

# Energiespeicher

(Alfons Reichert)



**Stolberg, im April 2015**

## Inhalt

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>1. Einleitung</b> .....      | <b>1</b>  |
| <b>2. Grundlagen</b> .....      | <b>3</b>  |
| <b>3. Energiespeicher</b> ..... | <b>6</b>  |
| 3.1 Einmalspeicher .....        | 6         |
| 3.1.1 Batterien.....            | 6         |
| 3.1.2 Kohle.....                | 8         |
| 3.1.3 Erdöl/Erdgas.....         | 10        |
| 3.1.4 Biomasse.....             | 11        |
| 3.1.5 Wasserstoff.....          | 13        |
| 3.1.6 Kernbrennstoffe.....      | 15        |
| 3.1.7 Erdwärme.....             | 18        |
| 3.1.8 Sonnenenergie.....        | 20        |
| 3.2 Aufladbare Speicher .....   | 23        |
| 3.2.1 Akkus.....                | 23        |
| 3.2.2 Kondensatoren.....        | 25        |
| 3.2.3 Wasserspeicher.....       | 31        |
| 3.2.4 Luftspeicher.....         | 37        |
| <b>4. Literatur</b> .....       | <b>40</b> |

## 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, die größte Herausforderung besteht darin, neue Energiespeicher zu entwickeln oder Energiequellen zu erschließen, mit denen man die Energielücken in der Nacht oder an sonnenarmen und windstillen Tagen schließen kann. Viele neue 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, müssen Energiespeicher entwickelt und gebaut werden, die Energielücken zu überbrücken. In Thüringen entstand 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. 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

## 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 so 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 vor ein paar Jahren grundlegend gewandelt, 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 miteinander 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  $\text{cm}^3$  oder  $\text{m}^3$

$m$ : Masse in kg oder g.

Im ersten Fall spricht man von volumetrischer Energiedichte. Sie hat die Einheit  $\text{J}/\text{m}^3$  und ist ein Maß für den Energieinhalt

eines Stoffes in Joule pro Kubikmeter. Im zweiten nennt man sie gravimetrische Energiedichte oder spezifische Energie mit der Einheit J/kg. Sie ist ein Maß für den Energieinhalt eines Stoffes in Joule pro Kilogramm. 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 zu- meist 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:

$$\begin{aligned}1Ah &= 1A * 3600s \\ &= 3600As \\ &= 3600C\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}1mAh &= 0,001A * 3600s \\ &= 3,6As \\ &= 3,6C.\end{aligned}$$

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. 9V-Blockbatterien auf Lithiumbasis haben Kapazitäten von  $Q = 800\text{mAh}$  bis  $Q = 1300\text{mAh}$ . Ihr Volumen beträgt einheitlich  $V = 22\text{ cm}^3 = 2,2 \cdot 10^{-5}\text{ m}^3$ . Für die kleinste Batterie mit der Ladung  $Q = 800\text{mAh}$  erhält man eine Energiedichte:

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

9V-Block-Batterien mit Alkali-Mangan-Technologie besitzen Kapazitäten von  $Q = 500\text{mAh}$  bis  $Q = 600\text{mAh}$ . Für die kleinste Ausgabe der Batterie erhält man damit eine Energiedichte von

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

Bei herkömmlichen 9V-Zink-Kohle-Blocks schwankt die Ladung zwischen  $Q = 190\text{mAh}$  und  $Q = 330\text{mAh}$ . Für die kleinste Batterie ergibt sich eine Energiedichte:

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{190 \cdot 3,6\text{C} \cdot 9\text{V}}{2,2 \cdot 10^{-5}\text{ m}^3} \\
 &= 2,80 \cdot 10^8\text{ J / m}^3 \\
 &= 280\text{MJ / m}^3.
 \end{aligned}$$

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

$$S = \frac{25920J}{0,03274kg} \\ = 0,792MJ / kg$$

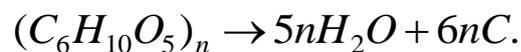
und für die Alkali-Mangan-Batterie

$$S = \frac{16200J}{0,04576kg} \\ = 0,354MJ / kg.$$

Laut Wikipedia<sup>4)</sup> 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.

