

Heißt es Windmühle, Windrad, Windkraftanlage oder Windenergieanlage?

Moderne Anlagen, die die Energie des Windes in elektrische Energie wandeln, heißen korrekt **Windenergieanlagen** (abgekürzt WEA). Parallel dazu werden auch die englischen Begriffe WEC (Wind Energy Converter) oder WTG (Wind Turbine Generator) verwendet.

Windmühlen sind vom Wind angetriebene Anlagen zum Mahlen von Mahlgut, wie beispielsweise von Getreide. Die ersten Windmühlen wurden wahrscheinlich in Mesopotamien ab 1700 v. Chr. eingesetzt (Bild 1.1). Ausgeführt waren diese in Form eines Widerstandsläufers, der über eine vertikale Drehachse einen Mühlstein antreibt. An der Drehachse waren geflochtene Matten befestigt, die dem Wind einen Widerstand entgegensetzten und somit vom Wind „mitgenommen“ wurden. Durch Abschottung einer Rotorhälfte mittels einer Mauer wurde die notwendige Asymmetrie erzeugt, um die Windmühle zur Rotation zu bringen.

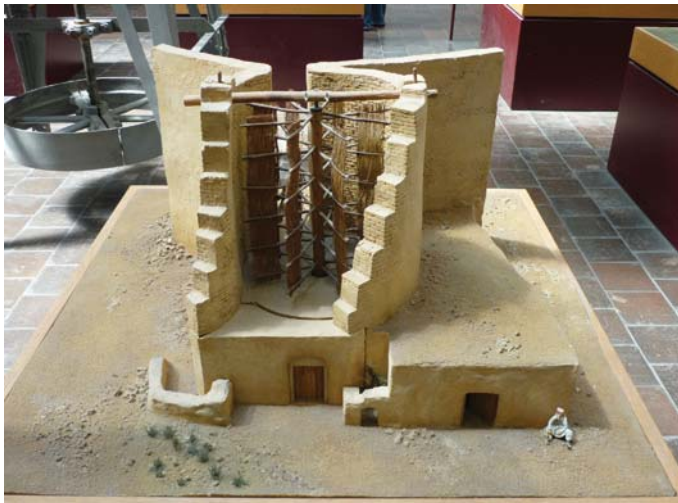


Bild 1.1 Nachbau einer persischen Windmühle (© Wikipedia, User: Saupreiß)

In Europa wurden viel später die ersten Windmühlen mit horizontaler Drehachse entwickelt, deren Rotor sich wie bei einem Propeller eines Flugzeugs senkrecht zum Wind dreht. Die älteste Bauform dieser Anlagen ist die Bockwindmühle (Bild 1.2), die im 12. Jahrhundert das erste Mal erwähnt wurde. Von Frankreich und England aus verbreitete sich dieser Anlagentyp über Holland und Deutschland in Nord- und Mitteleuropa. In Südeuropa hingegen setzte sich der Typ der Turmwindmühle durch (Bild 1.3).



Bild 1.2 Bockwindmühle (© Wikipedia, User: indeedous)

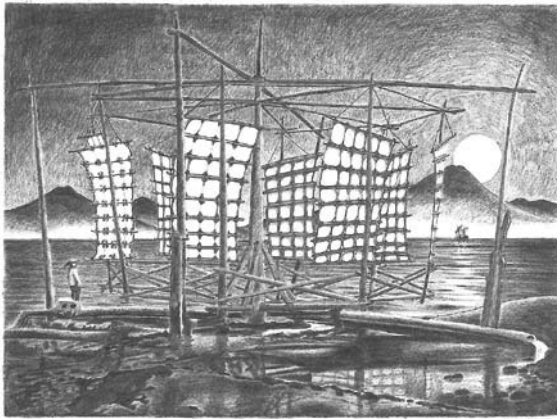
Windräder sind Anlagen zur Wandlung von Windenergie in nichtelektrische Energieformen. Als Wasserpumpen wurden solche Windräder erstmals in China ab etwa 1000 n. Chr. zur Bewässerung von Reisfeldern und zur Salzgewinnung in Meerwassersalinen eingesetzt (Bild 1.4).

Auch diese Windräder waren als Widerstandsläufer ausgeführt, konnten den Wind aber unabhängig von der herrschenden Windrichtung nutzen, da die Segel, die dem Wind den Widerstand entgegensetzten, auf ihrem Rückweg (dem Wind entgegen) wegklappten.

