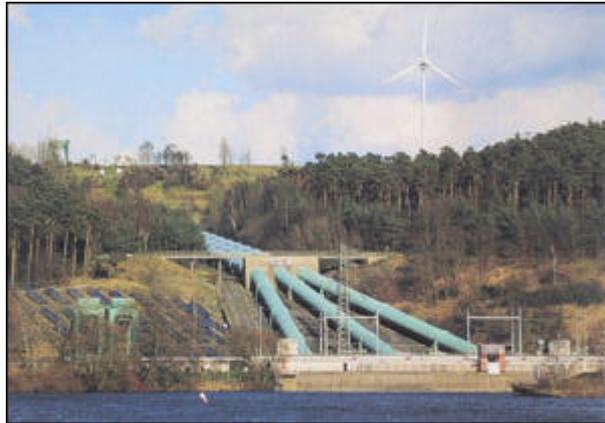


Alternative Energiequellen

Wie schon in der Einleitung zum Thema [Wasserstoff](#) angesprochen, soll Wasserstoff im Sinne einer Wasserstoffenergiewirtschaft zur Speicherung von Energie dienen. Die primäre Energieerzeugung soll dabei von den regenerativen Energiequellen Sonne, Wasser und Wind übernommen werden.



Nun ging es in den letzten Kapiteln um die Möglichkeiten, die eine Wasserstoff-Energiewirtschaft bietet, um die technischen Umsetzungen der Energieerzeugung mit Brennstoffzellen und vor allem die aktuellen Projekte in diesem Bereich.

Das Kapitel Alternativen soll jetzt abschließend noch einmal die Energiequellen Sonne, Wasser und Wind näher vorstellen, damit Sie sich einen Gesamteindruck machen können. Die einzelnen Kraftwerksarten vom Sonnenkollektor über die verschiedenen Wasserkraftwerke bis hin zum Windrad werden vorgestellt und ihre Funktionsweise verständlich erklärt.

Hinweise zu diesem Dokument:

2000-2002 © dieBrennstoffzelle.de

Das Verwenden von Auszügen aus diesem Text ist mit Quellenangabe gestattet, wir bitten in diesem Fall jedoch um eine kurze Mitteilung, wann, wo und in welcher Form zitiert worden ist. (Email: info@dieBrennstoffzelle.de)

Als Quellenangabe setzen Sie bitte einen Link auf die URL
<http://www.dieBrennstoffzelle.de>

Unsere Sonne

Die Sonne. Das Leben auf der Erde ist ohne sie nicht möglich. Sie spendet Licht, erwärmt den Boden, die Meere und die Atmosphäre, steuert Wetter und Klima. Die Sonne liefert Energie für das Pflanzenwachstum und damit für alles Leben.

Die Bedeutung der Sonne für das Leben wurde von Anbeginn der Menschheitsgeschichte hoch eingeschätzt. Man beobachtet ihren täglichen Gang und alle besonderen Vorkommnisse wie z.B. Sonnenwenden. Die erste dokumentierte Sonnenfinsternis registrierte man 753 v. Chr. in Babylonien.

Joseph von Fraunhofer untersuchte 1814 die Sonnenstrahlung mit Hilfe des Spektroskops. Zwar erforschte schon Isaak Newton 1666 die Sonnenstrahlen, doch konnten erst durch Fraunhofers Erkenntnisse ansatzweise wissenschaftliche Erklärungen der Sonnenatmosphäre angefertigt werden.

Die sichtbare Sonnenoberfläche nennt man Photosphäre. Auf ihr kann man eine körnige Struktur beobachten, die sogenannte Granulation, bei der es sich sozusagen um die Enden der heißen Materieströme vom Sonneninneren handelt. Über der Photosphäre liegt eine weitere, sehr dünne Schicht, die Chromosphäre. Sie erhielt ihren Namen wegen der rötlichen Färbung. Darüber befindet sich wiederum die sehr heiße, aber ebenso dünne Sonnenatmosphäre, die Korona. Hier herrschen Temperaturen von einigen Millionen Grad. Man kann sie jedoch meist nicht sehen, da sie von der Photosphäre überstrahlt wird. In der Nähe des Zentrums herrschen Temperaturen von ca. 16 Millionen Kelvin.

Die von der Sonne ausgehende Strahlung ist nahezu konstant. Sie verändert sich im Laufe einiger Tage nur um wenige Zehntel Prozent. Die Energie der Sonne kommt aus dem Inneren dieses Himmelskörpers, der, wie auch die meisten anderen Sterne, zum größten Teil aus Wasserstoff (71% H₂, 27% Helium, 2% schwere Metalle) besteht.

Die Dichte im Sonnenzentrum ist ca. 150-mal größer als die von Wasser. Die Protonen der Wasserstoff-Atome reagieren miteinander durch Kernfusion. Am Ende einer Reaktionskette steht die Reaktion von vier H₂-Atome zu einem Helium-Atom. In jeder Sekunde reagieren so 650 Millionen Wasserstoffatome zu Helium. Die Massendifferenz äußert sich in frei werdender Gammastrahlung.

Die Gammastrahlung wird in der Strahlungszone durch zahlreiche Teilchen absorbiert und emittiert, d.h. aufgenommen und wieder ausgesandt. Dabei werden aus der hochenergetischen Gammastrahlung auch andere elektromagnetische Wellen wie z.B. sichtbares Licht, Infrarot-, Röntgen- oder Ultraviolettstrahlen. Bis die Strahlen auf diesem umständlichen Weg die Strahlungszone durchquert haben, vergehen etwa 10 Millionen Jahre.

Die Strahlung gelangt in die Konvektionszone. Hier wird bei niedrigerer Temperatur und Druck Gas erwärmt, dass dann in Gasblasen an die Oberfläche steigt. So gelangt die Energie an die Oberfläche. Wenn die Energie dann an der Oberfläche ist, wird sie in Form der verschiedenen Strahlungen mit Lichtgeschwindigkeit in den Weltraum abgegeben. Nach etwa 8 Minuten ist das Licht dann auf der Erde angekommen.

Solarthermie

Die Sonnenstrahlen stehen uns zwar kostenlos zur Verfügung, doch sind die verschiedenen Techniken, sie in Elektrizität umzuwandeln, sehr aufwendig. Man unterscheidet zwischen Solarthermie und Photovoltaik.

In solarthermischen Kraftwerken wird die Sonneneinstrahlung in Wärmeenergie umgewandelt, die in Form von Wasserdampf oder aufsteigender erwärmter Luft Turbinen antreibt.

Die Solarthermie teilt sich in verschiedene Konzepte:

- Turmkraftwerke
- Parabolrinnen-Sonnekraftwerke
- Aufwindkraftwerke

Turmkraftwerke

Auf einem großen Feld stehen um einen zentralen Receiver-Turm verteilt hunderte, meist gekrümmte Spiegel, sogenannte Heliostaten, welche die Sonnenstrahlen zur Turmspitze reflektieren. Die Heliostaten sind beweglich angebracht, so dass sie zur Sonne hin ausgerichtet werden können.