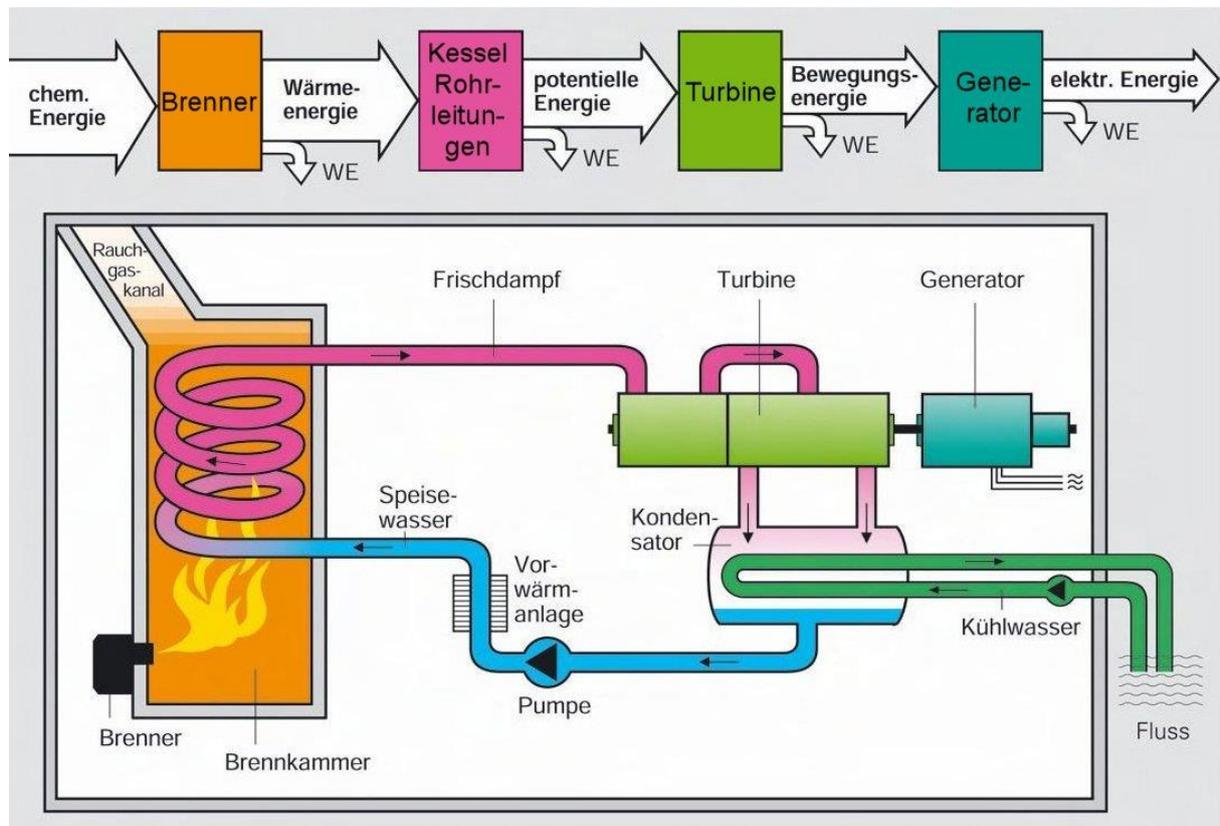
### 3.1.2 Kohle

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:



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 Block-

kraftwerken wird sie teilweise als Fernwärme zum Heizen von Häusern oder als Prozesswärme in chemischen Fabriken benutzt.



**Abb.1: Energieumwandlungen in einem Kohlekraftwerk<sup>2)</sup>**

Die Kohlevorkommen sind der größte Speicher an chemischer Energie. Ihr Vorrat reicht bei der derzeitigen Energiehunger der Menschheit noch für einige hundert Jahre. Das ist bezogen auf ein Menschenalter beruhigend. 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<sub>2</sub>-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<sub>2</sub> herauszufiltern und unter der Erde in alten Bergwerksstollen zu deponieren. Weil diese CCS-Technologie (Carbon Capture and Storage) noch intensiv er-

forscht 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<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre wird deutlich gebremst werden. Welche Gefahren und Risiken von diesen CO<sub>2</sub>-Depots ausgehen können, ist noch völlig unklar.

