

Windkraft, Wasserkraft und Meeresenergie – Technik mit sozialer, ökologischer und ökonomischer Akzeptanz

1. Windenergie

Die jährlichen Zuwachsraten der neu installierten Windkraftanlagen liegen seit Jahren im zweistelligen Bereich. Diese rasante Entwicklung wurde im Wesentlichen durch Forschungs- und Förderprogramme der Länder und des Bundes, insbesondere jedoch durch wegweisende gesetzgeberische Maßnahmen wie das Strom-einspeisungs-Gesetz (StrEG) und das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) ermöglicht.

Ende Juli 2006 waren in Deutschland ca. 17.841 Windenergieanlagen mit zusammen etwa 19.276 MW Leistung in Betrieb, die etwa 6% des deutschen Strombedarfs decken. Trotz insgesamt rückläufiger Installationszahlen in Deutschland konnten durch eine Erhöhung des Exportanteils auf etwa 50% die Fertigungskapazitäten ausgelastet werden. Von den weltweit 6,3 Mrd. Euro Umsatz der Windindustrie im Jahr 2004 wurden 3,15 Mrd. in Deutschland erwirtschaftet. Nach Angaben der Fachverbände waren in 2004 über 60.000 Menschen in der Windenergiebranche beschäftigt. Damit ist Deutschland nicht nur wie bereits seit Jahren führend in der Anwendung der Windenergie sondern auch in der Entwicklung innovativer Technologien.

1.1 Preisentwicklung

Obwohl bei den spezifischen Investitionskosten der Windenergieanlagen in Bezug auf ihre Nennleistung (€/kW) kaum noch weitere Preisreduktionen messbar sind, ist der Trend der auf den Jahresenergieertrag am Referenzstandort bezogenen Investitionskosten auch weiterhin fallend. Aus der vom ISET für die Windenergie ermittelten Lernkurve kann man eine Preisreduktion

von 10% je Verdoppelung der kumulierten installierten Leistung ableiten. Hiernach ergibt sich als Wert für das Jahr 1990 ein spezifischer Anlagenpreis von ca. 0,85 €/kWh · a am Referenzstandort. Dieser konnte bis 2004 auf etwa 0,40 €/kWh · a reduziert werden. Dies entspricht einer Preisreduktion von 53% innerhalb von 15 Jahren bzw. einer Lernrate von 10% je Verdoppelungsschritt der installierten Leistung. Die günstigsten Windkraftanlagen in Deutschland erzeugen Windstrom für etwa 4 ct/kWh.

Jochen Bard
ISET
jbard@iset.uni-kassel.de

1.2 Das Wissenschaftliche Mess- und Evaluierungsprogramm

Mit dem Ziel, statistisch relevante Erfahrungswerte über den praktischen Einsatz von Windenergieanlagen in Deutschland zu gewinnen, fördert das Bundesministerium für Umwelt (BMU) den Breitentest „250 MW Wind“. Das seit 1990 parallel laufende „Wissenschaftliche Mess- und Evaluierungsprogramm“ (WMEP) [1] begleitet diese Fördermaßnahme und damit auch den Aufbau der Windenergienutzung in Deutschland mit wissenschaftlich-technischen Auswertungen:

- meteorologische Bedingungen, denen die Windenergieanlagen ausgesetzt sind
- Zuverlässigkeit, mit der die Anlagen arbeiten, bzw. der Störungen, die an den Anlagen auftreten
- Stromerzeugungsbeitrag durch die Windenergie
- Kosten für die Bereitstellung der elektrischen Energie

Die bis heute mit den Auswertungen des WMEP erzielten Erkenntnisse geben Politik, Wissenschaft und Industrie mit dem jährlich erschei-

Abbildung 1
Dänischer Offshore
Windpark Hornsrev
Quelle: Vestas Wind Systems



nenden „Windenergie Report Deutschland“ wesentliche Informationen zur Einschätzung der Windenergienutzung.

Die Summe der momentan durch die verteilt installierten Windenergieanlagen in die Netze eingespeiste Leistung ist auf Grund des gegenseitigen Ausgleichs weniger durch lokal schwankende Windgeschwindigkeiten, sondern vielmehr durch das weiträumige Wettergeschehen geprägt. Dazu gehören die jahreszeitlichen Schwankungen und vor allem in den Sommermonaten auch Erwärmungsvorgänge der Atmosphäre, die zu ausgeprägten Tagesgängen führen können. Die Schwankungen des Summenleistungsverlaufs haben daher keine zu starken zufallsbedingten Steigungen, sodass die kurz- und mittelfristig zu erwartende Leistung mit entsprechenden Verfahren zufrieden stellend vorhergesagt werden kann. Die im Rahmen des „250 MW Wind“- Programms seit Anfang der 90er Jahre durchgeführten Untersuchungen zum Leistungsdargebot der Windenergie bilden die Grundlage für die von ISET entwickelten Programme zur Online-Erfassung und Prognose der eingespeisten Windleistung, die heute zum unverzichtbaren Werkzeug in den Netzleitwarten deutscher Übertragungsnetzbetreiber geworden sind [2].