In der Turmspitze sitzt der sog. Receiver. In diesem Receiver werden die Sonnenstrahlen von einem Trägermedium absorbiert und in ein Wärmekraftwerk weitergeleitet. Flüssiges Salz wird mit einer Temperatur von ca. 290°C in die Turmspitze gepumpt, wo es auf ca. 565°C erhitzt wird. Über Wärmetauscher wird seine Wärmeenergie dann an Wasser weitergeleitet: Wasserdampf entsteht. Dieser Wasserdampf treibt eine Turbine an, die wiederum über einen Generator Strom erzeugt. Ein solches Turmkraftwerk erreicht Leistungsbereiche von 30 bis 400 MWe.

Das "Solar One" war in der Zeit von 1982-1988 als weltgrößtes Turmkraftwerk im Einsatz. Das Heliostaten-Feld bestand aus 1818 Heliostaten mit einer jeweiligen Spiegelfläche von 39,3m². Es demonstrierte die Durchführbarkeit von Turmkraftwerken und zeigte, dass es möglich war, in der Sommerzeit 10 MWe Energie pro Tag zu liefern.

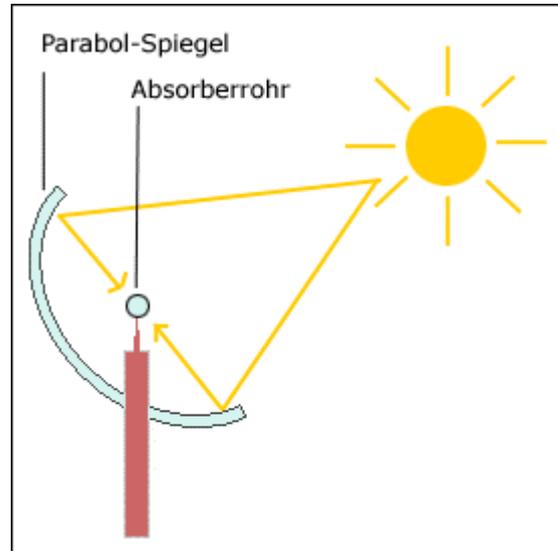
An der Weiterentwicklung des "Solar One" zum "Solar Two", der einen besseren und größeren Speicher besaß, zeigte sich jedoch die Unwirtschaftlichkeit eines 10MW-Turms. Berechnungen zufolge lohnt sich der Bau eines Solarturmkraftwerks erst ab einer Leistung von 30MW.

Parabolrinnen-Solarkraftwerke

Parabolrinnen-Solarkraftwerke stellen heute die kostengünstigste und effizienteste Technologie dar, um aus Sonnenenergie Strom zu erzeugen. Sie funktionieren ähnlich wie konventionelle Dampfkraftwerke, mit dem Unterschied, dass hier nicht fossile Energieträger verbrannt werden, sondern letztlich Sonnenenergie die Dampfturbinen antreibt.

Ein Solarfeld besteht aus mehreren parallel angeordneten Reihen von Kollektoren. Diese Kollektorreihen haben jeweils eine Länge von ca. 100 Metern und sind wiederum unterteilt in kleine Einzelkollektoren.

Die Spiegel der Einzelkollektoren haben einen parabelförmigen Querschnitt, ähnlich einer Regenrinne. Im Brennpunkt des Spiegels verläuft ein Absorberrohr, das von einem hitzebeständigen, synthetischen Öl durchlaufen wird. Das Sonnenlicht wird 80-fach konzentriert auf dieses Rohr reflektiert. Das Öl wird dadurch auf bis zu 400°C erhitzt.



Die Energie wird über das Trägermedium in die Kraftwerkszentrale transportiert, wo sie über einen Wärmetauscher an Wasser abgegeben wird. Der entstehende Wasserdampf treibt dann, wie schon beim Turmkraftwerk erklärt, einen Generator an. Bereits gebaute konventionelle Dampfkraftwerke könnten somit einfach auf Solarstrom um- bzw. aufgerüstet werden.

Anlagen dieser Bauweise kommen auf einen Wirkungsgrad von ca. 20% im Sommer bzw. 14% im Jahresmittel. Im Vergleich zu anderen, noch folgenden, Technologien, die "wirkungsvollste".

Aufwindkraftwerke

Auch Aufwindkraftwerke kann man zu solarthermischen Kraftwerken zählen. Das Funktionsprinzip ist bestechend einfach. Wie der Name schon verrät, macht man sich hier das Naturgesetz zu Nutzen, dass warme Luft nach oben steigt. Das Aufwindkraftwerk kombiniert dabei seit der Antike bekannte physikalische Grundsetze: den Schornsteineffekt, den Gewächshaus- bzw. Treibhauseffekt und das Windrad.

Unter einem flachen, kreisförmigen Glasdach, das an den Seiten offen ist, wird die Luft durch einfallende Sonnenstrahlen wie in einem Glashaus erwärmt. In der Mitte des leicht ansteigenden Glasdaches befindet sich ein hoher Kamin, durch den die warme Luft entweicht. So entsteht ein kontinuierlicher Aufwind, der druckgestufte Turbinen antreibt.

Ein derartiger Sonnenkollektor kann im Jahresmittel bis zu 45% der eingefallenden Sonneneinstrahlung in Wärmeenergie umsetzen.

Um Aufwindkraftwerke hoher Leistung zu bauen, sind nicht nur ausgedehnte Glas- bzw. Plastikdächer von einigen Kilometern Durchmesser nötig, sondern auch sehr hohe Kamine. Für ein Kraftwerk mit beispielsweise 5MW Leistung benötigt man ein Kollektordach von 1,1km Durchmesser und einen Kamin von 445m Höhe und 27m Durchmesser. Wünscht man mehr Leistung, beispielsweise 200MW, liegen die Größen schon in nahezu unvorstellbaren Dimensionen: 5000m Durchmesser für das Dach, 1000m Höhe und 150m Durchmesser für den Kamin. Zum Vergleich: Die höchsten Gebäude der Welt, die Petronas Towers in Kuala Lumpur, sind 451m hoch.

Insbesondere in Drittländern bieten sich mit dieser einfachen und wenig störanfälligen Technologie ungeahnte Chancen auf dem Energiemarkt.

Mit Unterstützung des Bundesforschungsministeriums entstand Anfang der achtziger Jahre in einem Wüstengebiet bei Manzanares, Spanien, eine Versuchsanlage mit einer verhältnismäßig geringen Leistung von 50kW. Der Kamin aus Blech hatte einen Durchmesser von 10m und eine Höhe von 195m. Das 45.000m² große Kollektordach (mittlerer Radius 122m) wurde in verschiedenen Bereichen aus unterschiedlichen Materialien (Folien und Einfachglas) gebaut, um das ideale und optimalste auszuwählen.

