

VORWORT

Hans van Steen

Referatsleiter, Reglementierung und Förderung erneuerbarer Energien,
Generaldirektion für Energie und Verkehr (GD TREN), Europäische Kommission



Ich freue mich, Ihnen die neue Ausgabe von *Windenergie – Die Fakten* vorstellen zu können, die von der European Wind Energy Association (EWEA) herausgegeben und als Teil des Programms „Intelligente Energie – Europa“ von der Europäischen Kommission gefördert wurde.

Auf Ebene der Europäischen Union (EU) stehen die Herausforderungen durch Energieversorgung und Klimawandel an erster Stelle der politischen Agenda. Das Potenzial der Windenergie, zu einem zentralen Baustein der Lösung zu werden, zeigt sich hierbei derzeit klarer als je zuvor. Durch den konkreten Beitrag zu sauberer und sicherer Energiegewinnung gewährleistet die Windenergie, dass ein steigender Anteil des Stroms ohne Rückgriff auf fossile Brennstoffe, ohne Kühlung durch kostbares Trinkwasser und ohne die Emission von Treibhausgasen oder gefährlichen Luftschadstoffen erzeugt wird.

Ein Ende der Erfolgsgeschichte der Windenergie in der EU ist nicht abzusehen. Viele Mitgliedstaaten haben sich bereits den Pionieren angeschlossen, und die Windenergie ist weiterhin eine der Stromerzeugungsformen mit dem stärksten Wachstum in Europa. Die Technologie der Windkraftanlagen wird fortlaufend verbessert. Umfassendere und effizientere Technologien werden entwickelt, und Offshore-Projekte gehen in Betrieb.

Die Europäische Kommission ist sich sicher, dass Europa noch über ein großes ungenutztes Potenzial für erneuerbare Energien verfügt. Das vereinbarte Ziel eines Anteils von 20 Prozent erneuerbarer Energien am Energiemix der EU bis 2020 ist damit so ehrgeizig wie erreichbar.

Diese Zielvorgabe lässt sich jedoch nur erfüllen, wenn die Beteiligten aller Ebenen sich entschieden dafür einsetzen. Das gilt auch für die nationalen Regierungen und die Branche der erneuerbaren Energien. Die Einspeisung und Einbindung großer Mengen von Windenergie in die Stromnetze und -märkte stellt die Branche vor bedeutende Herausforderungen, zu deren Bewältigung Forscher, Betreiber von Übertragungsnetzen, Stromanbieter, Behörden, politische Entscheidungsträger und andere Interessengruppen eng zusammenarbeiten und auf konstruktive Weise geeignete Lösungen finden müssen.

Diese Publikation bietet einen hervorragenden, leicht verständlichen und umfassenden Überblick über die verschiedenen relevanten Aspekte der Windenergie. In Anbetracht der wachsenden Bedeutung der Windenergie im europäischen Energiesektor dient sie als nützliches Bezugsdokument – nicht nur innerhalb der Branche, sondern auch für politische Entscheidungsträger.

VORWORT VON EWEA

Arthouros Zervos

Präsident der European Wind Energy Association



Vor fünf Jahren schrieb ich das Vorwort zu der Ausgabe von *Windenergie – Die Fakten* des Jahres 2004. In der kurzen Zeit seitdem haben sich große und positive Veränderungen für die europäische Windenergiebranche ergeben. Auf den größten Teil der Fragen zu den umweltbezogenen, regulierungstechnischen, technologischen, finanziellen und politischen Aspekten, die 2004 für die Branche noch offen waren, wurden mittlerweile zufrieden stellende Antworten gefunden.

Die installierte Gesamtkapazität für die Windenergie ist der wohl überzeugendste Beweis dieser rasanten Erfolgsgeschichte. Ende 2003 waren in den EU-15-Staaten Windenergieanlagen mit einer Kapazität von über 28.000 Megawatt (MW) installiert. Ende 2007 war in den auf 27 erweiterten EU-Staaten eine Kapazität von über 56.000 MW installiert.

Durch diese 56.000 MW wurden 3,7 Prozent des gesamten Strombedarfs der EU oder der Energiebedarf von 30 Millionen durchschnittlichen Haushalten in Europa gedeckt und 91 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen eingespart. Darüber hinaus konnten Milliarden Euro eingespart werden, die der Import von Treibstoff im Jahr 2007 erfordert hätte. 11 Milliarden Euro wurden in die Errichtung von Windenergieanlagen in Europa investiert.

Auch die politische Beachtung ist mit Klimawandel und der Frage nach der Energieversorgung in den vergangenen fünf Jahren gewachsen. Politiker suchen jetzt nach zugleich umsetzbaren wie effektiven Lösungen für die Herausforderungen durch den sprunghaft ansteigenden Ölpreis, die Erschöpfung der fossilen Brennstoffreserven, die Abhängigkeit von Energieimporten und die möglicherweise verheerenden Folgen der globalen Erwärmung. Die Volksvertreter bemühen sich mehr als je zuvor um Lösungen für diese komplexen und entscheidenden Probleme.

Daher hat die EU die Deckung von 20 Prozent des Energiebedarfs durch Wind und andere erneuerbare Quellen bis 2020 als verbindliches Ziel festgesetzt. Zur Erfüllung dieser Vorgabe muss über ein Drittel des europäischen Strombedarfs aus erneuerbaren Energiequellen stammen. Der erwartete Anteil der Windenergie liegt dabei bei 12 bis 14 Prozent (180 GW) des Gesamtbedarfs. Die Windenergie wird damit eine führende Position bei der kontinuierlichen Versorgung mit selbst produzierter grüner Energie einnehmen.

Für uns ist damit der richtige Zeitpunkt gekommen, eine aktualisierte Fassung von *Windenergie – Die Fakten* zu veröffentlichen, um die jüngsten Veränderungen dieser Europa- und weltweit schnell wachsenden Branche einzubeziehen. Sowohl der Markt insgesamt als auch die Größe der Anlagen sind seit 2003 in extremem Maß gewachsen und müssen neu berücksichtigt werden. Mit den neuen Kapazitäten müssen Aspekte wie der Zugang zum Netz, Bau und Verstärkung von Übertragungsleitungen und Netzbetrieb fair, effizient und transparent geregelt werden. Die relativ neue Offshore-Branche verfügt über ein beeindruckend großes Potenzial, aber dieser neue Bereich benötigt Unterstützung für die Startphase. Darüber hinaus müssen die Versorgungsengpässe überwunden werden, die durch dieses schnelle Wachstum hervorgerufen werden.

Ich hoffe, dass diese aktuelle Ausgabe von *Windenergie – Die Fakten* dazu beiträgt, den Weg für eine wirklich nachhaltige Zukunft zu bahnen. Ich bin davon überzeugt, dass die Windenergiebranche die ihr bevorstehenden Herausforderungen meistern und in Zukunft noch um ein Vielfaches erfolgreicher sein wird.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Arthouros Zervos'.

Arthouros Zervos
President, EWEA

DANKSAGUNGEN

Die European Wind Energy Association dankt allen Autoren dieser neuen Ausgabe von *Windenergie – Die Fakten*.

Teil I

Paul Gardner, Andrew Garrad, Lars Falbe Hansen, Peter Jamieson, Colin Morgan, Fatma Murray und Andrew Tindal von Garrad Hassan and Partners, Großbritannien (www.garradhassan.com); José Ignacio Cruz und Luis Arribas von CIEMAT, Spanien (www.ciemat.es); Nicholas Fichaux von European Wind Energy Association (EWEA) (www.ewea.org).

Teil II

Frans Van Hulle von EWEA und Paul Gardner von Garrad Hassan and Partners.

Teil III

Poul Erik Morthorst vom Risø DTU National Laboratory an der Technischen Universität Dänemark (www.risoe.dk); Hans Auer von der Energy Economics Group, Technische Universität Wien; Andrew Garrad von Garrad Hassan and Partners; Isabel Blanco von der Universidad de Alcalá, Spanien (www.uah.es).

Teil IV

Angelika Pullen vom Global Wind Energy Council (GWEC) (www.gwec.net); Keith Hays von Emerging Energy Research (www.emerging-energy.com); Gesine Knolle von EWEA.

