Energiespeicher

Alfons Reichert

Inhalt

1. Einleitung **1**

2. Grundlagen **2**

3. Energiespeicher **4**

3.1 Einmalspeicher 4

3.1.1 Batterien 4

3.1.2 Kohle 5

3.1.3 Erdöl/Erdgas 7

3.1.4 Biomasse 7

3.1.5 Wasserstoff 9

3.1.6 Kernbrennstoffe 10

3.1.7 Erdwärme 12

3.1.8 Sonnenenergie 14

3.2 Aufladbare Speicher 15

3.2.1 Akkus 15

3.2.2 Kondensatoren 17

3.2.3 Wasserspeicher 20

3.2.4 Luftspeicher 24

4. Versuche **27**

4.1 Brennstoffzellen 27

4.2 Heizwert 37

4.3 Solarzellen 41

4.4 Kondensator 57

5. Literatur **71**

1. Einleitung

Ohne Moos nichts los, heißt ein bekannter Wahlspruch, wenn es ums Geld geht. Für die moderne Industriegesellschaft müsste man ihn abwandeln in „Ohne Energie läuft nichts“. Und der Energiehunger ist unersättlich. Dabei sind die Energiespeicher der Erde, die die Natur in Jahrmillionen angelegt hat, zunehmend erschöpft. Die Erdöl- und Kohlevorräte verringern sich zusehends. Die vermeintliche Lösung lautet nachwachsende Rohstoffe und erneuerbare Energien. Auf Dauer gibt es zu ihnen keine wirkliche Alternative. Leider stehen sie zeitlich und räumlich nur sehr schwankend zur Verfügung. Nur wenn die Sonne scheint und der Wind weht, liefern sie genügend Energie, um den laufenden Bedarf zu decken, dann meist sogar mehr als momentan benötigt wird. Auch geographische Unterschiede sind von Bedeutung. Im Norden Europas können Wasser- und Windkraft einen erheblichen Beitrag leisten, in Südeuropa eher die Sonnenenergie. Selbst in Deutschland macht sich dieses Nord-Süd-Gefälle bereits deutlich bemerkbar. Unabhängig von der Art der erneuerbaren Energie besteht die größte Herausforderung darin, Energiespeicher zu entwickeln oder Energiequellen zu erschließen, mit denen man die Energielücken in der Nacht oder an sonnenarmen und windstillen Tagen schließen kann. Viele Ideen stehen im Raum, nur keine von ihnen hat bisher einen Durchbruch erzielt und arbeitet aus heutiger Sicht schon wirtschaftlich. Einige Wissenschaftler wollen in den Wüsten Solarkraftwerke errichten, um die Industrieländer mit Energie zu versorgen. Riesige Investitionen wären nötig, vor allem in Überlandleitungen. Die benötigte Elektronik gibt es bereits. Aber die Abnehmer begäben sich in neue Abhängigkeiten von den politisch unsicheren Regionen Nordafrika und Naher Osten. Deutschland setzt in den letzten Jahren vermehrt auf erneuerbare Energien vor Ort, in Biogasanlagen, Photovoltaikanlagen und Windkraftanlagen. Damit zu jeder Zeit und an allen Orten genügend Energie zur Verfügung steht, entstand in Thüringen z.B. eine riesige Akkustation, in anderen Regionen, etwa in der Eifel, sind neue Pumpspeicherkraftwerke geplant. In letzter Zeit sind zudem neue Kondensatortypen auf den Markt gekommen, Superkondensatoren genannt. Sie besitzen ein Vielfaches der Kapazität bisher gängiger Kondensatoren. Vielleicht können sie in absehbarer Zeit einen entscheidenden Beitrag zur Energiespeicherung liefern.

In diesem Skript stelle ich die verschiedenen Speichermöglichkeiten vor und vergleiche sie in Bezug auf ihre Energiedichte miteinander. Denn je größer sie ist, umso weniger Platz beanspruchen die Energiespeicher. Es bleibt spannend aus wissenschaftlicher Sicht, welches Konzept sich letztendlich durchsetzt, wahrscheinlich eine Kombination aus mehreren Möglichkeiten. Denn regenerative Energien stehen in Hülle und Fülle zur Verfügung. Man muss nur die Technik entwickeln, um sie nutzen zu können.

Stolberg, im Januar 2015 und März 2020

2. Grundlagen

Nach dem Energieerhaltungssatz kann Energie weder vernichtet noch aus dem Nichts erzeugt werden. Daher ist der Energievorrat des Universums zeitlich gleichbleibend. Aber nur einen geringen Teil dieser Energie können wir nutzen, da der größte Teil als ungeordnete Wärmeenergie vorliegt. Dieser Anteil steigt nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik stetig an, da die Entropie und damit die ungeordnete Bewegung der Moleküle ständig wachsen. Die meisten Vorgänge in der Natur sind irreversibel, lassen sich nicht umkehren. Die Scherben einer Tasse, die zu Boden fällt, haben sich bis jetzt noch nie wieder zur ganzen Tasse geordnet, die vom Boden auf den Tisch zurückhüpft. Nach dem Energieerhaltungssatz spricht nichts gegen diesen Vorgang, aber er ist so unwahrscheinlich, dass noch nie jemand ihn beobachtet hat. Nach der Meinung vieler Forscher sollte das Universum folglich irgendwann den Hitzetod sterben. Ingenieure unterscheiden aus diesem Grund nutzlose und nutzbare Energie und bezeichnen letztere als Exergie. So gesehen haben wir keine Energiekrise, wie uns die Medien weismachen wollen, sondern eine Exergiekrise. Ist die Exergie eines Körpers groß, so führen viele Teilchen, seien es Moleküle, Elektronen oder Ionen eine geordnete, gerichtete Bewegung aus. Sie können einen Motor antreiben, eine Lampe zum Leuchten bringen und viele andere Vorgänge in Gang setzen, die wir tagtäglich nutzen.
Ein wichtiges Problem ist die Zwischenspeicherung der Exergie bzw. Energie. Zu manchen Zeiten steht sie im Übermaß zur Verfügung, zu anderen Zeiten kann der momentane Bedarf nicht gedeckt werden. Das gilt etwa an Sommertagen, weil zu dieser Jahreszeit die Gebäude nicht beheizt werden müssen. An einem kalten Wintertag dagegen wird viel Wärmeenergie benötigt, aber der Nachschub durch die Sonne ist gering. Die Natur hat dieses Problem auf vielerlei Art und Weise gelöst. Bäume betreiben im Sommer Photosynthese und legen sich einen Vorrat für den Winter an. Viele Tiere und auch wir Menschen profitieren davon. Sie sammeln Früchte, Obst und Gemüse und lagern sie für den Winter ein. Oder wir führen sie aus anderen Kontinenten ein, in denen zu dieser Jahreszeit Sommer herrscht. Andere Tiere fressen sich im Herbst ein Fettpolster an, um zu überwintern. Da ein Teil der von uns benutzten Exergie als elektrische Energie benötigt wird, mussten technische Lösungen her, elektrische Exergie platzsparend zwischen zu lagern. Das gelingt auf direktem Weg nur mit Hilfe elektrischer Felder z.B. in Kondensatoren. Sie können Ladungen speichern. Aber ihr Speichervermögen war bis vor ein paar Jahren sehr begrenzt und nur für kleine Ladungsmengen geeignet, etwa in Netzgeräten oder anderen elektronischen Schaltungen. Das hat sich inzwischen grundlegend geändert, seit Superkondensatoren auf den Markt gekommen sind, die 10000 mal mehr Exergie pro Kubikmeter bzw. pro Kilogramm speichern können als herkömmliche Kondensatoren. Aber sie stehen erst in kleinen Einheiten zur Verfügung und umfangreiche Praxistests stehen noch aus. Der größte Teil der überschüssigen elektrischen Exergie muss daher nach wie vor in eine andere Exergieform umgewandelt werden, damit man sie lagern kann, etwa in Lageenergie wie in Pumpspeicherkraftwerken oder in chemische Energie wie in Akkus. Daneben speichert auch die Natur Exergie in größerem Stil in Form von Biomasse. Fossile Energieträger sind aus Biomasse entstanden, die die Natur in Jahrmillionen produziert hat.
Das Speichervermögen S eines Speichers sollte möglichst hoch sein. So erzielt man lange Betriebszeiten mobiler Geräte wie Handys, Smartphones usw. oder große Reichweiten von mobilen Fahrzeugen bei kleinerer Masse bzw. kleinerem Volumen. Außerdem sinken die Transportkosten für die Geräte. Damit man die Werte für verschiedene Speichermedien mit-

einander vergleichen kann, bezieht man die Energie auf ein einheitliches Volumen oder auf eine einheitliche Masse. Damit kann man das Speichervolumen auf zwei Arten definieren:

$$S = \frac{E}{V}$$

bzw.

$$S = \frac{E}{m}.$$

Darin bedeuten:
S: Speichervermögen
E: Energie bzw. Exergie in J oder kJ
V: Volumen in cm^3 oder m^3
m: Masse in kg oder g.

Im ersten Fall spricht man von volumetrischer Energiedichte. Sie hat die Einheit J/m^3 und ist ein Maß für den Energieinhalt eines Stoffes in Joule pro Kubikmeter. Im zweiten Fall nennt man sie gravimetrische Energiedichte oder spezifische Energie mit der Einheit J/kg. Sie gibt an, wieviel Energie in Joule der Stoff pro Kilogramm speichern kann. Um sie zu bestimmen, muss man die Energie in eine leicht messbare Form umwandeln, etwa in Wärme oder in Bewegungsenergie und zugleich das Volumen bzw. die Masse des Speichermediums ermitteln. Der Quotient aus Energie und Volumen bzw. Energie und Masse ergibt das Speichervermögen. Bei Gasen bezieht man das Speichervermögen zumeist auf das Volumen, da es bei ihnen einfacher zu bestimmen ist als die Masse. Bei Festkörpern und Flüssigkeiten kann als Bezug sowohl das Volumen als auch die Masse dienen. Beide sind recht einfach experimentell zu ermitteln.

3. Energiespeicher

3.1 Einmalspeicher

3.1.1 Batterien

In Galvanischen Elementen, umgangssprachlich auch als Batterien bezeichnet, ist chemische Energie gespeichert. Sie kann bei Bedarf in elektrische Energie umgewandelt werden durch eine chemische Reaktion. Grundsätzlich besteht eine galvanische Zelle aus zwei Halbzellen. In einer werden Elektronen freigesetzt, ein Stoff wird oxidiert. Sie bildet den Minuspol der Batterie. Die andere Halbzelle nimmt die Elektronen auf. In ihr wird ein Stoff reduziert. Sie stellt den Pluspol dar. Beide Halbzellen sind durch ein Diaphragma getrennt, so dass ein direkter Elektronenaustausch unterbunden ist. Damit können die Elektronen nur vom Minuspol zum Pluspol gelangen, in dem sie über den externen Verbraucher fließen. Die Spannung der Batterie ergibt sich aus der Differenz der Potentiale der beiden Halbzellen. Sie hängt von den verwendeten Stoffen und ihren Konzentrationen in den Halbzellen ab. Auf einer Batterie stehen zwei Angaben, zum einen die Spannung U in Volt und die Ladung Q in Amperestunden Ah oder in Milliamperestunden mAh. Sie wird auch als Kapazität bezeichnet. Aus beiden zusammen kann man die Energie E errechnen, die die Batterie in Form elektrischer Energie freisetzen kann. Dazu muss man die Ladung zuerst in Amperesekunden und somit in Coulomb umrechnen. Es ist:

$$1Ah = 1A * 3600s = 3600C$$

$$1mAh = 0{,}001A * 3600s = 3{,}6C.$$

Für die Energie gilt:

$$E = Q * U.$$

Um die Energiedichte S zu erhalten, teilt man diese Energie entweder durch das Volumen der Batterie oder durch ihre Masse, wie in Kapitel 2 beschrieben.
Ein konkretes Beispiel soll die Überlegungen verdeutlichen. 9 V-Blockbatterien auf Lithiumbasis haben Kapazitäten von Q_1 = 800 mAh bis Q_2 = 1300 mAh. Ihr Volumen beträgt einheitlich V = 22 cm^3 = $2{,}2*10^{-5}$ m^2. Für die kleinste Batterie mit der Ladung Q = 800 mAh erhält man eine Energiedichte:

$$S = \frac{E}{V} = \frac{Q * U}{V} = \frac{800 * 3{,}6C * 9V}{2{,}2 * 10^{-5}m^3} = 1{,}178 * 10^9 J/m^3 = 1178MJ/m^3.$$

9V-Block-Batterien mit Alkali-Mangan-Technologie besitzen Kapazitäten von Q_1 = 500 mAh bis Q_2 = 600 mAh. Für die kleinste Ausgabe der Batterie erhält man eine Energiedichte von

$$S = \frac{500 * 3{,}6C * 9V}{2{,}2 * 10^{-5}m^3} = 7{,}36 * 10^8 J/m^3 = 736MJ/m^3.$$

Bei herkömmlichen 9V-Zink-Kohle-Blocks schwankt die Ladung zwischen Q_1 = 190 mAh und Q_2 = 330 mAh. Für die kleinste Batterie ergibt sich eine Energiedichte:

$$S = \frac{190 * 3{,}6C * 9V}{2{,}2 * 10^{-5}m^3} = 2{,}80 * 10^8 J/m^3 = 280MJ/m^3.$$

Die Energiedichte der Lithiumbatterie ist etwa eineinhalbmal so hoch wie bei einer Alkali-Mangan-Batterie und rund viermal so hoch wie bei einer herkömmlichen Zink-Kohle-Batterie. Sie hält entsprechend länger bei gleicher Belastung. Wiegt man die Batterien, so kann man auch die gravimetrische Energiedichte oder spezifische Energie errechnen. Man erhält z.B. für die Lithiumbatterie

$$S = \frac{800 * 3{,}6C * 9V}{0{,}0327kg} = \frac{25920J}{0{,}03274kg} = 0{,}792MJ/kg$$

und für die Alkali-Mangan-Batterie

$$S = \frac{500 * 3{,}6C * 9V}{0{,}04576kg} = \frac{16200J}{0{,}04576kg} = 0{,}354MJ/kg.$$

Laut Wikipedia[4)] beträgt die Energiedichte einer Lithium-Eisendisulfid-Batterie 0,9 MJ/kg, die einer Alkali-Mangan-Batterie 0,45 MJ/kg. Die gemessene Lithiumbatterie enthielt Mangandioxid MnO_2 als Oxidationsmittel. Man sieht, die Werte sind nur in etwa vergleichbar, stimmen aber in jedem Fall in der Größenordnung überein.

3.1.2 Kohle

Kohle ist in einem Jahrmillionen dauernden Prozess aus Biomasse entstanden. Abgestorbene Lebewesen, Pflanzen und Tiere werden durch Sedimentablagerungen oder Erdbeben mit Sand, Geröll und Erde überschichtet. Unter Luftausschluss und hohem Druck wurde nach und nach das in der Biomasse gebundene Wasser herausgepresst. Zurück blieb Kohlenstoff, vermischt mit Schwefel und einigen Mineralien, die in den Pflanzen und Tieren gebunden waren. Der Hauptvorgang lässt sich mit folgender Reaktionsgleichung vereinfacht zusammenfassen:

$$(C_6H_{10}O_5)_n \rightarrow 5nH_2O + 6nC.$$

Je nachdem wie weit dieser Inkohlungsprozess bereits fortgeschritten ist, unterscheidet man zwischen Braun- und Steinkohle. Sie besitzen unterschiedliche Energiedichten. Bei Rohbraunkohle beträgt sie je nach Herkunft zwischen 8 und 15 MJ/kg, bei Steinkohle bis zu 31 MJ/kg. Beide Werte sind damit deutlich höher als in Batterien oder Akkus. In Kraftwerken wird die chemische Energie der Kohle über mehrere Formen (s. Abb. 1) nur zu etwa 40% in elektrische Energie umgewandelt, der Rest geht als Abwärme an die Umgebung verloren. Nur in Blockkraftwerken wird sie teilweise als Fernwärme zum Heizen von Häusern oder als Prozesswärme in chemischen Fabriken benutzt.
Die Kohlevorkommen sind der größte Speicher an chemischer Energie. Ihr Vorrat reicht beim derzeitigen Energiehunger der Menschheit noch für einige hundert Jahre. Das ist bezogen auf ein Menschenalter beruhigend.

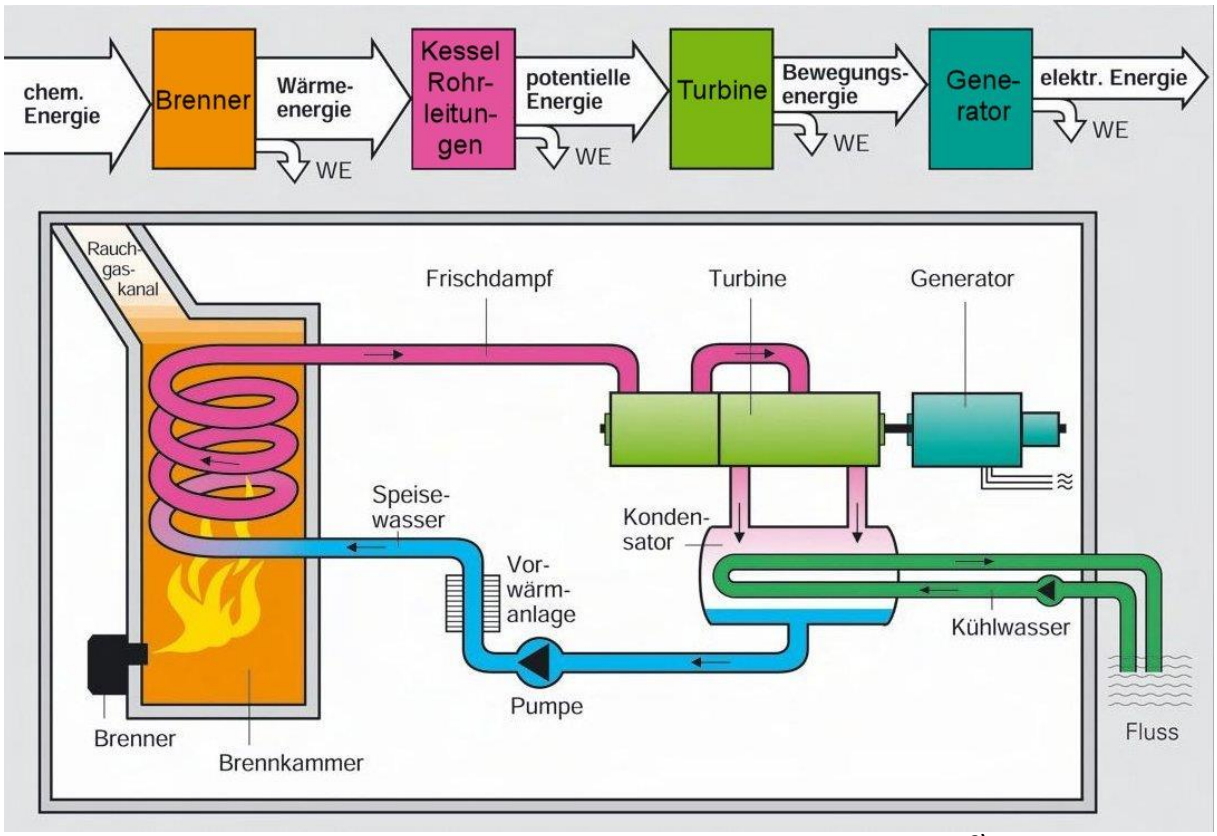


Abb.1: Energieumwandlungen in einem Kohlekraftwerk[2)]

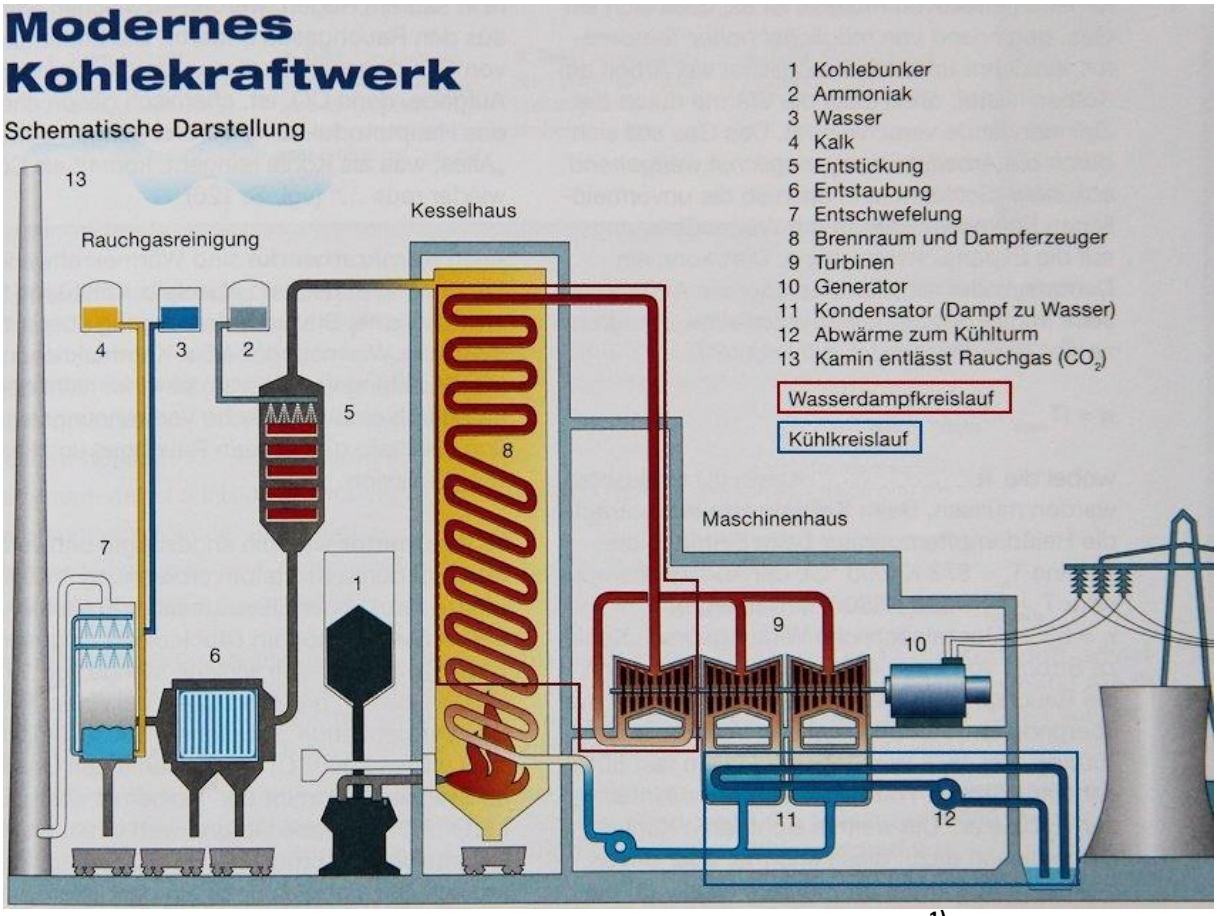


Abb.2: Aufbau eines modernen Kohlekraftwerkes[1)]

Aber jedes Jahr verbraucht die Menschheit so viel Energie, wie die Natur in 1 Million Jahre durch die Photosynthese an Sonnenenergie speichern konnte. Außerdem tragen gerade die CO_2-Emissionen aus Kohlekraftwerken erheblich zum Klimawandel bei. Weil es noch so viel Kohle gibt und ihre Energiedichte recht hoch ist, wird die Technik der Kohlekraftwerke ständig weiterentwickelt. Den Aufbau eines modernen Kohlekraftwerkes zeigt Abb.2. Im Kesselhaus wird Kohlestaub verbrannt. Mit der freiwerdenden Energie wird Wasser zum Sieden gebracht. Der Wasserdampf treibt die Turbine an. Der an sie angeschlossene Generator erzeugt elektrischen Strom. Nachdem die Rauchgase durch Entstaubungs-, Entstickungs- und Entschwefelungsfilter umweltfreundlich geworden sind, arbeiten die Ingenieure nunmehr daran, das CO_2 herauszufiltern und unter der Erde in alten Bergwerksstollen zu deponieren. Weil diese CCS-Technologie (Carbon Capture and Storage) noch intensiv erforscht werden muss, gibt es noch kein CCS-Großkraftwerk als Prototyp. Leider sinkt durch CCS der Wirkungsgrad der Kraftwerke von heute etwa 40% auf 30% ab, aber der Anstieg des CO_2-Gehalt der Atmosphäre würde deutlich gebremst werden. Welche Gefahren und Risiken von diesen CO_2-Depots ausgehen können, ist noch völlig unklar.

3.1.3 Erdöl/Erdgas

Erdöl und Erdgas sind ebenso wie Kohle aus Biomasse entstanden, die durch Pflanzen vor Jahrmillionen aufgebaut wurde. Nur die geologischen Bedingungen waren etwas anders. Außerdem waren an der Umsetzung Bakterien beteiligt. Es wurde kein Wasser freigesetzt, sondern Kohlendioxid. Dieser Vorgang läuft heute in ähnlicher Weise in Biogasanlagen ab. Methan kann sich aus Glucose, dem Grundbaustein der Biomasse, etwa nach folgender Reaktionsgleichung bilden:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2.$$

In ähnlichen Prozessen entstehen auch die langkettigen Alkane als wesentliche Bestandteile des Erdöls. Der Brennwert von Erdgas liegt je nach Herkunft zwischen 30 und 36 MJ/kg. Aus Erdöl destilliert man eine Reihe von Produkten wie Benzin oder Diesel mit Brennwerten von 46 MJ/kg bzw. 42 MJ/kg. Kein anderer Treibstoff für Fahrzeuge kommt auch nur in die Nähe dieser Werte, auch Wasserstoff nicht, da der Tank mit berücksichtigt werden muss (vgl. Kapitel Wasserstoff). Benzin und Diesel sind außerdem flüssig und lassen sich daher leicht handhaben. Leider sind die bekannten Vorräte in einigen Jahrzehnten aufgebraucht, wenn der Energiehunger der Menschheit weiter so anhält. Bei ihrer Verbrennung entstehen Kohlendioxid und Wasser. Methan z.B. verbrennt nach folgender Reaktionsgleichung:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O.$$

Erdgas und Erdölprodukte tragen damit erheblich zur Erderwärmung bei. Sie sollen nach und nach durch erneuerbare Energieträger wie Wasserstoff, Akkus usw. ersetzt werden. Ihre Energiedepots kann man mit Sonnenenergie oder Windenergie aufladen.

3.1.4 Biomasse

Mit Hilfe des Sonnenlichtes läuft in allen Pflanzen im Chlorophyll der Blätter die Photosynthese ab. In einem zweistufigen Prozess bauen sie aus Kohlendioxid und Wasser Glucose auf nach folgender Reaktionsgleichung:

$$6CO_2 + 6H_2O \leftrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2.$$

Unter optimalen Bedingungen können dabei über 10% der Lichtenergie in chemische Energie umgewandelt werden. Durchschnittlich liegt der Wirkungsgrad aber nur bei etwa 1%. Ein großer Baum kann an einem Sommertag bis zu 15 kg Glucose bilden. Das benötigte CO_2 nehmen die Pflanzen auf der Blattunterseite durch winzige Spaltöffnungen auf, gleichzeitig scheiden sie den für die Tiere lebensnotwendigen Sauerstoff ab. Im Baum wird fast alle Glucose anschließend in Stärke und in Cellulose umgewandelt. Stärke ist der wichtigste Energiespeicher der Pflanzen, aus Cellulose und eingelagertem Lignin bestehen vor allem das Holz und die Blätter. Nicht nur die Pflanzen, sondern auch die Tiere, nutzen die Stärke als Energieträger. Dabei wird die Photosynthese umgekehrt (s. Reaktionsgleichung). Glucose reagiert mit Sauerstoff wieder zu Kohlendioxid und Wasser. Im Laufe der Evolution hat sich ein Kreislauf entwickelt zum beiderseitigen Nutzen. Tiere und Menschen nehmen den Sauerstoff auf und atmen Kohlendioxid aus, Pflanzen atmen Kohlendioxid ein und geben Sauerstoff ab. Die Photosynthese ist damit der wichtigste chemische Prozess, den die Natur je erfunden hat. Die fossilen Energieträger, die wir heute in großem Stile nutzen, hätten sich ohne diese chemische Reaktion nicht bilden können.
Die Menschen nutzen die Stoffe, die die Pflanzen durch die Photosynthese bereitstellen, nicht nur als Nahrung, sondern in vielfältiger Weise. Als Holzpellets mit einer Energiedichte von 10 MJ/kg dienen sie zum Heizen der Wohnungen. Durch alkoholische Gärung kann man sie in Ethanol umwandeln, der als Biotreibstoff und als Genussmittel verwendet wird. Dabei laufen folgende Reaktionen ab:
Alkoholische Gärung:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_6O + 2CO_2$$

Verbrennung von Ethanol:

$$C_2H_6O + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O.$$

Ethanol hat eine Energiedichte von 26,8 MJ/kg, ist also durch die Gärung energetisch weiter verdichtet worden. Sie ist jedoch kleiner als die von Benzin und Diesel. Daher steigt der Spritverbrauch etwas, wenn man Super-E10 mit 10% Ethanol tankt anstelle des normalen Supers, das nur 5% Prozent Ethanol enthält.
Ein Teil der Biomasse wird als Abfälle in Biogasanlagen in Methan verwandelt, das anschließend zum Heizen oder zur Erzeugung elektrischer Energie genutzt wird. Die Reaktionsgleichungen lauten:
Biogasanlage:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$$

Verbrennung von Methan:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O.$$

Methan hat eine Energiedichte von 50 MJ/kg. Bei seiner Verbrennung entsteht weniger Kohlendioxid als bei der Verbrennung von Benzin, Diesel oder Ethanol, da der Wasserstoffanteil im Molekül prozentual höher ist. Deshalb ist es als Treibstoff für Autos umweltfreundlicher als Benzin, Diesel oder Ethanol.