Die Anlage war mit 280 Sensoren ausgestattet, die im Sekundenrhythmus Daten erfassten und sobald die Luftgeschwindigkeit im Kamin über 2,5m/s stieg, wurden die Turbinen eingeschaltet. Im Kamin wurden Luftgeschwindigkeiten von 9m/s bei eingeschalteten, bis zu 15m/s bei abgeschalteten Turbinen gemessen.

Das Aufwindkraftwerk produzierte jahrelang Energie und bewies damit die Realisierbarkeit dieser Technologie. Im Frühjahr 1989 stürzte der Kamin bei einem Orkan zusammen und wurde nicht wieder aufgebaut. Doch die Anlage hatte ihren Zweck erfüllt.

Bisher wurden keine weiteren Aufwindkraftwerke gebaut, doch das Ingenieurbüro "Schlach, Bergermann und Partner" aus Stuttgart plant momentan den Bau einer Anlage in der Wüste Australiens mit einem Durchmesser von 5km.

Photovoltaik

Der Bereich der Photovoltaik umfasst die direkte Gewinnung von Elektrizität aus Sonnenlicht mit Hilfe von Solarzellen. Dies ist die gleichzeitig teuerste aber auch eleganteste Variante, aus Sonnenenergie Strom zu erzeugen.

Die Solarzelle ist die Grundeinheit eines Solarstromgenerators. Sie ist ca. 10x10cm² groß und liefert Strom von einigen Ampere bei einer Spannung von ca. 0,5V. In der Regel werden mehrere Solarzellen zu Solarmodulen zusammengeschlossen und in einem witterungsfesten Rahmen, der alle Anschlüsse usw. enthält, angeboten. Die Anforderungen an ein Gehäuse sind hoch: Temperaturen von -40°C bis +80°C, Regen, Hagel, Wind, Kondenswasser...

Eine netzgekoppelte Solaranlage besteht meist aus mehreren Modulen, die mit einem Wechselrichter gekoppelt sind, der den erzeugten Strom in das öffentliche Netz einspeist. Der Besitzer einer Photovoltaik-Anlage ist somit Einspeiser für das öffentliche Netz und bekommt den Strom nach dem "Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien" (EEG) vergütet. Er bezieht den Strom den er selber verbraucht auch aus dem öffentlichen Netz, wobei jedoch eingespeister und verbrauchter Strom gegeneinander aufgerechnet werden.

Inselanlagen kommen dort zum Einsatz, wo kein öffentliches Stromnetz zur Verfügung steht oder nur mit erheblichen Aufwand zu errichten ist. Diese sogenannten netzautarken Solaranlagen sind mit Batterien zur Speicherung und einem Laderegler ausgestattet, was die Installationskosten erhöht. In Kanada und den skandinavischen Ländern kommen solche Anlagen zum Einsatz, um z.B. entlegene Ferienwohnungen mit Strom zu versorgen. In Deutschland sieht man Inselanlagen z.B. an Parkautomaten und an Stauwarnern.

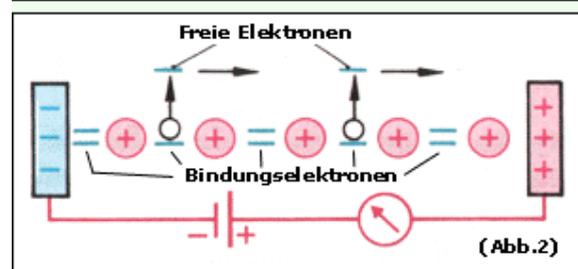
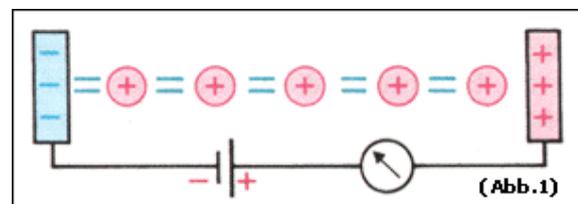
Funktion der Solarzelle

Um die Funktion einer Solarzelle richtig erklären zu können, müssen wir an dieser Stelle ein wenig ausholen. Solarzellen werden aus Halbleitern hergestellt. Halbleiter sind Stoffe, deren Leitfähigkeit durch Energiezufuhr in Form von Wärme oder Licht erhöht werden kann, z.B. Silizium (Si), Germanium (Ge) oder Cadmiumsulfid (CdSO₃). Doch wie kommt es dazu, dass ein Stoff an Leitfähigkeit gewinnt, wenn man ihm Energie zuführt?

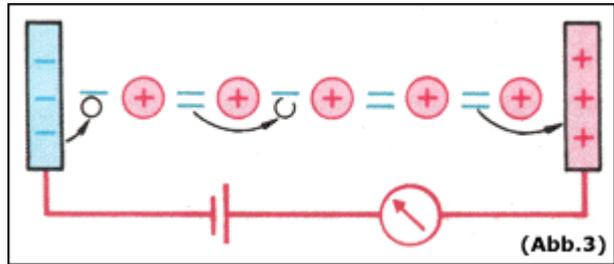
Dies lässt sich am Beispiel des Siliziums gut erklären. Im Kristallgitter dieses Elements hat jedes Atom vier unmittelbare Nachbaratome. In jedem der vier Nachbarbereiche hält sich eines der vier Außenelektronen des Si-Atoms auf. Da jedes der Nachbaratome ebenso ein Außenatom für diesen Nachbarbereich liefert, befinden sich dort jeweils zwei Elektronen. Der Kristall wird durch die Anziehungskräfte der Elektronen im Nachbarbereich und dem Atomrumpf zusammengehalten.

Bei sehr tiefen Temperaturen werden die Elektronen zwischen den Rumpfen festgehalten (Abb.1). Erwärmt man den Kristall, so beginnen die Elektronen zu schwingen und werden sozusagen aus ihren Bindungen "herausgeschüttelt". Nach Anlegen einer Spannung werden die "freigeschüttelten" Elektronen zum Pluspol gezogen und am Minuspol wieder durch neue Elektronen aus dem Stromkreis ersetzt. Die Elektronen bewegen sich natürlich auch zwischen den Atomrümpfen, doch in Abbildung 2 wurden sie symbolisch außerhalb der Kette gezeichnet. Die entstandene Lücke wurde durch eine Kreis gekennzeichnet.