Teil V

Carmen Lago, Ana Prades, Yolanda Lechón und Christian Oltra vom CIEMAT, Spanien (www.ciemat.es); Angelika Pullen vom GWEC; Hans Auer von der Energy Economics Group, Technische Universität Wien.

Teil VI

Arthouros Zervos von der Nationalen Technischen Universität Athen, Griechenland (www.ntua.gr); Christian Kjaer von EWEA.

Koordination

Zoé Wildiers, Gesine Knolle und Dorina Iuga, EWEA

Herausgeber

Christian Kjaer, Bruce Douglas, Raffaella Bianchin und Elke Zander, EWEA

Lektorat

Rachel Davies, Sarah Clifford, Chris Rose
Wir danken den unten aufgeführten Organisationen für wertvolle Informationen und aufschlussreiche Ergänzungen sowie vielen weiteren EWEA-Mitgliedern für ihre Beiträge und ihre Unterstützung.

Verband der Erzeuger erneuerbarer Energien (APPA), Spanien
IG Windkraft, Österreich
British Wind Energy Association
Bulgarischer Windenergieverband
Cyprus Institute of Energy
Tschechische Gesellschaft für Windenergie
Danish Wind Industry Association
ECN, Niederlande
Ente Per Le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente-Centro Ricerche (ENEA, Italien)
Estonian Wind Power Association
Finnish Wind Energy Association
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME, France)
Bundesverband WindEnergie e. V.
GE Wind Energy, Deutschland
Hellenic Wind Energy Association

IV WINDENERGIE - DIE FAKTEN - DANKSAGUNGEN

Horvath Engineering, Ungarn
Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
(INEGI, Portugal)
Irish Wind Energy Association
KEMA Power Generation and Sustainables, Niederlande
Latvian Wind Energy Association
Romanian Wind Energy Association
Slowakischer Verband für Windenergie
Swedish Defence Research Agency
Vestas Wind Systems, Dänemark
VIS VENTI Association for Supporting Wind Energy,
Polen

Schließlich dankt die European Wind Energy Association der Generaldirektion Energie und Verkehr der Europäischen Kommission (GD TREN) für die wertvollen Beiträge und die Unterstützung für dieses Projekt (Nr. EIE/07/230/SI2.466850).

Die in *Windenergie – Die Fakten* enthaltenen Informationen spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung der European Wind Energy Association oder der Europäischen Kommission wider.



WINDENERGIE - DIE FAKTEN

ZUSAMMENFASSUNG



ZUSAMMENFASSUNG

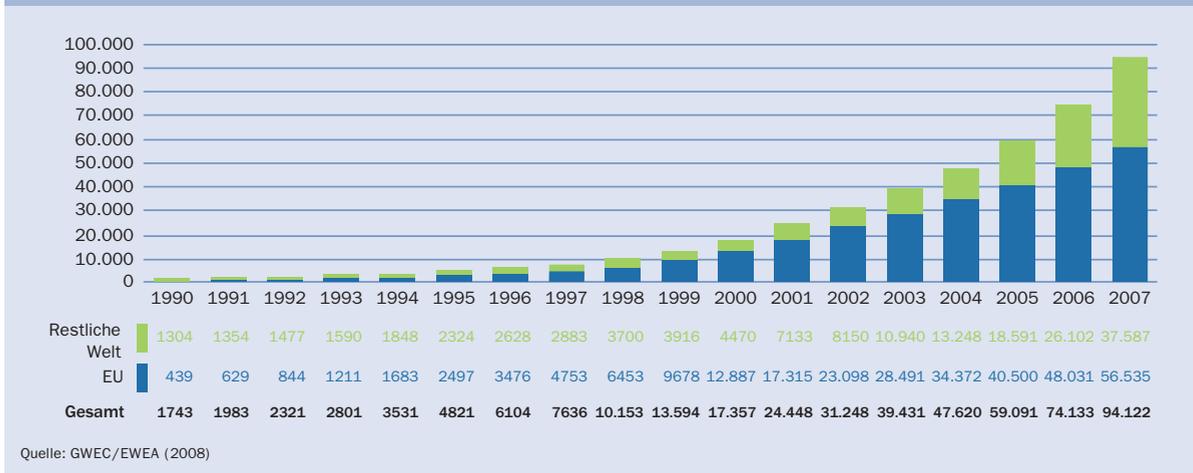
Seit der letzten Ausgabe von *Windenergie – Die Fakten* vom Februar 2004 hat die Windenergiebranche beeindruckende Wachstumsraten verzeichnet und steht jetzt ganz oben auf der politischen Agenda. Mit der drohenden Energiekrise werden die Rufe nach unmittelbaren und greifbaren Lösungen für die lange Reihe der Energie- und Klimafragen, die sich heute stellen, immer lauter. Die Windenergie ist genau die richtige Antwort darauf.

Voraussetzung für fachlich gut informierte politische Entscheidungen ist die profunde Kenntnis der Windenergiebranche. Dieser Band soll durch genaue Informationen über die Windenergiebranche einen Beitrag zur Verbreitung dieses Wissens leisten. *Windenergie – Die Fakten* bietet einen umfassenden Überblick zu den zentralen aktuellen Aspekten der Windenergie: Bewertung von Windressourcen, Technologie, Planung von Windparks, Offshore-Windenergie, Forschung und Entwicklung, Netzeinspeisung, wirtschaftliche Aspekte, Branche und Märkte, Nutzen für die Umwelt sowie Szenarien und Zielsetzungen.

Seit 2004 ist die Bereitstellung von Windenergie sprunghaft angestiegen. Die weltweit installierte Kapazität erhöhte sich bei einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von fast 25 Prozent von 40.000 MW Ende 2003 auf 94.000 MW Ende 2007. Europa ist dabei den Bereich der Windenergie-ietechnologie weltweit führend. 60 Prozent der weltweiten Kapazitäten waren Ende 2007 in Europa installiert, und der Marktanteil europäischer Unternehmen im Jahr 2007 betrug 66 Prozent. Die Anteile am Elektrizitätssektor betragen mittlerweile 21 Prozent in Dänemark und ca. 7 und 12 Prozent in Deutschland bzw. Spanien. Die Leistungen auf regionaler Ebene sind noch beeindruckender: In Schleswig-Holstein sind beispielsweise über 2.500 MW an Windkapazität installiert. Dadurch können 36 Prozent des regionalen Energiebedarfs gedeckt werden. In Navarra, Spanien, beläuft sich dieser Anteil sogar auf 70 Prozent.

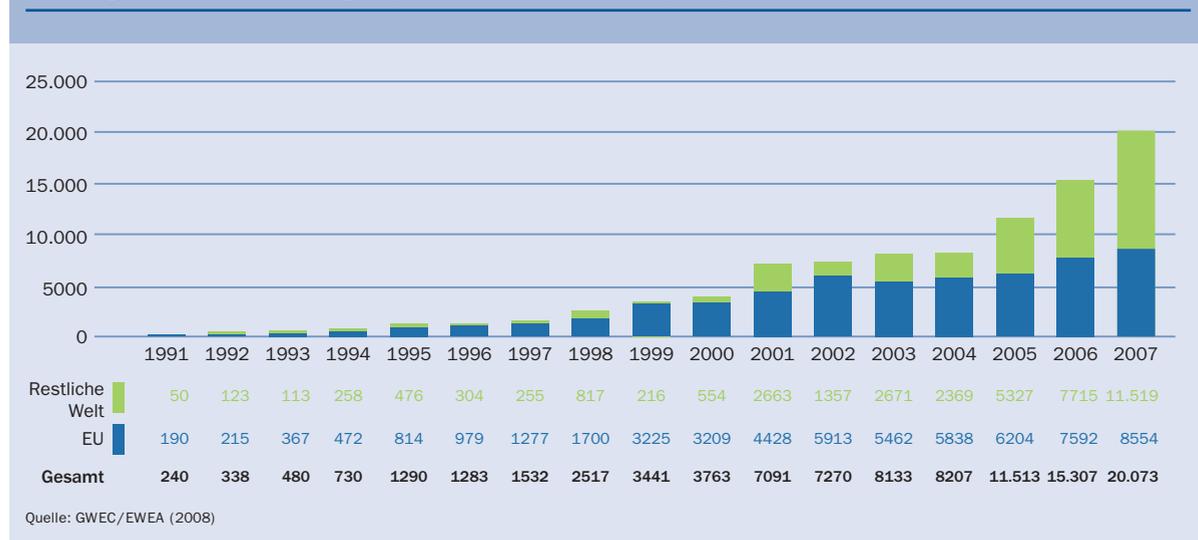
Ein großer Schritt nach vorn erfolgte im März 2007, als die Staatschefs der EU die Deckung von 20 Prozent des Energiebedarfs aus erneuerbaren Quellen bis zum