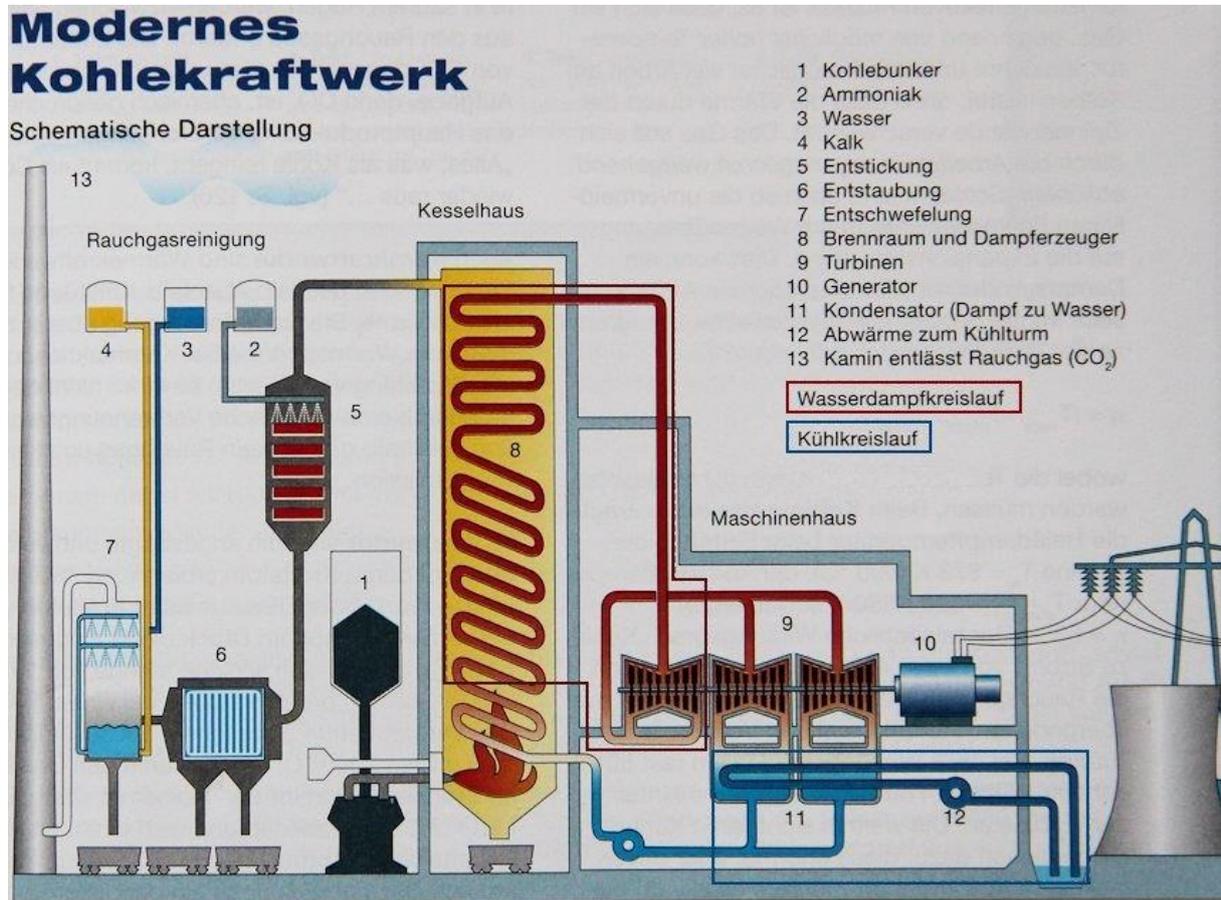


Abb.2: Aufbau eines modernen Kohlekraftwerkes<sup>1)</sup>

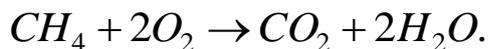
### 3.1.3 Erdöl/Erdgas

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 auch heute noch in ähnlicher Weise in Biogasanlagen ab. Methan kann sich aus Glucose, dem Grundbaustein der Biomasse, etwa nach folgender Reaktionsgleichung bilden:



In ähnlichen Prozessen entstehen auch die längerkettigen Alkane als wesentliche Bestandteile des Erdöls. Der Brennwert von

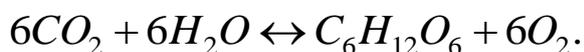
Erdgas liegt je nach Herkunft zwischen 30 und 36 MJ/kg. Aus Erdöl destilliert man eine Reihe von Produkten wie Benzin oder Diesel mit Brennwerten von 46 MJ/kg bzw. 42 MJ/kg. Kein anderer Treibstoff für Fahrzeuge kommt auch nur in die Nähe dieser Werte, auch Wasserstoff nicht, da der Tank mit berücksichtigt 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 verbrennt nach folgender Reaktionsgleichung:



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:



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 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 Sauer-

stoff 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 niemals 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 Reaktion ab:

**Alkoholische Gärung:**



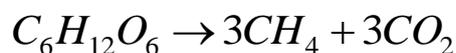
**Verbrennung von Ethanol:**



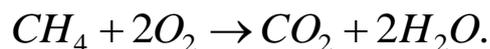
Ethanol hat eine Energiedichte von 26,8 MJ/kg, ist also durch die Gärung energetisch weiter verdichtet worden. Sie ist jedoch kleiner als die von Benzin und Diesel. Daher steigt der Spritverbrauch etwas, wenn man Super-E10 mit 10% Ethanol tankt anstelle des normalen Supers, das nur 5% Prozent Ethanol 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:**



**Verbrennung von Methan:**



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 120MJ/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 schon 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  $S = 1,19 \text{ MJ/kg}$  statt  $S = 120 \text{ MJ/kg}$  bei reinem Wasserstoff beträgt, obwohl sie aus Leichtmetallen gebaut werden. Eine kleine Rechnung macht das deutlich. Der Benzintank in einem Auto fasst z.B.  $V = 60 \text{ l}$  Benzin. Für die Masse des Benzins gilt:

$$\begin{aligned} m &= \rho * V \\ &= 0,75 \text{ kg/l} * 60 \text{ l} \\ &= 45 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Mit der Energiedichte  $S$  des Benzins erhält man für die darin enthaltene Energie  $E$ :

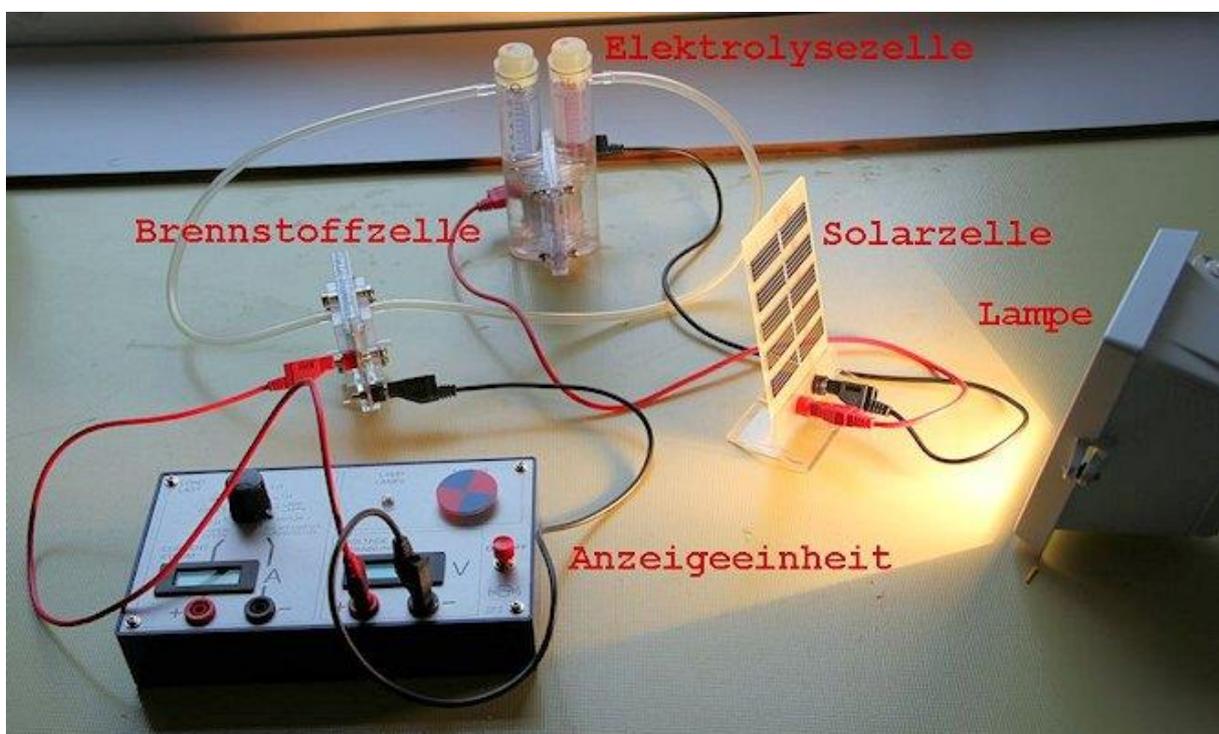
$$\begin{aligned} E &= m * S \\ &= 45 \text{ kg} * 43 \text{ MJ / kg} \\ &= 1935 \text{ MJ.} \end{aligned}$$