Um die Leitfähigkeit eines Halbleiters zu verbessern, erhöht man die Anzahl der Elektronen. Hierzu ersetzt man z.B. jedes millionste Siliziumatom im Kristallgitter durch ein Arsenatom. Diesen Vorgang nennt man Dotieren. Da Arsen fünf Valenzelektronen besitzt, kann sich ein Elektron an der Kristallbindung nicht beteiligen. Es bleibt als freies Elektron und erhöht so die Leitfähigkeit. Da dieses Dotieren auf der Zugabe von negativ geladenen Elektronen beruht, spricht man von n-Halbleitern.

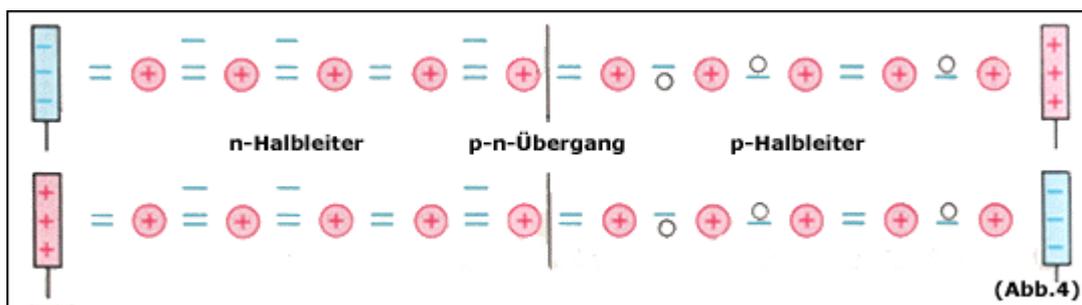


Dotiert man Silizium mit Atomen, die ein Valenzelektronen weniger haben, z.B. Aluminium, nennt man dies positiv dotieren. Es entsteht ein p-Halbleiter. Da bei jedem Aluminium-Atom ein Elektron in der Bindungskette fehlt, entstehen viele Löcher, die nicht aufgefüllt werden können. Bei angelegter Spannung können Bindungselektronen also von links in ein rechts von ihrem Gitterplatz liegendes Loch "hüpfen" (Abb.3). An ihrem alten Platz entsteht dafür ein neues Loch. Auch Elektronen aus dem Minuspol können hierbei Löcher auffüllen. Da der Kristall aber elektrisch neutral bleiben muss, müssen gleich viele Elektronen zum Pluspol abwandern.



Grenzen ein n- und ein p-Halbleiter ohne Störung der Gitterstruktur aneinander, so entsteht an dieser Stelle eine sogenannte Sperrschicht. Je nach Polung lässt diese Schicht Elektronen durch oder sperrt den Elektronenfluss. Man nennt dies eine Halbleiterdiode.

Bei Durchlasspolung (Abb.4, oben), also n-Halbleiter am Minuspol und p-Halbleiter am Pluspol, werden die Elektronen vom n-Halbleiter über die Sperrschicht hinweg zum Pluspol gezogen. Am Minuspol werden neue Elektronen dem n-Halbleiter zugeführt. Bei Sperrpolung (Abb.4, unten) werden die freien Elektronen durch eine Kraft nach links gezogen. Doch es kommen keine Elektronen über die Sperrschicht, da es rechts fast keine freien Elektronen gibt und links keine Löcher zur Verfügung stehen.



Eine Solarzelle ist genauso aufgebaut, wie die eben beschriebene Diode. Die n-dotierte Seite ist der Sonne zugewandt. Beginnen wir aber beim Zustand vor der Belichtung.

Aufgrund ihrer Eigenbewegung überschreiten einige Elektronen schon bei der Herstellung des p-n-Übergangs die Grenzschicht. Ebenso rücken Bindungselektronen in die Löcher des p-Halbleiters. Der n-Halbleiter verliert so einen kleinen Teil seiner frei beweglichen Elektronen. In der unmittelbaren Nähe der Grenzschicht überwiegt bei ihm die positive Ladung der Löcher. Der p-Halbleiter lädt sich in der Nähe der Grenzschicht bedingt durch die hinzugekommenen Elektronen leicht negativ auf. Es bildet sich ein Gleichgewichtszustand, der verhindert, dass weitere Elektronen über die Grenzschicht springen.

Wird die Grenzschicht nun belichtet, werden die Elektronen auf ein höheres energetisches Niveau gehoben und es entstehen freie Elektronen und Löcher. Die positiven Ladungen am Rande des n-Halbleiters ziehen freie Elektronen nach links. Das Gleichgewicht wird gestört. Der n-Halbleiter hat Elektronen "zurück gewonnen". Diese fließen über den äußeren Stromkreis zurück zum p-Halbleiter. Bei längerer Belichtung entsteht so ein kontinuierlicher Stromfluss, den man als Nutzstrom abgreifen kann.

Bei Solarzellen wird zwischen drei Typen unterschieden: monokristalline, polykristalline und amorphe Solarzellen.

Bei der Herstellung von monokristallinen Silizium-Zellen wird geschmolzenes, hochreines Silizium in Stabform gezogen und danach in Scheiben geschnitten. Da die Herstellung sehr aufwendig ist, ist dies der teuerste, aber auch wirkungsvollste (14-17%) Solarzellen-Typ. Monokristalline Solarmodule werden bevorzugt in mittleren und großen professionellen Solarstromanlagen eingesetzt, wo es auf hohen Wirkungsgrad und lange Haltbarkeit besonders ankommt.

Polykristalline Solarzellen werden in Blöcke gegossen und danach in Scheiben geschnitten. Durch die unterschiedlich großen Kristalle, die sich beim Erstarren bilden, treten an den Grenzen Defekte auf, wodurch der Wirkungsgrad nur zwischen 13-15% liegt. Da sich die Herstellung nur wenig von der der monokristallinen Solarzellen unterscheidet (nur das aufwendige Kristallziehen entfällt), sind die Anwendungsbereiche ähnlich gelagert.

Amorphe Solarzellen findet man in kleinen Anwendungen, wie z.B. Uhren oder Taschenrechnern. Das Silizium wird einfach in einer Schicht von ca. $1\mu\text{m}$ auf eine Glasplatte aufgedampft.

Wasserkraft

Knapp 97,6% des gesamten Wassers der Erde findet man in Ozeanen, wovon jede Sekunde 14 Mio. m³ verdunsten. Dieses Wasser kommt als Regen wieder auf die Erde zurück. Wenn diese Niederschläge oberhalb der Meereshöhe fallen, entsteht ein zusätzliches Potential an Wasserkraft. Europa liegt ca. 300m über Null, Amerika sogar 700m. Daraus ergeben sich Energiepotentiale, die man zur Energiegewinnung nutzen kann.

Geographisch sind die Wasserkräfte jedoch sehr ungleichmäßig verteilt: Ca. 2/3 des nutzbaren Potentials findet man in Ländern der dritten Welt. So findet sich in Brasilien das größte Wasserkraftwerk der Welt mit einer Leistung von 12.600 MW! Auf Platz 13 der "Top25" der leistungsstärksten Wasserkraftwerke steht das Kraftwerk Kuybischew an der Wolga mit 2563 MW.