Abbildung S.1: Weltweite Gesamtkapazität der Windenergie 1990–2007 (in MW)



4 WINDENERGIE - DIE FAKTEN - ZUSAMMENFASSUNG

Abbildung S.2: Jährliche Windenergiekapazität weltweit 1991–2007 (in MW)



Jahr 2020 als verbindliches Ziel festlegten. Im Januar 2008 veröffentlichte die Europäische Kommission dann einen Gesetzentwurf über erneuerbare Energien, in dem ein langfristiger und zugleich flexibler EU-Rahmen vorgeschlagen wurde, durch den die massive Expansion der Windenergie in Europa gewährleistet werden soll. Sollte sich die Unterstützung von politischer Seite weiterhin so positiv gestalten, prognostiziert die EWEA für das Jahr 2010 eine in den EU-27-Staaten installierte Kapazität von 80.000 MW. Das würde einem Gesamtbeitrag zur Stromversorgung von fünf Prozent entsprechen. Bis 2020 wird diese Zahl voraussichtlich auf 12 bis 14 Prozent anwachsen. Wind wird dann den Energiebedarf von 107 Millionen durchschnittlichen europäischen Haushalten decken.

Teil I: Technologie

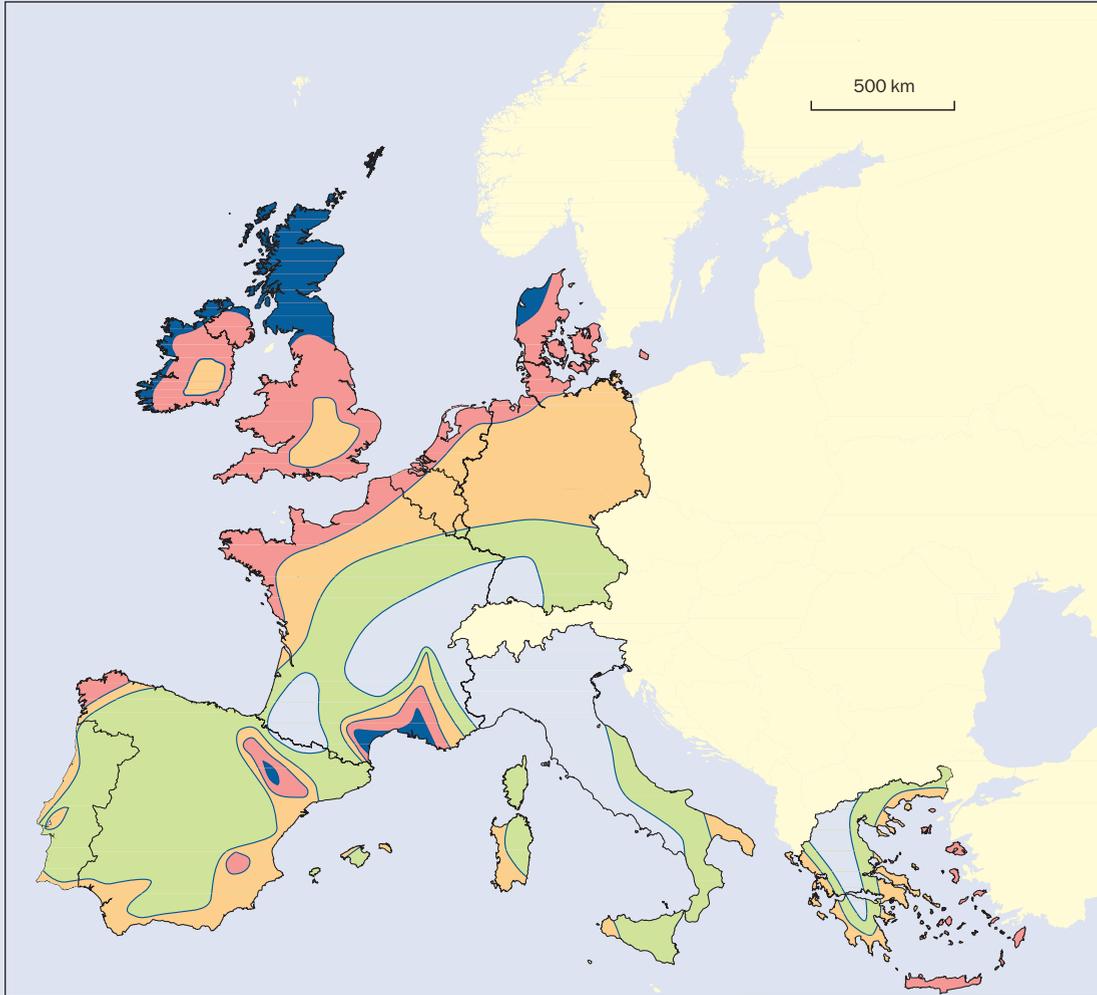
In Teil I werden alle Aspekte der Technologie für die Windbranche behandelt, die sich auf allen Gebieten rasch entwickelt hat. Viele Aspekte sind bereits erforscht, aber in vielen Bereichen bestehen weiterhin Lücken: in Bezug auf die Grundlagen der Meteorologie, der Aerodynamik und der Werkstoffkunde ebenso wie

hinsichtlich der angewandten Forschung, z. B. für Wartungsstrategien und die Planung von Windparks und Stromversorgungsnetzen. Darüber hinaus wurde eine Reihe von Konzepten für den Entwurf von Anlagen bisher nicht getestet, die jedoch möglicherweise eine ernsthafte Berücksichtigung verdienen. Dieser Teil beschreibt die Grundlagen, den aktuellen Stand und mögliche Zukunftstrends der Windtechnologie.

BEWERTUNG VON WINDRESSOURCEN

Die Verfahren zur Bewertung von Windressourcen haben sich bereits bewährt. In Kapitel I.1 wird die Bewertung von Windressourcen für große Gebiete beschrieben. Bei dieser Bewertung werden das verfügbare Potenzial einer Region sowie die besten Gebiete innerhalb dieser Region eingeschätzt. Daneben befasst sich dieser Bereich mit der Einschätzung der Windressourcen und der Energieerzeugung für einzelne Standorte. Die Genauigkeit der Schätzung zur Energieerzeugung ist für den Eigentümer wie für die das Projekt finanzierenden Organisationen von zentraler Bedeutung. Das Kapitel erläutert die lange Reihe der Faktoren, die die Energieproduktion beeinflussen können.