3.1.5 Wasserstoff

Geht es nach dem Willen einiger Ingenieure, so hat Wasserstoff als Energieträger eine große Zukunft. Er besitzt mit 120 MJ/kg die größte Energiedichte aller konventionellen Brennstoffe. Nur in Kernbrennstoffen ist die Energie noch wesentlich dichter gepackt. Wasserstoff lässt sich durch Elektrolyse aus Wasser in beliebiger Menge gewinnen. Den benötigten Strom könnten Solarzellen liefern. Sie produzieren kleine Gleichspannungen, ideal für die Elektrolyse. Alternativ könnte man Windenergie nutzen. Allerdings sind die Lagerung und der Transport des Wasserstoffs nicht unproblematisch, da er hoch explosiv ist. Dafür entsteht bei seiner Verbrennung in einem Motor lediglich Wasserdampf als Abgas, der bei Temperaturen unter 100 °C zu flüssigem Wasser kondensiert. Es entsteht ein geschlossener Stoffkreislauf. Man kann mit dem Wasserstoff auch Brennstoffzellen betreiben, die einen Elektromotor antreiben. Beide Varianten sind heute bereits technisch realisiert. Als Tanks dienen sogenannte Feststoffspeicher aus Magnesiumhydrid, Lithiumhydrid oder Lithiumaluminiumhydrid, wie sie auch in Nickel-Metallhydrid-Akkus verwendet werden. In sie kann man Wasserstoff unter geringem Überdruck pressen. Beim Erwärmen setzen sie ihn wieder frei. Sie sind allerdings für Autos recht schwer, da die Energiedichte in ihnen nur S = 1,19 MJ/kg statt S = 120 MJ/kg bei reinem Wasserstoff beträgt, obwohl sie aus Leichtmetallen gebaut werden. Eine kleine Rechnung macht das deutlich. Der Benzintank in einem Auto fasst z.B. V = 60 l Benzin. Für die Masse des Benzins gilt:

$$m = \rho * V = 0{,}75kg/l * 60l = 45kg.$$

Hinzu kommt die Masse des leeren Tanks. Mit der Energiedichte S des Benzins erhält man für die darin enthaltene Energie E:

$$E = m * S = 45kg * 43MJ/kg = 1935MJ.$$

Ein Metallhydridwasserstofftank, der die gleiche Energiemenge speichert, hätte eine Masse

$$m = \frac{E}{S} = \frac{1935MJ}{1{,}19MJ/kg} = 1626kg.$$

Die Reichweite wäre mit beiden Tanks in etwa gleich, da die Brennstoffzellen einen etwas höheren Wirkungsgrad haben wie Verbrennungsmotoren für Benzin. Der Wasserstofftank wäre zwar etwa elfmal leichter als ein Bleiakku gleichen Energieinhalts, aber dennoch eineinhalbmal so schwer wie der Rest des Autos. Und die Masse unserer Autos ist heute schon der größte Pferdefuß, wenn es um sparsame Autos geht. In einem Auto der Masse m = 1200 kg wird meist nur eine Peron der Masse m = 75 kg von A nach B transportiert. Das wäre so, als würde man Eier in Stahlbehältern befördern statt in Hörtchen aus Karton.
Abb.1 zeigt einen Modellversuch zur Wasserstoffversorgung der Zukunft. In einer Elektrolysezelle wird mit Hilfe von Solarstrom Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Sie werden in eine Brennstoffzelle eingespeist, die einen kleinen Elektromotor antreibt. Bis zur großtechnischen Umsetzung dieses Konzeptes ist allerdings noch viel Entwicklungsarbeit nötig. Aber es wäre eine saubere und nachhaltige Energieversorgung, nicht nur für Autos und Fahrzeuge, sondern auch zum Heizen der Gebäude, wenn man den Wasserstoff verbrennt.

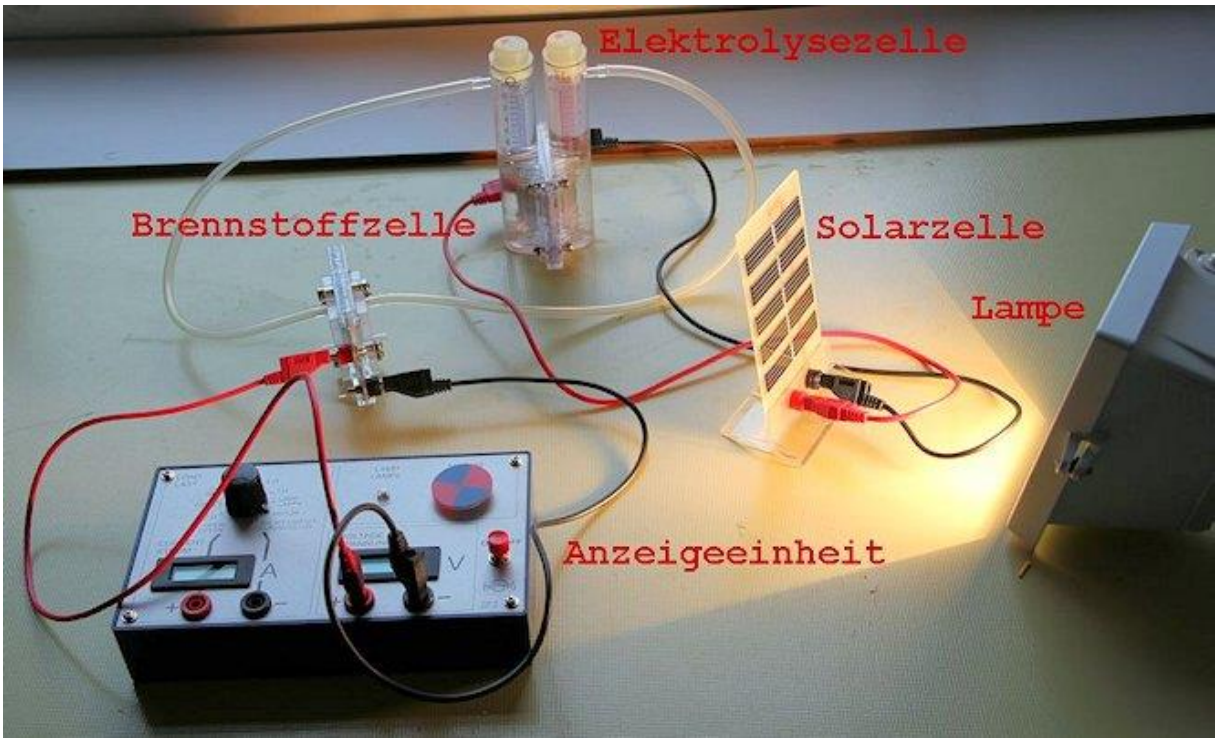


Abb.1: Experimentiersatz zum Wasserstoffauto

3.1.6 Kernbrennstoffe

Die berühmteste Formel der Relativitätstheorie lautet:

$$E = m * c^2.$$

Masse lässt sich in Energie verwandeln. In m = 1 kg Masse ist eine Energie

$$E = 1kg * (3 * 10^8 m/s)^2 = 9 * 10^{16} J$$

gespeichert. In Masse ist die Energie am dichtesten gepackt. Der Energievorrat der Erde und des Weltalls ist damit nahezu unerschöpflich. In Kernkraftwerken wird ein geringer Teil dieser Energie genutzt. Denn die Summe der Massen der Spaltprodukte ist kleiner als die Summe der Massen der Ausgangskerne. Der Massendefekt liefert die kinetische Energie, mit der die Spaltkerne auseinanderfliegen. Sie erhitzt den Wasserdampf, der seinerseits die Turbine antreibt. Der nachgeschaltete Generator wandelt die thermische Energie in elektrische um. Die meisten Kerne werden nach folgender Reaktionsgleichung gespalten (s.a. Abb. 1):

$${}^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{89}_{36}Kr + {}^{144}_{56}Ba + 3{}^{1}_{0}n.$$

Die Massenbilanz lautet:
Edukte E:

$$m_E = m_{U235} + m_n = 235{,}043930u + 1{,}0086649u = 236{,}0525949u$$

Produkte P:

$$m_P = m_{Kr89} + m_{Ba144} + 3m_n$$
$$= 88{,}91763u + 143{,}922953u + 3 * 1{,}0086649u = 235{,}8665777u.$$

Die Differenz beträgt:

$$\Delta m = m_E - m_P = 236{,}0525949u - 235{,}8665777u = 0{,}1860172u.$$

Bei der Kernspaltung wird pro Atomkern eine Energie

$$E = 0{,}1860172u * 1{,}660539 * 10^{-27}kg/u * (2{,}99792458 * 10^8 m/s)^2$$
$$= 2{,}77615422 * 10^{-11}J$$

frei. U-235 besitzt damit eine Energiedichte von

$$S = \frac{2{,}77615422 * 10^{-11}J}{236{,}0525949u * 1{,}660539 * 10^{-27}kg/u} = 70.800.000MJ/kg.$$

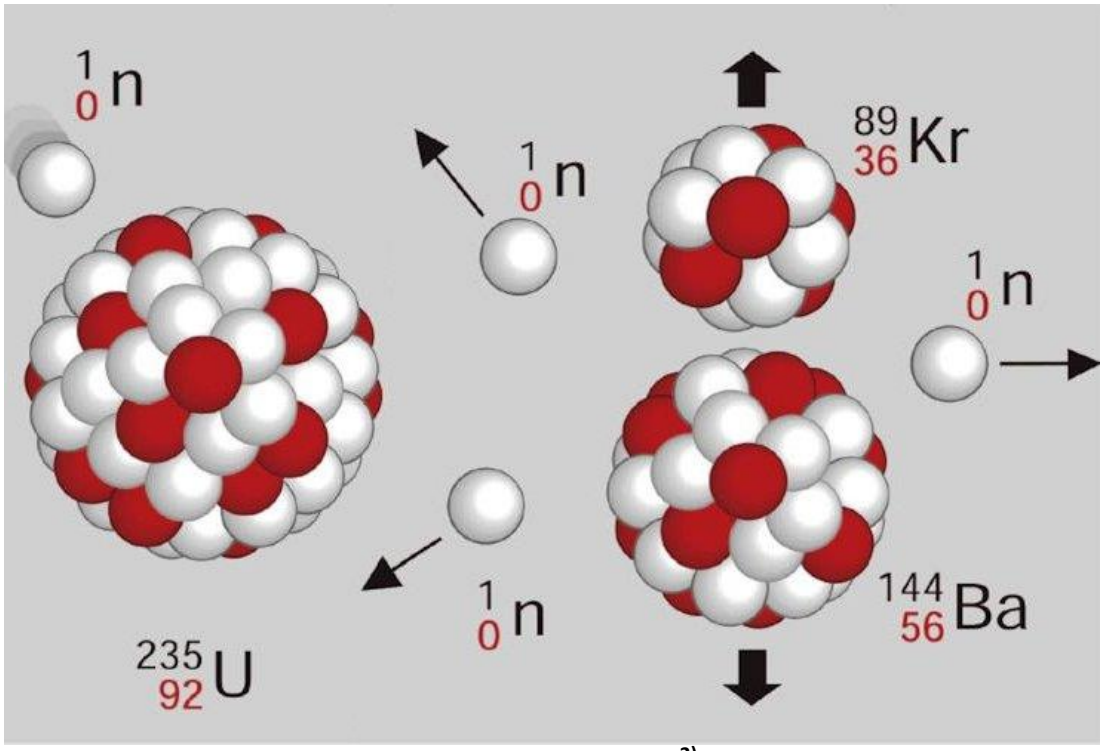


Abb.1: Kernspaltung[2)]

Bei Wikipedia[4)] wird sie mit rund 90.000.000 MJ/kg angegeben. Der Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass bei der obigen Rechnung nur die Hauptreaktion berücksichtigt wurde. Die Spaltprodukte sind ihrerseits radioaktiv und setzen zusätzliche Energie frei.
In der Sonne verschmelzen Protonen zu Heliumkernen. Diese Kernfusion liefert riesige Energiemengen. Eine ähnliche Kernreaktion soll in Zukunft in einem Fusionsrektor ablaufen, um

die Energieprobleme zu lösen. Darin verschmelzen ein Deuterium- und ein Tritiumkern zu einem Heliumkern nach folgender Reaktionsgleichung:

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n. $$

Hier lautet die Massenbilanz:

Edukte E:

$$ m_E = m_{H2} + m_{H3} = 2{,}0141018u + 3{,}0160493u = 5{,}0301511u $$

Produkte:

$$ m_P = m_{He4} + m_n = 4{,}0026033u + 1{,}0086649u = 5{,}0112682u. $$

Die Differenz beträgt:

$$ \Delta m = m_E - m_p = 5{,}0301511u - 5{,}0112682u = 0{,}0188829u. $$

Bei dieser Kernfusion wird pro Reaktion eine Energie

$$ E = 0{,}0188829u * 1{,}660539 * 10^{-27} kg/u * (2{,}99792458 * 10^{8} m/s)^2 $$
$$ = 2{,}8181 * 10^{-12} J $$

frei. Die Energiedichte beträgt:

$$ S = \frac{2{,}8181 * 10^{-12} J}{5{,}0301511u * 1{,}660539 * 10^{-27} kg/u} = 337.000.000 MJ/kg. $$

Bei Wikipedia[4)] wird sie mit rund 300.000.000MJ/kg angegeben.

3.1.7 Erdwärme

Wir leben auf einer riesigen, im Innern zwischen 5000 und 7000 °C heißen Feuerkugel. Etwa die Hälfte der Wärme stammt noch aus der Zeit, als die Erde entstanden ist. Die andere Hälfte liefern langlebige Radioisotope im Erdinneren. Trotzdem gibt es im Winter Eis und Schnee. Erdboden und Gestein sind schlechte Wärmeleiter. Der Wärmestrom aus dem Erdinneren beträgt im Schnitt nur S = 0,065W/m^2. Nur an Stellen, an denen heiße Quellen austreten und Vulkane heißes Magma an die Oberfläche befördern, ist er deutlich höher. Auf Island z.B. können die Gebäude durch Fernwärme kostenlos beheizt werden. Solche Wärmequellen sind auf der Erde recht selten. Die mittlere Bodentemperatur an der Oberfläche wird vor allem von der Sonneneinstrahlung und den Luftströmungen bestimmt. Die Sonne liefert in unseren Breiten unter optimalen Bedingungen etwa S = 1kW/m^2. Ab etwa einer Tiefe von 1 m stellt sich aufgrund beider Wärmequellen bei uns eine konstante Temperatur ein, die der mittleren Lufttemperatur an der Oberfläche entspricht. Gräbt man tiefer in die Erde wie etwa beim Bergbau, dann nimmt die Temperatur im Mittel um rund 3°C pro 100 m zu. Deshalb ist es in tiefen Bergwerksstollen unerträglich heiß.

Die schlechte Wärmeleitung verhindert, dass man den unbegrenzten Wärmevorrat der Erde einfach anzapfen kann. Man bohrt dazu Löcher bis in Tiefen von 100 m und pumpt anschließend Wasser hinein. Das erwärmte Wasser gibt seine Wärme über einen Wärmetauscher an die Luft in den Gebäuden ab. Leider treten in der Praxis unkalkulierbare Risiken auf. So muss man das Gestein im Innern der Erde lockern, damit ein kontinuierlicher Wärmestrom stets genügend Wärme aus umliegenden Schichten nachliefert. Das ist mit Erschütterungen und kleinen Erdbeben verbunden. Eine wasserführende Schicht ist besonders günstig, da sie einen guten Wärmeübergang zwischen den Schichten gewährleitet. Allerdings kann es dann passieren, dass man Gesteinsschichten wie etwa Gipskeuper mitanbohrt, die durch das Wasser aufquellen, den Boden anheben und so Risse in Gebäuden verursachen. Außerdem verschlammen die Erdlöcher schnell und müssen in regelmäßigen Abständen erneuert werden. Nur wenn die Temperatur des Grundwassers ausreicht, kann man die Gebäude relativ preisgünstig mit einer Wärmepumpe beheizen. Dazu ist allerdings eine wasserrechtliche Genehmigung erforderlich. Bohrt man bis in Tiefen von 3000 bis 5000 m, so erhält man Wasser, das bis zu 150 °C heiß ist und unter erhöhtem Druck steht. Dazu sind zwei Bohrungen nötig, die mehrere hundert Meter voneinander entfernt sind. Zu Beginn wird Wasser unter hohem Druck in ein Bohrloch gepresst, um im Gestein Brüche und Spalten zu erzeugen. Später pumpt man kaltes Wasser hinein, lässt es durch das Gestein erwärmen und fördert es im zweiten Bohrloch nach oben. Damit kann man Wasserdampf erzeugen und damit eine Turbine antreiben, die Strom erzeugt. Geothermische Kraftwerke können eine Leistung bis zu 50 MW haben. In Deutschland, Frankreich und der Schweiz sind Pilotanlagen in Betrieb. Es treten immer wieder kleinere und mittlere Erdbeben auf, so dass die Akzeptanz der Anlagen bei den Einwohnern zunehmend sinkt.
Aus physikalischen Gründen steht die Erdwärme nur im bescheidenen Maße zur Verfügung, um Häuser zu heizen. Das soll die folgende kleine Rechnung verdeutlichen. Die mittlere Wärmekapazität aus Gestein und Erdboden beträgt c = 0,8 kJ/(kg*°C)[4]. Damit erhält man bei einem Temperaturunterschied von ΔT = 10 °C eine mittlere Energiedichte S des Erdreichs

$$S = \frac{c * m * \Delta T}{m} = c * \Delta T = \frac{0{,}8\ kJ}{kg * °C} * 10°C = 8000\, J/kg.$$

Um ein Einfamilienhauses zu heizen, benötigt man z.B. V = 2000 l Heizöl und damit eine Energie von E = 20000 kWh. Für diese Energie muss man eine Erdmasse

$$m = \frac{E}{S} = \frac{2 * 10^4 kWh * 3{,}6 * 10^6 J/kWh}{8000 J/kg} = 9 * 10^6 kg.$$

anzapfen. Bei einer mittleren Dichte des Erdreichs von ρ = 2100 kg/m^3 entspricht das einem Volumen

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{9 * 10^6 kg}{2100 kg/m^3} = 4286 m^3.$$

Beträgt die Dicke der angezapften Erdschicht z.B. d = 4 m, so muss man die Oberflächenerdsonden auf einer Fläche von A = 1071 m^2 verlegen. Das entspricht der Fläche von 3 mittleren Baugrundstücken. Nur in tieferen Erdschichten kann man die Temperatur durch die Wärmepumpe um mehr als 10 °C absenken. Dadurch sinkt der Flächenbedarf. Problematisch bleibt

aber die geringe mittlere Wärmeleitfähigkeit der Erde aus Erdboden und Gestein von etwa λ = 1,8 W/(m*K)[4]. Die entnommene Energie wird nur sehr langsam durch die umgebenden Erdschichten nachgeliefert. Man müsste den Erdboden ständig umgraben, um die Energie besser nutzen zu können.

3.1.8 Sonnenenergie

Fast die gesamte Energie, die wir nutzen, stammt letztendlich von der Sonne. Pflanzen haben die Sonnenenergie mit Hilfe der Fotosynthese in fossilen Energieträgern gespeichert. Die Sonnenstrahlung erwärmt in Solarkollektoren Wasser und erzeugt in Solarzellen Strom. Sie treibt die Luftströmungen an, erwärmt das Wasser in den Ozeanen und lässt Wasser verdunsten, das als Regen vom Himmel fällt und Staubecken füllt. Nur die Kernenergie und die Erdwärme haben ihren Ursprung nicht in der Sonne. Uran steht jedoch als Kernbrennstoff nur in begrenzter Menge zur Verfügung. Die langfristige sichere Lagerung der radioaktiven Abfälle ist bislang weitgehend ungeklärt. Die Nutzung der Erdwärme ist mit unkalkulierbaren Risiken verbunden und steht nur an einigen exponierten Orten auf der Erde in ausreichendem Maße zur Verfügung (s. Erdwärme). Eine nachhaltige langfristige Energieversorgung kann daher nur auf der Sonnenenergie aufbauen, wie die folgende Rechnung zeigt. In der Sonne werden Wasserstoffatome zu Heliumatomen verschmolzen nach folgender Reaktionsgleichung:[3]

$$4\,{}^{1}_{1}H \;\rightarrow\; {}^{4}_{2}He + 3\gamma + 2e^{+} + 2\nu + 25\,MeV.$$

Darin sind:
γ: Gammaquanten
e^{+}: Positronen
ν: Neutrinos.

Pro Sekunde werden m = $6{,}7*10^{11}$kg Wasserstoff verbrannt. In der Sonne laufen damit in jeder Sekunde

$$z = \frac{m}{4 * m(H)} = \frac{6{,}7 * 10^{11} kg/s}{4 * 1{,}66 * 10^{-27} kg} = 1{,}01 * 10^{38} * 1/s$$

Kernreaktionen ab. Sie erzeugen eine Leistung

$$\begin{aligned} P &= 1{,}01 * 10^{38} * 1/s * 2{,}5 * 10^{7} * 1{,}6 * 10^{-19} J \\ &= 4{,}04 * 10^{26} J/s \\ &= 4{,}04 * 10^{26} W. \end{aligned}$$

Die Energie wird in alle Richtungen etwa gleichmäßig ins Weltall abgestrahlt. Jeder Quadratmeter der Querschnittsfläche der Erde wird damit mit einer Intensität

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{4{,}04 * 10^{26} W}{4\pi * (1{,}5 * 10^{11} m)^2} = 1430\, W/m^2.$$

bestrahlt. Darin ist r der Radius der Erdbahn um die Sonne. Da die Atmosphäre 30 % der Sonnenenergie absorbiert bzw. reflektiert, beträgt die Solarkonstante am Erdboden im Schnitt

$$S = 0{,}7 * I = 0{,}7 * 1430 W/m^2 = 1000 W/m^2 .$$

Die gesamte Querschnittsfläche A der Erdoberfläche wird von der Sonne mit der unglaublichen Leistung

$$P = S * A = 1000\, W/m^2 * \pi * (6{,}4 * 10^6 m)^2 = 1{,}29 * 10^{17} W.$$

angestrahlt. Die gesamte Menschheit benötigt zurzeit eine Primärleistung $P = 1{,}5*10^{13}$ W. Könnte man zu jeder Zeit nur

$$P = \frac{1{,}5 * 10^{13} W}{1{,}29 * 10^{17} W} * 100\% = 0{,}0116\%$$

der von der Sonne auf die Erdoberfläche abgestrahlten Energie in nutzbare Energie umwandeln, dann wären schlagartig alle Energieprobleme der Menschheit gelöst. Diese Überlegung macht deutlich, auf lange Sicht führt kein Weg an der sinnvollen Nutzung der Sonnenenergie für alle Lebensbereiche vorbei. Nur sie stellt jederzeit die benötigten Energiemengen zur Verfügung. Sind ihre Energievorräte erschöpft, erlischt so wie so alles Leben auf der Erde. Am Ende ihres Lebens bläht sie sich zu einem roten Riesen auf, der alle Planeten verschluckt. Heute wird nur ein winziger Bruchteil dieser Energie wirklich genutzt, etwa in Solaranlagen. In unseren Breiten bestrahlt die Sonne jeden Quadratmeter Erdoberfläche mit einer Energie von rund E = 1000 kWh pro Jahr und m^2. Sie entspricht der Energie, die in V = 100 l Heizöl enthalten sind. Mit Solarzellen mit einem Wirkungsrad von η = 10 - 15 % kann man somit eine elektrische Energie von E_{el} = 100 - 150 kWh/(a*m^2) erwirtschaften. Um den Bedarf eines Zweipersonenhaushalt an elektrischer Energie von ca. E = 5000 kWh/a zu decken, benötigt man bei Südlage eine mittlere Dachfläche

$$A = \frac{E}{E_{el}} = \frac{5000 kWh/a}{125 kWh/(a * m^2)} = 40 m^2.$$

Soviel Platz bietet jedes Dach. Inzwischen sind die Preise der Solaranlagen soweit gesunken, dass der von ihnen erzeugte Strom auch wirtschaftlich konkurrenzfähig ist. Leider steht er nur sehr schwankend zur Verfügung. Hier müssen sinnvolle Speicherlösungen her. Vielleicht bieten die neuen Superkondensatoren eine Lösung (s. Kondensator).

3.2 Aufladbare Speicher

3.2.1 Akkus

Wenn in einer Batterie die Ausgangsstoffe der chemischen Reaktion, die den Strom erzeugt, größtenteils aufgebraucht sind, liefert sie keine oder nur noch eine zu geringe elektrische Spannung. Man sagt, sie ist leer. Man muss sie als Müll, je nach Inhaltsstoffen auch als Sondermüll entsorgen. Einige können zumindest teilweise recycelt werden. In Akkus dagegen kann man die chemische Reaktion durch eine externe Spannung umkehren. Die drei wich-

tigsten, heute verwendeten Akkus sind der Blei-Akku, der Lithiumionen-Akku und der Nickel-Metallhydrid-Akku. Der Blei-Akku, auch als Autobatterie bezeichnet, dient im Auto als Starterbatterie und treibt einen Elektromotor an, der den Benzinmotor auf Touren bringt. Sie wird laufend neu geladen durch die elektrische Lichtmaschine, einen kleinen Generator. Lithiumionenakkus sind in Laptops, Fotoapparaten, Camcordern und anderen elektronischen Geräten weit verbreitet und treiben Elektroautos an. Nach wie vor sind aber auch Nickel-Metallhydrid-Akkus im Einsatz. Ihre spezifischen Energien S liegen laut Wikipedia[4)] in der gleichen Größenordnung, unterscheiden sich aber fast um den Faktor 5. Sie betragen für die verschiedenen Akkus:

$$Bleiakku\colon\ S = 0{,}11 MJ/kg$$

$$NiMHakku\colon\ S = 0{,}36 MJ/kg$$

$$Liionakku\colon S = 0{,}5\, MJ/kg.$$

Für kleinere, elektrische, mobile Geräte sind Akkus ein geeigneter Energiespeicher. Der Akku eines Laptops trägt z.B. die Aufschriften

$$U = 10{,}8\, V; E = 48 Wh; Q = 4200 mAh.$$

Bei einer mittleren Leistung des Laptops von P = 15 W hält der Akku

$$t = \frac{E}{P} = \frac{48 Wh}{15 W} = 3{,}2 h.$$

Das ist eine akzeptable Zeit. In Zukunft sollen Akkus aber auch Elektroautos antreiben. Ein Kleinwagen fährt t = 8 h mit einer mittleren Leistung P = 20 KW. Der Elektromotor besitzt einen Wirkungsgrad von η = 95%. Dann erhält man für die Masse des benötigten Lithiumionen-Akkus:

$$m = \frac{E}{\eta * S} = \frac{P * t}{\eta * S}$$

$$= \frac{20 kW * 8 h}{0{,}95 * 0{,}5 MJ/kg} = \frac{160 kWh}{0{,}475 MJ/kg}$$

$$= \frac{160 kWh * 3{,}6 MJ/kWh}{0{,}475 MJ/kg} = 1213 kg.$$

Das ist noch mehr als die mittlere Masse des Kleinwagens. Mit Bleiakkus wird die Masse völlig unakzeptabel. Man erhält mit der spezifischen Energie eines Bleiakkus:

$$m = 5514 kg.$$

Das entspricht der Masse eines kleinen LKWs. Besitzt das Auto einen Benzinmotor mit einem Wirkungsgrad von η = 35%, so würde die im Akku gespeicherte Energie etwa mit einer

Tankfüllung vergleichbar sein, wie die folgende Rechnung zeigt. Man bestimmt zunächst mit Hilfe der spezifischen Energie S die Masse m des benötigten Benzins und dann mit der Dichte ρ das Volumen V. Es gilt:

$$m = \frac{E}{\eta * S} = \frac{160kWh * 3{,}6MJ/kWh}{0{,}35 * 43MJ/kg} = 38{,}27kg$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{38{,}27kg}{0{,}75kg/l} = 51{,}03l.$$

Um Elektroautos wirklich konkurrenzfähig zu machen, muss die spezifische Energie der zur Verfügung stehenden Akkus erheblich gesteigert werden, oder es müssen neue Akkus mit größerer spezifischer Energie entwickelt werden.