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

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

Die Reichweite wäre mit beiden Tanks in etwa gleich, da die Brennstoffzellen nur einen etwas höheren Wirkungsgrad haben als 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  $m = 1200 \text{ kg}$  wird meist nur eine Person der Masse  $m = 75 \text{ kg}$  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.



**Abb.1: Experimentiersatz zum Wasserstoffauto**

### 3.1.6 Kernbrennstoffe

Die berühmteste Formel der Relativitätstheorie lautet:

$$E = mc^2.$$

Masse lässt sich also in Energie verwandeln. In  $m = 1\text{kg}$  Masse ist eine Energie

$$\begin{aligned} E &= 1\text{kg} * (3 * 10^8 \text{m/s})^2 \\ &= 9 * 10^{16} \text{J}. \end{aligned}$$

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):

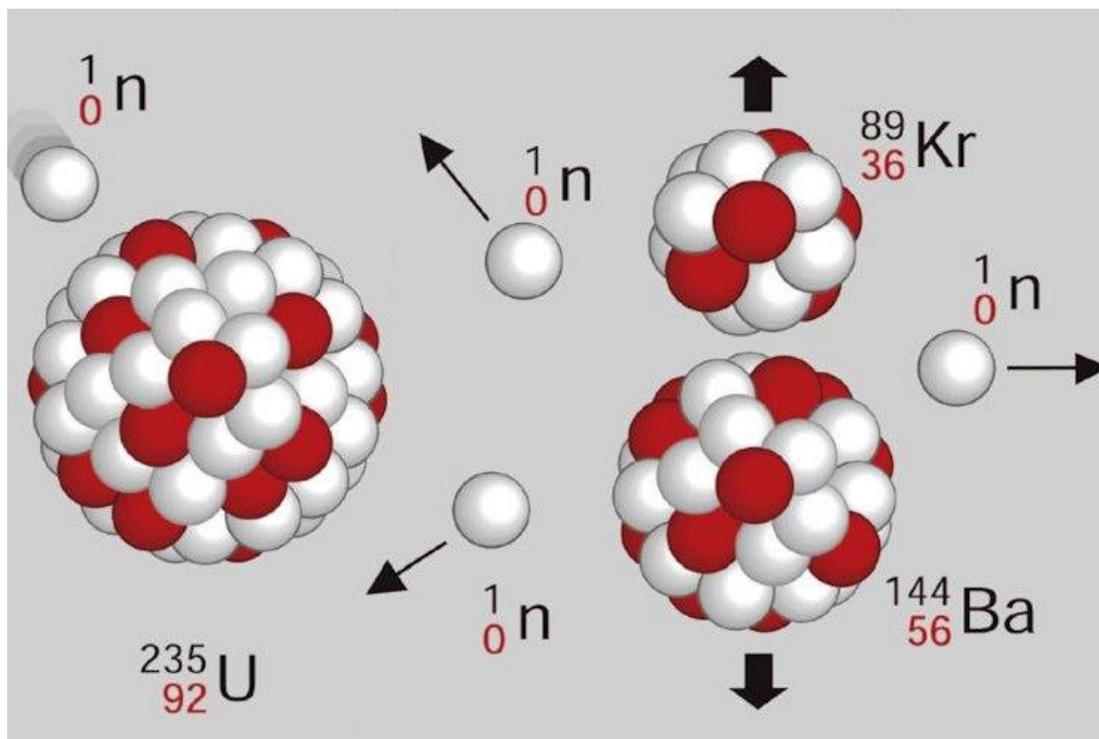


Abb.1: Kernspaltung<sup>2)</sup>

Die Massenbilanz lautet:

**Edukte:**

$$m_{U-235} = 235,043930u$$

$$m_n = 1,008655u$$

$$m_E = 236,052595u$$

**Produkte:**

$$m_{Kr-89} = 88,917631u$$

$$m_{Ba-144} = 143,922953u$$

$$m_{3n} = 3,025995u$$

$$m_p = 235,866579u.$$

Die Differenz beträgt:

$$\Delta m = m_E - m_p$$

$$= 236,052595u - 235,866579u$$

$$= 0,186016u.$$

Bei der Kernspaltung wird pro Atomkern eine Energie

$$E = 0,186016u * 1,660539 * 10^{-27} \text{ kg/u} * (2,99792458 * 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$= 2,776136315 * 10^{-11} \text{ J}$$

frei. U-235 besitzt damit eine Energiedichte von

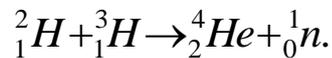
$$S = \frac{2,776136315 * 10^{-11} \text{ J}}{236,052595u * 1,660539 * 10^{-27} \text{ kg/u}}$$

$$= 7,08 * 10^{13} \text{ J/kg}$$

$$= 70.800.000 \text{ MJ/kg}.$$

Bei Wikipedia<sup>4)</sup> wird sie mit rund 90.000.000MJ/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 Fusionsreaktor ablaufen, um die Energieprobleme zu lösen. Darin verschmelzen ein Deuterium- und ein Tritiumkern zu einem Heliumkern nach folgender Reaktionsgleichung:



Hier lautet die Massenbilanz:

