

6 Windenergie

6.1 Stromerzeugung mithilfe der Windkraft

6.1.1 Windmühle

Wasser und Wind waren die ersten von Menschen genutzten Energieformen. Mithilfe von Windmühlen konnte sich der Mensch anfallende Arbeit wie das Mahlen von Getreide und das Pumpen von Wasser erleichtern. Hinweisen in der Literatur zufolge wurden Windmühlen schon um 1750 v. Chr. in Babylon benutzt. Um 220 n. Chr. kamen sie in China als Pumpen zum Schöpfen von Wasser zum Einsatz, um 800 n. Chr. auch in Persien zum Mahlen von Getreide (Bild 6.1) [18] [63]. Diese Bauform wird als „Widerstandsläufer“ bezeichnet, weil sie den Strömungswiderstand nutzt.

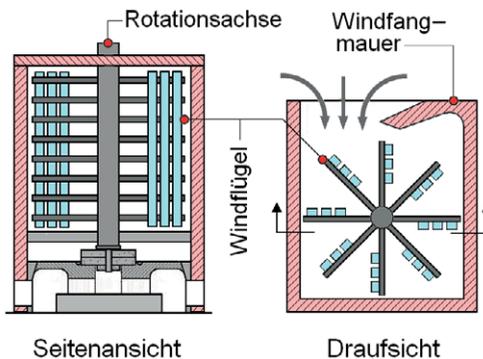


Bild 6.1 Persische Windmühle mit senkrecht stehender Rotationsachse

In Europa taten Windmühlen mit vertikalem Rad und horizontaler Welle, wie in Bild 6.2 dargestellt, ab dem 12. Jahrhundert Dienst. Das Bild zeigt einen sog. Galerieholländer. Bei unebenem Gelände wird die Mühle zur Verbesserung des Wirkungsgrades auf einem steinernen Unterbau aufgeständert. Wegen der dann größeren Mühlenhöhe konnte allerdings die Flügel- und Kappenverstellung nicht mehr vom Boden aus erfolgen. So baute man eine umlaufende Galerie, von wo aus die Bedienung der Kappe/der Flügel von Hand erfolgen kann. Ist (wie dargestellt) eine Windrose zur selbsttätigen Windrichtungsnachführung vorhanden, ist das Krüh-/Drehwerk ¹⁶ [94] nicht erforderlich.

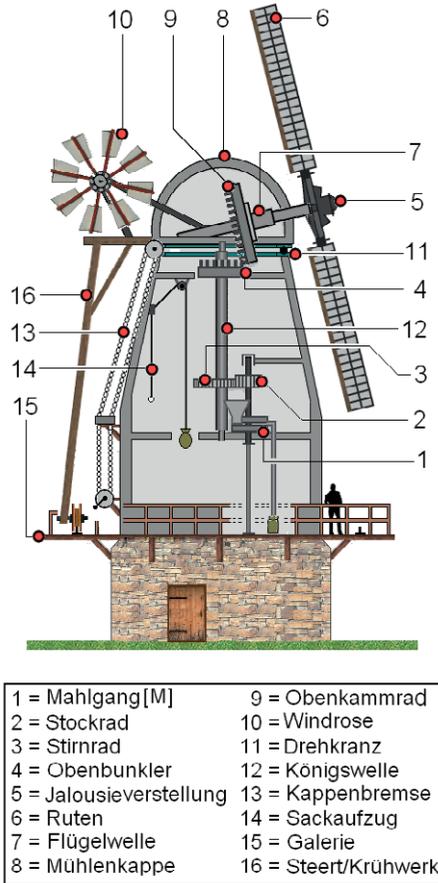


Bild 6.2 Galerie-Windmühle

Bild 6.3 [10] [25] zeigt eine andere Bauart, den sog. „Auftriebsläufer“, auch „Senkrechta-cher“ genannt – seine Rotorblätter arbeiten quer zur Windrichtung.

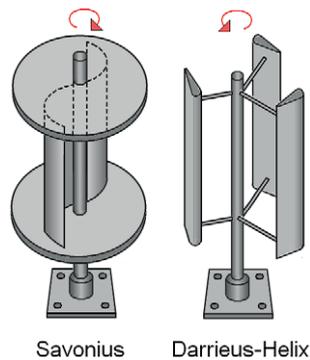


Bild 6.3 Rotor-Bauarten

Die Darrieus-Bauweise kommt auch als Unterwasser-Turbine zum Einsatz. Den Savonius-Rotor finden wir auch beim Flettner-Schiffsantrieb.

