

## Vom Holzfeuer zur Solarenergie

*Die «Zähmung» des Feuers vor mindestens 600 000 Jahren war eine der wichtigsten Phasen der Menschwerdung. Das gefährliche Feuer zu beherrschen und auf kontrollierte Weise zu nutzen, zeugte von Mut und hoher Intelligenz.*

### Holz

Als Quelle von Wärme und Licht verfügte der Mensch während Hunderttausenden von Jahren lediglich über Holz; selten wurde getrockneter Tierdung verwendet. In Bezug auf mechanische Kraft war er auf den eigenen Körper angewiesen, bis er Nutztiere gezüchtet bzw. gezähmt hatte.

### Kohle

Bei Torf, Braunkohle, Steinkohle und Anthrazit handelt es sich (wie beim Holz) um Produkte der Fotosynthese, also der Sonnenenergie, die vor Jahrtausenden bis Hunderten von Jahrmillionen gespeichert wurde. Man bezeichnet sie (zusammen mit Erdöl und Erdgas) als fossile Energieträger.

Zu einer Großindustrie wurde die Kohleförderung im Rahmen der industriellen Revolution im zweiten Drittel des 18. Jahrhunderts. Mit Kohle betrieb man nunmehr Dampfmaschinen; für die Eisen- und Stahlindustrie war Kohle (nach der Verarbeitung zu Koks) zugleich Brennstoff und Reduktionsmittel. Bis nach dem Zweiten Weltkrieg war Kohle der wichtigste Rohstoff der chemischen Industrie. Das Stadtgas entstand durch Erhitzen und partielles Verbrennen von Kohle unter Zufuhr von Wasserdampf; es bestand aus Wasserstoff, Methan und Kohlenmonoxid.

Fast die gesamte, weltweit gewonnene Kohle – es sind 3,5 Milliarden Tonnen pro Jahr – wird zur Wärmeengewinnung verbrannt und zu einem großen Teil «verstromt». Die Kohlereserven sind immens und reichen beim heutigen Verbrauch bis gegen Ende des dritten Jahrtausends. Gänzlich ungelöst ist jedoch das Treibhausgas-Problem: aus jeder Tonne Kohle entstehen beim Verbrennen drei bis vier Tonnen des klimawirksamen Kohlendioxids.

### Wasserkraft

Die Chinesen, Inder, Assyrer und Ägypter der Antike verfügten bereits über unterschächtige, in ein fließendes Gewässer eingetauchte Wasserräder, die im 4. Jh. n. Chr. nach Europa gelangten. Das gut dreimal effizientere, überschächtige Wasserrad setzte sich erst im Mittelalter durch. Eine entscheidende Verbesserung brachte im 19. Jahrhundert die Francis-Turbine. Das vollständig im Wasser versenkte Laufrad wird durch einen Wasserwirbel angetrieben, den man mit der Einlaufspirale erzeugt. Damit lassen sich Fallhöhen bis 700 m nutzen.

Die für Fallhöhen bis 1800 Meter geeignete Pelton-Turbine besteht aus einem in der Luft drehenden Rad, das mit nahe beieinander befestigten Schaufeln versehen ist. Das Wasser wird über mehrere Düsen tangential den Schaufeln zugeführt. Eine dritter Turbinentyp, die sog. Kaplan-Turbine wird in Flusslauf-Kraftwerken eingesetzt, bei welchen große Wasservolumina zur Energiegewinnung verfügbar sind. Die Kaplan-Turbine gleicht einer horizontal rotierenden Schiffsschraube, die durch das von oben nach unten strömende Wasser angetrieben wird.

Durch die sog. Rohrturbine fließt das Wasser horizontal; sie ist für ganz niedrige Fallhöhen konzipiert. Die verstellbaren Laufradschaufeln sind direkt mit dem Generator verbunden, der sich in einem wasserdichten Gehäuse im strömenden Wasser befindet.

Das Pumpspeicherkraftwerk nutzt billigen Nachtstrom, um Wasser in ein hochgelegenes Reservoir zu pumpen und es in den Spitzenzeiten zu wesentlich höheren Preisen wieder zu verstromen.