3.2.2 Kondensatoren

In Kondensatoren lassen sich elektrische Ladungen speichern und bei Bedarf wieder abrufen. Im einfachsten Fall bestehen sie abwechselnd aus Lagen von Aluminiumfolien und nicht leitenden Kunststofffolien. In einer anderen Form befindet sich zwischen den Alufolien ein Elektrolyt als Dielektrikum. Häufig sind sie zu einem Zylinder aufgerollt. Das Dielektrikum erhöht das Speichervermögen des Kondensators. Bis vor ein paar Jahren war die in solchen Kondensatoren pro Volt gespeicherte Ladung, auch Kapazität genannt, im Vergleich zur Ladung, die man in Akkus und Batterien speichern kann, allerdings sehr gering. Kondensatoren dienten allenfalls als Zwischenspeicher für kleine Ladungsmengen etwa in Netzgeräten. Die Ladungen erzeugen ein elektrisches Feld, das die Energie E_K trägt. Es wird durch das Dielektrikum verstärkt. Die im Kondensator gespeicherte Energie E_K berechnet sich mit C als Kapazität und U als Spannung zu:

$$E_K = \frac{1}{2}CU^2.$$

Für die Kapazität C gilt:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r * \frac{A}{d}$$

und für Spannung

$$U = E * d.$$

Darin bedeuten:
ε_0: elektrische Feldkonstante
ε_r: Dielektrizitätszahl
A: Fläche einer Folie
E: elektrische Feldstärke
d: Abstand zweier Metallfolien bzw. Dicke der Kunststofffolie.

Setzt man diese Gleichungen in die Energiegleichung ein, so folgt:

$$E_K = \frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon_r * \frac{A}{d} * (E * d)^2 = \frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon_r * (A * d) * E^2 = \frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon_r * V * E^2.$$

Für die Energiedichte S des elektrischen Feldes im Kondensator erhält man somit:

$$S = \frac{E_K}{V} = \frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon_r * E^2.$$

Die Energiedichte steht und fällt mit der elektrischen Feldstärke. Sie lässt sich in Kondensatoren nicht beliebig steigern. Verringert man den Abstand der Metallfolien bzw. die Dicke der Kunststofffolie oder der Elektrolytschicht, um die Kapazität zu erhöhen, steigt auch die Feldstärke E. Es kommt dann aber verstärkt zu elektrischen Durchschlägen zwischen den Metallfolien. Die Ladungen gleichen sich im Kondensator aus, die Energie wird intern in Wärme umgewandelt, was zur Explosion des Kondensators führen kann. Um das zu verhindern, muss man die Ladespannung verringern, was hingegen wieder zur Folge hat, dass die gespeicherte Energie sinkt. Aus diesen Gründen war die Energiedichte, die man in herkömmlichen Kondensatoren zwischenspeichern konnte, sehr bescheiden im Vergleich zur Energiedichte etwa eines NiMH-Akkus. Ein Beispiel soll das verdeutlichen. Kondensatoren mit einer Kapazität von 4,7 Millifarad (mF) waren das non plus Ultra, was man bauen konnte. Ein Kondensator mit einer Kapazität von 1 Farad speichert pro V eine Ladung von 1 C. Sie können z.B. mit einer maximalen Spannung U = 20 V geladen werden. Die gespeicherte Energie beträgt:

$$E_K = \frac{1}{2} * 4{,}7 * 10^{-3} C/V * (20V)^2 = 0{,}94J.$$

Ein NiMH-Akku hat etwa die doppelte Größe. Er besitzt folgende Daten:

$$Q = 1{,}2Ah; U = 1{,}2V.$$

Er speichert damit eine Energie

$$E = Q * U = 1{,}2A * 3600s * 1{,}2V = 5184J.$$

Sein Energieinhalt ist damit etwa um den Faktor

$$z = \frac{5184J}{0{,}94J} = 5515$$

mal größer als der des Kondensators. Der zylinderförmige Kondensator hat folgende Maße

$$l = 31mm; d = 16mm; m = 9{,}5g$$

mit l als Länge, d als Durchmesser und m als Masse. Seine volumetrische Energiedichte beträgt

$$S = \frac{E_K}{V} = \frac{0{,}94J}{\pi * (0{,}008m)^2 * 0{,}031m} = \frac{0{,}94J}{6{,}23 * 10^{-6}m^3} = 0{,}151MJ/m^3.$$

und seine spezifische Energie:

$$S = \frac{0{,}94J}{0{,}0095kg} = 98{,}9J/kg.$$

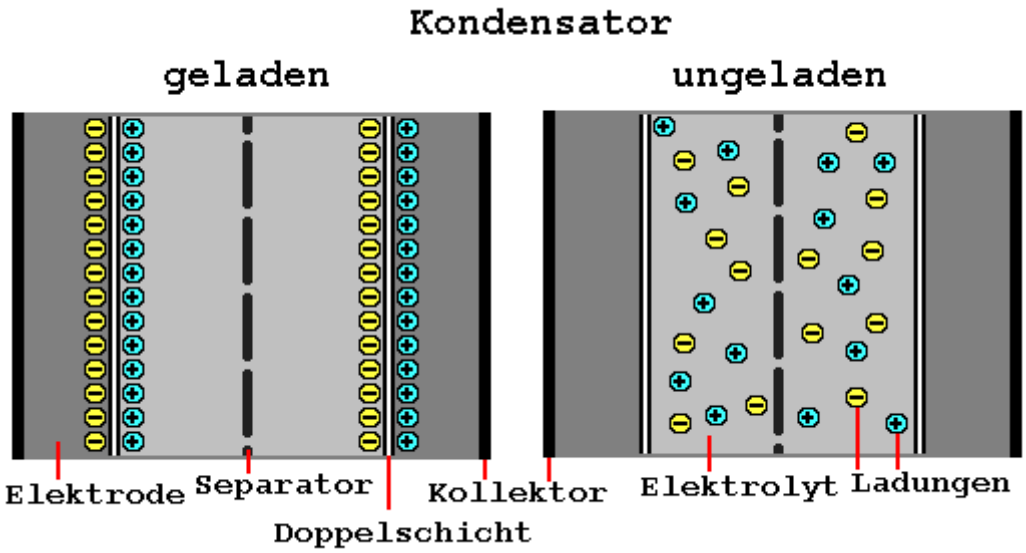


Abb.1: Aufbau eines Superkondensators

In den letzten Jahren konnte die Kapazität der Kondensatoren durch eine besondere Beschichtung der Kollektoren mit Aktivkohle, die mit einem Elektrolyten getränkt wird, erheblich gesteigert werden (s. Abb. 1). Beide Elektroden sind durch ein Diaphragma, den Separator, getrennt, das für Ionen durchlässig ist. Es verhindert, dass sich die beiden gegensinnig geladenen Aktivkohleblöcke durch direkten Kontakt entladen können. Die Aktivkohle besitzt aufgrund ihrer porösen Struktur eine riesige Oberfläche, die bis zu 100.000mal größer ist als die einer glatten Fläche. So sind heute Kondensatoren mit Kapazitäten bis zu 5000 F möglich. Beim Laden bildet sich zwischen der Aktivkohle und dem Elektrolyten an beiden Polen eine Doppelschicht aus, die sehr dünn ist (s. Abb. 1). Beim Entladen werden die Doppelschichten abgebaut und die Ionen des Elektrolyten verteilen sich wieder gleichmäßig über die Mittelschicht zwischen beiden Kohleblöcken. Es liegen zwei in Reihe geschaltete Kondensatoren hoher Kapazität vor. Diese Goldcaps oder Superkondensatoren, wie sie auch genannt werden, sind nicht viel größer als ein herkömmlicher Kondensator, dürfen aber nur mit Spannungen von wenigen Volt geladen werden. Ihre Energiedichte übersteigt die der herkömmlichen Kondensatoren um ein Vielfaches, wie ein Beispiel deutlich macht. Ein handelsüblicher Goldcap besitzt folgende Daten:

$$C = 22F; U = 2{,}3V; l = 35mm; d = 18mm; m = 11{,}4g.$$

Er speichert eine Ladung Q

$$Q = C * U = 22F * 2{,}3V = 50{,}6C$$

und eine Energie

$$E_K = \frac{1}{2} * 22F * (2{,}3V)^2 = 58{,}2J.$$

Seine volumetrische Energiedichte S beträgt

$$S = \frac{58{,}2J}{\pi * (0{,}009m)^2 * 0{,}035m} = 6{,}54MJ/m^3$$

und seine spezifische Energie

$$S = \frac{58{,}2J}{0{,}0114kg} = 5105J/kg.$$

Größere Kondensatoren mit einer Kapazität von C = 100 F bringen es auf eine zwei- bis dreifach höhere Energiedichte. Sie ist somit erheblich kleiner als die eines Akkus, im Vergleich zu einem Lithiumionen-Akku etwa um den Faktor 30 - 100. Ihr großer Vorteil ist, dass sie unendlich viele Lade- und Entladezyklen vertragen. Beim Entladen fällt die Spannung wegen des geringeren Energieinhaltes allerdings deutlich rascher ab als bei einem Akku. Man muss ihnen einen Spannungsregler oder Stromregler nachschalten (s. Kapitel/Versuche). Goldcaps eignen sich vor allem als Speicher für elektrische Geräte, die nur kurz betrieben werden, etwa der Anlasser beim Autostart, der Generator, mit dem man beim Bremsen die kinetische Energie in elektrische Energie zurück verwandeln kann, oder der Motor in einer elektrischen Zahnbürste. Auch für Geräte, die nur wenig Strom benötigen, sind sie geeignet, etwa den Motor in einer Solaruhr, den Puffer in einem CMOS-Speicher oder einem Digitalvoltmeter. Mit dem oben beschriebenen Goldcap kann man einen kleinen Solarmotor bei voller Ladespannung U und einer Mindestspannung U_m = 0,3 V mit einer mittleren Stromstärke I = 15 mA immerhin eine Dreiviertelstunde lang betreiben. Es gilt:

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{C * (U - U_m)}{I}$$
$$= \frac{22F * (2{,}3V - 0{,}3V)}{0{,}015A} = \frac{44C}{0{,}015A} = 2933s = 48{,}9min.$$

3.2.3 Wasserspeicher

Elektrische Ladungen und damit elektrische Energie kann man grundsätzlich in Kondensatoren oder Akkus speichern. Da herkömmliche Elektrolytkondensatoren nur eine Energiedichte von rund 100 J/kg (vgl. Kapitel 3.2.2) haben, wären riesige Kondensatoren nötig, um die in Kraftwerken erzeugte überschüssige elektrische Energie zwischenzulagern. Großkraftwerke produzieren nachts mehr Strom als benötigt wird, tagsüber dagegen übersteigt der Bedarf die Leistung der Kraftwerke. Daher wurde schon früh nach einer Lösung gesucht, größere Mengen elektrischer Energie zu speichern. Zu diesem Zweck wurden in Deutschland 31 Pumpspeicherkraftwerke angelegt. Nachts werden in ihnen mit dem überschüssigen Strom Elektromotoren betrieben, die Wasser aus einem Unterbecken in ein Oberbecken pumpen (s. Abb. 1). Die elektrische Energie wird in Lageenergie umgewandelt und als solche gespeichert.

Bei Tag arbeiten die Motoren als Generatoren, die vom Wasser aus dem Oberbecken angetrieben werden. Man erreicht insgesamt einen Wirkungsgrad von η = 80%.
Die Energiedichte des gespeicherten Wassers hängt nur vom Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterbecken ab, wie die folgende Rechnung zeigt.

$$S = \frac{E}{m} = \frac{m * g * h}{m} = g * h.$$

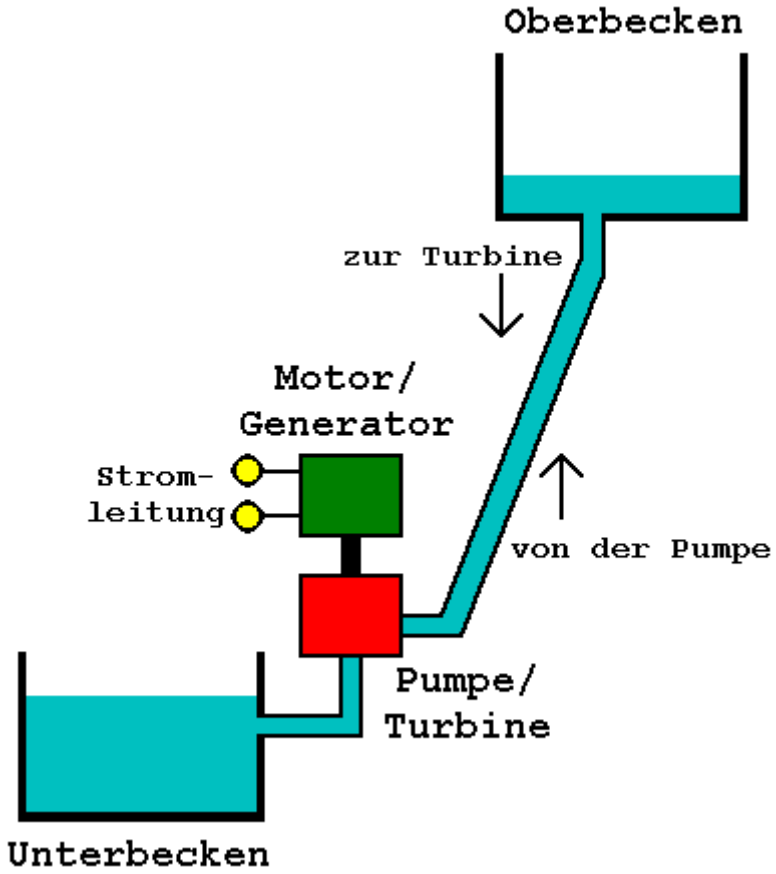


Abb.1: Aufbau eines Pumpspeicherkraftwerkes

Beim Pumpspeicherkraftwerk in Vianden an der deutsch-luxemburgischen Grenze beträgt der Höhenunterschied h = 280 m. Damit besitzt das Wasser im Oberbecken eine Energiedichte

$$S = g * h = 9{,}81 N/kg * 280 m = 2746{,}8 J/kg.$$

Sie ist zwar knapp 30mal größer als in herkömmlichen Kondensatoren, aber um die Hälfte bis ein Sechstel kleiner als in modernen Doppelschichtkondensatoren, außerdem etwa 180mal kleiner als in Lithiumionen-Akkus und rund 11000mal kleiner als in Kohle. Dieser Vergleich macht die ganze Problematik der modernen Großkraftwerke deutlich. Pumpspeicherkraftwerke benötigen riesige Betonbecken, die die Landschaft zerstören. Das Oberbecken des Pumpspeicherkraftwerkes Vianden fasst 6,84 Millionen m^3 Wasser. Damit speichert es eine Energie

$$E = S * m = 2746{,}8 J/kg * 6{,}84 * 10^9 kg = 1{,}88 * 10^{13} J = 5{,}22 GWh.$$

Bei einem Bedarf an elektrischer Energie von W = 4000 kWh[1)] pro Jahr könnte man damit einen Zweipersonenhaushalt

$$t = \frac{5{,}22 * 10^6 kWh}{4 * 10^3 kWh/a} = 1305{,}8a.$$

Jahre mit Energie versorgen oder 1306 Haushalte 1 Jahr lang. Das ist nicht allzu viel angesichts der Größe des Staubeckens. Platzsparender wäre es auf jeden Fall, die Kohle erst zu verfeuern, wenn der Strom benötigt wird. Leider kann man die Leistung von Großkraftwerken nicht flexibel an den Bedarf anpassen. Wir sind daher auf größere Speicherkapazitäten angewiesen. Bei der Nutzung regenerativer Energien wie Sonnenenergie oder Windenergie verschärft sich das Problem sogar noch. Mal liefern sie zu viel, mal zu wenig Energie und das mit unkalkulierbaren zeitlichen Schwankungen. Auch durch die Verwendung moderner Doppelschichtkondensatoren ließe sich der Platzbedarf für die Speichereinheiten nicht entscheidend verringern. Die Natur ist uns in diesem Punkt weit voraus. Sie hat im Laufe der Jahrmillionen effektive Mechanismen entwickelt, Energie auch über immer längere Zeiträume zu speichern in Form von Kohle, Erdöl oder Erdgas. Davon profitiert unsere moderne Industriegesellschaft zurzeit, die Frage ist nur wie lange noch bei dem gewaltigen Energiehunger der Menschheit.
Fließendes Wasser enthält kinetische Energie. Für die Energiedichte S gilt:

$$S = \frac{E}{m} = \frac{1/2 * m * v^2}{m} = \frac{1}{2} * v^2.$$

Bei einem Gebirgsbach mit einer mittleren Fließgeschwindigkeit von z.B. v = 15 km/h beträgt sie

$$S = 1/2 * (4{,}17 m/s)^2 = 8{,}68 J/kg.$$

Sie ist sehr gering. Trotzdem hatten Orte, in denen Wasserkraft zur Verfügung stand, in frühindustrieller Zeit eine enorme wirtschaftliche Bedeutung, vor allem dann, wenn in der Nähe auch noch Erze, Kohle und Kalk abgebaut wurden, wie etwa in meiner Heimatstadt Stolberg. Die Kupfermeister Stolbergs, die die Zinkerze Galmei und Zinkblende mit Kupfer zu Messing verhütteten, waren auf die Wasserkraft angewiesen, in Mühlen zum Mahlen der Erze und in den Kupferschlägereien, in denen die Messingbleche gehämmert wurden. Sie zählten zu den reichsten Leuten ihrer Zeit. Dabei stellte der Vichtbach auf seiner ganzen Länge bei einem Höhenunterschied von h = 300 m und einem mittleren Wasserdurchsatz von V = 120 l/s nur eine gesamte Leistung

$$P = \frac{E}{t} = \frac{m * g * h}{t} = \frac{120 kg * 9{,}81 N/kg * 300 m}{1 s} = 353 kW$$

zur Verfügung. Bei einem geschätzten Wirkungsgrad der Maschinen von 35 % entspricht das einer Nutzleistung von

$$\eta_{Nutz} = 0{,}35 * 353 kW = 123{,}55\ kW,$$

nicht viel mehr als der Leistung eines modernen Mittelklassewagens. Das macht deutlich, wie nahezu unersättlich der Energiehunger des modernen Menschen geworden ist. Außerdem schwankte der Wasserdurchfluss im Jahresverlauf sehr stark[6)]. Daher legte man Stauweiher an, um die zahlreichen Erzmühlen, Hammerwerke und Entwässerungspumpen das ganze Jahr über betreiben zu können.
Wasser ist ein sehr gutes Kühlmittel, weil es eine große Wärmekapazität besitzt. Hinzu kommen seine hohe Schmelz- und Verdampfungswärme. Es kann sehr viel Energie in Form von Wärmeenergie speichern. Für seine Wärmeenergiedichte S_W gilt:

$$S_W = \frac{m * c * \Delta T}{m} = c * \Delta T.$$

Erwärmt man Wasser von 0°C auf 20°C, so erhöht sich seine Energiedichte um

$$S_W = 4{,}18 \frac{kJ}{kg * °C} * 20°C = 83{,}6 kJ/kg.$$

Hinzu kommen die Schmelzwärme S_S, die benötigt wird, um Eis zu schmelzen und die Verdampfungswärme S_V, die zugeführt werden muss, wenn Wasser verdampft. Sie betragen:

$$S_S = 335 kJ/kg = 0{,}335 MJ/kg$$

$$S_V = 2258 kJ/kg = 2{,}258 MJ/kg.$$

Wasser besitzt damit eine Energiedichte, die etwa der eines Lithiumionenakkus entspricht, Wasserdampf sogar eine höhere als Wasserstoff in einem Metallhydridtank. Es wäre sinnvoll, die Sonnenenergie und die im Regenwasser gespeicherte Energie zum Heizen zu nutzen. Die Heizung stellt neben dem Auto den größten Batzen am Energiebedarf eines Haushaltes dar. Ein kleines Rechenbeispiel verdeutlicht die Überlegungen. Man legt im Erdboden ein Wasserbecken an, das mit Glas abgedeckt wird. Das Wasser erwärmt sich im Sommer schätzungsweise auf ca. 20 °C. Im Winter wird ihm mit einem Wärmetauscher die Energie entzogen und es gefriert nach und nach zu Eis. Um einen Zweipersonenhaushalt mit Wärme zu versorgen, braucht man bei derzeitiger Bauweise der Häuser im Schnitt etwa V = 2000 l Heizöl. Sie enthalten eine Energie E = 20.000kWh. Um diese Energie dem Regenwasser entziehen zu können, benötigt man

$$m = \frac{E}{S} = \frac{E}{S_W + S_S} = \frac{2 * 10^4 kWh * 3{,}6 * 10^6 J/kWh}{(8{,}36 * 10^4 + 3{,}35 * 10^5) J/kg} = 172000 kg = 172 t.$$

bzw.

$$V = 172 m^3$$

Wasser von 20°C. Das Becken müsste bei einer Tiefe von h = 2 m eine Fläche von

$$A = \frac{V}{h} = \frac{172m^3}{2m} = 86m^2$$

haben. Dabei wird vorausgesetzt, dass keine Wärme an den Erdboden verloren geht und die Wärmepumpe die Energie zu 100% ausnutzen könnte. Das ist sicherlich unrealistisch. Die Sonne strahlt in der Mitte Deutschlands mit einer mittleren Intensität von I = 1000 kWh/m^2. Auf die Oberfläche des Beckens überträgt sie somit eine Energie

$$E = I * A = \frac{1000kWh}{m^2} * 86m^2 = 86.000kWh.$$

Sie ist mehr als viermal höher als die Energie, die man zum Aufheizen des Wassers benötigt. Um die Sonneneinstrahlung optimal nutzen zu können, müsste das Wasser regelmäßig umgerührt werden. Zusätzlich könnte man das Regenwasser, das auf der Dachfläche aufgeheizt wird, ins Becken leiten. Es würde weitere Energie ins Wasser eintragen und gleichzeitig für eine ständige Durchmischung sorgen. Eine mittlere Gebäudegrundfläche von 100 m^2 würde bei einer durchschnittlichen Niederschlagsmenge von 800 mm eine Wassermenge

$$V = 100m^2 * 0{,}8m = 80m^3$$

ergeben. Der Inhalt des Beckens würde etwa alle zwei Jahre vollständig ausgetauscht. Das würde Fäulnisprozesse im Wasser verringern. Ob die Berechnungen realistisch sind, könnte nur eine Pilotanlage zeigen. Schwer abzuschätzen sind die benötigten Investitionen.

3.2.4 Luftspeicher

Auch in Luft ist Energie in verschiedenen Formen gespeichert. Warme Luft enthält Wärmeenergie, feuchte Luft Verdampfungswärme des Wassers, bewegte Luft Bewegungsenergie und zusammengepresste Luft Spannenergie. Sie erhält diese Energieformen wie das Wasser meist durch Sonneneinstrahlung. In Druckluftspeichern führt man der Luft zusätzliche Spannenergie mit riesigen Kompressoren zu. Für die Wärmeenergiedichte der Luft gilt bei einer Erwärmung um ΔT = 20°C:

$$S = c * \Delta T = 1\frac{kJ}{kg * °C} * 20°C = 20kJ/kg.$$

Sie ist rund viermal kleiner als die des Wassers. Bei 100% Luftfeuchtigkeit enthält V = 1 m^3 Luft m = 26 g Wasserdampf. Darin ist eine Energie

$$E = S_V * m = 2{,}258 * 10^6 J/kg * 0{,}026kg/m^3 = 58{,}7kJ/m^3$$

in Form von Verdampfungswärme gespeichert. Bei einem Gewittersturm kondensiert der Wasserdampf in rund V = 1 km^3 Luft zu Wasser. Dabei wird die unglaubliche Energie

$$E = 58{,}7kJ/m^3 * 1 * 10^9 m^3 = 5{,}87 * 10^{13} J$$

frei. Dauert der Gewittersturm 2 Stunden, so besitzt er eine Leistung

$$P = \frac{E}{t} = \frac{5{,}87 * 10^{13} J}{2 * 3600 s} = 8{,}15 * 10^9 W = 8{,}15 GW.$$

Das entspricht der Leistung eines Großkraftwerkes mit vier 2000 MW-Blöcken.
Die Energiedichte in bewegter Luft lässt sich mit der gleichen Formel wie beim Wasser berechnen. Beträgt die mittlere Windgeschwindigkeit z.B. v = 70 km/h, so erhält man

$$S = 1/2 * v^2 = 1/2 * (19{,}4 m/s)^2 = 188{,}2 J/kg.$$

Die Energiedichte ist nicht allzu hoch, aber die Menge macht's. Daher wird diese Energie vermehrt in Windkraftanlagen genutzt.
Bei Huntorf presst man in unterirdische Kavernen, die durch den Salzabbau entstanden sind, Luft unter einem Druck von p = 50 - 70 bar. Man speichert so in einem Volumen V = 0,27 Mio m^3 eine Energie von E = 0,58 GWh. Im Pumpspeicherkraftwerk von Vianden sind es bei einem Volumen V = 6,84 Mio m^3 E = 5,22 GWh. Um die spezifische Energie zu berechnen, muss man mit Hilfe des allgemeinen Gasgesetzes die Masse der komprimierten Luft näherungsweise abschätzen. Es gilt:

$$p * V = n * R * T = \frac{m}{M} * R * T.$$

Darin bedeuten:
p: Druck
V: Volumen
m: Masse
M: Molmasse
R: allgemeine Gaskonstante
T: Temperatur in K.

