindlicheren Messinstrument genauer untersuchen, wie sich der Kondensator im Gleichstromkreis verhält.

Wir legen dazu den Kondensator in Reihe zum Messinstrument (mit dem $100\text{ k}\Omega$ Widerstand) und zu einem Taster (2). Betätigen wir den Taster, schlägt der Zeiger kurz aus und geht dann auf Null zurück, auch wenn der Taster betätigt bleibt. Lassen wir den Taster los und betätigen ihn nach kurzer Zeit erneut, wird

sich der Zeiger - falls überhaupt - nur noch ganz wenig bewegen. Es sieht so aus, als ob der Kondensator nur kurzzeitig leitet und dann hochohmig wird. Entfernen wir dagegen den Kondensator aus der Schaltung und verbinden seine beiden Anschlüsse über Massebausteine miteinander, so können wir wie zu Anfang in der Versuchsschaltung bei Tasterbetätigung einen kräftigen aber immer nur einmaligen Zeigerausschlag des Instruments beobachten.

Kombinieren wir beide Schaltungen miteinander, erhalten wir den abgebildeten Versuchsaufbau (3). Die Glühlampe ist eingefügt, damit beim versehentlichen gleichzeitigen Betätigen beider Taster die Batterie nicht kurzgeschlossen wird. Jetzt wird deutlich, was eigentlich passiert, wenn wir nacheinander den linken und dann den rechten Taster betätigen: Das Instrument schlägt kurz aus und geht auf Null zurück; danach schlägt es zur entgegengesetzten Seite aus und geht ebenfalls auf Null zurück. Hierbei ist die Batterie überhaupt nicht beteiligt, was den Schluss zulässt, dass der Kondensator Energie speichert, also elektrisch aufgeladen und anschließend wieder entladen wird. Er ist - wie die Batterie - ein Energiespeicher.



Experiment 23

Kondensator laden und entladen

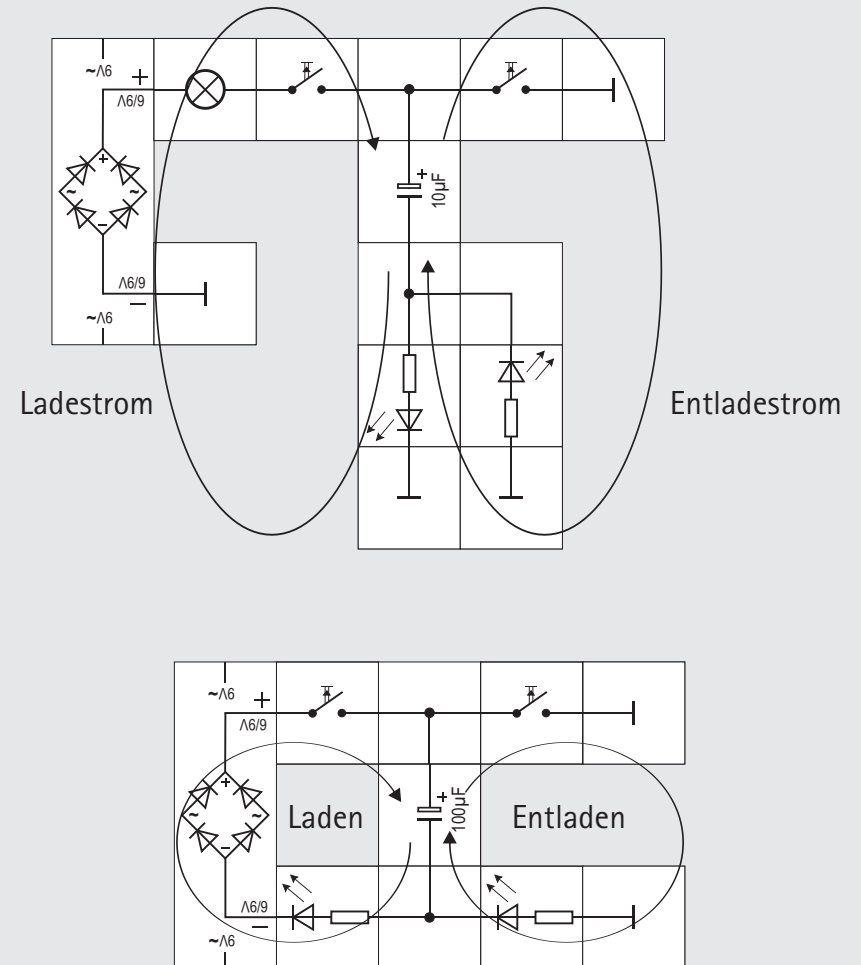
Wenn wir statt des $0,1\mu\text{F}$ Kondensators den $10\mu\text{F}$ Kondensator verwenden, wobei wir auf die Polung achten müssen, ist der Effekt erheblich ausgeprägter: Die Zeigeraus schläge des Instruments gehen viel langsamer zurück. Das liegt an dem 100mal größeren Fassungsvermögen des Kondensators, also an seiner Kapazität, die in Farad (F) - nach dem englischen Forscher M. Faraday - gemessen wird. 1F ist ein sehr großer Wert, weswegen wir meistens Kondensatoren mit dem Aufdruck μF (millionste Teil eines Farads) oder nF (milliardste Teil eines Farads) begegnen werden. Der Zahlenwert gibt an, wie leicht (kleiner Wert) oder schwer (großer Wert) es ist, den Kondensator auf die anliegende Spannung zu laden.

Mit Hilfe der uns bereits bekannten Leuchtdiode können wir Lade- und Entladestrom sichtbar machen. Statt des In-

struments und des $100\text{ k}\Omega$ Widerstands setzen wir zwei antiparallel geschaltete Leuchtdioden in den Versuchsaufbau. Betätigen wir den linken Taster, wird der Kondensator auf Batteriespannung geladen und die linke Diode zeigt den Ladestrom an, da er nur durch sie fließen kann; die rechte Diode ist in Sperrrichtung geschaltet. Anders ist es, wenn wir den rechten Taster betätigen. Jetzt fließt der Entladestrom des Kondensators durch die rechte Diode, die deswegen leuchtet und die linke bleibt dunkel.

Tauschen wir den $10\mu\text{F}$ Kondensator gegen einen $100\mu\text{F}$ Kondensator (wieder auf die Polung achten) aus, ist wegen der größeren Lade- und Entladeströme das Leuchten der Dioden noch stärker. Der Versuchsaufbau kann noch vereinfacht werden: Es wird dann deutlicher, dass für den Entladevorgang die Batterie überflüssig ist.

Die als Kurzschlusschutz verwendete Glühlampe entfällt. Beim versehentlichen gleichzeitigen Betätigen beider Taster leuchten beide Dioden.





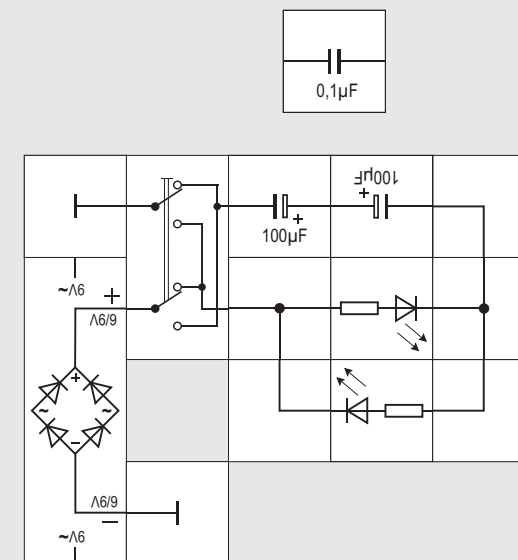
Experiment 24 Kondensator an »Wechselspannung«

Bisher haben wir den Kondensator immer nur geladen und wieder entladen; wir können nun noch einen Schritt weiter gehen und ihn nach dem Entladen »andersherum« gepolt laden. Dazu benötigen wir einen zweipoligen Umschalter. Damit der gepolte $100\mu\text{F}$ Kondensator bei der Falschpolung keinen Schaden erleidet, schalten wir einen zweiten entgegen gesetzt gepolt in Reihe. Diese Anordnung wirkt so wie ein ungepoltter Kondensator mit einer Gesamtkapazität von $50\mu\text{F}$.

Bei der gezeigten Schalterstellung fließt der Strom der Ladungsträger vom Pluspol der Batterie über die obere Leuchtdiode zur rechten Kondensatorplatte. Eine gleich große Menge Ladungsträger fließt von der linken Kondensatorplatte über die beiden Massebausteine zum Minuspol der Batterie. Der Ladestrom wird Null, wenn die Kondensatorspannung gleich der Batteriespannung ist. Die rechte Platte ist dann gegenüber der linken, die an Masse liegt, 9V positiver. Schalten wir um, so wird der Pluspol der Batterie mit der linken Kondensatorplatte verbunden und die 9V der Batterie lie-

gen mit der 9V Kondensatorspannung in Reihe, da auch gleichzeitig die Katode der unteren (aufleuchtenden) Diode an Masse geschaltet wird. An der Diode liegt anfangs eine Spannung von 18V ; ein kräftiger Entladestrom des Kondensators durch die Diode ist die Folge. Der Kondensator entlädt sich und wird andersherum aufgeladen, wobei die linke Platte 9V positiver als die rechte ist; letztere liegt ja über der unteren Diode an Masse.

Schalten wir wieder zurück, wiederholt sich das Spiel der Entladung mit folgender (Um-) Ladung und die obere Diode leuchtet. Je schneller wir schalten und je größer die Kapazität des Kondensators ist (versuchsweise den kleineren $0,1\mu\text{F}$ Kondensator verwenden), desto heller leuchten die Dioden. Obwohl durch die Isolationsschicht zwischen den Kondensatorplatten keine Ladungsträger durchkommen (Experiment 22 zeigte, dass der Kondensator keinen Gleichstrom durchlässt), hat der Kondensator für unsere selbst erzeugte Wechselspannung einen endlichen Widerstand, dessen Größe von der Schaltfrequenz und der Kapazität abhängt. Mit einem Kondensator können wir also Gleich- von Wechselspannung trennen.



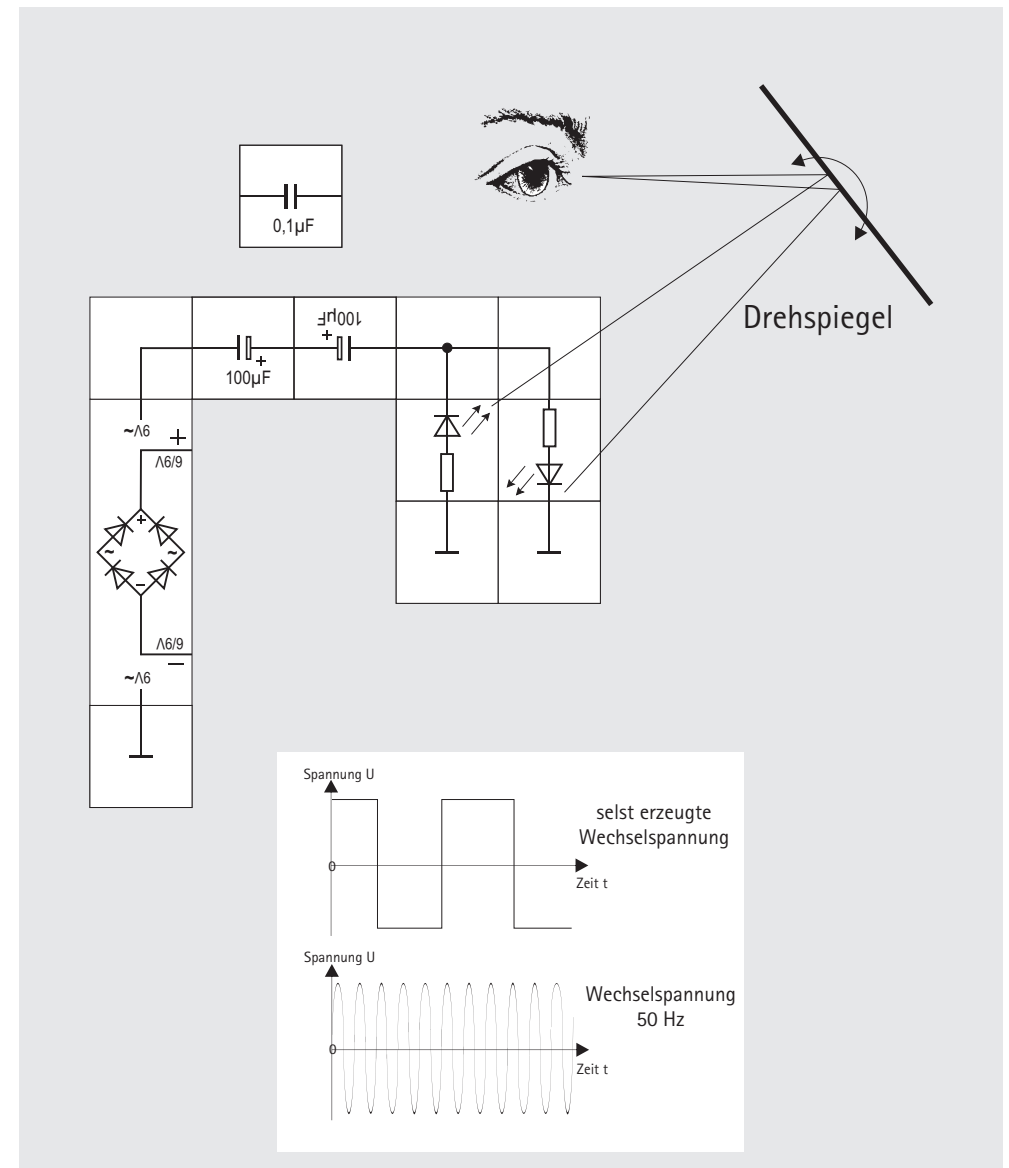
Experiment 25

Kondensator an Wechselspannung

Um Wechselspannung zu erzeugen, müssen wir nun nicht einen Umschalter ständig hin- und herschalten, sondern können das Gleiche viel bequemer erhalten: Die Elektrizität, die uns ins Haus geliefert wird, ist nämlich eine Wechselspannung. Sie hat zwar die für den menschlichen Körper lebensgefährliche Spannung von 230 V und wir dürfen keinesfalls unsere Versuchsaufbauten direkt an der Steckdose betreiben, sondern müssen immer das Netzgerät dazwischen schalten. Es wandelt die hohe Spannung in für uns harmlose 12 V um. Der zeitliche Verlauf der so zur Verfügung stehende Wechselspannung sieht ein klein wenig anders aus als der der selbst erzeugten. Mit unserem Umschalter haben wir schlagartig vom positiven auf den negativen Höchstwert und zurück geschaltet, die gelieferte Wechselspannung steigt dagegen kontinuierlich von Null auf den positiven Höchstwert, fällt wieder kontinuierlich auf Null und steigt dann wieder auf Null. Dieser Durchlauf geschieht 50-mal pro Sekun-

de; man sagt die Wechselspannung hat eine FREQUENZ von 50 Hertz (Hz).

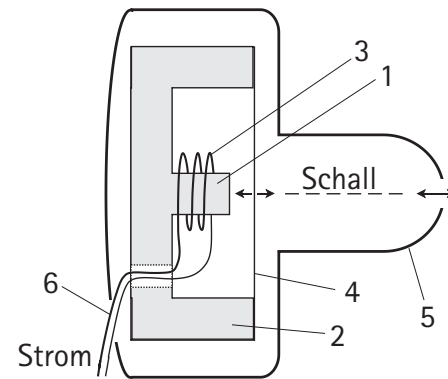
Wenn wir mit ihr unseren Versuchsaufbau betreiben, folgen die Lade- und Entladeströme des Kondensators so schnell aufeinander, wie wir den mechanischen Umschalter gar nicht betätigen können, so dass für unser Auge beide Leuchtdioden scheinbar ständig leuchten. Schauen wir sie uns dagegen über einen kleinen Taschenspiegel an, den wir mit der Hand mäßig schnell leicht hin- und herdrehen, so sehen wir das Licht der Dioden in zwei Leuchtbandern auseinander gezogen. Das eine Band hat dort Unterbrechungen, wo das andere leuchtet und umgekehrt. Die einzelnen Leuchtbandabschnitte entsprechend den Lade- und Entladeströmen des Kondensators. Ersetzen wir unsere Anordnung gegen einander geschalteter 100µF Kondensatoren durch den 0,1µF Kondensator, werden wir weiter die Leuchtbander mit Unterbrechungen beobachten können. Wegen der erheblich kleineren Kapazität des Kondensators sind Lade- und Entladestrom jedoch wesentlich kleiner und die Bänder leuchten dunkler. Unsere Erkenntnis aus den vorausgegangenen Versuchen wird bestätigt: Der Scheinwiderstand eines kleinen Kondensators ist größer als der eines großen Kondensators.



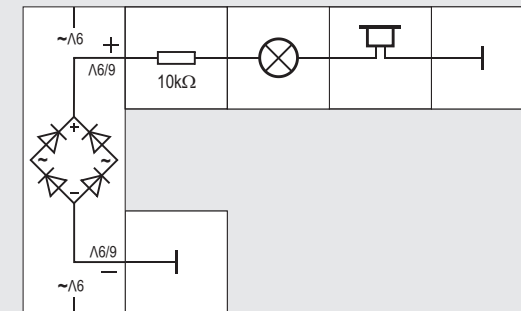
Experiment 26

Ohrhörer

Wir wollen nun ein sehr empfindliches Nachweisinstrument für Wechselströme kennen lernen: den Ohrhörer. Schalten wir ihn in einen Stromkreis mit einer Glühlampe, so werden wir beim Anlegen der Batterie ein deutliches Knacken im Ohr vernehmen; auch beim Unterbrechen des Stromkreises (z. B. einen Massebaustein wegnehmen) hören wir wieder das Knacken. Zwischen Schließen und Öffnen des Stromkreises hören wir nichts, obwohl sicherlich ein Strom fließt. Wir können das Ein- und Ausschalten des Stroms noch eleganter bewerkstelligen, indem wir den Stromkreis wieder schließen und das Lämpchen in seiner Fassung los- und festschrauben und so einen Wackelkontakt herstellen. Beim Wackeln des Lämpchen hören wir ein lautes Krachen im Ohrhörer. Er ist demnach ein gutes Nachweismittel für schwache Ströme, allerdings müssen sich die Ströme in ihrer Größe ändern, sonst hören wir nichts. Dieses Verhalten wird uns klar, wenn wir uns den Aufbau des Ohrhörers genauer ansehen: Im Inneren verbirgt sich ein STABMAGNET (1) mit einem ringförmigen POLSCHUH (2). Die um den Magneten gewickelte SPULE (3) besteht aus äußerst dün-



nem Kupferdraht. Vor der Spule befindet sich eine runde STAHLMEMBRAN (4), die wie eine Rasierklinge federt. Aus dem GEHÄUSE (5) führen zwei ANSCHLUSSDRÄHTE (6) heraus, welche die Enden der Spule mit den Seitenkontakten des Ohrhörerbausteins verbinden. Wenn nun ein Strom durch die Spule fließt, erzeugt sie ein Magnetfeld, das zusammen mit dem Feld des Stabmagneten die Membran mehr oder weniger anzieht; aber nur wenn sich die Membran aufgrund eines wechselnden Stromes bewegt, entstehen durch diese Bewegung Schallwellen, die wir hören. Fließt ein konstanter Strom springt die Membran in eine andere Stellung (wir hören einmalig einen Knacks) und verharrt dort.





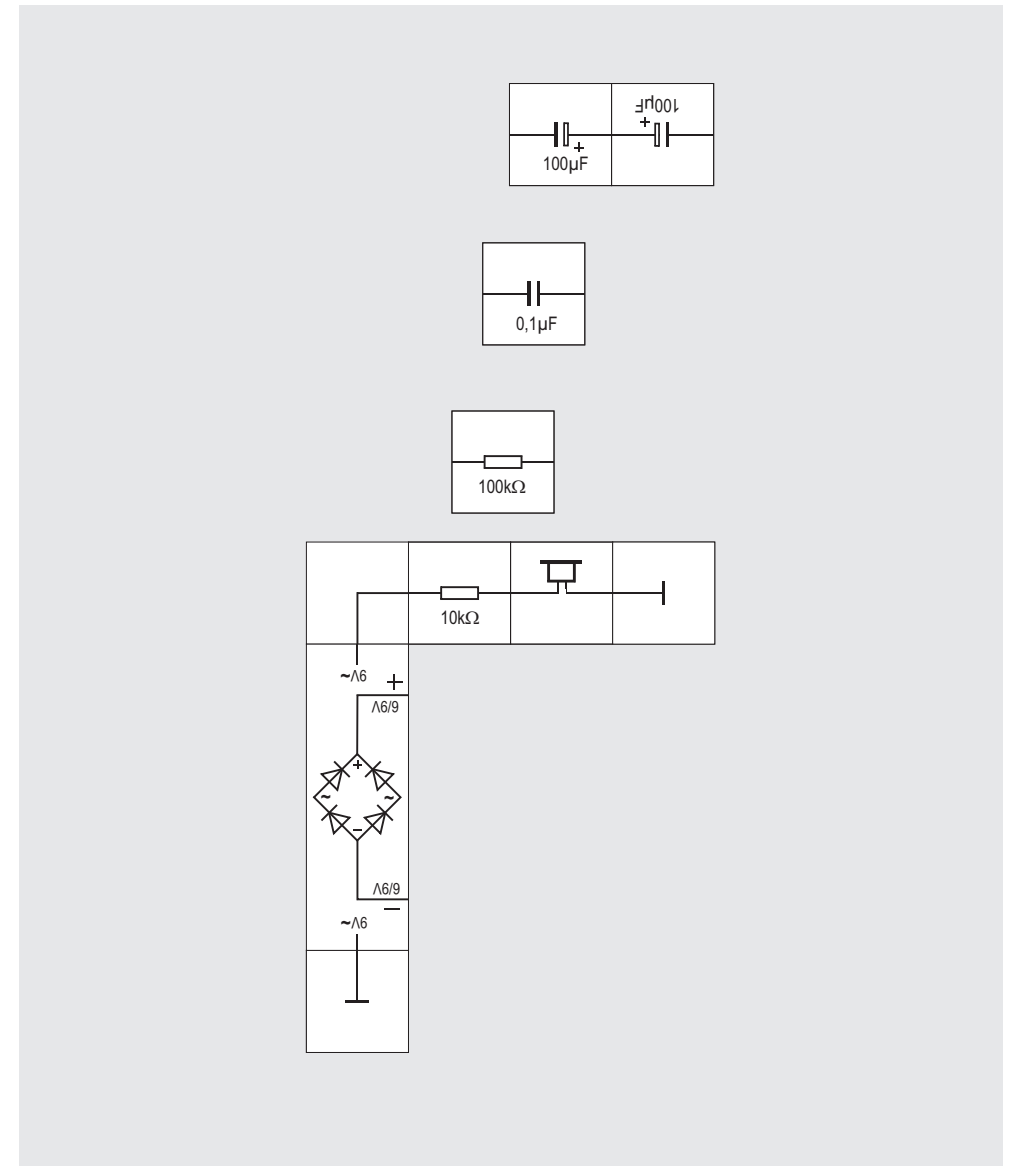
Experiment 27

Ohrhörer an Wechselspannung

Den Ohrhörer legen wir in einen Stromkreis, durch den Wechselstrom fließt und machen diesen hörbar. Um zu zeigen, wie empfindlich der Ohrhörer ist, schalten wir zunächst einen $10\text{ k}\Omega$ Widerstand in Reihe. Wir vernehmen ein lautes Brummen, das einer Schwingung von 50 Hz entspricht. Wechseln wir den Widerstand gegen einen $100\text{ k}\Omega$, so fließt ein zehnmals kleinerer Strom. Das Brummen wird leiser, ist aber immer noch deutlich zu hören.

