



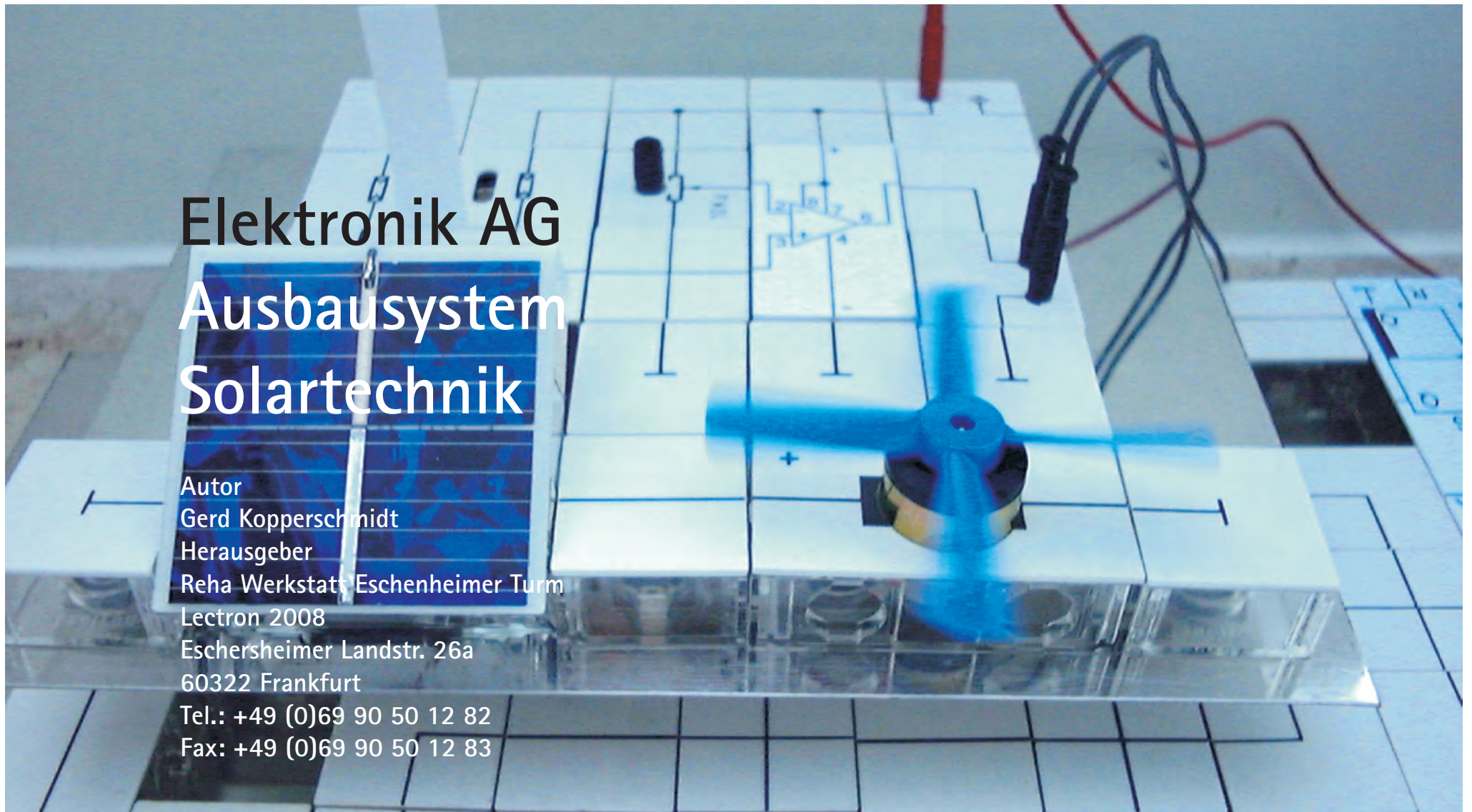
Solartechnik Versuche



Lectron

Elektronik AG Ausbausystem Solartechnik

Autor
Gerd Kopperschmidt
Herausgeber
Reha Werkstatt Eschenheimer Turm
Lectron 2008
Eschersheimer Landstr. 26a
60322 Frankfurt
Tel.: +49 (0)69 90 50 12 82
Fax: +49 (0)69 90 50 12 83





Experiment	Thema	Seite	Experiment	Thema	Seite
	Zu diesem Kasten	4	14	Die Kennlinie einer Germaniumdiode	26
	Bausteine Solartechnik	5		Diodenkennlinien	27
	Bausteine Elektronik AG	6	15	Messung mit Digitalinstrumenten	28
	Die Sonne-eine fast unendliche Energiequelle	7	16	Messung mit einem Digitalmultimeter	29
	Die Solarzelle	7	17	Die Kennlinie einer Leuchtdiode	30
1	Motor an Solarzelle	8	18	Leuchtdiode mit Vorwiderstand	31
2	Die Leuchtdiode LED	9	19	Ein hochempfindlicher Spannungsnachweis	32
3	Die Leuchtdiode an einer Solarzelle	10	20	Die LED als Spannungsquelle	33
4	Die Leuchtdiode an zwei Solarzellen	11	21	Die Solarzelle als Diode	34
	Aufbau der Materie	12	22	Die Belastungskennlinie einer Solarzelle	35
	Anregung von Atomen	13	23	Messprobleme	36
	Verteilung des Elektroniums in Feststoffen	14	24	Messen mit einem Instrument	37
	Elektrizitätsleitung in Feststoffen	15	25	Die Kennlinie bei voller Sonne	38
	Funktionsweise einer Leuchtdiode	16	26	Parallelschaltung von Solarzellen	39
5	Die Siliziumdiode	17	27	Serienschaltung von Solarzellen	40
6	Die Schottkydiode	18	28	Die Bypassdiode	41
7	Die Germaniumdiode	19	29	Eigenschaften der Lectron Solarzelle	42
8	Der Sperrstrom der Germaniumdiode	20		Arbeitspunkt der Solarzelle	43
9	Bauteilkennlinien	21	30	Glockenankermotor als Last an Solarzelle	45
10	Die Kennlinie eines Widerstands	22	31	Glockenankermotor als Generator	46
11	Die Glühlampenkennlinie	23	32	LED als Last an Solarzelle	47
12	Die Kennlinie einer Siliziumdiode	24	33	»Hochspannungserzeugung« mit Solarzelle	48
13	Die Kennlinie einer Schottkydiode	25	34	Nickel Metallhydrid Akku als Puffer	49



Zu diesem Kasten

Der Lectron Elektronik AG Experimentierkasten hat sich in Schule und Ausbildung bewährt. Er ist speziell für den Physikunterricht der 5. und 6. Klassen zusammengestellt und hat den Schwerpunkt Stromkreise. Darüber hinaus kann er wegen seiner reichhaltigen und trotzdem preiswerten Ausstattung auch im AG - Bereich für Versuche bis hin zu Logikschaltungen, wie sie in modernen Computern vorkommen, eingesetzt werden.

Wegen seines Erfolgs nach seiner Einführung hat sich Lectron entschlossen, ihn als Grundkasten für weitere aktuelle Schwerpunkte der heutigen Ausbildung in Schule und Universität zu verwenden und eine Reihe von kostengünstigen Ausbausystemen, die deswegen als Klassensatz angeschafft werden können, dafür zu konzipieren. Nach dem ersten Ausbausystem »Magnetismus« folgt hier mit »Solartechnik« nun ein weiterer.

In 34 anschaulichen Experimenten und zusätzlichen ausführlichen Erklärungen behandelt »Solartechnik« alles Wissenswerte über die Gewinnung und Verwen-

dung einer Energie, der die Zukunft gehört. Energie von der Sonne ist praktisch unerschöpflich und ihre Gewinnung emissionsfrei, was für unser Leben auf der Erde immer wichtiger wird. Von ihrem Vormarsch selbst in unseren Breiten, wo man nicht gerade sonnige Tage im Überfluss erlebt, zeugt eine ständig wachsende Zahl an Hausdächern mit den charakteristischen blauen Fotovoltaikzellen und den schwarzen Sonnenabsorbern zur Wassererwärmung. Zwei dieser blauen Zellen sind in dem vorliegenden Kasten enthalten; an ihnen werden die Eigenschaften, aber auch die Probleme gezeigt, die beachtet bzw. gelöst werden müssen, um die Sonne effektiv »anzapfen« zu können.

Das Ganze geschieht - wie auch schon in anderen Lectron Experimentierkästen - mit Modellen und auf der Basis des Karlsruher Physikkurses [1], der von der Abteilung für Didaktik der Physik an der Universität Karlsruhe entwickelt wurde. Für die Solartechnik - Experimente werden zusätzlich zum Elektronik AG Kasten nur wenige Bausteine, die bereits in anderen Lectron Experimentierkästen vor-

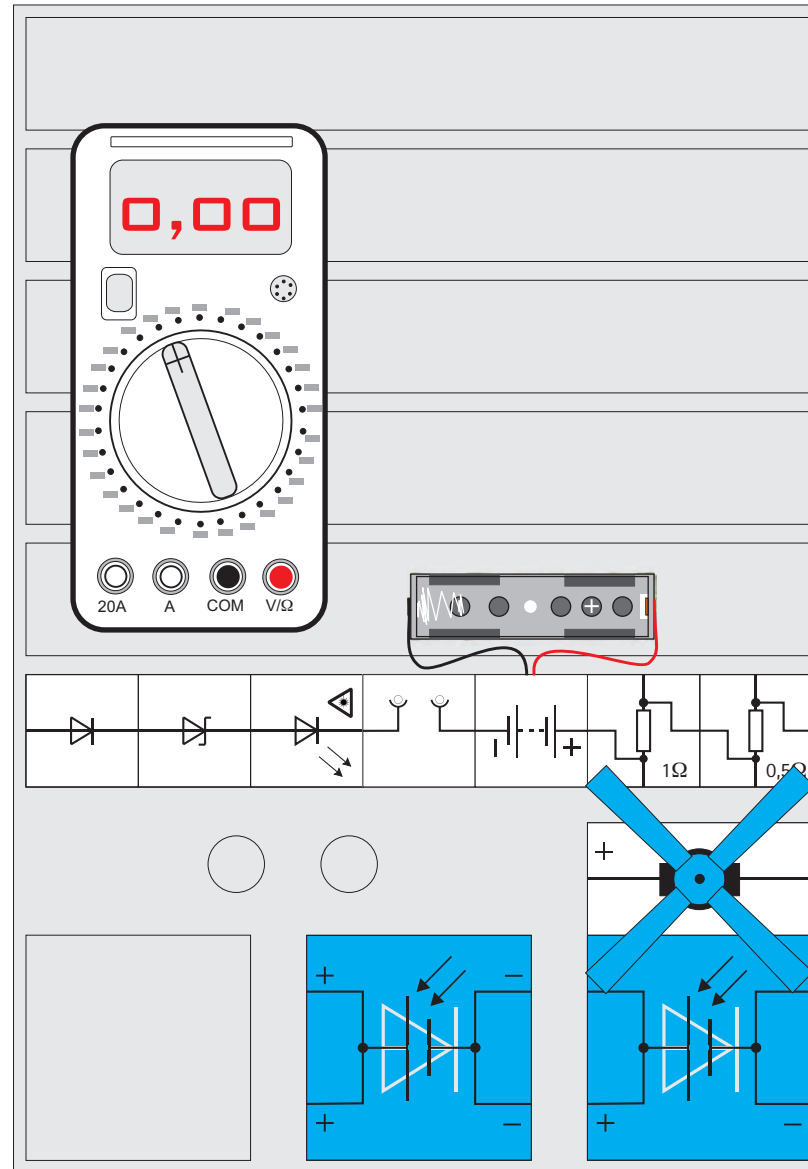
kommen, benötigt: die beiden Solarzellen, ein speziell für diese Technik geeigneter Motor, verschiedene Dioden, Messwiderstände, ein Akku zur Speicherung und ein universell verwendbares Digitalmultimeter. Mit ihm werden hauptsächlich Kennlinien aufgenommen; diese sind nicht nur in der Elektrotechnik und Elektronik bewährte Mittel, wesentliche Eigenschaften der eingesetzten Bauteile und ihr Zusammenspiel in Schaltungen knapp und exakt darzustellen. Wo immer möglich werden allerdings auch die bereits vorhandenen analogen Lectron Messinstrumente eingesetzt, da erfahrungsgemäß das Messen mit den scheinbar so einfach zu handhabenden Digitalinstrumenten doch seine Tücken hat. Allen denen, die nach Ausführung der vorliegenden Experimente Lust nach mehr verspüren, empfehlen wir den Lectron Experimentierkasten »Optoelektronik und Solartechnik«. In rund 50 Experimenten werden Theorie und Anwendung weiter vertieft. Ausführliche Unterlagen sind bei Lectron erhältlich (Adresse auf Seite 2) oder direkt unter www.lectron.de im Internet abrufbar.

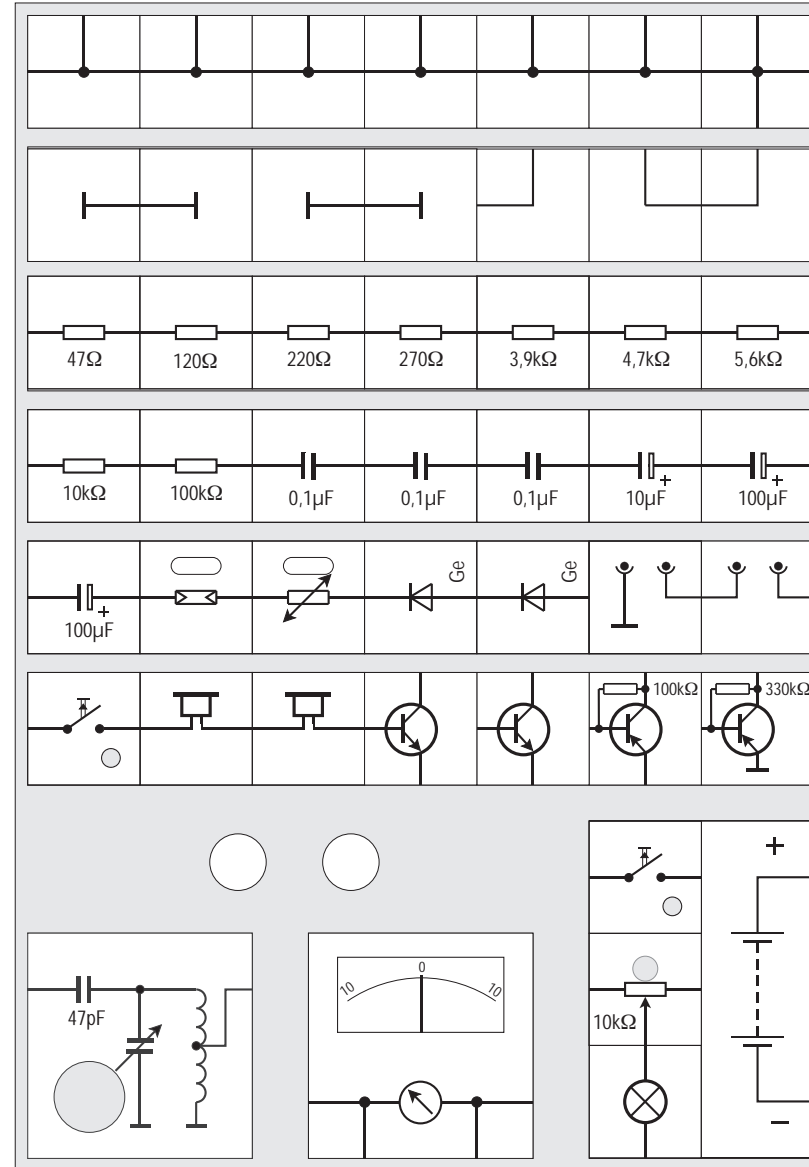
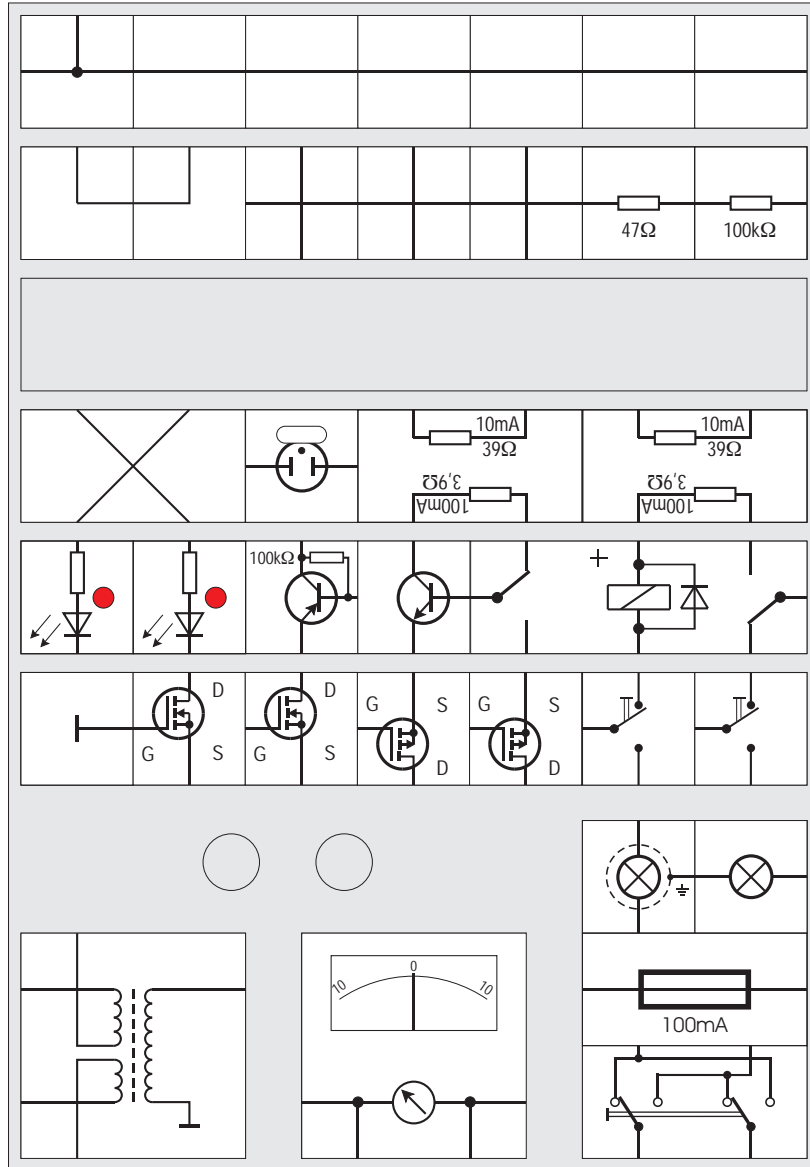
[1] Der Karlsruher Physikkurs KPK Schülerband 3 (physikalische Chemie, Wellen, Photonen, Atome, Festkörper, Kerne), ISBN: 3-7614-2097-8
AULIS Verlag Deubner & Co KG, Antwerpener Str. 6-12, 50672 Köln.

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

Schülerband 1 (Energie, Strömungen, Mechanik, Wärmelehre)
ISBN: 3-7614-2095-1
Schülerband 2 (Daten, Elektrizitätslehre, Optik),
ISBN: 3-7614-2096-X
Unterrichtshilfen (Gesamtband) mit Lösungen aller Aufgaben der Schülerbände
ISBN: 3-7614-2098-8
alle ebenfalls AULIS Verlag Deubner & Co KG, Antwerpener Str. 6-12, 50672 Köln

Der Kurs wird laufend erweitert, auch für die Sekundarstufe II gibt es die entsprechenden Unterlagen; weitere Materialien findet man unter:
<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/>







Die Sonne – eine fast unendliche Energiequelle

Unsere Sonne ist eine glühende Gaskugel mit einem für uns kaum vorstellbaren Durchmesser von $1,4 \cdot 10^6$ km und der $3,33 \cdot 10^5$ fachen Masse der Erde. Die Sonne spendet uns Licht und Wärme, ohne diese Energie ist kein Leben auf der Erde möglich: Die Photosynthese, bei der in den Pflanzen organische Stoffe wie Stärke und Zucker aufgebaut werden, benötigt die Sonnenlichtenergie ebenso wie auch der Kreislauf des Wassers auf unserem Planeten. Die Sonne ist wegen ihrer hohen Temperatur und ihrer Größe eine starke Strahlungsquelle. In ihrem Inneren laufen Kernfusionsprozesse ab, bei denen aus Wasserstoffkernen Heliumkerne zusammengesetzt werden. Aus dem dabei entstehenden Massendefekt (die Masse eines Heliumkerns ist ein wenig geringer als die Summe seiner Einzelteile) von 4 Millionen Tonnen pro Sekunde wird Energie frei gesetzt, die das in der Sonne enthaltene »Gas« auf die unvorstellbar hohe Temperatur von $15 \cdot 10^6$ °C im Inneren aufheizt. Die Temperatur an ihrer Oberfläche ist wesentlich niedriger, beträgt aber immer noch 5700°C.

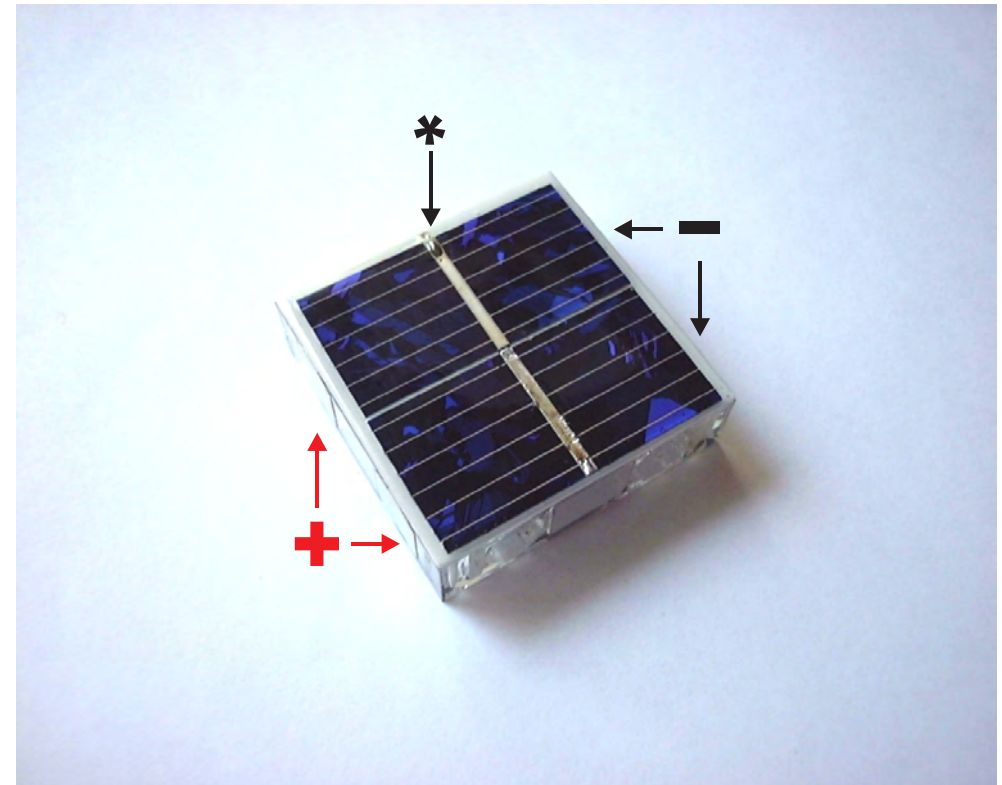
Die bei dieser Kernfusion frei werdende Energie ist riesig; die Strahlungsleistung der Sonne beträgt $3,86 \cdot 10^{26}$ W. Da der Radius der Erdbahn um die Sonne ca.

$150 \cdot 10^6$ km beträgt, empfängt die Erde nur einen winzigen Bruchteil dieses Energiestroms, nämlich $1,37 \text{ kW/m}^2$ (mittlere Strahlungsleistung); dieser Wert wird SOLARKONSTANTE genannt. Der Einfluss der Atmosphäre verringert die maximale Strahlungsleistung des direkten Sonnenlichts auf der Erdoberfläche auf 1 kW/m^2 . Dabei wird nicht das gesamte Spektrum gleichmäßig, sondern – je nach Wellenlänge – stark unterschiedlich reduziert. Das Dach eines 100 m^2 Bungalows in Frankfurt z. B. absorbiert jährlich 10^5 kWh an Energie, ein Angebot, das mit Hilfe von Solarzellen zum Teil direkt auf den Energieträger »Elektrische Ladung« oder kurz »Elektrizität« umgeladen werden kann.

Die Solarzelle

Eine Solarzelle ist ein Bauelement, das Energie vom Energieträger Licht (Entropie) auf den neuen Träger elektrische Ladung umlädt. Die Möglichkeit dieser Umladung ist bereits seit mehr als 100 Jahren bekannt. Seither verfolgen Wissenschaftler in der ganzen Welt das Ziel, die Sonne als Energiequelle für die Stromversorgung zu nutzen. Sogenannte monokristalline Siliciumsolarzellen werden seit den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts für die Stromversorgung von künstlichen Erdsatelliten eingesetzt.