In Europa wird das Potential der Wasserkraft erst zu ca. einem Drittel ausgenutzt. Norwegen liegt dabei an der Spitze: 99% des Stroms werden aus Wasserkraft gewonnen. Dahinter liegen Island mit 94 %, Österreich mit 72 %, die Schweiz mit 58 %, Frankreich mit 16 %, Deutschland mit 3,5 % usw.

Deutschlands schlechte Position läßt sich auf die Topographie zurückführen. Im Norden und Osten Deutschlands gibt es sehr wenig Möglichkeiten, Wasserkräfte zu nutzen, da Flüsse wie die Elbe, die Oder und Saale ein sehr geringes Gefälle haben. Dem entsprechend finden sich die deutschen Kraftwerke an Rhein, Main, Donau, u.a.

Vom Wasserrad zur Turbine

Vom Wasserrad zur Turbine war es ein weiter Weg. Schon vor mehr als 5000 Jahren wurden in Mesopotamien Wasserräder zum Schöpfen eingesetzt. Die Römer nutzten sie später als Antrieb für Sägewerke und Mühlen.

Dies zeigt, dass die Wasserkraft schon seit Jahrhunderten genutzt wird, um die Lage- bzw. Bewegungsenergie des Wassers auszunutzen, um Arbeit zu verrichten. Man unterscheidet dabei zwischen dem Aktions- und dem Reaktionsprinzip. Das Aktionsprinzip nutzt die Bewegungsenergie, während das Reaktionsprinzip nur die Lageenergie ausnutzt.

Es gab früher verschiedene Arten von Wasserrädern. Beim Stoßrad tauchen die Schaufeln horizontal in das Wasser ein und nutzen so die Bewegungsenergie des Wassers zum Antrieb. Aus dem Stoßrad entstand das "unterschlächlige" Wasserrad, das durch eine leichte Höhendifferenz zusätzlich zur Bewegungsenergie den Druck des Wassers beim Eintritt ausnutzt. Dagegen nutzt das "oberschlächtige" Wasserrad hauptsächlich die Lageenergie. Dabei fließt das Wasser von oben auf die muldenförmigen Schaufeln des Rades und treibt es durch das Gewicht des Wassers an.

Unser Bild zeigt ein "oberschlächtiges" Wasserrad, das am Ausfluß eines Klärwerks über einen Generator ca. 14 kW Leistung erbringt. Es gibt in Deutschland noch heute schätzungsweise 7000 sogenannte Kleinwasser-Kraftwerke, die meist der Eigenversorgung der Betreiber dienen.

Aus den früheren Wasserrädern entstanden später die heute eingesetzten Turbinen.

Turbinenformen

Für unterschiedliche Leistungsbereiche, Fallhöhen und Drücke kommen verschiedene Turbinen zum Einsatz. An dieser Stelle sollen die drei häufigsten Bauformen kurz vorgestellt werden.

Francis-Turbine

Francis-Turbinen sind am weitesten verbreitet, da sie am universellsten einzusetzen sind. 1849 konstruierte der anglo-amerikanische Ingenieur James B. Francis diesen Turbinentyp, der einen Wirkungsgrad von 90% erreichen kann. Die heutigen Francis-Laufräder erreichen ein Gußgewicht von ca. 150t und Leistungen von über 700MW.

Das Wasser gelangt durch ein schneckenförmiges Rohr, das Spirale genannt wird, in die Turbine. Um die Turbinenleistung zu regulieren, können die Schaufeln des Leitapparats verstellt werden. Durch ein Saugrohr an der Verlängerung der Turbinenachse wird das abgearbeitete Wasser abgeleitet.

Die Francis-Turbine hat den Vorteil, das sie auch als Pumpe eingesetzt werden kann. Diese Eigenschaft macht man sich in Pumpspeicherkraftwerken zu nutzen, wo man eine Francis-Turbine und den Generator zur sogenannten Pumpturbine zusammengeschlossen hat, die sowohl pumpen als auch Strom erzeugen kann.

Kaplan-Turbine

Die Kaplan-Turbine wurde Anfang der 20er Jahre vom österreichischen Ingenieur Viktor Kaplan aus der Francis-Turbine heraus entwickelt. Sie ist ideal für geringe Wasserdrücke bei großen Durchflusssmengen. Das Laufrad gleicht hier einer Schiffsschraube deren Schaufeln verstellbar sind. Es wird von Wasser umströmt und treibt einen Generator an. Das Leitwerk sorgt dafür, dass das Wasser parallel zur Welle auf die Schaufeln trifft. Die Kaplan-Turbine wird meistens vertikal eingebaut, so dass das Wasser von oben nach unten durchströmt. Sie erreicht einen Wirkungsgrad von 80-95%.

Aus der Kaplan-Turbine wurde die Rohrturbine entwickelt, die horizontal eingebaut werden kann und somit platzsparender unterzubringen ist. Der Generator befindet sich in einem wasserdichten Gehäuse, am verlängerten Ende der Turbinenwelle.

Pelton-Turbine

Im Jahr 1880 konstruierte der amerikanische Ingenieur Lester Pelton eine Freistrahlturbine, die später als Pelton-Turbine bekannt wurde. Seine "Wasserrad", das ausschließlich nach dem Aktionsprinzip arbeitet, also nur die Lageenergie des Wassers ausnutzt, erinnert stark an das Stoßrad.

Jedes der bis zu 40 Schaufelblätter teilt sich in zwei Halbschaukeln, sogenannte Becher, in deren Mitte ein Wasserstrahl aus einer oder mehreren Düsen tangential auftrifft. Bei einer Fallhöhe von 1000 Metern schießt der Strahl mit einer Geschwindigkeit von fast 500km/h auf die Schaufeln. Die Pelton-Turbine ist typisch für Kraftwerke im Hochgebirge.

Laufwasserkraftwerke

Laufwasserkraftwerke gehören zu den Niederdruckkraftwerken. Auf die 585 deutschen Laufwasserkraftwerke entfällt der größte Teil der deutschen Stromerzeugung aus Wasserkraft. Diese Kraftwerke haben zusammen eine Leistung von 2600MW. Zum Vergleich: Diese Leistung entspricht der von vier Kohlekraftwerken.

Laufwasserkraftwerke nutzen die Kraft des fließenden Wassers in Flüssen und dies mit einem Wirkungsgrad von fast 94%. Der Fluß wird mittels einer Wehranlage aufgestaut und durch Turbinen in den unteren Flußlauf geleitet.

In den meisten Kraftwerken dieser Bauart kommen vertikalachsige Kaplan-Turbinen zum Einsatz, in neueren auch die horizontale Version, die Rohrturbine.