Als Plattform zur Weitergabe von Daten und zur Veröffentlichung von Auswertungen wird seit Anfang 1997 auch das Internet genutzt unter <http://reisi.iset.uni-kassel.de>.

1.3 Offshore-Windenergienutzung

Mit insgesamt 15 genehmigten Windparks mit über 1000 Anlagen (Stand 08/2006) hat in der deutschen AWZ¹ auch die Ära der Offshore-Windenergienutzung begonnen. In der ersten Ausbauphase bis 2010 sollen nach den in 2002 entwickelten Plänen des Bundes bis zu 3.000 MW Windenergieleistung an geeigneten Standorten installiert werden [2]. Die nächste Phase sieht bis 2030 einen Ausbau auf 20.000 bis 25.000 MW vor. Die Offshore-Windkraftanlagen würden dann 70 bis 85 Milliarden Kilowattstunden Strom pro Jahr erzeugen. Dies wären etwa drei Viertel der für diesen Zeitpunkt insgesamt eingeplanten 95 bis 110 Milliarden Kilowattstunden Strom aus Windkraft. Gemessen am heutigen Bedarf würde das einem Anteil der Windstromerzeugung zwischen 20 und 25 % entsprechen. Die Gesamtzahl der bis 2030 im Meer zu installierenden Anlagen beläuft sich dann bei einer angenommenen mittleren Leistung von knapp 4 MW pro Anlage mit heutiger Technik auf mehr als 6000 Anlagen. Dieses ehrgeizige Ausbaziel erfordert neben erheblichen Investitionen in die Infrastruktur der elektrischen Netze auch eine vorausschauende Planung der einzelnen Ausbauschritte. Hierzu haben sich einige Konsortien gebildet. Erste Kabeltrassen sind bereits genehmigt.

¹ Die deutschen Gewässer in Nord- und Ostsee unterteilen sich in die 12 Seemeilen-Zone (Küstenmeer) und die ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ). Das Küstenmeer ist deutsches Hoheitsgebiet. Seewärts der 12 Seemeilen-Grenze bis maximal 200 sm Entfernung zur Küste befindet sich die AWZ, an die sich die hohe See anschließt.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens prüft das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrologie (BSH), ob die einzelnen Schutzgüter der Meeresumwelt z. B. Vögel, Fische, Meeres-säuger, Bodenfauna, Boden und Wasser durch das Projekt gefährdet werden. Außerdem ist bei Windparkvorhaben mit mehr als 20 Anlagen eine Umweltverträglichkeitsprüfung gemäß Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVPG) durchzuführen. Zu diesem Zweck muss der Antragsteller die Meeresumwelt in dem beplanten Gebiet untersuchen und die Auswirkungen des Vorhabens prognostizieren. Das BSH hat hierzu ein Regelwerk herausgegeben, das den Antragstellern den grundsätzlich für erforderlich gehaltenen Untersuchungsumfang für die einzelnen Schutzgüter vorgibt [3]. Eine Abschätzung möglicher ökologischer Auswirkungen war in der Vergangenheit mangels praktischer Erfahrung und fehlender Daten sehr schwierig. Die im Rahmen des vom BMU finanzierten Projekts Beo-FINO errichtete Forschungsplattform FINO 1 bietet heute ideale Möglichkeiten, Auswirkungen auf die Bodenfauna und den Vogelzug zu untersuchen. Die Ergebnisse dieser Studie wurden im Abschlußbericht in 2005 veröffentlicht [4].