Der Lectron Ausbakasten »Solartechnik« soll uns mit der Theorie und der Anwen-



dung von Solarzellen vertraut machen. Hauptbestandteil des Kastens sind die auffällig blauen Solarzellen, die wir in vielen Versuchen als Spannungsquelle nutzen werden. Die Zellen haben wie eine Batterie einen Plus- und einen Minuspol, die jeweils seitlich an je zwei Kontaktplättchen geführt sind. Damit möglichst viel Licht eingefangen wird, kann die Oberfläche der Zellen natürlich nicht bedruckt, die Polarität also nicht angegeben

werden. Wir erkennen allerdings im mittleren Randbereich einer Seite einen angelödeten Anschlussdraht (*); liegt diese Seite oben, so ist der Pluspol auf den linken beiden, entsprechend der Minuspol auf den rechten beiden Kontaktflächen herausgeführt. Im Inneren des Kästchens ist der Pluspol rot und der Minuspol schwarz verdrahtet.

Im ersten Versuch wollen wir mit einer Solarzelle einen Motor antreiben.



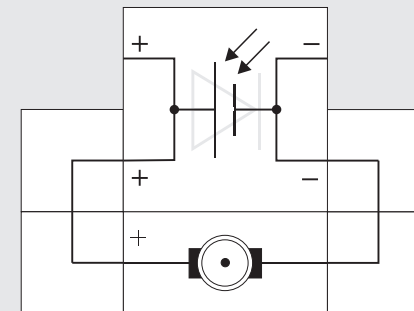
Experiment 1

Motor an Solarzelle

Neben den Solarzellen gibt es im Lectron Ausbakasten einen Motor, an dessen Achse ein Propeller befestigt ist. Der Pluspol des Motors ist gekennzeichnet. Wir verbinden ihn mit dem Pluspol der Solarzelle und entsprechend den Minuspol mit dem Minuspol der Zelle. Setzen wir diese Anordnung starker Sonnenstrahlung aus, so dreht sich der Propeller. Durch teilweise Abschattung der Solarzelle mit der Hand können wir die Geschwindigkeit beeinflussen; das Gleiche gelingt auch, wenn wir den Anstellwinkel zur Sonne verändern. Wir werden

feststellen, dass der Motor am schnellsten läuft, wenn die Sonnenstrahlen senkrecht auf die blaue gänzlich unbeschattete Oberfläche der Solarzelle auftreffen. Verwenden wir statt der Sonne eine Glühlampe als Lichtquelle, ist dieselbe Abhängigkeit zu beobachten. Hinzu kommt eine Abhängigkeit der Drehzahl von der Entfernung der künstlichen Lichtquelle zur Solarzelle. Insbesondere bei Leuchtstoffröhren und Energiesparlampen müssen wir relativ dicht an der Lampe sein, damit der Motor sich überhaupt dreht.

Ändern wir die Polarität des Motors, dreht er sich andersherum.





Experiment 2

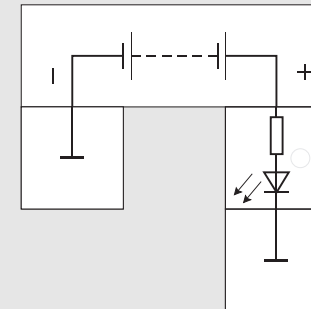
Die Leuchtdiode LED

Nach dem ersten erfolgreich ausgeführten Experiment wollen wir nun statt des Motors eine Leuchtdiode mit der Solarzelle betreiben. Leuchtdioden kamen Ende der 60er Jahre des vorigen Jahrhunderts langsam in Gebrauch. Es gab zuerst nur rot leuchtende mit relativ geringer Helligkeit. Mittlerweile sind sie in fast allen Farben erhältlich und unser tägliches Leben ist ohne sie kaum mehr vorstellbar. Jedes elektronische Gerät weist meistens gleich mehrere LEDs (vom engl. *light emitting diode*) als Anzeigeelemente auf. Die Lichtausbeute konnte inzwischen auch so verbessert werden, dass die LEDs dabei sind, die Glühlampe als Leuchtmittel zu ersetzen.

Bevor wir den Motor aus unserem Versuchsaufbau entfernen und statt dessen den Leuchtdiodenbaustein einsetzen, betreiben wir erst einmal die LED mit unserer 9V Batterie. Leuchtdioden dürfen im Gegensatz zu Glühlampen nicht ohne Vor-

widerstand zur Strombegrenzung an einer Spannungsquelle betrieben werden. Warum das so ist, werden wir später noch herausfinden. Da erfahrungsgemäß beim Aufbau der Versuche der Vorwiderstand jedoch vergessen wird und die LED beim direkten Anschluss an die Batterie sofort zerstört würde, ist zur Sicherheit bereits ein 220Ω Widerstand in den Lectron Baustein eingebaut.

Die LED weist noch eine Besonderheit auf: Sie lässt Strom nur in einer Richtung durch. Das Schaltsymbol ist deswegen ein Pfeil, der die Durchlassrichtung anzeigt. Der Anschluss an der Spitze des Pfeils heißt KATHODE und der andere ANODE. Damit die Diode leuchtet, müssen wir also unbedingt ihre Polung beachten. Die Anode verbinden wir mit dem Pluspol der Batterie und die Kathode mit Masse. Erwartungsgemäß leuchtet die LED hell auf. Polen wir die Diode dagegen um, bleibt sie dunkel. Dieser Versuch sollte nicht durchgeführt werden, weil eine Sperrspannung $>5V$ bereits zur Zerstörung führen kann.





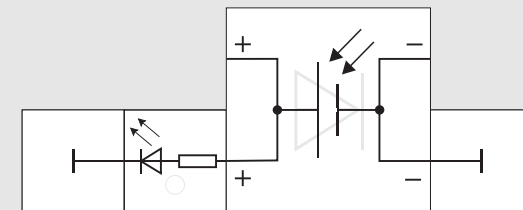
Experiment 3

Die Leuchtdiode an einer Solarzelle

Wir ersetzen nun die Batterie durch die Solarzelle, wobei wir auf die Polung achten und bringen die Anordnung wieder in die pralle Sonne. Damit wir besser er-

kennen, ob die Leuchtdiode leuchtet, muss sie gegebenenfalls abgeschattet werden, ohne dass der Schatten auf die Solarzelle fällt.

Selbst bei starkem Sonnenlicht leuchtet die Leuchtdiode merkwürdigerweise nicht.





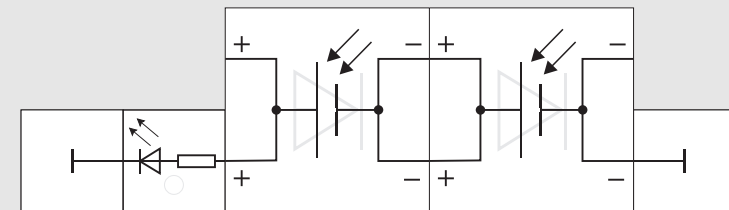
Experiment 4

Die Leuchtdiode an zwei Solarzellen

Da wir noch eine zweite Solarzelle zur Verfügung haben, wollen wir sie in unseren Aufbau einsetzen mit der Hoffnung, so die Leuchtdiode zum Leuchten zu bringen. Wir legen sie zur ersten Solarzelle in Reihe, wie wir das auch mit zwei Batterien tun würden, um die Spannung zu erhöhen und diesmal funktioniert es tatsächlich: Die Leuchtdiode

leuchtet, wenn Licht auf die beiden Solarzellen fällt.

Um zu einer Erklärung zu kommen, warum ein Motor zum Drehen mit einer Solarzelle auskommt, eine scheinbar empfindlichere Leuchtdiode zum Leuchten aber zwei benötigt, wollen wir uns zunächst mit dem Aufbau von Materie beschäftigen, dann die Eigenschaften von Leuchtdioden und anderen Dioden kennen lernen und uns zum Schluss wieder der Solarzelle zuwenden.





Aufbau der Materie

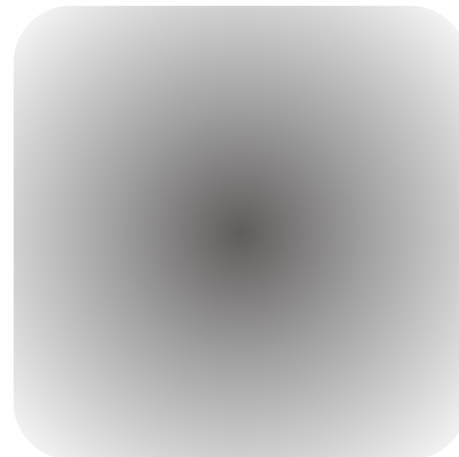
Bereits die griechischen Philosophen Leucippus (um 500 v. Chr.) und Demokrit (460 - 370 v. Chr.) machten sich Gedanken darüber, dass man ein Stück Materie nicht beliebig oft teilen kann. Irgendwann müsste man zu dem Grundbaustein kommen, aus dem alles aufgebaut ist. Diesen Baustein nannten sie *atomos*, das heißt das Unteilbare. Obgleich sie damit aus heutiger Sicht erstaunlich gut geschlossen hatten, wurden ihre Gedanken 2000 Jahre lang nicht mehr aufgegriffen, weil die Mittel fehlten, ihre Theorie zu überprüfen. Erst der englische Chemiker John Dalton kam 1803 wieder auf die Atome zurück. In der Folgezeit verbreitete sich die Idee in der wissenschaftlichen Welt und wurde durch den Neuseeländer Lord Rutherford und den Dänen Niels Bohr weiter verfeinert. Auch wenn wir heute wissen, dass die Atome noch weiter teilbar sind, reicht das Modell für uns völlig aus.

Wir wollen Atome so beschreiben, wie es im KARLSRUHER PHYSIKKURS [1] gemacht wird, einem Kurs, der am Institut für Didaktik der Physik der Universität Karlsruhe entwickelt wurde. Die folgenden Beschreibungen sind so weit gekürzt und abgewandelt, wie wir sie für diesen Lectron - Kasten benötigen. Näheres zu dem sehr empfehlenswerten Kurs, bei dem

der Versuch einer Neuordnung der Inhalte der Physik unternommen wird, sind im Literaturverzeichnis zu finden.

Atome sind kugelförmig. Sie bestehen aus einem sehr kleinen, schweren Kern, dessen Masse 99,9% der Gesamtmasse des Atoms ausmacht, und einer leichten und relativ großen Hülle. Der Kerndurchmesser beträgt etwa ein 50 000stel des Hüllendurchmessers. Kern und Hülle sind elektrisch unterschiedlich geladen: Der Kern ist positiv, die Hülle negativ; die Ladungen von Kern und Hülle sind betragsmäßig gleich, so dass das Atom nach außen hin elektrisch neutral ist, seine Gesamtladung ist null.

Die Atomhülle muss man sich nach diesem Modell als aus einem Stoff bestehend vorstellen, der kontinuierlich in der



Umgebung des Kerns (siehe Abbildung) verteilt ist. Wir nennen diesen Stoff ELEKTRONIUM.

Die Dichte des Elektroniums ist nicht konstant. In unmittelbarer Nähe des Kerns ist sie am größten und nimmt dann mit zunehmendem Abstand vom Kern zunächst sehr schnell und dann immer langsamer ab. Die Atomhülle ist also kugelförmig, hat aber keinen scharfen Rand, an dem sie endet. Es ist mit dem Elektronium also ähnlich wie mit der Lufthülle der Erde: Auch sie wird mit zunehmender Entfernung von der Erdoberfläche immer dünner, aber es lässt sich keine scharfe Grenze angeben, an der sie endet. Damit wir überhaupt eine Größe des Atoms angeben können, nehmen wir den Radius, innerhalb dessen sich 90% des Elektroniums befindet. Verschiedene Atomsorten haben verschiedene Radien; ein typischer Radius hat den für uns unvorstellbar kleinen Wert von 10^{-10} m.

Das Atom hat nun eine ganz merkwürdige Eigenschaft, die zutage tritt, wenn man versucht, einen Teil des Elektroniums zu entfernen: Man kann nämlich aus dem Elektronium nur Portionen heraus holen, die das ganzzahlige Vielfache einer ELEMENTARPORTION ausmachen, aber nie Mengen, die dazwischen liegen. (Dabei soll uns hier nicht interessieren, wie man dies technisch macht.)

Wie die kleinsten Portionen des Lichts

(Photon) oder der chemischen Stoffe (Moleküle) einen eigenen Namen haben, so hat auch die kleinste Elektroniumportion einen eigenen Namen: Es ist das Teilchen ELEKTRON. Seine wichtigsten Eigenschaften sind seine winzige Masse von 10^{-30} kg, und eine elektrische Ladung von minus $1,6 \cdot 10^{-19}$ C; außerdem verhält es sich wie ein kleiner Dauermagnet ganz bestimmter Stärke.

Solange sich das Elektronium in der Atomhülle befindet, merkt man allerdings nichts von seiner Eigenschaft, nur in Elementarportionen aufzutreten: In der Hülle bilden die Elementarportionen einen kontinuierlich verteilten »Brei«, so dass keine Grenzen zwischen einzelnen Portionen feststellbar sind.

Auch der Atomkern besteht aus einem Stoff; allerdings ist die Dichte dieser Kernmaterie im Kerninneren konstant. Aus dem Kern lassen sich ebenfalls nur bestimmte Portionen des Kernmaterials heraus holen. Im Unterschied zur Hülle gibt es jedoch zwei etwas verschiedene Elementarportionen, sie heißen PROTON und NEUTRON. Protonen und Neutronen haben eine viel größere Masse als Elektronen, sie sind etwa 1800 mal so schwer. Die elektrische Ladung des Protons hat denselben Betrag wie die des Elektrons, aber entgegengesetztes Vorzeichen, also $+1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Das Neutron ist ungeladen. Auch Protonen und Neutronen sind mag-



netisch, allerdings wesentlich schwächer als die Elektronen. Da das Atom nach außen hin elektrisch neutral ist, müssen im Kern genauso viele Protonen vorhanden sein wie in der Hülle Elektronen sind. Die Anzahl der Protonen bestimmt, um welches Atom es sich handelt: Wasserstoffatome haben ein Proton im Kern, Heliumatome zwei, Lithiumatome drei usw. Im so genannten PERIODENSYSTEM sind die Atome nach der Zahl der Protonen im Kern, der Ordnungszahl, angeordnet. Ein Atom hat seine natürliche Kugelform nur, wenn man es »in Ruhe lässt«; darunter wollen wir verstehen, dass nichts in der Nähe ist, was das Atom verformen könnte: also keine anderen Atome und keine elektrischen oder magnetischen Felder. Man kann nämlich diese Kugel genauso verformen wie ein aufgeblasener Luftballon verformt werden kann, indem man ihn drückt oder an ihm zieht. Lässt man wieder los, so geht er zurück in seinen ursprünglichen Zustand. Auch er hat seine normale Form nur, wenn man ihn in Ruhe lässt; bei Atomen ist es ähnlich. Die Bedingung, dass sich kein anderes Atom in der Nähe befindet, ist bei gasförmigen Stoffen erfüllt, denn die einzelnen Atome haben einen relativ großen Abstand voneinander. Bei Flüssigkeiten und festen Stoffen liegen die Atome dagegen dicht an dicht. Mit der Form der Atome in diesen Stoffen wollen

wir uns später befassen; im Augenblick betrachten wir nur solche freien Atome gasförmiger Stoffe. Zur Verformung eines Atoms oder eines Luftballons braucht man immer Energie. Einem Luftballon kann man die Energie auch auf andere Weise zuführen als durch drücken: Man kann z. B. einen Tennisball gegen ihn werfen. Der Tennisball verändert während des Aufpralls die Form des Luftballons. Die Energie dafür kommt vom Tennisball, der beim Aufprall abgebremst wird. Der Luftballon behält die Verformung natürlich nicht bei, sondern springt sofort wieder zurück in seine ursprüngliche Form, wobei er den Tennisball wegkatapultiert. Atome kann man auf ganz ähnliche Art verformen, indem man andere Teilchen – zum Beispiel Photonen oder Elektronen – dagegen schießt. Bei dieser Verformung verhalten sich die Atome aber wieder recht merkwürdig und ganz anders als ein Luftballon: Ähnlich wie man aus dem Elektronium nur ganz bestimmte Mengen herausnehmen konnte, können Atome nur ganz bestimmte Mengen Energie aufnehmen und in ganz bestimmte dazugehörige Formen »einrasten«. Diese Form behalten sie zunächst bei, springen dann aber nach einer gewissen Zeit in den unverformten Zustand zurück und geben dabei die Verformungsenergie wieder ab. Den Zu-

stand mit unverformter Hülle nennt man den GRUNDZUSTAND des Atoms und den Verformungsvorgang ANREGUNG. Von einem Atom, das in eine der möglichen Formen eingerastet ist, sagt man, es befindet sich in einem ANGEREGTEN ZUSTAND. Die Energie des Atoms im angeregten Zustand kann also nur ganz bestimmte Werte annehmen. Im Grundzustand hat es den niedrigsten Energiewert, die Energiewerte in den möglichen angeregten Zuständen liegen um den Betrag höher, der bei der Anregung aufgenommen wird. Ein Atom verweilt eine gewisse Zeit in einem angeregten Zustand. Die Dauer ist wieder eine der Besonderheiten in der Welt der Atome: Sie hat für ein bestimmtes Atom oder eine Atomsorte keinen bestimmten Wert, sondern schwankt vielmehr statistisch. Das bedeutet nun aber nicht, dass man gar nichts über die Dauer eines angeregten Zustandes sagen könnte. Betrachtet man nämlich eine sehr große Zahl gleichartiger angeregter Atome, so ist nach einer bestimmten Zeit die Hälfte der Atome in den Grundzustand zurück gekehrt. Wartet man noch einmal dieselbe Zeit, kehrt die Hälfte der dann noch im angeregten Zustand verbliebenen Atome in den Grundzustand zurück, usw. Man kann also die HALBWERTSZEIT angeben, in der gerade die Hälfte der angeregten Atome in den Grundzustand zu-

rückgekehrt ist. Die Zahl der Atome im angeregten Zustand nimmt wegen dieser Gesetzmäßigkeit exponentiell ab. Typische Halbwertszeiten sind 10^{-8} Sekunden. Wann ein einzelnes Atom aus seinem angeregten in den Grundzustand zurückkehrt, lässt sich nicht voraussagen. Ein einzelnes Atom »weiß« nicht, wann es in den Grundzustand zurückkehren soll; es ist vielmehr so, als ob das Atom ständig in schneller Folge eine Münze wirft und je nach Ausgang des Wurfs zurückgeht oder nicht. Auch wie ein angeregtes Atom auf den verschiedenen Wegen (wenn möglich), in den Grundzustand zurückkehrt, ist statistisch geregelt. Zur Anregung von Atomen kann man – wie ausgeführt – Photonen oder auch andere Teilchen verwenden, z. B. Elektronen, Ionen, Protonen, Atome und Moleküle. Sehr häufig werden Elektronen benutzt. Damit ein Elektron ein Atom anregen kann, braucht es zusätzlich zu seiner Ruheenergie diejenige Energiemenge, die für die Anregung erforderlich ist. Die Energie eines Elektrons lässt sich leicht erhöhen, indem man es in schnelle Bewegung versetzt, d.h. mit Impuls lädt, denn zusammen mit dem Impuls bekommt es auch Energie. Dieses Laden des Elektrons mit Impuls und Energie bewerkstelligt man dadurch, dass man es in ein elektrisches Feld bringt. Da Elektronen elektri-



sche Ladung tragen, zieht das Feld an ihnen, Impuls und Energie der Elektronen nehmen zu. Wenn nun solche schnellen Elektronen auf Atome treffen, werden die Atome verformt und können in angeregte Zustände gelangen. Hat das Elektron mehr Energie bekommen, als für eine Anregung nötig ist, nimmt es die überschüssige Energie nach dem Zusammenprall mit dem Atom wieder mit. Es unterscheidet sich in dieser Eigenschaft von den Photonen, die bei der Anregung eines Atoms verschwinden.

In Feststoffen, mit denen wir uns im Folgenden beschäftigen, ist das Elektronium etwas anders verteilt als in Gasen. Die obere Abbildung zeigt, wie man sich das Innere eines Feststoffs, in diesem Fall eines Kristalls, vorstellen kann. Je dunkler der Grauton in der Abbildung, desto höher ist die Dichte des Elektroniums. An den Stellen maximaler Dichte befinden sich die Atomkerne. Mit zunehmendem Abstand von einem Kern nimmt die Dichte des Elektroniums zunächst ab bis sie in der Nähe des nächsten Kerns wieder zunimmt.

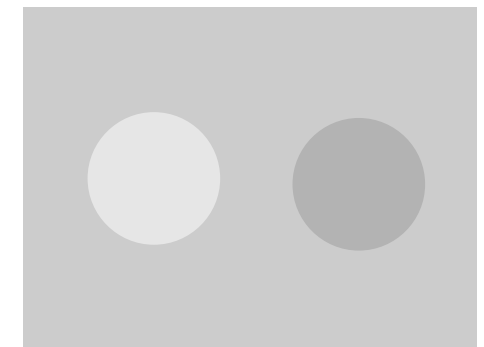
Wie bei einzelnen Atomen, befindet sich der größte Teil des Elektroniums in der Nähe der Kerne, dazwischen gibt es aber keine Hohlräume, der ganze Raum zwi-

schen den Kernen ist mit Elektronium ausgefüllt. Auch existiert keine eindeutige Grenze zwischen dem Ende des einen Atoms und dem Anfang des nächsten. Das Elektronium der einzelnen Atome ist zu einem durchgehenden Stoff verschmolzen.

Wir hatten gesehen, dass das Elektronium in der Hülle eines Atoms verformt werden und dass es in bestimmte Formen einrasten kann; dasselbe trifft auch für das Elektronium in Feststoffen zu.

Verformen bedeutet hier, genauso wie beim Einzelatom, dass etwas Elektronium von einer Stelle zu einer anderen verschoben wird. Es ändert sich also die Verteilung des Elektroniums: An einer Stelle nimmt die Dichte des Elektroniums ab, an einer anderen entsprechend zu.

Die untere linke Abbildung zeigt das Elektronium im unverformten Zustand. Der Übersichtlichkeit halber ist es hier mit konstanter Dichte dargestellt. In der unteren rechten Abbildung ist gezeigt, wie wir uns eine Verformung vorstellen können: An einer Stelle hat die Dichte abgenommen (heller Bereich), an einer anderen hat sie dafür zugenommen (dunkler Bereich). Es entstehen also eine Verdünnung und eine Verdichtung.



Elektrizitätsleitung in Feststoffen

Es ist allgemein bekannt, dass Metalle die Elektrizität gut leiten und die meisten Kunststoffe nicht, weswegen man letztere auch als Isolierung für Drähte verwendet. Wir wollen nun an unserem Modell betrachten, wie diese Leitung zustande kommt.

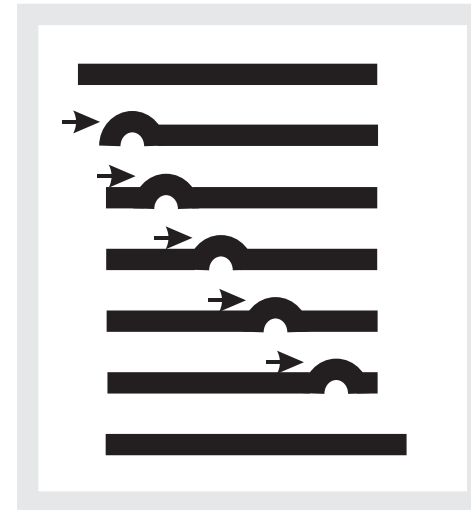
Beim Aufbau der Atome hatten wir gesehen, dass Elektrizität immer mit Teilchen verbunden ist, nämlich mit den positiven Protonen im Kern und der negativ geladenen Elektroniumhülle. Wenn Elektrizität durch einen Draht hindurchfließen soll, müssen sich entweder die Kerne, das Elektronium oder beide bewegen. Die Kerne sind nun fest an ihren Platz im Kristallgitter gebunden, also bleibt nur das Elektronium über.

Das Elektronium ist allerdings auch nicht so frei beweglich, dass es ohne weiteres bei einem Potentialunterschied als Ganzes in Bewegung kommt und an den Kernen vorbei durch den Feststoff fließt. Es hängt vielmehr so fest an ihnen, dass es sich auf diese Art nicht verschieben lässt. Ein Beispiel aus dem Alltagsleben verdeutlicht das Problem: Wenn man es nicht schafft, einen großen Teppich im Ganzen über den Boden zu verschieben, weil er zu schwer ist, kann man sich dadurch helfen, dass man zunächst eine Falte in eine Seite hineindrückt. Diese

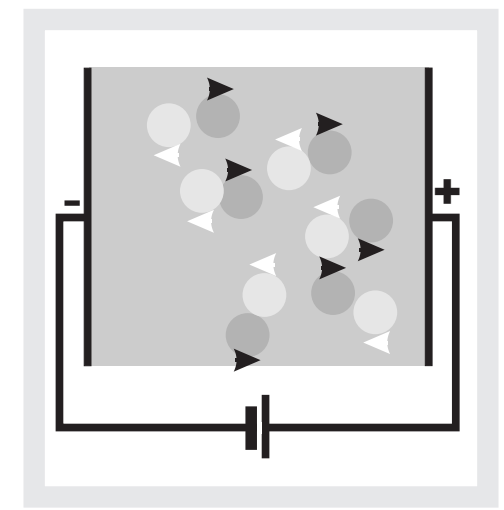
lässt sich anschließend leicht durch den Teppich hindurch schieben (siehe die linke Abbildung); letztendlich ist auf diese Weise der ganze Teppich ein Stück verschoben.