Tauschen wir den Widerstand gegen einen Kondensator, z. B. den $0,1\mu\text{F}$, der für Wechselstrom durchlässig ist, so hören wir wieder den 50 Hz Brummtone mit einer Lautstärke, die zwischen derjenigen bei einem Betrieb mit einem $10\text{ k}\Omega$ und der mit einem $100\text{ k}\Omega$ Widerstand liegen wird. Tatsächlich beträgt der Scheinwiderstand des $0,1\mu\text{F}$ Kondensators bei 50 Hz ungefähr $30\text{ k}\Omega$.

Wir können noch den $0,1\mu\text{F}$ Kondensator gegen die Anordnung von zwei gegeneinander geschalteten $100\mu\text{F}$ Kondensatoren ersetzen und hören dann den Brummtone sehr laut. Für einen $50\mu\text{F}$ Kondensator beträgt der Scheinwiderstand bei 50 Hz nur rund 60Ω .





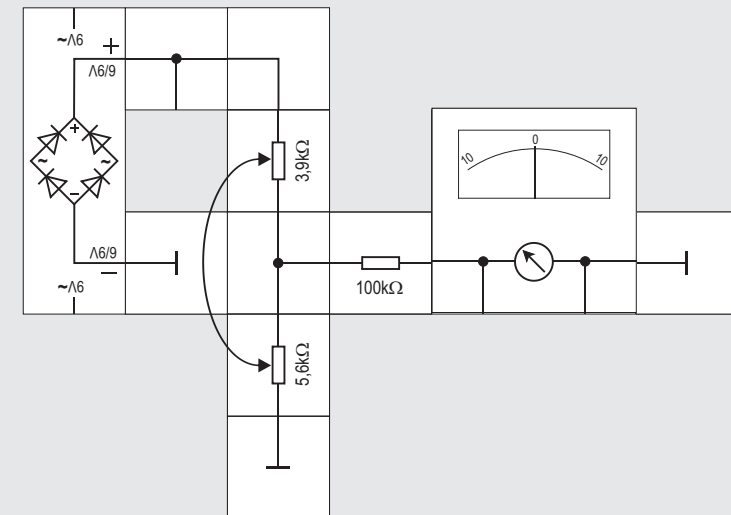
Experiment 28

Spannungsteiler

Im Experiment 9 betrieben wir drei Glühlampen in Reihe an der 9 V Batterie und konnten mit dem Messinstrument die Potentiale 9 V (vor der ersten Lampe), 6 V (vor der zweiten Lampe) und 3 V (vor der dritten Lampe) gegen Masse anzeigen. Durch die drei gleich großen Lampenwiderstände wurde die Versorgungsspannung gedrittelt. Eine SPANNUNGSTEILUNG ist nicht nur mit Glühlampen, sondern natürlich auch mit normalen Widerständen möglich.

Wir bauen dazu einen Stromkreis mit den beiden Widerständen $3,9\text{ k}\Omega$ und $5,6\text{ k}\Omega$ auf. Da die Widerstände ungefähr

gleich groß sind, wird das Instrument auch ungefähr die halbe Versorgungsspannung anzeigen. Eine genaue Ableseung zeigt jedoch, dass über 5 V angezeigt werden, weil bei gleichem Strom an dem größeren Widerstand eine etwas höhere Spannung abfällt als an dem kleineren. Deutlicher wird das, wenn wir die Widerstände austauschen; jetzt ist der kleinere näher an Masse und das Instrument zeigt einen Wert unter 4 V an. Wir können mit Hilfe von passenden Widerständen also eine vorgegebene konstante Versorgungs-) Spannung auf einen von uns gewünschten Wert »herunterteilen«; die Reihenschaltung von mindestens zwei Widerständen kommt in der Praxis sehr häufig vor und heißt SPANNUNGSTEILER.

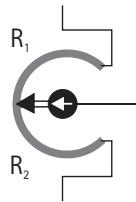




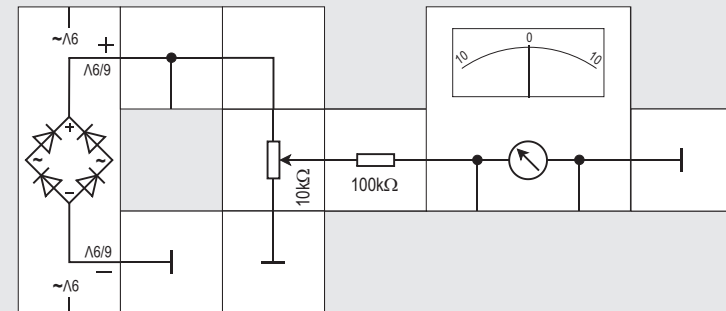
Experiment 29

Potentiometer

Etwas störend ist beim Aufbau des Spannungsteilers aus zwei Widerständen, dass man manchmal sehr »krumme« Widerstandswerte benötigt, um ein bestimmte Spannung am Teilerpunkt zu erhalten. Abhilfe schafft hier ein Spannungsteiler, der mit einem Drehknopf kontinuierlich eingestellt werden kann. Auf einem Trägermaterial (Pertinax oder Keramik) ist eine kreisförmige Widerstandsschicht aus Metall oder Graphit aufgedampft, auf der ein Schleifer als Abgriff verstellbar wird. Der Abgriff teilt die Widerstandsschicht in die beiden Teilwi-



derstände R_1 und R_2 , wobei die Summe von R_1 und R_2 konstant und dem aufgedruckten Wert, z. B. $10\text{ k}\Omega$, ist. Da man am Mittelabgriff sämtliche Potentiale zwischen Versorgungsspannung und Masse durch Drehen am Einstellknopf erhalten kann, heißt dieses vielgenutzte Bauteil POTENTIOMETER. Wir werden es in den nächsten Experimenten häufig einsetzen.



Experiment 30

Aufbau des Transistors

Wir kennen nun schon einige wesentliche Bausteine mit ihren Funktionen, die in allen modernen elektronischen Schaltungen wirken.

Das wichtigste Bauteil und damit auch das technisch interessanteste ist jedoch der Transistor. Er ist ein steuerbarer Halbleiter. Was das bedeutet, wollen wir mit den folgenden Experimenten herausfinden.

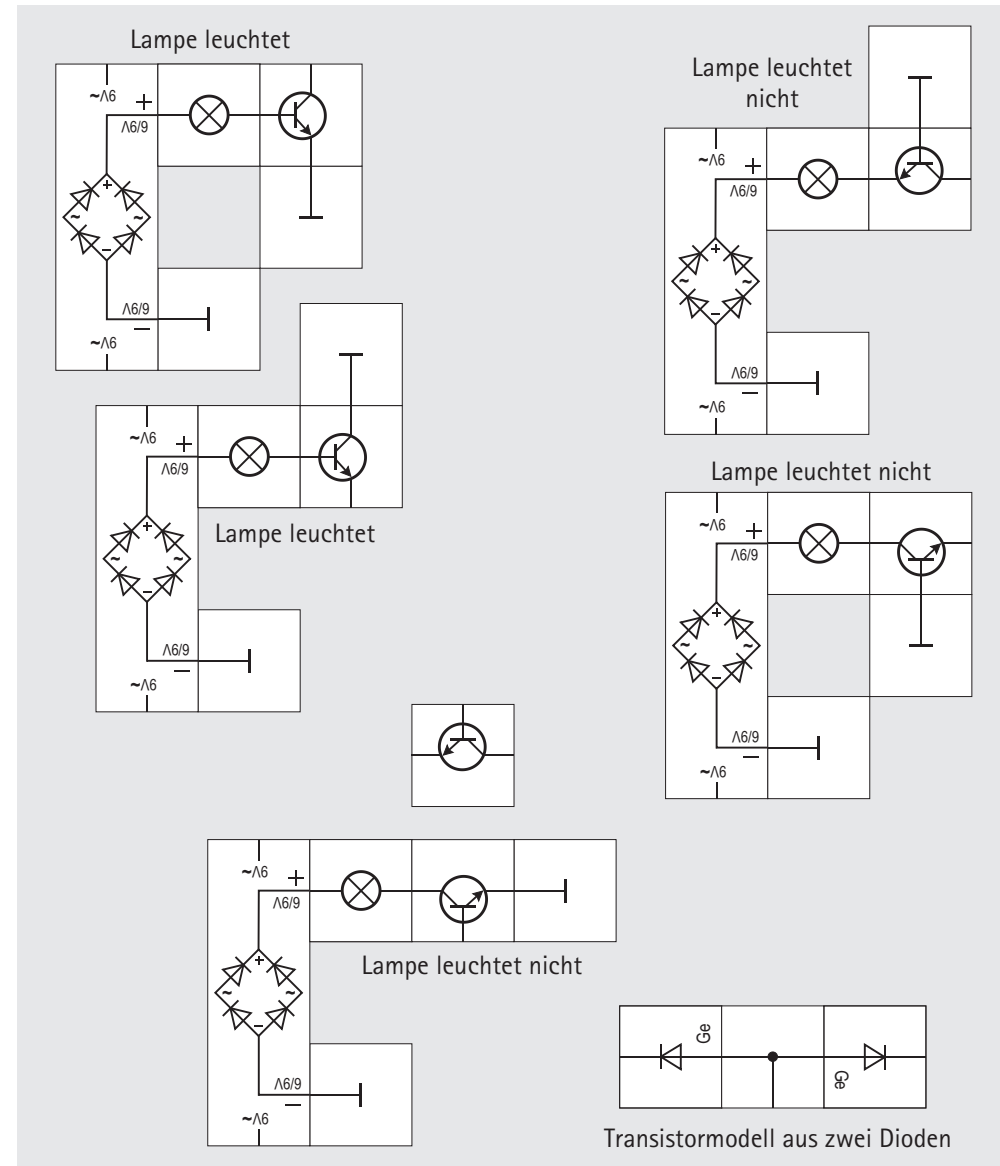
Schauen wir uns einen Transistorbaustein etwas genauer an, so erkennen wir an dem Schaltungssymbol einen Pfeil, den wir in ähnlicher Form bereits von der Diode kennen; und tatsächlich handelt es sich hier um eine solche, wie wir im Experiment mit der Glühlampe leicht nachweisen können.

Der Transistor hat noch einen dritten Anschluss, der nicht mit einem Pfeil versehen ist. Trotzdem können wir zwischen diesem Anschluss und dem Anschluss

mit dem dicken Balken ebenfalls ein Diodenverhalten nachweisen: In der einen Richtung angeschlossen leuchtet die Lampe, in der anderen nicht.

Tatsächlich kann man sich den Transistor aus zwei Dioden zusammengesetzt vorstellen. Die drei Anschlüsse des Transistors heißen EMITTER (mit Pfeil), BASIS (dicker Balken) und KOLLEKTOR. Es gibt demnach eine Basis - Emitter - Diode und eine Basis - Kollektor - Diode, die gegeneinander geschaltet sind. Zwischen Emitter und Kollektor (bei offenem Basisanschluss) darf der Transistor also in beiden Richtungen nicht durchlässig sein, das Lämpchen muss dunkel bleiben. Sollte das wider Erwarten nicht der Fall sein, ist der Transistor defekt und für unsere Experimente nicht mehr zu gebrauchen.

Unser Transistormodell aus zwei Dioden gibt allerdings das Verhalten nur unzureichend wieder. Im nächsten Experiment werden wir sehen, wie wir mit diesem wichtigen Bauteil der Elektronik





Experiment 31

Transistor im Stromkreis

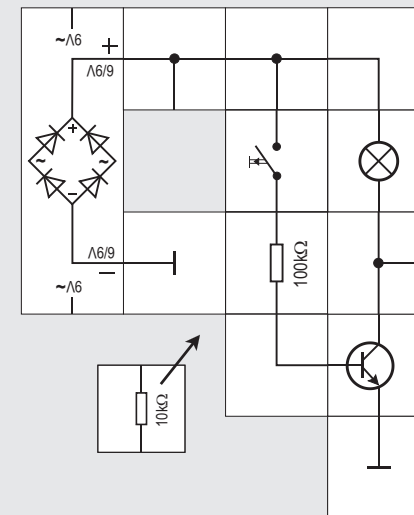
Wenn wir unsere Schaltung aufgebaut haben, wird es uns wahrscheinlich nicht sehr wundern, dass bei nicht betätigtem Taster die Lampe dunkel bleibt; wir konnten im vorigen Experiment keinen Stromfluss zwischen Kollektor und Emitter feststellen, wenn die Basis nicht angeschlossen ist.

Betätigen wir jedoch den Schalter, so leuchtet bei frischer Batterie das Glühlämpchen sehr schwach. Das bedeutet, unser Transistor befindet sich in einem Zustand, in dem ein geringer Stromfluss von kleiner 20 mA zwischen Kollektor und Emitter möglich ist, wenn wir in die Basis einen ganz geringen Strom von ungefähr 0,1 mA (über den 100 k Ω Widerstand) hinein schicken. Öffnen wir den Schalter, erlischt das Lämpchen. Wir können also offensichtlich mit einem sehr geringen Basisstrom den Stromfluss zwischen Kollektor und Emitter steuern.

Unsere Vermutung prüfen wir nach, indem wir den 100 k Ω Widerstand durch einen zehnmal kleineren, nämlich durch den 10 k Ω Widerstand ersetzen: Beim Betätigen des Tasters leuchtet das Glühlämpchen hell auf, es muss ein Strom von 50 mA durch das Lämpchen und den Transistor fließen; die Kollektor - Emitter - Strecke des Transistors leitet bei jetzt vergrößertem Basisstrom von circa 1 mA sehr gut. Bei einer reinen Reihenschaltung von 10 k Ω Widerstand und Lämpchen (ohne den Transistor) würde das Lämpchen dunkel bleiben.

Mit Hilfe des Transistors können wir also durch einen relativ kleinen Basisstrom den ungleich größeren Strom über Kollektor und Emitter nicht nur an- und abschalten, sondern auch in den Zwischenbereich steuern.

Im nächsten Experiment wollen wir diese Stromsteuerung mit Hilfe des Transistors genauer untersuchen.





Experiment 32

Strom - Messungen an Emitterschaltung

Um genau heraus zu finden, was bei der Steuerung des Transistors eigentlich passiert, bauen wir unsere Schaltung mit zwei Messinstrumenten auf. Das linke misst den Basisstrom und hat durch die Anordnung des Nebenschlusswiderstands Vollausschlag bei 10 mA. Das rechte misst den Strom durch das Lämpchen, der gleich dem Kollektorstrom ist. Sein Vollausschlag ist 100 mA. Die Höhe des Basisstroms stellen wir über das Potentiometer ein, wobei der zusätzliche Reihenwiderstand von $3,9 \text{ k}\Omega$ ganz wichtig ist: Ohne ihn würde, wenn der Schleifer des Potentiometers am oberen Ende steht, die Basis - Emitter - Diode zu viel Strom erhalten und der Transistor zerstört werden.

Wir starten den Versuch mit dem Schleifer des Potentiometers am unteren Ende, d.h. mit Masse verbunden. Der Drehknopf ist dabei im Uhrzeigersinn an den Anschlag gedreht. Beide Instrumente zeigen nichts an, es fließt also weder Basis- noch Kollektorstrom. Der Transistor wirkt wie ein offener Schalter im Stromkreis Pluspol Batterie - Messinstrument - Lampe - Kollektor - Emitter - Masseanschluss - Minuspol.

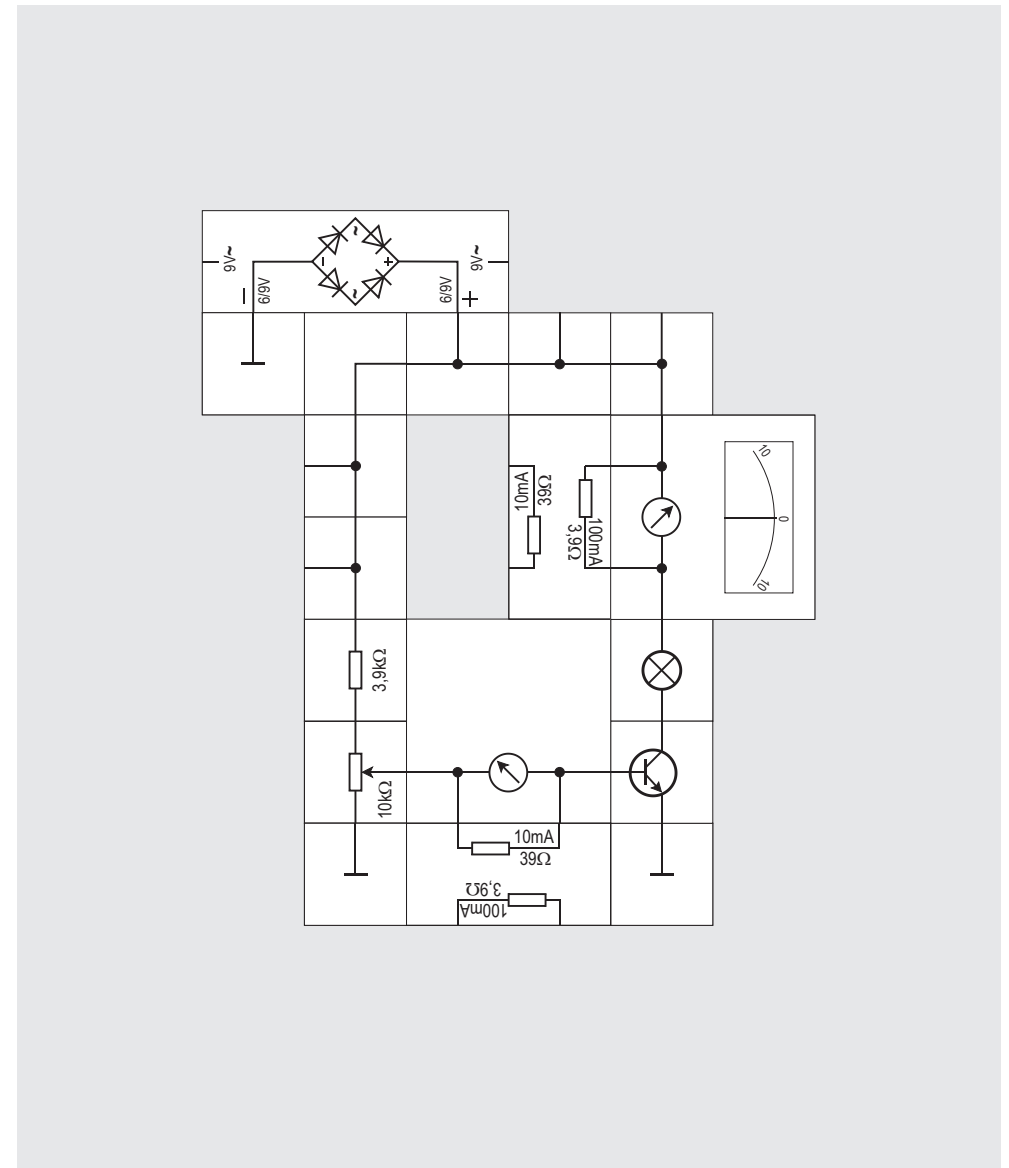
Drehen wir nun langsam den Einstellknopf im Gegenuhrzeigersinn, so wird das linke Instrument einen langsam wachsenden Basisstrom und das rechte einen wachsenden Kollektorstrom anzeigen, das Lämpchen fängt an zu glühen, leuchtet immer heller und hat schließlich seine normale Helligkeit erreicht. Eine weitere Steigerung des Basisstroms bewirkt jetzt nichts mehr: Der Transistor ist wie ein geschlossener Schalter, mehr als Kollektor mit Emitter sehr gut verbinden, kann er nicht. Es gibt also beim Transistor drei Arbeitsbereiche:

! Hochohmiger SPERRBEREICH

! ZWISCHENBEREICH, bei dem kleine Basisstromänderungen verstärkt werden und große Kollektorstromänderungen bewirken. Hier beträgt die sogenannte STROMVERSTÄRKUNG des Transistors (Kollektorstromänderung / Basisstromänderung) circa 100. Wenn wir einen Transistor als Verstärker und nicht nur als Schalter nutzen wollen, müssen wir ihn in diesem Bereich arbeiten lassen.

! Gut leitender DURCHLABBEREICH

Da der Emitter der gemeinsame Anschluss für den Ansteuerkreis (Basisstrom) und den zu steuernden Kreis (Kollektorstrom) ist, heißt diese Schaltung EMITTERSCHALTUNG.



Experiment 33

Spannungs - Messungen an Emitterschaltung

Im letzten Versuch haben wir gesehen, dass eine Basisstromänderung eine etwa 100-fache Kollektorstromänderung bewirkt, wenn der Transistor in einem bestimmten (Zwischen-) Bereich arbeitet. Man sagt dann auch: Der Arbeitspunkt des Transistors liegt im aktiven Bereich und der Transistor hat eine Stromverstärkung von 100.