Die Laufwasserkraftwerke dienen zur Deckung der Grundlast, da eine Durchflußregulierung meist nicht üblich ist, und Verschwendung von Energie bedeutete. Somit laufen die Kraftwerke 24 Stunden am Tag. Bei einigen Kraftwerken besteht aber die Möglichkeit, bei geringem Energiebedarf Wasser aufzustauen, um es als Energiereserve aufzusparen.

Vor allem an Rhein, Donau, Iller, Lech, Isar, Inn und Mosel findet man in Deutschland große Laufwasserkraftwerke. Ihr Leistungsbereich geht von 85MW bis zu 130MW an den Grenzkraftwerken des Rheins und der Donau.

Speicherkraftwerke

Speicherkraftwerke nutzen die Wasserkraft, die sich durch den Höhenunterschied zwischen einem hoch gelegenen Staubecken und einem tiefer gelegenen Krafthaus ergibt.

Ein Stausee, der durch Aufstauen des Wassers durch eine Staumauer oder einen Staudamm entstanden ist, speichert das Wasser zu Zeiten großen Zuflusses, wie z.B. der Schneeschmelze. Durch ein Beileitungssystem werden Stauseen häufig zusätzlich zur natürlichen Zuleitung mit Wasser aus anderen Gewässern versorgt.

Durch einen Druckstollen und einen Druckschacht wird das tiefer gelegene Krafthaus mit Wasser versorgt und produziert damit Strom. Diese sogenannten Triebwege können unterirdisch verlaufen oder durch offenliegende Rohrleitungen. Das Krafthaus kann ein freistehendes Gebäude, aber auch eine in den Fels eingegrabene Höhle, auch Kaverne genannt, sein. Als Generator-Antrieb kommen meist Francis- oder Pelton-Turbinen zum Einsatz.

In Deutschland gibt es 59 Speicherkraftwerke mit einer installierten Leistung von insgesamt 240MW. Sie sind nicht für den Dauerbetrieb ausgelegt, sondern dienen vielmehr dem Einsatz bei Lastspitzen.

Pumpspeicherkraftwerke

Pumpspeicherkraftwerke arbeiten bei der Stromerzeugung genau wie Speicherkraftwerke. Wasser aus einem höher gelagerten Speichersee treibt im Maschinenhaus Turbinen an, die über einen Generator Strom erzeugen. Das Wasser gelangt dann in den unteren Speichersee, meist ein natürliches Gewässer.

Das Oberbecken hat jedoch meist keine natürlichen Zuflüsse. Das Wasser kommt aus dem unteren Becken und wurde mit elektrischer Energie hinauf gepumpt. Da das Hinaufpumpen zwangsläufig mehr Energie kostet, als später erzeugt werden kann, scheint dies unsinnig. Aus technischer und wirtschaftlicher Sicht ist die zweimalige Umwandlung von elektrischer zu potenzieller Energie und wieder zurück jedoch sinnvoll.

Wenn der Strombedarf gering ist, z.B. nachts, werden nicht genutzte Kapazitäten aus der Grundlast genutzt, um Wasser kostengünstig in das Oberbecken zu pumpen. In Spitzenlastzeiten, mittags oder abends, treibt das Wasser aus dem Oberbecken dann die Turbinen an, um die vorher zugeführte Energie wieder in elektrische Energie umzuwandeln.

Pumpspeicherkraftwerke sind also zur Deckung der Spitzenlast unentbehrlich. Auch finanziell lohnt es sich, da mit diesem Kraftwerkstyp billiger Nachtstrom zu teurerem Tagstrom verwandelt werden kann.

In der Regel haben Pumpspeicherkraftwerke einen Wirkungsgrad von rund 75%, d.h. um 1kWh Strom zu erzeugen, müssen vorher 1,3kWh aufgebracht werden. Pumpspeicherkraftwerke erreichen eine Leistung von bis zu 1100MW.

Die größten Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland liegen im Schwarzwald, in Hessen, Niedersachsen und in den neuen Bundesländern.

Gezeitenkraftwerke

Auch die Wasserkraft, die in den Gezeiten verborgen ist, kann man zur Energiegewinnung nutzen. Voraussetzung hierfür ist allerdings ein ausreichender Tidenhub, wie er z.B. am Mündungstrichter der Rance bei St. Malo in Frankreich zur Verfügung steht. Der Unterschied zwischen niedrigstem und höchstem Wasserstand beträgt hier 12-13 Metern.

Bereits in den 60er Jahren sperrte man den Mündungstrichter mit einem Damm ab und errichtete ein Gezeitenkraftwerk mit einer Leistung von 600 Millionen kWh. Da sich der Gezeitenrhythmus täglich um 50 Minuten verschiebt, verschiebt sich damit auch der Zeitpunkt der vollen Leistungsfähigkeit eines solchen Kraftwerks.

Bei Flut läuft das Staubecken des Kraftwerks voll und die Turbine wird vom einströmenden Wasser angetrieben. Wenn das Wasser wieder rückläufig ist (Ebbe), dann wird das gestaute Wasser wieder abgelassen und die Turbinen werden erneut angetrieben.

Der Itaipu-Damm in Brasilien

Der Itaipu-Damm an der Grenze zwischen Brasilien und Paraguay ist das weltweit größte Wasserkraftwerk. Mit einer Leistung von 12600MW deckt es 1995 78% des Strombedarfs Paraguays und 25% des Bedarfs in Brasilien.

Sieben Jahre, von 1975 bis 1982, waren 30000 Arbeiter mit dem Bau des 20-Billionen-US-Dollar-Kraftwerks beschäftigt. Der Materialbedarf war dementsprechend hoch: Stahl von 380 Eiffeltürmen und Beton von 15 Euro-Tunnel. Im fast 8 Kilometer langen und 196 Meter hohen Damm wurden 18 Turbinen eingebaut. Das Staubecken faßt ca. 29 Millionen Kubikmeter Wasser bei einer Wasserfläche von 1350km².

Wind entsteht

Wie schon an anderer Stelle erwähnt, ist die Lufthülle um die Erde ein Gemisch aus verschiedenen Gasen, vor allem Stickstoff (78%) und Sauerstoff (21%). Die durchschnittliche Dichte der Luft liegt bei ca. 1,2kg/m³. Der Luftdruck auf Meereshöhe liegt bei Durchschnittlich 1013hPa (ca. 1013 Millibar). Er nimmt alle 5000 Meter um ca. die Hälfte ab. Ist Luftmasse in Bewegung, nennt man dies Luftströmung oder auch Wind. Wind ist damit Träger kinetischer Energie.