**Edukte:**

$$m_{H-2} = 2,0141018u$$

$$m_{H-3} = 3,0160493u$$

$$m_E = 5,0301511u$$

**Produkte:**

$$m_{He-4} = 4,0026033u$$

$$m_n = 1,0086649u$$

$$m_E = 5,0112682u.$$

Die Differenz beträgt:

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

Bei dieser Kernfusion wird pro Reaktion eine Energie

$$\begin{aligned} E &= 0,0188829u * 1,660539 * 10^{-27} \text{ kg/u} * (2,99792458 * 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 2,816 * 10^{-12} \text{ J} \end{aligned}$$

frei. Die Energiedichte beträgt:

$$\begin{aligned} S &= \frac{2,816 * 10^{-12} \text{ J}}{5,0301511u * 1,660539 * 10^{-27} \text{ kg/u}} \\ &= 337.000.000 \text{ MJ / kg.} \end{aligned}$$

Bei Wikipedia<sup>4)</sup> 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 0,065W/m<sup>2</sup>. 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 1kW/m<sup>2</sup>. 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 100m 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 100m 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 gewährleistet. Allerdings kann es dann passieren, dass man Gesteinschichten 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  $c = 0,8 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ <sup>4)</sup>. Damit erhält man bei einem Temperaturunterschied von  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  eine mittlere Energiedichte  $S$  des Erdreichs

$$\begin{aligned} S &= \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{m} \\ &= c \cdot \Delta T \\ &= 0,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 10^\circ\text{C} \\ &= 8000 \frac{\text{J}}{\text{kg}}. \end{aligned}$$

Um ein Einfamilienhaus 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

$$\begin{aligned} m &= \frac{E}{S} \\ &= \frac{2 \cdot 10^4 \text{ kWh} \cdot 3,6 \cdot 10^6 \text{ J/kWh}}{8000 \text{ J/kg}} \\ &= 9 \cdot 10^6 \text{ kg}. \end{aligned}$$

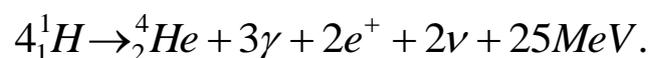
anzapfen. Bei einer mittleren Dichte des Erdreichs von  $\rho = 2100 \text{ kg}/\text{m}^3$  entspricht das einem Volumen

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{m}{\rho} \\
 &= \frac{9 \cdot 10^6}{2100 \text{ kg/m}^3} \\
 &= 4286 \text{ m}^3.
 \end{aligned}$$

Beträgt die Dicke der angezapften Erdschicht z.B.  $d = 4 \text{ m}$ , so muss man die Oberflächenerdsonden auf einer Fläche von  $A = 1071 \text{ m}^2$  verlegen. Das entspricht der Fläche von 3 mittleren Baugrundstücken. Nur in tieferen Erdschichten kann man die Temperatur durch die Wärmepumpe um mehr als  $10^\circ\text{C}$  absenken. Dadurch sinkt der Flächenbedarf. Problematisch bleibt aber die geringe mittlere Wärmeleitfähigkeit der Erde aus Erdboden und Gestein von etwa  $\lambda = 1,8 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ <sup>4)</sup>. 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 Photosynthese 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 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:<sup>3)</sup>



Darin sind:

$\gamma$ : Gammaquanten

$e^+$ : Positronen und

$\nu$ : Neutrinos.

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

$$\begin{aligned} z &= \frac{m}{4 \cdot m(H)} \\ &= \frac{6,7 \cdot 10^{11} \text{ kg/s}}{4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \\ &= 1,01 \cdot 10^{38} \cdot 1/s \end{aligned}$$

Kernreaktionen ab. Sie erzeugen eine Leistung

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

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

$$\begin{aligned} I &= \frac{P}{4\pi r^2} \\ &= \frac{4,04 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4\pi \cdot (1,5 \cdot 10^{11} \text{ m})^2} \\ &= 1430 \text{ W/m}^2. \end{aligned}$$

bestrahlt. Darin ist  $r$  der Radius der Erdbahn um die Sonne. Die gesamte Querschnittsfläche  $A$  wird von der Sonne mit der unglaublichen Leistung

$$\begin{aligned} P &= I \cdot A \\ &= 1430 \text{ W/m}^2 \cdot (\pi \cdot (6,4 \cdot 10^6 \text{ m})^2) \\ &= 1,84 \cdot 10^{17} \text{ W.} \end{aligned}$$

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

$$p = \frac{1,5 \cdot 10^{13} \text{ W}}{1,84 \cdot 10^{17} \text{ W}} * 100\% \\ = 0,0082\%$$

der von der Sonne auf die Erde 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  $E = 1000 \text{ kWh pro Jahr und m}^2$ . Sie entspricht der Energie, die in  $V = 100 \text{ l Heizöl}$  enthalten sind. Mit Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von  $\eta = 10\text{-}15 \%$  kann man somit eine elektrische Energie von  $E_{el} = 100\text{-}150 \text{ kWh}/(a \cdot \text{m}^2)$  erwirtschaften. Um den Bedarf eines Zweipersonenhaushalt an elektrischer Energie von ca.  $E = 5000 \text{ kWh/a}$  zu decken, benötigt man bei Südlage eine mittlere Dachfläche

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

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 Stoffe, zwischen denen die Strom erzeugende chemische Reaktion abläuft, 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 wichtigsten, 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. Nach wie vor sind aber auch Nickel-Metallhydrid-Akkus im Einsatz. Ihre spezifischen Energien liegen laut Wikipedia<sup>4)</sup> in der gleichen Größenordnung, unterscheiden sich aber fast um den Faktor 5. Sie betragen für die verschiedenen Akkus:

$$\text{Bleiakku: } 0,11 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{NiMHakku: } 0,36 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Liionakku: } 0,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}.$$