Stellt man die Formel nach m um, so erhält man

$$m = \frac{p * V * M}{R * T}.$$

Nimmt man an, dass der mittlere Druck p = 60 bar und die Temperatur unter der Erde T = 298 K beträgt, so ergibt sich für die Masse der gespeicherten Luft bei einer Molmasse der Luft von M = 0,0288kg/mol:

$$m = \frac{6 * 10^6 N/m^2 * 2{,}7 * 10^5 m^3 * 0{,}0288 kg/mol}{8{,}31 J/(mol * K) * 298 K} = 1{,}88 * 10^7 kg.$$

Damit erhält man eine spezifische Energie

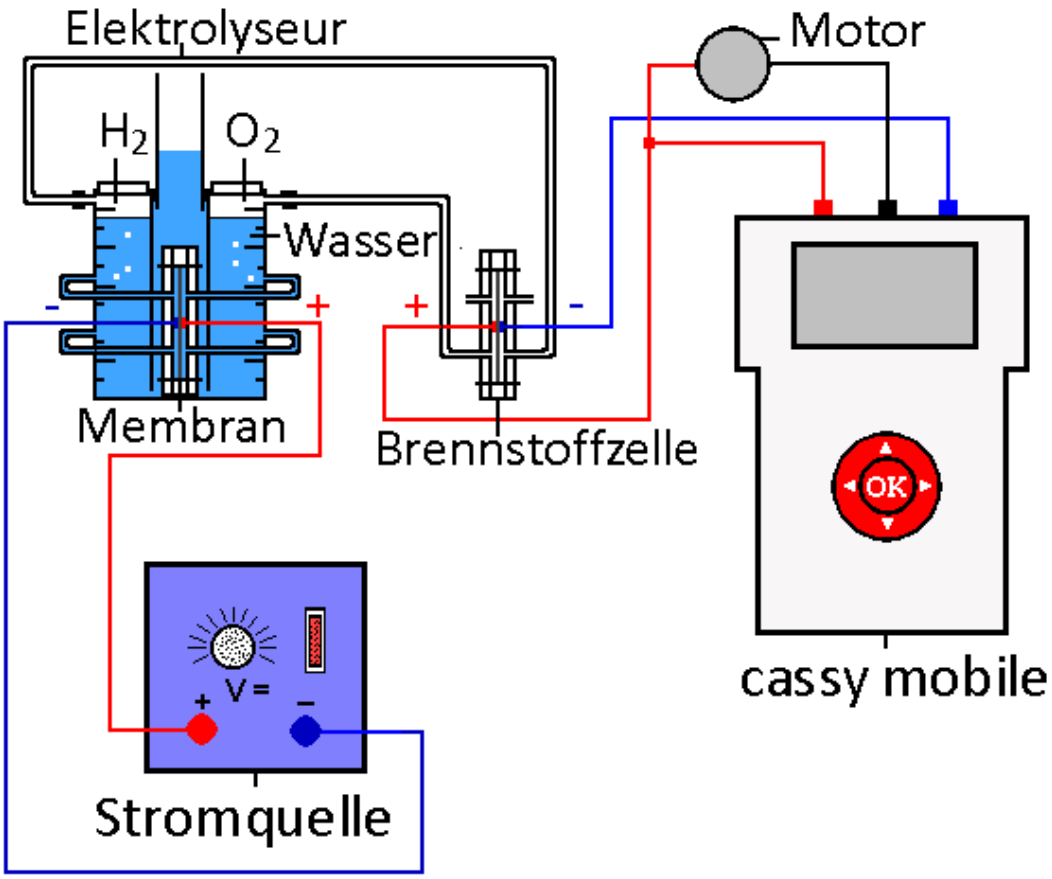
$$S = \frac{5{,}8 * 10^8 W * 3600 s}{1{,}88 * 10^7 kg} = 0{,}111 MJ/kg.$$

Sie ist fast genauso so hoch wie die Energiedichte in einem Blei-Akku und rund 40mal höher als im Pumpspeicherkraftwerk in Vianden. Die Speicherung von Energie mit Hilfe von Druckluft ist aber aus einem anderen Grund problematisch. Luft erwärmt sich beim Komprimieren stark. Diese Wärme geht im Druckluftspeicher zum größten Teil an den umgebenden Erdboden verloren. Je nach Druck und Wärme des Gases betragen die energetischen Verluste zwischen 30 und 50 %[1)]. Pumpspeicherkraftwerke nutzen die Energie dagegen immerhin zu 80% aus.

4. Versuche

4.1 Brennstoffzellen

Versuch 1
Für den folgenden Versuch benötigen Sie einen Elektrolyseur, eine Brennstoffzelle und einen kleinen Solarmotor mit einem Anlaufstrom I = 10 mA. Sie werden von verschiedenen Firmen angeboten. Beachten Sie die Bedienungsanleitungen.



Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch gemäß der Abb. zunächst ohne Motor auf. Achten Sie auf die richtige Polung der elektrischen Anschlüsse. Beachten Sie ferner die richtige Zuordnung der Gasverbindungen an der Brennstoffzelle. An der H_2-Seite (-) darf nur Wasserstoff eingeleitet werden, an der O_2-Seite (+) nur Sauerstoff.
2. Starten Sie cassy mobile. Aktivieren Sie im Menü I_B die Strommessung und im Menü P die Leistungsmessung. Wählen Sie in den Menüs folgende Einstellungen:
   U_A: Bereich -1V..1V, Erfassung: gemittelte Werte (DC), Nullpunkt: links
   I_B: Bereich -0,03A..0,03A, Erfassung: gemittelte Werte, Nullpunkt: links
   P: Bereich 10 mW.
3. Schalten Sie die Stromquelle ein. Stellen Sie eine Spannung ein, dass deutlich Gasblasen in beiden Gasbehältern des Elektrolyseurs aufsteigen.
4. Warten Sie ein paar Minuten bis sich die Spannung an der Brennstoffzelle stabilisiert hat. Speichern Sie diese Messwerte fünfmal im Abstand von 30 Sekunden.

5. Schließen Sie den Motor an cassy an. Wenn er schnell läuft, speichern Sie die Messwerte im Abstand von 30 Sekunden fünfmal.

Aufgaben

a. Erläutern und erklären Sie die Messkurven.
b. Formulieren Sie die Vorgänge an beiden Elektroden für den Elektrolyseur und die Brennstoffzelle.
c. Berechnen Sie den maximal möglichen Wirkungsgrad der Brennstoffzelle und den Wirkungsgrad beim Einsatz des Motors. Vergleichen Sie ihn mit dem Wirkungsgrad des Elektrolyseurs von $\eta = 57{,}7\ \%$ (vgl. Skript „Ch-Schülerversuche“ auf dieser Webseite).
d. Berechnen Sie den maximal möglichen Gesamtwirkungsgrad des Versuches. Diskutieren Sie, warum er in der Praxis nie erreicht wird.
e. Durch Elektrolyse von Wasser sollen in Zukunft größere Mengen Wasserstoff produziert werden z.B. für den Antrieb von Autos mit Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren auf Basis von Wasserstoff. Diskutieren Sie Vor- und Nachteile des Wasserstoffantriebs im Vergleich zu Benzinmotoren, Dieselmotoren und Elektroautos mit Lithiumionen-Akkus.

Beobachtung
Man erhält z.B. die Messkurven in Abb. 1 - 3.

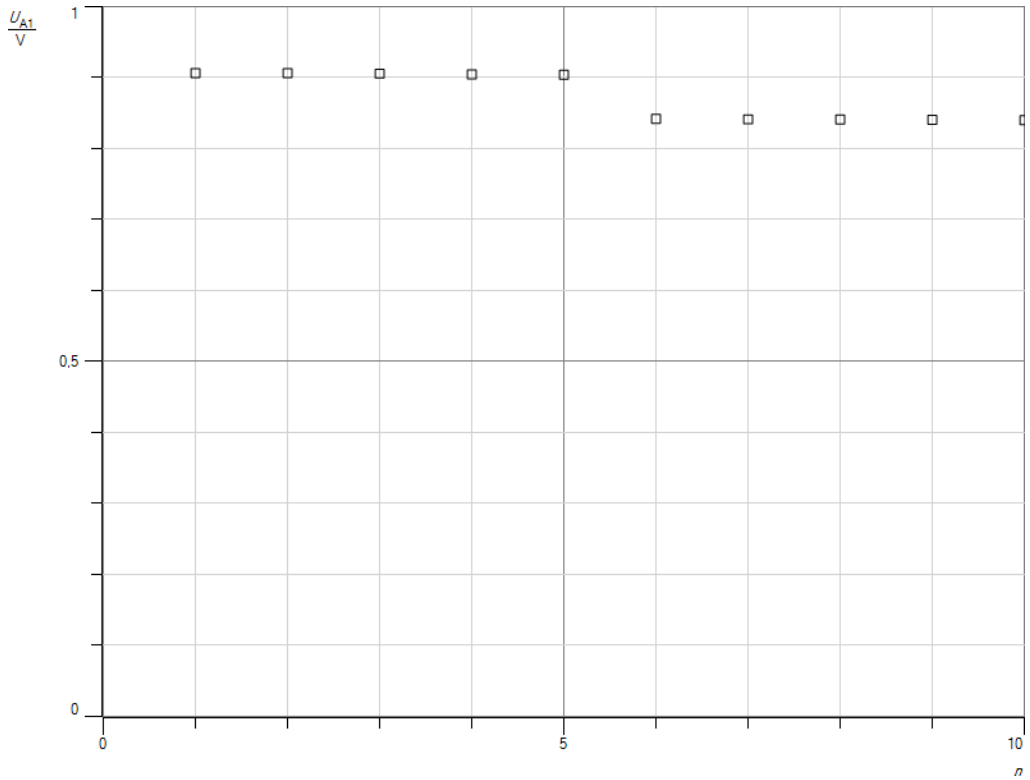


Abb.1: U(n)-Messkurve

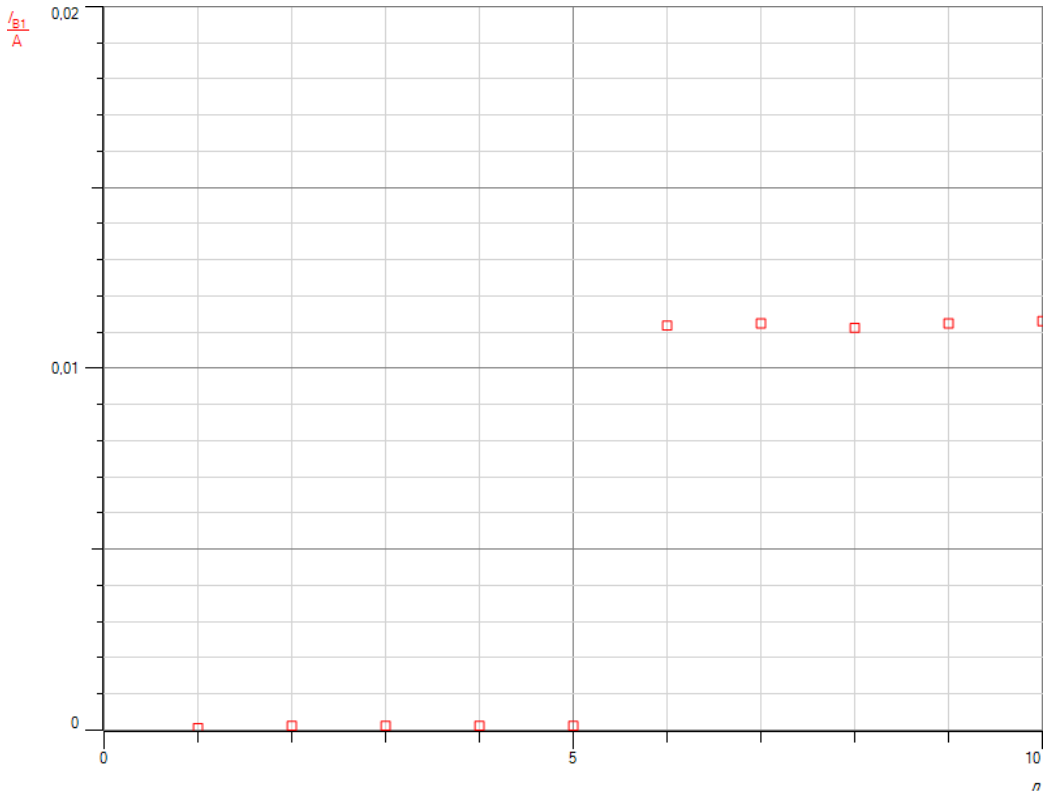


Abb. 2: I(n)-Messkurve

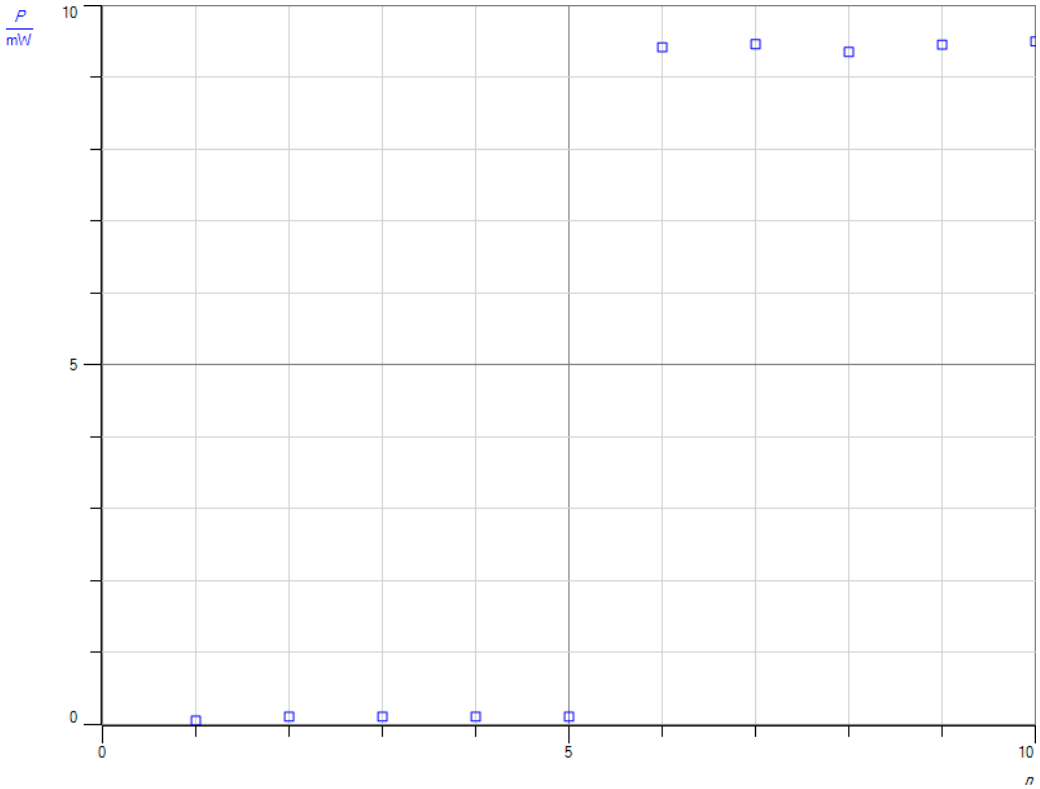


Abb.3: P(n)-Messkurve

Auswertung

a. Aus der Messkurve 1 erhält man die Leerspannung U_L = 0,906 V der Brennstoffzelle. Theoretisch müsste sie U_L = 1,24 V betragen. Ein Teil der Spannung geht als Überspannung an den Elektroden verloren. Sie entsteht dadurch, dass die Gase an die Elektroden andocken müssen, bevor sie reagieren können. Betreibt man den kleinen Motor mit der Brennstoffzelle, so sinkt die Klemmenspannung auf U_K = 0,841 V.

b. An den Elektroden laufen folgende Reaktionen ab:

$$Dissoziation: 4H_2O \leftrightarrow 4H^+ + 4OH^-$$

$$+Pol: 4OH^- - 4e^- \leftrightarrow O_2 + 2H_2O$$

$$-Pol: 4H^+ + 4e^- \leftrightarrow 2H_2$$

Die Pfeile nach rechts beschreiben die Reaktion im Elektrolyseur, die Pfeile nach links in der Brennstoffzelle.

c. Für den Wirkungsgrad gilt:

$$\eta = \frac{genutzte\ Energie}{aufgebrachte\ Energie} * 100\%$$

Die elektrische Energie W ist definiert als

$$W = Q * U.$$

Das Normalpotential für die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff beträgt U_0 = 1,24 V. Die Brennstoffzelle liefert aber nur maximal eine Leerslaufspannung von U_L = 0,906 V. Damit besitzt sie einen maximalen Wirkunsggrad von

$$\eta = \frac{Q * U_L}{Q * U_0} * 100\% = \frac{U_L}{U_0} * 100\% = \frac{0{,}906V}{1{,}24V} * 100\% = 73{,}1\%.$$

Beim Betrieb des Motors erhält man

$$\eta = \frac{0{,}841V}{1{,}24V} * 100\% = 67{,}8\%.$$

d. Der Elektrolyseur hat einen maximalen Wirkungsgrad η = 57,7%, die Brennstoffzelle von η = 73,1%. Damit ergibt sich für die Kombimnation aus beiden ein maximal möglicher Wirkungsgrad von

$$\eta = 0{,}577 * 0{,}731 * 100\% = 42{,}2\%.$$

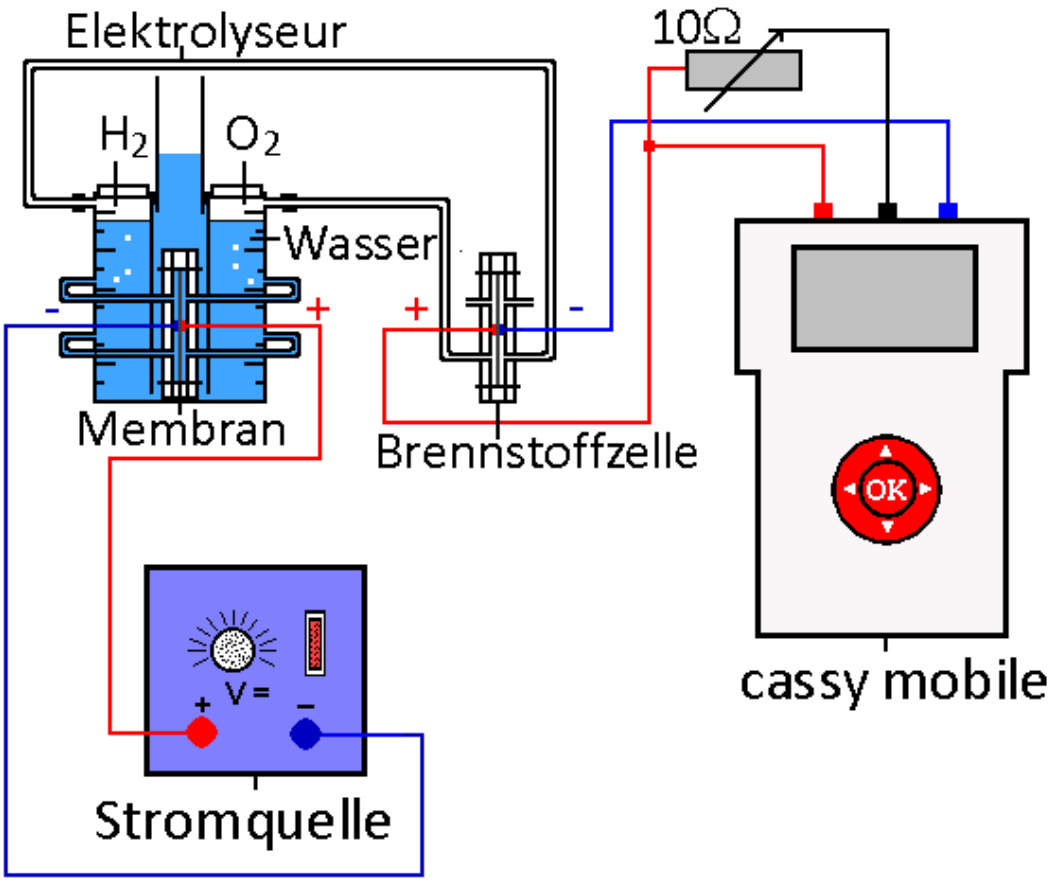
Dieser Wert wird aber nur erreicht, wenn ein sehr geringer Strom fließt, die Leistung sowohl des Elektrolyseurs als auch der Brennstoffzelle gegen null geht. Das ist in der Praxis aber wenig sinnvoll, da einerseits die Elektrolyse unendlich lange dauern würde und andererseits der Motor sich nur im Schneckentempo bewegen würde. Der praktische Wirkungsgrad beträgt beim Betrieb des Motor

$$\eta = 0{,}577 * 0{,}678 * 100\% = 39{,}1\%.$$

Sowohl der Elektrolyseur als auch die Brennstoffzelle besitzt wie jede normale Batterie einen Innenwiderstand. Je größer der entnommene Strom, umso größer ist der Teil der Spannung, der an ihm nutzlos abfällt und umso kleiner ist der Wirkungsgrad.

e. Brennstoffzellenautos erzeugen nur Wasser als Abfallstoff. Brennstoffzellen sind wesentlich leichter als Lithiumionenakkus. Wasserstoff hat eine viel kleinere Dichte als Benzin und einen wesentlich höheren Energieinhalt. Aber er ist hoch explosiv, so dass die Lagerung in einem Tank problematisch ist. Beim Tankvorgang sind sehr strenge Kontrollenmaßnahmen nötig, damit kein Wasserstoff austritt und es mit Luft zur Knallgasexplosion kommt. Der Wirkungsgrad ist beim heutigen Stand der Technik vergleichbar dem von Diesel- und Benzinmotoren, aber deutlich niedriger als der von Elektromotoren, wenn man nur den Antrieb betrachtet.

Versuch 2:
Für den folgenden Versuch benötigen Sie einen Elektrolyseur und eine Brennstoffzelle. Sie werden von verschiedenen Firmen angeboten. Beachten Sie die Bedienungsanleitungen. Außerdem brauchen Sie ein Potentiometer mit R = 10 Ω. Sie können auch ein Potentiometer mit R = 5 Ω verwenden und für die Widerstände von 6 Ω - 10 Ω einen Festwiderstand von R_2 = 5 Ω dazu in Reihe in Reihe schalten.



Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch gemäß der Abb. zunächst ohne Widerstand auf. Achten Sie auf die richtige Polung der elektrischen Anschlüsse. Beachten Sie ferner auf die richtige Zuordnung der Gasverbindungen an der Brennstoffzelle. An der H_2-Seite (-) darf nur Wasserstoff eingeleitet werden, an der O_2-Seite (+) nur Sauerstoff.
2. Starten Sie cassy mobile. Aktivieren Sie im Menü I_B die Strommessung und im Menü P die Leistungsmessung. Wählen Sie in den Menüs folgende Einstellungen:
   U_A: Bereich -1V..1V, Erfassung: gemittelte Werte (DC), Nullpunkt: links
   I_B: Bereich -0,3A..0,3A, Erfassung: gemittelte Werte, Nullpunkt: links
   P: Bereich 100 mW.
3. Schalten Sie die Stromquelle ein. Stellen Sie eine Spannung ein, dass deutlich Gasblasen in beiden Gasbehältern des Elektrolyseurs aufsteigen.
4. Warten Sie ein paar Minuten bis sich die Spannung an der Brennstoffzelle stabilisiert hat.
5. Stellen Sie am Widerstand einen Wert R_1 = 1 Ω ein. Schließen Sie ihn an cassy an. Speichern Sie den Messwert.
6. Erhöhen Sie den Widerstand in Schritten ΔR = 1 Ω bis auf R_2 = 10 Ω. Speichern Sie für jeden Schritt die Messwerte.
7. Speichern Sie insgesamt die Messreihe.

Aufgaben

a. Deuten Sie die Messkurven. Beachten Sie bei Ihren Überlegungen, dass die Brennstoffzelle einen Innenwiderstand hat.
b. Laden Sie die Messwerte ins Programm cassy lab 2. Erstellen Sie eine Formel, mit der Sie die Nummer des Messwertes in den Messwiderstand in Ω umrechnen können.
c. Erzeugen Sie ein P(R)-Diagramm.
d. Bestimmen Sie den Widerstand bei maximaler Leistung. Berechnen Sie ihn aus den Messwerten. Erläutern Sie, welche Bedeutung er hat.
e. Überlegen Sie sich Möglichkeiten, die Leistung der Brennstoffzelle zu erhöhen.

Beobachtung
Man erhält z.B. die Messkurven in Abb. 1 - 3.

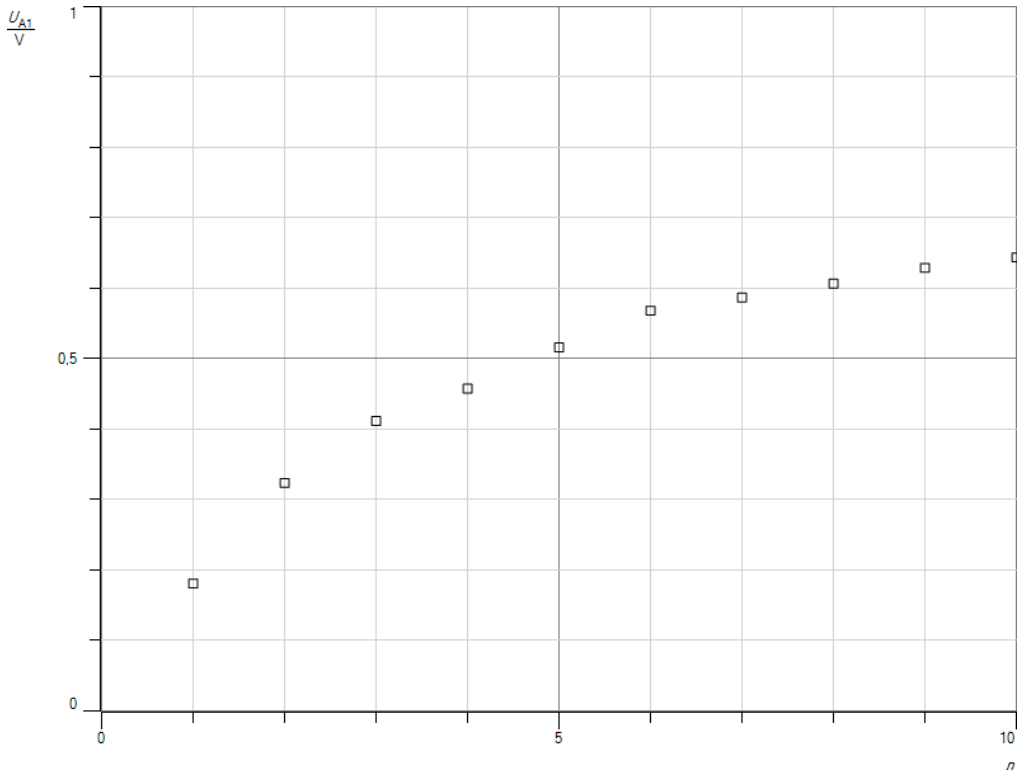


Abb. 1: U(n)-Messkurve

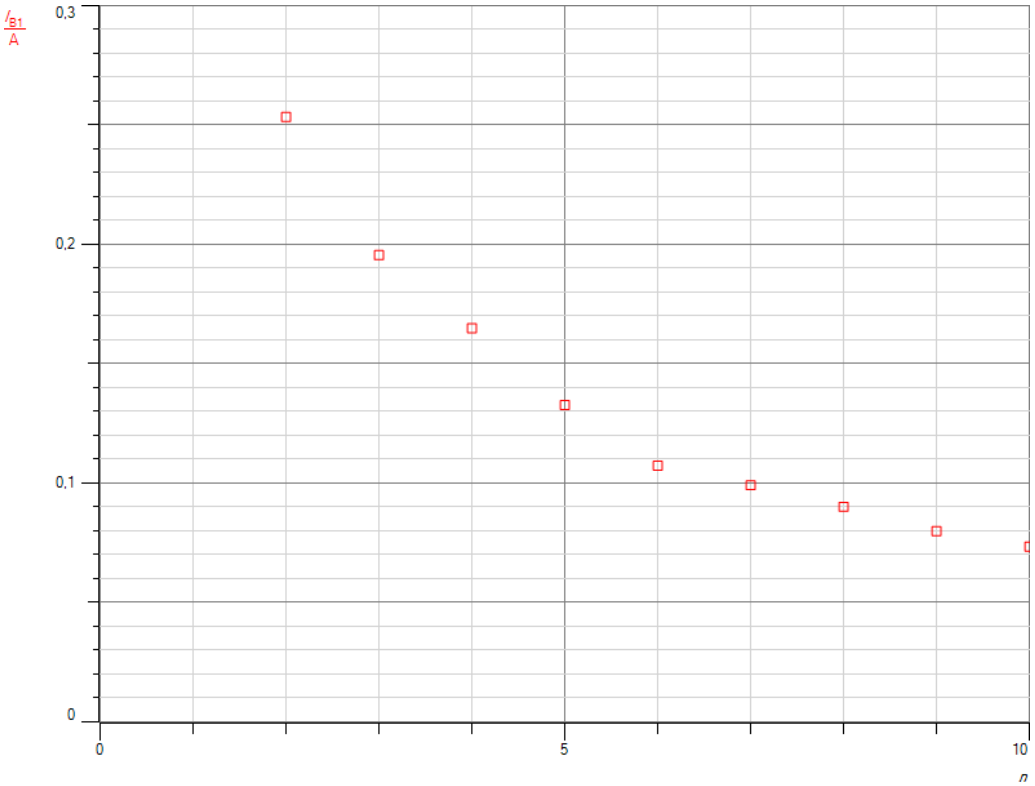


Abb.2: I(n)-Messkurve

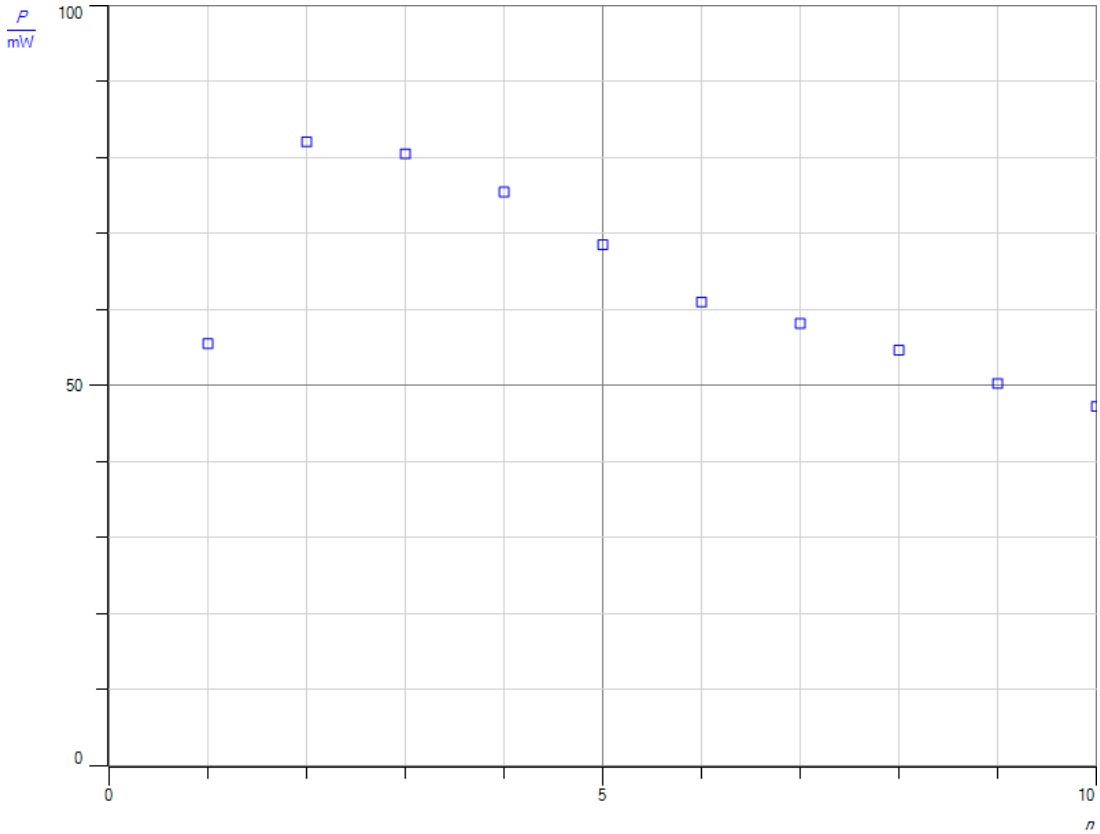


Abb. 3: P(n)-Messkurve

Auswertung

a. Die Stromstärke sinkt mit steigendem Widerstand, die Spannung steigt. Die Leistung durchläuft ein Mamimum, wenn der Belastungswiderstand gleich dem Innenwiderstand der Brennstoffzelle ist.