Das Gezeitenkraftwerk ist das einzige Wasserkraftwerk, das ohne solare Wärmestrahlung auskommt. Es nutzt nämlich die Schwerkraftwirkung von Mond und Sonne auf die Erde, die im Mündungsgebiet von Flüssen einen Tidenhub von 10 m bis über 15 m erzeugen kann. Zur Errichtung eines solchen Kraftwerks riegelt man die Flußmündung mit einem Damm vom Meer ab. Bei Flut strömt Wasser durch Rohrturbinen flußaufwärts und wird gespeichert, bei Ebbe kann es durch dieselben Rohrturbinen wieder ins Meer abfließen.

## Elektrische Batterien

Mit der nach ihm benannten Säule, machte 1800 Alessandro Volta (1745 - 1827) eine Stromquelle verfügbar, die als Vorgängerin unserer Batterien gilt. Sie bestand aus abwechselungsweise übereinander gestapelten Plättchen aus Zink und Kupfer, zwischen je zwei dieser Plättchen befanden sich Scheiben aus Filz, die mit einer Kochsalzlösung getränkt waren.

Bei der Suche nach leistungsfähigeren Stromquellen erfand 1860 der Franzose Georges Leclanché (1839 - 1882) ein heute noch enorm verbreitetes Batteriesystem: Zink-Kohle mit Braunstein als Depolarisator. Auch die heutigen alkalischen Batterien basieren auf Leclanchés Konzept.

Gaston Planté (1834 - 1889) baute ebenfalls 1860 die erste aufladbare Batterie, d. h. einen Akkumulator aus Blei- bzw. Bleidioxidplatten, die in Schwefelsäure eintauchen. Die spezifische Energie von 25 bis 35 Wattstunden pro Kilogramm (Wh/kg) ist relativ gering. In dieser Hinsicht sind der Nickel-Cadmium-Akkumulator und der Nickel-Metallhydrid-Akkumulator mit 45 - 50 Wh/kg bzw. 50 - 70 Wh/kg deutlich überlegen. Der neue Lithiumionen-Akkumulator erreicht sogar 100 - 120 Wh/kg.

Für den Betrieb von Elektromobilen ist die spezifische Energie der besten heutigen Stromspeicher nur marginal ausreichend, denn diejenige von Benzin beträgt ca. 12 000 Wh/kg. Die zum Aufladen der Akkumulatoren benötigte elektrische Energie wird zudem weltweit zu fast zwei Dritteln in Kohle-, Öl- und Gaskraftwerken erzeugt, die große Mengen von Treibhausgasen emittieren.

## Erdöl

Erdöl entsteht aus marinem Faulschlamm, d. h. aus den Rückständen verwester Meeresorganismen unter dem Einfluß von Druck und Hitze in tiefen geologischen Formationen. Die moderne Ölindustrie begann 1857, als Edwin L. Drake in Pennsylvania ein größeres Ölvorkommen entdeckte. Erdöl wurde damals vorwiegend zu Leuchtpetrol verarbeitet.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts begann die sprunghafte Entwicklung der Automobilindustrie. Das aus Erdöl gewonnene Benzin wurde ein sehr wichtiges Produkt. Für Dieselmotoren, Gasturbinen, Flugzeugtriebwerke und Ölheizungen wurden später andersartige Erdölderivate entwickelt, nämlich Kerosin, Dieselöl und Heizöl. Aus Erdöl werden auch die Rohstoffe für sämtliche Kunststoffe und Synthefasern gewonnen.

Die weltweite jährliche Erdölförderung beträgt 3,5 Milliarden Tonnen. Mit 80 Milliarden Tonnen hat Saudiarabien die größten Ölreserven, die Reserven Rußlands und Kuwaits sind je etwa halb so groß. Die gesicherten Reserven in der Nordsee betragen rund 3 Milliarden Tonnen.

## Brennstoffzellen

Beim Untersuchen der elektrolytischen Zersetzung von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff wurde 1839 entdeckt, daß dieser Vorgang umkehrbar ist; dabei wird Strom erzeugt. In einer solchen Brennstoffzelle wird die Verbrennungsenergie von Wasserstoff mit sehr hohem Wirkungsgrad direkt in elektrische Energie umgewandelt.