In einem weiteren Versuchsaufbau wollen wir untersuchen, wie es mit der Spannungsverstärkung der Emitterschaltung aussieht. Wir messen dazu mit dem linken Instrument die Basisspannung gegen Masse. Mit dem 5,6 k Ω Vorwiderstand hat das Instrument Vollausschlag bei 1 V. Das rechte Instrument ist über einen 100 k Ω Widerstand am Kollektor angeschlossen, sein Vollausschlag ist bei 10V erreicht

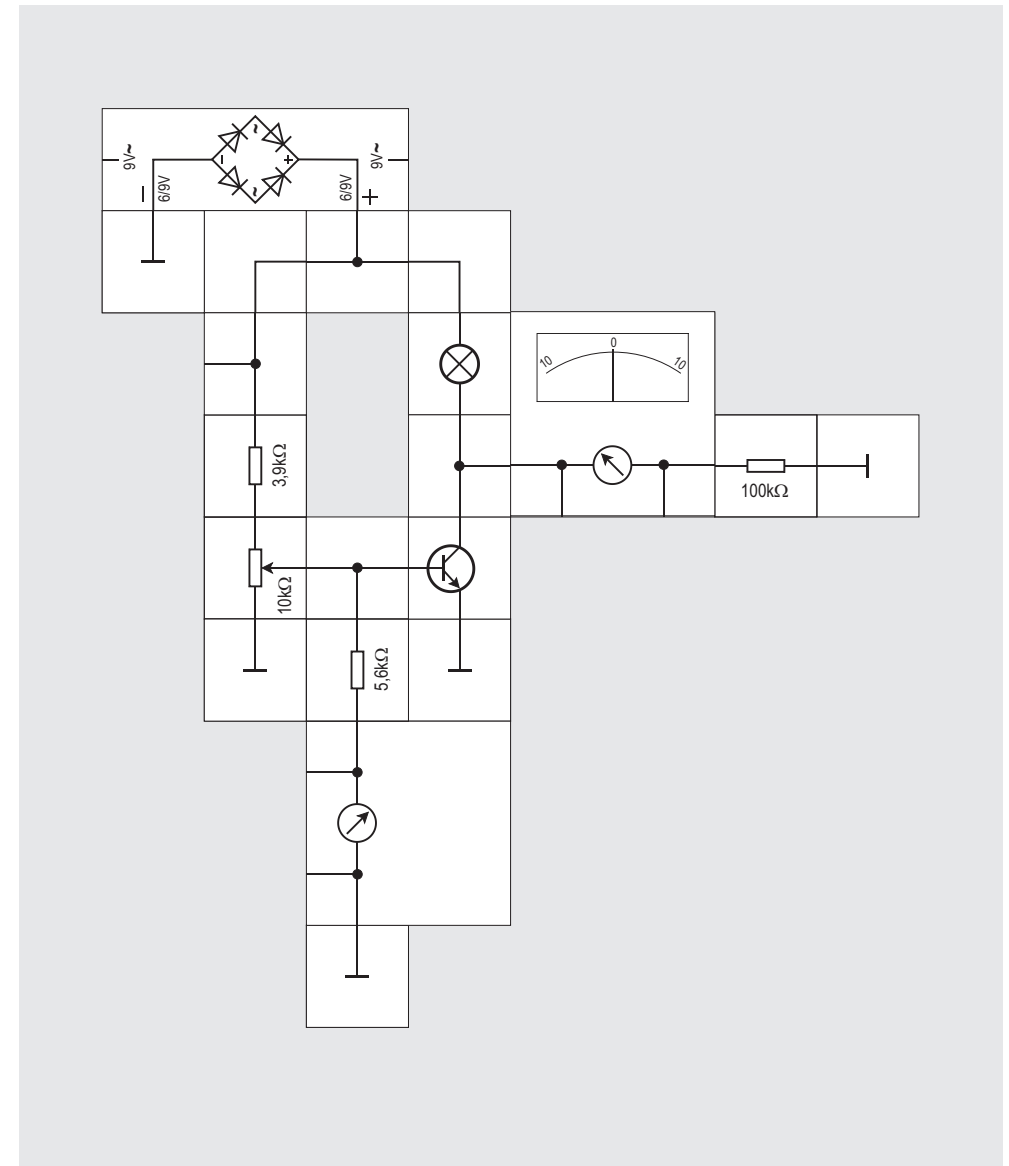
.Wir starten den Versuch wieder mit dem Schleifer des Potentiometers am unteren Ende, d.h. mit Masse verbunden. Der Drehknopf ist dabei im Uhrzeigersinn an den Anschlag gedreht. Das linke Instrument zeigt nichts an, die Basis - Emitter - Spannung ist Null. Der Transistor ist gesperrt, die Lampe ist dunkel und das rech-

te Instrument zeigt deswegen die volle Versorgungsspannung von 9 V an.

Drehen wir nun langsam den Einstellknopf im Gegenuhrzeigersinn, so wird das linke Instrument eine langsam wachsende Basisspannung anzeigen. Bei circa 0,6 V bewegt sich auch der Zeiger des rechten Instruments, weil der Transistor vom Sperr- in den Durchlassbereich gesteuert wird. Die Ausgangsspannung wird kleiner, es fließt Kollektorstrom und bei einer weiteren Erhöhung der Basisspannung auf 0,7 V glüht das Lämpchen zunächst und leuchtet dann hell auf. Der Transistor leitet immer besser und das rechte Instrument zeigt zum Schluss nur noch 0,1 V an.

Wir sehen, dass in einem relativ kleinen Bereich eine Erhöhung der Basisspannung von circa 0,3 bis 0,4 V eine Verminderung der Kollektorspannung von 9 V auf nahezu 0V nach sich zieht. Die Spannungsverstärkung beträgt also ungefähr $9V / 0,3 V = 30$, wobei der Transistor in Emitterschaltung invertiert: Eine Erhöhung der Basisspannung bewirkt eine Verminderung der Kollektorspannung und umgekehrt.

Ein Transistor in Emitterschaltung hat sowohl eine Strom- als auch eine Spannungsverstärkung und invertiert das anliegende Signal.



Experiment 34

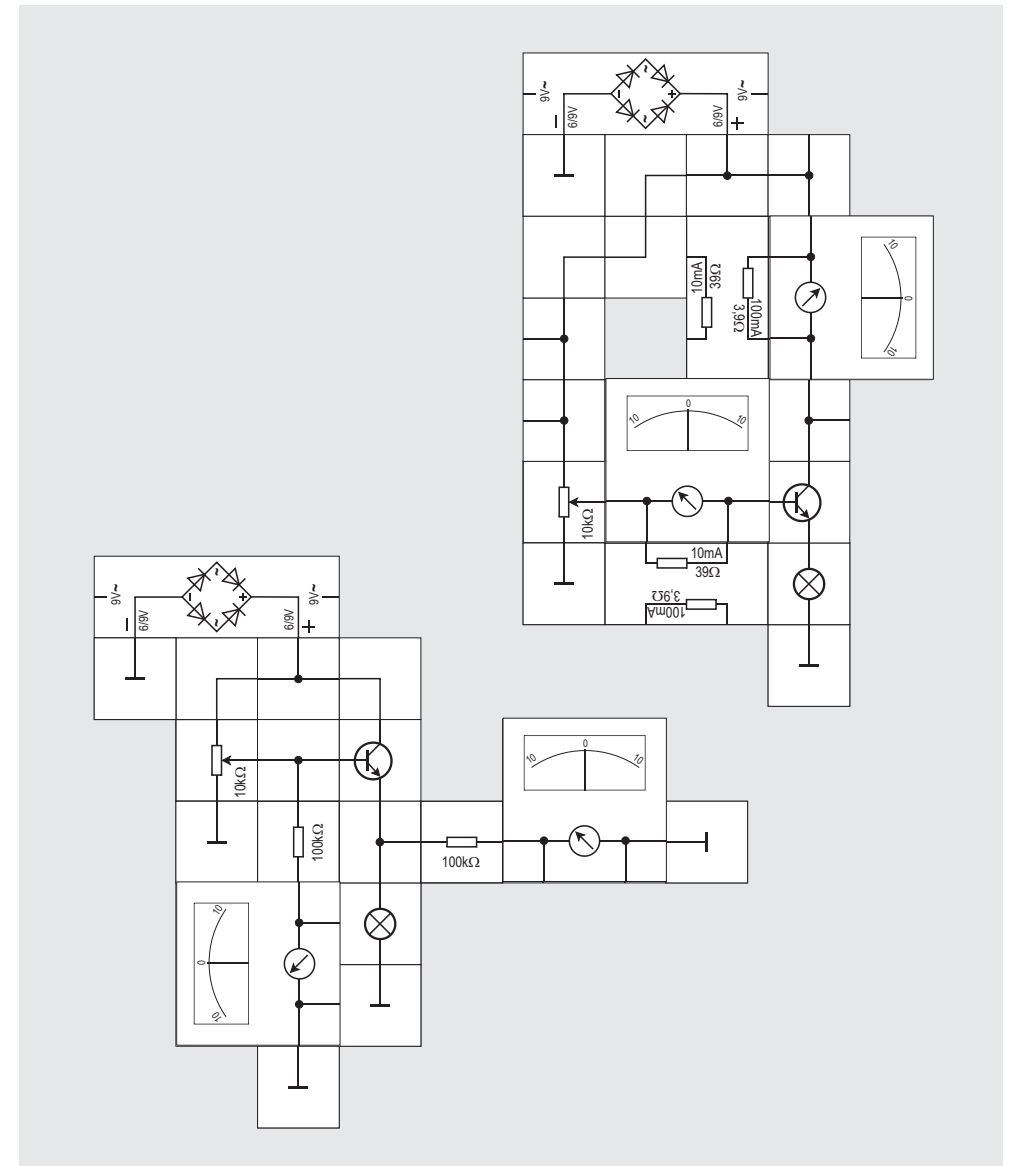
Messungen an Kollektorschaltung

Wenn wir eine Glühlampe und einen Schalter in Reihe schalten, ist es gleichgültig, in welcher Reihenfolge die beiden Bauteile angeordnet werden. Man könnte deswegen meinen, beim Ersatz des mechanischen Schalters durch einen elektronischen, nämlich durch den Transistor, sei es genauso. Das ist nicht der Fall. Wir ändern zunächst in der Strommessschaltung die Reihenfolge von Transistor und Lämpchen und messen wieder die Ströme. Der $1,5\text{ k}\Omega$ Widerstand ist nun überflüssig, da der Basisstrom durch das Lämpchen begrenzt wird. Beim Vergrößern des Basisstroms wird sich wie bisher der Kollektorstrom auch vergrößern. In der sogenannten KOLLEKTORSCHALTUNG besitzt der Transistor ebenfalls eine hohe Stromverstärkung. Anders ist es dagegen bei der Spannungsverstärkung: Beide Instrumente erhalten einen $100\text{ k}\Omega$ Vorwiderstand, da die Basisspannung jetzt bis zur Versorgungsspannung von 9 V erhöht werden kann. Der Ausgang der Transistorstufe

ist der Emitter. Wir starten wieder bei 0 V Basisspannung und erhöhen sie langsam durch Drehen des Einstellknopfes am Potentiometer. Da der Transistor zunächst sperrt, zeigt auch das rechte Instrument nichts an. Ab etwa $0,6$ bis $0,7\text{ V}$ Basisspannung folgt der Zeiger des rechten Instruments dem des linken mit genau dieser Differenz von $0,6\text{ V}$, wobei das Lämpchen immer stärker leuchtet. Da beide Instrumente immer ungefähr die gleiche Spannung anzeigen, ist die Spannungsverstärkung auch ungefähr 1 , wobei die Transistorstufe das Signal nicht umkehrt. Höhere Eingangsspannung führt zu höherer Ausgangsspannung; man sagt: Ein- und Ausgangssignal sind in Phase.

Die Kollektorschaltung besitzt eine hohe Stromverstärkung, ihre Spannungsverstärkung ist etwas kleiner als 1 ; sie dreht das Eingangssignal nicht um.

Wir werden bei den folgenden Experimenten sowohl die Emitter- als auch die Kollektorschaltung verwenden.





Experiment 35

Transistor als Verstärker

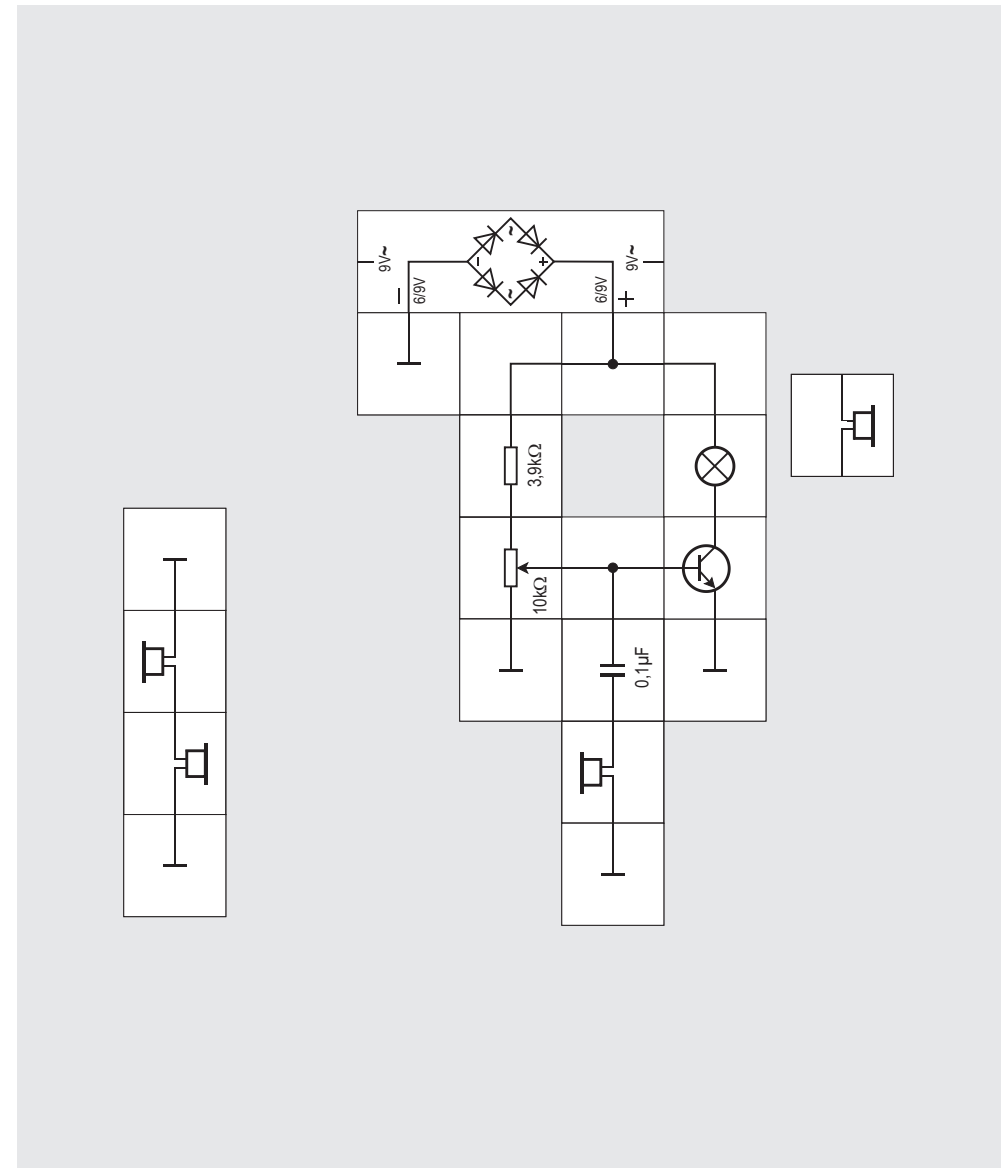
Wird der Transistor in einer Schaltung als Schalter eingesetzt, so arbeitet er im Sperrbereich (Schalter aus) und im Durchlassbereich (Schalter ein). Der Transistor sperrt stets, wenn Basis und Emitter auf demselben Potential liegen, also beispielsweise niederohmig miteinander verbunden sind. Soll er gut leiten, muss für ausreichend großen Basisstrom gesorgt werden, er arbeitet sonst in dem für den Schalterbetrieb zu meidenden Zwischenbereich und wird dabei nur unnötig warm, weil Verlustleistung in ihm entsteht. Es ist nun nicht so, dass er in diesem Bereich gar nicht arbeiten sollte. Wenn er Kleinsignale verstärken muss, liegt sein Arbeitspunkt hier und wir wollen im nächsten Experiment erfahren, wie wir das bewerkstelligen können.

Wir kennen bereits den Ohrhörer, was wir vielleicht aber noch nicht wissen, ist, dass wir ihn auch als Mikrofon benutzen können. Er wandelt dann Schallwellen in elektrische (Wechsel-) Signale um, die wir im zweiten Hörer wieder in akustische zurück verwandeln. Wenn wir den einen als Mikrofon benutzten Hörer lautstark beschallen, indem wir mit dem Fingernagel dagegen klopfen oder über die Öffnung pusten, so ist eine (allerdings sehr leise) Wiedergabe im anderen Hörer

vernehmbar. Mit Transistorverstärkung geht das viel besser.

Dazu bauen wir eine Verstärkerstufe zunächst mit einer Lampe als Last in Emitter-schaltung auf und stellen mit dem Potentiometer den Transistor in den Zwischenbereich: der Glühfaden sollte glimmen. Die Frage ist nun, wie wir das Mikrofon zwischen Basis und Emitter anschließen. Es hat durch die interne Spule ungefähr einen Widerstand von $500\ \Omega$, der den Arbeitspunkt beim direkten Anschließen total verstellen würde, so dass der Transistor im Sperrbereich wäre.

Wir erinnern uns nun, dass das Mikrofon nur Wechselspannungen abgibt und dass ein Kondensator Gleich- von Wechselspannungen trennt. Schalten wir also einen $0,1\ \mu\text{F}$ Kondensator dazwischen, werden wir sehen, wie das Lämpchen flackert, wenn wir auf das Mikrofon pusten. Tauschen wir zum Schluss noch das Lämpchen gegen den zweiten Hörer, können wir das Pust- oder Kratzgeräusch verstärkt hören. Eventuell muss das Potentiometer noch ein wenig verstellt werden, um den Arbeitspunkt zu optimieren. Die vom Mikrofon erzeugte winzige Wechselspannung wird vom Transistor so weit verstärkt, dass wir sie mit dem zweiten Hörer im Kollektorkreis gut hören können.



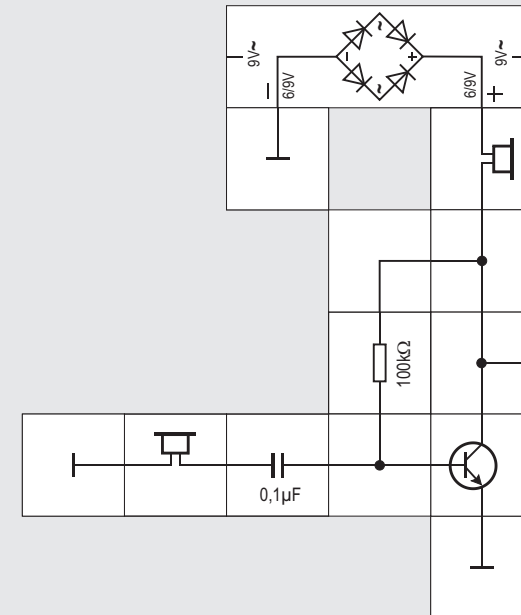


Experiment 36

Arbeitspunkteinstellung

Es gibt für die Arbeitspunkteinstellung noch eine elegantere Methode, und zwar die der GEGENKOPPLUNG. Dazu verbinden wir den Kollektor des Transistors mit seiner Basis über einen sehr hochohmigen Widerstand, z. B. 100 k Ω . Der Transistor erhält darüber etwas Basisstrom und wird ein wenig leitend, wodurch sich seine Kollektorspannung etwas verringert. Dies führt dazu, dass er weniger Ba-

sisstrom bekommt und seine Kollektorspannung wieder steigt. Es stellt sich folglich ein Gleichgewichtszustand so ein, dass der Transistor gerade immer im aktiven Bereich, in dem er gut verstärkt, arbeitet. Da ein Teil des verstärkten Ausgangssignals am Kollektor auf das zu verstärkende Eingangssignal an der Basis zurückgekoppelt wird und beide Signale zueinander gegenphasig sind, spricht man von Gegenkopplung. Die Gegenkopplung wird in der Praxis häufig angewandt, um eine Schaltung zu stabilisieren.



Experiment 37

Abschaltverzögerung

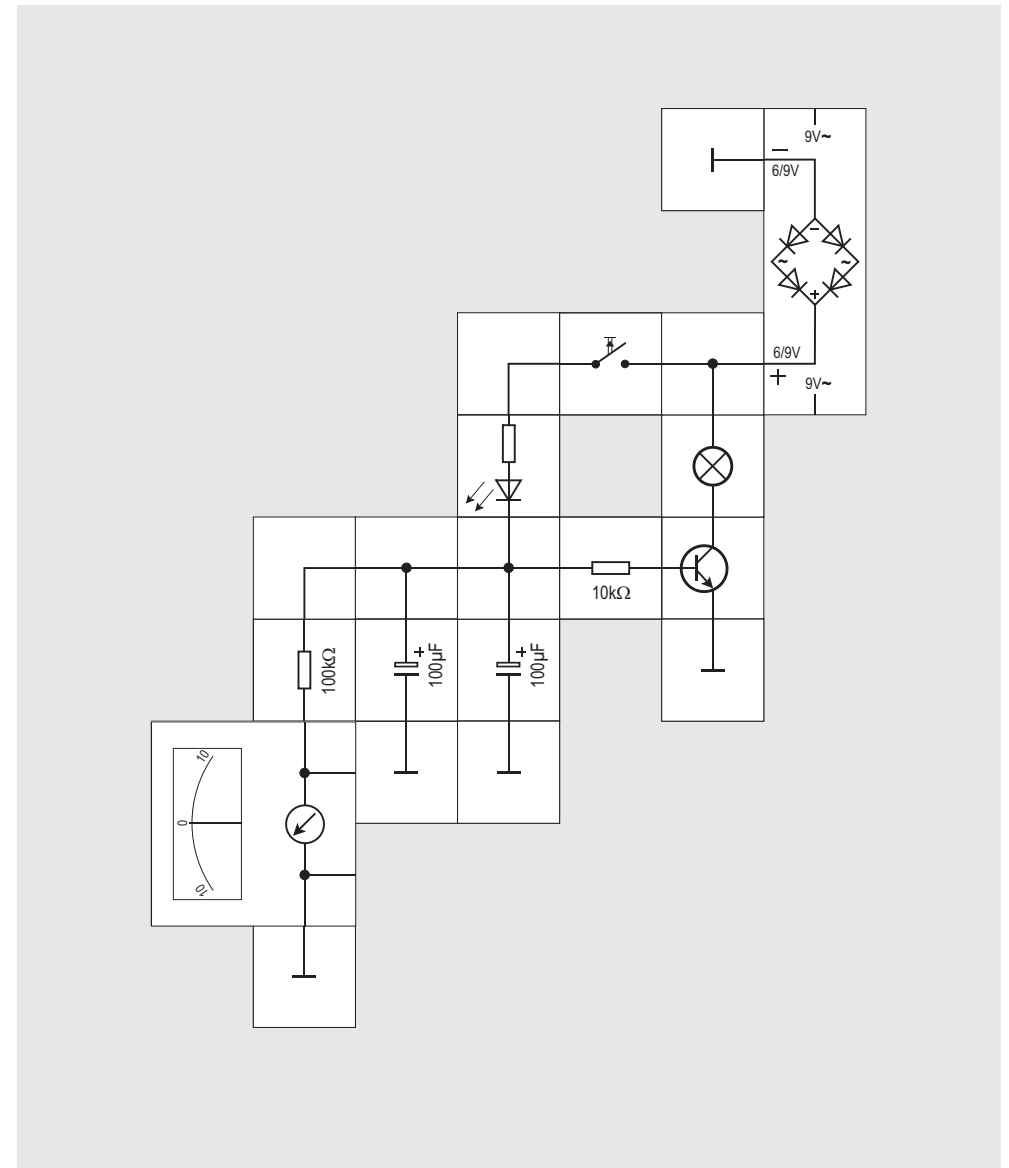
Mit Hilfe einer Transistorstufe wollen wir eine Schaltung aufbauen, die uns häufig im Alltag begegnet, die Abschaltverzögerung. Weit verbreitet ist sie z. B. bei der Kfz - Innenbeleuchtung. Schaltet man diese aus, indem man die Autotüren schließt, bleibt das Licht noch eine Weile an und geht dann selbsttätig aus. Die Verzögerung erreichen wir dadurch, dass wir zunächst einen Kondensator schnell laden und ihn dann langsam entladen. Mit dem schwachen Entladestrom als Basisstrom steuern wir einen Transistor an, dessen Kollektorstrom durch ein Lämpchen fließt und es leuchten lässt.