b. Die benötigte Formel lautet:

$$R = n * 1\Omega.$$

c. Man erhält das Diagramm in Abb 4.

d. Der Widerstand im Mamimum der P(R)-Kurve beträgt R = 2,5 Ω. Er enstpricht dem Innenwiderstand der Brennstoffzelle wie bei einer Solarzelle oder einer herkömmlichen Batterie. Er lässt sich berechnen aus dem Strom I bei einer bestimmten Belastung, der Leerlaufspannung U_L und der Klemmespannung U. Es gilt z.B. für das zweite Messpaar:

$$R_i = \frac{U_L - U}{I} = \frac{0{,}906V - 0{,}324V}{0{,}2535A} = 2{,}3\Omega.$$

und für das dritte

$$R_i = \frac{U_L - U}{I} = \frac{0{,}906V - 0{,}412V}{0{,}1956A} = 2{,}5\Omega.$$

Wertet man alle Messwerte aus, so zeigt sich, dass er mit sinkender Belastung leicht ansteigt. Die Konzentration der gebildeten Ionen an der Membran sinkt.

e. Die Leistung lässt sich wie bei jeder anderen Batterie durch Reihen- und Parallelschaltung erhöhen. Bei Parallelschaltung addieren sich die Ströme der einzelnen Zweige zum Gesamtstrom, bei Reihenschaltung summieren sich die Einzelspannungen zur Gesamtspannung. Meist werden beide Möglichkeiten kombiniert.

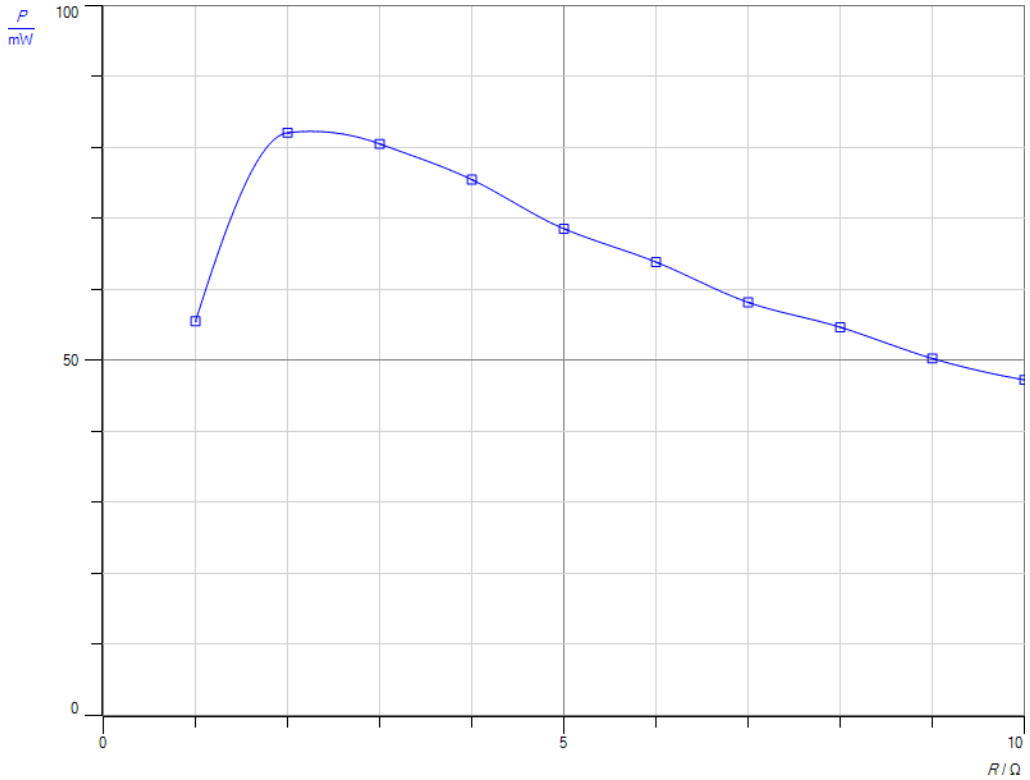


Abb.4: P(R)-Diagramm

4.2 Heizwert

Will man die Güte fossiler Energieträger auf Kohlenstoffbasis miteinander vergleichen, so zieht man ihren Heizwert heran. Er gibt an, wie viel Energie in J oder kJ frei wird, wenn man die Masse von 1 g oder 1 kg vollständig oxidiert zu Wasser H_2O und Kohlendioxid CO_2. Um ihn zu bestimmen, verbrennt man eine kleine Menge des Brennstoffes und misst die freigesetzte Energie in Form von Wärme. Das Ergebnis rechnet man auf 1 g bzw. 1 kg hoch. Dabei muss man die Wärmeverluste an die Umgebung minimieren. Exemplarisch wird die Vorgehensweise im folgenden Versuch an Kerzenwachs gezeigt.

Versuch:

Geräte:

1 Becherglas 250 ml
1 Thermometer, wenn möglich mit Genauigkeit 0,1 °C
1 Stativ
1 Doppelmuffe
1 Klemme
1 elektronische Waage, Genauigkeit 0,01 g
1 Teelicht
1 Messzylinder 100 ml
1 Feuerzeug
1 Stoppuhr

Aufbau:

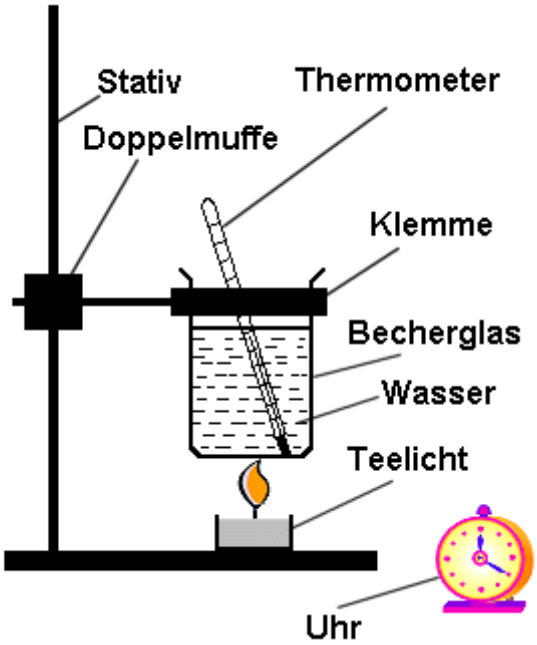


Abb. 1: Versuchsaufbau

Durchführung:

Man befestigt das Becherglas am Stativ und füllt es anschließend mit Hilfe des Messzylinders mit V = 200 ml Wasser. Dann wiegt man das Teelicht, zündet es an und erwärmt damit t = 5 min lang das Wasser. Dabei sollte die Spitze der Flamme den Boden des Glases gerade berühren. Eventuell muss man das Becherglas ein wenig höher oder tiefer hängen. Danach

wiegt man das Teelicht erneut. Außerdem misst man die Temperatur des Wassers vor und nach dem Erwärmen. Während des Erwärmens sollte man es mehrere Male etwa mit dem Thermometer umrühren. Um die gesamte vom Teelicht abgegebene Energie ermitteln zu können, benötigt man außerdem noch die Gesamtmasse des Kerzenwachses in einem Teelicht. Dazu nimmt man ein neues Teelicht aus der Metallhülle, entfernt den Docht und wiegt es.

Ergebnisse:

Man erhält folgende Messergebnisse:

$$m(Teelicht\ vorher) = 14{,}92g$$

$$m(Teelicht\ nachher) = 14{,}77g$$

$$m(Kerzenwachs\ im\ Mittel) = 14{,}5g$$

$$T(Wasser\ vorher) = 20{,}3°C$$

$$T(Wasser\ nachher) = 25{,}2°C.$$

Auswertung:

Es werden

$$\Delta m(Teelicht) = 14{,}92g - 14{,}77g = 0{,}15g$$

verbrannt. Das Wasser erwärmt sich um

$$\Delta T(Wasser) = 25{,}2°C - 20{,}3°C = 4{,}9°C.$$

Daraus folgt für die von 0,15 g Kerzenwachs abgegebene Energie:

$$W = m * c * \Delta T = 200g * 4{,}18J/(g * °C) * 4{,}9°C = 4096\ J.$$

Mit Hilfe eines einfachen Dreisatzes erhält man für die insgesamt zur Verfügung stehende Energie eines Teelichtes:

$$W(Teelicht) = \frac{14{,}5g * 4096J}{0{,}15g} = 395{,}9\ kJ.$$

Für den Heizwert ergibt sich somit:

$$Heizwert(Wachs) = \frac{395{,}9kJ}{0{,}0145kg} = 27303kJ/kg.$$

Einen Literaturwert konnte ich nicht finden. Im Vergleich zu anderen Werten[1)] erscheint er jedoch durchaus realistisch. Er liegt jedenfalls wesentlich niedriger als der von Propan mit 50000 kJ/kg, das in Gasbrennern verwendet wird.
Aufschlussreich sind auch die folgenden Tabellen über die Heizwerte und die Brennwerte für Nahrungsmittel.

Brennstoff	**Heizwert in 10^3 kJ/kg**	**Nahrungsmittel**	**Brennwert in 10^3 kJ/kg**
Trockenes Holz	14	Reines Fett	38,9
Rohbraunkohle	8..15	Reine Kohlenhydrate	17,2
Braunkohlenbriketts	20	Reines Eiweiß	17,2
Steinkohle	31	Butter	30,1
Heizöl	42	Speck	34,3
Benzin	46	Zucker	15,5
Ethanol	30	Weizenmehl	15,5
Hartspiritus	31	Weißbrot	10,9
Stadtgas	29	Mageres Fleisch	6,0
Erdgas	30..35	Trockene Erbsen	14,7
Propan	50	Kartoffeln	3,6
Wasserstoff	143	Gurken	0,54

Tabelle 1: Heiz- und Brennwerte verschiedener Stoffe[5)]

Daraus ergeben sich eine Reihe weiterer interessanter Aspekte zum Umweltschutz und zur zukünftigen Energieversorgung.

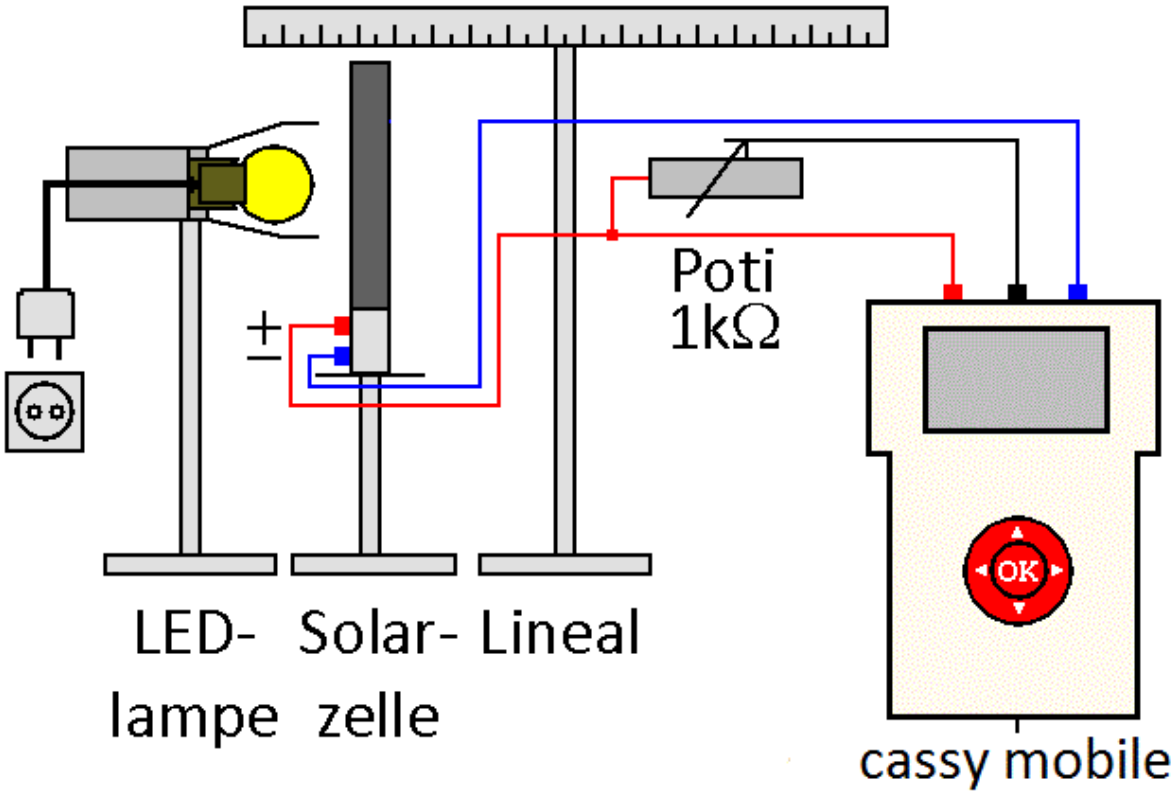
- Manche Physiker und Politiker sehen im Wasserstoff den Energieträger der Zukunft. Zum einen entsteht bei seiner Verbrennung nur Wasser. Ferner besitzt er, wie man der Tabelle entnehmen kann, einen sehr großen Heizwert. Das würde die benötigte Lagerkapazität im flüssigen Zustand erheblich verringern, wenn auch die Lagerung sich insgesamt erheblich schwieriger gestaltet als bei Benzin oder Heizöl, da Wasserstoff unter normalen Bedingungen gasförmig ist und nur mit erheblichem Aufwand verflüssigt werden kann. Zurzeit forscht man jedoch intensiv an sogenannten Festkörperspeichern für Wasserstoff.
- Aus der Tabelle der Heizwerte geht außerdem hervor, dass Holz ein sehr schlechter Energieträger ist. Aber vor allem in der dritten Welt wird es noch häufig zum Heizen und Kochen benutzt. Hier wäre es sinnvoll, verstärkt auf die Solarenergie umzusteigen, zumal in vielen Entwicklungsländern die Sonneneinstrahlung erheblich größer ist als bei uns. Außerdem müsste dann nicht so viel Wald abgeholzt werden. Der Kohlendioxidgehalt der Luft würde gleich in doppelter Hinsicht gesenkt. Wenn Holzpellets als Alternative zum Heizöl und Gas bei uns als Heizmaterial propagiert werden, weil sie angeblich fast klimaneutral sind, kann ich das nur als ökologischen Schwachsinn bezeichnen. Vor 150 Jahren waren ganze Mittelgebirgsregionen wie Schwarzwald, Eifel usw. verödet, weil die Menschen selbst die Wurzeln der Bäume ausgruben, um Brennmaterial zur Verfügung zu haben. Und dass obwohl die Bevölkerung nur rund ein Achtel der heutigen betrug und der persönliche Energiebedarf um ein Vielfaches geringer war. Der Wald konnte sich erst erholen, als die Leute anfingen, ihren Energiebedarf mit Kohle, Erdöl und Erdgas zu decken. In der Folge wuchs die Bevölkerung rasant an, weil plötzlich Energie aus scheinbar unerschöpflichen Quellen zur Verfügung stand. Jetzt gehen diese Quellen zur Neige und die Folgen des ungehemmten Energieverbrauchs werden überall

sichtbar. Das Klima hat sich dramatisch verändert und ganze Landstriche sind verwüstet, wie die Braunkohlegebiete am Niederrhein und in der Lausitz. Und dass die angeblich sauberen Wind- und Solarparks inklusive der benötigten Energiespeicher alles andere als nachhaltig sind, zeigt sich schon heute in den Abbaugebieten der seltenen Erden und des Lithiums in Chile und China. Dort entstehen die ökologischen Wüsten von morgen. Unsere Energieeffizienz muss deutlich erhöht bzw. unser Energiebedarf drastisch gesenkt werden, um die Energiewende wirklich schaffen zu können und unsere Umwelt zu schonen. Dazu muss jeder sein Konsumverhalten nachhaltig ändern. Die Alternative zu Benzin- und Dieselautos heißt nicht Elektroautos, sondern zu Fuß gehen, Fahrradfahren oder öffentliche Verkehrsmittel benutzen. Bei den Autos ist nicht die Art des Antriebs die Lösung des Problems, sondern die Masse und die Menge der Autos. Beide müssen erheblich reduziert werden. Ich kann nur ungläubig den Kopf schütteln, wenn ich sehe, wie Leute mit einem Elektro-SUV mit einer Masse von 3 - 5 Tonnen durch die Gegend brettern und sich dabei noch als Umweltengel brüsten. Aber das dürfen Politiker nicht einmal laut denken, ohne sofort abgestraft zu werden.

- Nicht zuletzt kann man den Einsatz von Teelichtern zum Warmhalten von Kaffee oder Tee als einen, wenn auch sehr bescheidenen Beitrag ansehen, nachwachsende Rohstoffe als Energieträger zu nutzen. Schließlich verbraucht man dann keinen Strom, um eine elektrische Warmhalteplatte zu betreiben. Vom energetischen Standpunkt aus betrachtet wäre es allerdings noch günstiger, eine isolierte Warmhaltekanne zu benutzen, damit die einmal zugeführte Wärme nicht so schnell an die Umgebung verloren geht.
- Der Heizwert, oder wie man bei Nahrungsmitteln sagt, Brennwert ist aber auch bei der Ernährung von größter Bedeutung. Viele Leute in den Industrieländern leiden unter Übergewicht, da sie zu viele energiereiche Lebensmittel zu sich nehmen, vor allem Fette und Kohlenhydrate. Energieärmere Kost wie Obst und Gemüse wären der Gesundheit wesentlich förderlicher. Ihr (die Schüler) solltet also rechtzeitig auf eine ausgewogene Ernährung achten.

4.3 Solarzellen

Versuch 1



Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch gemäß der Abb. auf. Benutzen Sie als Lichtquelle eine Schreibtischlampe mit einer LED-Birne mit den Daten 6 W, 470 lm, E 14.
2. Starten Sie cassy mobile. Aktivieren Sie im Menü I_B die Strommessung und im Menü P die Leistungsmessung. Wählen Sie folgende Einstellungen:
   U_A: Bereich -10V..10V, Erfassung: gemittelte Werte (DC), Nullpunkt: links
   I_B: Bereich -0,03A..0,03A, Erfassung: gemittelte Werte, Nullpunkt: links
   P: Bereich 100 mW.
3. Verschieben Sie das Lineal, bis sich der Nullpunkt auf Höhe des Überganges zwischen Porzellanfassung und Glashülle der Lampe befindet. Dort sitzen die LEDs. Stellen Sie die Solarzelle in einer Entfernung r = 5 cm vor der Lampe auf.
4. Drehen Sie das Potentiometer auf R_1 = 0 Ω. Drücken Sie die O.K.-Taste, um den Messwert zu speichern.
5. Erhöhen Sie den Widerstand R des Potentiometers in Schritten ΔR = 50 Ω bis auf R_2 = 700 Ω. Speichern Sie nach jedem Schritt die Messwerte durch Drücken der O.K.-Taste.
6. Speichern Sie die Messkurven.
7. Entfernen Sie das Potentiometer aus der Schaltung und stellen Sie die Solarzelle r = 5 cm vor der Lampe auf. Notieren Sie sich die gemessene Leerlaufspannung.

Aufgaben

a. Erläutern und erklären Sie die Messkurven. Beachten Sie bei Ihren Überlegungen, dass die Solarzelle einen Innenwiderstand R_i besitzt.
b. Berechnen Sie aus der Leerlaufspannung die Spannung, die eine Solarzelle liefert. Das Solarmodul besteht aus insgesamt 16 Solarzellen, die in zwei parallelen Reihen zu je 8 Zellen angeordnet sind.
c. Laden Sie die Messwerte ins Programm cassy lab 2. Erstellen Sie eine Formel, mit der Sie die Nummer n der Messung in den Widerstand umrechnen können. Erzeugen Sie ein U(R), I(R)- und ein P(R)-Diagramm.
d. Ermitteln Sie aus den Messkurven den Leerlaufstrom. Berechnen Sie aus der Leerlaufspannung und dem Leerlaufstrom den Innenwiderstand des Moduls.
e. Erläutern, welche Bedeutung der Innenwiderstand für die gemessene Leistung hat.
f. Diskutieren Sie, welche Vor- und Nachteile Solarzellen haben.

Beobachtung
Man erhält z.B. die Messkurven in Abb. 1-3.

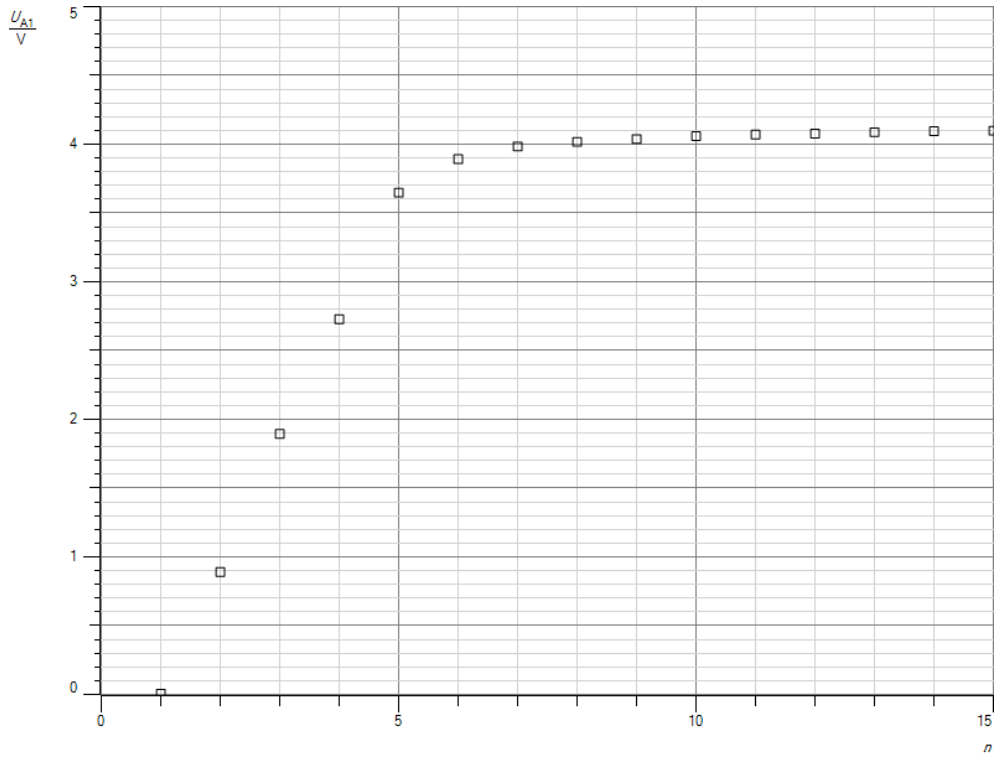


Abb. 1: U(n)-Messkurve

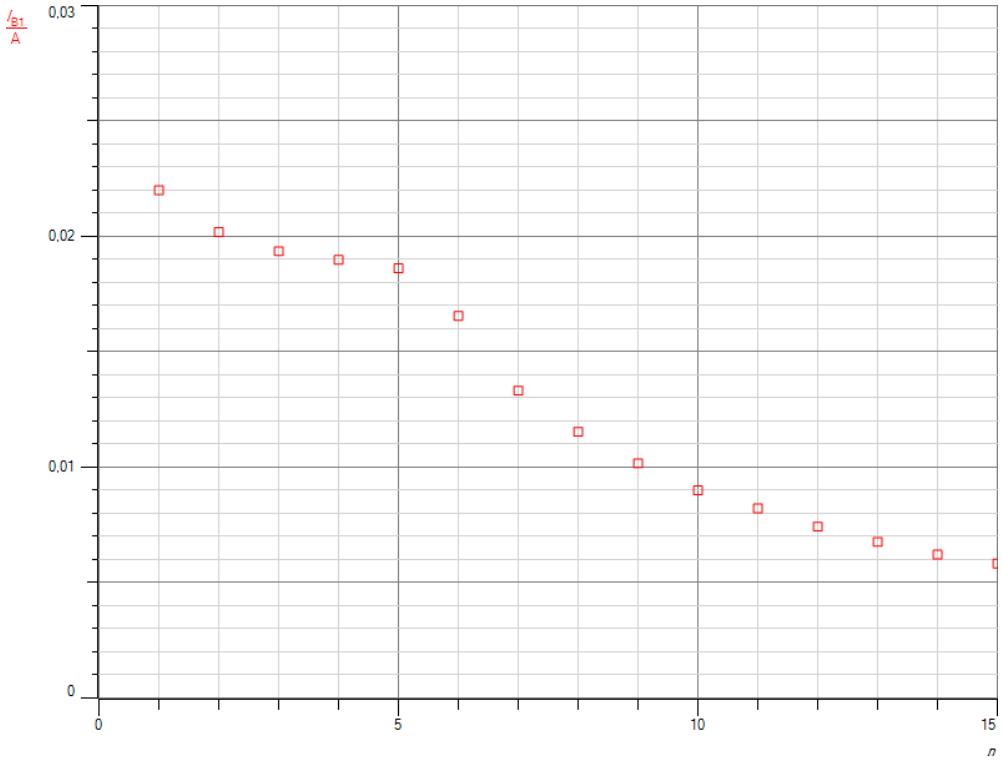


Abb. 2: I(n)-Messkurve

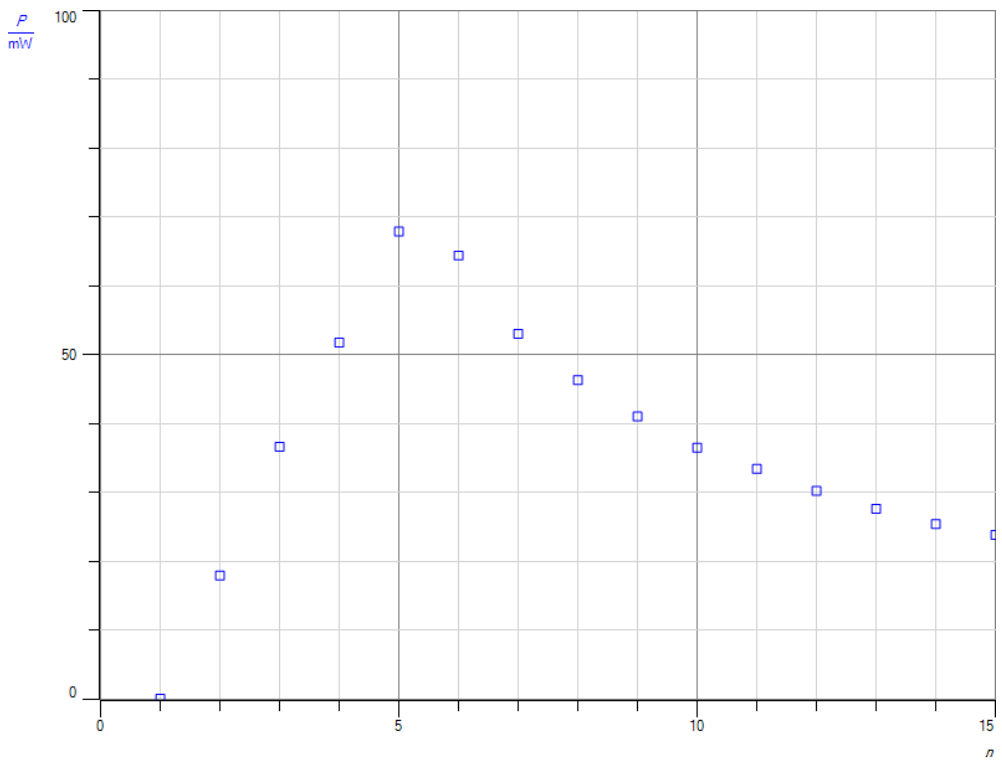


Abb. 3: P(n)-Messkurve

Auswertung

a. Die Stromstärke sinkt in zwei Stufen, die Spannung steigt am Anfang gleichmäßig an und geht dann in einen konstanten Endwert über. Die Leistung P durchläuft ein Maximum bei n = 5 und damit bei R ≈ 200 Ω. Da sie als Produkt aus Spannung U und Stromstärke I definiert ist, nimmt sie am Anfang vor allem aufgrund der steigenden Spannung zu. Nach ihrem Maximum fällt sie ab, da die Stromstärke sinkt.