**Bild 1.3**

Turmwindmühle

(© Wikipedia, User: Harald Weber)

**Bild 1.4** Chinesisches Windrad (Zeichnung) (© Wikipedia, User: Carl von Canstein)

In Holland wurden im 15. Jahrhundert die Bockwindmühlen so modifiziert, dass diese Anlagen zum Antrieb von Pumpen verwendet werden konnten, um Landgewinnung durch Entwässerung der Polder zu ermöglichen. Ergebnis war die Wippmühle, die eigentlich Wipprad heißen müsste und die auch in Ost- und Nordfriesland zur Trockenlegung der Moorflächen Anwendung fand (Bild 1.5). Mit der weiterentwickelten Holländerwindmühle im 17. und 18. Jahrhundert erlebte die Windenergienutzung eine Blütezeit. Diese Anlagen wurden zu Zehntausenden

sowohl als Windrad (vornehmlich in Holland und Friesland) als auch als Windmühle genutzt.



Bild 1.5
Wippmühle (Kokerwindrad) mit Schöpfrad
(© Wikipedia, User: Rasbak)

Ein weiterer wichtiger historischer Anlagentyp des Windrades ist das amerikanische Windrad, das Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelt wurde und hauptsächlich für die Trink- und Tränkwasserversorgung sowie für die Wasserversorgung der frühen Dampflokomotiven eingesetzt wurde (Bild 1.6). Charakteristisch für diesen Anlagentyp ist die Flügelrosette aus vielen Blehschaufeln mit einem Durchmesser von 3 – 5 Metern.

Im 19. Jahrhundert begannen erst Dampfmaschinen und dann Verbrennungsmotoren Windmühlen und Windräder abzulösen. Parallel dazu wurden nach dem Ersten Weltkrieg wesentliche technisch-wissenschaftliche Arbeiten zu den theoretischen Grundlagen durchgeführt, wie z. B. von Physikern wie Albert Betz, Poul laCour, Johannes Juul und Ulrich W. Hütter. Diese Erkenntnisse flossen kurz vor und insbesondere nach dem Zweiten Weltkrieg in den Bau der ersten **Windkraftanlagen** ein. Eine besonders wegweisende Anlage war die 1957 von Johannes Juul errichtete Gedser-Anlage in Dänemark, die einen Asynchrongenerator verwendete und erstmals eine Stallregelung beinhaltete (Bild 1.7).

**Bild 1.6**

Amerikanisches Windrad

(© Wikipedia, User: Vysotsky)

**Bild 1.7**

Gedser-Windkraftanlage (© Heiner H. Dörner)

Ähnlich wegweisend war die 1958 von Ulrich W. Hütter errichtete Windkraftanlage W34, die einen Synchrongenerator verwendete und einen zweiflügligen Rotor hatte (Bild 1.8). Besonders innovativ waren die aus Glasfaser gefertigten Rotorblätter und die Rotorblattwinkelregulierung über eine hydraulische Verstelleinrichtung.



Bild 1.8 W34 Windkraftanlage (© Heiner H. Dörner)

1978 beschloss das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) in Deutschland den Bau der weltweit größten Windkraftanlage Growian mit 100 Metern Turmhöhe und 100 Metern Rotordurchmesser (Bild 1.9). Nicht zuletzt die Auslegung als Zweiblattrotor, der als Leeläufer auf der windabgewandten Seite des Turms angebracht war, führte zu nicht beherrschbaren Lasten und Materialproblemen. Die Anlage wurde weitestgehend ein Misserfolg. Allerdings wurden etliche Lehren aus den begangenen konzeptionellen Fehlern gezogen.

Gute Übersichten über die historische Entwicklung der Windausnutzung finden Sie beispielsweise in [1.1, 1.2, 1.3] sowie [3.2] und [3.3].

Moderne **Windenergieanlagen** (Beispiele: Bild 1.10 , Bild 1.11 und Bild 1.12) haben die Versuchsanlage Growian in ihren Parametern weit übertroffen, werden in großer Stückzahl produziert und ausschließlich zur elektrischen Stromerzeugung eingesetzt.



Bild 1.9
Versuchsanlage Growian
(© Wikipedia, User: Thyge Weller)



Bild 1.10
Enercon E-160 EP5 (© ENERCON GmbH)

**Bild 1.11**

Vestas V-150 (© Wikipedia, User: Vinaceus)

**Bild 1.12**

Nordex N-149 (© Nordex/Acciona SE)

Heute sind Windenergieanlagen fester Bestandteil der elektrischen Energieversorgung. Ein wesentlicher Treiber hierfür waren in Deutschland das am 29. März 2000 in Kraft getretene Gesetz zum Ausbau der erneuerbaren Energien (EEG) [2.8] und dessen beschlossene Neuregelungen (z. B. [2.9]). Seitdem hat sich die installierte Windenergieanlagenleistung nahezu verzehnfacht [2.1] (Bild 1.13).