Ab etwa 1890 dienten Windmühlen weltweit auch der Stromerzeugung. In diesem Fall wurde der Mahlgang entfernt – an seiner Stelle wurde ein Generator mit der Königswelle verbunden (siehe auch Bild 12.3).

Bild 6.4 [74] zeigt ein modernes Offshore-Windrad – übliche Abmessungen sind im Bild markiert. Baugleiche Anlagen werden auch landgebunden betrieben. Die Leistung einer Offshore-Anlage beträgt zurzeit bis zu 6,0 MW. Die Windenergie ist mit weltweit etwa 742 GW (Deutschland ca. 62 GW) an der Erzeugung alternativer Energie beteiligt – siehe auch Bild 12.26. An Land werden hiervon ca. 41 %, offshore ca. 10 % erbracht.

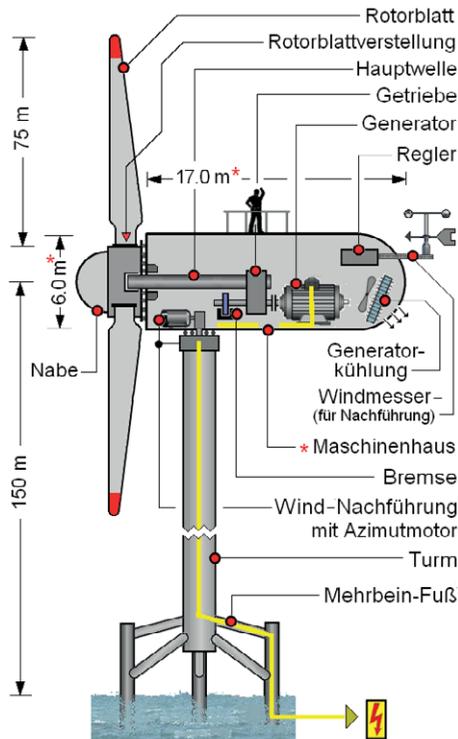


Bild 6.4 Offshore-Windrad

Das in Bild 6.4 dargestellte Offshore-Windrad ist mithilfe eines Gerüsts (Vierbein-Jacket/Dreibein-Sockel/Einrohr-Monopile) fest mit dem Meeresboden verbunden. Je nach Untergrund müssen die Fundamente dieser Windräder 50 m und tiefer im Meeresboden verankert werden. Nur so widerstehen die Räder Sturm und Wellengang. Standorte in uferfernen Bereichen verbieten sich wegen der dann großen Wassertiefen und den damit unverhältnismäßig hohen Installationskosten.

In neuester Zeit befinden sich zahlreiche schwimmende Windkraftanlagen in der Erprobung. Sie bestehen aus Plattformen, die aus Schwimmkörpern gebildet werden. Auf diesen wird die Einheit aus Turm und Turbinen-Generator-Gondel aufgesetzt. Die komplette Einheit

12 Wasserkraftwerke

Als alternative Energiequelle dürfen auch Wasserkraftwerke nicht unerwähnt bleiben, war die Kraft des Wassers doch über Jahrhunderte Energiequelle z. B. zum Antrieb von Transmissionen in Handwerksbetrieben mithilfe von Wasserrädern. Nachfolgend werden einige Wasserkraftwerke vorgestellt. Eigen ist allen Wasserkraftwerken, dass sie die kinetische (Fall-/Strömungs-) Energie des Wassers in mechanische Energie, im nächsten Schritt in elektrische Energie umwandeln.

12.1 Die Strömungsmaschine

Eine der ersten mit Wasser betriebenen Strömungsmaschinen ist in Bild 12.1 dargestellt. Die Maschine erinnert stark an den Heronsball (Bild 12.1 B - [88]), erfunden von Heron von Alexandria († ca. 100 n. Chr.).