b. Bei Parallelschaltung von Solarzellen ist die Gesamtspannung gleich der Spannung einer Zelle, der Strom steigt dagegen proportional zur Zahl der Zellen an. Bei Reihenschaltung addieren sich die Einzelspannungen zur Gesamtspannung, die Stromstärke ist in allen Zellen gleich. Da jeweils 8 Zellen in Reihe geschaltet sind und man eine Gesamtleerlaufspannung U_L = 4,38 V misst, beträgt die Leerspannung U_1 einer Zelle

$$\mathrm{U}_1 = \frac{4{,}38V}{8} = 0{,}55\mathrm{V}.$$

c. Die benötigte Formel lautet:

$$R = (n-1) * 50\Omega.$$

Man erhält das Diagramm in Abb. 4.

d. Den Leerlaufstrom kann man aus der Messkurve an der Stelle ablesen, an der der Messwiderstand R = 0 beträgt. Man erhält beträgt I_L = 0,022 A. Zusammen mit der Leerlaufspannung ergibt sich für den Innenwiderstand R_i des Moduls

$$R_i = \frac{4{,}38V}{0{,}022A} = 200\Omega.$$

e. Die entnehmbare Leistung ist dann am größten, wenn der Belastungswiderstand genau so groß ist wie der Innenwiderstand der Zelle. Das entspricht, wie man der Messkurve entnehmen kann, dem Punkt der Strom- bzw. Spannungskurve, an dem die Spannung fast die Leerlaufspannung erreicht hat, aber der Strom noch nicht allzu stark abgefallen ist.

f. Solarzellen können nicht leer werden wie eine galvanische Zelle. Sie können allenfalls kaputt gehen. Mit der Zeit nimmt ihre Leistung ab. Bei Solarzellen auf den Dächern ist sie nach zwanzig Jahren unter die Hälfte gesunken. Sie liefern nur dann elektrische Energie, wenn sie mit Licht beschienen werden. Ihre Leistung hängt stark von der Intensität des Lichtes ab, wie der folgende Versuch zeigt. Sie setzen keine Abgase frei wie Kohlekraftwerke. Und die Entsorgung ist weit weniger problematisch wie bei Atommüll, weil sie überwiegend aus Silizium bestehen.

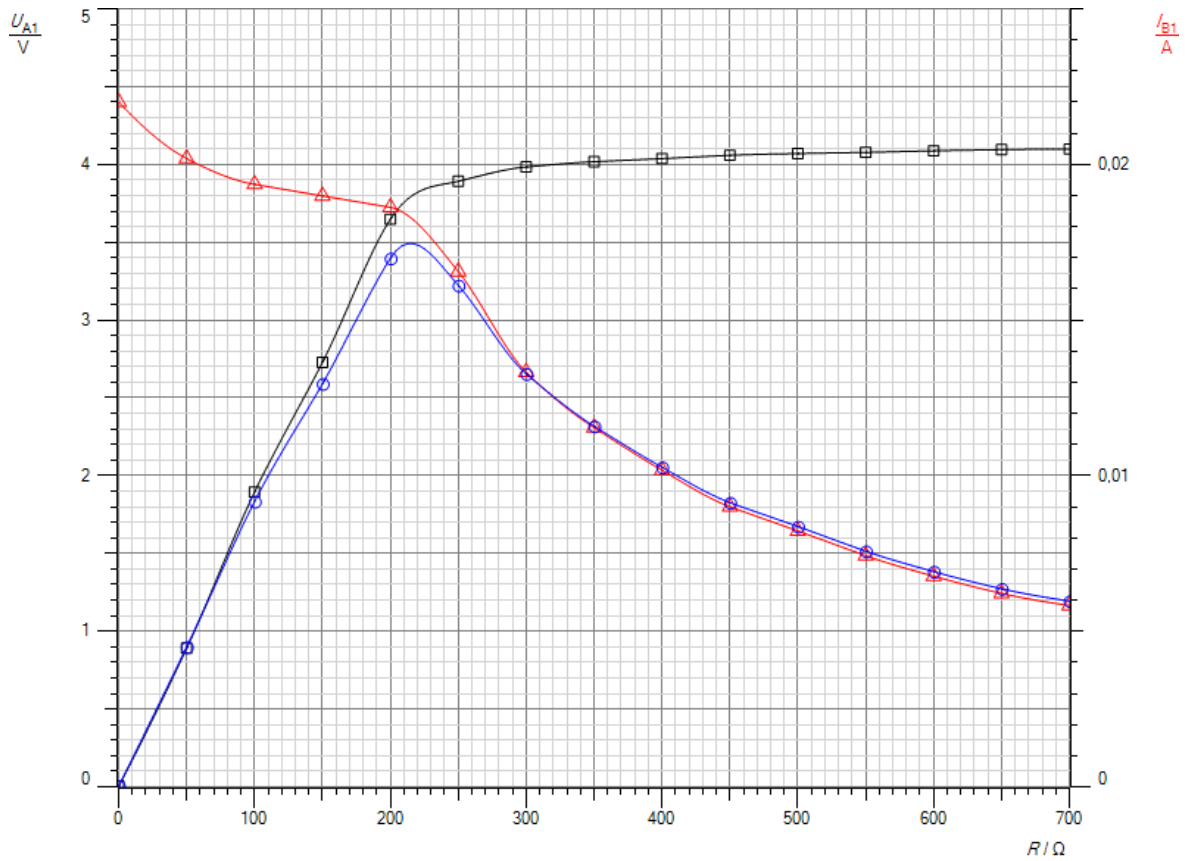
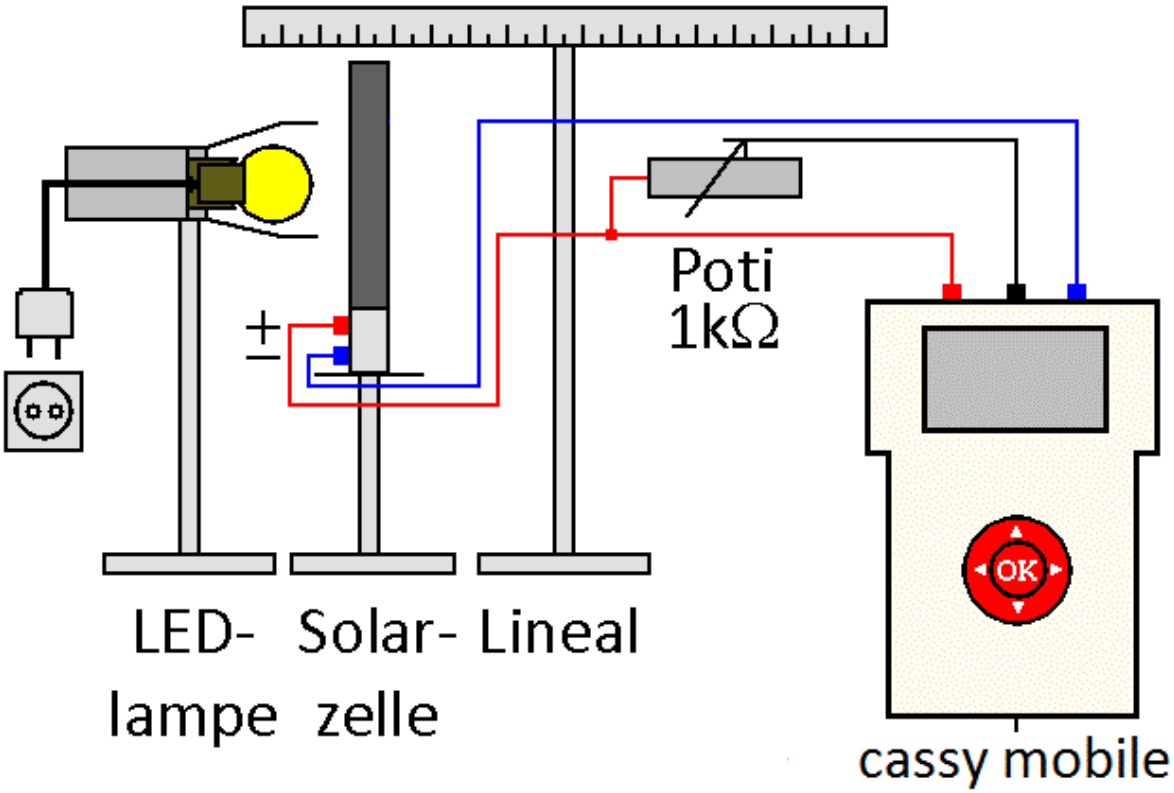


Abb. 4: U(R)-, I(R), P(R)-Diagramm

Versuch 2



Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch gemäß der Abb. auf. Benutzen Sie als Lichtquelle eine Schreibtischlampe mit einer LED-Birne mit den Daten 6 W, 470 lm, E 14.
2. Starten Sie cassy mobile. Aktivieren Sie im Menü I_B die Strommessung und im Menü P die Leistungsmessung. Wählen Sie folgende Einstellungen:
   U_A: Bereich -10V..10V, Erfassung: gemittelte Werte (DC), Nullpunkt: links
   I_B: Bereich -0,03A..0,03A, Erfassung: gemittelte Werte, Nullpunkt: links
   P: Bereich 100 mW
3. Verschieben Sie das Lineal, bis sich der Nullpunkt auf Höhe des Überganges zwischen Porzellanfassung und Glashülle der Lampe befindet. Dort sitzen die LEDs. Stellen Sie die Solarzelle in einer Entfernung r = 5 cm vor der Lampe auf.
4. Drehen Sie das Potentiometer auf R = 200 Ω. Drücken Sie die O.K.-Taste, um den Messwert zu speichern.
5. Erhöhen Sie den Abstand der Solarzelle zur Lampe in Schritten von Δr = 5 cm bis auf r = 30 cm. Speichern Sie nach jedem Schritt die Messwerte durch Drücken der O.K.-Taste.
6. Speichern Sie die Messkurven.

Aufgaben

a. Erläutern und erklären Sie die Messkurven.
b. Laden Sie die Messwerte ins Programm cassy lab 2. Erstellen Sie im Programm eine Formel, mit der Sie die Nummer des Messwertes in die Entfernung r zwischen Lampe und Luxmeter umrechnen können. Erzeugen Sie ein P(r)- Diagramm.
c. Wählen Sie im Kontextmenü „Anpassung durchführen“ die Option „Hyperbel $1/x^2$“. Markieren Sie die Messwerte mit der Maus. Das Programm berechnet die Hyperbel durch die Messwerte und stellt das Ergebnis links unten in der Statuszeile dar.
d. Deuten Sie das Ergebnis.

Beobachtung
Man erhält z.B. die Messkurven in Abb. 1 - 3.

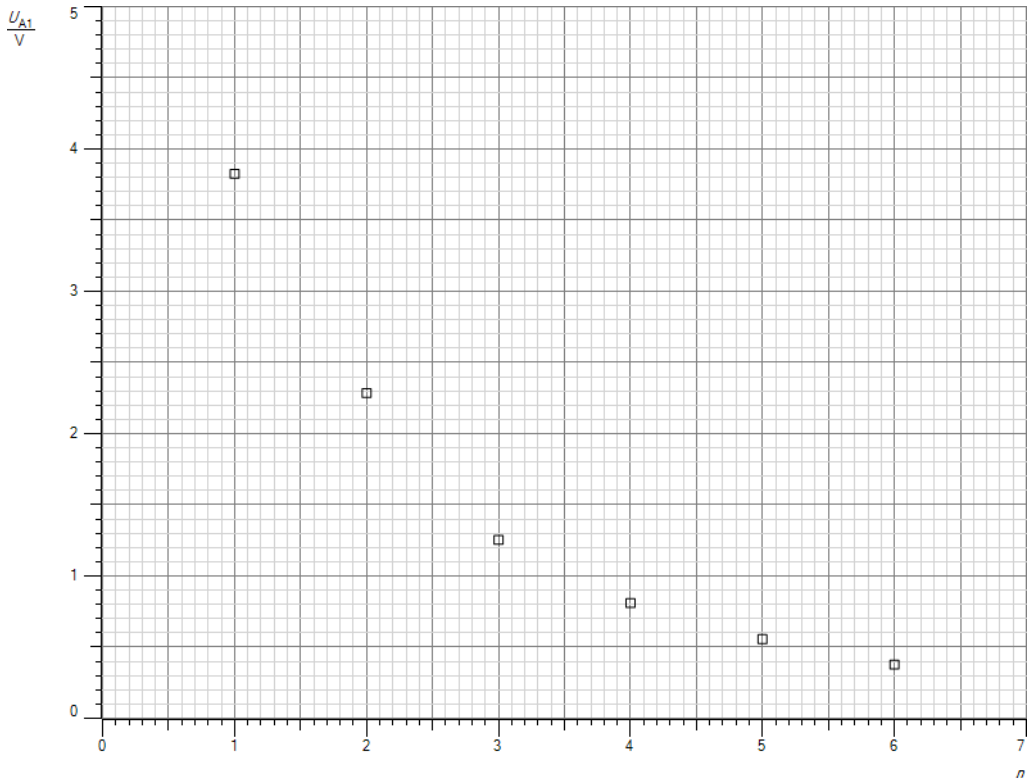


Abb.1: U(n)-Messkurve

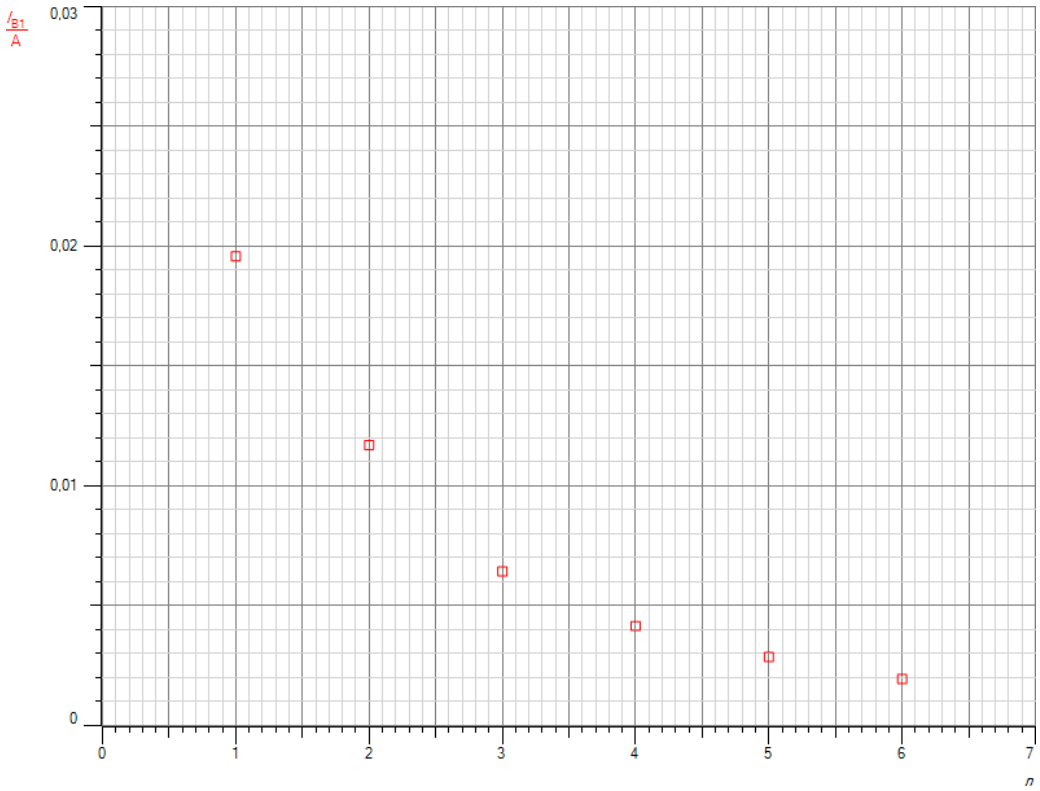


Abb.2: I(n)-Messkurven

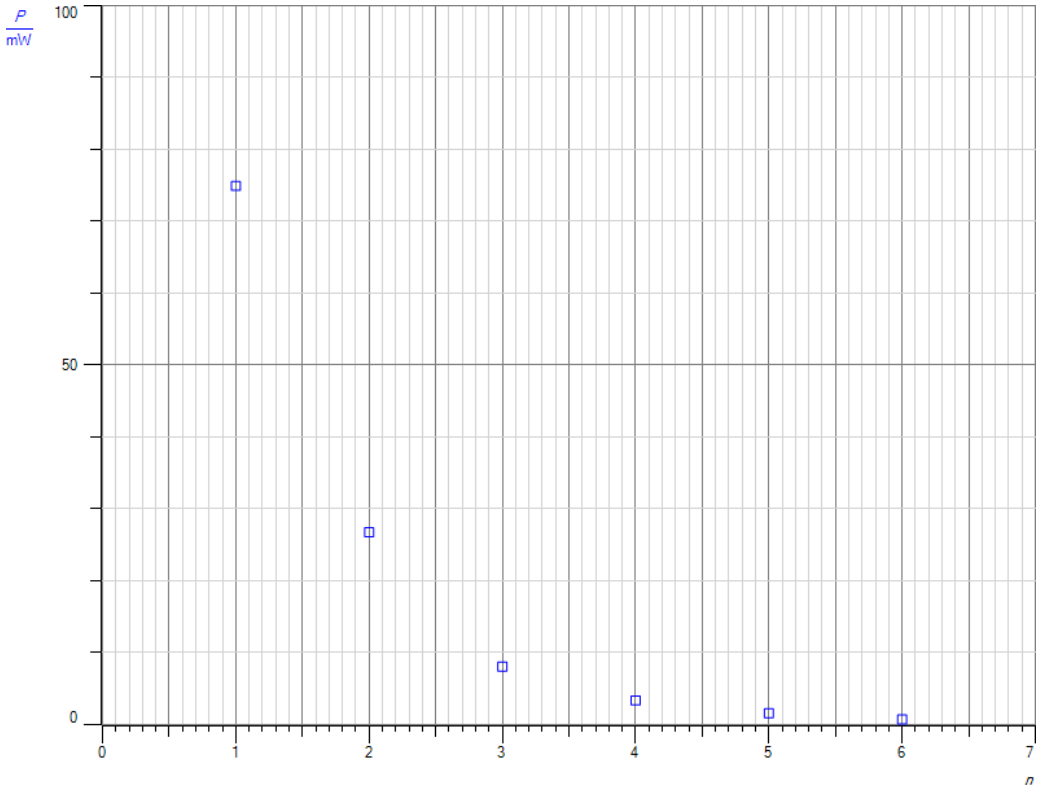


Abb.3: P(n)-Diagramm

Auswertung

a. Spannung und Stromstärke nehmen rasch mit dem Abstand r zwischen Lampe und Solarzelle ab, da die Beleuchtungsstärke quadratisch mit r sinkt. Die Leistung fällt schneller ab, da sie das Produkt aus Spannung und Stromstärke ist.

b. Die benötigte Formel lautet:

$$r = n * 5cm$$

Man erhält das Diagramm in Abb. 4.

c. Das Programm errechnet folgende Formel für die Ausgleichskurve.

$$P(r) = \frac{1900mW * cm^2}{r^2} + 0{,}3mW.$$

d. Die Leistung nimmt näherungsweise mit dem Quadrat der Entfernung ab. Allerdings weichen einige Messwerte mehr oder weniger stark von der theoretischen Kurve ab. Die Fläche der Solarzelle ist mit A = 82,5 cm^2 recht groß. Daher wird sie nicht in allen Entfernungen gleichmäßig ausgeleuchtet.

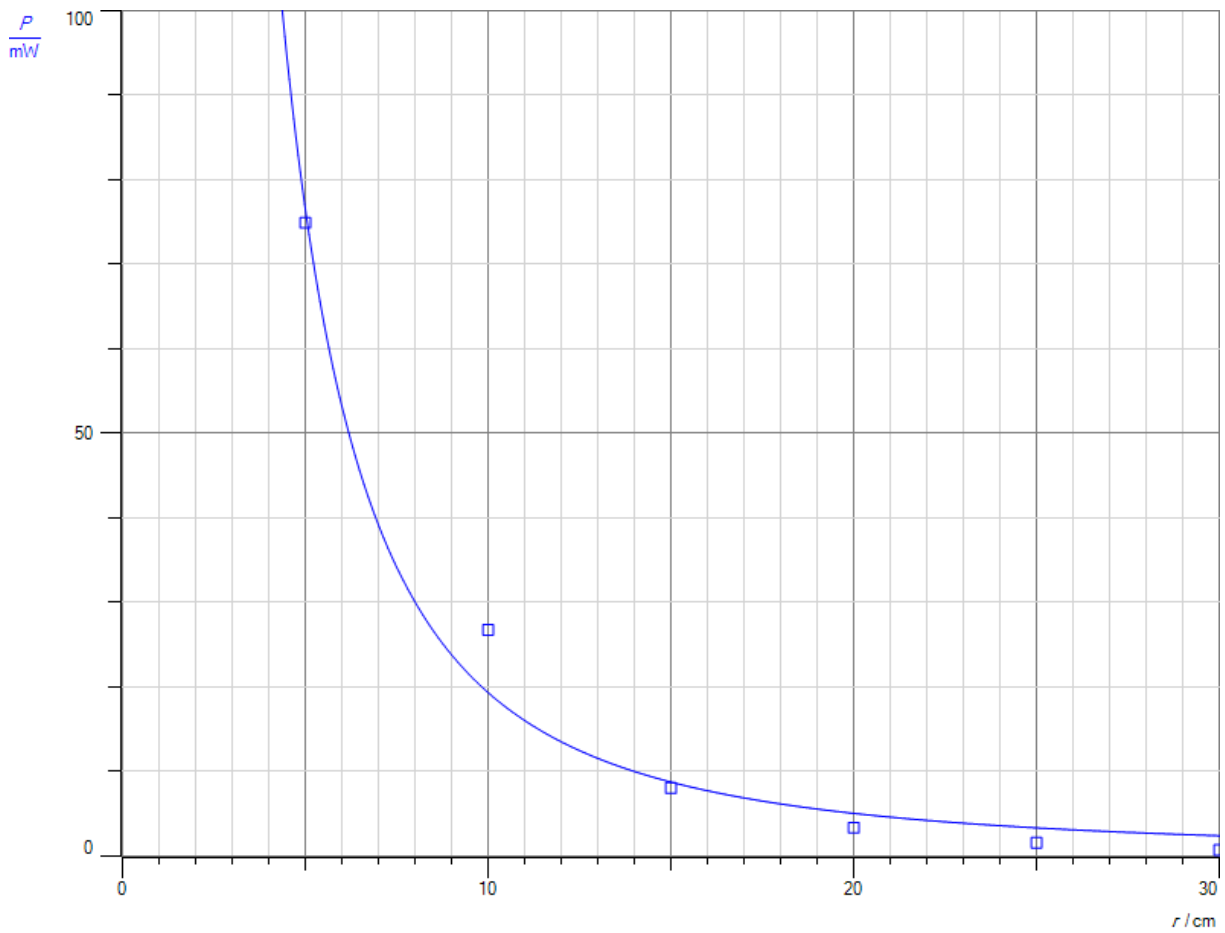
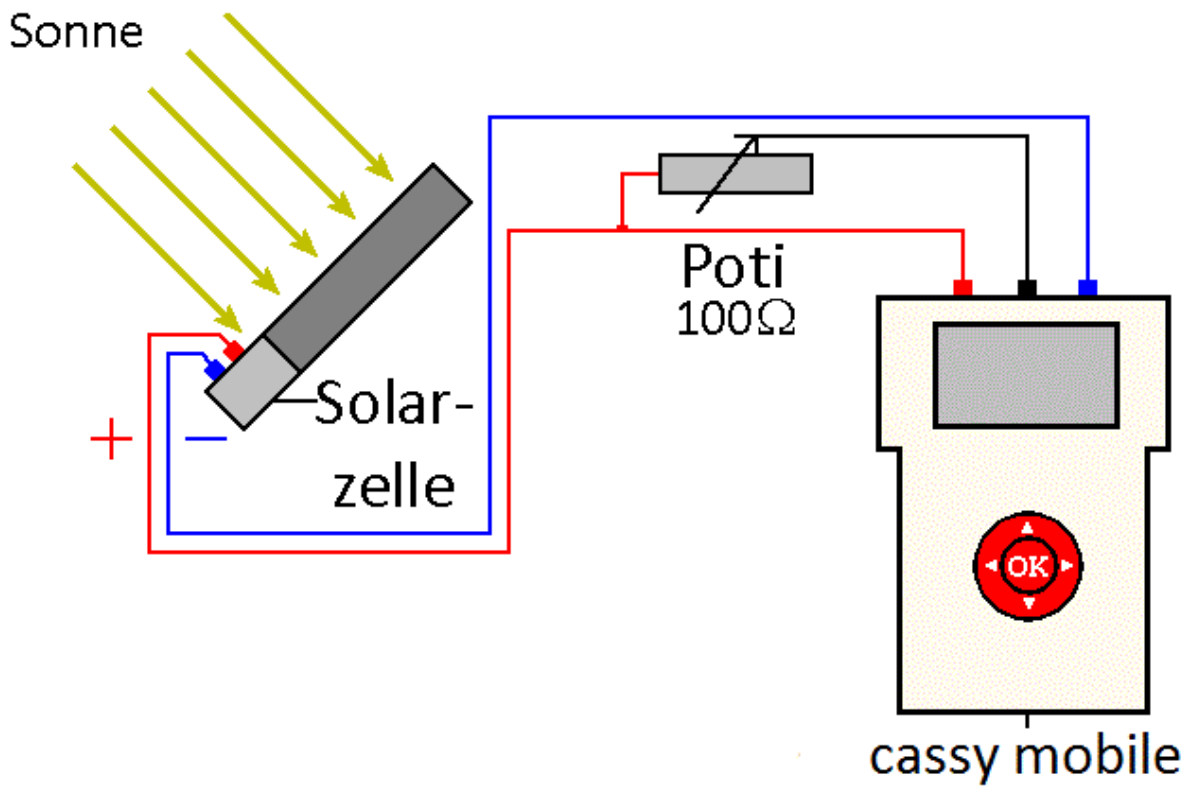


Abb.3: P(r)-Diagramm

Versuch 3



Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch gemäß der Abb. auf. Richten Sie die Solarzelle so aus, dass sie senkrecht zur Sonneneinstrahlung steht.
2. Starten Sie cassy mobile. Aktivieren Sie im Menü I_B die Strommessung und im Menü P die Leistungsmessung. Wählen Sie folgende Einstellungen:
   U_A: Bereich -10V..10V, Erfassung: gemittelte Werte (DC), Nullpunkt: links
   I_B: Bereich -0,3A..0,3A, Erfassung: gemittelte Werte, Nullpunkt: links
   P: Bereich 1 W
3. Drehen Sie das Potentiometer auf R_1= 0 Ω. Drücken Sie die O.K.-Taste, um den Messwert zu speichern.
4. Erhöhen Sie den Widerstand R des Potentiometers in Schritten ΔR = 10 Ω bis auf R_2 = 100 Ω. Speichern Sie nach jedem Schritt die Messwerte durch Drücken der O.K.-Taste.
5. Speichern Sie die Messkurven.
6. Entfernen Sie das Potentiometer aus der Schaltung und messen sie die Leerlaufspannung. Notieren Sie sich den Wert.