Den relativ großen Ladestrom machen wir ebenfalls sichtbar und zwar mit einer Leuchtdiode. Er fließt, wenn der Taster betätigt wird in die beiden Kondensatoren; gleichzeitig fließt Strom über den $10\text{ k}\Omega$ Widerstand in die Basis. Das Lämpchen im Kollektorkreis leuchtet. Das In-

strument zeigt uns die Kondensatorspannung an, sie geht bei gedrückter Taste auf ungefähr $7,5\text{ V}$.

Lassen wir die Taste los, kann kein Strom mehr durch die Leuchtdiode fließen, sie erlischt augenblicklich. Da die Kondensatoren geladen sind, fließt jetzt ein Entladestrom über den $10\text{ k}\Omega$ Widerstand in die Basis, wodurch der Transistor leitend bleibt und sein starker Kollektorstrom das Lämpchen weiter leuchten lässt. Am Instrument sehen wir, wie sich die Kondensatoren langsam entladen und dadurch ihre Spannung sinkt. Schließlich ist sie mit $0,7\text{ V}$ so klein, dass der Transistor nach Durchlaufen des Zwischenbereichs in den Sperrbereich gelangt. Das Lämpchen wird dabei dunkler und verlischt dann ganz.

Die Zeitverzögerung hängt von der Kapazität des verwendeten Kondensators (hier $C = 200\mu\text{F}$) und der Größe des Entladewiderstands ($R = 10\text{ k}\Omega$) ab. Die sogenannte ZEITKONSTANTE ist das Produkt aus R und C und ein Maß für die erreichbare Verzögerung.

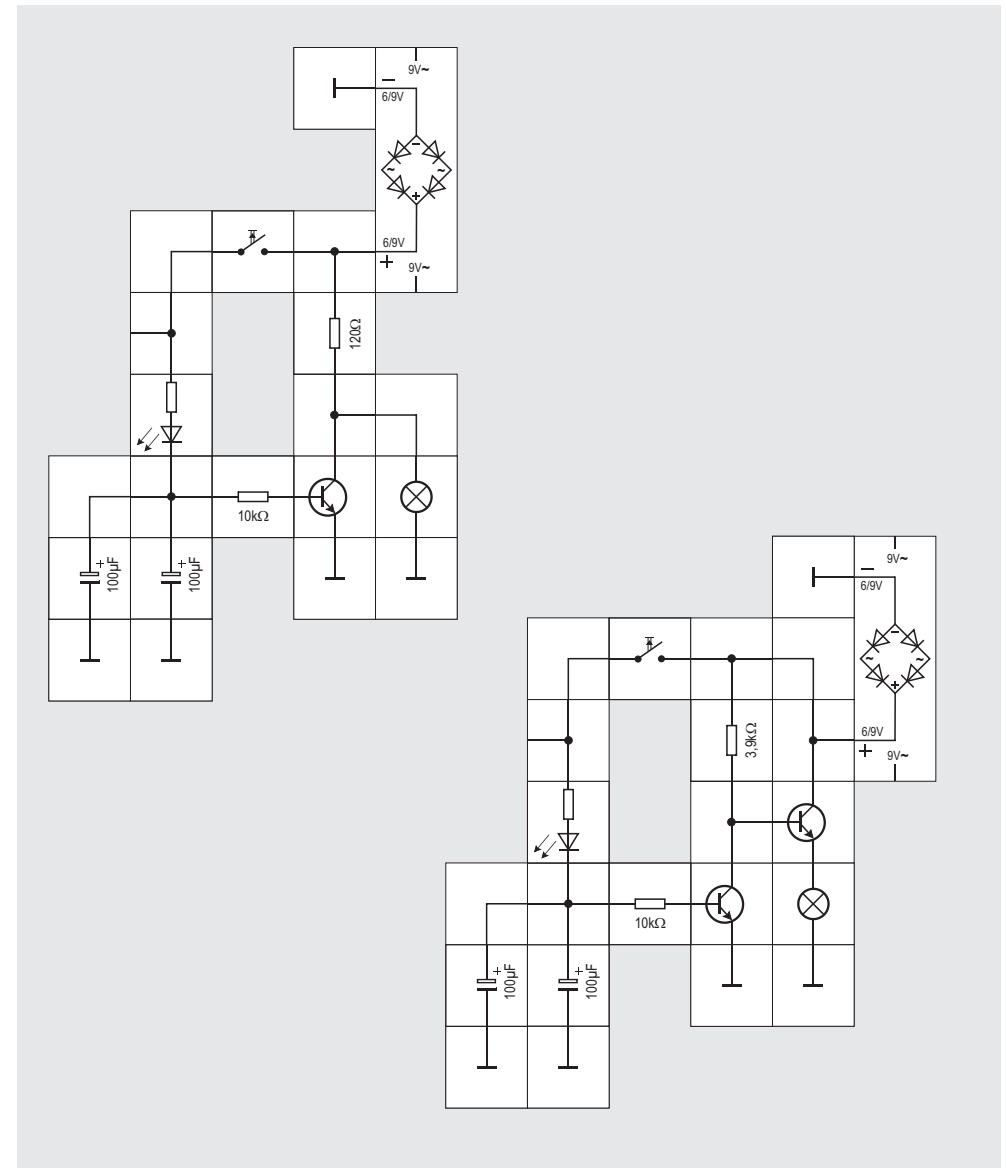


Experiment 38

Anschaltverzögerung

Das Gegenteil zur Abschaltverzögerung, nämlich die Anschaltverzögerung, bei der nach Tasterbetätigung scheinbar zunächst nichts passiert und erst nach einer gewissen Verzögerung beispielsweise ein Lämpchen leuchtet, erhalten wir ganz einfach aus dem vorherigen Versuchsaufbau: Wir erinnern uns daran, dass ein Transistor in Emitterschaltung das Eingangssignal Basisspannung spannungsmäßig invertiert am Kollektor wieder abgibt. So lange eine ausreichend hohe Basisspannung vorhanden ist, leitet der Transistor und seine Kollektorspannung ist nahezu Null. Erst wenn die Basisspannung bei entleerten Kondensatoren zu klein ist, sperrt der Transistor und seine Kollektorspannung erreicht Versorgungsspannungspotential. Schalten wir also vom Kollektor zur Masse das Lämpchen, tut es genau das, was wir erreichen wollen: Es geht verzögert an. Damit der Transistor im leitenden Zustand nicht durch zu hohen Kollektorstrom zerstört wird, müssen wir diesen mit einem Widerstand begrenzen. Dieser Widerstand darf allerdings nicht zu groß

sein, da im Sperrfall der Lämpchenstrom durch ihn fließt und das Lämpchen ja hell leuchten soll. $120\ \Omega$ sind eine gute Wahl für den Kollektorwiderstand. Das Instrument lassen wir jetzt weg. Betätigen wir den Taster, werden die Kondensatoren sehr schnell geladen und der Transistor ist gut leitend. Er überbrückt das Lämpchen, das deswegen dunkel bleibt. Erst wenn der Transistor nach der Verzögerungszeit aus den Kondensatoren nicht mehr genug Basisstrom bekommt, sperrt er langsam, wodurch das Lämpchen immer heller leuchtet. Nachteilig ist an der Schaltung, dass wenn der Transistor leitet wegen des relativ niederohmigen Kollektorwiderstands von $120\ \Omega$ viel Strom nutzlos durch den Transistor fließt. Durch einen weiteren Transistor in Kollektorschaltung können wir diesen Nachteil beheben. Der Kollektorwiderstand des ersten Transistors lässt mit $3,9\ \text{k}\Omega$ (oder noch größer) nur noch einen kleinen Querstrom fließen. Dieser Strom reicht bei gesperrtem ersten Transistor als Basisstrom für den zweiten jedoch aus, als verstärkter Kollektorstrom das Lämpchen leuchten zu lassen.



Experiment 39

Blinkschaltung

Kondensatorlade- und -entladeströme sind die Grundlage der im Alltag überall anzutreffender Blinkschaltungen. Solch eine Blinkschaltung wollen wir jetzt schrittweise aufbauen, damit wir ihre Funktion gut verstehen.

Wir beginnen mit einem Transistor in Emitterschaltung, der eine Lampe schalten soll; die Lampe als Last kommt in die Kollektorleitung. Über einen $100\text{ k}\Omega$ Widerstand erhält der Transistor etwas Basisstrom, so dass er im aktiven Bereich arbeitet und die Lampe ganz schwach glüht. In seine Basiszuleitung legen wir einen $10\mu\text{F}$ Kondensator, dessen Lade- und Entladeströme den Transistor ansteuern.

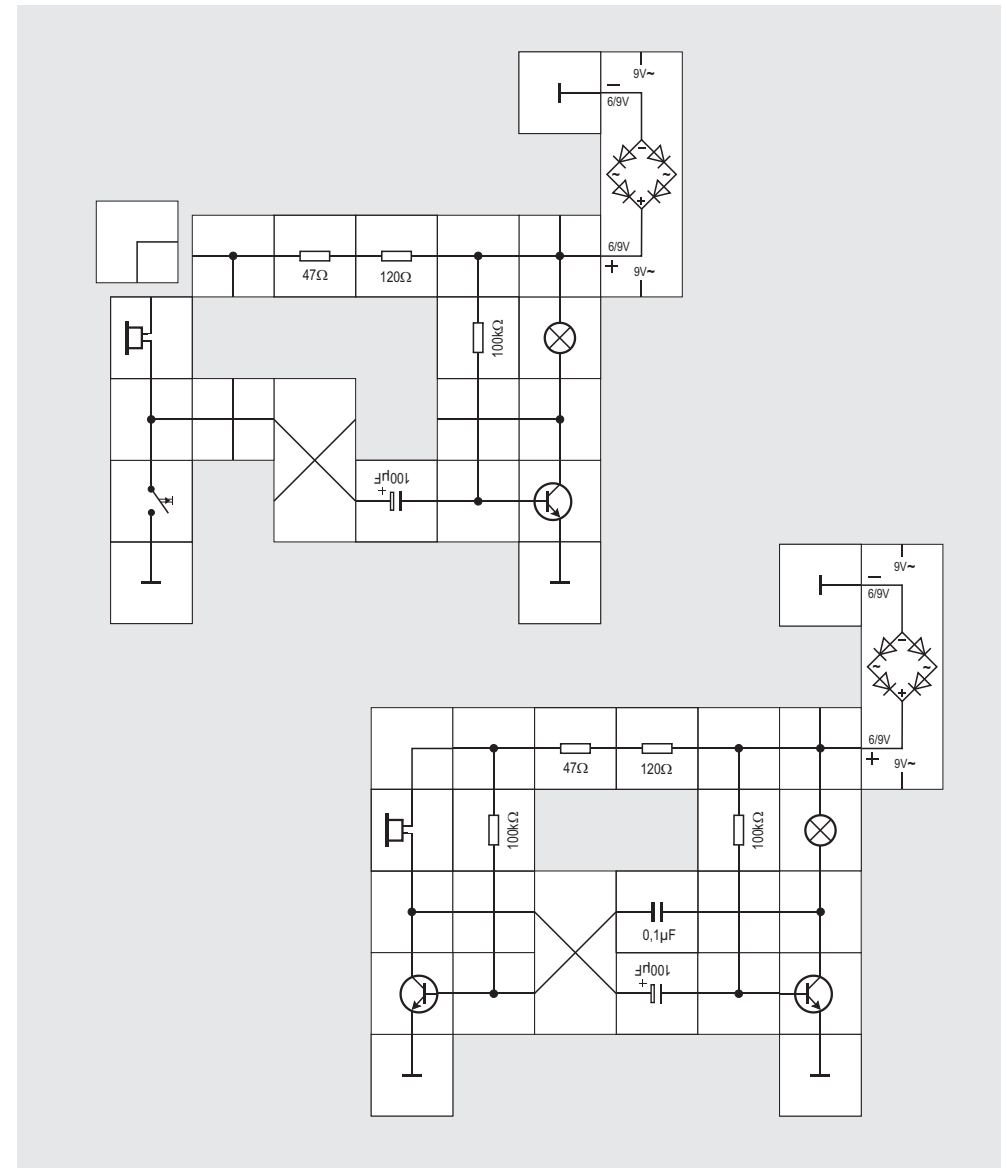
Damit der Kondensator geladen werden kann, muss er mit dem Pluspol der Batterie verbunden werden. Dies geschieht über zwei niederohmige Widerstände, die wir lediglich als Ersatz für zwei Verbindungsbausteine nehmen und einen Ohrhörer, der das An- und Abschalten für uns hörbar macht. Legen wir zum Schluss den Winkelbaustein in die so weit aufgebaute Schaltung, so knackt es im Hörer und die Kondensatorladung beginnt. Der Ladestrom steuert den Transistor in den gut leitenden Zustand und die Lampe leuchtet. Nach kurzer Zeit ist

der Kondensator auf Versorgungsspannung geladen, es fließt kein Strom mehr und die Lampe glüht nur noch schwach wie zu Anfang.

Damit wir den Vorgang wiederholen können und die Lampe ein weiteres Mal aufleuchtet, muss der Kondensator entladen werden. Das können wir durch eine kurze Betätigung des hinzu gefügten Tasters bewerkstelligen. Der Entladestrom des Kondensators fließt von seinem Pluspol nach Masse und von dort zum Minuspol der Batterie. Eine gleich große Ladung fließt vom Pluspol der Batterie über den $100\text{ k}\Omega$ Widerstand zur negativen Platte des Kondensators; für einen kurzen Augenblick erhält der Transistor also gar keinen Basisstrom und die Lampe verlöscht ganz. Nach Loslassen des Tasters leuchtet die Lampe wie zu Beginn des Versuchs wieder hell auf.

Automatisch blinkt sie allerdings noch nicht; dazu müssen wir den mechanischen Schalter durch einen elektronischen, nämlich durch einen weiteren Transistor, ersetzen. Wir wissen bereits, dass dieser »Schalter« nur kurz betätigt werden darf, wenn die Kondensatorladung beendet ist. Dieser Zeitpunkt ist gekommen, wenn der rechte Transistor sperrt und seine Kollektorspannung auf Batteriespannung steigt. Verbänden wir den Kollektor des rechten mit der Basis des linken Transistors, würde letzterer

Fortsetzung nächste Seite



Fortsetzung

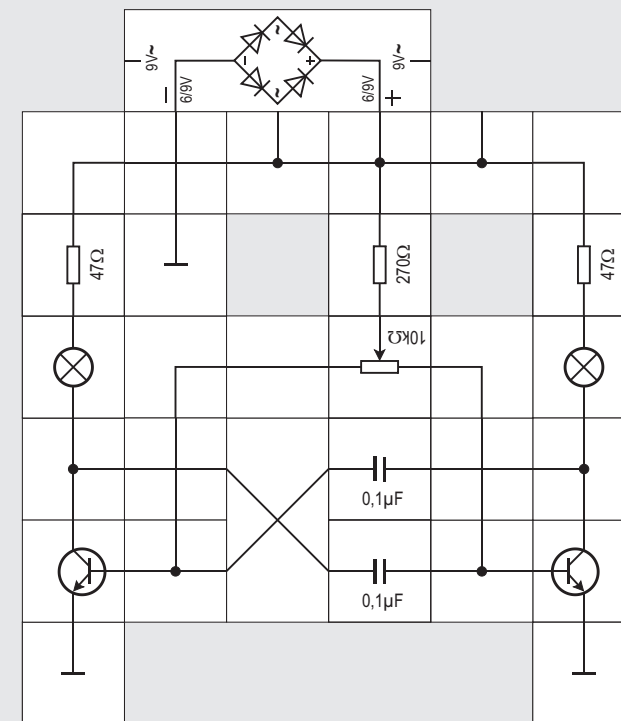
dauernd leiten und eine erneute Kondensatorladung käme nicht zustande. Wir dürfen ihn ja nur kurzzeitig, entsprechend einer kurzen Tasterbetätigung, in den leitenden Zustand bringen. Das können wir erreichen, wenn wir statt des Widerstandes einen weiteren Kondensator ($0,1\mu\text{F}$) einbauen und dessen Ladestrom zum Ansteuerung des linken Transistors verwenden. Solange dieser zweite Kondensator geladen wird, ist der linke Transistor leitend und entlädt den ersten Kondensator über seinen Kollektor und Emitter nach Masse, wie es zuvor der Taster tat.

Nach kurzer Zeit ist der $0,1\mu\text{F}$ Kondensator geladen, es fließt kein weiterer Ladestrom mehr, weswegen der linke Transistor sperrt. Nun kann sich der $10\mu\text{F}$ Kondensator wieder laden, der rechte Transistor leitet aufgrund des Ladestrom sehr gut und die Lampe leuchtet. Glücklicherweise kann sich dabei der $0,1\mu\text{F}$ Kondensator gleichzeitig entladen und damit ein neuer Zyklus beginnen. Als Ergebnis blinkt die Lampe automatisch und wir hören das Schalten des linken Transistors im Ohrhörer. Die An- und Abschaltzeiten sind durch die Größe der Kondensatoren und der Widerstände (Lampen und Hörerwiderstand, sowie $100\text{ k}\Omega$) festgelegt. Die Schaltung hat keinen stabilen Zustand, sondern kippt immer hin und her.

Experiment 40 Helligkeitseinstellung

Eine genaue Betrachtung der Blinkerschaltung zeigt, dass es sich um eine symmetrische Schaltung handelt, bei der die beiden Transistoren kapazitiv »über Kreuz« gekoppelt sind. Wir ändern sie nun so ab, dass die Symmetrie noch deutlicher wird, indem wir statt des Hörers eine zweite Lampe einsetzen. Durch Verwendung kleinerer Kapazitäten und Widerstände geschieht das An- und Abschalten der Lampen so schnell, dass unser Auge die Vorgänge nicht mehr auflösen kann und die Lampen scheinbar dauernd mehr oder weniger hell leuchten. Die Trägheit des Glühfadens verstärkt diesen Effekt noch. Wie hell sie sind, hängt ab vom Verhältnis der An- zur Abschaltzeit.

Verwenden wir statt der Festwiderstände ein Potentiometer, können wir die Helligkeit der Lampen einstellen. Durch Verstellen des Schleifers wird beim Vergrößern des einen Widerstands der andere automatisch um denselben Betrag kleiner und umgekehrt. Entsprechend ändert sich die Anhaltzeit und damit die Helligkeit einer Lampe »auf Kosten« der jeweils anderen Lampe. Wichtig ist der $270\ \Omega$ Widerstand in der Schleiferleitung; ohne ihn würden in den Endstellungen die Basisströme nicht begrenzt.



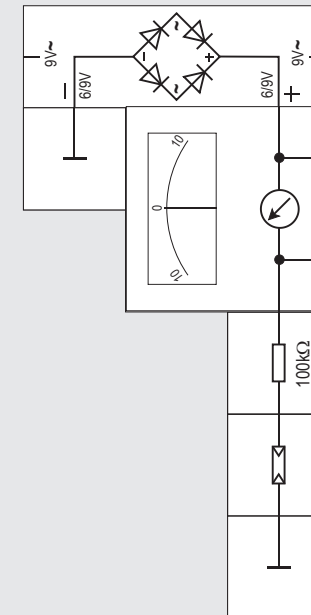


Experiment 42 Fotowiderstand

Wir wollen nun ein neues Bauelement kennen lernen, das statt in einem transparenten in einem schwarzen Kunststoffkästchen untergebracht ist, nämlich den FOTOWIDERSTAND. Dieses Bauelement hat die bemerkenswerte Eigenschaft, dass sein Widerstand beleuchtungsabhängig ist. Fällt durch die ovale Öffnung auf der Oberseite viel Licht auf ihn, so ist er gut leitend, sein Widerstand beträgt dann einige Kiloohm. Im Hand Schatten steigt er auf etwa $100\text{ k}\Omega$ und bei Dunkelheit auf $10\text{ M}\Omega$. Damit ihn nur das durch das Fenster einfallende Licht

beeinflussen kann und kein Fremdlicht, befindet er sich in dem erwähnten schwarzen Kästchen.

Seine Lichtabhängigkeit lässt sich leicht zeigen: Legen wir ihn in Reihe zu dem Messinstrument mit dem $100\text{ k}\Omega$ Widerstand an die Versorgungsspannung und beleuchten ihn stark, so wird das Instrument wie gewohnt die Spannung von 9 V anzeigen; die wenigen Kiloohm des Fotowiderstands sind im Vergleich zu dem $100\text{ k}\Omega$ Widerstand vernachlässigbar. Verdunkeln wir anschließend das Fenster, so steigt der Widerstand stark an. Bei guter Bedeckung ist er dann so groß, dass das Instrument kaum noch einen Ausschlag zeigt.





Experiment 43 Dämmerungsschalter

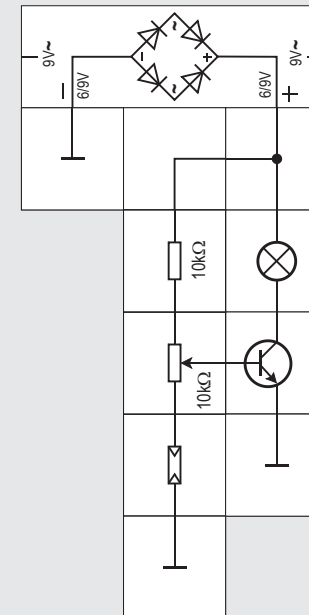
Hauptanwendungsgebiet des Fotowiderstandes war früher der Einsatz in Fotoapparaten zur Belichtungsmessung. Inzwischen ist er durch modernere Bauelemente, die schneller auf eine Belichtungsänderung reagieren, ersetzt worden.

Wir wollen nun eine Schaltung vorstellen, in der er immer noch vorkommt, einen Dämmerungsschalter. Dieser Schalter schaltet automatisch eine Lampe an, wenn es dunkler wird.

Als Schalter benutzen wir einen Transistor in Emitterschaltung, die Lampe ist folglich in der Kollektorleitung angeordnet. Mit dem Fotowiderstand und dem Potentiometer bauen wir einen Spannungsteiler auf, der durch einen $10\text{ k}\Omega$

Festwiderstand ergänzt wird. Dieser Widerstand ist wichtig, damit nicht in der oberen Schleiferstellung die volle Versorgungsspannung an der Basis - Emitter - Diode des Transistors liegt. Durch den dann fließenden sehr hohen Basissstrom würde der Transistor unweigerlich zerstört.

Wir stellen bei normaler Beleuchtung das Potentiometer so ein, dass der Transistor gerade noch sperrt, die Lampe also nicht leuchtet. Der Teilerpunkt, und damit das Basis - Emitter - Emitter - Potential wird dann ungefähr $0,5\text{ V}$ bis $0,6\text{ V}$ betragen. Verdunkeln wir dann das Fenster, wird der Fotowiderstand sehr viel hochohmiger und das Teilerpotential steigt an, worauf sich der Basisstrom des Transistors stark erhöht und der Transistor gut durchschaltet. Als Folge leuchtet die Lampe.