Einfallendes Sonnenlicht erwärmt die Luft. Wie stark die Luftmassen erwärmt werden, hängt davon ab, in welchem Winkel das Sonnenlicht eintrifft. Je senkrechter das Licht auf die Erde trifft, desto stärker erwärmt sich die Luft. Am Äquator wird die Luft damit stärker erwärmt als in unseren Gefilden. An den Polen ist es dagegen kühler, da hier die Sonnenstrahlen über eine größere Fläche verteilt werden. Allgemein kann man sagen, dass sich die Luft bei Sonnenlicht auf dem Land intensiver und schneller erwärmt als über einer Wasseroberfläche.

Da die erwärmte Luft über dem Land sich nun ausdehnt und leichter wird, steigt sie auf. In den freiwerdenden Raum strömt kühlere Meeresluft nach. Dies bezeichnet man als Seebreeze.

In der Nacht kehrt sich der Vorgang um. Die Luftmassen über Land kühlen schneller ab als über der Wasseroberfläche. Die Luft über der Landfläche verdichtet sich, wird schwerer und strömt Richtung Meer. Dies bezeichnet man als ablandigen Wind.

Grundsätzlich kann man also sagen, dass Wind durch Sonnenenergie hervorgerufene Erscheinung ist. Durch die unterschiedliche Erwärmung der Erdoberfläche entstehen in der Atmosphäre unterschiedliche Druckbereiche, die man als Hoch- und Tiefdruckgebiete bezeichnet. Der Druckausgleich zwischen diesen Gebieten erfolgt durch Wind, wobei er immer vom Hoch ins Tief weht. So hat sich auf der Erde ein charakteristisches Windsystem herausgebildet.

Große Luftströmungen sowie z.B. Passatwinde werden durch die Erdrotation beeinflusst (Corioliskraft). Auf lokale Winde hat vor allem die Bodenbeschaffenheit Auswirkungen. Zum Beispiel verursachen Gebäude Änderungen im Strömungsverlauf, da auf der windabgewandten Seite ("Lee") Turbulenzen entstehen.

Die Windstärke wird aus den unterschiedlichen Energiepotentialen der bewegten Luftmassen ermittelt. Die Windgeschwindigkeit wird in einer Höhe von 10 Meter über der Geländeoberkante ermittelt, wobei man einen Durchschnittswert der letzten 10 Minuten angibt. Deutschland liegt in einer Westwindzone liegt. Wir haben hier eine mittlere Windgeschwindigkeit von 4m/s und nimmt mit steigender Höhe zu. Eine gleichmäßige Strömung gibt es dabei nie.

| Windstärke | Windgeschw. in km/h | Bezeichnung |
|------------|---------------------|--------------------|
| 0 | 0-1 | Windstille |
| 1 | 1-5 | leichter Zug |
| 2 | 6-11 | leichter Wind |
| 3 | 12-19 | schwacher Wind |
| 4 | 20-28 | mäßiger Wind |
| 5 | 29-38 | frischer Wind |
| 6 | 39-49 | starker Wind |
| 7 | 50-61 | steifer Wind |
| 8 | 62-74 | stürmischer Wind |
| 9 | 75-88 | Sturm |
| 10 | 89-102 | schwerer Sturm |
| 11 | 103-117 | orkanartiger Sturm |
| 12 | 118 und mehr | Orkan |

Die Geschichte der Windkraft

Das Potential der Windkraft wird seit Jahrhunderten genutzt. Im Mittelalter stellte die Windmühle neben der Wassermühle die wichtigste Antriebsmaschine des vorindustriellen Europas dar. Bis Mitte des 19. Jahrhunderts wuchs die wirtschaftliche Bedeutung der Windmühle. Die mechanische Kraft wurde in der Müllerei und in Sägewerken benötigt. Mit der Erfindung und dem steigenden Einsatz der Dampfmaschine verlor die Windmühle an Bedeutung.

Bedingt durch die Energiekrisen der 70er und 80er Jahre des 20. Jahrhunderts begann das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) mit Forschungen im Bereich der Windkraft. Gemeinsam mit den drei großen Energieversorgern HEW (Hamburger Elektrizitätswerke), RWE (Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk) und der Schleswig wagte man 1980 das Growian-Projekt, aus dem 1983 eine 3-MW-Windanlage hervorging, die im Kaiser-Wilhelm-Koog errichtet wurde. Das 87,2 Million D-Mark (ca. 44,58 Mio. Euro) teure Projekt endete 1988, als die Anlage aufgrund von 99%igem Stillstand und technischen Problemen demontiert wurde.

In den USA versuchte man Ende der 70er Jahre durch ein neues Gesetz, dass Abschreibungsmöglichkeiten von bis zu 25% ermöglichte und die Einspeisung des Stroms in das öffentliche Netz regelte, die Windkraft zu fördern. Dies hatte zur Folge, dass in den darauf folgenden Jahren allein im Bundesstaat Californien ca. 15.000 Windkraftanlagen errichtet wurden.

Während dieses Gesetz in den USA einen wahren Boom auslöste und auch der zweitgrößte Windkraftmarkt Dänemark weiter wuchs, plagten sich deutsche Anlagenerrichter vor allem mit den Behörden um Baugenehmigungen zu bekommen, da Windkraftanlagen im Baugesetz noch nicht vorgesehen waren. Auch die Energieversorger zeigten sich nicht kooperativ bei der Frage, ob man den Strom in ihre Netze speisen könne.

Im Jahre 1991 regelte ein neues Gesetz diese Differenzen. Regenerativ erzeugter Strom wurde mit 90% des Durchschnittserlöses je Kilowattstunde vergütet. Die Baugenehmigung oblag jedoch weiterhin den lokalen Behörden.

Nachdem die ausschließliche Förderung von Großprojekten durch das BMFT nicht den gewünschten Erfolg zeigte, schlug man mit dem 250MW-Programm eine neue Richtung ein. Der Betreiber einer Windkraftanlage konnte entweder durch eine Investitionszulage über 60% der Investitionskosten oder über eine Zulage zur Einspeisevergütung von diesem Programm profitieren. Schleswig-Holsteins Strombedarf konnte durch dieses Programm 1994 bereits zu 4% durch Windenergie gedeckt werden.

Energiepotential

Eine Windkraftanlage entzieht dem Wind seine kinetische Energie. Insgesamt umfaßt die Bewegungsenergie der Luftmassen eine Leistung von ca. 3000TW, von der jedoch nur ein Bruchteil durch Windkraftanlagen genutzt werden kann. Der Hauptteil dieser Energie liegt in höheren Luftschichten oder über den Ozeanen.

Die wirtschaftliche Grenze der Windenergie liegt bei einer Windgeschwindigkeit von ca. 4m/s. Die Leistung einer Windkraftanlage ist abhängig von der Luftdichte, der Windgeschwindigkeit und der durchströmten Fläche und läßt sich folgendermaßen berechnen:
Leistung(Wind) = $0.5 \cdot \text{Luftdichte} \cdot \text{Windgeschwindigkeit}^3 \cdot \text{Fläche}$

Die Rotorfläche wird dabei senkrecht zur Windrichtung von der Nabe bis zur Rotorspitze gemessen, geometrisch gesehen also ein Kreisring.