Aufgaben

a. Erläutern und erklären Sie die Messkurven. Beachten Sie bei Ihren Überlegungen, dass die Solarzelle einen Innenwiderstand R_i besitzt.
b. Berechnen Sie aus der Leerlaufspannung die Spannung, die eine Solarzelle liefert. Das Solarmodul besteht aus insgesamt 16 Solarzellen, die in zwei parallelen Reihen zu je 8 Zellen angeordnet sind. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Wert in Versuch 1.
c. Laden Sie die Messwerte ins Programm cassy lab 2. Erstellen Sie eine Formel, mit der Sie die Nummer n der Messung in den Widerstand umrechnen können. Erzeugen Sie ein U(R), I(R)- und ein P(R)-Diagramm.
d. Ermitteln Sie aus den Messkurven den Leerlaufstrom. Berechnen Sie aus der Leerlaufspannung und dem Leerlaufstrom den Innenwiderstand des Moduls.
e. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Wert aus Versuch 1. Erklären Sie.
f. Erläutern, welche Bedeutung der Innenwiderstand für die gemessene Leistung hat.
g. Berechnen Sie den Wirkungsgrad der verwendeten Solarzelle. Sie hat eine Fläche $A = 0{,}007\ m^2$. Die Solarkonstante beträgt bei optimaler Sonneneinstrahlung $S = 1\ kW/m^2$.
h. Diskutieren Sie, welche Vor- und Nachteile Solarzellen haben.

Beobachtung
Man erhält z.B. die Messkurven in Abb.1 - 3.

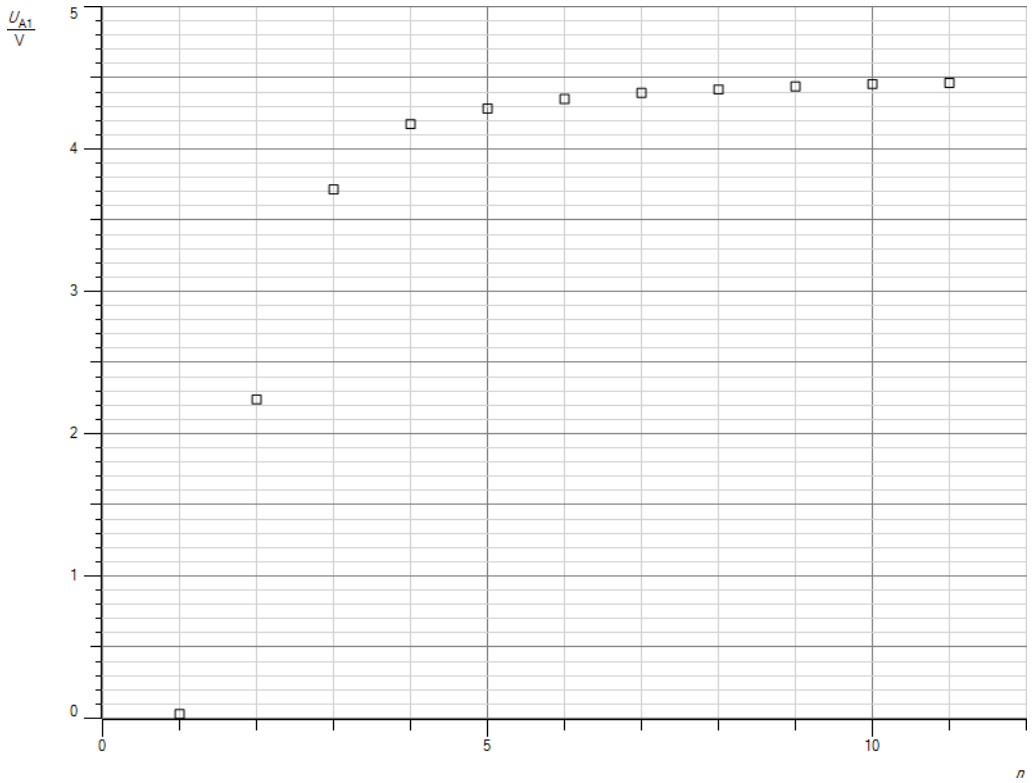


Abb.1: U(n)-Diagramm

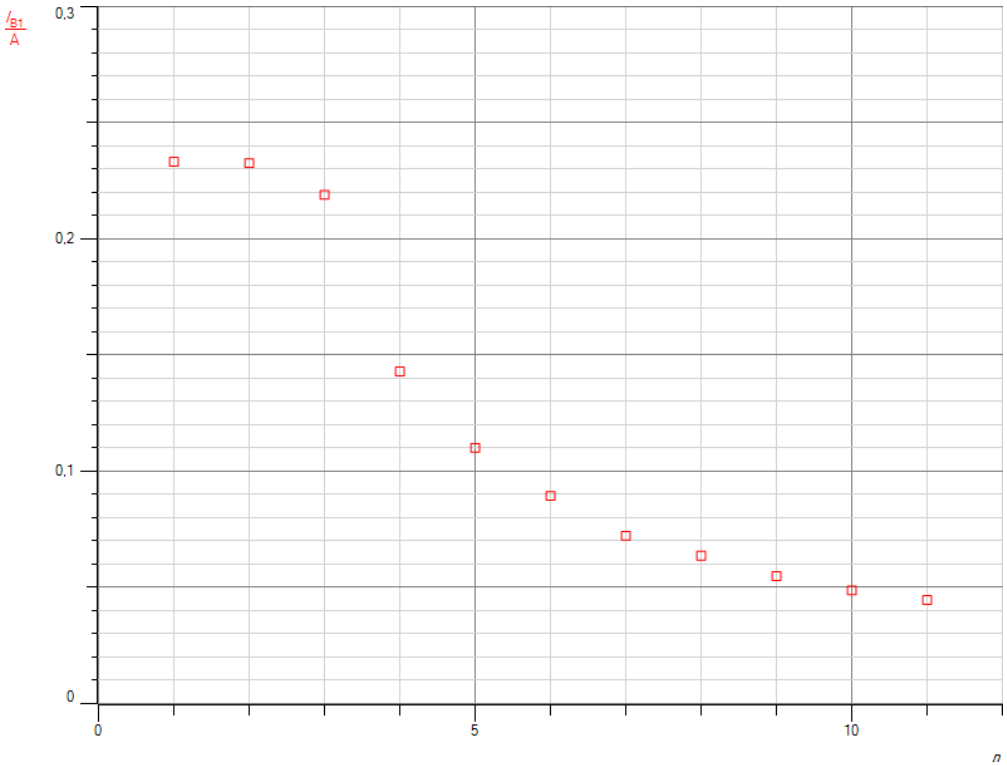


Abb.2: I(n)-Diagramm

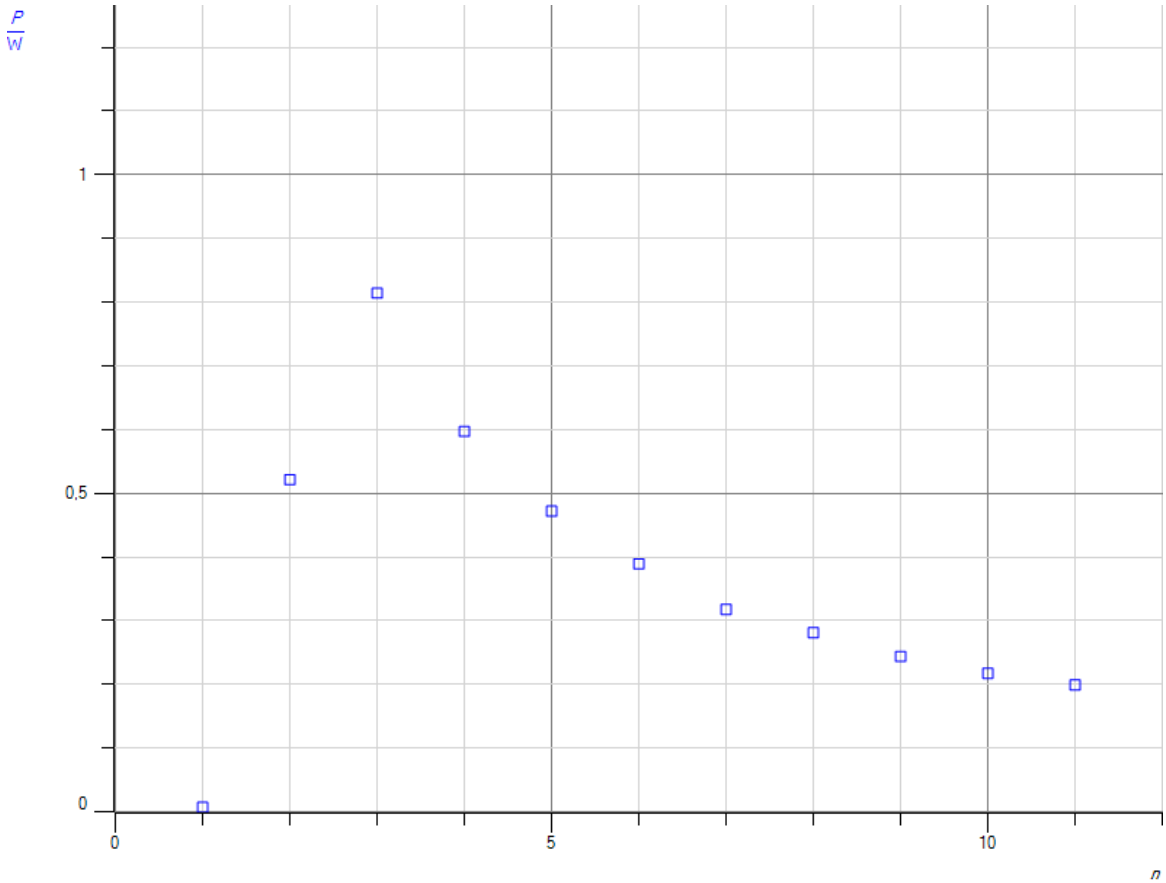


Abb.3: P(n)-Diagramm

Auswertung

a. Die Stromstärke sinkt in einer Stufe, die Spannung steigt am Anfang gleichmäßig an und geht dann in einen konstanten Endwert über. Die Leistung P durchläuft ein Maximum bei n = 3 und damit bei R ≈ 20 Ω. Da sie als Produkt aus Spannung U und Stromstärke I definiert ist, nimmt sie am Anfang vor allem aufgrund der steigenden Spannung zu. Nach ihrem Maximum fällt sie ab, da die Stromstärke sinkt.

b. Bei Parallelschaltung von Solarzellen ist die Gesamtspannung gleich der Spannung einer Zelle, der Strom steigt dagegen proportional zur Zahl der Zellen an. Bei Reihenschaltung addieren sich die Einzelspannungen zur Gesamtspannung, die Stromstärke ist in allen Zellen gleich. Da jeweils 8 Zellen in Reihe geschaltet sind und man eine Gesamtleerlaufspannung U_L = 4,8 V misst, beträgt die Leerspannung U_1 einer Zelle

$$\mathrm{U}_1 = \frac{4{,}8V}{8} = 0{,}6\mathrm{V}.$$

Sie ist etwa 10% höher als in Versuch 1, in dem die Solarzelle nur mit einer Schreibtischlampe beleuchtet wurde.

c. Die benötigte Formel lautet:

$$R = (n-1) * 10\Omega.$$

Man erhält das Diagramm in Abb. 4.

d. Den Leerlaufstrom kann man aus der Messkurve an der Stelle ablesen, an der der Messwiderstand R = 0 beträgt. Man erhält beträgt I_L = 0,233 A. Zusammen mit der Leerlaufspannung ergibt sich für den Innenwiderstand R_i des Moduls

$$R_i = \frac{4{,}8V}{0{,}233A} = 20{,}6\Omega.$$

e. Der Innenwiderstand ist rund 10mal kleiner als in Versuch 1, in dem die Solarzelle mit einer Schreibtischlampe beleuchtet wurde. Er hängt von der Beleuchtungsstärke ab. Je höher sie ist, umso mehr bewegliche Ladungsträger werden in der Solarzelle freigesetzt und umso geringer ist der Innenwiderstand.

f. Die entnehmbare Leistung ist dann am größten, wenn der Belastungswiderstand genau so groß ist wie der Innenwiderstand der Zelle. Das entspricht, wie man der Messkurve entnehmen kann, dem Punkt der Strom- bzw. Spannungskurve, an dem die Spannung fast die Leerlaufspannung erreicht hat, aber der Strom noch nicht allzu stark abgefallen ist.

g. Die maximale Leistung der Solarzelle beträgt P_{max} = 0,812 W. Auf die Fläche der Solarzelle strahlt die Sonne eine Leistung

$$P_{Sonne} = S * A = 1000W/m^2 * 0{,}007m^2 = 7W.$$

Damit erhält man für den Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{Sonne}} * 100\% = \frac{0{,}812W}{7W} * 100\% = 11{,}6\%.$$

h. Solarzellen können nicht leer werden wie eine galvanische Zelle. Sie können allenfalls kaputt gehen. Mit der Zeit nimmt ihre Leistung ab. Bei Solarzellen auf den Dächern ist sie nach zwanzig Jahren unter die Hälfte gesunken. Sie liefern nur dann elektrische Energie, wenn sie mit Licht beschienen werden. Ihre Leistung hängt stark von der Intensität des Lichtes ab, wie Versuch 2 zeigt. Sie setzen keine Abgase frei wie Kohlekraftwerke. Und die Entsorgung ist weit weniger problematisch wie bei Atommüll, weil sie überwiegend aus Silizium bestehen.

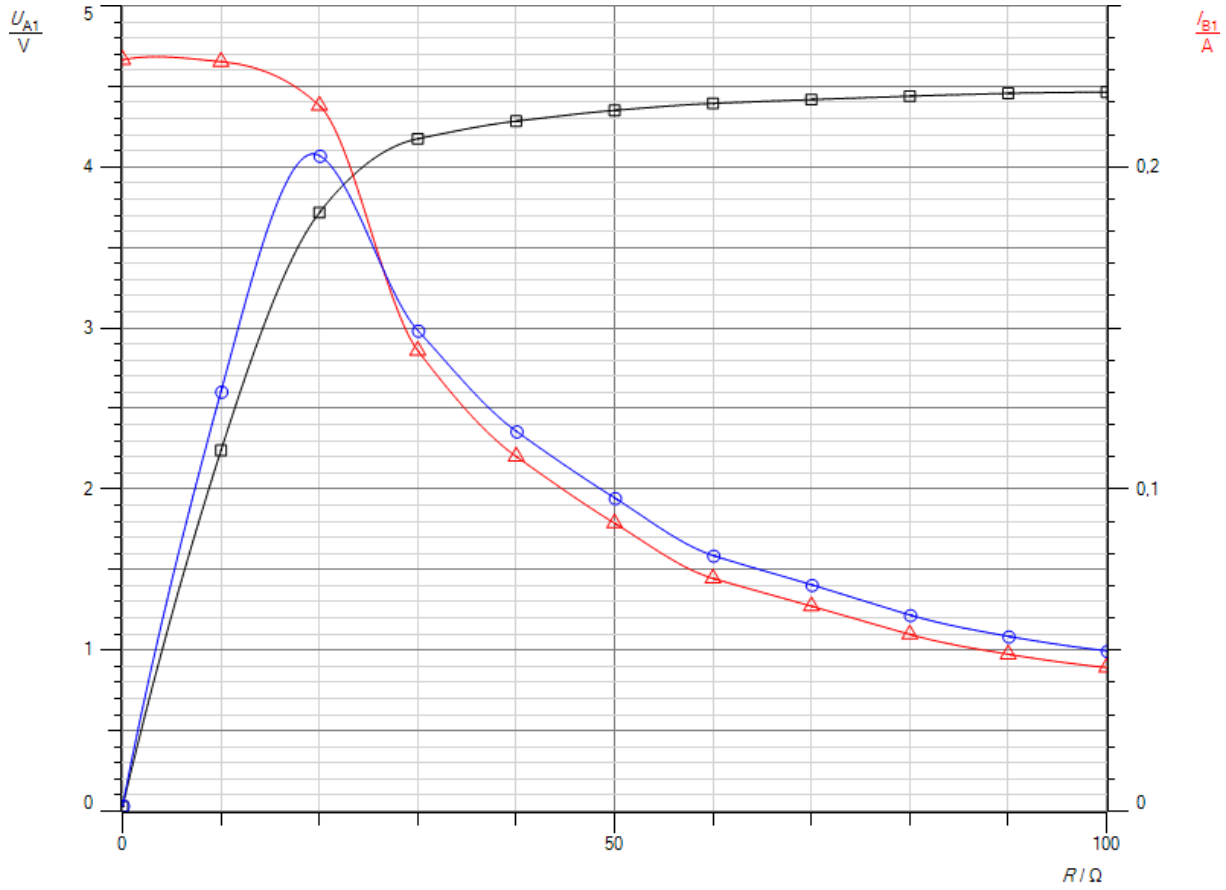
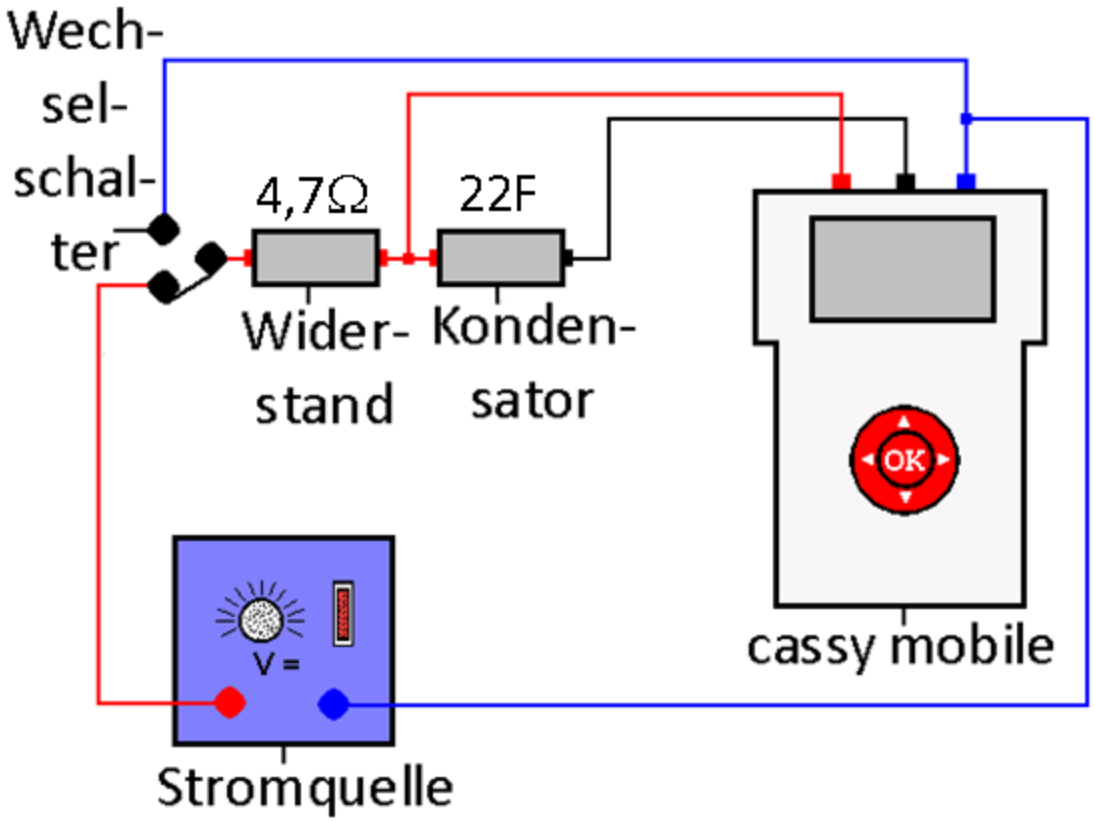


Abb.4: U(R), I(R)- und P(R)-Diagramm

4.4 Kondensator

Versuch 1



Durchführung

1. Bauen Sie die Schaltung gemäß der Abb. auf. Achten Sie beim Kondensator auf die richtige Polung.
2. Starten Sie cassy mobile. Aktivieren Sie im Menü I_B die Strommessung. Wählen Sie folgende Einstellungen:
   U_A: Bereich -10V..10V, Erfassung: gemittelte Werte (DC), Nullpunkt: links
   I_B: Bereich -1A..1A, Erfassung: gemittelte Werte, Nullpunkt: Mitte
3. Stellen Sie den Wechselschalter so ein, dass der Kondensator entladen wird, gemäß der Abb. in die obige Position.
4. Schalten Sie die Stromquelle ein und legen Sie eine Gleichspannung U = 2,5 V an.
5. Starten Sie die Messung.
6. Legen Sie den Wechselschalter um und beobachten Sie den Kurvenverlauf.
7. Hat die Spannung einen fast konstanten Endwert erreicht, so drehen Sie den Wechselschalter in die andere Position.
8. Stoppen Sie die Messung, wenn die Spannung auf fast 0 V gesunken ist.

Aufgaben

a. Erklären Sie den Kurvenverlauf von U und I beim Laden bzw. Entladen des Kondensators.
b. Erstellen Sie eine U/t-Wertetabelle für den Entladevorgang und zeigen Sie, dass man ihn mit einer e-Funktion beschreiben kann.
c. Ermitteln Sie aus der Messkurve den Ladewiderstand.
d. Errechnen Sie einen Mittelwert für die Ladekonstante und ermitteln Sie mit ihm und dem Widerstand die Kapazität des Kondensators.
e. Vergleichen Sie den gemessenen Wert mit der Aufschrift auf dem Kondensator. Erklären Sie mögliche Abweichungen zwischen Ihrem Messwert und der Angabe.

Beobachtung
Man erhält z.B. folgende Messkurve.

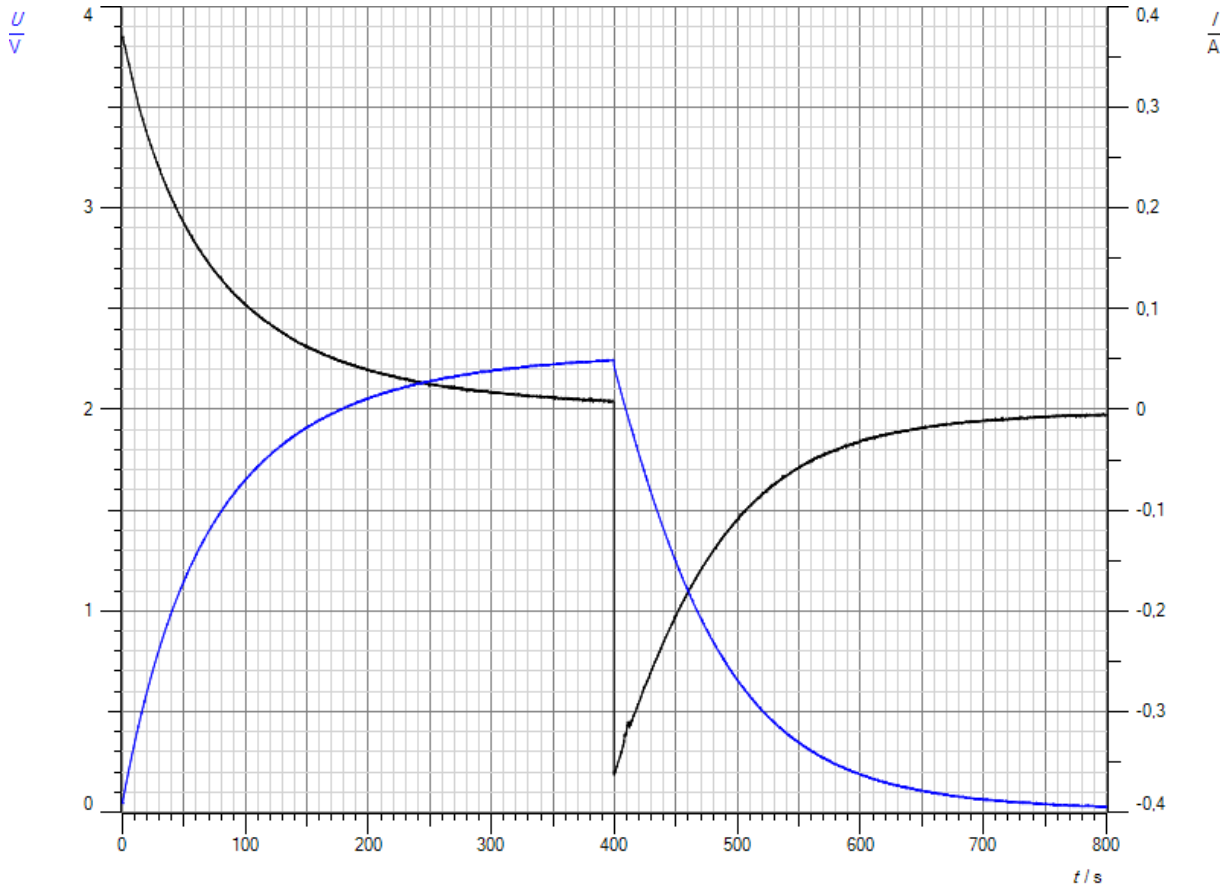


Abb.1: Lade-und Entladekurve eines Goldcaps

Auswertung

a. Beim Laden des Kondensators fließt zu Beginn ein hoher Strom, da der Kondensator noch keine Ladung trägt. Folglich ist die Spannung an ihm gering. Je voller er wird, umso mehr steigt die Spannung an. Gleichzeitig nimmt die Spannungsdifferenz zwischen der von außen angelegten Spannung und der Kondensatorspannung ab. Der Antrieb des Ladestromes wird kleiner, die Stromstärke sinkt. Beim Entladen treibt zu Beginn die hohe Kondensatorspannung einen hohen negativen Entladestrom durch den Widerstand. Je mehr Ladung der Kondensator verliert, umso kleiner werden die an ihm liegende Spannung und damit der Antrieb für den Entladestrom. Er sinkt betragsmäßig.

b. Man erhält folgende Tabelle:

t[s]	0	25	50	75	100	150	200	250
U[V]	2,25	1,68	1,26	0,89	0,64	0,34	0,18	0,11
λ[1/s]		0,0122	0,0117	0,0124	0,0126	0,0126	0,0126	0,0121

Für den Entladevorgang eines Kondensators gilt mit U als momentaner Spannung, U_0 als Spannung zum Zeitpunkt 0, λ als Entladekonstante und t als Zeit folgende Gesetzmäßigkeit:

$$U = U_0 * e^{-\lambda * t}$$

Löst man diese Gleichung nach λ auf, so erhält man

$$\lambda = -\frac{ln\,(U/U_0)}{t}.$$

Berechnet man die Entladekonstante für die Spannungen zu verschiedenen Zeiten, so ergibt sich Zeile 3 der Tabelle. Da der Wert für λ nahezu konstant ist, sinkt die Spannung beim Entladen des Kondensators mit einer e-Funktion.

c. Für den Entladewiderstand gilt:

$$R = \frac{U_0}{I_0} = \frac{2{,}25V}{0{,}37A} = 6{,}08\Omega.$$

d. Die Entladekonstante ist umso kleiner, je größer der Entladewiderstand und je größer die Kapazität des Kondensators ist. Es gilt:

$$\lambda = \frac{1}{R * C}.$$

Löst man diese Gleichung nach C auf, so folgt:

$$C = \frac{1}{R * \lambda} = \frac{1}{6{,}08\Omega * 0{,}0123 * 1/s} = 13{,}4F.$$

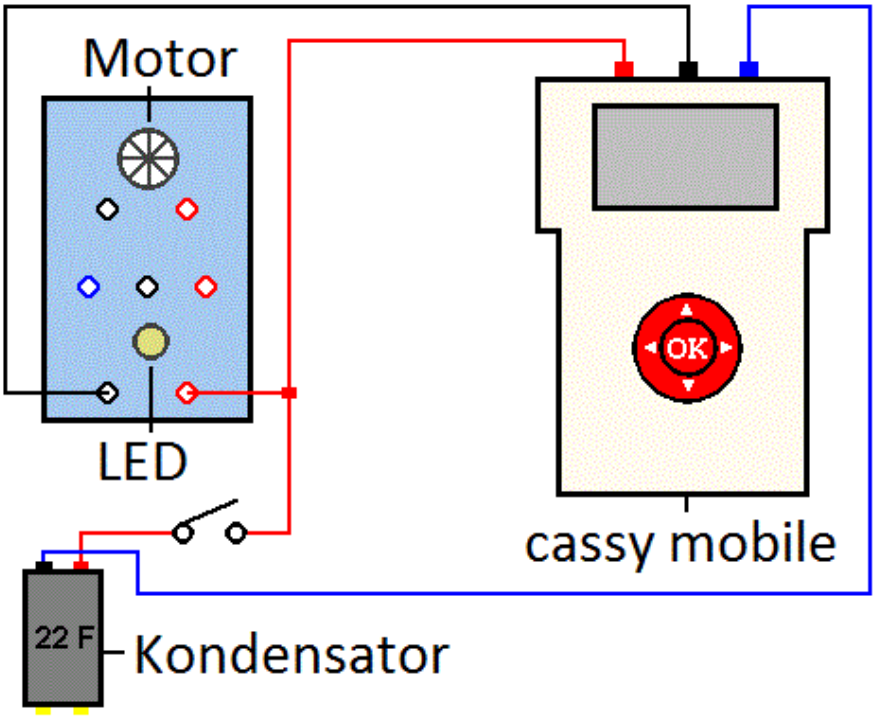
e. Die ermittelten Werte weichen erheblich von den Aufschriften auf den Bauteilen ab. Einerseits weisen elektronische Bauteile je nach Güte mehr oder weniger große Abweichungen vom Nennwert auf, die bis zu 50 % betragen können. Ferner muss man beachten, dass auch der Kondensator einen Widerstand besitzt. Er beträgt im Beispiel

$$R = 6{,}08\Omega - 4{,}7\Omega = 1{,}38\Omega$$

und damit fast 30 % des Ladewiderstandes. Und je größer der scheinbare Ladewiderstand ist, umso kleiner ist nach der obigen Formel der berechnete Wert für die Kapazität. Einen besseren Wert für C erhält man in den Versuchen 2 und 4, in denen die Kapazität über ihre Definition ermittelt wird und nicht über eine abgeleitete Formel.