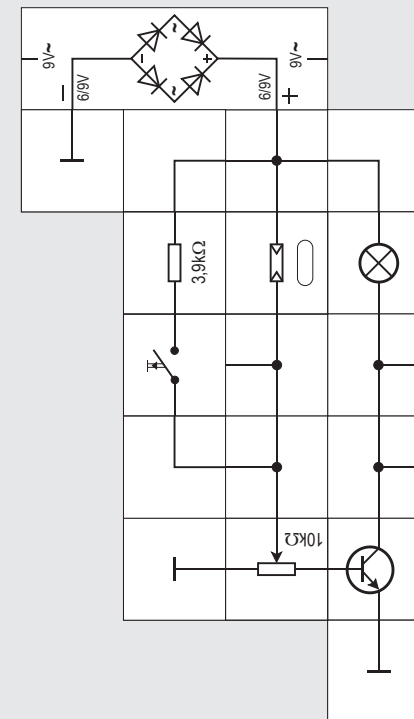


Experiment 44 Lichtschanke

Verlegen wir den Fotowiderstand in den oberen Teil des Spannungsteilers, so können wir erreichen, dass bei seiner Beleuchtung ein Basisstrom in den Transistor fließt, dieser durchschaltet und die Lampe leuchtet. Durch eine geeignete Anordnung von Fotowiderstand und Lampe fällt das Lampenlicht dann auf den Fotowiderstand und es ist durch diese OPTISCHE RÜCKKOPPLUNG gar kein Umgebungslicht mehr nötig, um die Lampe weiter brennen zu lassen. Der parallele Zweig mit dem $3,9\text{ k}\Omega$ Widerstand und dem Taster dient zum erstmaligen Anschalten der Lampe.

Die Schaltung lässt sich als Lichtschan-

ke einsetzen, wenn das Potentiometer so eingestellt ist, dass das Umgebungslicht nicht ausreicht, den Transistor durchzuschalten. Nach kurzer Tasterbetätigung beleuchtet dann die Lampe den Fotowiderstand und der Transistor erhält genügend Basisstrom, um weiterhin gut zu leiten. Durch SELBSTHALTUNG verbleibt die Schaltung in diesem Zustand. Erst wenn der Lichtstrahl unterbrochen wird, verlischt die Lampe und kann nur mit erneuter Tasterbetätigung wieder zum Leuchten gebracht werden. Die Schaltung findet z. B. Anwendung bei Stanzen und Pressen, die sofort abgeschaltet werden, wenn der Bediener mit seinen Händen zum unpassenden Zeitpunkt im Gefahrenbereich hantieren will.



Experiment 45 Blinkschaltung

Die Lichtschranken - Schaltung lässt sich durch Hinzunahme eines Kondensators zu einer Schaltung weiter entwickeln, die ein interessantes Verhalten zeigt. Wir brauchen dazu wieder den Transistor in Emitterschaltung, die Lampe als Last liegt im Kollektorkreis. Über die beiden $10\text{ k}\Omega$ + $3,9\text{ k}\Omega$ Widerstände erhält der Transistor bereits so viel Basisstrom, dass die Lampe mäßig hell leuchtet. Der Teilerpunkt des Spannungsteilers, gebildet aus dem Fotowiderstand und dem $4,7\text{ k}\Omega$ Widerstand nimmt je nach Beleuchtung einen bestimmten Potentialwert an.

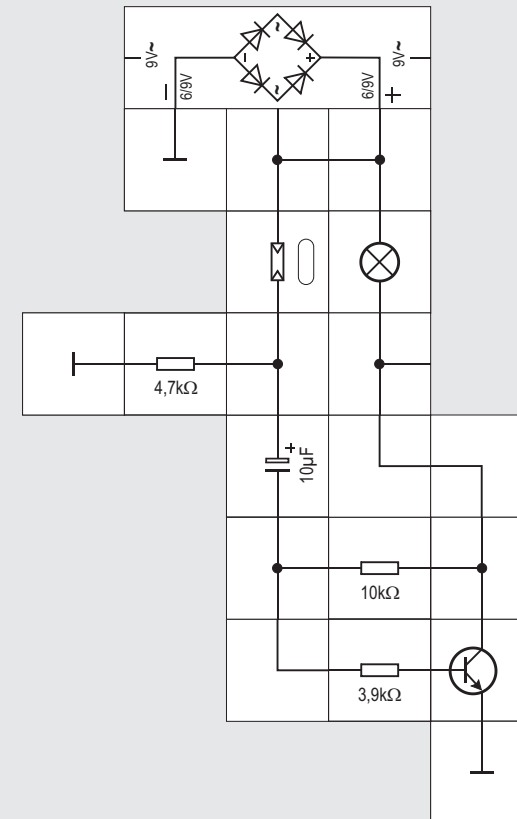
Verbinden wir ihn über den leeren $10\mu\text{F}$ Kondensator mit dem Basiswiderstand, so lädt sich der Kondensator auf. Der zusätzliche Ladestrom addiert sich zum Basisstrom und steuert den Transistor noch besser durch, als Folge davon leuchtet die Lampe etwas heller, so lange der Kondensator geladen wird.

Verdunkeln wir anschließend den Fotowiderstand, so verschiebt sich das Potential des Teilerpunkts zu einem kleineren Wert und der Kondensator muss sich teilweise entladen. Der Entladestrom subtrahiert sich vom Basisstrom; der Transistor leitet nicht mehr so gut und die Lampe leuchtet für die Dauer dieses

Vorgangs etwas dunkler. Beide Vorgänge lassen sich durch Beleuchten und Abdecken des Fensters vom Fotowiderstand beliebig wiederholen.

Wenn wir nun durch ein Blatt weißes Papier, das waagrecht über das Fenster vom Fotowiderstand und die Lampe gehalten wird, das Lampenlicht durch Reflexion auf den Fotowiderstand rückkoppeln, fängt die Lampe an zu blinken; die Schaltung ist instabil geworden.

Jede noch so kleine potentialmäßige Erhöhung des Teilerpunkts führt zu einer Kondensatorladung und damit zum Hellerwerden der Lampe, was optisch rückgekoppelt den Effekt verstärkt. Mehr als sehr gut durchschalten kann der Transistor jedoch nicht, so dass die Kondensatorladung zum Stillstand kommt, wodurch die Lampe wieder etwas dunkler wird. Dies wirkt sich auf den Teilerpunkt in einer Weise aus, dass der Kondensator sich etwas entlädt und die Lampe als Folge wieder weniger hell brennt. Der Vorgang beschleunigt sich durch die Rückkopplung und kommt erst zum Stehen, wenn der Transistor sperrt und der Kondensator seinen neuen Ladezustand angenommen hat. Anschließend fängt die Lampe wegen Basisstroms durch die beiden Widerstände wieder an, mäßig hell zu brennen und der Vorgang beginnt von vorn.





Experiment 46

Steuerung des pnp Transistors

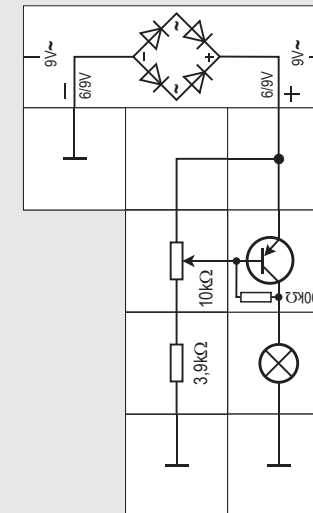
Wir kennen bisher einen Transistor, bei dem die Basis - Emitter - und die Basis - Kollektor - Diode mit ihren Anoden (an der Basis) verbunden sind. Der Fachausdruck hierfür ist NPN TRANSISTOR (Experiment 30). Man kann die beiden Dioden auch mit ihren Katoden verbinden und erhält dann einen PNP TRANSISTOR. Sein Schaltbild unterscheidet sich von dem des ersteren dadurch, dass der Emitterpfeil zur Basis hin zeigt. Basisstrom und Kollektorstrom fließen also aus dem Transistor heraus, woraus folgt, dass der Emitter dieses Transistors auf höherem Potential liegen muss.

In unserem Baukasten gibt es einen solchen Transistorbaustein, der außer dem eigentlichen Transistor einen $100\text{ k}\Omega$ Widerstand zwischen Basis und Kollektor enthält. Wie wir bereits wissen, dient dieser Widerstand dazu, dass der Transistor ohne weitere Beschaltung in einen Bereich gesteuert wird, in dem er schon ein

wenig leitet. Wir sparen dadurch zwei T-Stücke und einen externen Widerstandsbaustein.

Trotz des intern bereits vorhandenen $100\text{ k}\Omega$ Widerstands lässt sich der pnp Transistor auch richtig sperren: Wir müssen nur seine Basis mit dem Emitter verbinden (obere Endstellung des Potentiometers), dann fließt kein Basisstrom und damit auch kein Kollektorstrom mehr, das Lämpchen verlischt. Auf diese Weise lässt sich ein Transistor, ganz gleich ob pnp oder npn, grundsätzlich sperren.

Sorgen wir bei geeigneter Einstellung des $10\text{ k}\Omega$ Potentiometers dafür, dass ein größerer Basisstrom fließen kann, wird die Emitter - Kollektor - Strecke des Transistors gut leitend und das Lämpchen leuchtet hell auf. Der $3,9\text{ k}\Omega$ Widerstand ist wieder nötig, damit bei der unteren Endstellung des Schleifers nicht die volle Versorgungsspannung an der Basis - Emitter - Diode anliegt, was unweigerlich zur Zerstörung des Transistors führen würde.



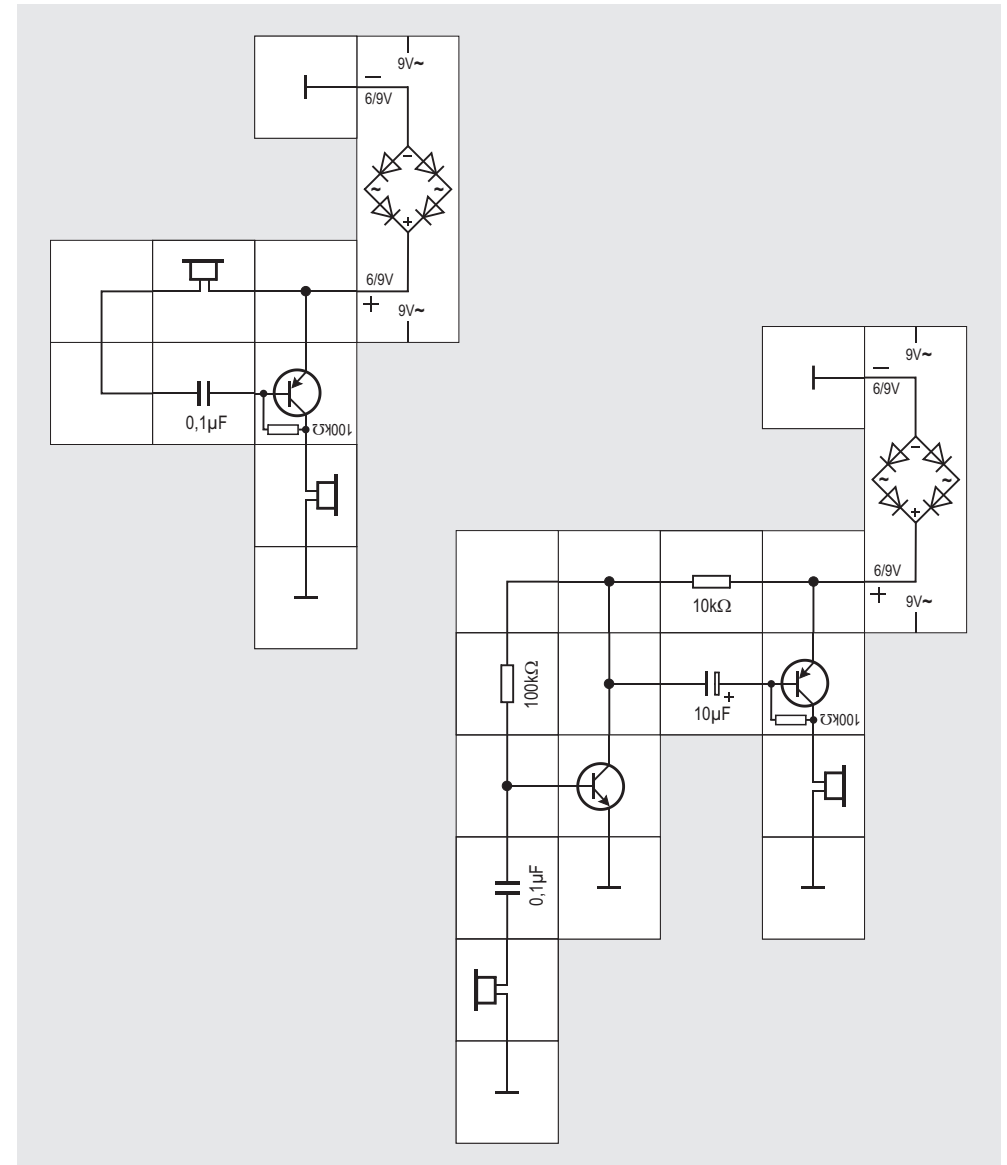


Experiment 47 Zweistufiger Mikrofonverstärker

Den Verstärker aus Experiment 36 können wir mit dem pnp Transistorbaustein einfacher aufbauen, da er bereits den $100\text{ k}\Omega$ Widerstand enthält.

Sollte uns die Verstärkung einer Transistorstufe nicht ausreichen, so können wir diese Stufe mit einer weiteren (mit npn

Transistor) kombinieren. Da wir wiederum nur Wechselspannungen verstärken wollen, koppeln wir sie vom Kollektor der ersten Stufe über einen Kondensator auf die Basis der zweiten Stufe. Die Gesamtverstärkung dieses zweistufigen Verstärkers ist gleich dem Produkt der beiden Einzelverstärkungen und damit bereits sehr hoch.



Experiment 48
Rückkopplungsarten beim Verstärker

Wegen der hohen Verstärkung kann es sehr leicht zu einer Erscheinung kommen, die uns von Veranstaltungen, bei denen mit Verstärkern gearbeitet wird, vertraut sind: Aus den Lautsprechern ertönt statt einer Rede oder eines Musikstücks ein schrilles Pfeifen. Es liegt dann eine **AKUSTISCHE RÜCKKOPPLUNG** vor, die dadurch entsteht, dass das Mikrofon dem Lautsprecher zu nahe gekommen ist.

Wir können den Effekt mit unserem Mikrofonverstärker ebenfalls hervorrufen: Halten wir Mikrofon und Lautsprecher mit den Öffnungen gegeneinander, so ertönt das Rückkopplungspfeifen. Sollte das Pfeifen nicht einsetzen, muss der Mikrofonbaustein um 180° gedreht werden.

Ein leiser Ton wird vom Lautsprecher abgestrahlt, vom Mikrofon aufgenommen, vom Verstärker verstärkt, vom Lautsprecher abgegeben, vom Mikrofon wiederum aufgenommen, vom Verstärker verstärkt, vom Lautsprecher abgegeben, ... So wiederholt sich der Vorgang, und schaukelt sich weiter auf, bis durch Begrenzungen im Verstärker eine weitere Steigerung nicht mehr möglich ist. Weil Schallwellen die Brücke zwischen Mikrofon und Lautsprecher bilden,

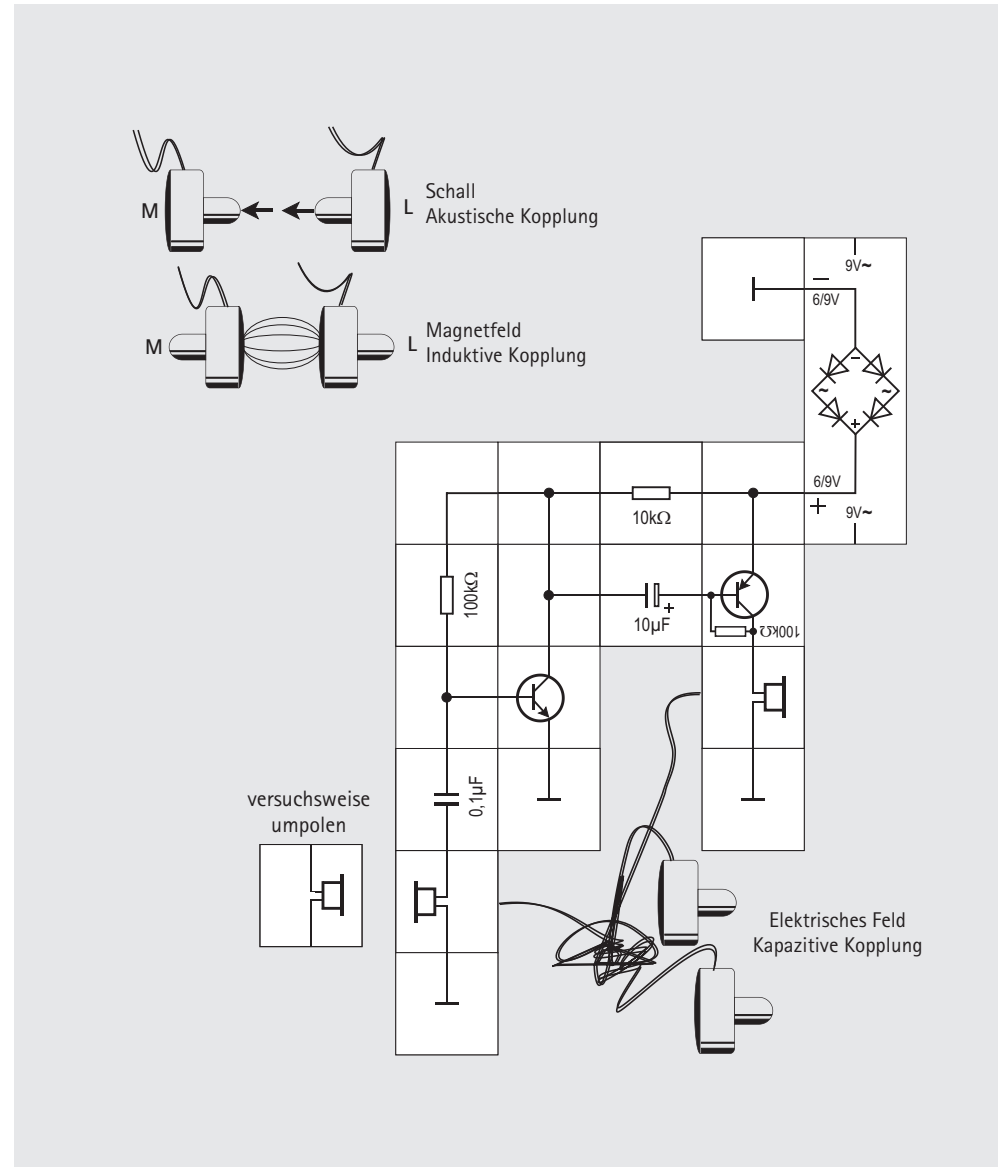
heißt die Erscheinung **AKUSTISCHE RÜCKKOPPLUNG**. Hält man zwischen die akustisch gekoppelten Ohrhörer ein Stück Papier, so setzt der Pfeifton aus; Papier hemmt den Schall. Will man eine akustische Kopplung über eine größere Entfernung erreichen, muss man zwischen die Höreröffnungen einen Strohhalm halten.

Halten wir beide Ohrhörer mit dem Rücken gegeneinander und gleichzeitig ihre Öffnungen zu, so ertönt ebenfalls ein Rückkopplungspfeifen. Die Brücke zwischen Mikrofon und Lautsprecher wird diesmal durch ein Magnetfeld hergestellt, das sich zwischen den Spulen der Ohrhörer aufbaut. Die Kopplung durch ein Magnetfeld nennt man **INDUKTIVE RÜCKKOPPLUNG**. Sollte sie nicht einsetzen, muss versuchsweise ein Hörer umgepolt werden, da es auf die Phasenlage des Feldes ankommt. Diese Art der Kopplung kann nicht durch Papier unterbunden werden. Halten wir dagegen zwischen die induktiv gekoppelten Ohrhörer die eisenhaltige Zusatzplatte, so setzt das Pfeifen aus oder wird schwächer, weil Eisen Magnetfelder beeinflusst.

Bei der akustischen Rückkopplung war es von Bedeutung, dass der Mikrofonhörer richtig gepolt war; bei der induktiven Rückkopplung ebenfalls.

Verknäulen wir die Schnüre von Mikro-

Fortsetzung nächste Seite





fortsetzen und Lautsprecher und drücken das Schnurknäuel fest mit der Hand zusammen, so ertönt wiederum ein Pfeifton.

Dieser Pfeifton ist unabhängig davon, welche Lage die Hörer zueinander haben oder wie sie gepolt sind. Als Brücke zwischen Mikrophon und Lautsprecher tritt jetzt ein elektrisches Feld auf, die Schnüre stellen verkümmerte Kondensatorplatten dar.

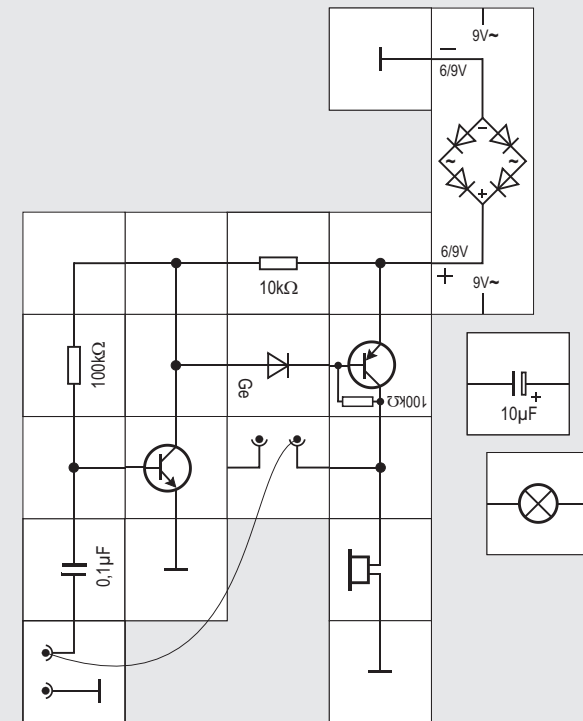
Zur Kontrolle können wir die Schnüre auch um den Finger wickeln; entweder eine links herum, die andere rechts herum, oder beide gleichsinnig. Die KAPAZITIVE RÜCKKOPPLUNG ist vom Windungssinn der Schnüre unabhängig.

Wichtig ist nur, dass der Abstand der Schnüre, der «Kondensatorplatten» also, hinreichend klein ist. Diese kapazitive Kopplung trat wahrscheinlich bereits im vorherigen Versuch auf und kann durch die Maßnahme, längere Teile der Verbindungskabel dicht auf der Aufbauplatte liegen zu lassen, unterbunden werden. Die Kapazität der einzelnen Kabel zur Masse ist dann weitaus größer als untereinander und die Kopplung vom Lautsprecher zum Mikrophon dadurch viel geringer.

Experiment 49 Rückkopplungsgenerator

Wenngleich man manchmal umfangreiche Vorkehrungen in Schaltungen treffen muss, um unerwünschte kapazitive Kopplungen in elektronischen Schaltungen unwirksam zu machen, so gibt es auch Anwendungsfälle, in denen sie erwünscht sind. Unser Experiment zeigt eine solche Schaltung, die einen Pfeifton erzeugen soll, nämlich einen Rückkopplungsgenerator.