1.4 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Unter maßgeblicher Beteiligung des ISET wurde 2003 die European Academy of Wind Energy (EAWE) gegründet. Sie ist ein weltweit einmaliger Kompetenzverbund für Windenergieforschung. Darin haben sich die vier führenden europäischen Forschungsinstitute sowie einige Univer-

sitäten zusammengeschlossen und repräsentieren so insgesamt über 80% der europäischen Forschungskapazitäten im Windenergiebereich. Die von der EAWE formulierten Forschungsschwerpunkte für die kommenden Jahre umfassen Themen wie:

- intelligente Windkraftwerke der Zukunft
- kurz- und langfristige Windleistungsvorhersage
- Zusammenlegung von dezentralen Windparks als virtuelle Kraftwerke
- angepasste lastreduzierende Regelungsverfahren und die weitere Steigerung der technischen Verfügbarkeit für den Offshore-Einsatz
- Entwicklung von Reserve- und Risikostrategien
- Ertrags- und Windleistungsprognosen für Offshore-Anlagen

2. Wasserkraft

Die Wasserkraft ist die älteste und am weitesten entwickelte Technologie zur nachhaltigen Stromerzeugung. Mit einem Anteil von 18% an der weltweiten Stromerzeugung steht sie auf dem dritten Platz nach Erdöl und Kohle. Aus mehr als 750 GW werden pro Jahr etwa 2800 TWh Strom erzeugt. Weitere 120 GW befinden sich im Bau, 300 bis 400 GW sind noch geplant. Das technische Potenzial der Wasserkraft entspricht etwa 90% des weltweiten Strombedarfs, jedoch werden nur ca. 30% davon als nachhaltig eingestuft. Insbesondere große Wasserkraftanlagen mit großen Stauseen verursachen lokal erhebliche soziale und ökologische Probleme. Demgegenüber können kleine Wasserkraftanlagen durchaus so ausgeführt werden, dass Umweltauswirkungen gering ausfallen und auch strengeren Auflagen, wie sie z. B. aus der europäischen Wasserrahmenrichtlinie resultieren, genügen.

Allein in China versorgen über 45.000 Kleinwasserkraftanlagen mehr als 300 Millionen Menschen. Darüber hinaus ist die Kleinwasserkraft weltweit mit der Versorgung von über 50 Millionen Haushalten und 60.000 Kleinbetrieben die wichtigste Technologie zur länd-

*Abbildung 2
Kleinwasserkraft
Pilotanlage in Tirva
(Finnland), EU-Projekt
Vasocompact
Quelle: ISET*



lichen Elektrifizierung, wo es keine Stromnetze gibt. Mit Anschlusskosten von typisch 50 bis 75 \$ pro Haushalt verursacht sie die niedrigsten Kosten und bietet durch eine weitgehend angepasste Technologie die höchste regionale Wertschöpfung.

2.1 Wasserkraft als Speicher

Neben der Stromerzeugung hat die Wasserkraft in Form von Pumpspeicherkraftwerken enorme Bedeutung als derzeit einziger bedeutender Pufferspeicher für elektrische Energie. Die größten Anlagen können über Stunden mehrere Gigawatt an Leistung aufnehmen oder abgeben und innerhalb von Sekunden eingesetzt werden. Der Energieinhalt der norwegischen Speicherkraftwerke genügt, um Europa über Wochen mit elektrischer Energie zu versorgen. Im Unterschied zu anderen Erneuerbaren wächst die Wasserkraft mit moderaten 3%/a bei tendenziell steigenden Kosten für neue Anlagen, was vorwiegend durch steigende Rohstoffpreise wie z. B. den hohen Stahlpreisen verursacht wird.

2.2 Forschungs- und Entwicklungsvorhaben

Nationale und internationale Forschungsprogramme konzentrieren sich daher – soweit die Wasserkraft überhaupt noch Beachtung findet – auf die Reduktion der Kosten und der Umweltauswirkungen der Anlagen. Trotz der technischen Reife moderner Wasserkraftanlagen führt technologischer Fortschritt zu immer besseren Turbinen und neuen Lösungen wie zum Beispiel direktgetriebenen Synchrongeneratoren mit Permanenterregung, die ein Getriebe überflüssig machen.

Eine besonders für Anlagen mit niedriger Fallhöhe interessante Entwicklung hat das ISET im Rahmen eines Europäischen Projektes (VAS-COMPACT) entwickelt. Hierbei wird die aufwändige mechanische Regulierung von Lauf- und Leitrad der Kaplan turbine durch eine elektronische Drehzahlregelung ersetzt. Diese neuartigen Turbinen mit integrierten Permanentmagnetgeneratoren funktionieren getriebelos und können daher komplett unter Wasser betrieben werden. Mit ihnen sind Kostenein-

sparungen im Bereich von 10% möglich. Weitere interessante neue Lösungen sind:

- Kompakt-Turbinen mit der Bezeichnung ECOBulb™. Sie wurden für kleine Flusskraftwerke entwickelt und sind ein besonders umweltverträgliches Produkt. Sie garantieren dank ihrer innovativen Technologie sehr hohe Wirkungsgrade bei minimalem Wartungsaufwand.
- „Straflomatrix“-Miniturbinen der Firma Andritz VATEch können schon bei geringem Gefälle Strom erzeugen.