Abbildung S.3: European Wind Atlas, Anlagen an Land



Windkraft-Ressourcen in 50 m Höhe über dem Boden für fünf verschiedene Geländebedingungen										
	Windgeschütztes Gelände		Offenes Gelände		An der Meeresküste		Offenes Meer		Berge und Hügelketten	
	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²
	>6,0	>250	>7,5	>500	>8,5	>700	>9,0	>800	>11,5	>1800
	5,0–6,0	150–250	6,5–7,5	300–500	7,0–8,5	400–700	8,0–9,0	600–800	10,0–11,5	1200–1800
	4,5–5,0	100–150	5,5–6,5	200–300	6,0–7,0	250–400	7,0–8,0	400–600	8,5–10,0	700–1200
	3,5–4,5	50–100	4,5–5,5	100–200	5,0–6,0	150–250	5,5–7,0	200–400	7,0–8,5	400–700
	<3,5	<50	<4,5	<100	<5,0	<150	<5,5	<200	<7,0	<400

Quelle: Risø DTU

6 WINDENERGIE - DIE FAKTEN - ZUSAMMENFASSUNG

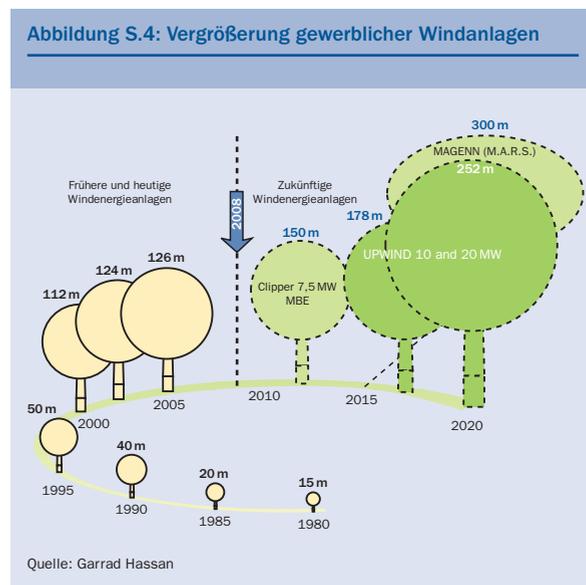
In Kapitel 1.2 wird außerdem die Prognostizierung abgedeckt, da dieser Bereich mittlerweile von großer Bedeutung für die Windbranche ist. In Abhängigkeit von der Struktur des Strommarktes können der Eigentümer des Projekts oder der Käufer der Energie durch genaue Prognosen zur Windenergieproduktion große finanzielle Vorteile erzielen. Auch die Betreiber von Elektrizitätsnetzen mit hohen Anteilen an Windenergie benötigen Prognosen zur Optimierung des Netzbetriebs.

WINDANLAGENTECHNOLOGIE

Die schnellen technischen Fortschritte lassen sich am deutlichsten an der Entwicklung der Windanlagentechnologie ablesen. In Kapitel 1.3 wird die rasante Entwicklung von Größe, Leistung und Komplexität von Windkraftanlagen illustriert, für die die Vergrößerung gewerblicher Anlagen ca. um den Faktor 100 in 20 Jahren der beste Indikator ist (Abbildung S.4). Von außen betrachtet mögen Windkraftanlagen wie einfache Maschinen wirken, tatsächlich jedoch besteht eine Reihe grundlegender Anforderungen, durch die sich diese Richtung der Ingenieurwissenschaften von allen anderen absetzt:

- Die Anlage muss als unbeaufsichtigtes Kraftwerk betrieben werden und mehr als nur Energie an das Stromnetz liefern;
- Die Verfügbarkeit von Wind variiert in einem Zeitrahmen, der von Sekunden bis zu mehreren Jahren reicht und damit allen Aspekten, von der mechanischen Belastung bis zur Energieerzeugung, einen Unsicherheitsfaktor hinzufügt;
- Die Technologie befindet sich bei den Energiekosten im Wettbewerb mit anderen erneuerbaren Quellen und herkömmlicher Energieerzeugung.

In Kapitel 1.3 werden daher die Fortschritte der Windanlagenentwicklung erläutert und erklärt, warum drehzahlvariable Drei-Blatt-Luvläufer mit Pitchregelung heutzutage vorherrschen. Die wichtigsten Faktoren für den Anlagenentwurf sind mittlerweile die Netzkompatibilität, die Energiekosten (dazu



zählt auch die Zuverlässigkeit), Lärmemissionen, optischer Eindruck und die Eignung in Bezug auf die Standortbedingungen.

Viele technische Fragen sind jedoch weiterhin ungeklärt. Zu den großen Anlagen, die aktuell produziert werden, zählen beispielsweise:

- Modelle mit langsam laufenden Generatoren großen Durchmessers;
- Modelle mit schnelllaufenden Generatoren und Getrieben;
- Mittlere Modelle mit mittelschnell laufenden Generatoren und weniger Getriebestufen.

Ebenso erstaunlich ist es, dass die optimalen Dimensionen von Windkraftanlagen für standardmäßige Windparks an Land eine noch unbekannt große sind. Das Kapitel erklärt eine Reihe dieser technischen Aspekte und schließt mit der Erläuterung einiger radikaler Alternativen.

PLANUNG VON WINDPARKS

In Kapitel 1.4 wird beschrieben, wie Windkraftanlagen zu Windparks zusammengefasst werden, welche Faktoren sich auf die Standortwahl auswirken und wie

Windparks errichtet werden. Die Entwicklung von Windparks ist ein entscheidender Faktor für Kostensenkung und die Akzeptanz durch die Öffentlichkeit. Dies gilt sowohl für Projekte an Land wie für Offshore-Projekte, insbesondere, weil manche Windparks mittlerweile größer als althergebrachte Elektrizitätswerke sind.

Die Anordnung von Windkraftanlagen innerhalb eines Windparks wirkt sich ganz eindeutig nicht nur auf die Energieproduktion aus, sondern auch auf den optischen Eindruck und die Geräuschbelastung für die Anwohner. Das Kapitel erläutert, wie die Planung durch die Verwendung speziell für die Windbranche entwickelter Software optimiert werden kann, damit solche Einschränkungen berücksichtigt werden.

Das Kapitel erörtert darüber hinaus die wichtigen Aspekte bei der Planung der Anlagenperipherie wie Bau- und Elektroarbeiten. Mit der wachsenden Erfahrung der Windbranche im Bau von Projekten unter unterschiedlichen Bedingungen steigt das Wissen in Bezug auf die Kosten und andere wichtige Aspekte, und die Risiken sind nicht mehr größer als bei anderen Bau- oder Kraftwerkprojekten vergleichbarer Größe.

OFFSHORE-WINDENERGIE

Kapitel 1.5 deckt das Thema der Offshore-Windenergie ab. Insbesondere wird die Erläuterung der Aspekte für Anlagen an Land in den Kapiteln 1.2 bis 1.4 um den Offshore-Bereich erweitert. Obwohl es sich hierbei derzeit noch um einen wesentlich kleineren Markt als dem der Anlagen an Land handelt, ist die Offshore-Windenergie in verschiedenen Ländern inzwischen zu einem grundlegenden Bestandteil der Energiepolitik geworden – und die Erwartungen sind hoch. Der Offshore-Windenergiemarkt ist durch Projekte gekennzeichnet, die wesentlich größer und risikoreicher sind als die Mehrheit der Projekte an Land, und es ist wahrscheinlich, dass derartige Projekte von verschiedenen Organisationen entwickelt und gebaut werden. Für die Errichtung dieser Anlagen wurden besondere Schiffe und Verfahren entwickelt. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Zugangsmöglichkeiten zu



Offshore-Anlagen einen Hauptfaktor für Kosten, Verfügbarkeit und Sicherheit bilden.

Auch die Anlagentechnologie von Offshore-Projekten ist eine andere: wichtige Gründe sprechen für wesentlich größere Dimensionen der einzelnen Anlagen, für die Kapazitäten von mindestens 5 MW angestrebt werden. Aufgrund der speziellen Umweltbedingungen und erhöhten Anforderungen an die Zuverlässigkeit bilden sich außerdem zunehmend subtilere Unterschiede bei der Technologie heraus. Die Wahrscheinlichkeit wirklich innovativer Entwicklungen ist beim Offshore-Markt möglicherweise größer als beim Markt für Landanlagen. Das Kapitel schließt daher mit einem Überblick zu so innovativen Konzepten wie schwimmenden Anlagen.

KLEINE WINDKRAFTANLAGEN

In Kapitel 1.6 wird das andere Ende des Spektrums beschrieben: Windkraftanlagen kleiner und sehr kleiner Größe, die zur Erfüllung einer Reihe unterschiedlicher

8 WINDENERGIE - DIE FAKTEN - ZUSAMMENFASSUNG

Bedarfsstrukturen neu aufkommen. Neben den traditionellen Bereichen der Stromversorgung ländlicher Gebiete und isolierter Gebäude sowie von Schiffen und Telekommunikationseinrichtungen haben die Aussichten auf eine große Nachfrage für Kleinkraftwerke in städtischen Gebieten die technische Entwicklung von kleinen Anlagenentwürfen vorangetrieben, die die Wirtschaftlichkeit deutlich verbessern könnten. Darüber hinaus begünstigen die steigenden Treibstoffpreise die Entwicklung von großen Wind-Diesel-Anlagen, für die der technische Aufwand sehr groß ist. Durch diese große Spanne an Märkten mit ihren jeweils besonderen Merkmalen gestaltet sich der Bereich für kleine Windenergieanlagen sehr viel vielfältiger als für herkömmliche, große Anlagen. Viele dieser Märkte verfügen über große Wachstumspotenziale.

FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

In Kapitel I.7 werden die Leistungen in Forschung und Entwicklung der Windtechnologie beschrieben. Ein verbreitetes Missverständnis ist, dass es sich bei der Windenergie um eine ausgereifte Technologie handelt und der Aufwand für Forschung und Entwicklung zurückgeschraubt werden kann. Darüber hinaus ergeben sich aus der europäischen Zielvorgabe von 20 Prozent Energie aus erneuerbaren Quellen weitere Herausforderungen. Die europäische Windenergieplattform TPWind (www.windplatform.eu) entwirft in ihrer kürzlich veröffentlichten Strategic Research Agenda, eine anspruchsvolle Vision für Europa, die bis 2030 eine Windenergiekapazität von 300 GW vorsieht. Das entspricht bis zu 28 Prozent des Stromverbrauchs der EU. Darüber hinaus umfasst das Panorama von TPWind ein Unterziel für Offshore-Windenergie, das sich im Jahr 2030 auf ca. 10 Prozent des Elektrizitätsbedarfs der EU belaufen soll. Als Zwischenziel sollen bis 2020 40 GW installiert sein – gegenüber derzeit 1 GW.

Forschungs- und Entwicklungsleistungen sind erforderlich, um die effiziente Umsetzung der Vision von

TPWind für die Windenergie zu gewährleisten und die Erreichung der Ziele zu unterstützen. TPWind hat entsprechende Prioritäten für Forschung und Entwicklung festgelegt, damit ihr Panorama der Windenergie im Jahr 2030 Realität wird. Es wurden vier thematische Bereiche definiert:

1. Windbedingungen;
2. Windanlagentechnologie;
3. Einspeisung von Windenergie;
4. Errichtung und Betrieb von Offshore-Anlagen.



Um die TPWind-Vision für das Jahr 2030 umzusetzen und Windenergie in großem Maßstab bereitzustellen, ist die Unterstützung durch ein stabiles und klar umrissenes wirtschaftliches, politisches und rechtliches Umfeld von entscheidender Bedeutung. Zur Marktstrategie zählen unter anderem die Kostensenkung und die effektive Integration der Windenergie in die natürliche Umwelt.

Die Finanzierung von Forschung und Entwicklung stellt einen Hauptaspekt dar, denn der gesamte gegenwärtige Einsatz für Forschung und Entwicklung im Bereich der Windenergie in der EU ist noch unzureichend, um die Ziele Europas im Hinblick auf den Anteil erneuerbarer Energien am Energiemix und die Lissaboner Ziele für Wachstum und Arbeit zu erreichen.

Das dringendste Problem ist dabei der Beitrag Europas. Der Europäische Strategieplan für Energietechnologie (SET-Plan) schlägt eine Reihe von Maßnahmen zur Lösung dieses Problems vor, darunter die Europäischen Industrie-Initiativen, zu denen auch die Europäische Windinitiative zählt.

Teil II: Netzeinspeisung

Die Verfügbarkeit von Windenergie weist zeitliche Schwankungen auf, hauptsächlich in Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen, die Änderungen innerhalb von Sekunden bis hin zu Jahren unterliegen können. Die Kenntnis dieser Schwankungen und ihre Vorhersagbarkeit besitzen für die Einspeisung von Windenergie in das Stromnetz und ihre optimale Nutzung höchste Priorität. Diese Aspekte werden in den Kapiteln II.1 und II.2 erläutert. Elektrizitätsversorgungsnetze sind durch Schwankungen im Hinblick auf Angebot und Nachfrage gekennzeichnet. Sie sind jedoch so ausgelegt, dass diese Schwankungen

über Auslegung, Steuerungssysteme und Verbund effektiv abgefangen werden.

Zur Verringerung von Schwankungen sollte die Leistung von Windkraftanlagen im größtmöglichen Umfang gebündelt werden, denn eine solche geografisch zusammengefasste Leistung von Windparks reduziert nicht nur Schwankungen, sondern führt außerdem zu einem Anstieg der stabilen Windenergiekapazität im Netz. Die Vorhersagbarkeit ist ein Schlüsselement für den Umgang mit den Schwankungen der Windkraft. Die Genauigkeit von Gesamtvorhersagen für gesammelte Windenergie steigt mit der Größe der Fläche und wirkt sich positiv auf die Menge der erforderlichen Regelenergieserven auf, insbesondere, wenn bei den Gate-Closure-Zeiten des Stromhandels die machbare Genauigkeit der Prognosen berücksichtigen.

Zu dem Vorteil der Reduzierung von Schwankungen gesellt sich bei der geografischen Zusammenfassung der Leistung von Windparks eine stabilere Windenergiekapazität im Netz.

Abbildung S.5: Beispiel für den Glättungsfaktor je nach geografischer Streuung



Anmerkung: In der Abbildung wird die Windenergieleistung pro Stunde für vier Situationen verglichen. Die Berechnung erfolgte auf Grundlage von simulierter Windenergie. Die Simulationen erfolgten anhand der Windgeschwindigkeiten im Dezember 2000 und der für das Jahr 2030 geschätzten Windenergiekapazitäten.
Quelle: www.trade-wind.eu

10 WINDENERGIE - DIE FAKTEN - ZUSAMMENFASSUNG

Die Integration von Windenergie in großem Maßstab wird in Abhängigkeit von der Prognose betrachtet, dass diese einen wesentlichen Anteil des zukünftigen Strombedarfs in Europa decken wird. Während die Windenergie im Jahr 2008 rund vier Prozent des Strombedarfs deckte, liegen die EWEA-Zielvorgaben dieses Anteils für die Jahre 2020 und 2030 in Abhängigkeit des zukünftigen Strombedarfs bei 12 bis 14 bzw. 21 bis 28 Prozent.

PLANUNG UND BETRIEB VON STROMNETZEN

Die zum Abfangen von Schwankungen in Angebot und Nachfrage festgelegten Kontrollverfahren und Netzreserven sind für den Ausgleich der vergrößerten Schwankungsbreite bei Windenergieanteilen von bis zu 20 Prozent mehr als ausreichend, selbst wenn der genaue Anteil von der Art des jeweiligen Netzes

abhängt. Die Schätzungen der zusätzlich erforderlichen Stromreserven belaufen sich bei einem Anteil von 10 Prozent Windenergie auf 2 bis 4 Prozent der installierten Windenergiekapazität, je nach Netzflexibilität, Qualität der kurzfristigen Prognosen und Gate-Closure-Zeiten der Energiemärkte. Bei höheren Anteilen könnten Änderungen der Netze und ihrer Betriebsart erforderlich werden, damit die Einspeisung von Windenergie weiterhin möglich ist. Dieses Thema wird in Kapitel II.3 behandelt. Zur Senkung von Kosten und Aufwand für die Einspeisung muss die Auslegung der Stromnetze flexibler werden. Diese Flexibilität kann durch die Kombination von anpassungsfähigen Kraftwerken, Speichersystemen, einer beweglichen Nachfrage, verfügbaren Verbundkapazitäten und elastischeren Regelwerken für den Stromhandel hergestellt werden.

Tabelle S.1 bietet einen detaillierten Überblick und eine Klassifizierung der Auswirkungen von Windenergie auf das Stromnetz.