Wir verwenden dazu den aufgebauten zweistufigen Verstärker und koppeln mit dem $0,1\mu\text{F}$ Kondensator vom Kollektor des zweiten Transistors auf die Basis des ersten. Die (kapazitive) Kopplung des ersten Transistors an den zweiten geschieht mit der Germaniumdiode; in Sperrrichtung betrieben ist sie ein Kondensator kleiner Kapazität. Versuchsweise können wir die Stufen auch direkt über die Glühlampe oder aber den $10\mu\text{F}$ Kondensator koppeln, wobei bei letzterem die Polarität beachtet werden muss. Wir erhalten dann keinen Pfeifton mehr, sondern Töne sehr viel tieferer Frequenz, die mehr einem Brummen bis Knurren

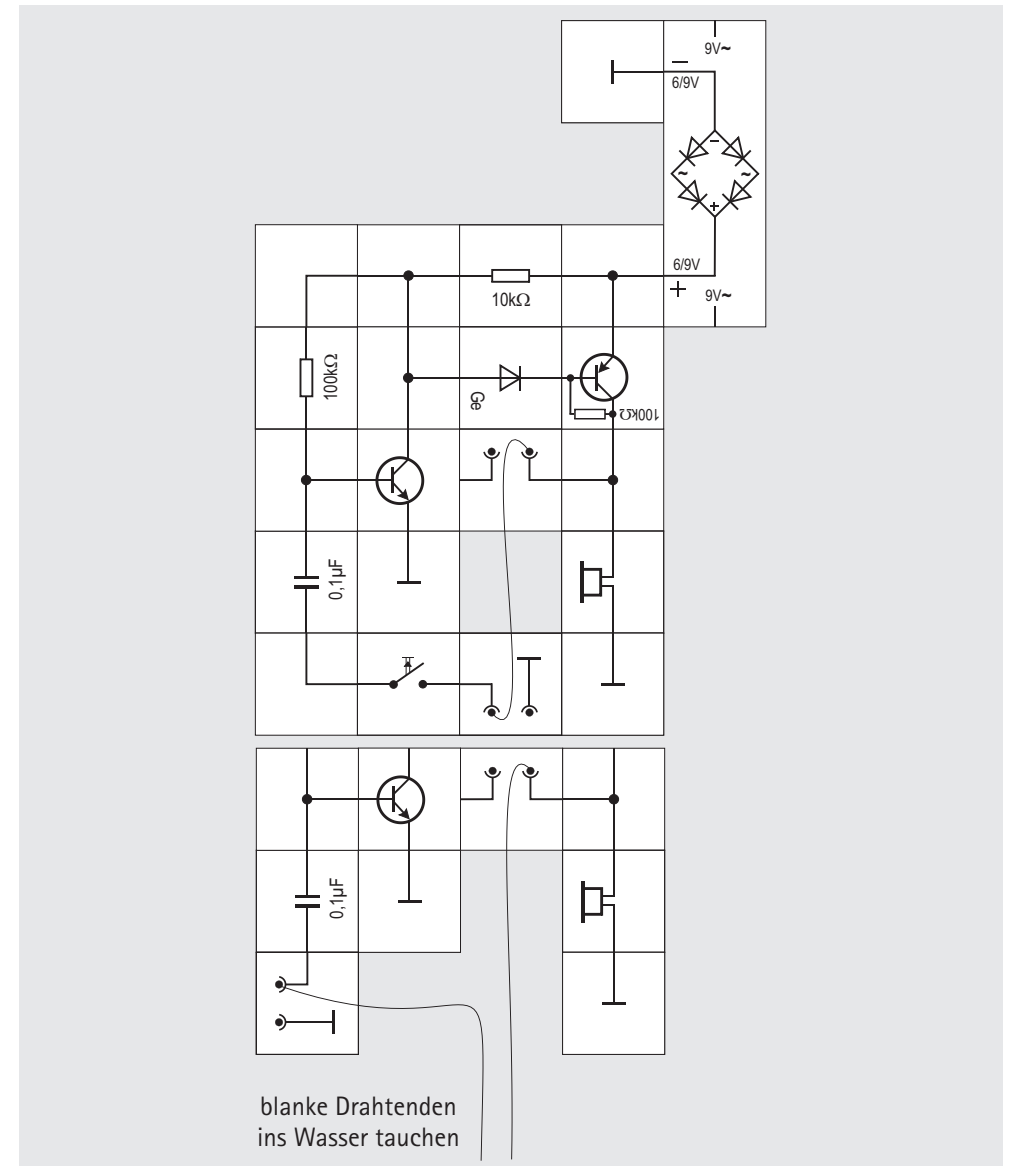




Experiment 50 Anwendungen des Rückkopplungs- generators

Eine elegante Nutzenanwendung unseres Schaltungsaufbaues finden wir nach einer kleinen Abänderung. Wir setzen in Reihe zu dem Kondensator den Schalterbaustein und können so die Rückkopplung unterbrechen und damit den Pfeifton abstellen. Seine Tonhöhe beträgt circa 1000 Hz (Hertz = Schwingungen pro Sekunde) und wird für die Tontelegraphie bevorzugt, da unser Gehör für diese Tonhöhe am empfindlichsten ist. Wir haben uns einen Tongeber aufgebaut, mit dem wir das Morsen zu üben können.

Die Schaltung lässt sich auch gut zur FÜLLSTANDÜBERWACHUNG von leitenden Flüssigkeiten verwenden. Wir entfernen den Schalterbaustein, füllen ein kleines Glas mit Wasser und hängen zwei abisolierte Drähte als Elektroden in die Flüssigkeit; sie dürfen sich nicht berühren. Unser Tongenerator gibt so lange den Pfeifton ab, wie das Wasser die erforderliche leitende Verbindung herstellt; er verstummt augenblicklich, wenn wir die Drahtenden aus dem Wasser ziehen oder der Pegel so weit sinkt, dass die Verbindung unterbrochen wird.





Experiment 51

Magnetstreifenleser

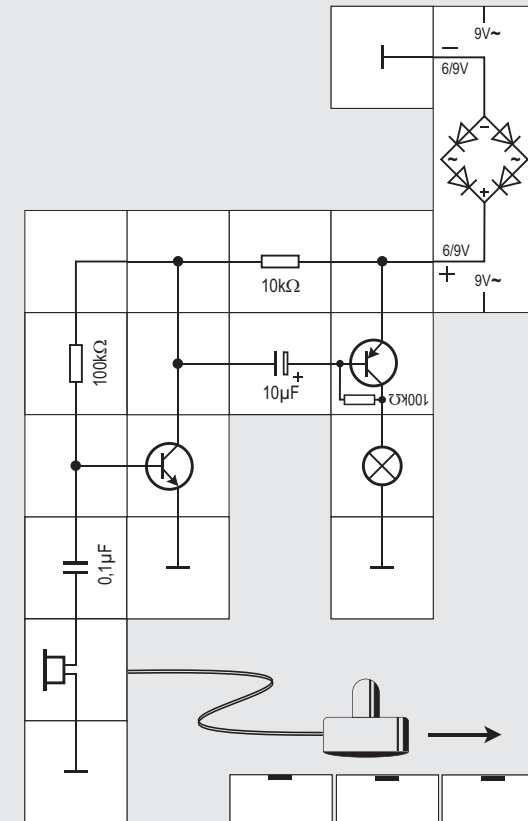
Wir entfernen in unserem Verstärker aus zwei Transistoren die Rückkopplung und ersetzen den »Lautsprecher« durch die Glühlampe oder die Leuchtdiode.

Im Experiment 48 (induktive Kopplung der Ohrhörer) haben wir gesehen, dass die Spule im Ohrhörer auf wechselnde Magnetfelder reagiert. Genauso arbeitet der Wiedergabe - Tonkopf eines Tonband- oder Kassettengerätes. Auch die Kredit- oder Geldkarten, die auf ihrer Rückseite ein Stück Magnetstreifen aufgedruckt haben, werden nach diesem Prinzip ausgelesen. Legen wir nämlich mehrere Bausteine, etwa die Diode und die beiden Steckbausteine, mit dem

Schaltbild nach unten auf den Tisch und führen den Ohrhörer mit dem Rücken nach unten sehr schnell über die Bodenmagnete der Bausteinkette, so flackert die Glühlampe.

Die Magnetkette ist das Modell eines Stückchens Tonband oder des Magnetstreifens. Auf ihm finden wir Stellen stärkerer und Stellen schwächerer Magnetisierung. Im Tonkopf werden die Schwankungen des Magnetfeldes zu Stromschwankungen umgewandelt. In unserem Versuch erkennen wir den schwankenden Strom am Flackern des Lampenlichtes.

Wer die Stromschwankungen hören will, muss die Glühlampe gegen den zweiten Ohrhörer austauschen.



Experiment 52

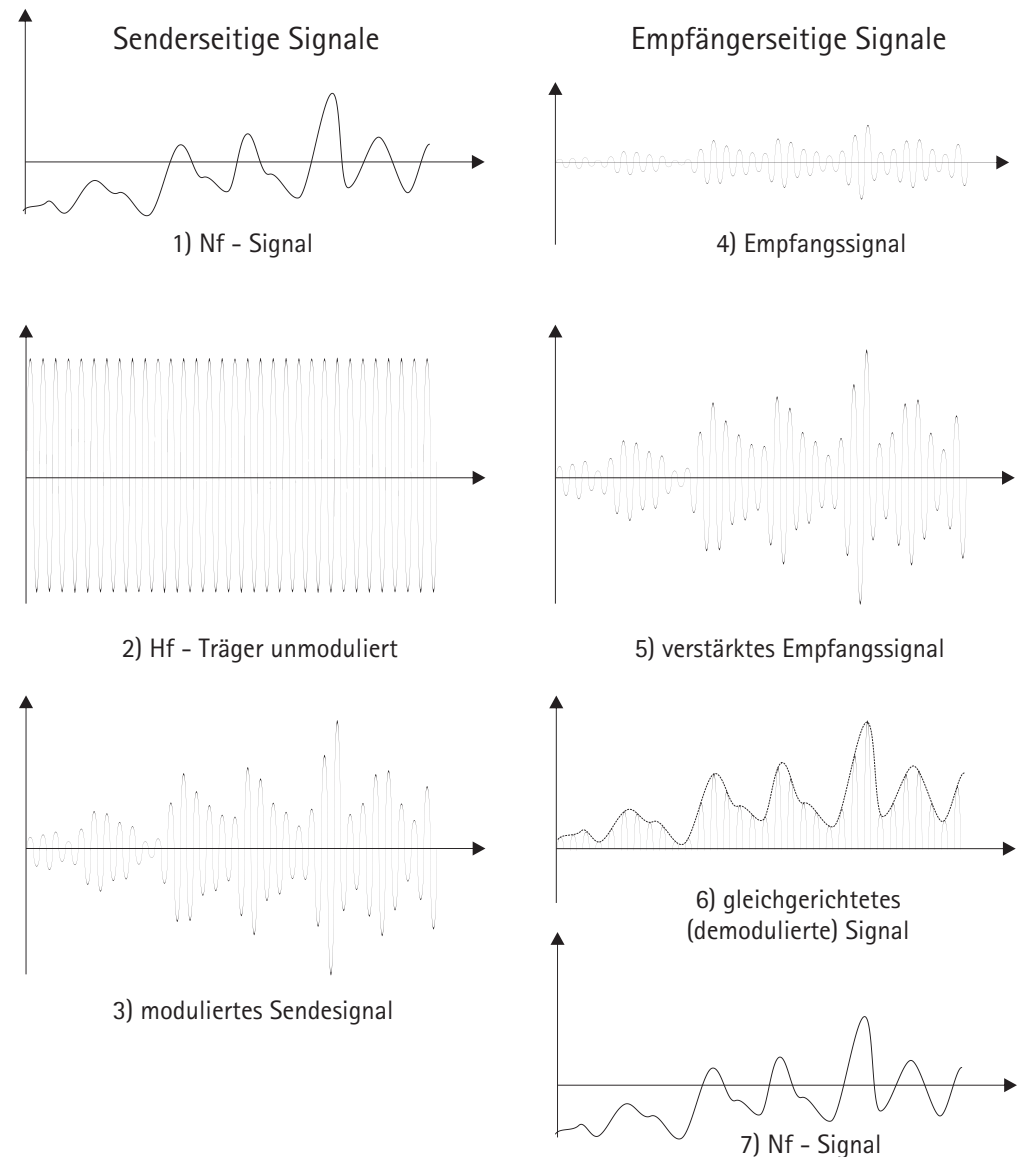
Schwingungen und Modulation

In vorangegangenen Experimenten bauten wir Mikrofonverstärker auf, mit deren Hilfe wir in der Lage waren, akustische Schwingungen (Schall, Sprache, Musik) in elektrische Signale umzusetzen und zu verstärken. Diese Signale (1) haben Frequenzen im sogenannten Tonfrequenzbereich, er erstreckt sich von 20 Hz bis 20 kHz. Selbst bei äußerst starker Verstärkung würde eine Sendeantenne diese Frequenzen im Niederfrequenzbereich (Nf) kaum abstrahlen, ein drahtloser Rundfunkempfang wäre nicht möglich. Anders sieht es dagegen mit Frequenzen im Hochfrequenzbereich (Hf) aus. Wenn wir uns die Skala eines Rundfunkgerätes betrachten, werden wir beispielsweise für den »Mittelwellenbereich« Frequenzangaben von 550 kHz bis 1500 kHz entdecken (2). Dass wir diese Frequenzen als Ton nicht mehr wahrnehmen können, dürfte verständlich sein. Aber doch empfangen wir Sender auf einer dieser Frequenzen.

Man benutzt diesen Frequenzbereich, weil die Ausbreitungsbedingungen einer elektromagnetischen Welle mit solch hoher Frequenz im freien Raum sehr

günstig sind und arbeitet dabei mit einem Trick: Die Hochfrequenz wird mit der Niederfrequenz MODULIERT, indem man deren AMPLITUDE (Höhe) im Takte der Niederfrequenz schwanken lässt (3). Wie das technisch gemacht wird, würde den Rahmen dieses Experimentierkastens sprengen und soll deswegen nicht beschrieben werden. In der Fachsprache ist die Hochfrequenz der TRÄGER, man spricht von einer TRÄGERFREQUENZ und einer AMPLITUDENMODULATION. Modulierte hochfrequente Schwingungen werden also von der Sendeantenne abgestrahlt, breiten sich durch den freien Raum aus und bringen so das modulierte Signal an unsere Empfangsantenne. Dieses im allgemeinen äußerst schwache Signal (4) ist in der Lage, winzige Spannungen in der Empfangsantenne zu erzeugen, die wir »weiter verarbeiten« müssen, um die aufmodulierte Niederfrequenz wieder zu gewinnen und in für uns hörbare akustische Schwingungen umzusetzen (5 bis 7).

In den Abbildungen sind die einzelnen Stationen der Signalverarbeitung gezeigt. Die Weiterverarbeitung im Empfänger wollen wir im nächsten Experiment durchführen.



Experiment 53

Detektor

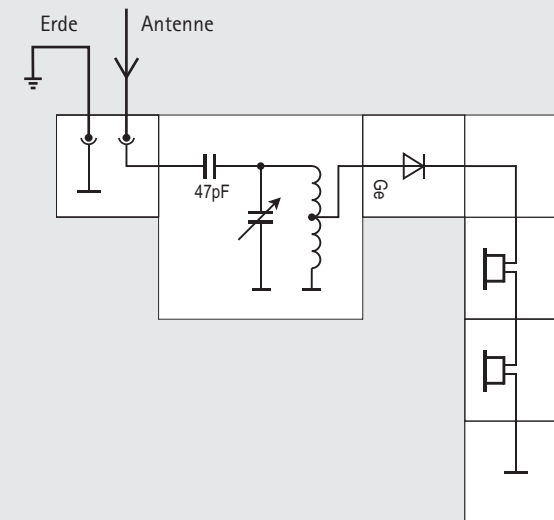
Wenn wir uns in einer einigermaßen günstigen Lage zu einem Mittelwellensender befinden, so haben wir zu jeder Tageszeit mit Hilfe einer Hochantenne (langer außerhalb des Gebäudes isoliert befestigter Draht) einen ausreichenden Empfang, es trifft noch genügend Energie vom Sender auf unsere Empfangsantenne und regt sie zum Mitschwingen an. Abends nach Sonnenuntergang ist der Empfang generell besser, da sich dann im Mittelwellenbereich die Ausbreitungsbedingungen verbessern.

Wir wollen zunächst – wie in der Frühzeit der Rundfunktechnik üblich – mit einem sogenannten DETEKTOR versuchen, ohne Batterie und damit ohne weitere Verstärkung (5) das Empfangssignal (4) zu demodulieren. Um aus dem Empfangssignal das aufmodulierte Nutzsignal zu erhalten, müssen wir die eine Hälfte «abschneiden», es also gleichrichten. Die Ohrhörermembran kann ohnehin nicht der Hochfrequenz folgen, aber auch nicht das sie umhüllende Nutzsignal wiedergeben, da es stets sowohl im positiven wie im negativen Spannungsbereich vorkommt und das resultierende Signal stets gleich Null ist. Das Gleichrichten geschieht mit der Germanium-

diode. In der Pionierzeit des Rundfunks wurde ein Bleiglanzkrystall (Bleisulfid), auf dem mit einer Drahtspitze zunächst eine zum Gleichrichten geeignete Stelle detektiert (gefunden) werden musste, verwendet; daher stammt auch der Name für diese einfache Empfangseinrichtung.

Wir bauen unsere Schaltung auf und schließen die Antenne an. Von ihr gelangen Wechselspannungen verschieden hoher (Träger-) Frequenzen an den Abstimmbaustein. Drehen wir am Abstimmkondensator, so finden wir eine Stellung in diesem »Eingangskreis«, in der wir einen bestimmten Sender am lautstärksten empfangen. Der Eingangskreis liegt in Resonanz zur Frequenz des gerade eingestellten Senders. Alle anderen Senderfrequenzen werden unterdrückt. Die ankommende hochfrequente Wechselspannung des eingestellten Senders wird von der Diode gleichgerichtet und die Ohrhörermembran bewegt sich im Takte der Umhüllenden, die ja das Nutzsignal ist: Wir hören die vom Sender ausgestrahlte Sprache oder Musik.

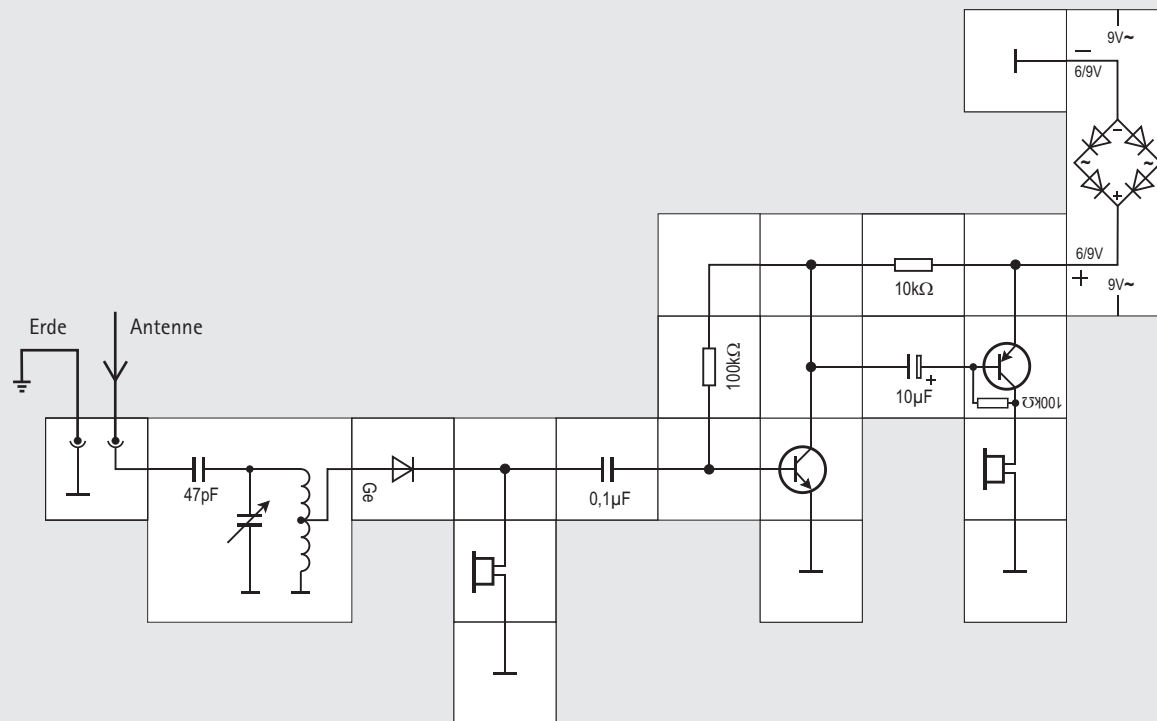
Versuchsweise können wir zur Empfangsverbesserung auch noch »Erde« anschließen, und zwar verbinden wir dazu die Aufbauplatte (Masse) mit der Wasserleitung oder der Heizung.



Experiment 54 Rundfunkempfänger

An unsere Detektorschaltung können wir nun unseren ein- oder auch gleich den zweistufigen Transistorverstärker anschließen. Der Vergleich der beiden Ohrhörer signale zeigt uns den deutlichen Unterschied zwischen unverstärktem und verstärktem Eingangssignal. Nach diesem Vergleich sollte der linke Hörer entfernt und in Reihe zum rechten geschaltet werden. Auch kann man wieder ausprobieren, ob die Empfangsverhältnisse sich verbessern, wenn man die Erde anschließt. In den Abendstunden werden wir durch vorsichtiges Drehen am Abstimmkondensator die verschiedensten Sender empfangen können. Versuchsweise kann bei starken Sendern auch die Germaniumdiode entfernt werden, dann übernimmt die Basis-Emitter-Diode der ersten Transistors die Gleichrichtung des vom Abstimmkreis gelieferten Signals.

Entfernen wir schließlich den Abstimmbaustein und schließen die Antenne direkt an die Germaniumdiode oder den Kondensator, so hören wir nur ein Durcheinander von Geräuschen: Der Empfänger ist nicht abgestimmt.