Das Elektronium in einem Feststoff verhält sich ähnlich wie der Teppich; als Ganzes lässt es sich nicht bewegen, kleine Verformungen dagegen kann man leicht durch den Feststoff hindurch schieben. Ein Feststoff ist daher elektrisch leitfähig, wenn sich sein Elektronium leicht verformen lässt.

Verbindet man eine Seite des Feststoffes mit dem Pluspol einer Batterie und die andere Seite mit dem Minuspol, so liegt ein Potentialunterschied am Feststoff vor und die Verdichtungen wandern in Richtung Pluspol während sich die Verdünnungen in Richtung Minuspol bewegen. Wie die Verschiebung der Falte im Teppich eine Folge hat, so resultiert aus den Verschiebungen der Verdichtungen und Verdünnungen ein Netto-Transport von Elektronium und damit ein Stromfluss. Der Transport von Elektrizität durch Feststoffe kommt zustande durch die Bewegung von Verformungen des Elektroniums. In Metallen lässt es sich leicht verformen. Zur Anregung reicht die Energie einer angeschlossenen Batterie und mit den Verformungen wird Elektrizität transportiert: Metalle sind deswegen gute Leiter. Nicht



Eine einfache Möglichkeit, einen Teppich zu verschieben, nach [1]



Bei angeschlossener Batterie wandern die Verdünnungen in Richtung Minuspol und die Verdichtungen in Richtung Pluspol

so bei den meisten Nichtmetallen: Hier schafft es die Batterie nicht, das Elektronium anzuregen, es gibt keine Verformungen und es kann deswegen keine Elek-

trizität transportiert werden. Die meisten Nichtmetalle und Kunststoffe leiten die Elektrizität nicht und eignen sich deswegen zur Isolierung von Leitern.

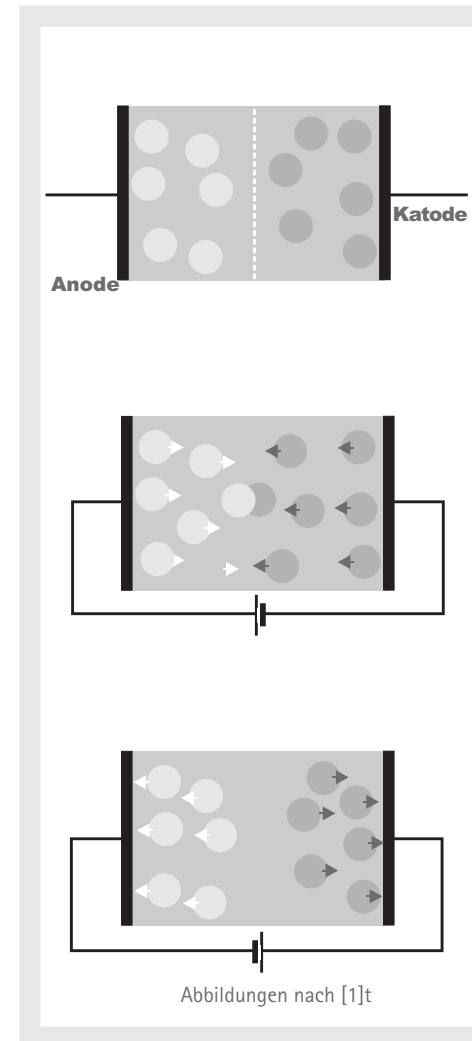


Funktionsweise einer Leuchtdiode

Bisher haben wir Feststoffe betrachtet, die – sieht man von den Verdünnungen und Verdichtungen ab – homogen (gleichartig) aufgebaut waren. LEDs werden z. B. aus Galliumarsenid hergestellt. Galliumarsenid (GaAs) ist eine chemische Verbindung aus dem Metall Gallium und dem Nichtmetall Arsen. Nun gehen wir einen Schritt weiter und schaffen uns durch gezielten Einbau von Fremdatomen in das Ausgangsmaterial Galliumarsenid ein Bauelement, das in einem Teil des Materials Verdichtungen und im anderen Teil Verdünnungen aufweist. (obere Abbildung). Die beiden Teile sind miteinander verbunden und an ihren Enden mit Anschlüssen versehen; die Anschlüsse heißen KATODE und ANODE. Die Katode ist häufig der kürzere Anschluss. Das so entstandene Bauelement ist die bereits bekannte Leuchtdiode. Ihre wichtigste Eigenschaft ist, dass sie in einen Stromkreis eingebaut, die Elektrizität nur in einer Richtung durchlässt und dabei Licht einer bestimmten Farbe, also mit einer bestimmten Wellenlänge abgibt. Die ersten brauchbaren Leuchtdioden kamen Anfang der siebziger Jahre auf

den Markt, strahlten im roten Bereich und waren aus dem Material Galliumarsenid aufgebaut. Es folgten grüne und gelbe aus Galliumphosphid sowie infrarote Leuchtdioden; mittlerweile gibt es auch blaue Dioden aus Galliumnitrid. Die Helligkeit der Dioden ist durch Einsatz neuer Materialien wie Aluminium-Indium-Gallium-Phosphat und sehr transparenter Substrate beachtlich gesteigert worden, so dass man durch Kombination der verschiedenen Farben fast das ganze Farbspektrum (inklusive weißem Licht aus der Addition von blauem und gelbem) erzeugen kann und ein Einsatz bei hellem Tageslicht möglich ist. Es gibt unzählige Anwendungsfälle, angefangen von Fernbedienungen (hauptsächlich mit infrarot strahlenden Dioden) bis hin zu Werbetafeln mit bewegten Bildern. Gegenüber Glühlampen haben sie den Vorteil einer ungleich längeren Lebensdauer und einer besseren Energieausnutzung, außerdem können sie in nahezu jeder beliebigen Form hergestellt werden.

Wenn wir eine solche Diode zunächst so an eine Batterie anschließen, dass der Pluspol der Batterie mit der Seite der Verdünnungen (Anode) und der Minuspol



mit der Seite der Verdichtungen (Katode) verbunden ist, wandern die Verdünnungen in Richtung Minuspol, also zur Mitte der Diode, die Verdichtungen in Richtung Pluspol, also auch zur Mitte. Gleichzeitig liefert die Batterie über die Anschlüsse links Verdünnungen und rechts Verdichtungen nach, denn auch in den Metalldrähten der Kabel wandern die Verdünnungen in Richtung Minuspol und die Verdichtungen in Richtung Pluspol. In der Mitte der Diode treffen sie nun aufeinander, und vernichten sich gegenseitig (»rekombinieren«) in dem Maß, wie sie von den Anschlüssen der Diode nachgeliefert werden. Ein Stromfluss ist die Folge. (mittl. Abb.) Die in den Verdichtungen und Verdünnungen gespeicherte Energie wird als Licht und Wärme (»Entropie«) abgegeben. Polen wir um, wandern die Verdünnungen wieder in Richtung Minus- und die Verdichtungen in Richtung Pluspol. Da in der Mitte keine neuen Verdichtungen und Verdünnungen entstehen, kommt der Stromfluss rasch zum Erliegen: Die Diode sperrt (untere Abbildung) und sendet natürlich kein Licht mehr aus, wie wir das bereits im zweiten Experiment festgestellt haben.



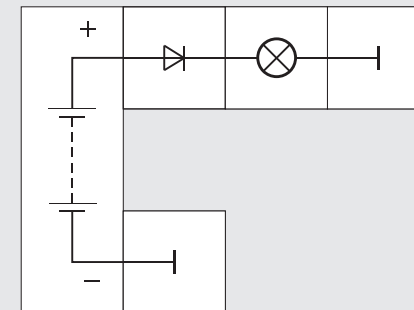
Experiment 5 Die Siliziumdiode

Wenn wir uns das Schaltzeichen der Leuchtdiode genau ansehen, so stellen wir fest, dass es im Experimentierkasten weitere Bausteine gibt, die ein ähnliches Schaltzeichen aufweisen, allerdings ohne die beiden Pfeile, die das abgegebene Licht symbolisieren. Wir schließen daraus, dass es sich ebenfalls um Dioden handelt und wollen unsere Vermutung in einem Experiment nachprüfen. Da wir wegen der fehlenden Pfeile im Symbol nicht mit der Abstrahlung von Licht rechnen können, wollen wir einen möglichen Stromfluss mit einer Glühlampe nachweisen.

Wir fangen mit dem Baustein an, der nur das uns bereits bekannte Diodensymbol auf seiner Deckplatte trägt und bauen die nebenstehende Schaltung auf. Legen wir den Batteriebaustein an, leuchtet die

Glühlampe auf. Drehen wir den Diodenbaustein um 180° in der Schaltung, bleibt die Glühlampe dunkel. Unsere Vermutung hat sich bestätigt: Der Baustein enthält eine Diode, und zwar handelt es sich in diesem Fall um eine, die aus dem weit verbreiteten Material Silizium aufgebaut ist. Sie hat - wie eine Leuchtdiode - zwei Anschlüsse; der Kathodenanschluss ist wie bei Dioden allgemein üblich mit einem Ring gekennzeichnet; der andere Anschluss ist dann die Anode.

Die Funktionsweise der Diode beim Anlegen von Spannung ist genauso wie bei der Leuchtdiode, nur dass bei der Rekombination von Verdichtungen und Verdünnungen die in ihnen gespeicherte Energie auf den Träger Entropie umgeladen wird. Bei längerem Betrieb könnten wir an einem offenem Baustein also feststellen, dass sich der Diodenkörper erwärmt.



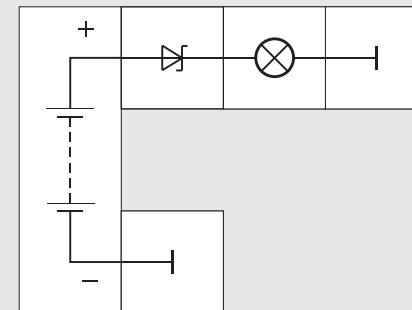


Experiment 6

Die Schottkydiode

Wenn wir die Siliziumdiode aus dem Versuchsaufbau heraus nehmen und dafür den Diodenbaustein einsetzen, dessen Kathode im Schaltsymbol wie ein geschwungenes S aussieht, passiert das Gleiche wie bei der Siliziumdiode. Die Glühlampe leuchtet bei Polung der

Diode in Durchlassrichtung und sie ist dunkel in Sperrrichtung. Das S steht im Übrigen für Schottky, den Erfinder dieser Diode. Obwohl wir im Augenblick keinen Unterschied zur Siliziumdiode feststellen können, unterscheidet sie sich doch in ihren Eigenschaften wesentlich von ihr, wie wir in späteren Experimenten noch herausfinden werden.





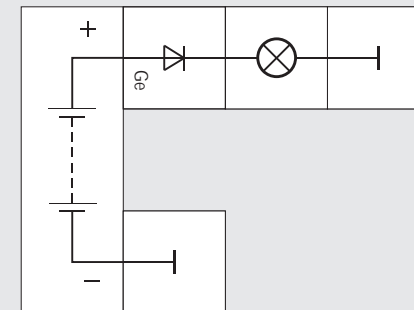
Experiment 7

Die Germaniumdiode

Das gleiche Experiment mit der Diode ausgeführt, die neben dem Diodenzeichen noch die Abkürzung Ge aufweist, ergibt nichts wesentlich Neues. Vielleicht fällt uns auf, dass die Glühlampe bei Polung der Diode in Durchlassrichtung ein klein wenig dunkler leuchtet als bei den vorangegangenen Experimenten mit den beiden anderen Dioden. In Sperrrichtung der Diode ist die Glühlampe jedoch ebenfalls dunkel. Die Abkürzung Ge steht für Germanium, ein Halbleitermaterial, das bevor das Material Silizium seinen Siegeszug antrat, zur Herstellung der ersten Transistoren und Dioden ver-

wendet wurde.

Unter einem Halbleiter versteht man einen Festkörper (ein festes Material), den man bezüglich seiner elektrischen Leitfähigkeit sowohl als Leiter als auch als Nichtleiter betrachten kann. Die Leitfähigkeit von Halbleitern ist stark temperaturabhängig. In der Nähe des absoluten Temperaturnullpunktes sind Halbleiter Isolatoren. Bei Raumtemperatur sind sie - abhängig vom verwendeten Material - leitend oder nichtleitend. Die elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern nimmt mit steigender Temperatur zu, sie gehören damit zu den Heißeleitern. Die Leitfähigkeit lässt sich durch das Einbringen von Fremdatomen in weiten Grenzen gezielt beeinflussen.





Experiment 8

Der Sperrstrom der Germaniumdiode

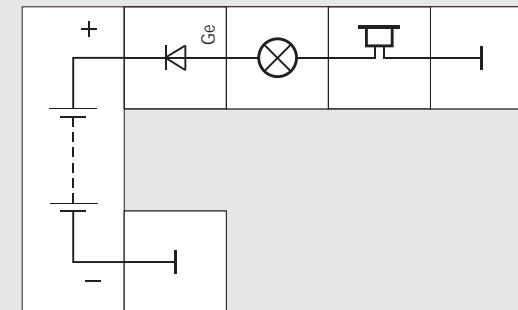
Aus dem Nichtaufleuchten der Glühlampe bei Polung der jeweiligen Diode in Sperrrichtung haben wir bisher geschlossen, dass kein Strom fließt. Dieser Schluss stimmt nun so nicht ganz, wie wir im folgenden Experiment erkennen werden.

Wir polen die Germaniumdiode so, dass sie sperrt, die Glühlampe also nicht leuchtet. In Reihe zu den beiden Bauelementen legen wir jetzt aber noch den Ohrhörer. Er ist ein sehr empfindliches Nachweisinstrument für Wechselströme. Wird er von Gleichstrom durchflossen, hören wir nichts. Lediglich beim Ein- und beim Ausschalten des Stromes gibt es einen Knacklaut zu hören.

Wir werden also zunächst nichts hören. Drehen wir das Lämpchen aber gerade so weit aus seiner Fassung, dass sein unterer Mittenkontakt den entsprechenden Gegenpol in der Fassung nicht mehr berührt, hören wir es deutlich knacken. Mit

diesem Wackelkontakt können wir offensichtlich einen fließenden Gleichstrom gut unterbrechen und damit nachweisen. Der Strom ist wesentlich kleiner als der in Durchlassrichtung und reicht – wie ausprobiert – nicht aus, das Lämpchen zum Leuchten zu bringen; er ist aber auch nicht Null, wie wir bisher voreilig angenommen hatten. Da er in Sperrrichtung fließt, heißt er SPERRSTROM.

Führen wir entsprechende Versuche mit der Siliziumdiode aus, werden wir wahrscheinlich nichts oder allenfalls nur ganz schwaches Knacken vernehmen. Der Sperrstrom dieser Diode ist zwar auch nicht Null, aber doch wesentlich kleiner als der von Germaniumdioden. Das ist unter anderem auch ein Grund dafür, warum Germaniumdioden durch Siliziumdioden in vielen Anwendungsfällen ersetzt wurden. Hinzu kommt, dass bei steigender Umgebungstemperatur (Dioden erwärmen sich im Betrieb) allgemein der Sperrstrom einer Diode zunimmt, der einer Germaniumdiode dann aber bereits unerwünscht groß wird.



Experiment 9

Bauteilkennlinien

In den bisherigen Versuchen haben wir gesehen, dass Dioden in einer Richtung Strom durchlassen und in der anderen nicht. Wo sind dann eigentlich die Unterschiede bei den drei Typen? Das wollen wir jetzt herausfinden.

In der Elektrotechnik und der Elektronik ist es üblich, die wesentlichen Eigenschaften eines Bauteils nicht mit vielen Worten, sondern mit Tabellen oder Diagrammen zu beschreiben. Eine wichtiges Beschreibungsmittel dabei ist die Strom - Spannungs - Kennlinie. Hierbei wird an das zu untersuchende Bauteil eine variable Spannung gelegt und der jeweils fließende Strom gemessen. Die Wertepaare trägt man dann in ein Diagramm ein und verbindet die Punkte miteinander. Die daraus entstehende Kennlinie ist sehr aussagekräftig, sie charakterisiert das Bauteil.

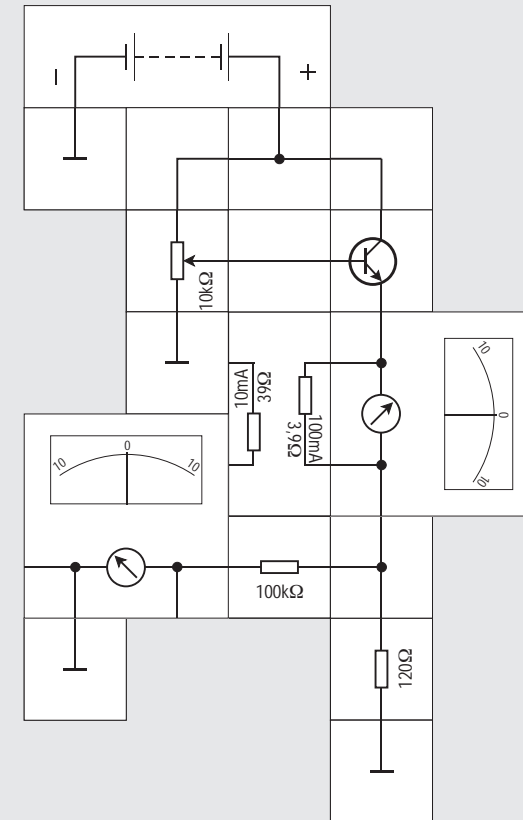
Der Versuchsaufbau für diese Messungen benötigt zwei Instrumente, eins zur Anzeige für die anliegende variable Spannung, das zweite zur Anzeige des dann fließenden Stroms. Strom und Spannungsmessungen sind uns bereits von den Stromkreisen her bekannt. Bei gleichzeitiger Messung gibt es ein kleines Problem, das bisher einfach unterschlagen wurde: Da die Instrumente zur

Anzeige der beiden Größen (kleine) Messströme benötigen, wird ein Messergebnis immer um den Messstrom des anderen verfälscht. Ob diese Verfälschung vernachlässigbar ist, sollte stets vorher überlegt werden.

Das unbeschaltete Messinstrument hat einen Innenwiderstand von $4\text{k}\Omega$ und zeigt Vollausschlag, wenn $0,1\text{mA}$ durch die Spule fließen, d. h. es fallen an ihm $0,1\text{mA} \cdot 4\text{k}\Omega = 0,4\text{V}$ ab. Abhängig vom Versuchsaufbau werden diese maximal $0,4\text{V}$ dem Spannungswert zugeschlagen oder die $0,1\text{mA}$ dem gemessenen Stromwert.

In der nebenstehenden Versuchsanordnung erzeugen wir uns eine variable Spannung mit dem Potentiometer und dem Transistor. Wie die Schaltung im Einzelnen funktioniert, soll hier nicht weiter interessieren. Ist der Drehknopf des Potentiometers im Gegenuhrzeigersinn an den Anschlag gedreht, gibt der Transistor am Emitter (das ist der Anschluss mit Pfeilspitze) 0V ab.

Langsames Drehen im Uhrzeigersinn erhöht die Spannung bis auf gut 8V . Das linke über den $100\text{k}\Omega$ Vorwiderstand angeschlossene Instrument (Vollausschlag bei 10V) zeigt die Spannung an dem zu untersuchenden Bauteil, einen 120Ω Widerstand, an. Das rechte Instrument zeigt uns die Summe aus dem Strom, der

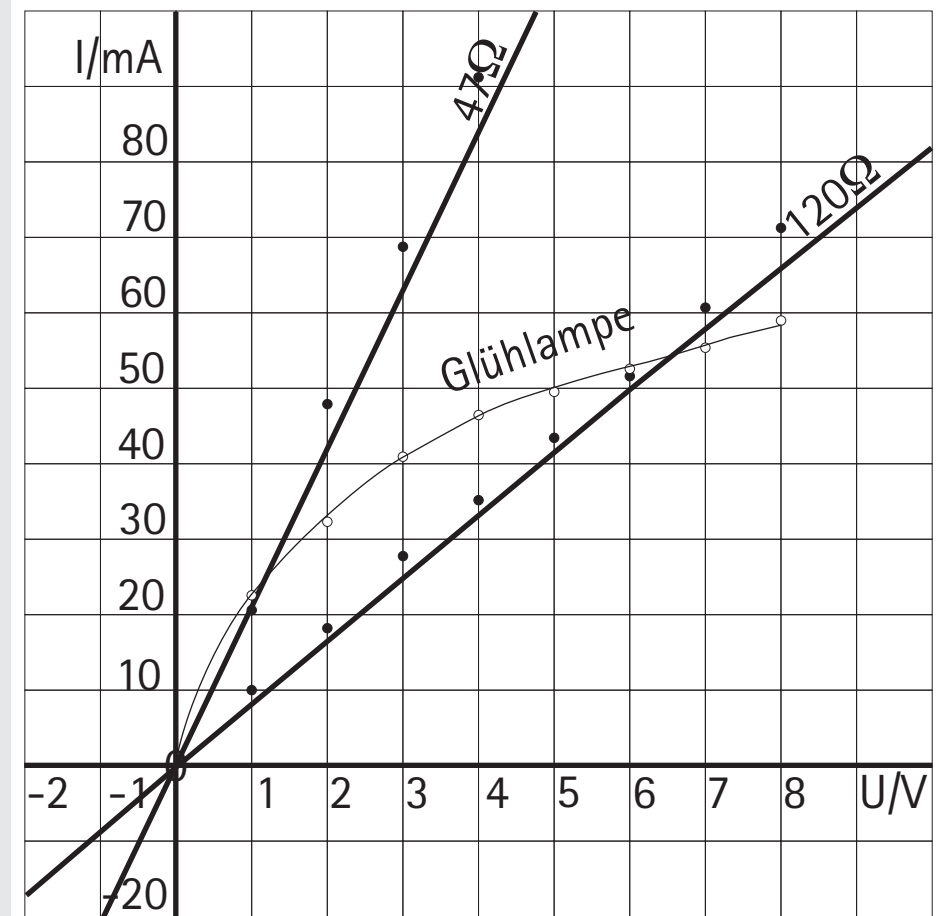


durch den Widerstand fließt, sowie den zur Spannungsmessung erforderlichen Messstrom von maximal 0,1 mA. Der Fehler durch den Messstrom ist bei den zu erwartenden Stromwerten vernachlässigbar klein, die Schaltung also zur Aufnahme der Widerstandskennlinie geeignet. Durch die Verwendung des Nebenwiderstands von $3,9\Omega$ wird der Vollausschlag des Strommessers bei 100 mA erreicht. Wir beginnen die Messung an unserem 120Ω Widerstand mit 0 V. Natürlich fließt dann auch kein Strom, beide Instrumente zeigen Null an. Für uns bedeutet das ein Punkt im Ursprung des Koordinatensystems, bei dem wir die Spannung auf der waagerechten Achse, der Abszisse, und den Strom auf der senkrechten Achse, der Ordinate, aufgetragen haben. Als nächstes drehen wir den Einstellknopf so, dass der Zeiger des linken Instruments ein Skalenteil, also 1 V, anzeigt. Das rechte Instrument wird uns dann einen Strom von knapp 10 mA anzeigen. Auch dieses Wertepaar wird sofort ins Diagramm eingetragen. Das sofortige Eintragen ins Diagramm statt erst eine Tabelle mit allen Messpaaren anzufertigen, hat den Vorteil, dass falsche Messungen sofort als Abweichung vom erwarteten Ergebnis erkannt werden und unmittelbar wiederholt werden

können.

Weitere Messpunkte werden bei 2 V, 3 V usw. bis 8 V ermittelt. Bis auf kleine Abweichungen, die durch Ablese- und Anzeigegenauigkeiten zustande kommen, liegen alle Messpunkte auf einer geraden Linie, die deswegen auch Widerstandsgerade genannt wird. Die Gerade kann über den Nullpunkt hinaus in den 3. Quadranten verlängert werden. Auch wenn der Messaufbau das nicht gestattet, dürfte klar sein, dass bei umgekehrter Polung am Messobjekt der Strom entgegengesetzt durch den Widerstand fließt und deswegen negativ gezählt wird.