Tabelle S.1: Auswirkungen von Windenergie auf Stromnetze, die Einspeisungskosten verursachen

	Auswirkung oder beeinflusstes Element	Gebiet	Zeitlicher Rahmen	Beitrag der Windenergie
Kurzfristige Auswirkungen	Spannungsregelung	lokal/regional	Sekunden/Minuten	Windparks können (dynamische) Spannungsunterstützung (in Abhängigkeit von der Auslegung) leisten.
	Produktionseffizienz von Wasser- und Wärmeenergie	Netz	1–24 Stunden	Auswirkungen in Abhängigkeit von der Betriebsart des Netzes und von kurzfristigen Prognosen
	Übertragungs- und Verteilungseffizienz	Netz oder lokal	1–24 Stunden	Je nach Anteil können Windparks zu zusätzlichen Investitionskosten oder Erträgen führen. Durch räumlich verteilte Windenergie können Netzverluste reduziert werden.
	Regelenergiereserven	Netz	Zwischen einigen Minuten und Stunden	Windenergie kann Teilbeitrag zu Primär- und Sekundärregelung leisten.
	Überschüssige (Wind)energie	Netz	Stunden	Verfügbare Windenergie übersteigt möglicherweise die Menge, die das Netz bei hohen Anteilen aufnehmen kann.
Langfristige Auswirkungen	Netz-zuverlässigkeit (ausreichende Erzeugung und Übertragung)	Netz	Jahre	Windenergie kann Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten (Kapazitätseffekt).

Quelle: EWEA

Abbildung S.6 stellt die verschiedenen Auswirkungen der Windenergie auf das Stromnetz grafisch dar. Sie bietet eine klare Darstellung der lokalen und netzweiten Auswirkungen sowie der kurz- und langfristigen Auswirkungen auf die verschiedenen betroffenen Aspekte des Stromnetzes, unter anderem die Netzinfrastruktur, die Netzreserven und die Netz-zuverlässigkeit.

AUFRÜSTUNG DER NETZINFRASTRUKTUR

Windenergie ist eine räumlich gestreute Energiequelle mit schwankender Leistung und erfordert daher Investitionen in die Infrastruktur und die Einführung neuer Technologie- und Netzregelungskonzepte, die in Kapitel II.4 vorgestellt werden. Die Einspeisung von Windenergie in großem Maßstab setzt eine deutliche Vergrößerung der Übertragungskapazität und andere Aufrüstungsmaßnahmen voraus, grenzübergreifend ebenso wie in den einzelnen Mitgliedstaaten der EU. Durch Netzoptimierung und andere „weiche“ Maßnahmen können erhebliche Verbesserungen erzielt werden. Dennoch wird auch die Errichtung neuer Leitungen

notwendig sein. Gleichzeitig müssen angemessene und gerechte Regelungen für den Netzzugang der Windenergie auch bei begrenzter Netzkapazität entwickelt werden. Ein grenzübergreifendes Offshore-Netz würde nicht nur den immensen Offshore-Ressourcen diesen Zugang ermöglichen, sondern auch den zwischenstaatlichen Energiehandel verbessern und Engpässe bei den vorhandenen Verbindungsleitungen abbauen. Für die Verbesserung der europäischen Netze müssen die Koordinierung der Netzplanung auf europäischer Ebene und die Zusammenarbeit aller beteiligten Parteien, insbesondere Stromnetzbetreiber, verstärkt werden. Auf Verteilungsebene ist eine aktivere Rolle bei der Netzregelung erforderlich. Es liegt im Interesse sowie der Windbranche als auch des Elektrizitätsbinnenmarktes, die Eignung des Netzes für die regionale und grenzübergreifende Stromübertragung zu steigern.

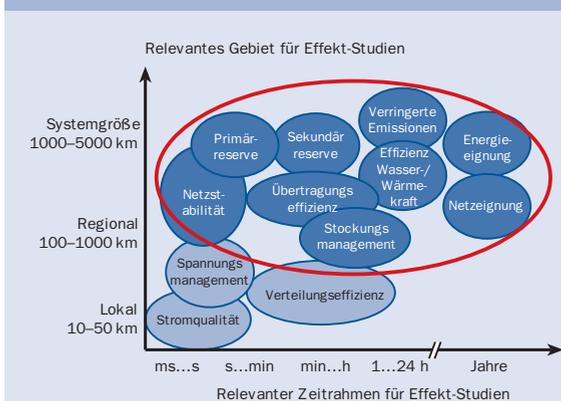
Die Abbildungen S.7 bis S.9 zeigen drei Beispiele für Offshore-Netzkonfigurationen in der Nordsee.

BEDINGUNGEN DES NETZANSCHLUSSES

Die einzelnen technischen Anforderungen der Grid Codes in Bezug auf Toleranz, Regelung von Wirk- und Blindleistung, Schutzvorrichtungen und Stromqualität befinden sich in einem Revisionsprozess, weil der Anteil der Windenergie steigt und so weitere Kraftwerksleistungen hinzukommen, z. B. die Bereitstellung von Regelenergie oder die Lieferung von Unterstützungsdiensten für Stromnetze (Kapitel II.5). Möglicherweise wird es auch zu einer Entwicklung von Märkten für Steuerungsdienstleistungen anstelle der Erfüllung von Pflichtanforderungen kommen. Wirtschaftlich wäre dies prinzipiell sinnvoll, denn so würde der für die Erbringung der Dienstleistung am besten geeignete Generator den Zuschlag erhalten.

In dem Maß, in dem der Anteil der Windenergie wächst, steigt auch die Notwendigkeit für die Entwicklung einer abgestimmten Reihe von Grid-Code-Anforderungen. Windenergiebranche und Netzbetreiber müssten sich gemeinsam darum bemühen.

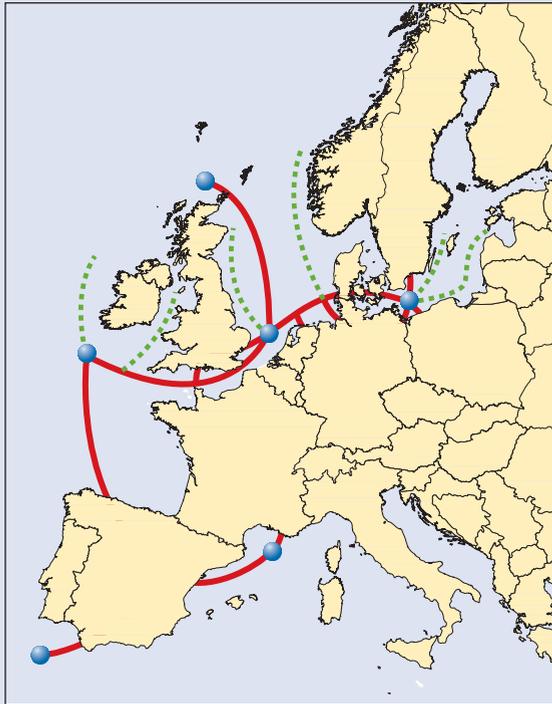
Abbildung S.6: Auswirkungen von Windenergie auf das Stromnetz



Anmerkung: Aspekte, die unter Task 25 fallen, sind rot markiert.
Quellen: IEA Wind Task 25; Holtinnen (2007)

12 WINDENERGIE - DIE FAKTEN - ZUSAMMENFASSUNG

Abbildung S.7: Entwurf eines Hochspannungs-Supernetzes für die Übertragung von Windenergie in ganz Europa

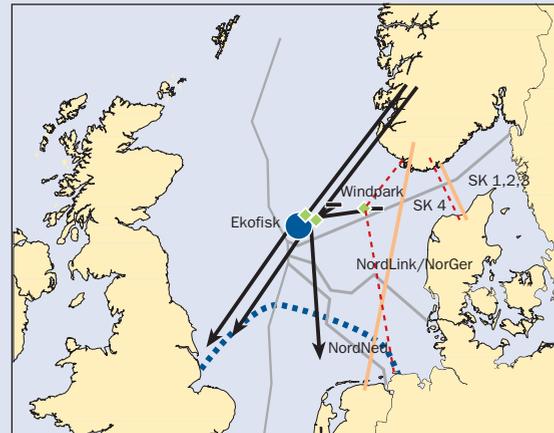


Quelle: Dowling und Hurley (2004)