Experiment 55 Monostabile Kippstufe

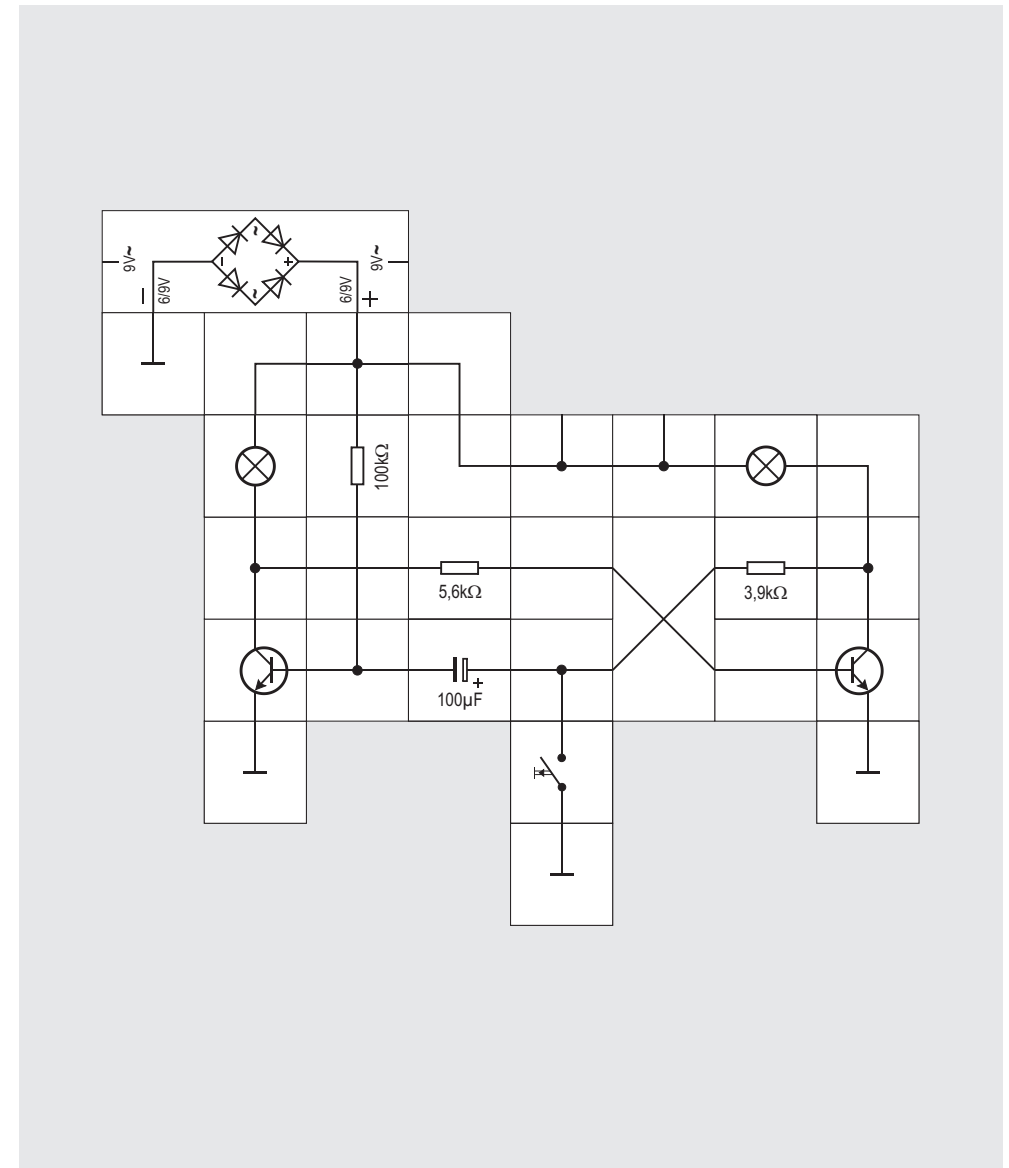
Nach dem Ausflug in die Empfangstechnik wollen wir noch einmal auf die Schaltung des Experiments 39 zurück kommen. Wir hatten dort zwei Transistoren kapazitiv über Kreuz gekoppelt und gesehen, dass diese Schaltung zwei nicht stabile Zustände kennt, zwischen denen sie ständig hin- und herschaltet. Verändern wir den Versuchsaufbau ein wenig, indem wir eine Kopplung nicht mit einem Kondensator, sondern mit einem Widerstand vornehmen und noch einen Taster ergänzen, so verhält sich die neue Schaltung ganz anders:

Beim Anlegen der Versorgungsspannung kann es sein, dass die rechte Lampe leuchtet; allerdings tut sie das nicht sehr lange. Nach kurzer Zeit verlischt sie, die linke geht an und die Schaltung bleibt in diesem Zustand.

Betätigt man den Taster, leuchtet erneut die rechte Lampe für eine kurze Zeit, geht dann aus und die linke leuchtet, wobei es keine Rolle spielt, wie lange der Taster gedrückt bleibt. Die Schaltung kennt offensichtlich einen instabilen und einen stabilen Zustand, in den sie ohne unser Zutun kippt, wenn wir sie vorher durch Tasterbetätigung in den instabilen gebracht hatten. Sie heißt deswegen MONOSTABILE KIPPSTUFE und wird zur

An- und Abschaltverzögerung, sowie zur Impulserzeugung eingesetzt.

Gehen wir beim Einschalten der Versorgungsspannung davon aus, dass der rechte Transistor leitend ist, so lädt sich die linke Kondensatorplatte über den $10\text{ k}\Omega$ Widerstand positiv auf. Eine gleich große Ladung fließt über den $3,9\text{ k}\Omega$ Widerstand nach Masse ab. Dieser instabile Zustand dauert so lange an, bis der Kondensator geladen ist; dann fließt der Strom durch den $10\text{ k}\Omega$ Widerstand als Basisstrom in den linken Transistor und steuert ihn in den leitenden Zustand. Dadurch sinkt sein Kollektorpotential nahezu auf Massepotential und der rechte sperrt. Das Kollektorpotential des rechten Transistors steigt und der Kondensator wird über die rechte Lampe und den $3,9\text{ k}\Omega$ Widerstand sowie die Basis - Emitter - Strecke des linken Transistors umgeladen. Dieser Zustand ist stabil, selbst wenn die Umladung beendet ist. Erst bei erneuter Tasterbetätigung beginnt wieder der instabile Zustand, da vorübergehend der Strom durch den $10\text{ k}\Omega$ Widerstand zum Umladen des Kondensators benötigt wird und deswegen der linke Transistor keinen Basisstrom mehr erhält. Die Dauer hängt von der Kapazität des Kondensators und der Größe der Widerstände ab.

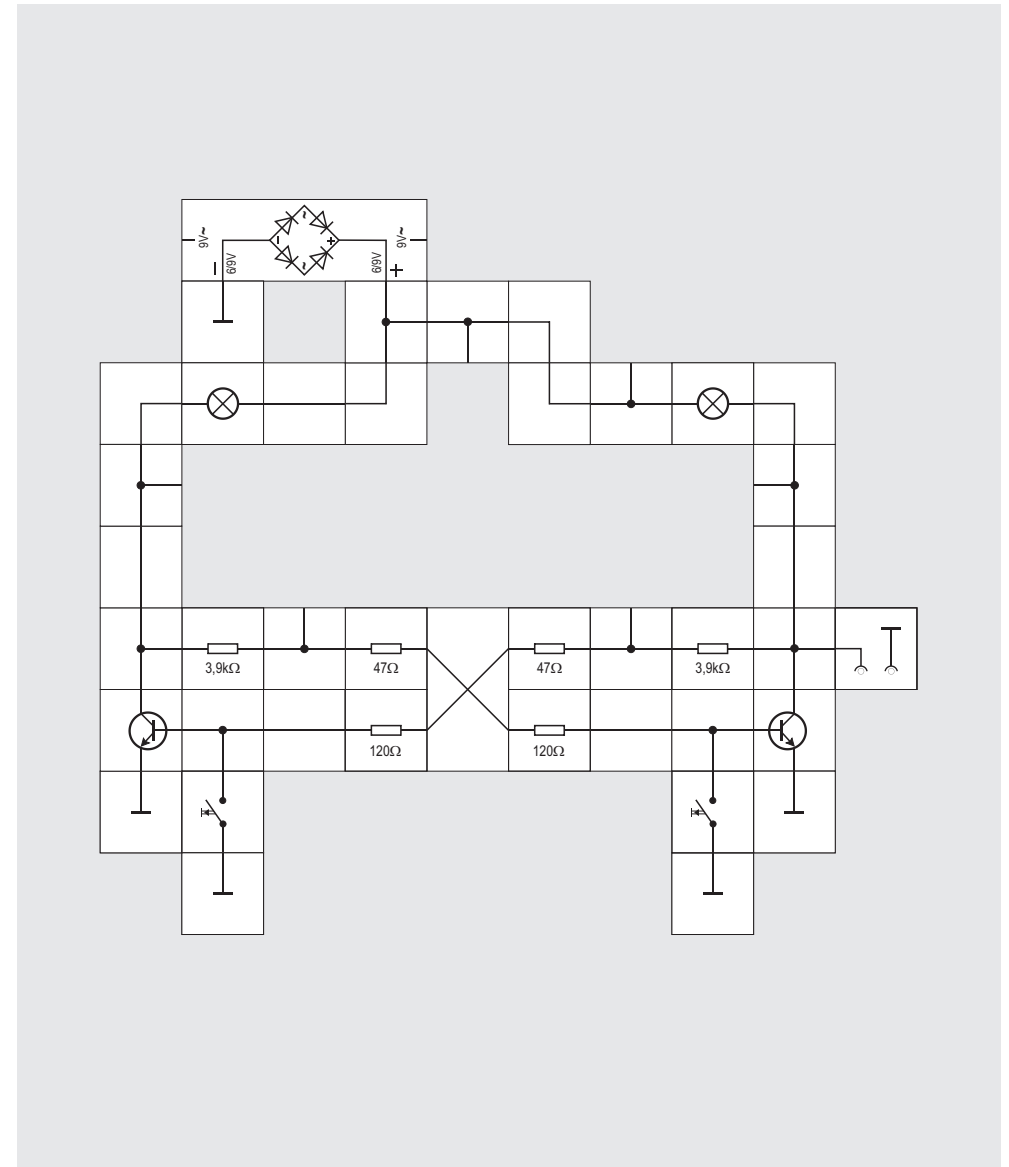




Experiment 56 Bistabile Kippstufe (Flipflop)

Sicherlich überrascht es uns nun nicht, dass wir eine Schaltung mit zwei stabilen Zuständen erhalten, wenn wir die Über - Kreuz - Kopplung statt mit Kondensatoren nur mit Widerständen ausführen. Diese Schaltung ist als BISTABILE KIPPSTUFE oder FLIPFLOP bekannt, da sie die Zustände Flip und Flop kennt. Ein Transistor ist dabei leitend und sperrt damit den anderen. Welcher das nach Anlegen der Versorgungsspannung ist, hängt von den zufälligen Toleranzen der verwendeten Bauelemente in der Schaltung ab. Wir bauen sie etwas großzügig auf, da wir sie später noch mit einem wichtigen Schaltungsteil ergänzen werden. Die Widerstände $47\ \Omega$ und $120\ \Omega$ dienen uns als Ersatz für Verbindungsbausteine. Die Schaltung bekommt zwei Taster. Mit dem linken können wir den linken Tran-

sistor sperren, so dass die rechte Lampe leuchtet, das Flipflop also SETZEN; mit dem rechten geschieht das Umgekehrte: das Flipflop wird RÜCKGESETZT. Damit wir nicht durcheinander kommen, tauschen wir die linke Lampe anschließend gegen einen $220\ \Omega$ Widerstand aus. Durch abwechselndes Betätigen des linken und des rechten Tasters setzen wir das RS - Flipflop (Lampe brennt) und setzen es zurück (Lampe ist dunkel). Die Transistoren sperren sich dabei gegenseitig, so dass jeweils ein Taster nur einmal gedrückt werden muss, um in den anderen stabilen Zustand zu gelangen. Wegen des abwechselnden Drückens der beiden Taster ist das Flipflop nicht zum Zählen geeignet. Wir wollen es deswegen im nächsten Experiment mit einigen Bauteilen ergänzen, so dass es beim Betätigen eines Tasters in den jeweils anderen Zustand springt.



Experiment 57

Bistabile Kippstufe (Flipflop)

Wir ergänzen unser Flipflop mit den angegebenen Dioden, Kondensatoren und Widerständen; den Setztaster benötigen wir an der bisherigen Stelle nicht mehr, er wird zwischen die Dioden und der Versorgungsspannung angebracht.

Legen wir Versorgungsspannung an die Schaltung, wird die Lampe entweder leuchten oder nicht. Das hängt wie bisher von den zufälligen Bauteiletoleranzen ab. Leuchtet sie, so können wir das Flipflop mit dem bisherigen Rücksetztaster zunächst in den Grundzustand bringen.

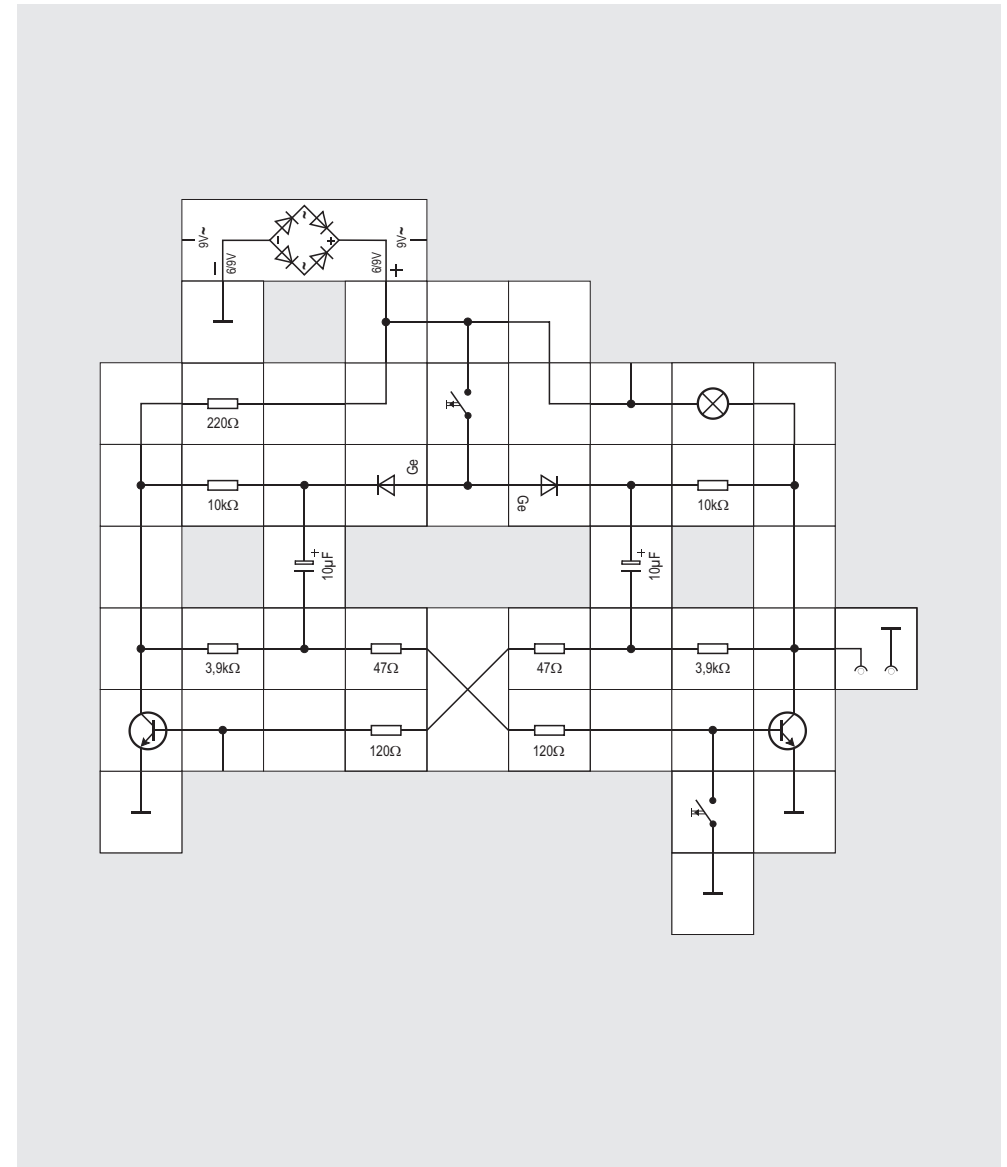
Betätigen wir nun den oberen Taster, so leuchtet die Lampe (Zustand Flip), ein weiteres Betätigen desselben Tasters lässt sie erlöschen (Zustand Flop). Beim ersten, dritten, fünften usw. Niederdrücken des Tasters wird also das Flipflop gesetzt, beim zweiten, vierten, sechsten usw. Niederdrücken wird es rückgesetzt. Betrachtet man diese Stufe als Zähler, so kann sie von 0 bis 1 zählen und beginnt beim zweiten Impuls wieder von vorn. Die Schaltung des so genannten T - Flipflops (engl. toggle) funktioniert folgendermaßen:

Angenommen der linke Transistor sei leitend; dann liegt sein Kollektorpotential nahezu auf Masse. Der linke

Kondensator erhält dieses Potential über den $10\text{ k}\Omega$ bzw. über den $3,9\text{ k}\Omega$ Widerstand an seine beiden Anschlüsse, er ist deswegen nicht geladen. Anders sieht es beim rechten Kondensator aus. Der rechte Transistor sperrt, sein Kollektorpotential ist Versorgungsspannungspotential, über den $10\text{ k}\Omega$ Widerstand hat der obere Anschluss des Kondensators dasselbe Potential; über den $120\ \Omega$ Widerstand liegt ungefähr $0,7\text{ V}$ Potential am unteren Anschluss. Dieser Kondensator ist geladen.

Betätigt man nun den Taster, so fließt vom Pluspol der Batterie über die eine Diode ein Ladestrom nur in den leeren linken Kondensator und damit über den $120\ \Omega$ Widerstand in die Basis des rechten Transistors, der daraufhin leitend wird und den linken sperrt. Beim nächsten Tastendruck ist es umgekehrt: Jetzt ist der rechte Kondensator leer und der linke geladen, so dass abwechselnd die Lampe leuchtet oder verlischt.

Ersetzt man den Taster durch den Fotowiderstand, so kann unser elektronischer Speicher registrieren, wie oft wir die Deckenbeleuchtung ein- und ausgeschaltet haben oder wie oft der Fotowiderstand beschattet wurde. Dazu kann es günstig sein, die $10\ \mu\text{F}$ durch $100\ \mu\text{F}$ Kondensatoren zu ersetzen.

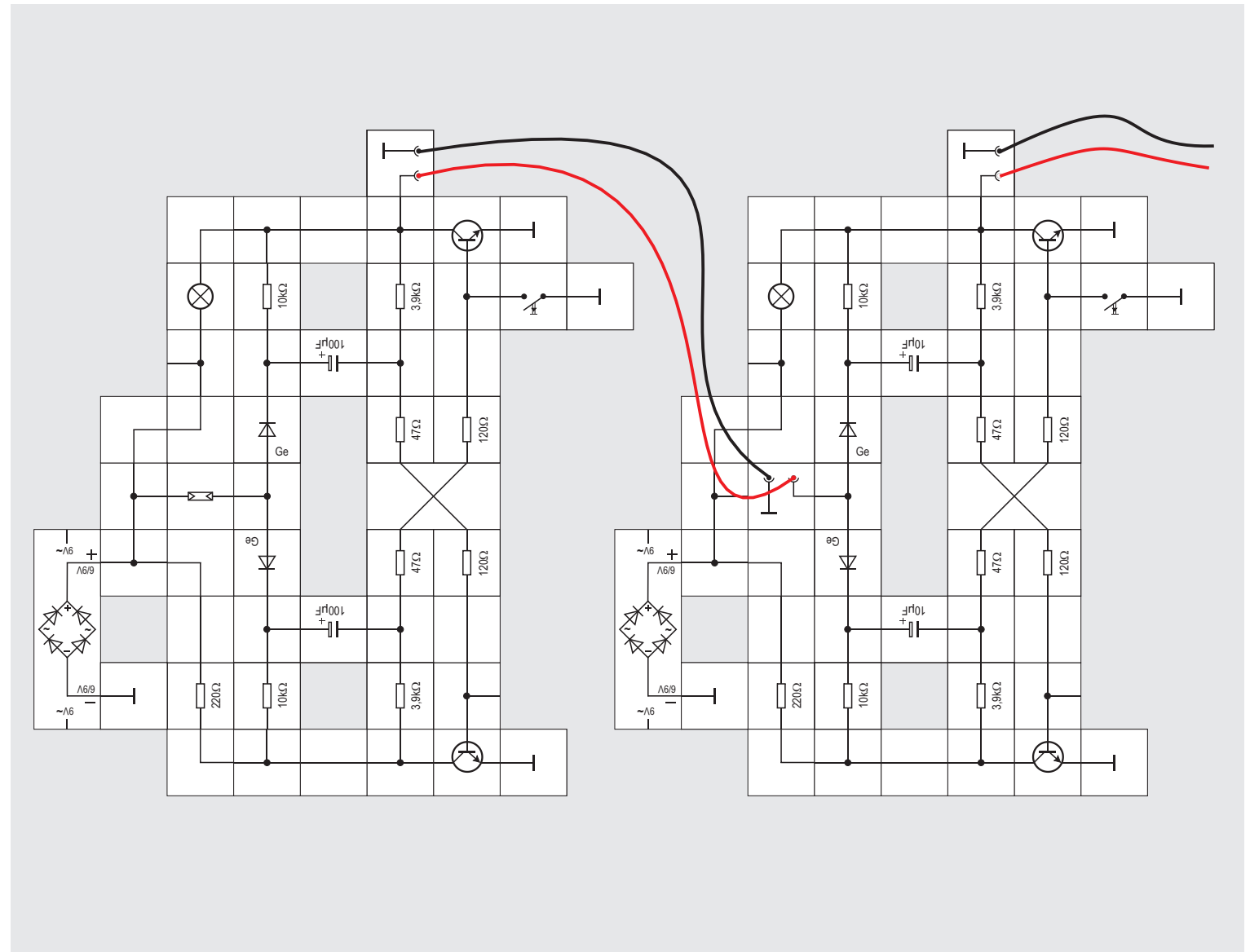


Experiment 58

Binärzähler

Koppeln wir an das erste Flipflop ein weiteres in der angegebenen Weise, so können wir bereits von 0 bis 3 zählen. Der positive Potentialsprung am Kollektor des rechten Transistors, der jedes Mal auftritt, wenn der Transistor sperrt, bewirkt das Gleiche wie bisher der Taster. Mit einem dritten angekoppelten Flipflop können wir bereits bis 7, mit einem vierten bis 15 und mit einem fünften bis 31 usw. zählen.

Zähler dieser Art kommen in großer Zahl in jedem Computer vor. Es soll aber nicht verschwiegen werden, dass moderne Computer nicht mehr mit den uns bekannten sogenannten bipolaren npn und pnp Transistoren arbeiten, sondern mit Feldeffekttransistoren, deren Eigenschaften wir in den abschließenden Experimenten kennen lernen.





Experiment 59

MOSFETs

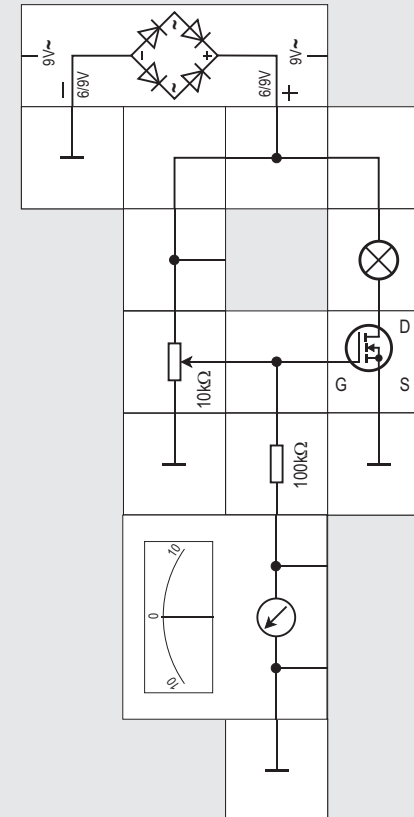
Die Transistoren, die wir bisher eingesetzt haben, benötigen zur Ansteuerung einen (relativ kleinen) Basisstrom, mit dem der Kollektorstrom in seiner Höhe beeinflusst wird. Wenngleich die Steuerleistung viel kleiner ist als die zu steuernde Leistung, so ist sie doch nicht gleich Null; bei heutzutage eingesetzten integrierten Schaltkreisen, bei denen sich Tausende oder gar Millionen Transistoren auf einem winzigen Halbleiterkristall befinden, summieren sich diese vielen kleinen Beträge doch und erzeugen eine unerwünschte Erwärmung.