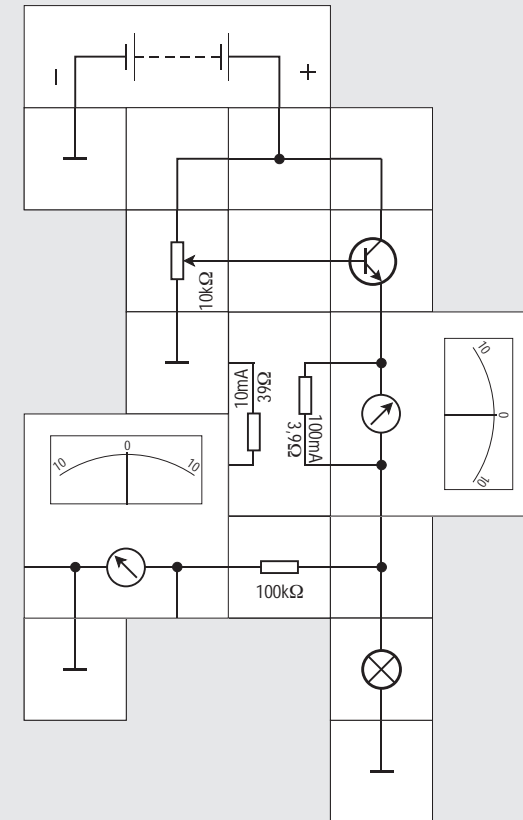
Damit wir etwas Übung im Aufnehmen der Kennlinien bekommen, sollten wir weitere Widerstände statt des 120Ω Widerstands in die Schaltung einsetzen und die Messwerte ins Diagramm eintragen. Wir werden schnell erkennen, dass die Widerstandsgerade umso steiler verläuft, je kleiner der Widerstandswert ist. Bei Widerstandswerten größer als $1k\Omega$ müssen wir den Nebenwiderstand des Strommessers um 180° gedreht ans Messinstrument legen; der Vollausschlag beträgt dann 10 mA. Dafür ist es dann auch günstig, die Ordinate des Diagramms so zu beschriften, dass 1 Kästchen 1 mA entspricht.



Experiment 11**Die Glühlampenkennlinie**

Wenn wir statt des Widerstands das Glühlämpchen in die Messschaltung einsetzen, erwarten wir vielleicht ebenfalls eine gerade Kennlinie; die Aufschrift auf dem Sockel des Lämpchen $6V / 0,05A$ legt nahe, dass es einen Widerstand von $6V / 50mA = 120\Omega$ hat. Die Kennlinie sollte also genauso aussehen wie die des 120Ω Widerstands. Zu unserer Überraschung ist es anders, denn die 120Ω liegen nur im Nennbetrieb vor. Bei kleineren Strömen -wenn das Lämpchen also noch nicht leuchtet - ist sein Widerstand wesentlich kleiner. Der Kaltwiderstand beträgt nur 15Ω bis 20Ω , weswegen die

Kennlinie aus dem Koordinatenursprung zunächst wesentlich steiler hinausläuft und bei steigendem Strom stetig flacher wird. Wir erhalten also keine gerade, sondern eine gebogene Kennlinie. Die Messwerte sind als kleine helle Kreise in das Diagramm auf der vorherigen Seite eingetragen. Die Kennlinie ist charakteristisch für die so genannten KALTLEITER, also für Elemente, die im kalten Zustand einen kleineren Widerstand haben als im heißen. Glühlampen mit Metallfäden gehören zu den Kaltleitern; sie brennen deswegen auch meistens beim Einschalten durch, wenn der bereits an einer Stelle geschwächte Glühfaden einem kurzzeitigen 5- bis 8-fachen Einschaltstrom nicht mehr standhält.



Experiment 12

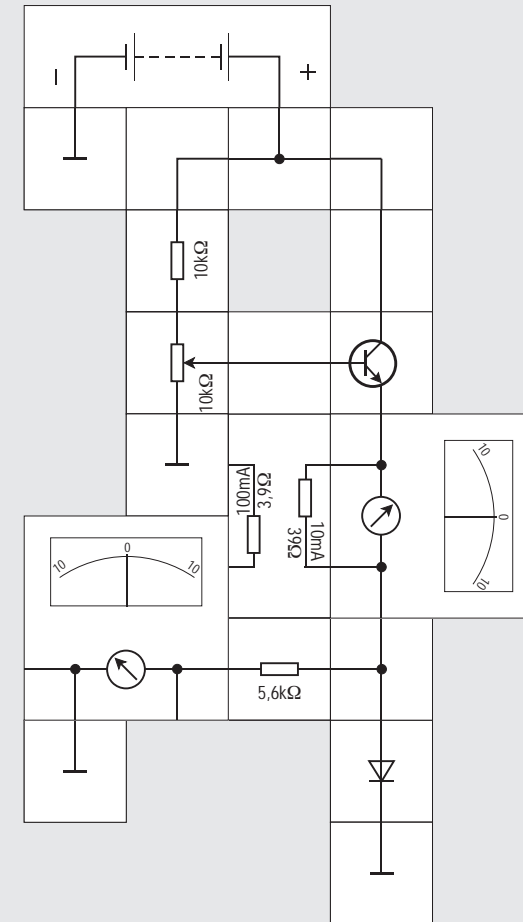
Die Kennlinie einer Siliziumdiode

Bevor wir uns einer Solarzelle zuwenden und ihre Kennlinie aufnehmen, wollen wir vorher noch verschiedene Dioden auf diese Weise untersuchen. Wir beginnen mit der Siliziumdiode und ändern unseren Versuchsaufbau ein wenig ab. Wir werden für die Spannung nicht den vollen Bereich von 0V bis 8V benötigen, sondern nur einen kleinen Teil davon. Deswegen legen wir in Reihe zu dem Potentiometer einen $10\text{k}\Omega$ Festwiderstand; der verbleibende Spannungsbereich ist dann nur noch halb so groß und lässt sich mit dem Drehknopf genauer einstellen. Eine weitere Änderung betrifft den Messbereich des Spannungsmessers. Hier wird nur ein Vollausschlag bei 1V benötigt; statt des $100\text{k}\Omega$ Vorwiderstands muss deswegen der $5,6\text{k}\Omega$ Widerstand eingesetzt werden. Der Nebenwiderstand des Strommessers sollte zunächst so an das rechte Messinstrument gelegt werden, dass sein Vollausschlag bei 10mA erreicht wird.

Wir beginnen die Messung bei 0V, das Potentiometer ist dabei im Gegenuhrzeigersinn an den Anschlag gedreht. Natürlich fließt kein Strom und wir haben unseren ersten Messpunkt gewonnen, den wir in das Diagramm auf Seite 27 eintragen. Durch Drehen des Einstellknopfs in

Uhrzeigerrichtung erhöhen wir die Spannung an der Diode auf 0,1V, was einem Skalenteil entspricht. Es wird weiterhin kein Strom angezeigt und wir haben unseren zweiten Messpunkt, der ebenfalls auf der Abszisse liegt, gewonnen. Auch bei den Spannungseinstellungen 0,2V 0,3V 0,4V und 0,5V wird nichts angezeigt; die Diode ist keineswegs defekt, sondern benötigt eine so genannte FLUSSSPANNUNG, ehe sie anfängt zu leiten. Diese Spannung beträgt bei der Siliziumdiode ungefähr 0,7 - 0,8V. Bei 0,6V wird sich allerdings der Zeiger des Strommessinstruments wahrscheinlich schon ein bisschen bewegen.

Wir können jetzt nicht einfach mit den Spannungswerten 0,7V 0,8V 0,9V usw. fortfahren, da der Strom bei Überschreiten der Flussspannung äußerst rasch ansteigt. Für die Aufnahme der Kennlinie ist es deswegen günstiger, mit dem Einstellknopf des Potentiometers zu versuchen, nacheinander Ströme von 10mA 20mA 30mA usw. einzustellen und die dazu gehörige Spannung möglichst genau abzulesen. Für Ströme größer als 10mA muss der Nebenwiderstand um 180° gedreht werden, 1 Skalenteil entspricht dann 10mA. Da die Diode in Gegenrichtung sperrt, können wir für negative Spannungswerte immer 0mA in das Diagramm eintragen.

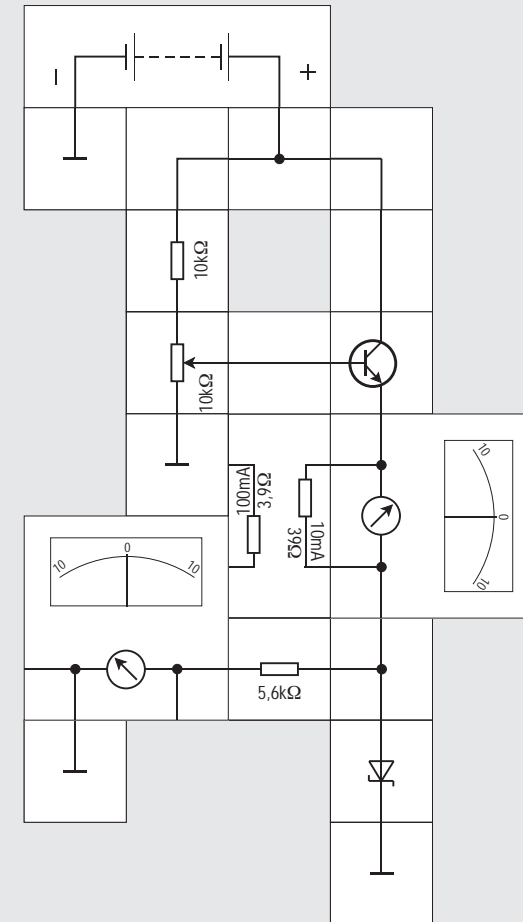


Experiment 13

Die Kennlinie einer Schottkydiode

Tauschen wir in unserem Messaufbau die Siliziumdiode gegen die Schottkydiode aus und beginnen wieder mit der Ausgangsstellung, Messpunkte aufzunehmen, passiert das Gleiche: Auch die Schottkydiode leitet zunächst nicht, sondern sie benötigt ebenfalls eine Flussspannung. Diese liegt allerdings in der Gegend 0,2 bis 0,3V, ist damit nur etwa halb so groß wie die einer Siliziumdiode. Da sowohl Silizium- als auch Schottkydioden zum Gleichrichten größere Wechselströme eingesetzt werden können, verdrängt die Schottkydiode erstere nach und nach in diesen Anwendungen. Wegen der kleineren Flussspannung entsteht bei gleichem Strom nicht so viel unerwünschte Entropie (Wärme), die abgeleitet werden muss, um das Bauteil nicht zu überhitzen. Außerdem kann eine Schottkydiode viel schneller vom leitenden

in den sperrenden Zustand wechseln, wenn die an ihr liegende Spannung umgepolt wird. Das liegt daran, dass sie aus zwei Schichten aufgebaut ist, deren eine im Elektronium nur Verdichtungen enthält, und deren andere ein Metall ist. Verdünnungen im Elektronium, die zum Sperren erst mit den Verdichtungen rekombinieren müssen, kommen gar nicht vor. Dadurch ist die so genannte SPERRVERZÖGERUNGSZEIT viel geringer. Zur Zeit haben Siliziumdioden noch eine größere SPERRSPANNUNG als Schottkydioden. Sperrspannung ist die Spannung, die eine Diode in Sperrrichtung maximal aushält, bevor sie durchschlägt und defekt ist. Ein weiterer Vorteil, der beim industriellen Einsatz ein großes Gewicht hat, ist der im Vergleich erheblich geringere Preis von Si-Dioden. Bei vielen Anwendungen kommt als weiterer Vorteil der erheblich geringere Leckstrom von Si-Dioden hinzu.



Experiment 14**Die Kennlinie einer Germaniumdiode**

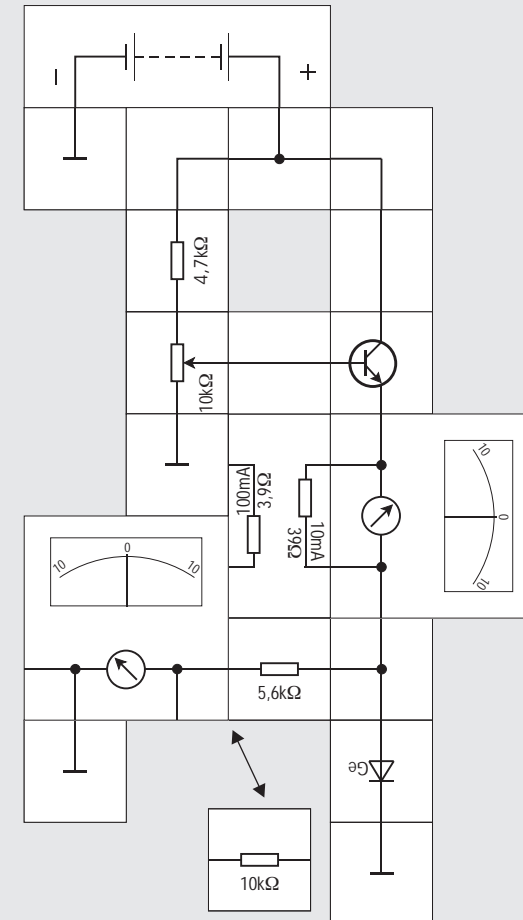
Beim Aufnehmen der Kennlinie für die Germaniumdiode fällt auf, dass sie bereits bei einer kleinen Flussspannung ähnlich wie die Schottkydiode anfängt zu leiten, der Knick in der Kennlinie aber überhaupt nicht ausgeprägt ist und deswegen die Kennlinie mehr das Aussehen einer Widerstandsgeraden hat.

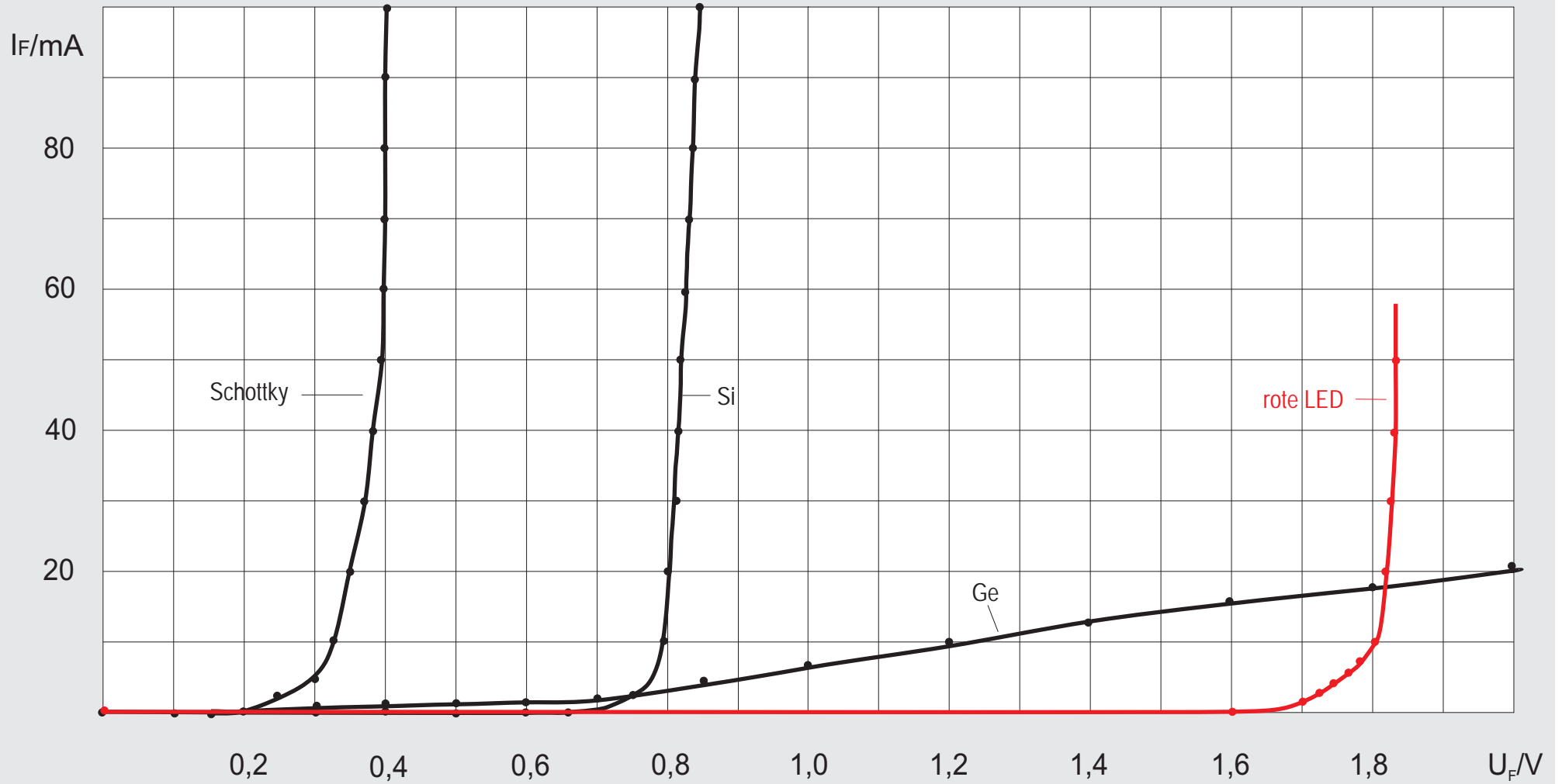
Beim Aufnehmen der Kennlinie müssen wir den Spannungsbereich bis 2V Vollauschlag ausdehnen; wir legen in Reihe zum 5,6 k Ω Widerstand ein 10k Ω Widerstand. Mit diesem Vorwiderstand von zusammen circa 16k Ω entspricht 1 Skalenteil dann 0,2V.

Germaniumdioden werden heute fast nur noch zum Gleichrichten hochfrequenter Spannungen in Rundfunkgeräten eingesetzt. Silizium- und Schottky-

dioden haben sie weitgehend aus ihren Anwendungsgebieten verdrängt. Als hochempfindliche und extrem schnelle Fotodiode hat sie allerdings noch ein weiteres Einsatzfeld. Ein großer Nachteil von Germaniumdioden ist, dass sie nur Temperaturen bis maximal 70°C vertragen. Ihr Sperrstrom steigt mit der Temperatur stärker an als bei den anderen beiden Typen (Einsatzbereich bis 125°C) und wird dann unzulässig groß. Allen drei Diodentypen gemeinsam ist die Temperaturabhängigkeit der Flussspannung. Mit steigender Temperatur wird die Flussspannung kleiner. Wir werden auf diese Abhängigkeit noch bei der Solarzelle zurückkommen (S. 43).

Sofern Dioden nicht gezielt als Fotodioden eingesetzt werden, müssen sie »lichtdicht« gekapselt werden, da ihre Eigenschaften auch in erheblichem Umfang lichtabhängig sind.





Experiment 15

Messung mit Digitalinstrumenten

Aufnahmen von Kennlinien lassen sich genauer und eleganter durchführen, wenn wir zur Messung Digitalmultimeter einsetzen. Diese Instrumente sind inzwischen derart preiswert geworden, dass sie analoge Zeigerinstrumente in der Praxis fast ganz verdrängt haben. Ihre Vorteile sind augenscheinlich:

Sie sind mechanisch robuster, da sie kein empfindliches Messwerk enthalten.

Sie zeigen den Messwert auf mehrere Nachkommastellen an, was Interpolieren (Abschätzen von Zwischenwerten) überflüssig macht.

Ihre Eingänge sind im Allgemeinen derart hochohmig, dass wir uns keine Gedanken über Messfehler, hervorgerufen durch Messströme, machen müssen.

Trotz dieser Vorteile haben wir bewusst zunächst mit den analogen Instrumenten die Kennlinien aufgenommen, denn der unbekümmerte Einsatz digitaler Instrumente bringt leider auch gewisse Nachteile mit sich:

Da alles ganz einfach scheint, macht man sich weniger Gedanken über das, was man

eigentlich misst.

Die hohe Anzahl der Nachkommastellen wird oft kritiklos übernommen, obwohl sie in einem Diagramm gar nicht darstellbar ist.

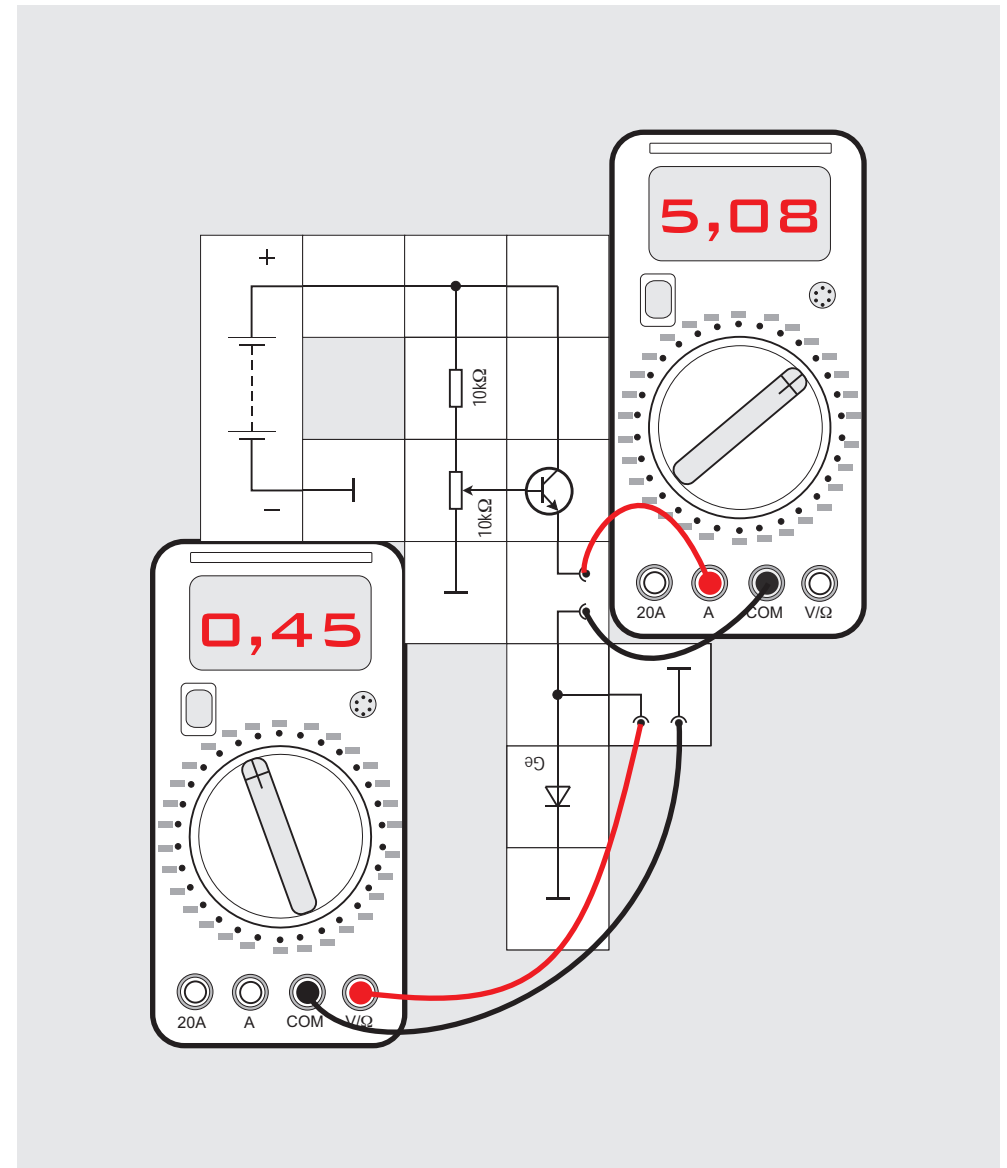
Interpolieren ist in der Technik eine wichtige Fähigkeit, die immer wieder vorkommt, und deshalb geübt werden sollte.

Wegen der hochohmigen Eingänge zeigen Digitalmultimeter selbst auch dann einen von Null verschiedenen Wert an, wenn sie nicht richtig kontaktiert sind; dieser Wert wird oft für bare Münze genommen.

Tendenzmessungen mit sich ständig ändernden Ziffern sind unübersichtlich. Allerdings besitzen viele Instrumente zusätzlich bereits eine Balkenanzeige.

Und nicht zuletzt benötigen sie eine interne Energiequelle zum Messen. Ist diese Batterie bereits etwas schwach und man übersieht die Warnhinweise, hält man die möglicherweise falsch angezeigten für wahre Werte.

Wenn man sich dieser Nachteile bewusst ist, kann man sie leicht vermeiden und die Digitalinstrumente mit Gewinn einsetzen. Der nebenstehende Versuchsaufbau zeigt beispielhaft, wie sie angeschlossen werden müssen.