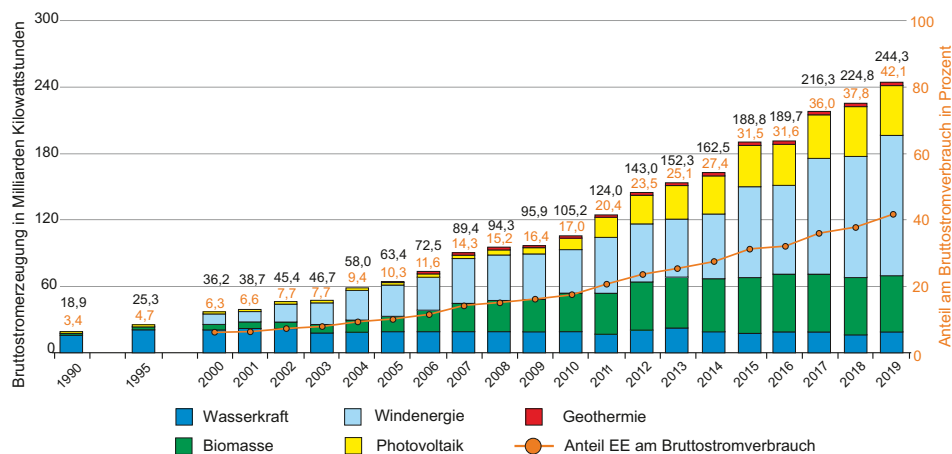


Bild 1.13 Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland (in Anlehnung an <https://www.umweltbundesamt.de/bild/entwicklung-der-stromerzeugung-aus-erneuerbaren-0>)

Für 2019 weist das deutsche Umweltamt den Anteil der Stromerzeugung in Deutschland aus erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch mit 42,1 % aus. Darüber hinaus löste die Windenergie erstmals die Braunkohle als wichtigsten Energieträger im deutschen Strommix ab: Mit 126 Milliarden Kilowattstunden (kWh) wurde durch Windenergie so viel Strom erzeugt wie durch keinen anderen Energieträger in Deutschland. Parallel dazu stieg die Anzahl der Windenergieanlagen stetig an. So waren Ende 2020 fast 30 000 Windenergieanlagen in Deutschland an Land aufgestellt [2.2] (Bild 1.14). Dazu kommen 1269 Offshore-Windenergieanlagen in der Nordsee und 232 Anlagen in der Ostsee (Stand: Juni 2020).

Die durchschnittliche Anlagenkonfiguration für das Jahr 2020 liegt bei etwa 3,3 MW Nennleistung, einem Rotordurchmesser von 121 Metern und einer durchschnittlichen Nabenhöhe von 137 Metern [2.2].

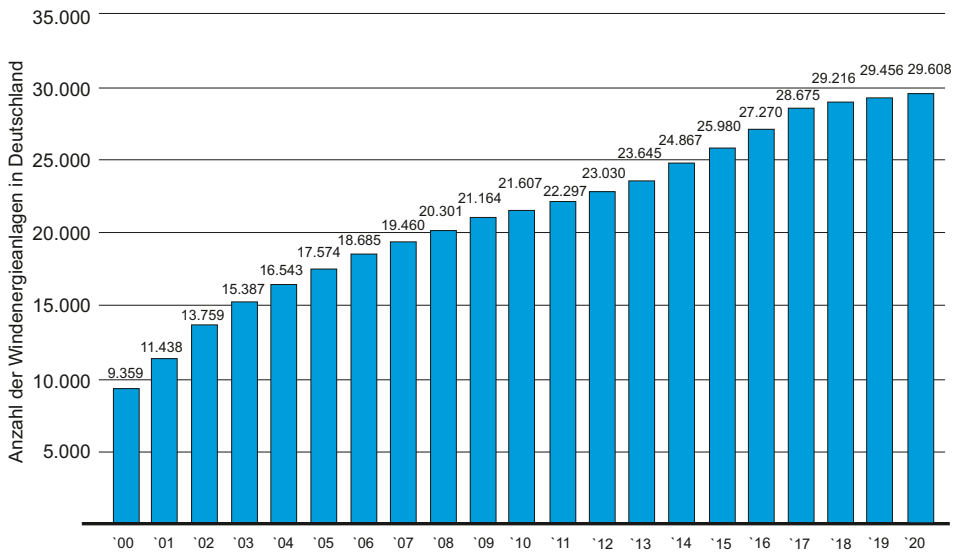


Bild 1.14 Anzahl der Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland (in Anlehnung an <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/deutschland>)