Die sogenannten Feldeffekttransistoren, FETs, und hier eine Untergruppe, die MOSFETs vom engl. Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor lassen sich dagegen nahezu leistungslos steuern. Ohne dass wir auf ihren inneren Aufbau genauer eingehen, wollen wir anhand des Schaltsymbols und mit einem kleinen Versuchsaufbau sehen, wie ein solcher Transistor arbeitet.

Der n - Kanal - MOSFET hat drei Anschlüsse; sie heißen Gate (entspricht der Basis), Source (Emitter) und Drain (Kollektor). Er verhält sich ähnlich wie ein

npn - Transistor: Damit ein Stromfluss zwischen Drain und Source zustande kommt, muss das Gate - Potential gegenüber dem Source - Potential positiv sein, und zwar typabhängig um 1 bis 3 V. Dann wird der im Schaltbild unterbrochen gezeichnete Drain - Source - Kanal leitend. Das Gate ist von diesem Kanal - ähnlich wie ein kleiner Kondensator - isoliert; der typische Isolationswiderstand beträgt einige Terraohm ($1 \text{ T}\Omega = 10^{12} \Omega$), es ist sehr empfindlich gegen statische Entladungen. **Bevor wir den Gate - Anschluss berühren, müssen wir uns immer an der Aufbauplatte entladen.** Andernfalls kann die extrem dünne Isolierschicht durchschlagen und der MOSFET wird zerstört.

In unserem Experiment legen wir die Lampe als Last in die Drain - Leitung und erhöhen langsam mit dem Potentiometer die Gate - Source - Spannung von 0 V aus. Bei ungefähr 2 bis 3 V leuchtet die Lampe, eine weitere Erhöhung verändert nichts mehr. Eine Gatestrom - Messung würde uns zeigen, dass kein Strom fließt, wir also lediglich mit der Gate - Source - Spannung den Stromfluss steuern. Wir verzichten auf die Messung und schauen uns das im nächsten Experiment auf eine andere Art und Weise an.





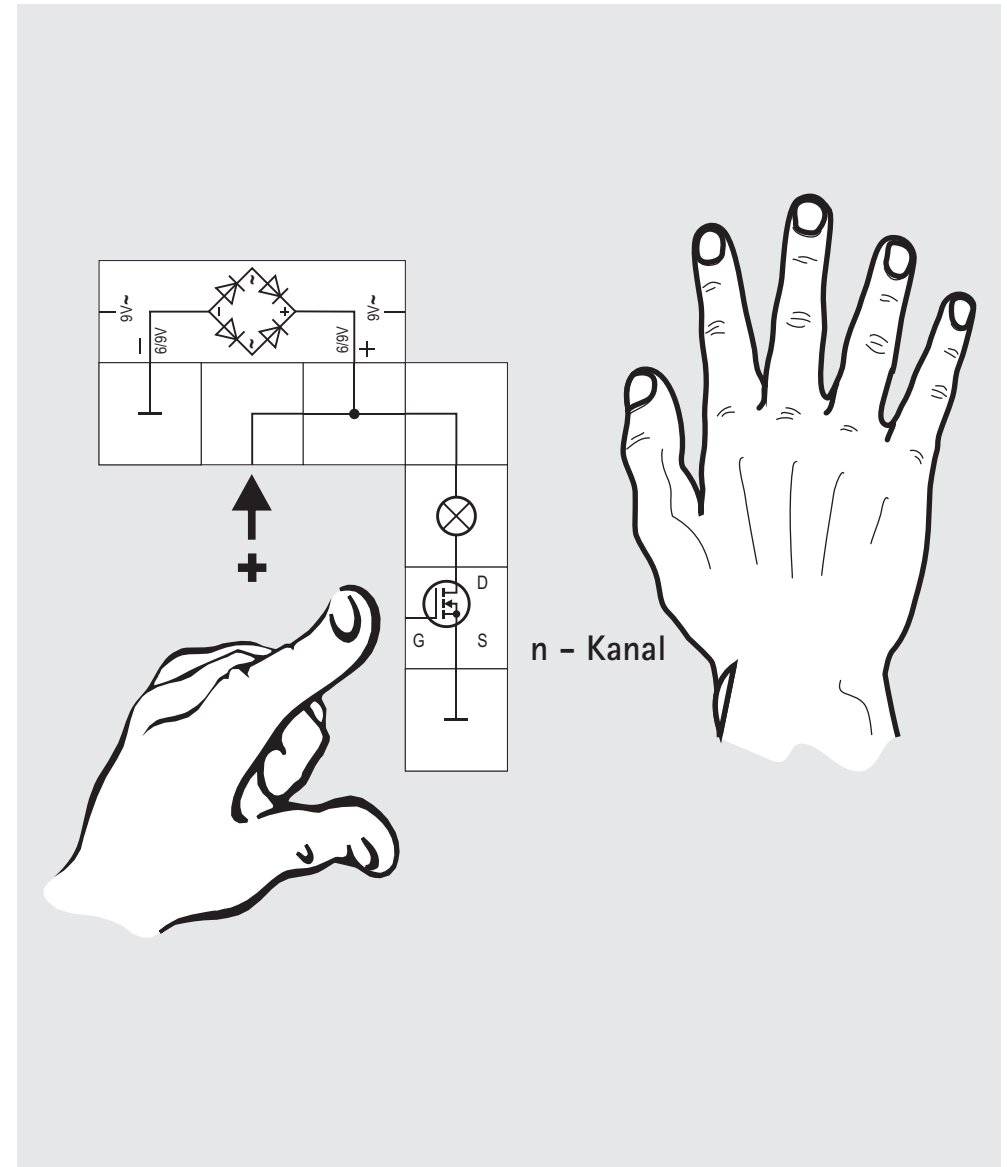
Experiment 60 Dimmerschaltung

Wir wollen in diesem Experiment zeigen, dass zum Steuern des Drainsstroms tatsächlich nur elektrische Ladungen auf das Gate gebracht werden müssen und abgesehen davon dann kein Gatestrom mehr fließen muss. Dazu werden wir den Gate - Anschluss berühren. Es ist deswegen wichtig, uns vorher zu entladen, indem wir eine Hand auf die Aufbauplatte legen.

Wir entfernen sodann den Spannungsteiler (Potentiometer) und das Instrument aus dem Versuchsaufbau. Berühren wir nun mit der einen Hand das frei liegende Kontaktplättchen mit 9 V Versorgungspotential und mit der anderen das Gate - Kontaktplättchen, ohne an die Aufbauplatte (Massepotential) zu kommen, so transportieren wir durch unseren Körper genügend positive Ladungen auf das Gate, der Transistor wird leitend und das Lämpchen leuchtet hell auf. Wir können nun beide Kontaktplättchen loslassen, das Lämpchen brennt weiter. Wegen der extrem guten Isolierung sind die Ladungen auf dem Gate »gefangen«.

Zum Abschalten der Lampe müssen wir die Ladungen nach Masse ableiten. Wir berühren dazu die Aufbauplatte mit der einen Hand und das Gate - Kontaktplättchen mit der anderen; das Lämpchen verlöscht sofort.

Nun wiederholen wir den ersten Teil des Experiments, so dass die Lampe brennt. Legen wir dann eine Hand an die Aufbauplatte und berühren mit der anderen durch ein Stück Papier hindurch das Gate - Kontaktplättchen, so werden wir bemerken, dass die Lampe langsam dunkler wird. Der Versuch kann bei beliebiger Helligkeit des Lämpchens abgebrochen werden, die Helligkeit verändert sich dann nicht mehr, vorausgesetzt, die Luftfeuchtigkeit ist nicht zu hoch. Obwohl uns Papier bisher als guter Isolator bekannt war, ist seine Leitfähigkeit noch ausreichend hoch, um Ladungen auf das extrem gut isolierte Gate zu bringen. Berühren wir durch das Papier hindurch das Gate - Kontaktplättchen und tippen mit der anderen nur kurzzeitig an das Versorgungsspannungs - Plättchen so sieht man buchstäblich, wie Ladungen portionsweise übertragen werden und das Lämpchen nach jedem Transport etwas heller leuchtet.

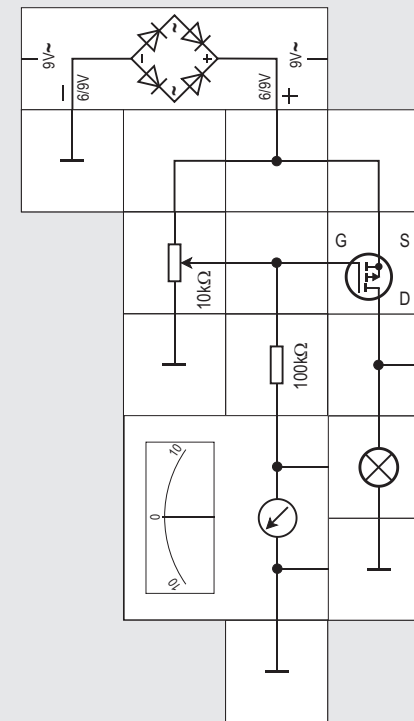




Experiment 61 p - Kanal MOSFET

Wir wollen nun auch noch das Gegenstück zum bipolaren pnp Transistor kennen lernen; es ist der p - Kanal MOSFET. Auch er sperrt, wenn seine Gate - Source

- Spannung 0 V ist. Erhöhen wir sie auf circa 2 bis 3 V, fängt er an zu leiten und das Lämpchen in der Drain - Leitung leuchtet. Das Source - Potential muss dabei positiver sein als das Gate - Potential. Mit ihm sind entsprechende Dimmerschaltungs - Versuche möglich.



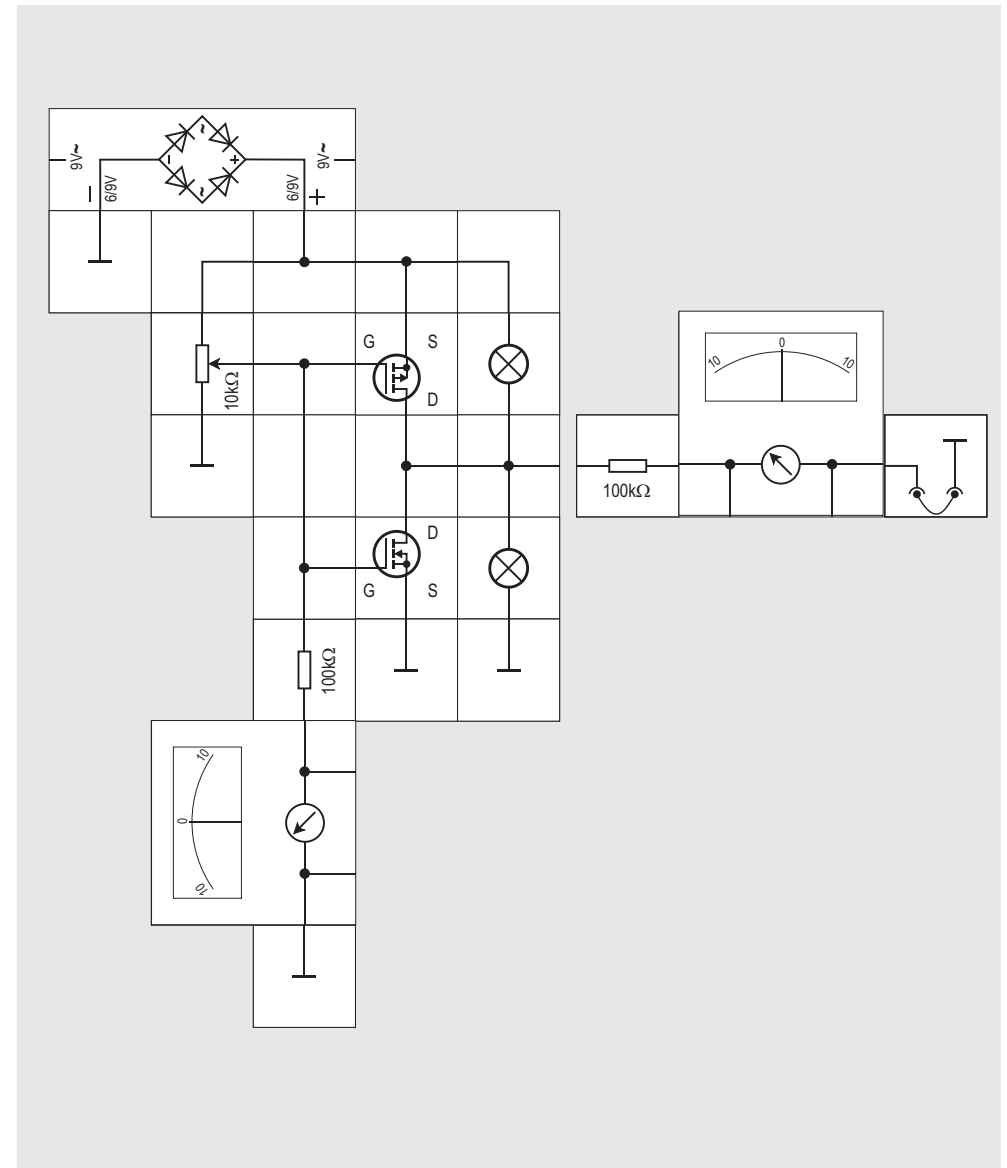
Experiment 62 CMOS – Inverter

In den Experimenten 58 und 60 haben wir mit einem n - Kanal bzw. p - Kanal MOSFET jeweils einen Inverter aufgebaut, wobei wir als Lastwiderstand ein Lämpchen verwendeten. Dieses Lämpchen kann natürlich gegen einen normalen hochohmigeren Widerstand ausgetauscht werden. Das invertierte Eingangssignal steht zwischen Drain und Lastwiderstand für Folgeschaltungen zur Verfügung, im Versuchsaufbau 60 also am rechten offenen T - Verbinder. Da in der Digitaltechnik nur 0 - und 1 - Signale (entsprechend 0 V und 9 V) und keine »Zwischenpotentiale« verarbeitet werden, ist der MOSFET entweder gesperrt oder gut leitend. Sperrt der n - Kanal MOSFET, erhält man über den Lastwiderstand (hohes) 1 - Potential, leitet er dagegen, gibt er (tiefes) 0 - Potential ab, wobei leider durch den MOSFET und den Widerstand ein unerwünschter Querstrom fließt.

Beim p - Kanal MOSFET ist es dagegen gerade umgekehrt: Er gibt 1 - Potential ab, wenn er leitend ist und damit ein Querstrom fließt; sperrt er, stellt sich 0 - Potential über den Lastwiderstand für Folgeschaltungen ein.

Die komplementären MOSFETs (COMPLEMENTARY MOS) gestatten nun den Auf-

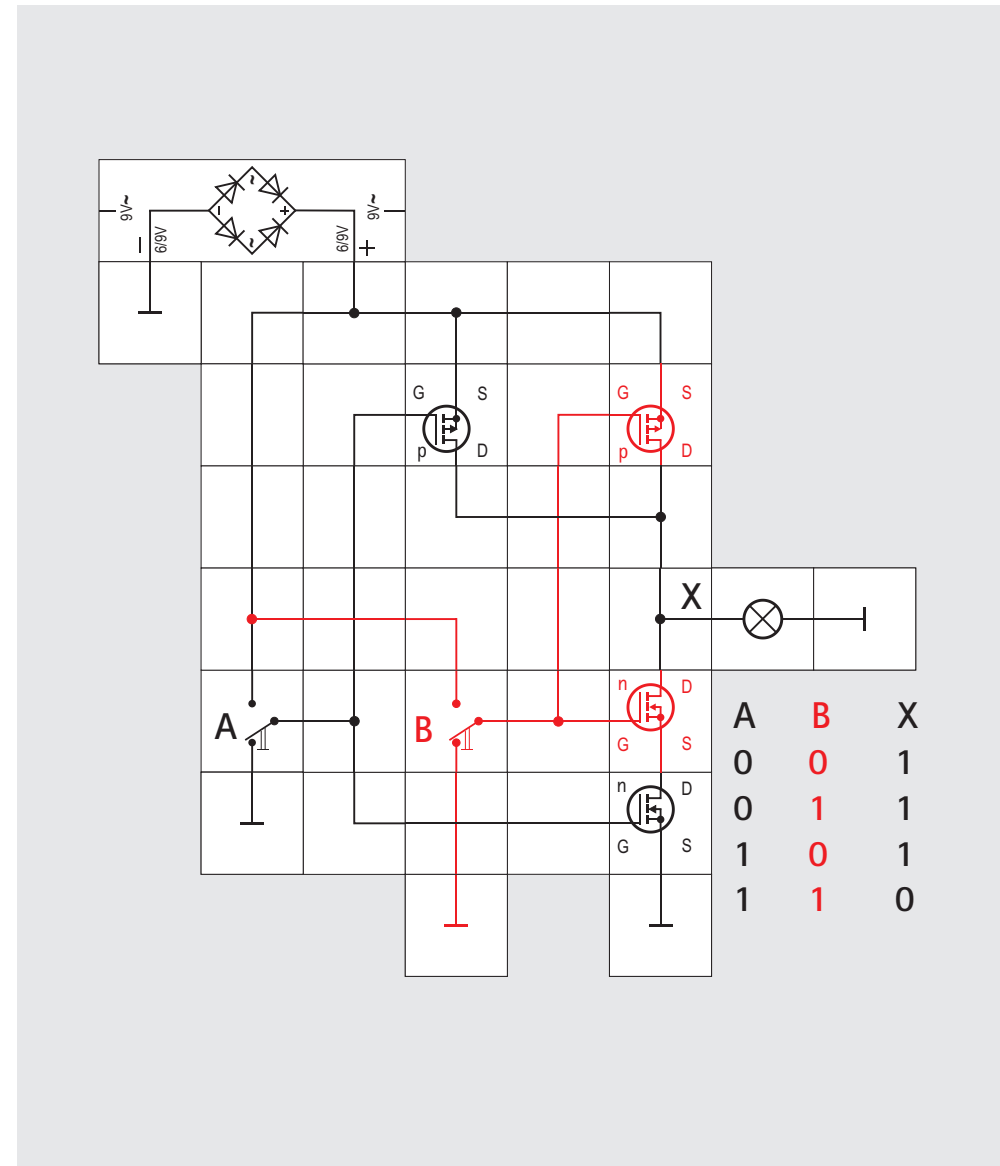
bau eines viel besseren CMOS - Inverters: Schaltet man einen p - Kanal und einen n - Kanal MOSFET zusammen und fasst den jeweils anderen Transistor als Lastwiderstand auf, so erhält man einen Inverter, der niederohmig in beiden Zuständen ist und bei dem, sieht man vom Augenblick des Umschaltens ab (den Bereich 3 V bis 6 V schnell durchfahren!), überhaupt kein Querstrom fließt und damit auch keine störende Verlustleistung entsteht, zumal für die Ansteuerung auch kein Strom, sondern nur ein Potential erforderlich ist. Seine Ruhevverlustleistung ist buchstäblich Null, er hat einen extrem hohen Eingangswiderstand und sein niederohmiges Ausgangspotential liegt entweder sehr nahe an seiner Versorgungsspannung oder sehr nahe an Masse, abhängig davon, wie viel Strom er an einen angeschlossenen Verbraucher abgeben oder von diesem aufnehmen muss. Ist der Verbraucher ebenfalls in CMOS aufgebaut, sind diese Ströme Null und das Versorgungs- bzw. das Massepotential wird erreicht. Der CMOS - Inverter ist das Grundelement für alle Schaltkreise der digitalen CMOS - Logik, einer Schaltkreisfamilie, die es überhaupt erst ermöglichte, höchst integrierte, verlustleistungsarme Schaltkreise zu bauen.



**Experiment 63
CMOS – NAND**

Wir wollen uns nun überlegen, wie man auf Basis des CMOS Inverters logische Verknüpfungen verwirklichen kann, so wie wir es anfangs mit Schaltern und dann mit einem Relais bewerkstelligt haben. Wenn wir diese Aufgabe mit Invertieren lösen wollen, ist es naheliegend, zunächst zu versuchen, eine Verknüpfungsfunktion mit Invertierung z.B. die NAND - Funktion, zu konstruieren. Für zwei Eingangssignale, A und B, werden wir wenigstens zwei Inverter benötigen, aber wie müssen sie geschaltet werden? Die NAND - Funktion zeichnet sich dadurch aus, dass sie nur dann tiefes Ausgangspotential (0) liefert, wenn beide Eingangssignale hohes Potential (1) führen. Für die Anordnung der n - Kanal MOSFETs, die das tiefe Potential an den Ausgang legen, bedeutet dies, dass der Ausgang des Verknüpfungsbausteins über zwei in Reihe geschaltete Transis-

toren mit Masse verbunden werden sollte. Andererseits liefert die NAND - Funktion immer dann hohes Ausgangspotential (1), wenn wenigstens eins der Eingangssignale tiefes Potential (0) führt. Dieses Verhalten erreicht man, wenn der Ausgang über zwei parallel geschaltete p - Kanal MOSFETs mit Versorgungsspannung verbunden wird. Und dies ist tatsächlich schon die Struktur einer NAND - Verknüpfung mit zwei Eingängen. Sie tut genau das, was wir von ihr wollen, ohne dass bei allen möglichen Eingangssignalkombinationen ein störender Querstrom fließt. Mit den beiden Umschaltern kann sowohl hohes (1) als auch tiefes (0) Potential an beide Eingänge gelegt werden, das Lämpchen dient zur Anzeige des Ausgangspotentials. Nur wenn beide Eingänge mit Versorgungspotential verbunden sind, verlischt es; dies ist genau das Verhalten einer NAND - Verknüpfung.



**Experiment 64
CMOS - NOR**

Zum Aufbau einer NOR - Verknüpfung aus zwei Invertern gehen wir mit entsprechenden Überlegungen wie bei der Konstruktion der NAND - Verknüpfung vor: Die NOR - Funktion liefert nur dann hohes Ausgangspotential (1), wenn beide Eingangssignale A und B tiefes Potential (0) führen. Für uns bedeutet das eine Serienschaltung der p - Kanal MOSFETs von der Versorgungsspannung zum Ausgang. Führt dagegen mindestens ein Eingang hohes Potential (1), gibt der Ausgang bereits tiefes Potential (0) ab: Des-

wegen müssen die n - Kanal MOSFETs vom Ausgang zur Masse parallel geschaltet werden. Damit ist die Struktur eines NOR - Verknüpfungsbausteins bereits wieder fertig. Möchte man AND - oder OR - Verknüpfungen haben, so muss jeweils noch ein einfacher Inverter nachgeschaltet werden. Alle in modernen Computern und Steuerungen vorkommenden Schaltungsteile wie Flipflops, Zähler, Schieberegister, und komplizierte Verknüpfungen lassen sich aus diesen Grundelementen aufbauen.