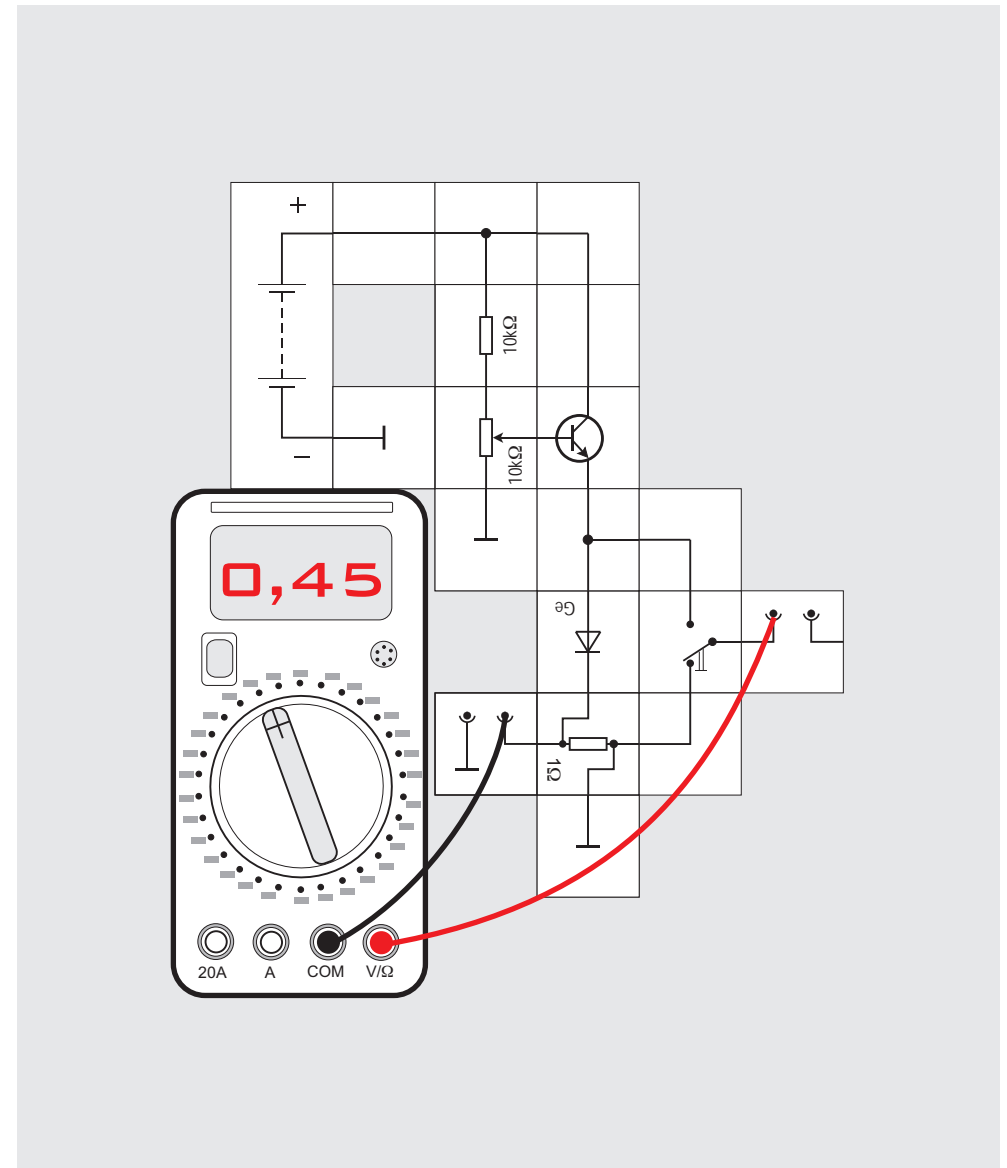
Experiment 16

Messung mit einem Digitalmultimeter

Steht uns nur ein Digitalmultimeter zur Verfügung, können wir den Versuchsaufbau so abändern, dass sich eine Messreihe ebenfalls elegant aufnehmen lässt. Die Abbildung zeigt, wie es gemacht wird, damit wir zwischen der Aufnahme zusammengehörender Strom- und Spannungswerte die Messschnüre am Instrument oder im Aufbau nicht ständig umstecken müssen. Zunächst legen wir in Reihe zu der auszumessenden Diode einen 1Ω Messwiderstand. Wir wandeln dadurch die Strommessung in eine Spannungsmessung um: Fließt nämlich beispielsweise durch diesen Widerstand ein Strom von 3mA , so fällt an ihm eine Spannung von 3mV ab, die das Instrument mit umgekehrten Vorzeichen anzeigt. Das Minuszeichen rührt daher, dass der gemein-

same Messpunkt (COM) zwischen Diode und Messwiderstand gewählt wurde. Dieser Punkt bleibt ständig mit dem Instrument verbunden. Umgekehrt wissen wir, dass eine Anzeige von $-x$ Millivolt durch einen Strom von x Milliampere durch die Diode verursacht wird. Die Spannungsmessung wird wie bisher direkt über der Diode durchgeführt.

Die Auswahl der beiden Messpunkte geschieht mittels des Umschalters. Steht er in der oberen Stellung, zeigt das Instrument die Spannung über der Diode an; in der unteren Stellung erfolgt die dazu gehörende Strommessung. Das Minuszeichen beachten wir nicht, sondern nehmen gleich den in Millivolt angezeigten Wert als Milliampere für den Eintrag in das Diagramm. Dass der Messwiderstand seine beiden Anschlüsse doppelt herausgeführt hat, vereinfacht hier den Aufbau, den eigentlichen Grund dafür werden wir später noch kennen lernen.



Experiment 17

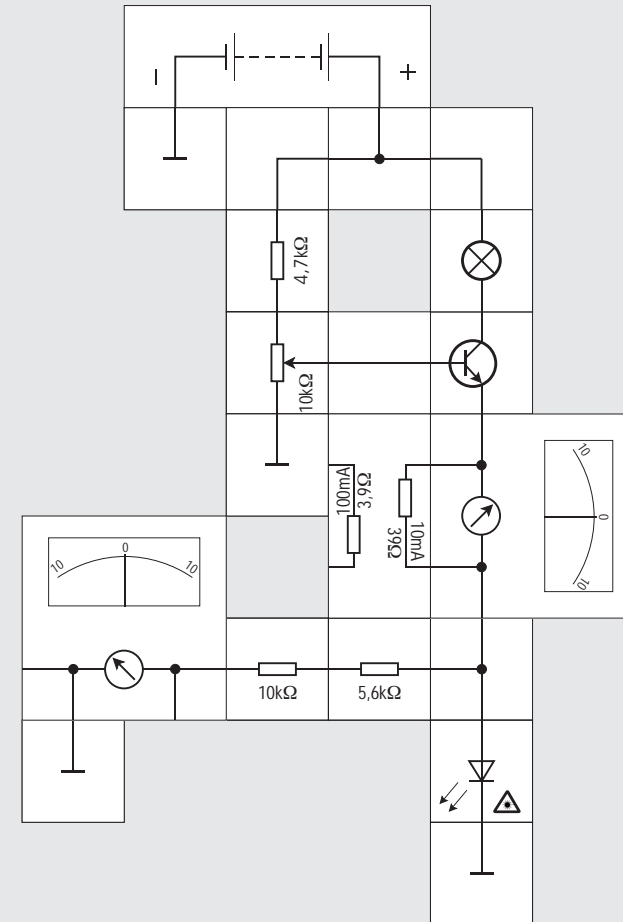
Die Kennlinie einer Leuchtdiode

Wollen wir die Kennlinie einer Leuchtdiode aufnehmen, so benötigen wir ein unbeschaltetes Exemplar; die LED mit Vorwiderstand ist nicht gut dafür geeignet. Als Messobjekt kommt nur die superhelle LED in Frage. Bei diesem Versuch ist doppelte Vorsicht geboten:

Die LED hat keinen Schutzwiderstand und ist bereits bei relativ kleinen Strömen so hell, dass sie unsere Netzhaut dauerhaft schädigen kann, wenn wir direkt in ihren Strahl schauen.

Am besten ist es, sie mit einem Stück durchscheinenden Papier abzudecken. In dieser Versuchsschaltung dient die Glühlampe als Schutzwiderstand. Der Schaltungsaufbau ist eine Variante des Aufbaus aus Experiment 14. Natürlich kann

auch die entsprechende Anordnung mit Digitalinstrumenten verwendet werden. Wir benötigen wieder 2V Vollausschlag beim Spannungsmesser ($1\text{SKT} \cong 0,2\text{V}$). Wenn wir die Spannung durch Drehen am Potentiometer wie gewohnt von Null aus langsam erhöhen, passiert zunächst gar nichts. Erst bei circa 1,6V fängt ein Strom an zu fließen. LEDs haben - abhängig von ihrer Farbe - relativ hohe Flussspannungen, beispielsweise hat eine blaue LED circa 3V. Wir nehmen zunächst die Spannungen bei 2, 4, 6, 8 und 10mV auf, drehen dann den Nebenschlusswiderstand um 180° auf 100mA Vollausschlag und messen noch für 20, 30, 40 und 50mA. Die Messpunkte tragen wir in das Diagramm auf Seite 27 ein. Wir sehen, dass die Kennlinie einen ähnlich markanten Knick aufweist wie die einer Siliziumdiode.



Experiment 18

Leuchtdiode mit Vorwiderstand

Nach Aufnahme der Diodenkennlinien sollte nun auch klar sein, warum eine Leuchtdiode stets einen Vorwiderstand benötigt und nicht direkt an einer Spannungsquelle betrieben werden darf. Wenn wir beispielsweise unsere superhelle LED ohne Vorwiderstand mit 10mA direkt an einer Spannungsquelle betreiben wollten, so müsste letztere nach dem Diagramm genau 1,8V abgeben. Eine geringfügige Erhöhung um 0,2V führte bereits dazu, dass 30 - 40mA fließen. So genau lässt sich eine Spannung nur schwer einstellen. Es kommt hinzu, dass die LED beim Betrieb Entropie erzeugt (warm wird) und sich ihre Schwellenspannung erniedrigt. Im Diagramm verschiebt sich dadurch die Kennlinie nach links, d. h. bei fest eingestellter Spannung steigt der Strom gleich auf ein Vielfaches seines ursprünglichen Wertes, wodurch die Diode noch wärmer wird und sehr schnell durchbrennt. Es gibt nichts in dem Stromkreis, was den Strom begrenzt. Einen gleichen Effekt haben auch Exemplarstreuungen, d. h. bei gleichem Typ weichen die Schwellenspannungen der einzelnen Exemplare erheblich voneinander ab. Legen wir dagegen beispielsweise einen 1kΩ Widerstand in Reihe zur LED, so fällt an ihm die »überschüssige« Spannung ab. Wir können das im Diagramm sehen (Maßstab der Abszisse ist angepasst), indem

wir zunächst die LED - Kennlinie (rot) und dann die Widerstandsgerade für 1kΩ einzeichnen. Bei gleichen Stromwerten addieren wir grafisch die beiden jeweiligen Spannungswerte waagrecht und erhalten so die neue Kennlinie mit Widerstand und Diode in Reihe. Beispielhaft ist das für $I = 4\text{mA}$ dargestellt. Man sagt auch, die Diodenkennlinie wird an der Widerstandsgeraden geschert.

Legen wir jetzt an eine Reihenschaltung von Diode und Vorwiderstand den Batteriebaustein mit 9V, so können wir aus dem Diagramm ablesen, dass ein Strom von 7,2mA fließen wird und die Diode nicht gefährdet ist.

Für kleinere Vorwiderstände erhalten wir steilere Widerstandsgeraden und damit auch steilere resultierende Kennlinien.

Es ergibt sich daraus die oft angegebene Gleichung zur Berechnung des Vorwiderstands:

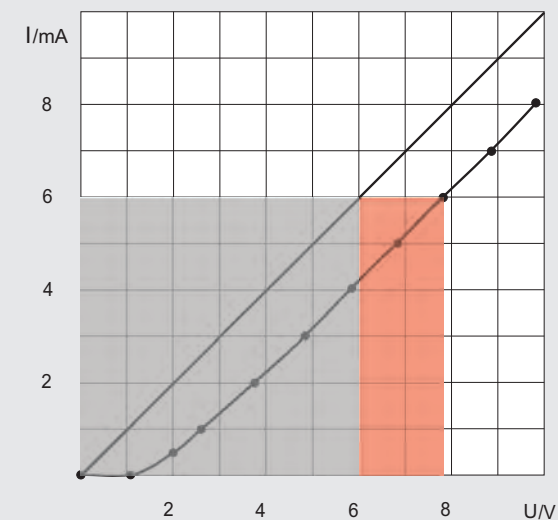
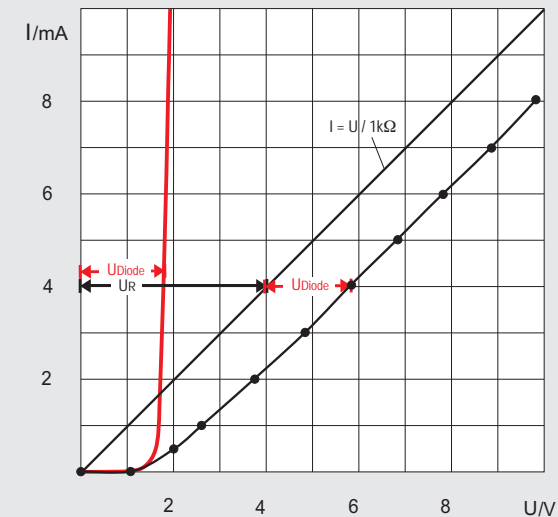
$$I = (U_{\text{Batt}} - U_{\text{Diode}}) / R_{\text{Vor}} \quad \text{oder} \\ R_{\text{Vor}} = (U_{\text{Batt}} - U_{\text{Diode}}) / I$$

In dem Diagramm können wir auch gut erkennen, wie hoch die Energieströme (Leistung) durch Widerstand und durch Diode sind.

$$P_{\text{Diode}} = I \cdot U_{\text{Diode}} \quad (\text{rote Fläche})$$

$$P_{\text{Wid.}} = I \cdot U_{\text{Wid.}} \quad (\text{graue Fläche})$$

Die Flächen sind beispielhaft für $I = 6\text{mA}$ dargestellt. Wir werden bei der Solarzelle diese Darstellung häufig benutzen.





Experiment 19

Ein hochempfindlicher Spannungsnachweis

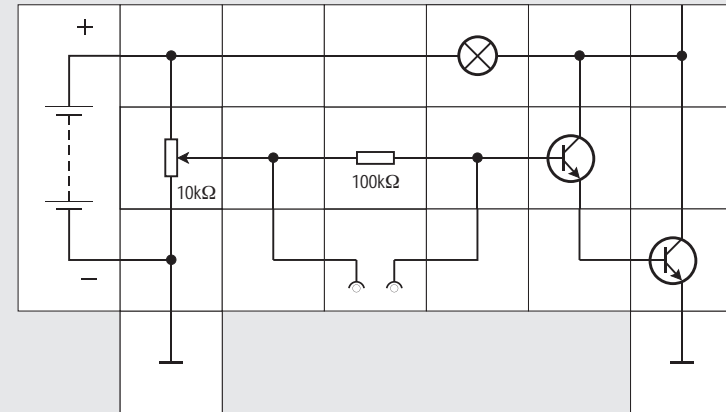
Als nächstes wollen wir zeigen, dass das Prinzip »Strom fließt durch eine LED und die LED leuchtet« auch umgekehrt funktioniert. Dazu müssen wir uns zunächst eine Nachweismöglichkeit für sehr kleine Spannungen aufbauen. Hierfür sollte die Wirkungsweise - vor allem die Stromverstärkung - eines Transistors bekannt sein (Elektronik AG Experimente Nr. 30 ff.).

Die Schaltung besteht aus zwei Transistoren, die in einer KASKADE hintereinander geschaltet sind, einem Potentiometer, einem hochohmigen Basisvorwiderstand und einer Glühlampe als Last für die Transistoren. Die Empfindlichkeit der sogenannten DARLINGTON - Schaltung beruht darauf, dass sich die Stromverstärkungen der Transistoren multiplizieren; es wird also leicht eine Gesamtverstärkung von 10.000 bis 50.000 erreicht. Ge-

ringste Änderungen des Basisstroms machen sich als Kollektorstrom - Änderungen bemerkbar.

Nach dem Anlegen der Versorgungsspannung stellt man das Potentiometer so ein, dass der Lampenfaden gerade zu glühen anfängt. Legt man jetzt eine kleine Spannungsquelle, beispielsweise eine total leere Batterie, parallel zum $100\text{ k}\Omega$ Widerstand und zwar den Minuspol an die Basisseite, so wird die Glühlampe je nach noch vorhandener Restspannung der Batterie etwas dunkler leuchten oder ganz verlöschen. Umpolen der Batterie lässt die Glühlampe heller leuchten.

Damit die Transistoren nicht zerstört werden, ist es ganz wichtig, wirklich vorher zu prüfen, dass die Batterie »leer« ist. Keinesfalls darf eine »frische« angeschlossen werden, da wir sonst die beiden in Reihe geschalteten Basis - Emitter - Dioden der Transistoren ohne Vorwiderstand an einer für sie zu hohen festen Spannung betreiben. (s. vorherige Experimente), was unweigerlich zu ihrer Zerstörung führt.



Experiment 20

Die LED als Spannungsquelle

Legen wir statt der leeren Batterie unsere superhelle LED parallel zum $100\text{k}\Omega$ Widerstand in die Schaltung und zwar in Sperrichtung, so dass kein zusätzlicher Basisstrom fließt, so haben wir zunächst wieder die bekannte Ausgangssituation. Das Potentiometer sollte so eingestellt sein, dass der Glühlampenfaden schwach glüht. Ob der Diodenbaustein in der Schaltung liegt oder nicht, ändert nichts an der Helligkeit des Lampenfadens (Ausprobieren!).

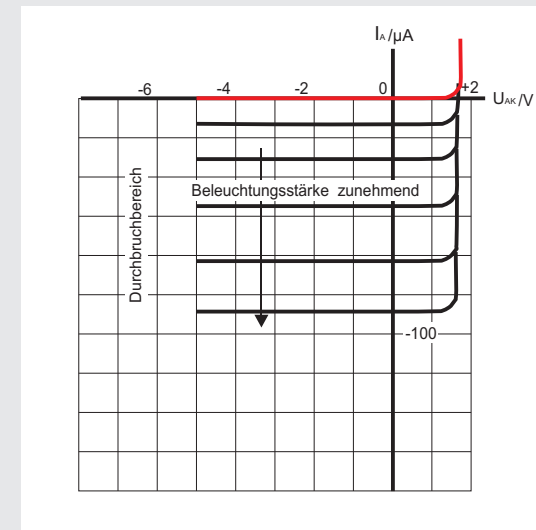
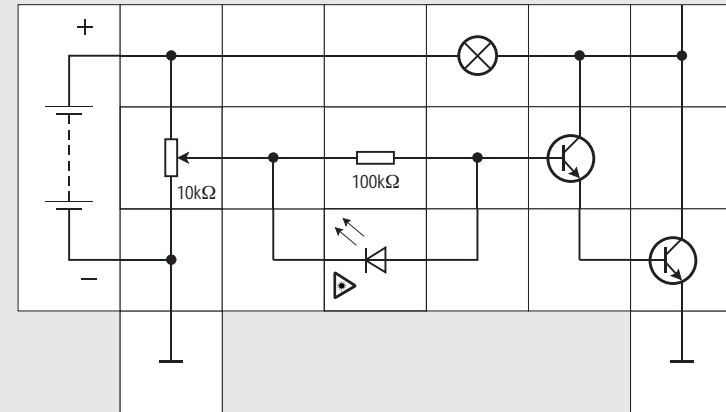
Beleuchten wir jetzt mit einer Taschenlampe die LED, so wird der Glühfaden hell aufleuchten und das, obwohl die Diode in Sperrichtung eingebaut ist. Wie ist das möglich?

Bei der Erklärung der Leuchtdiodenfunktion (Seite 16) haben wir gesehen, dass es Verdünnungen an der Anodenseite und Verdichtungen an der Katodenseite in der Diode gibt. Je nach Polung einer außen anliegenden Spannung wandern sie aufeinander zu und rekombinieren unter Abgabe von Photonen (LED leuchtet) oder zu den Anschlüssen und werden »abgesaugt«, bis keine mehr in der Diode sind (LED bleibt dunkel).

In unserem Experiment passiert genau das Umgekehrte: Photonen fallen auf die Diodenschicht und erzeugen Verdünnungen

und Verdichtungen. Die Verdünnungen wandern zum Anoden- und die Verdichtungen zum Katodenanschluss; es entsteht eine Potenzialdifferenz, die LED ist eine Spannungsquelle geworden. Da sie in die Schaltung eingebaut ist, kann deswegen zum bereits fließenden Basisstrom durch den $100\text{k}\Omega$ Widerstand ein weiterer in derselben Richtung fließen; die Transistoren werden stärker angesteuert, leiten besser und die Glühlampe leuchtet hell auf. Nach Drehung der Diode um 180° wird die Lampe bei Beleuchtung dunkler.

Schauen wir uns diesen Vorgang im Diagramm mit der Diodenkennlinie an, so befinden wir uns zunächst bei unbeleuchteter LED auf der Abszisse im leicht negativen Bereich (ca. $-0,1\text{V}$; LED in Sperrichtung). Durch die Beleuchtung verschiebt sich die Kennlinie umso mehr nach unten je stärker die Beleuchtung ist. Der dadurch hervorgerufene Strom fließt innerhalb der Diode von der Katode zur Anode, also entgegengesetzt zur Diodendurchlassrichtung und ist deswegen im Diagramm negativ als Sperrstrom eingezeichnet. Bemerkenswert ist, dass der Strom nahezu unabhängig von der anliegenden Sperrspannung ist (waagerechter Verlauf der Kennlinien) und nur von der Beleuchtung abhängt. Spezielle Dioden, bei denen dieser Effekt zur Lichtmessung und anschließender Steuerung von Abläufen ausgenutzt wird, sind als FOTO-DIODEN im Handel.

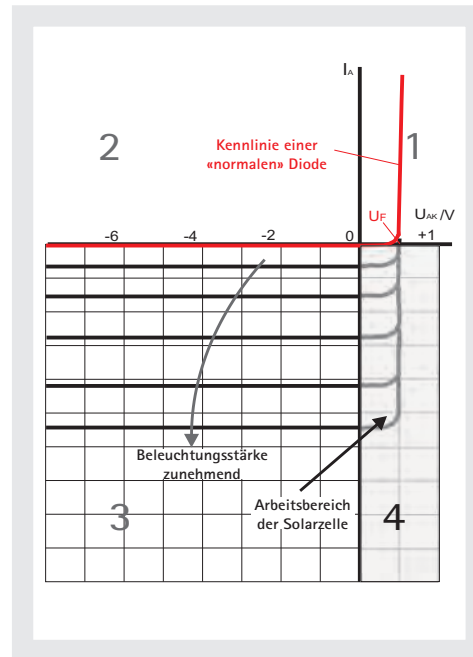


Experiment 21

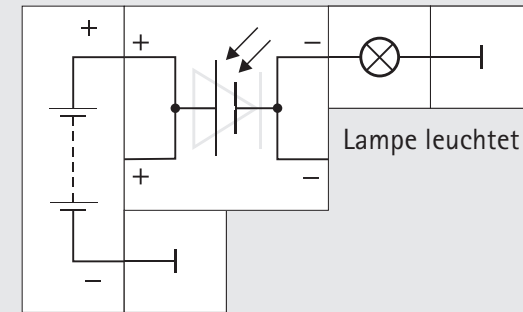
Die Solarzelle als Diode

Wir haben bisher aus dem Experimentierkasten »Solartechnik« lediglich bei den ersten Versuchen auch Solarzellen eingesetzt und uns dann intensiv mit verschiedenen Dioden und ihren Eigenschaften beschäftigt, so dass sich langsam die Frage aufdrängt: Was hat das alles mit Solartechnik zu tun? Die Antwort darauf ist einfach und vielleicht überraschend:

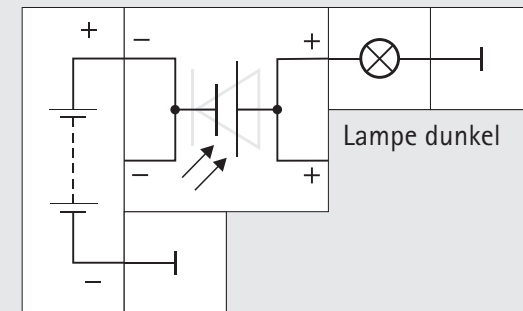
Eine Solarzelle ist nichts anderes als eine auf hohen Sperrstrom optimierte Fotodiode, die großflächig viel Licht auffangen und schon bei geringer Beleuchtung einen an elektrische Ladungsträger gebundenen Energiestrom abgeben kann. Das bedeutet, der beim normalen Siliziumdiodeneinsatz unterhalb der Flussspannung U_F kaum vorhandene Strom ist bei der Solarzelle der »Betriebsstrom«. Man kann es auch so sehen: Die uns wohl vertraute U/I -Kennlinie einer normalen Diode ist stark zu negativen Strömen hin verschoben (s. Abbildung). Um die Diodencharakteristik einer Solarzelle nachzuweisen, decken wir sie



mit schwarzer Pappe ab und legen sie einmal in Durchlass- und einmal in Sperrrichtung in einen Stromkreis mit Batterie und Glühlampe. Bei verdunkelter Zelle wird die Lampe leuchten, bzw. nicht leuchten, wie wir es von entsprechenden Experimenten mit normalen Dioden kennen. Im Stromlaufplan ist zur Orientierung das Diodenzeichen auf der Zelle abgebildet.