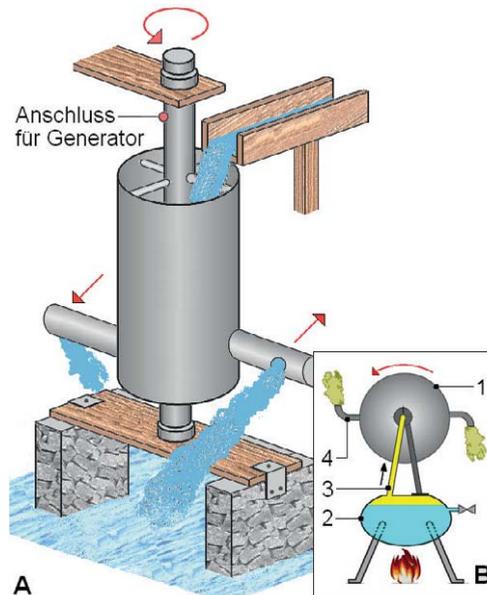


Bild 12.1 Reaktionsturbine

Der Heronsball ist eine drehbar gelagerte geschlossene Metallkugel ①, an deren Außenseite zwei Austrittsdüsen angebracht sind. Unterhalb dieses Gefäßes befindet sich ein mit Wasser gefüllter Behälter ②. Infolge Unterfeuerung dieses (ebenfalls geschlossenen!) Wasserbehälters verdampft das Wasser und wird wegen des entstehenden Dampfdruckes durch eine der als

Rohr gestalteten Halterungen ③ nach oben (↑) in die Kugel ① gedrückt. Der Dampf strömt wegen des nun auch in der Kugel herrschenden Überdruckes durch die beiden Düsen ④ ins Freie und versetzt die Metallkugel in eine Drehbewegung. Ähnlich arbeitet die in Bild 12.1 A dargestellte Apparatur/Reaktionsturbine. Wie erkennbar strömt ständig Wasser in einen um eine Mittelachse beweglichen stehenden Hohlzylinder. Im unteren Teil des Zylinders sind in zwei Auslegern Austrittsdüsen angebracht. Das aufgrund des statischen Druckes der Wassersäule im Zylinder durch die Düsen ausströmende Wasser versetzt den Zylinder infolge des Rückstoßes in Drehung. Die sich mit dem Zylinder drehende Achse treibt den Generator an – es wird Strom erzeugt [78] [88].

12.2 Das Wasserrad

Der Frühform der Energieerzeugung ist auch das Wasserrad (später wegen seiner Funktion auch „Wassermühle“ genannt) zuzuordnen. Erste Wasserschöpfträder zur Bewässerung von Feldern waren etwa 3500 v. Chr. in Asien in Gebrauch. Recht früh nutzten auch Niederländer die Wassermühlen zur Entwässerung ihrer unter dem Meeresspiegel liegenden Landbereiche. Etwa 800 n. Chr. ersann man Möglichkeiten, die Drehbewegung des Rades in eine lineare Bewegung umzuwandeln. Nunmehr konnten z. B. Schmiedehämmer, Gattersägen oder Transmissionen mithilfe der Wasserkraft betrieben werden.

Bei der Wassermühle wird die kinetische Energie des fallenden bzw. strömenden Wassers genutzt, um ein mit Schaufeln bestücktes Rad in eine Drehbewegung zu versetzen. Um den Hammer (Bild 12.2) in Betrieb nehmen zu können, muss man mithilfe des Spansschützes eine Klappe im Wassergerinne öffnen.

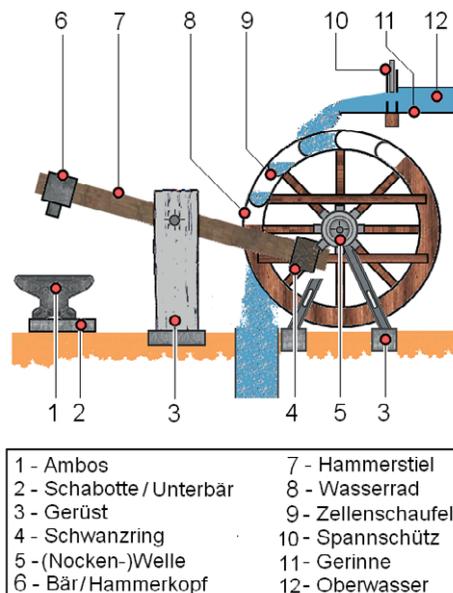


Bild 12.2 Hammerschmiede, angetrieben durch ein Wasserrad

Das Oberwasser beaufschlagt dann das Wasserrad und bringt dieses zum Drehen. Auf der Wasserradwelle ist ein Nockenring (Frosch) befestigt. Durch die Drehbewegungen dieses Nockenringes drückt einer der Nocken den gepanzerten Ring [4] am unteren Ende des Helmes nach unten, bis der Nocken über den Schwanzring rutscht. Der Hammer fällt durch sein eigenes Gewicht auf den Amboss. Dieser Vorgang wiederholt sich mit jedem Nockenanschub. Die Schlaghäufigkeit kann man über den Wasserzufluss beeinflussen [102].