Die erste praktische Anwendung der Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle war die Versorgung von Astronauten mit elektrischer Energie und Trinkwasser. In neuerer Zeit wurden erhebliche Fortschritte im Hinblick auf den Einsatz von Brennstoffzellen zum Antrieb von Elektromobilen erzielt. Probleme bereitet jedoch die Speicherung des Wasserstoffs. Zudem wird Wasserstoff aus Erdgas gewonnen; die Erzeugung von einer Tonne Wasserstoff bewirkt die Emission von etwa zwölf Tonnen Kohlendioxid.

Die Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser andererseits ist unwirtschaftlich und in Bezug auf die Umwelt bedenklich. Die dazu benötigte elektrische Energie wird nämlich fast überall auf der Welt vorwiegend durch Verbrennen von Kohle, Öl und Gas gewonnen. Als Alternative kann der synthetische Treibstoff Methanol im Fahrzeug bei hoher Temperatur zu Wasserstoff und Kohlendioxid zersetzt werden. Doch Methanol wird wie Wasserstoff aus Erdgas synthetisiert: Auch die Brennstoffzelle kommt letztlich nicht ohne fossile Energieträger aus.

## Erdgas

Erdgas kann unter der Einwirkung von hohen Drücken und Temperaturen aus Erdöl oder aus Kohle entstehen. Es besteht größtenteils aus Methan und wurde schon im 19. Jahrhundert zum Beleuchten, Heizen und Kochen verwendet; schliesslich verdrängte es das Stadtgas. Den europäischen Erdgasbedarf decken die Nordsee und Rußland über Pipelines; Nordafrika, der Mittlere Osten und Australien exportieren verflüssigtes Erdgas mit isolierten Tankern.

In Sibirien befinden sich die weltweit größten Erdgasreserven; sie betragen etwa 50 000 Milliarden Kubikmeter, während die Reserven Nordamerikas halb so groß sind und diejenigen in der Nordsee etwa ein Zehntel dieser Menge betragen.

Das sog. Biogas hat eine ähnliche Zusammensetzung wie Erdgas, enthält aber auch Kohlendioxid und Stickstoff. Es entsteht beim Vergären von tierischen und pflanzlichen Abfällen unter Ausschluß von Luftsauerstoff. Eine hohe Temperatur fördert die Gärungsprozesse: Darum sind einfache Biogas-Anlagen z. B. in Indien weit verbreitet.

## Elektrifizierung

In den 30er Jahren des 19. Jahrhunderts wurde mehr und mehr elektrische Energie für den Telegrafen und für das Galvanisieren von Messing und Stahl mit Nickel, Silber oder Gold benötigt. Den dazu erforderlichen Strom lieferten Batterien. Das Prinzip der Umwandlung von mechanischer Energie in Elektrizität war zwar seit 1831 bekannt, doch entwickelte sich die Starkstromtechnik erst um 1870 nach der Erfindung des dynamoelektrischen Prinzips mit Selbsterregung des Generators.

In den 70er Jahren errichteten Bahnhöfe, Fabriken, Geschäfte, Restaurants und Theater eigene, kleine Kraftwerke mit Dampfmaschinen oder Gasmotoren zur Speisung von Bogenlampen und Glühlampen. Das erste zentrale Kraftwerk baute Thomas Edison 1882 in New York. Um 1890 setzte sich der Wechselstrom durch, der bei hoher Spannung über große Entfernungen verlustarm transportiert und in Verbrauchernähe auf die gängigen 110 oder 220 Volt transformiert wird.

## Erdwärme

Die Erdwärme kann in vulkanischen Gebieten genutzt werden, wo heißes Magma aus dem Erdinneren bis in die Nähe der Erdoberfläche vorstößt. Sicker Wasser in die erhitzten Gesteinsschichten, so entsteht Dampf. Trockene Dampfquellen liefern unter hohem Druck stehenden, sehr heißen Dampf (über 370 °C), der direkt zum Antreiben von Turbinen dienen kann, wie z. B. in The Geysers in Nordkalifornien und in Lardarello bei Pisa in Italien.