Solarzelle mit schwarzer Pappe abdecken



Experiment 22

Die Belastungskennlinie einer Solarzelle

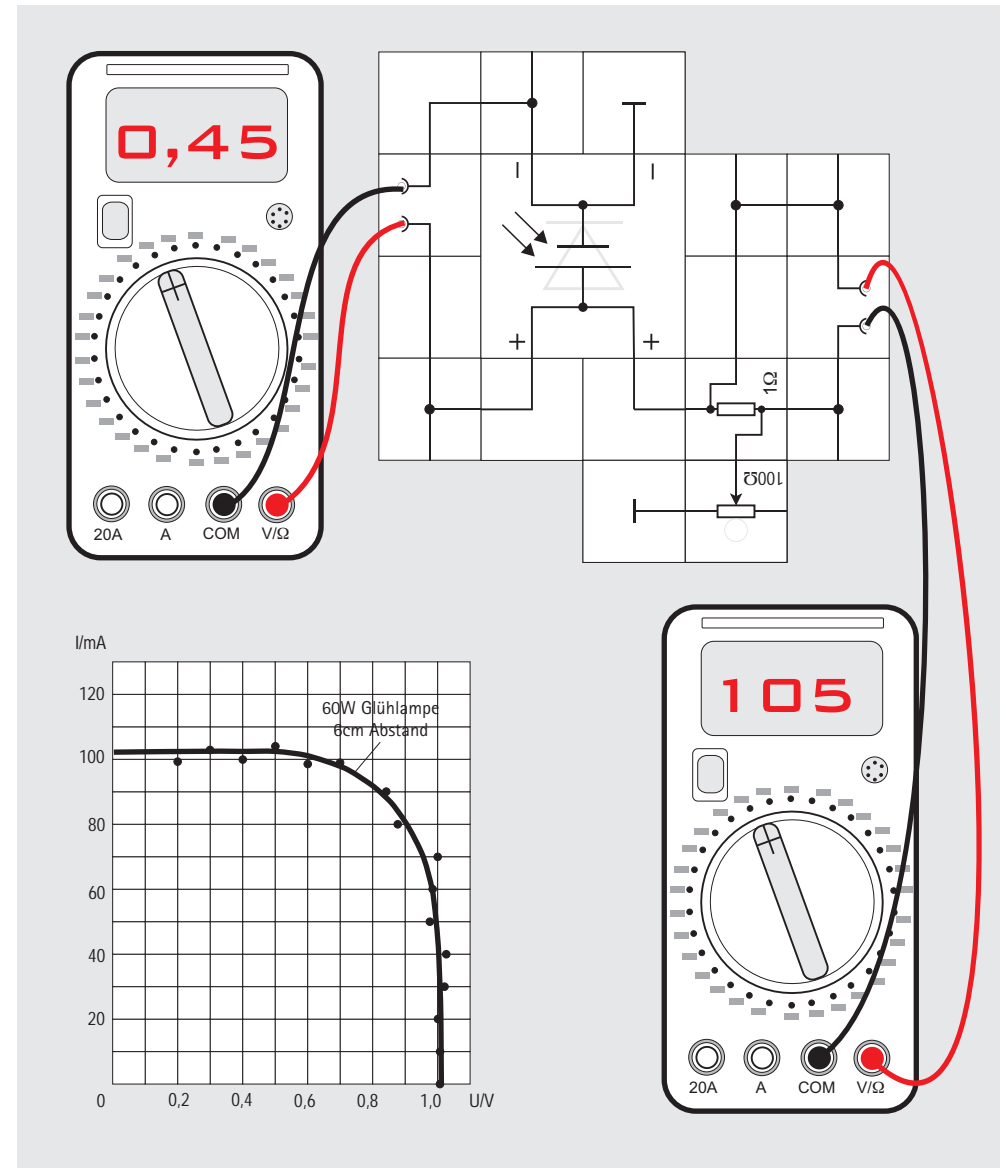
Um die Solarzelle besser kennen zu lernen, wollen wir zuerst ihre Kennlinien bei verschiedenen Belastungen aufnehmen. Bequem ist es, dafür Digitalmultimeter einzusetzen.

Wir verwenden die rechts angegebene Schaltung, wobei wir immer nur Spannungen messen und uns den Strom über das Ohmsche Gesetz $I = U/R$ ausrechnen. R ist ein 1Ω Messwiderstand, der in Reihe zum veränderlichen 100Ω Potentiometer als eigentlichem Belastungswiderstand liegt. Der Widerstand hat vier Anschlüsse, zwei für den Strom und zwei für die abzugreifende Spannung. Spannungsabfälle auf Grund schlechter Kontaktierung entfallen bei dieser Messmethode, da wir direkt am Widerstand über die zusätzlichen Anschlüsse die zu messende Spannung abgreifen. Ähnlich verfahren wir bei der Solarzelle; bei ihr sind beide Anschlüsse doppelt herausgeführt. Da für die Spannungsmessungen nur ein äußerst geringer Strom durch die Messinstrumente fließt, können »schlechte« Kontakte die Messungen kaum verfälschen; daraus resultierende Spannungsabfälle bleiben äußerst klein.

Wir messen als erstes bei Bestrahlung der Solarzelle mit einer 60W Glühlampe aus

6 cm Entfernung, weil vielleicht gerade die Sonne nicht scheint, und achten darauf, dass kein Schatten z. B. von Verbindungskabeln des Instrumentes auf die Zelle fällt. Die Glühlampe sollte senkrecht über der blauen Zellenoberfläche hängen und in ihrem Abstand nicht verändert werden. Durch Verändern des Potis erhalten wir verschiedene Belastungen. Das linke Multimeter zeigt direkt die Ausgangsspannung der Zelle an, das rechte den dazugehörigen Spannungsabfall am Messwiderstand. Die Umrechnung ist denkbar einfach: Die angezeigte Spannung in Millivolt entspricht einem Strom in Milliampere. Wir gehen bis zu $R_{\text{Poti}} = 0\Omega$ herunter, es liegt dann nur noch der Messwiderstand als Belastung vor. Den Rest der Kurve bis zum Kurzschlussstrom können wir extrapolieren. Die Messpunkte übertragen wir immer gleich in das Diagramm; wir sehen dann sofort Fehlmessungen und wo uns eventuell noch Punkte für die Darstellung fehlen.

In der Darstellung nehmen wir noch eine Vereinfachung vor: Wir spiegeln die Kennlinie an der Abszisse (Quadrant 4 wird dann Quadrant 1) und können dann mit positiven Strom- und Spannungswerten arbeiten. Beim Einsatz der Zelle als Energielieferant interessiert in erster Linie die Höhe des Energiestroms und nicht so sehr, dass wir es mit einer Diode zu tun haben; vergessen sollten wir letzteres aber



Experiment 23

Messprobleme

Wollen wir die Kennlinie der Solarzelle mit den analogen Lectron Messinstrumenten aufnehmen, so ist der nebenstehende obere Versuchsaufbau dafür »halbwegs« geeignet. Es gibt nämlich ein kleines Problem:

Die Spannungsmessung an der Zelle mit dem oberen Instrument geschieht in herkömmlicher Weise mit dem $5,6\text{k}\Omega$ Vorwiderstand; der Vollausschlag ist dann 1V , das ist problemlos.

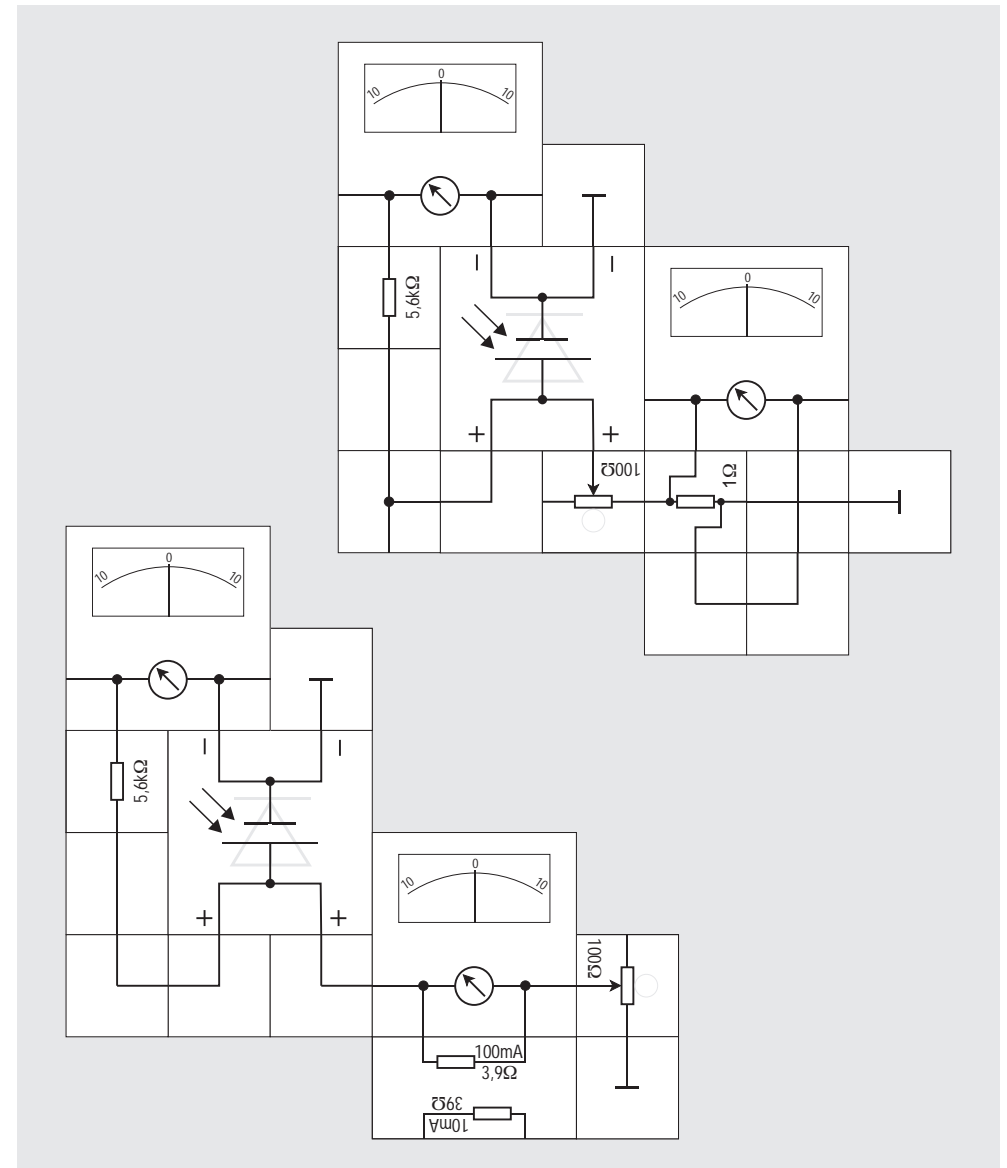
Das rechte Instrument zeigt den Strom an. Der 1Ω Messwiderstand fungiert als Nebenschlusswiderstand für das Instrument, das ja bei $100\mu\text{A}$ Vollausschlag anzeigt. Bei diesem Vollausschlag fallen am Instrument mit seinem Innenwiderstand von $4\text{k}\Omega$ und damit auch am Messwiderstand $0,4\text{V}$ ab; das entspricht einem Strom von $0,4\text{V} / 1\Omega = 400\text{mA}$.

Aus der Messung mit den Digitalinstrumenten wissen wir, dass bei Beleuchtung mit einer 60W Glühlampe nur circa 100mA maximal fließen werden. Die Ablesegenauigkeit wird also sehr schlecht sein, da wir lediglich den Bereich 0 bis $2,5$ Skalenteile nutzen.

Wir haben allerdings noch den Neben-

schlusswiderstand $39\Omega / 3,9\Omega$ im Zweierbaustein, der dem Messinstrument einen Vollausschlag von 100mA verleiht und eine volle Skalenausnutzung gestattet. Die entsprechende Schaltung ist unten abgebildet. Wenn die 100mA fließen, fallen wiederum $0,4\text{V}$ am Instrument und damit am Nebenschlusswiderstand ab. Wir werden also den Kurzschlussstrom der Solarzelle nicht erreichen, da bei $R_{\text{Poti}} = 0\Omega$ immer noch der Nebenschlusswiderstand von $3,9\Omega$ im Stromkreis liegt und den Kurzschluss verhindert.

Auch mit dem 1Ω Messwiderstand in der ersten Schaltung erreichen wir den gewünschten Kurzschluss nicht, ganz gleich, ob wir analog oder digital messen; wir kommen ihm aber beträchtlich näher. Nun wissen wir aus den bisherigen Experimenten aber bereits, dass wir die Kennlinie einer Siliziumdiode mit dem charakteristischen Knick aufnehmen. Zur Darstellung der Kennlinie reichen dafür bereits wenige Messpunkte vor und hinter dem Knick. Die Kennlinie kann dann waagrecht bis zum Kurzschlussstrom und senkrecht bis zur Leerlaufspannung verlängert werden, ohne dass wir einen großen Fehler begehen.



Experiment 24

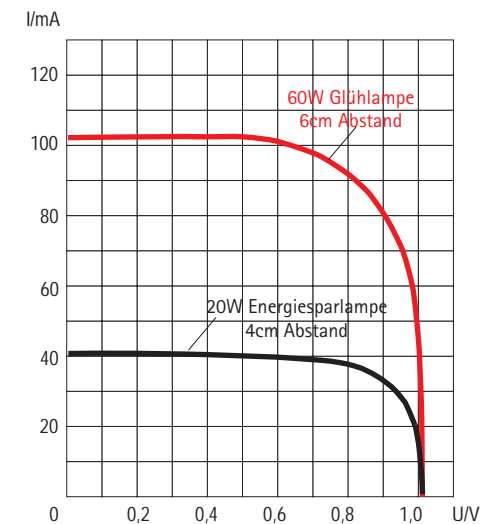
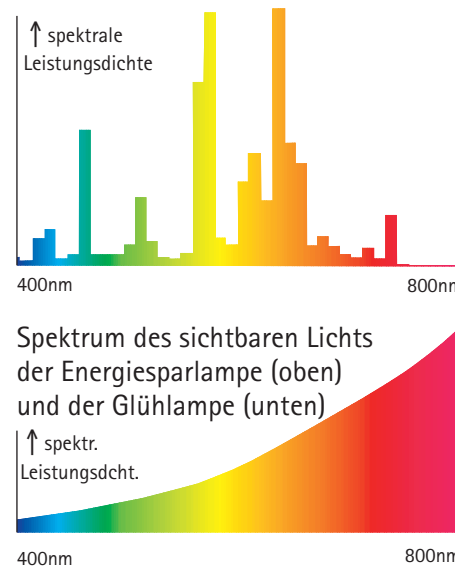
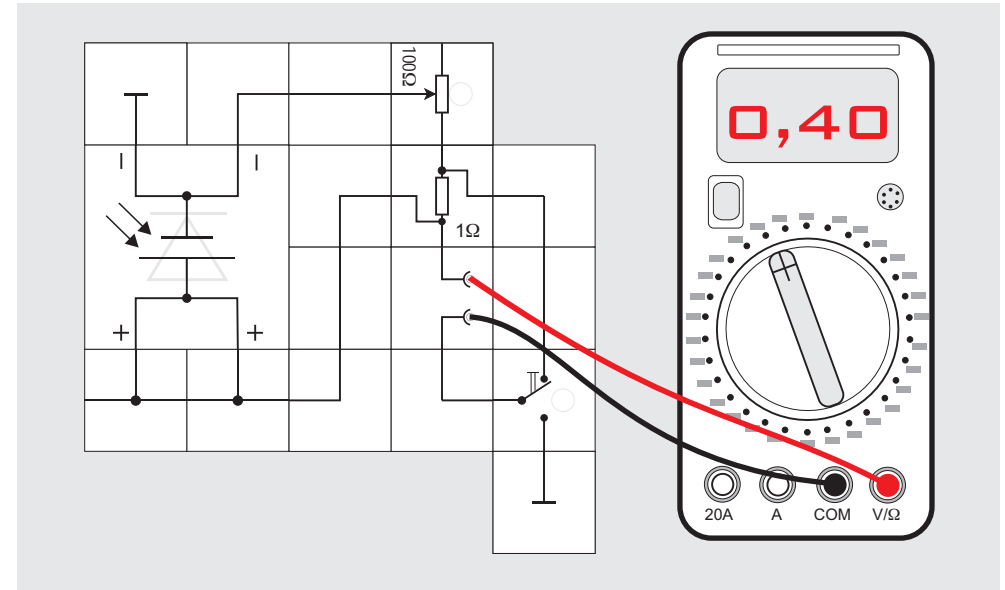
Messen mit einem Instrument

Es soll noch ein weiterer Messaufbau zur Aufnahme einer Kennlinie angegeben werden, der mit nur einem Digitalmultimeter auskommt. Wir müssen dann allerdings zwischen der Strom- und der Spannungsmessung umschalten.

In der oberen Schalterstellung messen wir die Spannung über dem 1Ω Messwiderstand, deren Wert gleich dem Stromwert ist; in der unteren Stellung zeigt das Instrument die dazu gehörende Solarzellenspannung an. Ist das 100Ω Poti im Gegenuhrzeigersinn an den Anschlag gedreht, so liegen die 100Ω als Belastung im Stromkreis, die angezeigte Spannung wird sich kaum von der Leerlaufspannung der Solarzelle unterscheiden. Wir können das sehen, indem wir den Poti-Baustein kurzzeitig aus der Schaltung entfernen.

Dieses Mal nehmen wir die Kennlinie der Solarzelle auf, wenn sie von einer Energiesparlampe aus geringer Entfernung beleuchtet wird. Die Leerlaufspannung ist - wie bei der Glühlampe - mit gut 1 V gleich. Bei Belastung unterscheiden sie sich aber deutlich voneinander: Wir können der Solarzelle offensichtlich weniger Energie entnehmen, da die Energiesparlampe ein deutlich anderes SPEKTRUM als eine Glühlampe hat. Wie das Spektrum des sichtbaren Lichts einer

Lichtquelle, also die Beiträge von Licht unterschiedlicher Wellenlänge im sichtbaren Bereich 400 - 800nm, aussieht, erkennt man grob, wenn man das Lichtgemisch mit einem Prisma zerlegt und die verschieden stark abgelenkten Lichtstrahlen auf einem Schirm auffängt. Vergleicht man beide Spektren miteinander, so fällt auf, dass das der Glühlampe kontinuierlich aussieht und stark zu den langen Wellen hin zunimmt, also einen hohen Rotanteil hat. Es entsteht dadurch, dass ein Metalldraht glüht. Das Spektrum der Energiesparlampe besitzt dagegen bei bestimmten Wellenlängen des für uns sichtbaren Lichts Spitzen, die in ihrer Gesamtheit unserem Auge weißes Licht vortäuschen. Es entsteht dadurch, dass ganz bestimmte Atome durch Energiezufuhr in der Gas - Entladungsröhre angeregt werden und beim Rückgang in den Grundzustand Licht genau dieser Wellenlänge aussenden. Bei den beiden Spektren ist zu beachten, dass sie nur qualitativ sind. Die absolute Intensitätshöhe des Lichts einer bestimmten Wellenlänge hängt in unserem Versuch natürlich auch von der Entfernung Lichtquelle - Solarzelle ab. Hinzu kommt, dass die Solarzelle auch noch Licht aus dem hier nicht dargestellten infraroten (d. h. jenseits vom roten) Teil des Glühlampenspektrums »verwertet«.

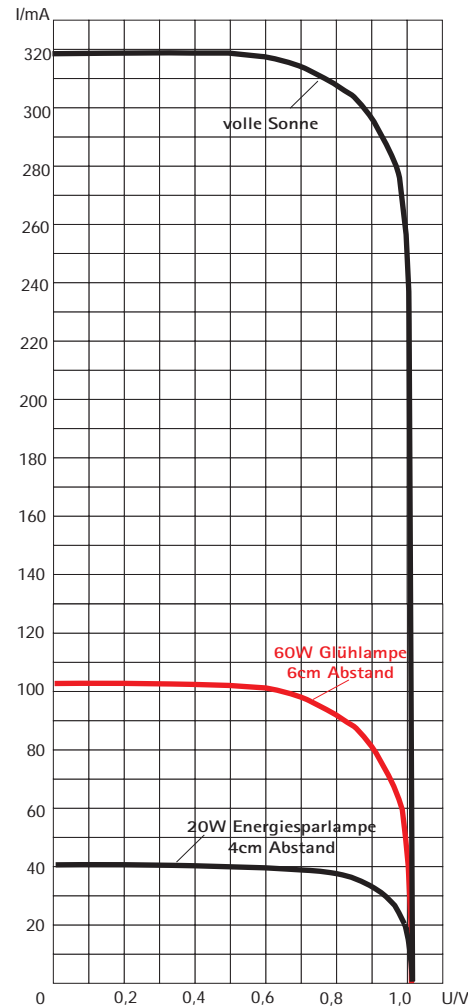


Experiment 25

Die Kennlinie bei voller Sonne

Bevor wir die Kennlinie der Solarzelle bei voller Sonnenbestrahlung aufnehmen, tauschen wir den 1 Ω Messwiderstand gegen den 0,5 Ω Messwiderstand aus; wir werden sehen, dass wir andernfalls nicht nahe genug an den Kurzschlussfall herankämen. Der in Millivolt angezeigte Wert des Messinstrumentes ergibt verdoppelt den Strom in Milliampere. Wir achten bei der Messung darauf, dass der Schatten der Anschlusskabel nicht auf die Solarzelle fällt, dass die Zelle senkrecht zur Einstrahlung steht (Aufbauplatte gegebenenfalls kippen) und dass keine Dunstschleier vor die Sonne ziehen. Gerade im »Hochstrombereich« reagiert die Zelle empfindlicher als unser Auge auf Beleuchtungsänderungen und die Messung würde verfälscht. Gegenüber den ersten beiden Kennlinien ist die Leerlaufspannung wieder gleich, der Kurzschlussstrom bei diesen Versuchsbedingungen allerdings erheblich höher. Die Sonneneinstrahlung bei wolkenlosem Himmel ist selbst in unseren Breitengraden erheblich. Die Abbildung zeigt, wie Licht der verschiedenen Wellenlängen zu dem Gesamtergebn beiträgt. Verglichen mit dem Spektrum der Glühlampe ist der Blauanteil erheblich höher, was bei uns Menschen zum Gesamteindruck »weiß« führt.

Interessant ist auch der Vergleich mit dem Spektrum der Energiesparlampe, deren Lichtzusammensetzung ja den gleichen Eindruck hervorrufen soll.



The diagram illustrates the experimental setup for measuring the solar cell's characteristic curve. It includes:

- Top Left:** A multimeter displaying a reading of 0,45. Its red and black probes are connected to the circuit.
- Top Right:** A circuit diagram showing a solar cell connected in series with a 0,5 Ω resistor and a 100 Ω resistor. The solar cell's terminals are marked with '+' and '-'.
- Bottom Right:** A second multimeter displaying a reading of 320. Its red and black probes are connected to the circuit.
- Bottom Left:** A spectral power density graph showing a rainbow spectrum from 400nm to 800nm. The y-axis is labeled '↑ spektrale Leistungsdichte'. The spectrum shows a higher intensity in the blue/violet region compared to a typical incandescent lamp.

Experiment 26

Parallelschaltung von Solarzellen

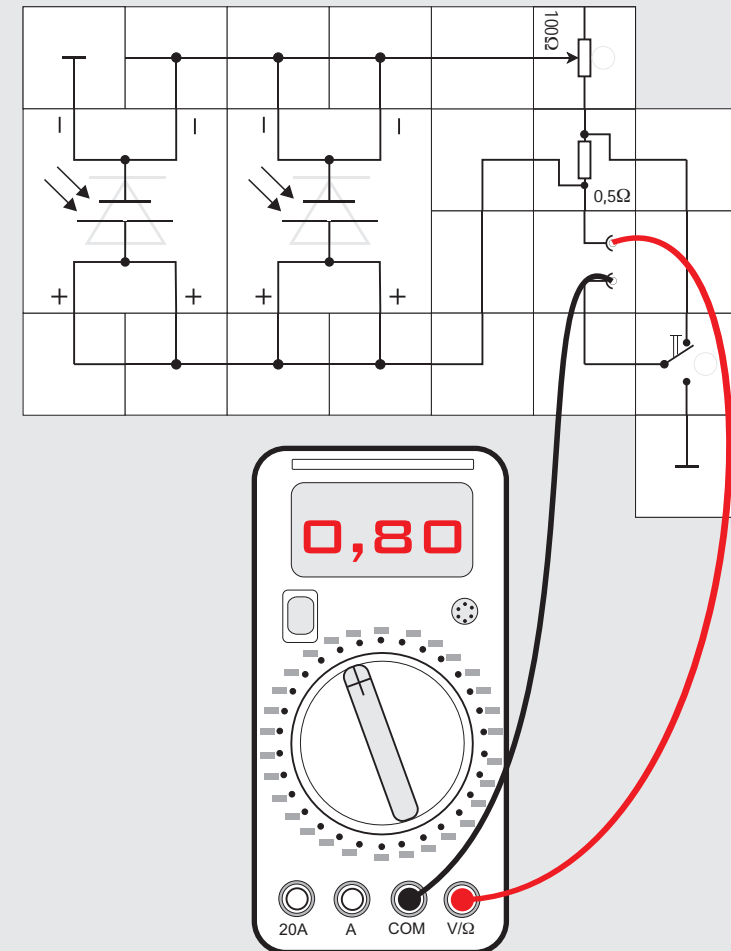
Decken wir im vorigen Versuch die untere oder die obere Hälfte der Solarzelle mit Pappe ab, so ändert sich die Leerlaufspannung der Zelle nicht; die ganze Kennlinie verschiebt sich zu kleineren Stromwerten, so dass nur noch der halbe Kurzschlussstrom erreicht wird. Es ist so, als ob die ganze Zelle mit weniger Intensität beschienen würde. Daraus ergibt sich die Frage, was wir tun müssen, um einen größeren Energiestrom aus der Zelle herauszubekommen.