1880 wurden nach Erfindung des Generators in England das erste Wasserkraftwerk bzw. die Windmühle zur Stromerzeugung in Betrieb genommen. Wie in Bild 12.3 zu erkennen ist, wurde hierzu z. B. die Welle zum Antrieb des Mahlganges [M] einer mit Wind angetriebenen Kornmühle anstelle des Mahlwerkes mit einem Generator verbunden – siehe hierzu Bild 6.2 Detail [1] (Galerie-Windmühle). Ebenso könnte auch die Nockenwelle [5] des Wasserrades aus Bild 12.1 mit dem Generator verbunden werden.

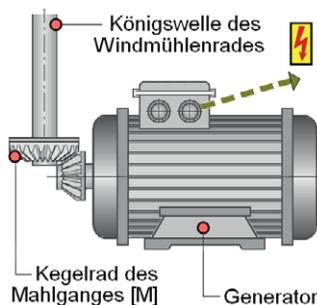


Bild 12.3 Windmühle/Wasserrad mit Generator

Etwa zeitgleich wurde neben der Wasserkraft aber auch die Dampfkesseltechnik als konkurrierende Energiequelle entwickelt und stillte fortan mithilfe der Dampfturbine mit gekoppeltem Generator den steigenden Energiebedarf. Trotz der anschließenden Vorstellung heute gebräuchlicher Wasserkraftwerke darf nicht unerwähnt bleiben, dass zuvor beschriebene Wasserräder als Kleinanlagen u. a. auch aus ökologischen Gründen zur dezentralen Energieversorgung durchaus eine Wiedergeburt erleben.

12.3 Pumpspeicher-Wasserkraftwerk

Beim Pumpspeicherkraftwerk nach Bild 12.4 dient erzeugter, aber zeitgleich im Stromnetz nicht nutzbarer Strom dazu, Wasser aus einem Unterbecken in ein Oberbecken (künstlich angelegt oder Natursee) zu pumpen.

Bei Spitzen-Strombedarf wird dieses Wasser mit natürlichem Gefälle einer Turbine zugeleitet und gelangt so wieder in das Unterbecken. Im Wesentlichen kommen zwei Fördersysteme zur Anwendung. Zum einen ist die genannte Turbine (i. d. R. eine Francis-Turbine) eine Strömungsmaschine, die je nach Bedarf durch Umkehr der Drehrichtung vom Motor mit gekoppelter Fördermaschine entweder mithilfe des aus dem Oberbecken bergabstürzenden Wassers als Turbine der Stromerzeugung dient oder als Pumpe Wasser aus dem Unter- in das Oberbecken zurückfördert. In Bild 12.4 ist stattdessen eine Motor-/Generator-Einheit

17 Dish-Stirling-System

Wie bei den in Kapitel 2 beschriebenen Sonnenwärme-Kraftwerken werden auch beim nachfolgend erläuterten Dish-Stirling-System – siehe Bild 17.1 [47] [81] – die Sonnenstrahlen mithilfe von Spiegeln aufgenommen. Bei den in Bild 2.1 und Bild 2.3 vorgestellten Kraftwerken wird die gewonnene Energie in Behältern mit Trägermedium (meist Salzsole) in einem Sole-/Wasser-Kreislauf zwischengelagert. Erst bei Bedarf wird die Speicherwärme in einem Sole-/Wasser-Tauscher zu Wasserdampf umgewandelt. Dieser erzeugt bedarfsgerecht in einem Generator Strom.

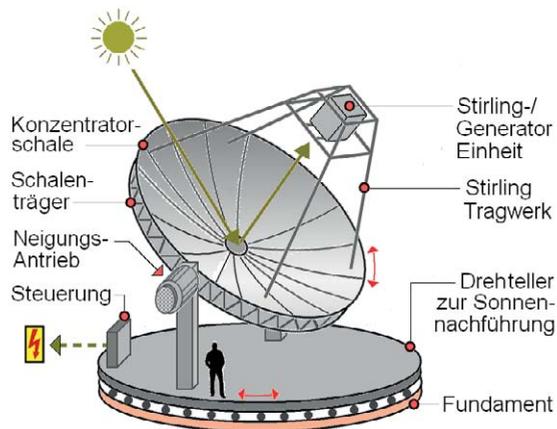


Bild 17.1 Dish-Stirling-System (Prinzipische Skizze)