3. Meeresenergie: Gezeiten, Wellen, Strömungen

Auf die Meere entfällt auf Grund ihres Anteils an der Erdoberfläche gut 70% der solaren Einstrahlung und fast 90% der Windenergie. Sie halten damit den größten Teil der weltweiten Ressourcen an erneuerbaren Energien bereit. Technisch und wirtschaftlich nutzbar sind aus heutiger Sicht jedoch nur Bruchteile dieses theoretischen Energieangebots.

Europäische Studien schätzen das weltweite technische Erzeugungspotenzial der Wellenenergie auf 11.400 TWh/a. Nachhaltig nutzbar sind davon schätzungsweise etwa 1.700 TWh pro Jahr.

3.1 Gezeitenenergie

In Küstennähe treten durch die Gezeiten starke Meeresströmungen auf, die ebenfalls zur Energiegewinnung genutzt werden können. Das gesamte nutzbare Potenzial liegt nach heutiger Kenntnis bei etwa 800 TWh/a. Die einzige Technologie, die heute bereits im Kraftwerksmaßstab eingesetzt wird, sind die Gezeitenkraftwerke. Das mit 240 MW größte befindet sich an der Mündung der Rance bei St. Malo an der französischen Atlantikküste, weitere Anlagen existieren in Kanada und China. Südkorea plant zurzeit drei weitere Kraftwerke dieses Typs mit zusammen mehr als 1700 MW.



Abbildung 3
Schottische Wellen-
energieanlage Limpet

Quelle: Wavegen –
Voith Siemens Hydro
Power Generation

3.2 Osmoseenergie

Ein weiteres Verfahren zur Energieerzeugung beruht auf der Ausnutzung des osmotischen Druckes zwischen Süßwasser und Meerwasser, z. B. an einer Flussmündung mithilfe spezieller Membranen mit hoher Salzurückhaltung. Diese Technologie befindet sich zurzeit noch im Labormaßstab. Weltweit ist an Flüssen mit einem Durchfluss von über 500 m³/s theoretisch eine Leistung von ca. 730 GW erreichbar, bzw. etwa 2.000 TWh pro Jahr als nachhaltiges Potenzial.

3.3 Wellenenergie

Aber auch die Wellenenergie wird sich in den nächsten Jahren rasch entwickeln. Der erste Wellenenergiepark der Welt mit drei Anlagen vom Typ Pelamis mit je 750 kW, einem aus beweglichen Gliedern bestehenden schwimmenden System, das an eine Seeschlange erinnert, wird in Kürze vor Portugal in Betrieb gehen. In Spanien und Portugal sind weitere Parks im Megawattbereich mit Punktabsonern geplant. In Großbritannien wird in einem speziell ausgewiesenen Bereich der Nordsee ein Netzanschluss mit 20 MW Kapazität für die Installation von Wellenenergiewandlern, der sog. „Wavehub“ bereitgestellt. Insgesamt werden in den kommenden Jahren allein in Europa mindestens 300 Mio. Euro in Entwicklung und Bau von Meeresenergieanlagen investiert. Auf Grund der technischen Nähe zur Wasserkraft war es z. B. für die

Firma Voith Siemens Hydro Power Generation eine „logische Ergänzung zur klassischen Wasserkraft“, die schottische Firma Wavegen und ihr Konzept einer Luftstau erzeugenden küstengebundenen Anlage zu erwerben (Abb. 3). Eine Anlage dieses Typs soll in Kooperation mit der EnBW erstmalig auch in Deutschland an der Nordseeküste errichtet werden.

3.4 Nachhaltig nutzbare Potenziale

Die Nutzung vorwiegend küstennaher und aus heutiger Sicht technisch erreichbarer Meeresflächen ergibt unter Berücksichtigung von Wellen, Strömungen und Osmose ein weltweit nutzbares Potenzial von insgesamt etwa 5.000 TWh pro Jahr, also knapp ein Drittel des Weltstrombedarfs.

3.5 Forschungs- und Entwicklungsvorhaben

Zurzeit sind etwa 10 Forschungseinrichtungen, darunter das ISET, sowie etwa 20 Unternehmen aus Deutschland an Entwicklung und Herstellung von Komponenten und Systemen für die Nutzung der Meeresenergie beteiligt. Es könnte für viele Unternehmen aus der Wasserkraft oder Windenergie ein interessanter neuer Exportmarkt entstehen.