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

$$U = 10,8V$$

$$E = 48Wh$$

$$Q = 4200mAh.$$

Bei einer mittleren Leistung des Laptops von  $P = 15 \text{ W}$  hält der Akku

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

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

$$\begin{aligned}
m &= \frac{E}{\eta * S} \\
&= \frac{P * t}{0,95 * S} \\
&= \frac{20kW * 8h}{0,95 * 0,5MJ / kg} \\
&= \frac{160kWh}{0,475MJ / kg} \\
&= \frac{160kWh * 3,6MJ / kWh}{0,475MJ / kg} \\
&= 1213kg.
\end{aligned}$$

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

$$m = 5514kg.$$

Das entspricht der Masse eines kleinen LKW's. Besitzt das Auto einen Benzinmotor mit einem Wirkungsgrad von  $\eta = 35\%$ , so würde die im Akku gespeicherte Energie etwa einer Tankfüllung entsprechen, 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  $\rho$  das Volumen  $V$ . Es gilt:

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

$$\begin{aligned}
V &= \frac{m}{\rho} \\
&= \frac{38,27kg}{0,7kg/l} \\
&= 54,7l.
\end{aligned}$$

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 dienen allenfalls als Zwischenspeicher für kleine Ladungsmengen etwa in Netzgeräten. Die Ladungen erzeugen ein elektrisches Feld, in das die Energie  $E_K$  eingelagert ist. 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:

$\varepsilon_0$ : elektrische Feldkonstante

$\varepsilon_r$ : 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:

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

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

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

Die Energiedichte steigt 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 1C. Sie konnten z.B. mit einer maximalen Spannung  $U = 20V$  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

$$l = 31mm$$

$$d = 16mm$$

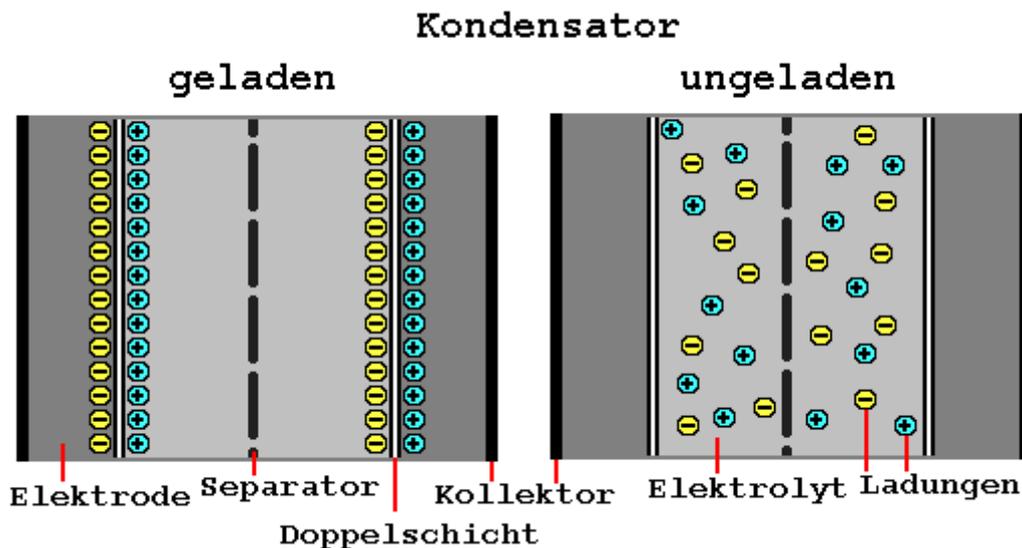
$$m = 9,5g$$

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

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

und seine spezifische Energie:

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



**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 aber, dass sich die beiden gegensinnig geladenen Aktivkohleblöcke durch direkten Kontakt entladen können.

nen. Die Aktivkohle besitzt aufgrund ihrer porösen Struktur eine riesige Oberfläche, die bis zu 100.000 mal 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 Laden 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  $Q$