Beim Dish-Stirling-System hingegen wird die Sonnenenergie unmittelbar in Strom umgewandelt. Hauptbestandteil ist die als Schüssel ausgebildete Konzentratorschale (durchaus mit einem Durchmesser von 10 m). Sie fängt die einfallende Sonnen-/Strahlungsenergie auf und leitet sie an einen im Brennpunkt der Schale angeordneten Receiver (Strahlenempfänger) weiter. Dieser fängt die Strahlungsenergie ein und führt sie einem Heißgas-Stirlingmotor zu, der wiederum die thermische in mechanische Energie umwandelt. Ein mit dem Stirlingmotor gekoppelter Generator erzeugt nunmehr Strom. Da die Sonnenenergie als direkte Strahlung genutzt wird, muss die Konzentratorschale mit der mit ihr verbundenen Receiver-/Stirling-Motor-Generator-Einheit dem Stand der Sonne nachgeführt werden. Dies geschieht mittels eines Azimut- bzw. Elevations-Antriebes. Aufgrund dieses mehrachsigen Stellantriebes ist die optimale Ausrichtung des Systems über die gesamten Sonnenstunden hinweg möglich und damit eine hohe Energieausbeute gegeben. Beim Dish-Stirling-System ist jedem Spiegel „seine“ Receiver-Einheit zugeordnet. Damit kann die Aufstellung freizügiger gehandhabt werden als z. B. beim Solarturm-Verfahren, bei dem alle Spiegel um einen Turm geschart/ ausgerichtet werden müssen. Wie [47] zu entnehmen ist, benutzt ein Dish-Stirling-System Helium als Heißgas. Üblich sind Drücke von 150 bar bei Gastemperaturen von 650 °C.

Bei diesen Bedingungen wird in jeder Schlüssel-Receiver-Einheit eine elektrische Leistung von bis zu 10 kW erreicht. An der Kurbelwelle des Motors ist ein Generator angeflanscht, der den erzeugten Strom unmittelbar ins Netz einspeist. Zu Beginn der 1980er Jahre wurden in den USA die ersten Anlagen in Betrieb genommen. In Deutschland werden – soweit bekannt – seit 1984 Dish-Stirling-Systeme entwickelt.

① *Der Stirling-Motor selbst (Bild 17.2) besteht zumindest aus zwei abgeschlossenen Zylindern. Innerhalb des Zylinders 1 wird ein Medium, meist Helium, erhitzt ■ und es dehnt sich aus. Im hier besprochenen Dish-Stirling-Verfahren erfolgt die Beheizung mittels des Parabolspiegels/der Sonneneinstrahlung. Infolge der Gasausdehnung bewegt sich Kolben 1 und treibt das Schwungrad an. Währenddessen wird das Gas in Zylinder 2 gekühlt ■. Infolge der Temperaturänderung innerhalb der Zylinder kommt es, da beide Zylinder über Rohrleitungen und den Regenerator miteinander verbunden sind, zwischen beiden Zylindern zyklisch zur Expansion bzw. Kompression des Gases. Über ein Kurbel-Schwungrad wird die oszillierende Kolbenbewegung in eine Drehbewegung umgesetzt. Ein angeschlossener Generator erzeugt elektrische Energie.*

Die Rückkühlung des Stirling-Motor-Kühlwassers erfolgt im geschlossenen Kreislauf mittels einer Umwälzpumpe durch einen Wasser-Luftkühler. Der Gasdruck innerhalb des Motors kann durchaus 150 bar betragen. Der erwähnte Regenerator ist ein Kurzzeit-Wärmespeicher, der abwechselnd, meist mittels einer porösen Stein-Speichermasse, Energie aufnimmt und abgibt [104].

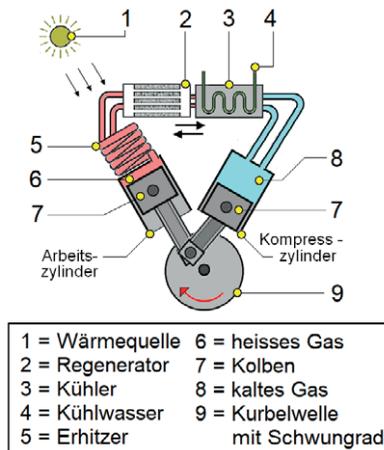


Bild 17.2 Stirling-Motor