Dies war auch ausschlaggebend für das BMU, das ISET gemeinsam mit Industriepartnern erstmalig mit einem Forschungsprojekt zur

Abbildung 4
Meeresströmungsturbine Seaflow im Meeresarm der Severn, Nähe Bristol

Quelle: ISET

Abbildung 5
Fotomontage der geplanten 1MW-Anlage am Standort in Nordirland

Quelle:
Marine Current Turbines

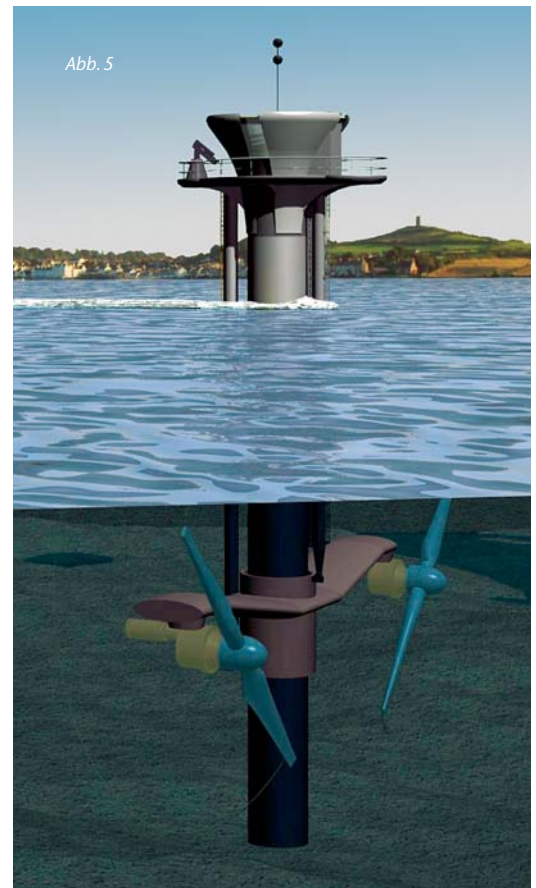


Weiterentwicklung einer Meeresströmungsturbine, der SEAFLOW-Anlage (Abb. 4), seit dem Jahr 2001 zu fördern. Das erste Projekt hat alle wesentlichen Projektziele erreicht und ist damit ein wichtiger Schritt zur Entwicklung marktfähiger Komponenten und Anlagen zur Stromerzeugung aus Meeresströmungen in Richtung auf eine Markteinführung der Technologie. Die Ergebnisse umfassen Maßnahmen zur Kostensenkung und zur Ertragssteigerung, zur Sicherstellung einer hohen Anlagenzuverlässigkeit sowie zur erhöhten Lebensdauer von Systemen und einzelnen Komponenten. Ein Nachfolgeprojekt wurde 2005 begonnen. Es umfasst die Entwicklung einer Doppelrotoranlage mit einer Leistung von 1MW (Abb. 5).

Auch hier fließt wieder Know-how des ISET und der Industrie aus der Entwicklung von Wind- und Wasserkraftanlagen ein. Die Installation des Prototyps ist für Anfang 2007 in Nordirland geplant. Darüber hinaus ist das ISET auch mit der Weiterentwicklung eines italienischen Vertikalachserkonzepts befasst.

Literatur

- [1] Windenergie in Deutschland – von der Vision zur Realität – Ausgewählte Ergebnisse aus dem Begleitprogramm WMEP zum Breitentest „250 MW Wind“, ISET, Kassel, März 2006



- [2] K. Rohrig, Online-Erfassung und Prognose der Windenergieeinspeisung, FGH-Fachtagung „Windenergie und Netzintegration“, Hannover, Februar 2005
- [3] Strategie der Bundesregierung zur Windenergienutzung auf See im Rahmen der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung, BMU, Januar 2002
<http://www.bsh.de/de/Meeresnutzung/Wirtschaft/Windparks/index.jsp>
- [4] Ökologische Begleitforschung zur Windenergienutzung im Offshore-Bereich der Nord- und Ostsee (BeoFINO): Abschlußbericht / Orejas, C. et al. Bremerhaven: Alfred-Wegener-Institut für Polar- u. Meeresforschung; Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz u. Reaktorsicherheit (BMU), 2005

Weiterführende Literatur:

Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung (WBGU), Springer, Berlin, 2003