Naßdampfquellen führen zwischen 180 °C und 370 °C heißes Wasser unter Druck, bekannt sind diejenigen in Neuseeland (Wairakei), in Chile (El Tatio) und in Island. Heißwasserquellen liefern Wasser mit einer Temperatur von 50 °C bis über 90 °C, sie dienen in Ungarn, Rußland und Island zum Heizen von Wohnungen und Gewächshäusern.

Die im Erdreich und in den Gewässern gespeicherte, von der Sonne eingestrahelte Wärme kann mittels Wärmepumpen zu Heizzwecken genutzt werden. Die Außenluft ist ebenfalls als Wärmereservoir für Wärmepumpen geeignet, doch der Wärmetauscher vereist bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Die Wärmepumpe kann etwa dreimal mehr Wärme ins Haus bringen als eine Elektroheizung mit demselben Stromverbrauch.

Im Maßstab eines Fernheiz-Kraftwerks oder einer Quartierheizanlage ist es durchaus sinnvoll, Heizöl oder Gas zu verstromen und die Abwärme für Heizzwecke zu verwerten, statt die Energieträger direkt zu verbrennen (sog. Wärme-Kraft-Koppelung).

## Kernspaltung

Mit der Erschließung der Kernenergie wurde in eine vollständig neue Welt vorgestoßen. Die aus dem Kern gewisser Atome freisetzbare Energie, übertrifft diejenige der Verbrennung um das Millionenfache.

So kann der Kern des Uranisotops U-235 beim Beschuß mit Neutronen in zwei kleinere Kerne zerfallen (sog. Kernspaltung). Die Bruchstücke fliegen mit großer Wucht auseinander, was zu einer starken Erhitzung führt. Gleichzeitig werden zwei bis drei Neutronen freigesetzt; jedes davon kann einen weiteren Urankern zur Spaltung zu bringen. Diese Vorgänge schaukeln sich zu einer explosiven Kettenreaktion hoch.

Kontrolliert man die Kettenreaktion durch Absorbieren eines Teils der freigesetzten Neutronen im Reaktor, so verläuft die Energieerzeugung langsam und stetig. Der erste Kernreaktor wurde 1942 in Chicago von Enrico Fermi (1901 - 1954) in Betrieb genommen. In der seither etablierten Praxis wird Uran (meist als Oxyd) in korrosionsfeste Rohre aus einer Zirkoniumlegierung eingeschlossen. Bündel dieser Rohre tauchen in Wasser ein, das zum Abbremsen der Neutronen, d. h. als Moderator und als Kühlmittel dient. Aus einem Kilogramm spaltbaren Urans wird etwa gleich viel Energie gewonnen, wie bei der Verbrennung von 2000 Tonnen Heizöl, ohne jegliche Emission von Kohlendioxid.

Allen Kernkraftwerken gemeinsam ist das Problem, daß ihr abgebrannter Kernbrennstoff hochradioaktiven Abfall darstellt, der mit oder ohne Wiederaufarbeitung etwa tausend Jahre lang von der Biosphäre isoliert werden muß. Obwohl man viele geologische Formationen kennt, die über Jahrmillionen stabil geblieben sind (z. B. Granit, Salz, Anhydrit, Ton) wird die Erstellung von Endlagern aus politischen Gründen verzögert. Allerdings besteht keine besondere Eile, denn die Mengen sind gering. Ein Mensch, der seinen ganzen Elektrizitätsbedarf lebenslänglich nur mit Kernenergie deckt, hinterlässt insgesamt 200 Gramm verglasten, radioaktiven Abfalls.

## Kernfusion

Die von der Sonne und den Sternen abgegebene Strahlungsenergie stammt vorwiegend von Kernfusionsreaktionen. Die wichtigste davon ist die Verschmelzung von vier Wasserstoffkernen (Protonen) zu einem Heliumkern. Dabei entsteht eine Million Mal mehr Energie als bei der chemischen Verbrennung derselben Menge Wasserstoff. Protonen können aber nur verschmelzen, wenn sie auf 100 bis 200 Millionen Grad erhitzt werden. Solche Temperaturen erreicht man ohne weiteres bei der Explosion einer konventionellen Atombombe. Aus diesem Grund wurde die Fusionsenergie 1952 erstmals in der sog. Wasserstoffbombe erschlossen.