Man kann natürlich mit Spiegeln versuchen, noch mehr Licht auf die vorhandene Zellenoberfläche zu lenken, was in der Praxis wegen des wandernden Sonnenstandes aufwendig ist und auch dazu führt, dass die Zelle zu heiß wird (über die Temperaturabhängigkeit später mehr); einfacher ist es, die Oberfläche durch Hinzunahme einer zweiten Zelle zu vergrößern. Wir haben zwei Möglichkeiten: Die beiden Zellen können parallel oder in

Reihe geschaltet werden. Wir nehmen mit der angegebenen Schaltung zunächst die Parallelschaltung auf. Steht nur ein Instrument zur Verfügung, muss umgeschaltet werden. Wir messen wieder am $0,5 \Omega$ Messwiderstand und verdoppeln den angezeigten (Spannungs-) Wert, um den Strom zu erhalten.

Das Messergebnis überrascht uns wahrscheinlich nicht: Die Leerlaufspannung ist mit gut 1V gleich geblieben, der Kurzschlussstrom hat sich gegenüber dem einer Zelle verdoppelt. Decken wir eine Zelle mit schwarzer Pappe ab, so ist es genauso, als ob diese Zelle nicht vorhanden wäre; der Kurzschlussstrom sinkt auf die Hälfte, also auf den Wert einer Zelle.

Die Parallelschaltung von Solarzellen bewirkt in der U/I -Kennlinie also die Addition der Ströme bei der jeweiligen Spannung. Das Ergebnis lässt sich verallgemeinern. Schalten wir n gleiche Zellen parallel, wird bei gleichbleibender Leerlaufspannung der Kurzschlussstrom n -mal so hoch wie der einer Zelle.



Experiment 27

Serienschaltung von Solarzellen

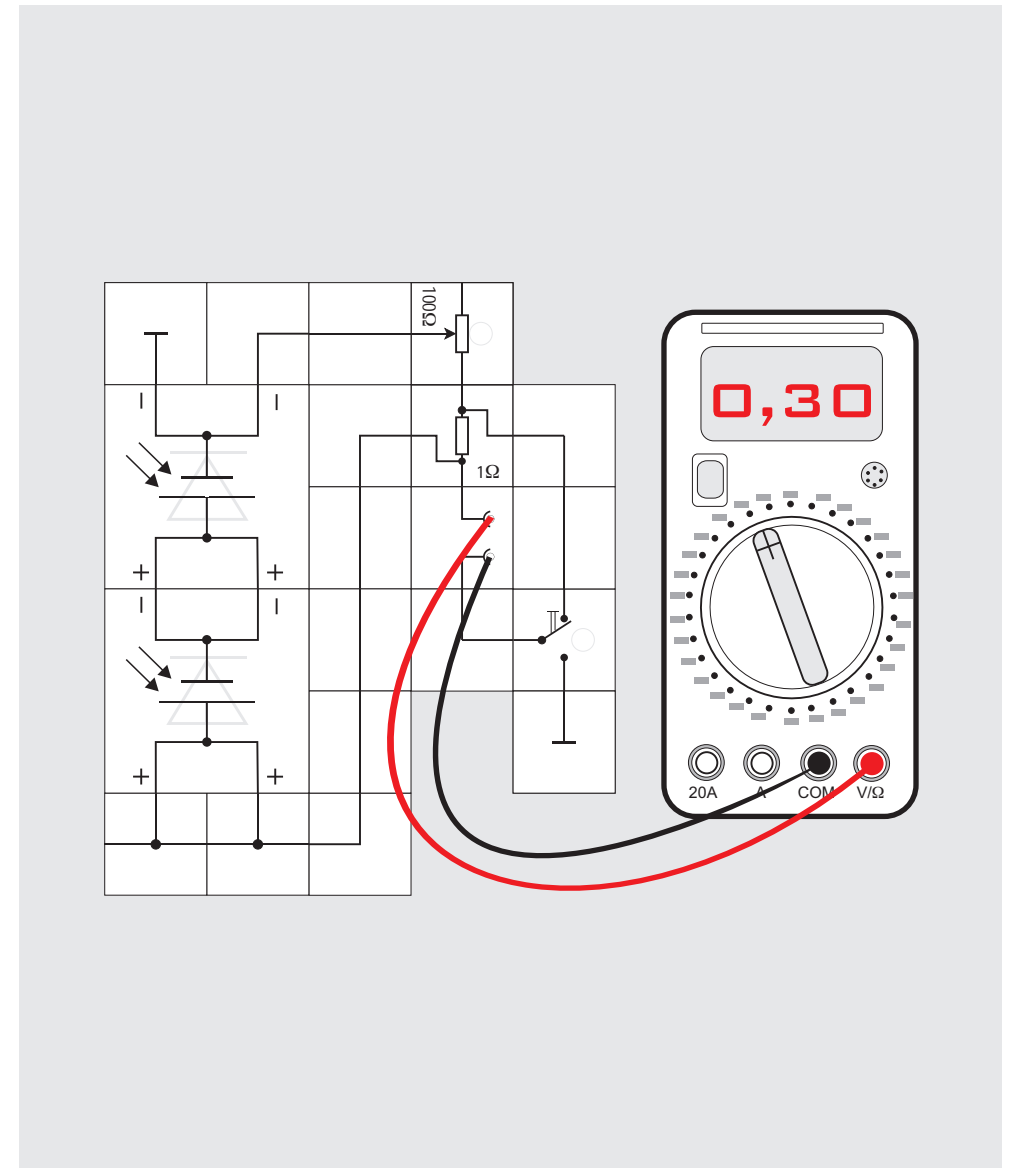
Wir probieren nun die andere Möglichkeit der Zusammenschaltung von zwei Solarzellen aus, schalten sie in Reihe und nehmen in gewohnter Weise die Kennlinie bei starker Beleuchtung auf. Zunächst fällt auf, dass sich die Leerlaufspannung auf etwas über 2 V addiert. Erhöhen wir langsam die Last durch Verkleinern des Widerstandes, so stellen wir keine Erhöhung des Kurzschlussstroms gegenüber dem einer Zelle bei gleicher Beleuchtung fest.

Die Serienschaltung zweier Solarzellen bewirkt in der U/I -Kennlinie also die Addition der Spannungen bei dem jeweiligen Strom.

Dieses Ergebnis lässt sich natürlich auf n Zellen verallgemeinern: Die **Serienschaltung ergibt eine Gesamtspannung im Leerlauf, die das n -fache der Leerlaufspannung einer Zelle beträgt. Die Stromergiebigkeit der Anordnung erhöht sich dadurch nicht.**

Zwischen beiden Anordnungen gibt es jedoch noch einen grundlegenden Unter-

schied im Verhalten, wenn man eine Zelle lichtdicht mit Pappe abdeckt: Bei der Parallelschaltung fehlt dem Gesamtstrom dann lediglich der Strom dieser Zelle, wie wir bereits festgestellt hatten; decken wir in der Serienschaltung eine Zelle so ab, dass sie kein Licht mehr empfängt, so wird sie hochohmig. Die Leerlaufspannung der Anordnung sinkt um den Betrag der abgedeckten Zelle (beim Messen Laststromkreis unterbrechen); wir können aus der Anordnung aber keinen Strom mehr entnehmen, da die Spannung dann sofort auf Null geht. Das ist in der Praxis deswegen ärgerlich, weil man zur Erzielung höherer Spannungen eine größere Anzahl von Zellen in Reihe schalten muss und beim Ausfall einer einzigen Zelle gar keine Energie mehr aus den restlichen bekommt. Ein ähnliches Problem besteht bei der Weihnachtsbaumbeleuchtung mit elektrischen Kerzen. Die bis zu 24 kleinen Glühlampen sind in Reihe geschaltet. Brennt eine durch, sind alle dunkel und man hat sogar Schwierigkeiten, ohne Hilfsmittel die defekte zu finden. Wir werden im nächsten Experiment sehen, was man dagegen tun kann.



Experiment 28

Die Bypassdiode

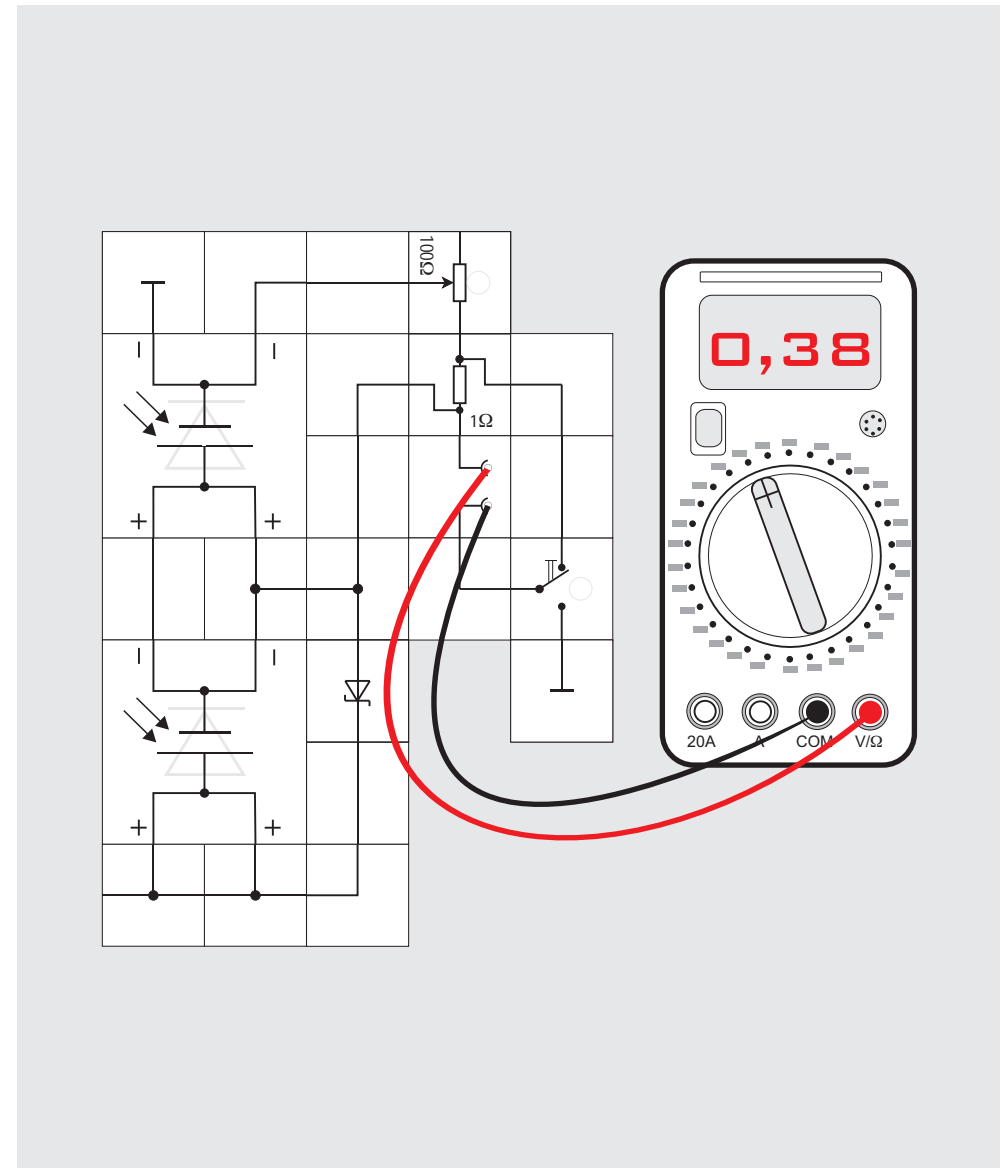
Wir verändern den Versuchsaufbau etwas, indem wir parallel zu einer Solarzelle eine normale Siliziumdiode in der angegebenen Polarität als so genannten BYPASS schalten. Solange beide Zellen Licht empfangen, stört die Diode nicht weiter, sie ist in Sperrrichtung gepolt. Decken wir die obere Zelle mit Pappe ab, stellt sich wieder der Effekt aus dem vorigen Versuch ein: Der Strom geht gegen Null, da die Zelle hochohmig geworden ist. Machen wir das Gleiche mit der unteren Zelle, so geht die Spannung im Leerlauf auf 0,3V zurück und wir können der Anordnung auch noch Strom entnehmen, dessen Größe von der Last abhängt. Es ist so, als ob wir eine Solarzelle in Reihe mit einer Diode betreiben, an der 0,7V Flussspannung abfallen; die Differenz von 0,3V zeigt unser Instrument an. Ersetzen wir die Siliziumdiode durch eine Schottky-Diode, so steigt die Spannung auf 0,6 bis 0,7V an, da ja ihre Flussspannung kleiner ist als die einer Siliziumdiode.

Bei zwei Solarzellen ist der Vorteil durch den Einsatz der Bypassdiode zwar noch nicht so beeindruckend, wenn aber beispielsweise zwanzig Solarzellen in Reihe geschaltet sind und man im Normalfall mit circa 20 V arbeitet, erhält man durch den Einsatz von Bypassdioden bei Aus-

fall einer Zelle immer noch 18,6 V statt des Totalausfalls der Anordnung.

Bei so vielen Solarzellen in Serie lohnt es sich sogar, statt der Schottky-Diode mit 0,3 - 0,4V Flussspannung eine LED mit 1,5V einzusetzen. Die LED leuchtet dann bei Ausfall der Zelle auf. Mit zwei Solarzellen funktioniert das noch nicht, da bei Ausfall einer Zelle die verbliebene zu wenig Spannung zum Betrieb einer LED abgibt (s. Experiment 3). Außerdem müsste die LED für den relativ hohen Strom von circa 320mA ausgelegt sein.

Bei der Lichterkette am Weihnachtsbaum teilen sich 24 Lämpchen gleichmäßig die 240V Potenzialdifferenz des Netzes auf. Im Betrieb fallen an jedem Lämpchen also 10V ab. Brennt ein Lämpchen durch, wären ohne zusätzliche Maßnahmen alle Lämpchen dunkel und man wüsste nicht einmal, welches das defekte ist. Um diese Situation zu vermeiden, gibt es parallel zu jedem Lämpchen ein spannungsabhängiges Bauteil, das beispielsweise bei 12V leitend wird. Im Normalbetrieb stört das nicht weiter; brennt jedoch ein Lämpchen durch, liegt kurzzeitig an dem dazugehörigen Bauteil die ganze Potenzialdifferenz von 240V und es wird leitend. Die restlichen 23 Lämpchen leuchten weiter, das defekte bleibt dunkel und kann ersetzt werden.





Experiment 29

Eigenschaften der Lectron Solarzelle

Eine Eigenschaft der Solarzelle, die bisher einfach nicht erwähnt wurde, muss unbedingt noch nachgetragen werden. Vielleicht ist es ja bereits aufgefallen, dass eine normale Siliziumdiode eine Flussspannung von circa 0,6 - 0,7V hat. Da diese - auch Knickspannung - genannte Eigenschaft materialabhängig ist, sollte man annehmen, dass eine Silizium Solarzelle eine gleichgroße Leerlaufspannung aufweist. Nun ist die der Lectron Solarzelle ungefähr doppelt so groß.

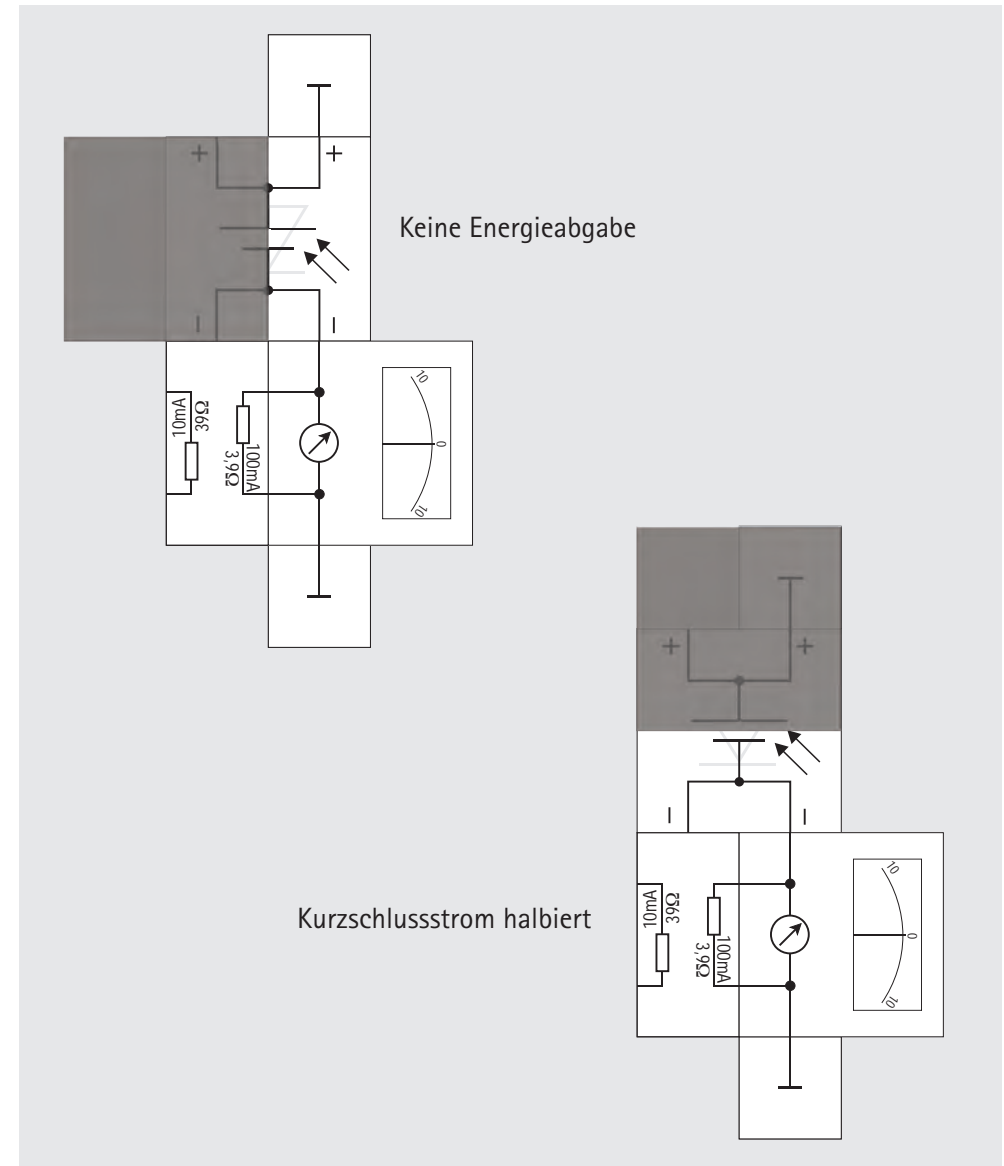
Des Rätsels Lösung: Beim Lectron Solarzellenbaustein sind bereits zwei Module in Reihe geschaltet und ihre Spannungen addieren sich zu gut 1V.

Mit unseren Erkenntnissen aus den letzten Experimenten können wir dies leicht

nachweisen: Verdunkeln wir mit einer schwarzen Pappe die linke oder rechte Hälfte der Solarzelle, so gibt sie keine Energie mehr ab. Beide Hälften sind in Reihe geschaltet, die verdunkelte lässt nichts mehr passieren.

Anders ist es dagegen, wenn nur die obere oder untere Hälfte abgedunkelt wird. Dann wird der Kurzschlussstrom halbiert, aber die Zelle wird weiterhin Energie abgeben können. Wir haben dann lediglich die aktiven Flächen der in Reihe geschalteten beiden Module halbiert.

Angemerkt sei noch, dass bei Lectron ein gleichgroßer Solarzellenbaustein mit der Bestellnummer 2611 als Einzelteil erhältlich ist. Bei ihm sind beide Module parallel geschaltet; sein Kurzschlussstrom beträgt 600mA, seine Leerlaufspannung 0,5V.



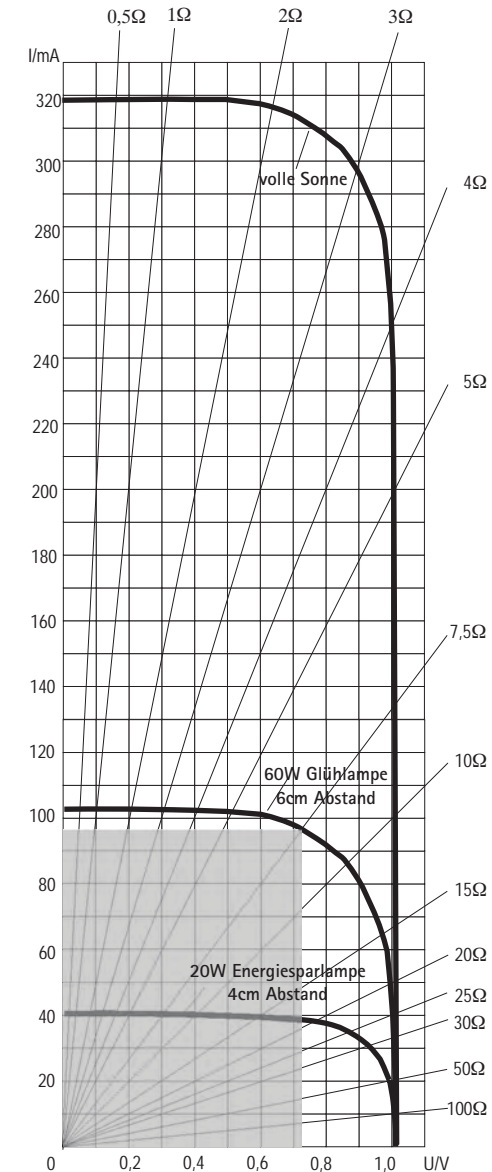
Arbeitspunkt der Solarzelle

Nachdem wir herausgefunden haben, wie wir durch Reihen- oder Parallelschaltung von Solarzellen die Kennlinie der Gesamtanordnung beeinflussen können, wollen wir nun herausfinden, welche Konfiguration für den einzelnen Verbraucher günstig ist. Wir gehen vom Kennlinienfeld auf Seite 38 aus. Hierin sind drei Kennlinien einer Zelle bei verschiedener Beleuchtung dargestellt. Wenn wir nun als Last $100\ \Omega$ am Potentiometer einstellen, so können wir die dazugehörige Widerstandsgerade in das Diagramm eintragen, z. B. ergibt $1\text{V} / 100\ \Omega = 10\ \text{mA}$; sie verläuft also durch den Punkt $(1\text{V}, 10\text{mA})$ und natürlich durch den Nullpunkt (siehe Experiment 10, Seite 22). Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der jeweiligen Kennlinie der Solarzelle ergibt den Arbeitspunkt bei Belastung mit $100\ \Omega$. Die Widerstandsgeraden für andere Lastwiderstände werden entsprechend konstruiert und in das Kennlinienfeld eingetragen. Beispielsweise ergibt $1\text{V} / 50\ \Omega = 20\ \text{mA}$; der Punkt $(1\ \text{V}, 20\ \text{mA})$ ist also ein Punkt (neben dem Nullpunkt) der $50\ \Omega$ Widerstandsgeraden, usw. Verändern wir nun den Lastwiderstand über $50\ \Omega, 30\ \Omega, 20\ \Omega, 10\ \Omega$, bis auf $0\ \Omega$, so wandert der Schnittpunkt der jeweiligen Widerstandsgeraden, also der Arbeitspunkt, auf den Kennlinien. Zum Schluss liegt nur

noch der Messwiderstand von $1\ \Omega$ bzw. $0,5\ \Omega$ als Belastung vor. Es fließen bei $1\ \Omega$ dann Ströme von $320, 103$ oder 40mA , je nach Beleuchtung.

Interessant für die praktische Anwendung ist nun, wie hoch der Energiestrom (Leistung) der Zelle in den verschiedenen Arbeitspunkten ist und wo eigentlich sein Maximum liegt. Dazu müssen wir Strom- und Spannungswerte des jeweiligen Arbeitspunktes miteinander multiplizieren, denn der Energiestrom ist $P=U \cdot I$. Das ist in dem Diagramm gerade die Fläche des Rechtecks mit dem Arbeitspunkt und dem Nullpunkt als diagonale Eckpunkte. Als Beispiel ist ein solches Rechteck mit $7,5\ \Omega$ Last und dem Arbeitspunkt ($720\ \text{mV}, 97\ \text{mA}$) bei Beleuchtung mit der Glühlampe grau eingezeichnet. Der dazugehörige Energiestrom ist $720\text{mV} \cdot 97\text{mA} = 69,84\ \text{mW}$.

Geht man von einem Arbeitspunkt nahe der Leerlaufspannung aus, so erhält man ein schmales liegendes Rechteck, dessen Flächeninhalt zunächst immer größer wird, je kleiner der Lastwiderstand gewählt ist. Der Arbeitspunkt steigt immer »höher« auf der Kennlinie bei Verkleinerung des Lastwiderstandes. Man kommt irgendwann in den Teil der stärksten Krümmung und hier ist das aufgespannte »Leistungsrechteck« augenscheinlich am größten. Weitere Verkleinerung des



Lastwiderstands bewirkt, dass der Arbeitspunkt jetzt auf dem waagerechten Teil der Kennlinie weiter nach links wandert und das Rechteck kleiner wird bis sein Flächeninhalt beim Kurzschlussstrom und der Spannung 0V ebenfalls 0mW geworden ist.