Versuch 2

LEDs müssen mit einer möglichst konstanten Spannung betrieben werden, bei weißen LEDs mit ca. 3 V. Sinkt die Spannung unter diesen Wert, so geht ihre Helligkeit aufgrund ihrer UI-Kennlinie stark zurück und sie erlischt sehr rasch ganz. Will man eine LED mit einem Superkondensator betreiben, so hat man zwei Probleme. Zum einen ist die Ausgangsspannung des Kondensators mit U_{max} = 2,3 V für die LED von vorneherein zu gering. Zum zweiten fällt sie beim Entladen des Kondensators zu Beginn rasch ab (s. Versuch 1). Daher benötigt man einen speziellen LED-Treiber, der in vielen kleinen LED-Taschenlampen verwendet wird. Man benötigt dann nur eine Mignonzelle mit U = 1,5 V. Sein Verhalten soll in den beiden folgenden Experimenten genauer untersucht werden.



Durchführung

1. Laden Sie den Kondensator mit einer Gleichspannungsquelle auf U = 1,5 V.
2. Starten Sie cassy mobile. Aktivieren Sie im Menü I_B die Strommessung. Wählen Sie folgende Einstellungen:
   U_A: Bereich -3V..3V, Erfassung: gemittelte Werte (DC), Nullpunkt: links
   I_B: Bereich -0,3A..0,3A, Erfassung: gemittelte Werte, Nullpunkt: links
3. Verbinden Sie den Kondensator gemäß der Abb. mit dem Eingang der LED und cassy mobile.
4. Schließen Sie den Schalter. Starten Sie die Messung.
5. Stoppen Sie sie einige Sekunden nach dem die LED erloschen ist.

Aufgaben

a. Beschreiben und erläutern Sie die Kurvenverläufe.
b. Berechnen Sie mit Hilfe des Diagramms zu mehreren Zeiten die elektrische Eingangsleistung des LED-Treibers. Berechnen Sie ihren Mittelwert oder ermitteln Sie ihn mit cassy aus der Kurve als Produkt aus U und I.
c. Erklären Sie, wie die Schaltung für fast gleiche Helligkeit der LED sorgt trotz sinkender Spannung am Eingang.
d. Ermitteln Sie mit Hilfe der Messkurven die Kapazität des eingesetzten Kondensators und vergleichen Sie das Ergebnis mit der Aufschrift.

Beobachtung
Man erhält z.B. folgende Messkurve:

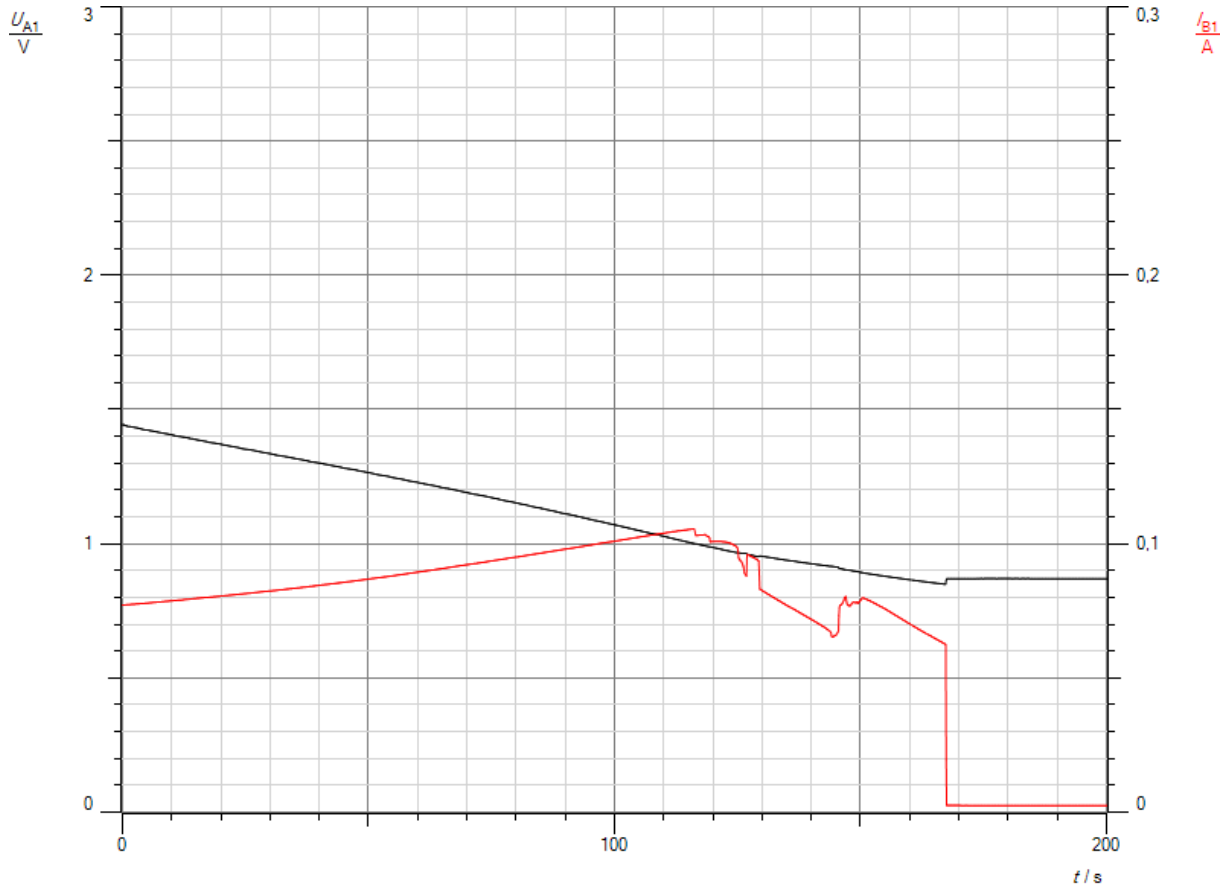


Abb.1: Spannungs- und Stromverlauf am Treibereingang

Auswertung

a. Die Spannung am Kondensator sinkt, da er sich nach und nach entlädt. Erstaunlicherweise steigt die Stromstärke bis ca. 120 s an. Danach fällt sie in Stufen. Die Helligkeit der LED sinkt. Nach etwa 165 s schaltet sich der Treiber von alleine aus, die LED erlischt.
b. Man erhält zu verschiedenen Zeiten folgende Spannungen, Stromstärken und Leistungen:

t[s]	U_E[V]	I_E[A]	P_E[W]
0,7	1,44	0,0773	0,111
20,3	1,37	0,0806	0,110
40,6	1,299	0,0847	0,110
60,2	1,228	0,0895	0,110
80,5	1,151	0,0952	0,110
100,1	1,070	0,1010	0,108

Die Eingangsleistung P_E bleibt konstant. Der Mittelwert beträgt P_m = 0,1098 W. Mit cassy erhält man als Mittelwert P_m = 0,1099 W.

c. Die sinkende Eingangsspannung U wird durch eine steigende Eingangsstromstärke I_E kompensiert, so dass die Eingangsleistung P_E und damit die Helligkeit der LED am Ausgang der Schaltung konstant bleibt.
d. Im Zeitraum 0 – 100,1 s sinkt die Spannung um

$$\Delta U = 1{,}44V - 1{,}07V = 0{,}37V.$$

Die mittlere Stromstärke ermittelt man graphisch aus der I(t)-Kurve. Sie beträgt:

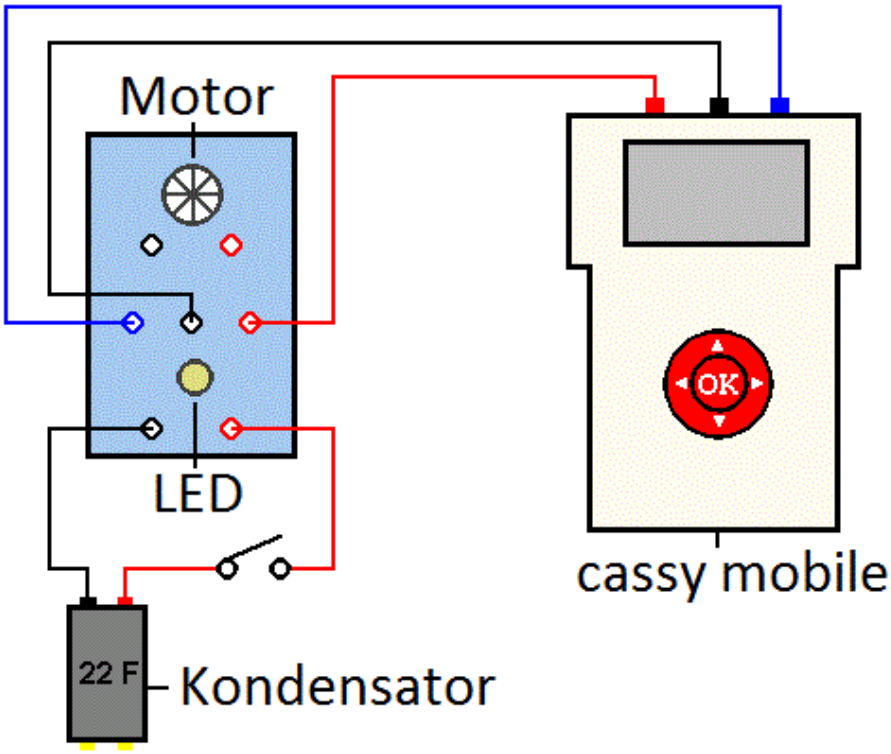
$$I_E = 0{,}08773A.$$

Damit besitzt der Kondensator eine Kapazität

$$C = \frac{Q_E}{\Delta U_E} = \frac{I_E * \Delta t}{\Delta U_E} = \frac{0{,}08773A * 100{,}1s}{0{,}37V} = 23{,}7F.$$

Dieser Wert stimmt im Rahmen der Toleranz mit der Aufschrift C = 22F überein.

Versuch 3:



Durchführung

1. Laden Sie den Kondensator mit einer Gleichspannungsquelle auf U = 1,5V.
2. Starten Sie cassy mobile. Aktivieren Sie im Menü I_B die Strommessung. Wählen Sie folgende Einstellungen:
   U_A: Bereich -10V..10V, Erfassung: gemittelte Werte (DC), Nullpunkt: links
   I_B: Bereich -0,1A..0,1A, Erfassung: gemittelte Werte, Nullpunkt: links
3. Verbinden Sie den Kondensator gemäß der Abb. mit dem Eingang der LED und den Ausgang der LED mit cassy mobile.
4. Schließen Sie den Schalter. Starten Sie die Messung.
5. Stoppen Sie sie einige Sekunden nach dem die LED erloschen ist.

Aufgaben

a. Erläutern und erklären Sie den Kurvenverlauf.
b. Ermitteln Sie die mittlere Leistung im Zeitraum 0 – 100 s.
c. Vergleichen Sie die Ausgangsleistung am LED-Treiber in Teilaufgabe b mit der Eingangsleitung in Versuch 2 und berechnen Sie den Wirkungsgrad der Schaltung.

Beobachtung
Man erhält z.B. folgende Messkurve:

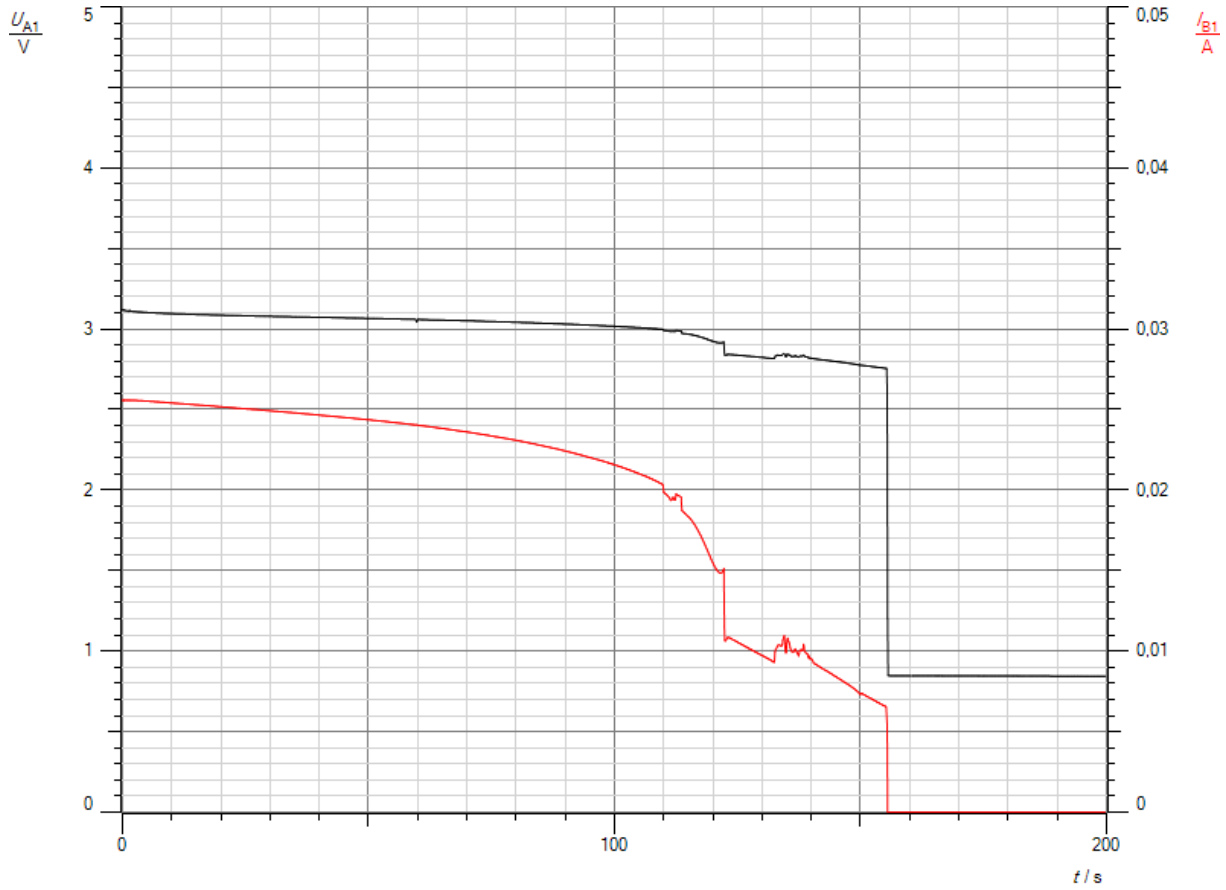


Abb.1: Spannungs- und Stromverlauf am Treiberausgang

Auswertung

a. Obwohl die Eingangsspannung am Kondensator nur 1,5 V beträgt und während des Versuches sinkt (s. Versuch 4) liegt an der LED eine nahezu konstante Spannung von etwa 3 V an. Der Strom fällt bis etwa 100 s Betriebsdauer nur von 25,5 mA auf 21,5 mA. Die LED wird im Zeitraum 1- 100 s mit fast konstanter Leistung betrieben und leuchtet etwa mit gleichbleibender Helligkeit. Danach sinkt sie rasch ab, nach etwa 155 s schaltet sich die LED automatisch ab. Zwischen Kondensator und LED liegt eine elektronische Schaltung, Schaltregler genannt. Man könnte ihn als Gleichspannungstrafo bezeichnen. Er erzeugt aus einer Gleichspannung U_1 = 1,5 V eine größere Gleichspannung U_2 = 3 - 3,2 V.

b. Wertet man die U(t)-Kurve bzw. I(t)-Kurve im Bereich 0 -100 s graphisch aus, so erhält man folgenden Mittelwert:

$$P_A = 0{,}0686W.$$

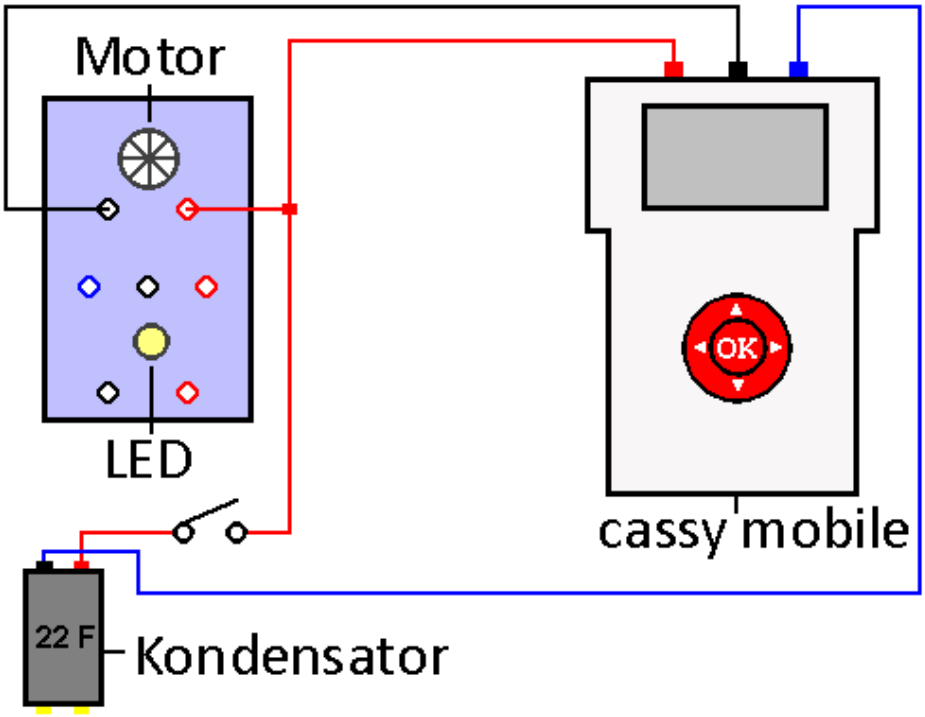
c. Gemäß Versuch 2 beträgt die mittlere Eingangsleitung im untersuchten Zeitraum

$$P_E = 0{,}1098W.$$

Damit besitzt die Schaltung einen Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_A}{P_E} * 100\% = 62{,}5\%.$$

Versuch 4



Durchführung

1. Laden Sie den Kondensator mit einer Gleichspannungsquelle auf U = 1 V.
2. Starten Sie cassy mobile. Aktivieren Sie im Menü I_B die Strommessung. Wählen Sie folgende Einstellungen:
   U_A: Bereich -3V..3V, Erfassung: gemittelte Werte (DC), Nullpunkt: links
   I_B: Bereich -0,3A..0,3A, Erfassung: gemittelte Werte, Nullpunkt: links
3. Verbinden Sie den Kondensator nach der Abb. mit dem Motor und cassy mobile.
4. Schließen Sie den Schalter. Starten Sie gleichzeitig die Messung.
5. Stoppen Sie sie ein paar Sekunden nach dem der Motor stehen geblieben ist.

Aufgaben

a. Beschreiben und erläutern Sie die Kurvenverläufe.
b. Ermitteln Sie aus der Spannungskurve den Spannungsabfall am Kondensator im Zeitraum 10 -120 s.
c. Ermitteln Sie aus der Stromstärkekurve die mittlere Stromstärke in diesem Zeitraum.
d. Berechnen Sie aus Ihren Ergebnissen die Kapazität des Kondensators.
e. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit der Aufschrift auf dem Kondensator und diskutieren Sie mögliche Abweichungen.

Beobachtung
Man erhält z.B. folgende Messkurve:

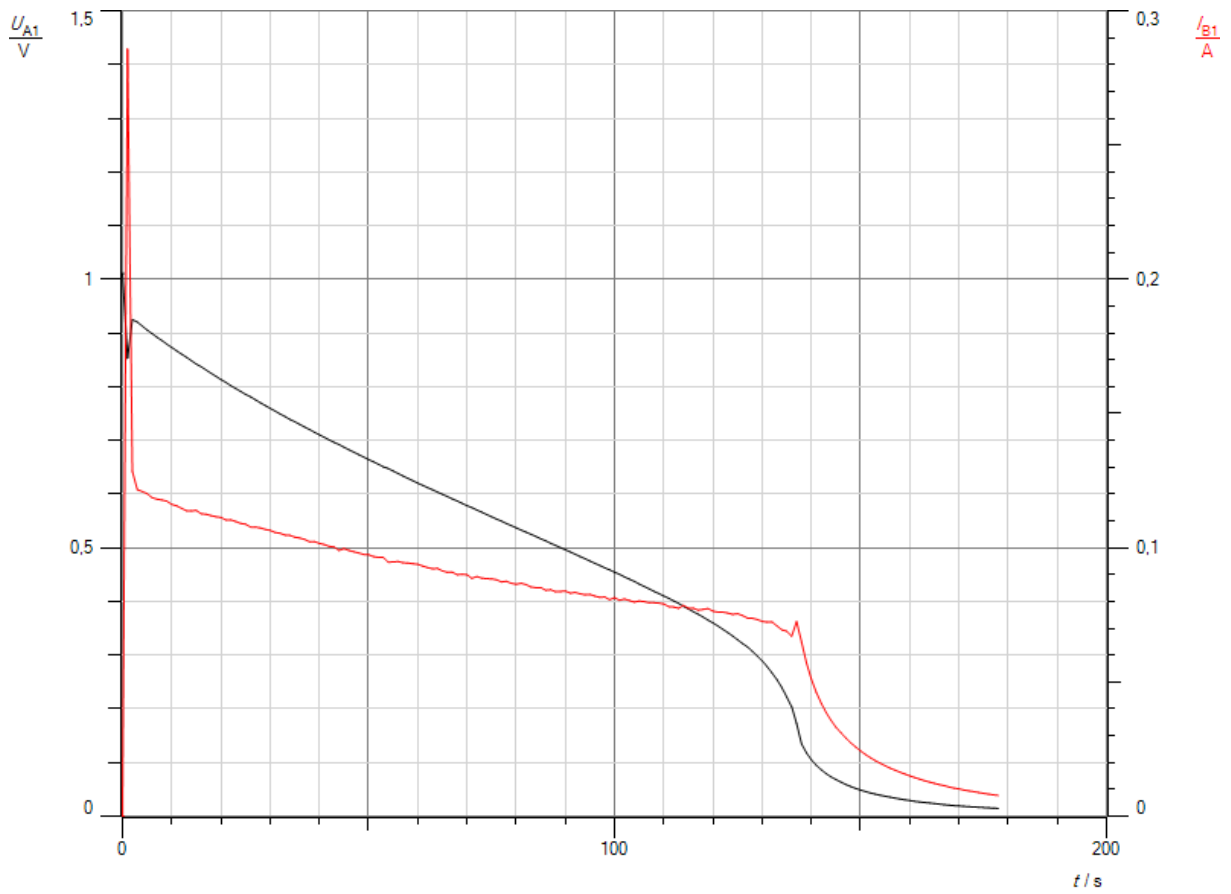


Abb.1: Spannungs- und Stromverlauf am Motor

Auswertung

a. Zu Beginn besitzt die Stromkurve eine hohe Spitze. Der Motor benötigt einen hohen Anlaufstrom. Die Spannung am Kondensator fällt für einen kurzen Augenblick etwas ab. Danach sinken Strom und Spannung etwa gleichmäßig, die Spannung schneller als die Stromstärke. Der Motor läuft immer langsamer. Erreicht die Spannung einen Wert von ca. 0,3 V, so bleibt der Motor stehen. Der Kondensator entlädt sich rasch vollständig.

b. Der Spannungsabfall im betrachteten Zeitraum beträgt:

$$\Delta U = 0{,}873V - 0{,}360V = 0{,}513V.$$

c. Die mittlere Stromstärke im betrachteten Zeitraum beträgt

$$I = 0{,}0933A.$$

d. Damit ergibt sich für die Kapazität des Kondensators

$$C = \frac{Q}{\Delta U} = \frac{I * t}{\Delta U} = \frac{0{,}0933A * 110s}{0{,}513V} = 20F.$$

e. Der Kondensator trägt die Aufschrift C = 22F. Da die Toleranz bei Kondensatoren bis zu 50 % betragen kann, stimmen gemessener Wert und angegebener Wert recht gut überein.

5. Literatur

1) Christoph Buchal, Energie, Baden-Baden 2008
2) Hrsgb.: Informationskreis Kernenergie, CD, 2006
3) Dorn-Bader, Physik 12/13, Hannover 2004
4) www.wikipedia.de, Download vom 5.11.14, 11:29
5) Dorn-Bader, Sekundarbereich I, Hannover 1993
6) Friedrich Holtz, Vom Messing bis zur Großchemie, Stolberg 1994