Im Prinzip gibt es zwei Wege, um Wasserstoff (bzw. seine schweren Isotope Deuterium und Tritium) ohne nukleare Explosion auf extrem hohe Temperaturen zu erhitzen. Einmal kann ein Wasserstoffplasma durch torusförmige Magnetfelder stark komprimiert und durch den im Plasma fließenden Ströme erhitzt werden (sog. Tokamak-Verfahren). Man kann auch den Strahlungsdruck zahlreicher Laserstrahlen benutzen, um ein Kügelchen aus gefrorenen Wasserstoffisotopen zu komprimieren und zu erhitzen. Von energieliefernden Fusionsreaktoren sind wir aber noch mehrere Jahrzehnte entfernt.

## Regenerative Energiequellen

*Als regenerativ bezeichnet man Energiequellen, die sich von selbst erneuern bzw. praktisch unerschöpflich sind; sie hängen fast alle direkt oder indirekt von der Sonne ab.*

### Wind

Mit Windenergie wurden schon in prähistorischer Zeit Schiffe angetrieben. Vom Mittelalter bis in die Neuzeit dienten Windmühlen zum Mahlen von Getreide und zum Pumpen von Wasser. Heute werden in windreichen Gebieten ganze «Parks» von Windturbinen aufgestellt. Ihre Leistung reicht von einigen hundert Kilowatt bis in den Megawattbereich. Wegen der geringen Energiedichte des Windes sind sehr große Anlagen erforderlich.

### Biomasse

Der Begriff «Biomasse» umfaßt Holz und landwirtschaftliche Abfälle wie Stroh, Gebüsch, sowie rasch wachsende Pflanzen wie Chinagrass. Alle diese Materialien können in Wärmekraftwerken «kohlendioxidneutral» verbrannt werden. Es besteht auch die Möglichkeit, die darin vorhandene Cellulose enzymatisch in Zucker und Alkoholtreibstoff umzuwandeln.

### Solare Wärme

Die Sonnenstrahlung ist eine diffuse, tages- und jahreszeitlich stark schwankende Energiequelle, deren Nutzung große Landflächen und Materialmengen erfordert. In den sonnigen Ländern rund um das Mittelmeer haben sich einfache Kollektoren zur Warmwasserbereitung gut bewährt. Für die Raumheizung sind größere und besser isolierte Kollektoranlagen erforderlich. Sie müssen mit einer konventionellen Heizung ergänzt werden, es sei denn, man treibe einen besonderen Aufwand bei der Architektur und der Gebäudeisolation (passive Solarnutzung, Nullenergiehäuser).

Bei den solarthermischen Kraftwerken liefert die Sonne Wärmeenergie, mit welcher Dampf erzeugt wird, zum Antreiben einer Turbogenerators. Bei den sog. Parabolrinnen wird Öl in einem Rohr erhitzt und dient über einen Wärmetauscher zur Dampferzeugung. Turmkraftwerke bestehen aus zahlreichen Spiegeln, die ständig der Sonne nachgeführt werden. Sie reflektieren das Licht auf die Spitze eines zentral angeordneten Turms. Dort wird eine Flüssigkeit oder ein Gas als Wärmeträger erhitzt.

## Fotovoltaik

Silicium-Solarzellen wandeln Sonnenlicht mit einem Wirkungsgrad von 14 bis 15 Prozent direkt in elektrische Energie um. Sie sind aufgrund ihres hohen Preises nur dort angebracht, wo ein Netzanschluß nicht verfügbar ist.

Große Hoffnungen setzt man heute auf Dünnschichtsolarzellen, die aus polykristallinem oder amorphem Silicium auf Glas bestehen. Interessante langfristige Aussichten haben auch die Multispektralzellen, d. h. Stapel aus z. T. exotischen Halbleitermaterialien, die auf zwei verschiedene Lichtwellenlängen ansprechen.

Die aktive Schicht der sog. Injektionszellen besteht aus einem hochporösen Aggregat nanokristalliner, miteinander versinterter Titandioxidpartikeln. Sie ist mit einer Dünnschicht eines Rutheniumkomplexes versehen und mit einem organischen, iodhaltigen Elektrolyt imprägniert. An der Verwirklichung von Festkörperzellen nach diesem Prinzip wird vielerorts gearbeitet.