BEITRAG DER WINDENERGIE ZUR VERSORGUNGSSICHERHEIT

Bei geringen Anteilen von Windenergie entspricht ihr relativer Kapazitätseffekt (der Anteil der „gesicherten Leistung“ an der gesamten installierten Windenergiekapazität) ungefähr der durchschnittlichen Erzeugungsleistung (Lastfaktor) für einen gegebenen Zeitraum, normalerweise den Moment der größten Nachfrage. Für die nordeuropäischen Länder beläuft sich diese Zahl an Land gewöhnlich auf 25 bis 30 Prozent und für Offshore-Projekte auf 50 Prozent. Mit steigenden Windenergieanteilen im Stromnetz verringert sich der relative Kapazitätseffekt. Daraus

Abbildung S.8: Statnett-Vorschlag für ein Offshore-Netz



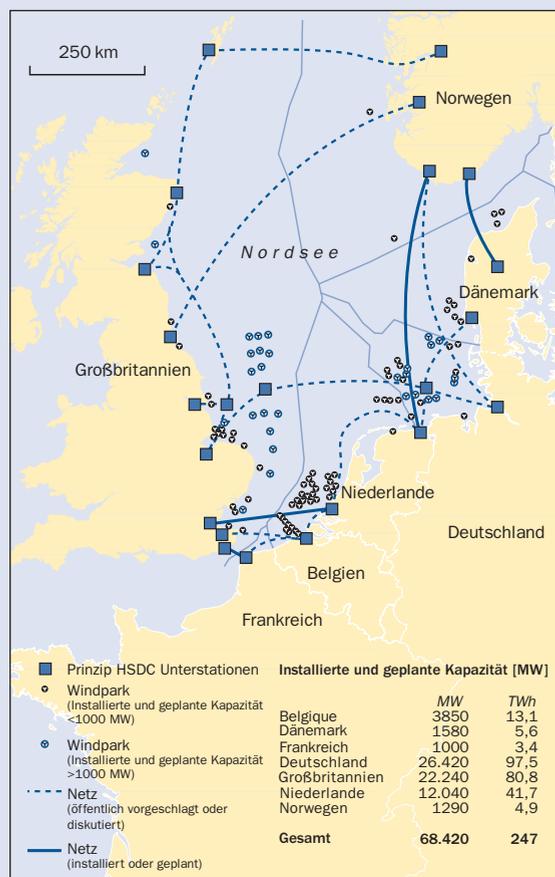
Quelle: Statnett (2008)

folgt jedoch nicht, dass weniger herkömmliche Kraftwerksleistung ersetzt wird, wie in Kapitel II.6 erläutert wird, sondern nur, dass der Energieanteil für eine Windkraftanlage, die neu an ein Netz mit hohen Windenergieanteilen angeschlossen wird, weniger herkömmliche Kapazitäten als die bereits an das Netz angeschlossenen Anlagen übernimmt.

MARKTMODELLE

Im Interesse der wirtschaftlich rentablen Integration der Windenergie sind Änderungen der Marktregelungen in ganz Europa erforderlich, damit die Märkte schneller und mit kürzeren Gate-Closure-Zeiten arbeiten (meist 3 Stunden oder weniger im Voraus). Dadurch werden Prognoseunsicherheit und Regelenergiebedarf mit sehr kurzen Fristen verringert. Erhebliche weitere wirtschaftliche Vorteile werden durch die räumliche Ausdehnung des Marktes und der Regelenergie leistenden Gebiete sowie durch entsprechende Marktregelungen für den grenzübergreifenden Stromhandel erwartet.

Abbildung S.9 In der Greenpeace-Studie analysiertes Offshore-Netz

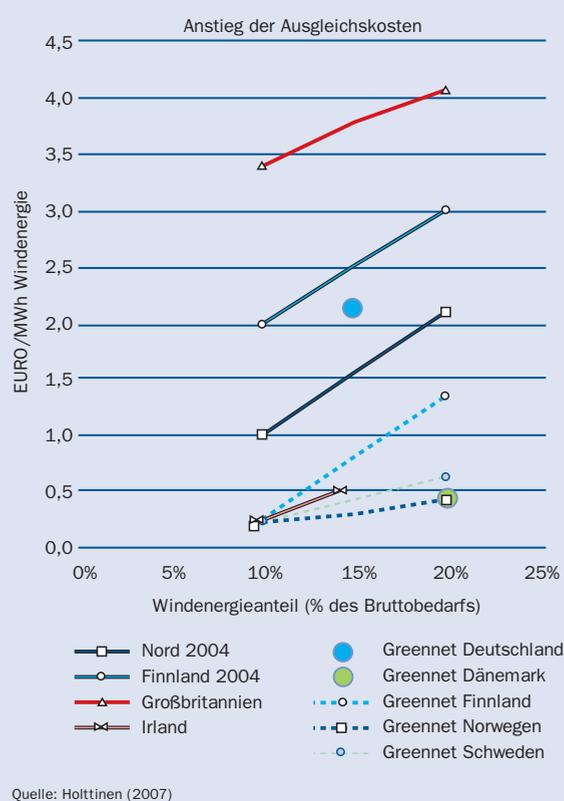


Quelle: Woyte (2008)

WIRTSCHAFTLICHKEIT DER EINSPEISUNG VON WINDENERGIE

Die Einspeisung großer Mengen an Windenergie in die Stromnetze zieht eine Reihe positiver und negativer wirtschaftlicher Konsequenzen nach sich. Die Kosten der Einspeisung von Windenergie leiten sich hauptsächlich aus zwei Faktoren ab: der Regellenergiebedarf und die Netzinfrastruktur (Kapitel II.7). Die zusätzlichen Kosten für die Regellenergie im Stromnetz

Abbildung S.10 Ergebnisse von Schätzungen für die durch die Windenergie verursachte Erhöhung der Kosten für Regellenergie und Betrieb



ergeben sich aus der grundsätzlich veränderlichen Natur der Windenergie. Dadurch werden Änderungen für andere Generatoren erforderlich, damit unerwartete Diskrepanzen zwischen Angebot und Nachfrage abgefangen werden können. Auf nationaler Ebene durchgeführte Untersuchungen haben ergeben, dass diese Zusatzkosten jeweils nur einen kleinen Anteil der Kosten für die Erzeugung von Windenergie und der Gesamtkosten für die Regellenergie des Stromnetzes darstellen.

Abbildung S.10 stellt die Kosten dar, die in verschiedenen Studien in Abhängigkeit vom Anteil der Windenergie ermittelt wurden. Die Kosten für

14 WINDENERGIE - DIE FAKTEN - ZUSAMMENFASSUNG

Regelenergie steigen linear mit dem Anteil der Windenergie, wobei die absoluten Beträge gering bleiben und bei einem Anteil von 20 Prozent in jedem Fall unter 4 €/MWh liegen (meist unter 2 €/MWh).

Die Kosten für die Netzausrüstung ergeben sich aus dem Anschluss der Windenergieanlagen an das Netz und aus der zusätzlichen Kapazität, die für die Übertragung der erhöhten Leistungsflüsse in den Übertragungs- und Verteilungsnetzen erforderlich ist. Darüber hinaus müssen die Stromnetze für eine verbesserte Spannungsregelung ausgerüstet werden, und um die Vorteile, die der kontinentale Maßstab der Windenergie bietet, voll ausschöpfen zu können, sind größere grenzübergreifende Verbundkapazitäten vonnöten. Jede Verbesserung der Infrastruktur, die diesen Bedarf erfüllt, verhilft den Stromnetzen zu einer ganzen Reihe an Vorteilen. Daher sollten diese Kosten nicht ausschließlich von der Windenergieerzeugung getragen werden müssen.

Die Kosten für die Anpassung von Stromnetzen mit einem hohen Windenergieanteil wachsen fast linear zur Erhöhung dieses Anteils. Die Bestimmung eines entsprechenden „wirtschaftlichen Optimums“ ist keine leichte Aufgabe, da die Kosten auch Vorteile mit sich bringen, unter anderem erhebliche Senkungen des Verbrauchs fossiler Treibstoffe und Kostensenkungen durch geringere Energieabhängigkeit. Diese positiven Effekte sind bereits als Preissenkungen an denjenigen Strombörsen spürbar, an denen große Mengen von Windenergie angeboten werden. Aus den bisher durchgeführten Studien geht bei einer Hochrechnung der Ergebnisse auf hohe Windenergieanteile klar hervor, dass die Einspeisung von mehr als 20 Prozent Windenergie in das Stromnetz der EU wirtschaftlich vorteilhaft wäre.