Obwohl der Zubau von erneuerbaren Erzeugereinheiten nach dem Systemwechsel innerhalb des EEG vom Modell der Einspeisevergütungen hin zum Ausschreibungsverfahren im Jahr 2017 für Neuanlagen nicht mehr so hoch ausfällt wie in den vergangenen Jahren, ist dennoch mit einem weiterem Ausbau der Windenergie auszugehen. Aufgrund der Elektrifizierung des Mobilitätssektors wird weitere elektrische Energie beispielsweise für Elektroautos benötigt. Auch die Verwendung von synthetischen Kraftstoffen oder Wasserstoff, die insbesondere mit Offshore-Windenergieanlagen erzeugt werden könnten, ist eine vielversprechende Option für die Zukunft.

2

Was sind die wesentlichen Bestandteile einer Windenergieanlage?

Bei Windenergieanlagen hat sich der sogenannte Auftriebsläufer mit horizontaler Drehachse (Luv-Läufer, die Rotorblätter stehen im Wind) und drei Rotorblättern durchgesetzt. Bild 2.1 zeigt die wesentlichen Komponenten einer Windenergieanlage.

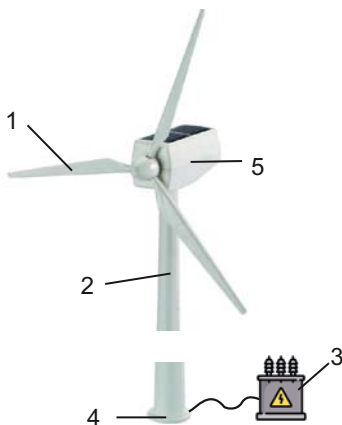


Bild 2.1

Wesentliche Bestandteile einer WEA: **(1)** Rotor, **(2)** Turm, **(3)** Transformator, **(4)** Fundament und **(5)** Maschinenhaus bzw. Gondel

Der Transformator befindet sich bei vielen Windenergieanlagen zusammen mit der Schaltanlage im Turmfuß. Einige Hersteller platzieren den Transformator direkt im Maschinenhaus. Vorteile dieses Konzepts sind geringere Stromwärmeverluste in den durch den Turm geführten Energieleitungen und eine verbesserte Abfuhr der Stromwärmeverluste des Transformators. Von Nachteil sind das höhere Gewicht des Maschinenhauses sowie eine erhöhte Schwierigkeit des Löschens im Fall eines Brandes des Transformators.

Die heutigen Windenergieanlagen zeichnen sich in der Regel durch folgende Eigenschaften aus (Bild 2.2):

- drei Rotorblätter (Dreiblattanlagen) mit dem Rotorradius R_{Rot} und der Rotorfläche A_{Rot}
- rechtsdrehender Rotor
- Luvläufer (Rotor ist in den Wind gedreht)
- variabler Gier- oder Azimutwinkel γ , um die Anlage entsprechend den Vorgaben relativ zur Windrichtung zu positionieren
- variabler Blattverstell- oder Pitchwinkel α zur Drehung der Rotorblätter um die eigene Achse
- Leistungseinspeisung in der Multi-Megawatt-Leistungsklasse

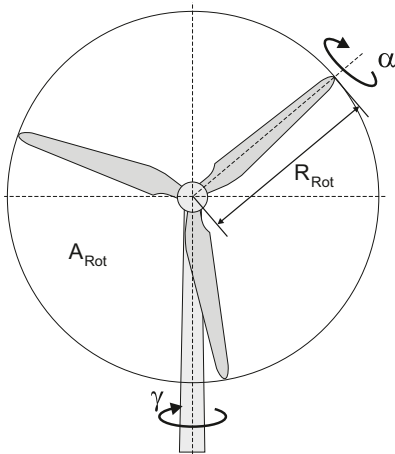


Bild 2.2
Rotor einer Windenergieanlage

Die weiteren Ausführungen in diesem Buch beziehen sich auf moderne Windenergieanlagen, die am Versorgungsnetz angeschlossen sind und elektrische Energie erzeugen. Die Entwicklung dieser Anlagen erfordert umfangreiches Wissen aus unterschiedlichen technischen Disziplinen. Als Beispiel seien die Aerodynamik, die Strukturmechanik, die Mechanik, die Leistungselektronik und auch die Regelungstechnik genannt. Alle diese Disziplinen müssen reibungslos ineinandergreifen, um die gewünschten Resultate zu erreichen.

Bezüglich der funktionalen Sicht kann eine Windenergieanlage mittels Bild 2.3 beschrieben werden, wobei nur die wesentlichen Funktionseinheiten eingezeichnet sind.