$$\begin{aligned} Q &= C * U \\ &= 22F * 2,3V \\ &= 50,6C \end{aligned}$$

und eine Energie

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

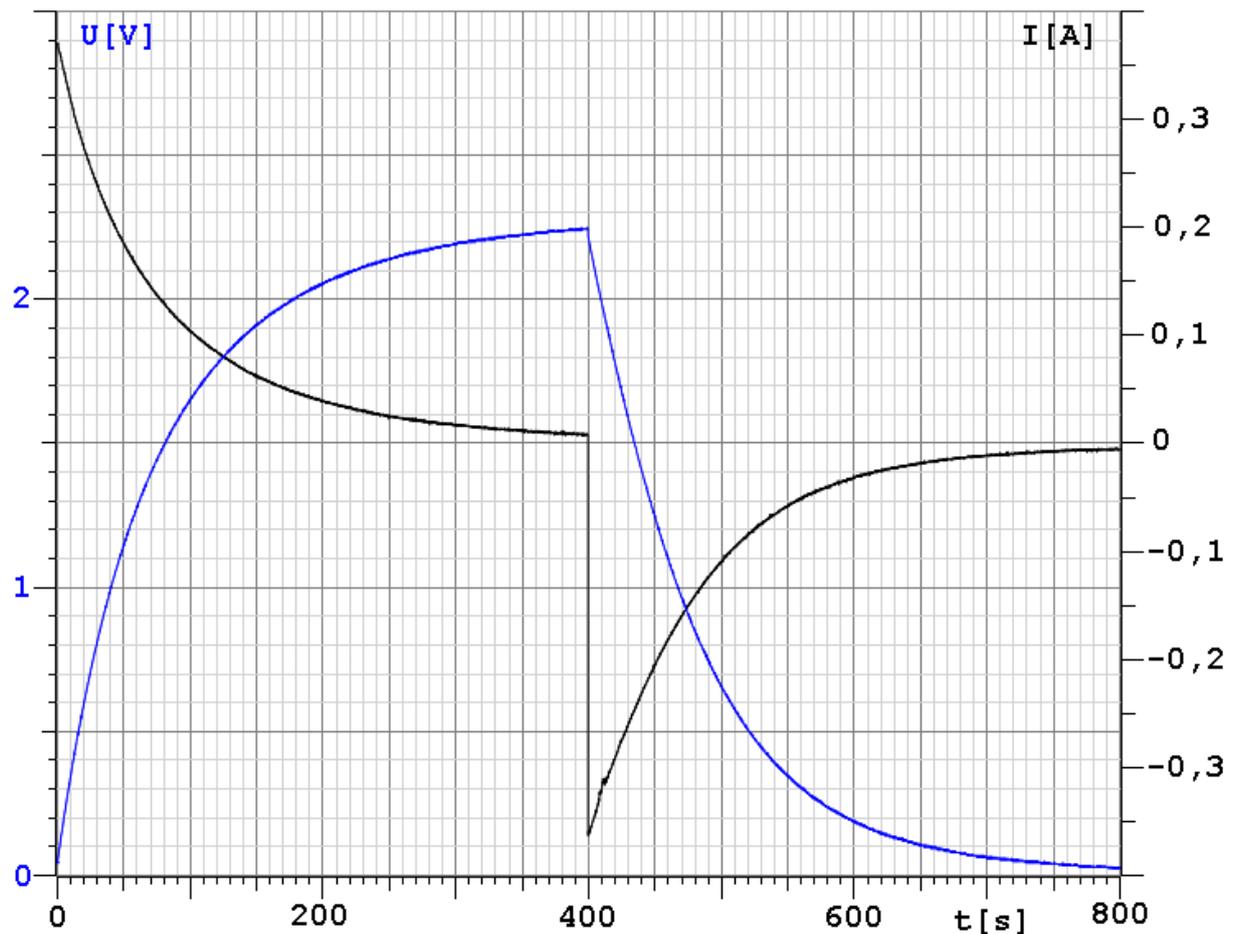
Seine volumetrische Energiedichte  $S$  beträgt

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

und seine spezifische Energie

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

Sie ist somit immer noch erheblich kleiner als die eines Akkus, in unserem Beispiel etwa um den Faktor 100 im Vergleich zu einem Lithiumionenakku. Dafür kann man ihn erheblich schneller laden, wie die Abb.2 zeigt.



**Abb.2: Lade-und Entladekurve eines Goldcaps**

Bereits nach einer Zeit  $t = 400s$  ist er bei einem maximalen Ladestrom  $I = 0,35 A$  vollgeladen. Da man ihn mit einem Strom bis  $I = 1A$  laden darf, könnte man die Ladezeit weiter verkürzen. Außerdem verträgt er unendlich viele Lade- und Entladezyklen. Beim Entladen fällt die Spannung allerdings deutlich rascher ab als bei einem Akku. Man muss ihnen einen Spannungsregler nachschalten. 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 der Motor in einer Solaruhr, der Puffer in einem CMOS-Speicher oder ein Digitalvoltmeter. Mit dem oben beschriebenen Goldcap kann man einen kleinen Solarmotor mit einer mittleren Stromstärke  $I = 15 \text{ mA}$  und einer Mindestspannung  $U_m = 0,3 \text{ V}$  immerhin eine Dreiviertelstunde lang betreiben. Es gilt:

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

### 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  $100 \text{ J/kg}$  (vgl. Kapitel 3.2.1) 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  $\eta = 80\%$ .

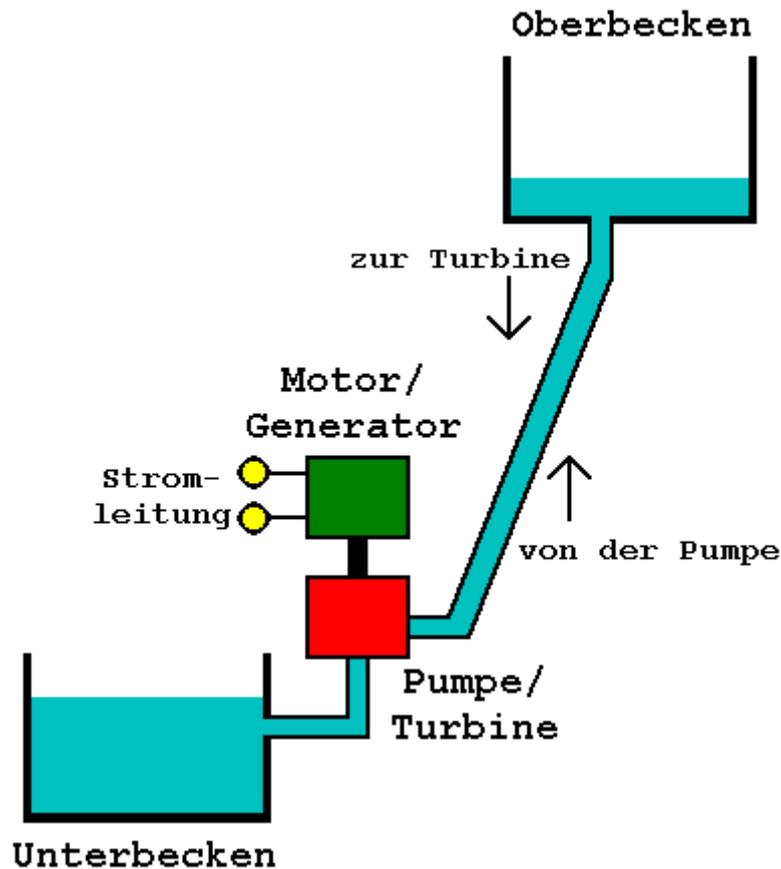


Abb.1: Aufbau eines Pumpspeicherkraftwerkes

Die Energiedichte des gespeicherten Wassers hängt nur vom Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterbecken ab, wie die folgende Rechnung zeigt.