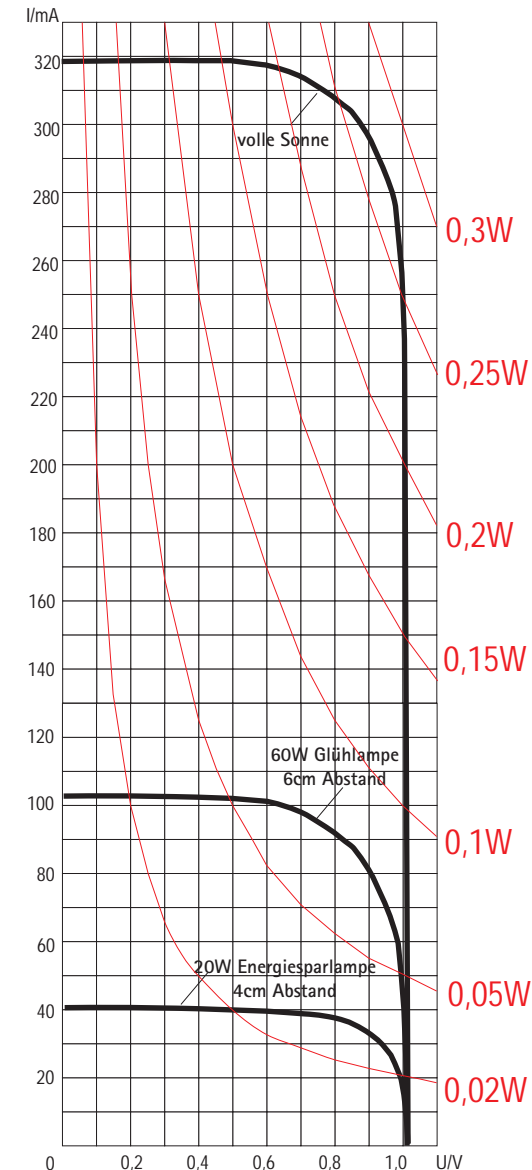
Statt nun immer Rechtecke aufzuspannen, kann man im Diagramm viele Punkte berechnen, die einen Energiestrom (Leistung) von 0,1W ergeben, das Gleiche macht man mit 0,2W usw. Verbindet man Punkte gleicher Größe des Energiestroms miteinander, so erhält man eine (rot dargestellte) Kurvenschar. Aus der Mathematik wissen wir, dass es Hyperbeln sind, in der Technik werden sie LEISTUNGSHYPERBELN, genannt. An ihnen sieht man sofort, wo der Arbeitspunkt mit maximaler Leistungsabgabe liegt. Unabhängig von der Beleuchtung ist dies immer dort, wo die jeweilige Kennlinie die stärkste Krümmung aufweist, also im Knick.

Wir sehen jetzt auch, welches Problem man in der Praxis lösen muss, um immer den maximalen Energiestrom zu bekommen: Hat man beispielsweise durch eine Belastung mit 3Ω den maximalen Energiestrom, den die Zelle bei voller Sonnenbestrahlung liefern kann, eingestellt, so arbeitet man nicht mehr im Optimum, wenn die Sonne schwächer scheint. Die Kennlinie der Solarzelle ver-

schiebt sich dann nach unten und die 3Ω Widerstandsgerade schneidet sie im waagerechten Teil und nicht mehr im Knick. Es dürfte klar sein, dass bei nicht so starker Sonneneinstrahlung auch der Energiestrom kleiner wird, wir könnten ihn aber trotzdem noch optimieren, wenn wir den Lastwiderstand etwas vergrößerten.

Ein weiteres Problem ist die Temperaturabhängigkeit der Diodenflussspannung. Wir haben dies bereits eingangs erwähnt; die Flussspannung einer Siliziumdiode beträgt bei 25°C ungefähr 0,7V, sie erniedrigt sich bei 85°C auf circa 0,55V und erhöht sich bei -25°C auf 0,85V.

Bei starker Einstrahlung und großer Energieabgabe lässt sich nicht verhindern, dass sich die Zelle langsam erwärmt, wodurch sich im Diagramm die gesamte Kennlinie nach links verschiebt. Arbeitete man vorher im Optimum, so verlagert sich der Arbeitspunkt bei Erwärmung in den senkrechten Teil der Kennlinie. Selbst bei Anpassung des Lastwiderstands gibt die Zelle dann nicht mehr so viel Energie ab. Starke Sonneneinstrahlung bei niedriger Umgebungstemperatur und angepasstem Lastwiderstand sorgen für den maximalen Energiestrom aus der Solarzelle, Bedingungen also, die sich nicht immer gleichzeitig verwirklichen lassen.

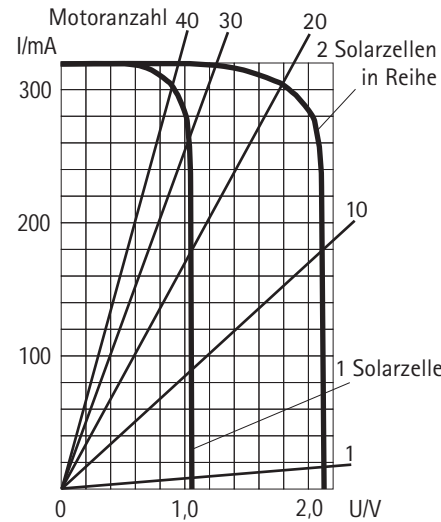


Experiment 30

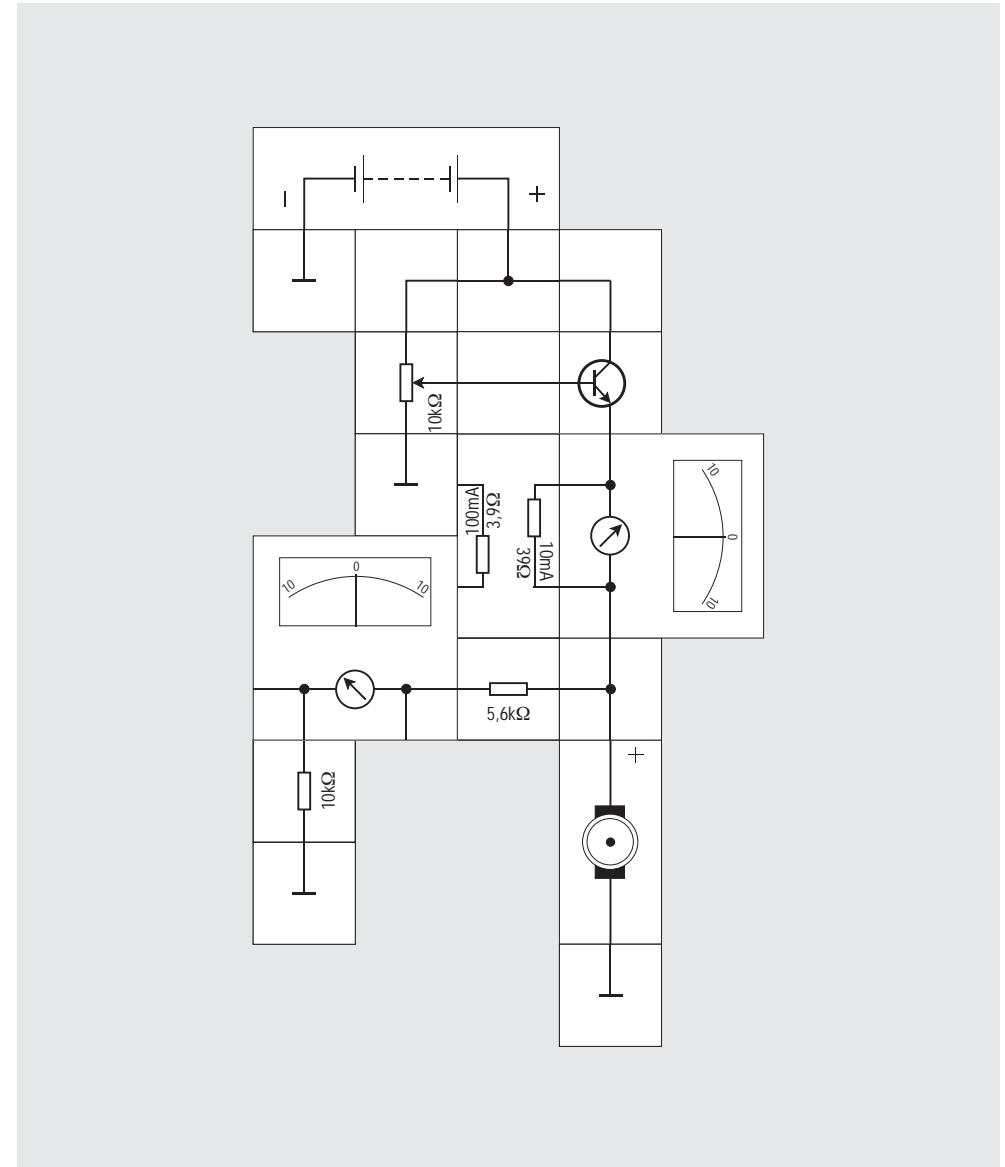
Glockenankermotor als Last an Solarzelle

In unserem ersten Versuch haben wir gesehen, dass der im Baukasten vorhandene Motor von einer einzigen Solarzelle angetrieben werden kann. Dieser Motor ist ein so genannter GLOCKENANKERMOTOR mit einem eisenlosen Glockenanker. Er lässt sich deswegen leicht ohne zu rucken von Hand drehen und läuft bereits bei Spannungen ab 0,4V an. Zwischen der angelegten Spannung und seiner Drehzahl besteht eine lineare Beziehung, ebenso zwischen aufgenommenem Strom und abgegebenem Drehmoment. Wegen dieser Eigenschaften eignet er sich besonders dazu, von Solarzellen mit Energie versorgt zu werden.

Wir wollen im Diagramm nachvollziehen, warum das so ist und nehmen zunächst seine Kennlinie (nahezu) im Leerlaufbetrieb auf; der Motor braucht lediglich mit seinen vier Flügeln etwas Luft zu bewegen. Da die Kennlinie linear ist, benötigen wir nur wenige Messpunkte. Tragen wir die so gewonnene Kennlinie in das Diagramm mit der Kennlinie einer Solarzelle ein, so sehen wir, dass sich beide im senkrechten Teil der Solarzellen-Kennlinie nahe der Leerlaufspannung schneiden: Eine Zelle mit einem Motor als Last gibt bei voller Sonnenbestrahlung nur einen



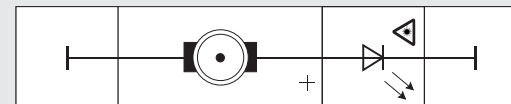
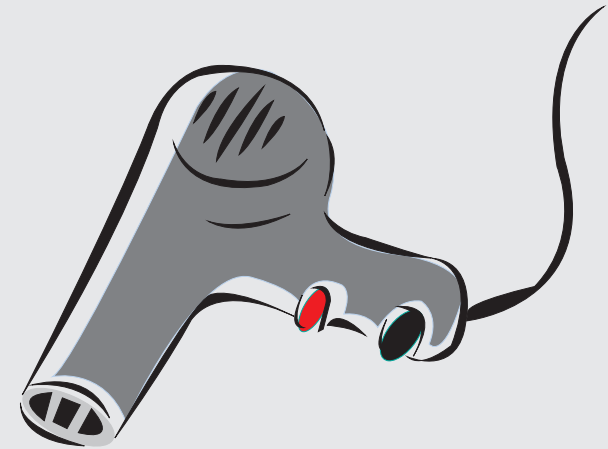
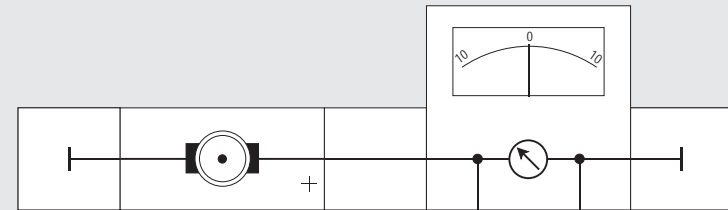
Bruchteil ihres möglichen Energiestromes ab. Um den maximalen Energiestrom abzunehmen können wir gut und gerne 40 Motoren parallel anschließen. Das ergibt sich daraus, dass die Stromwerte der Kennlinie eines Motors bei festgehaltenem Spannungswert mit 40 multipliziert eine Kennlinie ergeben, die diejenige der Solarzelle im Knickbereich schneidet. Zwei in Reihe geschaltete Solarzellen treiben bei maximalem Energiestrom 20 Motoren mit dann entsprechend höherer Drehzahl (die Drehzahl ist ja linear von der Spannung abhängig) an. Man kann es auch anders sehen; die Zelle braucht nur ganz wenig Licht, um einen Motor anzutreiben.



Experiment 31**Glockenankermotor als Generator**

Den Glockenankermotor kann man - wie fast alle Elektromotoren - auch als Generator betreiben. Dazu muss man ihn durch Anpusten der Ventilatorflügel antreiben. Als Last haben wir zunächst im Versuch nur das Messinstrument eingesetzt. Bereits leichtes Drehen des Flügelrads führt zum Vollausschlag von $100\mu\text{A}$. Ändern der Drehrichtung ergibt einen Zeigerausschlag beim Instrument zur anderen Seite. Unser »Generator« gibt also

Gleichspannung ab. Deren Polung sollten wir beachten, wenn wir im zweiten Experiment die superhelle Leuchtdiode ausnahmsweise einmal ohne Vorwiderstand anschließen. Es wird uns ohne Hilfsmittel nur kurzzeitig durch stoßartiges, kräftiges Anblasen gelingen, sie zum Aufleuchten zu bringen und damit zu zeigen, dass die Drehzahl hoch genug ist und ihre Flussspannung von $1,7\text{ V}$ überschritten wurde. Einfacher ist es, einen Fön (auf Kaltluft stellen) oder einen Ventilator zum Antreiben des Motors einzusetzen.



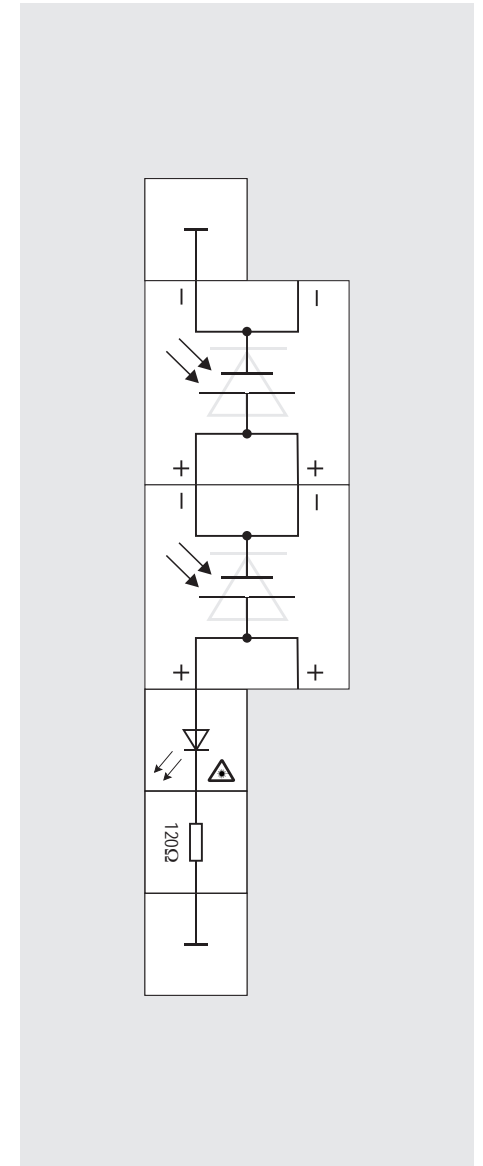
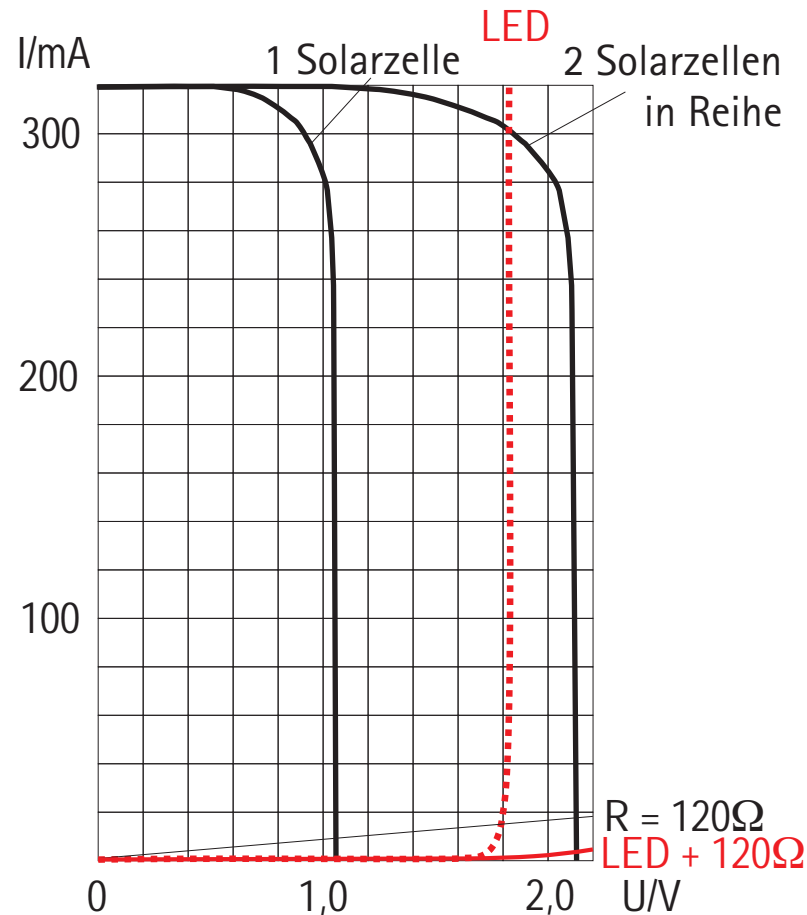
Experiment 32

LED als Last an Solarzelle

Wir wollen uns jetzt im Diagramm ansehen, was passiert, wenn wir die superhelle LED direkt an die Solarzelle anschließen und letztere der vollen Sonnenbestrahlung aussetzen.

Dazu tragen wir wie gewohnt die Kennlinie einer Solarzelle und die von zwei in Reihe geschalteten Zellen ein. Fügen wir nun noch die Kennlinie der LED (punktierte Linie) hinzu, so erkennen wir, dass sie diejenige einer Zelle auf der Abszisse, also bei $I = 0$, und $U = 1,05\text{V}$ schneidet. Ganz gleich wie stark die Solarzelle beleuchtet wird, ihre Spannung reicht nicht aus, einen Strom durch die LED mit circa $1,8\text{V}$ Knickspannung fließen zu lassen.

Legen wir dagegen zwei Solarzellen in Reihe, so schneiden sich die Kennlinie dieser Reihenschaltung und die der LED bei $U = 1,8\text{V}$ und $I = 300\text{mA}$; ohne Vorwiderstand wäre die LED sofort durchgebrannt. Mit 120Ω in Reihe zur LED erhalten wir die durchgezogene Kennlinie rechts unten in der Diagrammecke. Sie schneidet diejenige der beiden Solarzellen bei $I = 2,5\text{mA}$, das ist ein Wert, bei dem die LED bereits gut leuchtet. Der Arbeitspunkt liegt allerdings weit vom optimalen Arbeitsbereich der Solarzellen entfernt. Um dorthin zu gelangen, müsste man eine Vielzahl von Dioden mit Vorwiderstand parallel betreiben.





Experiment 33

»Hochspannungserzeugung« mit Solarzelle

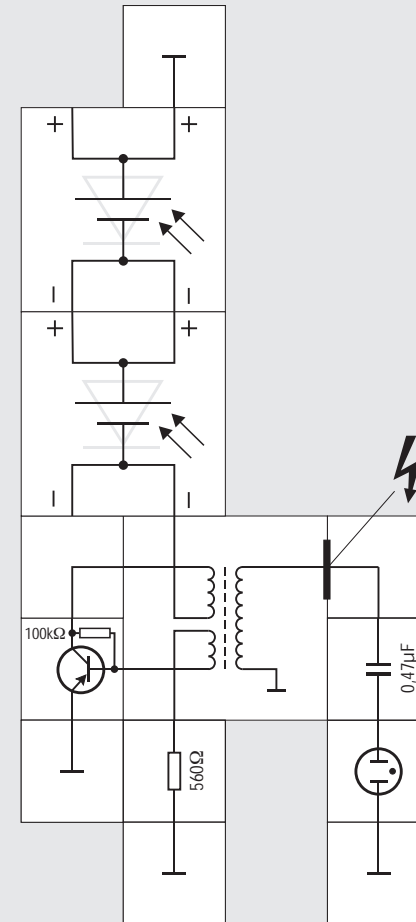
Wenn ein Verbraucher höhere Spannungen verlangt als eine Solarzelle zu liefern imstande ist, braucht man nicht unbedingt eine Vielzahl von Zellen in Reihe zu schalten. Eine Möglichkeit, die von der Solarzelle abgegebene Spannung zu wandeln, besteht darin, eine selbstschwingende Transistorstufe mit angeschlossenem Transformator einzusetzen. Zum Verständnis der Funktion sollte bekannt sein, wie ein Transistor und ein Transformator arbeiten (siehe Experimente in »Elektronik AG«).

Die Primärwicklung des Transformators liegt in der Kollektorleitung des Transistors. Jede Stromänderung in dieser Wicklung wird über die Rückkopplungswicklung im Basiskreis auch als Spannungsänderung auf die Basis übertragen und wieder im Transistor verstärkt. Dies zieht wieder eine Stromänderung im Kollektor-

kreis nach sich usw., so dass sich die Schaltung aufschaukelt und zu schwingen beginnt. In der dritten (»Hochspannungs«-) Wicklung des Transformator mit sehr vielen Windungen entsteht eine Spannung, die in der Lage ist, eine Glimmlampe leuchten zu lassen, also mindestens 70 V beträgt. Es ist eine Wechselspannung, wie man am Leuchten der beiden Elektroden erkennen kann.

Zur Strombegrenzung verwenden wir einen Kondensator. Es darf nur der 0,47 μF Typ eingesetzt werden, nur er ist spannungsfest genug. Wegen der Verwendung des Germanium pnp-Transistors muss der Pluspol der Solarzellen an Masse gelegt werden.

Entfernen wir Kondensator und Glimmlampe und berühren mit einem feuchten Finger gleichzeitig das dann freie Kontaktplättchen des Hochspannungstrafos und die Aufbauplatte, werden wir ein starkes, aber ungefährliches Kribbeln verspüren. Vorsicht, nicht erschrecken!



Experiment 34

Nickel Metallhydrid Akku als Puffer

Zum Schluss wollen wir noch ein Problem ansprechen, auf das man beim Einsatz von Solarzellen sehr schnell stößt: Die Sonne scheint nicht ständig und nachts gar nicht. Für Dauerbetrieb muss man also, wenn die Solarzelle von der Sonne beschienen wird, mehr Energie hereinholen, als zur Zeit gebraucht wird und den Rest speichern für Zeiten, in denen die Sonne nicht scheint. Als Speichermedium können wir einen Nickel-Metallhydrid-Akku (NiMH) mit einer Nennspannung von 1,2 V verwenden. Damit in die Akkuzelle überhaupt Strom aus den Solarzellen fließt, müssen wir also etwas mehr als 1,2 V anbieten; das reicht allerdings noch nicht aus, denn eine vollgeladene Akkuzelle hat 1,45 V, und wir möchten sie ja vollladen. Wir müssen deswegen zwei Solarzellen in Reihe vorsehen.

Schauen wir uns eine einfache Schaltung an, so fällt auf, dass bei nicht beschienenen Solarzellen und aufgeladenem Akku sich dieser über die Solarzellen wieder entladen kann, die Dioden der Solarzellen sind vom Akku aus gesehen in Durchlassrichtung gepolt. Um dies zu verhindern, brauchen wir noch eine Diode als Entladeschutz, deren Flussspannung $U_F = 0,3 \text{ V}$ (Schottky-Diode) ebenfalls berücksich-

tigt werden muss. Wir kommen also auf 1,75V, die zwei Solarzellen zur Verfügung stellen müssen und auch können.

Eine weitere Betrachtung ist über die Höhe des Ladestroms nötig: Normalerweise kann der Akku 14 Stunden lang mit 130 mA geladen werden. Diesen Strom kann eine Solarzelle liefern, wie wir festgestellt haben. Wir müssen deswegen keinen Parallelstrang von Solarzellen aufbauen. Es schadet aber auch nichts, wenn dieser Strom überschritten wird, der Akku kann auch schnell mit 325mA in 5 Stunden geladen werden, so viel Strom können unsere Solarzellen nicht liefern.

Um das Prinzip zu demonstrieren, können wir als Last nur den Glockenanker motor einsetzen, die Spannung des Akkus reicht nicht, eine LED zum Leuchten zu bringen. Mit Hilfe des Digitalmultimeters und des Messwiderstands sehen wir, ob der Akku ge- oder entladen wird. Das Vorzeichen der Anzeige ändert sich beim Beschatten der Zellen. Eigentlich müsste zum Schutz gegen Überladung noch eine Akku - Überwachung eingebaut werden. Aus Aufwandsgründen verzichten wir darauf, lassen unseren Versuchsaufbau aber auch nicht unbeaufsichtigt längere Zeit in der prallen Sonne liegen.