Die Schwankungen der Windgeschwindigkeit und damit der erzielten Leistung sind für die Windenergie charakteristisch. Moderne Anlagen erreichen heute je nach Standort eine jährliche Stromproduktion von 1,8 bis 2,5 kWh.

Windkraftanlagen mit vertikaler Rotorachse

Nach dem Franzosen George Darrieus sind Windkraftanlagen mit dem Darrieus-Rotor benannt. Darrieus, der seine Idee 1931 in den USA patentieren ließ, entwarf einen Rotor, dessen zwei oder drei Rotorblätter ähnlich einem Schneebesen geformt sind. Der Drehimpuls entsteht hier im Wesentlichen durch aerodynamischen Auftrieb.

Die Unabhängigkeit von der Windrichtung ist der große Vorteil des Darrieus-Rotors. Außerdem positiv: Die gesamte Mechanik und Elektrik kann am Boden untergebracht werden. Nachteilig ist jedoch, dass der Rotor nicht von selbst anlaufen kann und Starthilfe benötigt. Der Leistungsbeiwert eines Darrieus-Rotors liegt bei 37%, während die modernen zwei- oder dreiblättrigen Horizontal-Rotoren bis zu 45% der Windenergie umsetzen.

Eine spezielle Form des Darrieus-Rotors ist der H-Rotor. Seine Rotorblätter sind ähnlich einem "H" senkrecht angeordnet und über eine Trageskonstruktion mit der vertikalen Rotorwelle verbunden. Anlagen mit diesem Rotorentyp sind meist mit einem neu entwickelten Generator, dem sogenannten Wanderfeldgenerator, ausgestattet. Mit dem Rotor drehen sich ringartig angeordnete Dauermagnete um die am Mast angebrachten Wicklungen des Stators. Getriebe, Rotorblattverstellung und Windnachführung entfallen bei diesem Modell ebenfalls.

Häufig findet man in Kombination mit dem Darrieus-Rotor den Savonius-Rotor, erfunden Ende des 19. Jahrhunderts vom finnischen Kapitänleutnant Sigurd Savonius. Der Wind erfährt an der Schaufelöffnung einen höheren Widerstand als in der Schaufelrückseite. Es ergibt sich ein Drehmoment, das beide Schaufelseiten abwechselnd in den Wind dreht. Da Savonius-Rotoren schon bei relativ geringen Windgeschwindigkeiten anlaufen, werden sie häufig als "Starthilfe" mit Darrieus-Rotoren kombiniert. Das Bild zeigt ein Beispiel dafür.

Des Weiteren kommen Savonius-Rotoren zu Entlüftungszwecken, z.B. für Fahrzeuge oder Fabrikhallen zum Einsatz. Aufgrund ihres niedrigen Wirkungsgrades von 23% und dem hohen Materialbedarf sind sie für großen Leistungsbedarf ungeeignet.

Windräder mit horizontaler Rotorachse

Die meisten heute installierten Windkraftanlagen sind in gewisser Weise eine Weiterentwicklung der frühen Windmühlen. Diese Windräder zeichnen sich durch eine horizontal liegende Rotorwelle aus. Durch verbesserte Materialien und Bautechniken ist es heute möglich, strömungsgünstige Turmkonstruktionen zu errichten, die den Wirkungsgrad erheblich verbessern.

Der Turmkopf, auch Gondel genannt, ist mitsamt dem Rotor um volle 360° drehbar. Durch mechanische, hydraulische oder elektro-mechanische Drehgetriebe wird der Rotor entweder vollautomatisch durch eine Meß- und Regelanlage oder mit Hilfe von Seitenrädern und Windfahnen in die günstigste Position gedreht. Zusätzlich sind im Turmkopf die "wichtigsten Komponenten" des Windrades untergebracht, was der Nachteil gegenüber den Vertikalachsenertern ist, denn somit befinden sich die schweren Bauteile wie der Generator und das Getriebe im Kopf der Anlage.

Auf häufigsten werden Windräder mit drei Rotorblättern errichtet. Man erreicht damit eine gleichmäßige Massenverteilung bei der Drehbewegung und dadurch eine geringe mechanische Belastung. Das Laufbild erscheint dem menschlichen Auge sehr ruhig. Zweiflüglige Anlagen sind vor allem preislich im Vorteil gegenüber den dreiflügligen, da die Kosten für ein Rotorblatt verhältnismäßig hoch sind. Einblättrige Anlagen existieren auch schon als Prototyp, fallen aber durch ein sehr unruhiges Laufbild und laute Flügelgeräusche auf.

Der Rotor und seine Verstellmechanismen

Die Rotorblätter sind aerodynamisch geformt, damit sie nicht nur aufgrund des Widerstandes drehen, sondern auch durch aerodynamisch erzeugte Auftriebskräfte. Die Form der Rotorblätter ist ähnlich der von Flugzeugtragflächen. Auf der Oberseite wird die Geschwindigkeit der Luft erhöht, auf der Unterseite verringert. So entsteht auf der unteren Seite ein Überdruck, auf der oberen ein Unterdruck, was letztlich zum Entstehen von Auftriebskräften führt. Einem Flugzeug ermöglicht dieser Effekt das Fliegen, ein Rotorblatt wird dadurch gedreht. Im Vergleich mit reinen Widerstandsblättern aus Holz oder Kunststoff, die einfach nur gekrümmt oder schräg gestellt sind, erreichen diese aerodynamischen Rotorblätter einen wesentlich höheren Wirkungsgrad.

Um die Leistung des Generators konstant zu halten, ist es notwendig, dass die Drehzahl des Rotors ebenso konstant gehalten wird. Um dies zu gewährleisten, haben größere Windräder eine automatische Rotorblattverstellung eingebaut. Durch Verstellen des Rotorblattwinkels kann die Drehzahl des Rotors auch bei schwankenden Windstärken konstant gehalten werden. Bei schwachem Wind werden die Rotorblätter mit voller Breite gegen die Strömung gedreht; bei starkem Wind können die Blätter soweit gedreht werden, bis sie parallel zur Windströmung stehen. Diese Regelung wird auch Pitch-Regelung genannt. Im Falle von Sturm kann der gesamte Rotor durch eine Bremse festgesetzt werden.

Kleinere Windräder sind meist mit der Stall-Regelung ausgestattet. Die Rotorblätter sind dafür so geformt, dass die Luftströmung ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit zunehmende abreißt und die Rotordrehzahl so begrenzt wird. Zusätzlich sind diese Windräder mit aerodynamisch wirkenden Bremsklappen ausgestattet.