$$\begin{aligned} S &= \frac{E}{m} \\ &= \frac{m * g * h}{m} \\ &= g * h \end{aligned}$$

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

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

Sie ist zwar knapp 30mal größer als in herkömmlichen Kondensatoren, aber um knapp die Hälfte kleiner als in modernen Doppelschichtkondensatoren, außerdem etwa 180mal kleiner als in Lithiumionenakkus 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<sup>3</sup> Wasser. Damit speichert es eine Energie

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

Bei einem Bedarf an elektrischer Energie von  $W = 4000 \text{ kWh}^1$  pro Jahr könnte man damit einen Zweipersonenhaushalt

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

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 Jahrtausende effektive Mechanismen entwickelt, Energie

auch über immer längere Zeiträume zu speichern. 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:

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

Bei einem Gebirgsbach mit einer mittleren Fließgeschwindigkeit von z.B.  $v = 15\text{km/h}$  beträgt sie

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

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 abgebaut wurden, wie etwa in meiner Heimatstadt Stolberg. Die Kupfermeister Stolbergs, die das Zinkerz Galmei 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  $h = 300\text{m}$  und einem mittleren Wasserdurchsatz von  $V = 120\text{ l/s}$  nur eine gesamte Leistung

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

zur Verfügung, die in etwa der Leistung von vier modernen Mittelklassewagen entspricht. Das macht deutlich, wie groß der Energiehunger des modernen Menschen geworden ist.

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  $0^\circ\text{C}$  auf  $20^\circ\text{C}$ , so erhöht sich seine Energiedichte um

$$S_w = 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * 20^\circ\text{C}$$
$$= 83,6 \text{kJ} / \text{kg}.$$

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:

$$S_s = 335 \text{kJ} / \text{kg}$$
$$= 0,335 \text{MJ} / \text{kg}$$
$$S_v = 2258 \text{kJ} / \text{kg}$$
$$= 2,258 \text{MJ} / \text{kg}.$$

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.  $20^\circ\text{C}$ . 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  $V = 2000 \text{ l}$  Heizöl. Sie

enthalten eine Energie  $E = 20.000\text{kWh}$ . Um diese Energie dem Regenwasser entziehen zu können, benötigt man

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

bzw.

$$V = 172 \text{ m}^3$$

Wasser von  $20^\circ\text{C}$ . Das Becken müsste bei einer Tiefe von  $h = 2\text{m}$  eine Fläche von

$$\begin{aligned} A &= \frac{V}{h} \\ &= \frac{172 \text{ m}^3}{2 \text{ m}} \\ &= 86 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

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. Allerdings strahlt die Sonne in der Mitte Deutschlands pro Jahr eine Energie von rund  $1000\text{kWh/m}^2$  ein, auf die Oberfläche des Beckens also

$$\begin{aligned} E &= 1000 \text{ kWh/m}^2 * 86 \text{ m}^2 \\ &= 86000 \text{ kWh} \end{aligned}$$

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  $100\text{m}^2$  würde bei einer durchschnittlichen Niederschlagsmenge von  $800\text{mm}$  eine Wassermenge

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

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  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ :

$$S_w = c * \Delta T \\ = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * 20^\circ\text{C} \\ = 20\text{kJ} / \text{kg}.$$

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

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

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

$$E = 58,7 \text{kJ/m}^3 * 1 * 10^9 \text{m}^3$$

$$= 5,87 * 10^{13} \text{J}$$

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

$$P = \frac{E}{t}$$

$$= \frac{5,87 * 10^{13} \text{J}}{2 * 3600 \text{s}}$$

$$= 8,15 * 10^9 \text{W}$$

$$= 8,15 \text{GW}.$$

Das entspricht der Leistung eines Großkraftwerkes mit vier 2000MW-Blöcken.

Die Energiedichte in bewegter Luft lässt sich mit der gleichen Formel wie beim Wasser berechnen. Beträgt die mittlere Windgeschwindigkeit z.B.  $v = 70 \text{km/h}$ , so erhält man

$$S = 1/2 v^2$$

$$= 1/2 * (19,4 \text{m/s})$$

$$= 189 \text{J/kg}.$$

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  $p = 50\text{-}70 \text{bar}$ . Man speichert so in einem Volumen  $V = 0,27 \text{Mio m}^3$  eine Energie von  $E = 0,58 \text{GWh}$ . Im Pumpspeicherkraftwerk von Vianden sind es bei einem Volumen  $V = 6,84 \text{Mio m}^3$   $E = 5,22 \text{GWh}$ . Um die spezifische Energie zu erhalten, muss man mit Hilfe des allgemeinen Gasgesetzes die Masse der komprimierten Luft näherungsweise abschätzen. Es gilt nach dem allgemeinen Gasgesetz:

$$p * V = n * R * T$$

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

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  $T = 25^{\circ}\text{C}$  bzw.  $T = 298$  K beträgt, so ergibt sich für die Masse der gespeicherten Luft bei einer Molmasse der Luft von  $M = 0,0288\text{kg/mol}$ :

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

Damit erhält man eine spezifische Energie

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

Sie ist fast genauso so hoch wie die Energiedichte in einem Bleiakku 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 %<sup>1)</sup>. Pumpspeicherkraftwerke nutzen die Energie dagegen immerhin zu 80% aus.

## 4. 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](http://www.wikipedia.de), Download vom 5.11.14, 11:29