Sowohl Untersuchungen als auch Erfahrungen zeigen eindeutig, dass die Einspeisung der vorgesehenen Windenergiekapazität in Europa für 2020, 2030 und danach machbar ist, und bieten entsprechende Lösungen an. Die aktuell dringendste Frage stellt sich in erster Linie nach der wirtschaftlichsten Lösung der

Probleme bei Auslegung und Betrieb von Energieerzeugungssystemen, Ausrüstung von Stromnetzen, Regelungen für den Netzanschluss und Modellen für den Stromhandel.

Eine der Herausforderungen ist die Schaffung angemessener Marktregelungen, zu denen auch Anreize zur Entwicklung der Energieerzeugung und -übertragung in Richtung auf die Fähigkeit zur Abfederung schwankender Leistung und dezentralisierter Generierung zählen, insbesondere durch eine erhöhte Flexibilität und größere Verbundkapazitäten. Für die Erarbeitung einer technischen und wissenschaftlichen Grundlage zu den Aspekten Netzausrüstung und Marktregelung sind Studien auf europäischer Ebene erforderlich.

Teil III: Wirtschaftlichkeit von Windenergie

Die Windenergie entwickelt sich in Europa und weltweit gleichermaßen mit großer Geschwindigkeit. In den vergangenen 15 Jahren ist die weltweit installierte Windenergiekapazität von ca. 2,5 GW im Jahr 1992 auf über 94 GW Ende 2007 angewachsen. Das entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von über 25 Prozent. Durch die fortlaufende Verbesserung der Anlageneffizienz und gestiegene Treibstoffpreise steigt die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit der Windenergie gegenüber der herkömmlichen Energieerzeugung. An Standorten mit hohen Windgeschwindigkeiten an Land gilt Windenergie mittlerweile sogar als voll wettbewerbsfähig.

WINDENERGIE AN LAND

Die Kapitalkosten für Windenergieprojekte an Land werden in Kapitel III.1 behandelt; sie sind in erster Linie durch die Kosten der Windkraftanlagen bestimmt. Die Gesamtinvestitionskosten für eine typische, in Europa installierte Anlage belaufen sich auf ca. 1,23 Millionen Euro pro MW. Darin sind alle Zusatzkosten für Fundamente, Elektroinstallation und Beratung



enthalten (Preise von 2006). Die Hauptkosten sind wie folgt strukturiert (Näherungswerte): Anlage 76 Prozent, Netzanschluss 9 Prozent, Fundamente 7 Prozent. Andere Kostenanteile, z. B. Regelungssysteme und Grundstücke, machen nur einen kleinen Bruchteil der Gesamtkosten aus. Die Gesamtkosten pro kW installierte Windenergiekapazität variieren je nach Land stark und liegen zwischen 1.000 €/kW und 1.350 €/kW.

Tabelle S.2: Kostenstruktur einer typischen, in Europa installierten 2-MW-Windenergieanlage (2006 – €)

	Investition (1.000 €/MW)	Anteil (%)
Anlage (ab Werk)	928	75,6
Fundamente	80	6,5
Elektroinstallation	18	1,5
Netzanschluss	109	8,9
Regelungssysteme	4	0,3
Beratung	15	1,2
Grundstück	48	3,9
Finanzkosten	15	1,2
Straßenzugang	11	0,9
Gesamt	1227	100

Anmerkung: Vom Verfasser auf Grundlage ausgewählter Daten für installierte Windenergieanlagen in Europa berechnet.

Quelle: Risø DTU

Drei Haupttendenzen haben in den letzten Jahren die Entwicklung von Windenergieanlagen mit Netzanschluss bestimmt:

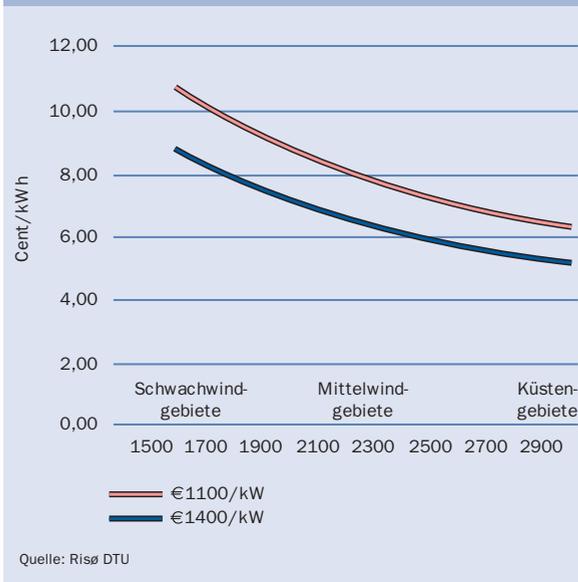
1. Anlagen werden höher und größer;
2. Die Effizienz der Anlagenproduktion ist fortlaufend gestiegen;
3. Die Investitionskosten pro kW sind im Allgemeinen gesunken, trotz einer Abweichung von diesem Trend in den letzten drei bis vier Jahren.

2007 machten Anlagen der MW-Klasse (über 1 MW) einen Marktanteil von über 95 Prozent aus. Für kleinere Anlagen verblieb damit ein Anteil von weniger als 5 Prozent. Im MW-Segment werden Anlagen mit Kapazitäten von 2,5 MW und mehr immer wichtiger, auch für Standorte an Land. Die Leistung der Anlage wird durch die Windverhältnisse am jeweiligen Standort, die Nabenhöhe der Anlage und der Effizienz bei der Erzeugung bestimmt. Damit führt bereits eine größere Anlagenhöhe zu einer gesteigerten Energieproduktion. Auch die Verfahren zur Messung und Bewertung der Windgeschwindigkeit an den einzelnen Standorten haben sich in den vergangenen Jahren stark entwickelt. Damit konnten die Standortwahl und die Wirtschaftlichkeit neuer Anlagen verbessert werden.

Die Effizienz der Stromerzeugung aufgrund optimierter Ausrüstung konnte ebenfalls erheblich gesteigert werden. Zwischen den späten 80er Jahren und dem Jahr 2004 verringerte sich die Gesamtinvestition pro Rotorfläche um über 2 Prozent. Im Jahr 2006 stiegen die Gesamtinvestitionskosten dagegen im Vergleich zu 2004 um rund 20 Prozent. Diese Entwicklung ist in erster Linie einem deutlichen Anstieg der globalen Nachfrage für Windenergieanlagen bei steigenden Rohstoffpreisen und Lieferengpässen geschuldet. Vorläufige Daten weisen darauf hin, dass die Preise 2007 weiter gestiegen sind. Die Energieerzeugungskosten für eine 2-MW-Windenergieanlage liegen derzeit je nach Windverhältnissen am entsprechenden Standort zwischen 5,3 und 6,1 ct€/kWh. Laut Analysen von Erfahrungskurven wird ein Rückgang

16 WINDENERGIE - DIE FAKTEN - ZUSAMMENFASSUNG

Abbildung S.11: Geschätzte Kosten pro kWh Windenergie in Abhängigkeit von den Windverhältnissen am jeweiligen Standort (Anzahl der Stunden bei Vollast)



der Kostenspanne auf 4,3 bis 5,5 ct€/kWh bis 2015 erwartet.

OFFSHORE-ENTWICKLUNG

Offshore-Windenergie (Kapitel III.2) macht einen Anteil von nur einem Prozent der gesamten weltweit installierten Windenergiekapazität aus, und die Entwicklung dieses Bereichs konzentriert sich vorrangig auf die Nord- und Ostsee. Ende 2007 war eine Offshore-Kapazität von über 1.000 MW installiert, die sich auf fünf Länder verteilte: Dänemark, Irland, Niederlande, Schweden und Großbritannien. Der Großteil dieser Kapazität wurde in relativ flachen Gewässern (Tiefen von max. 20 m) und in Entfernungen von höchstens 20 km vor der Küste installiert, um die Kosten für Fundamente und Seekabel möglichst gering zu halten.

Ebenso wie die Kosten für Anlagen an Land sind auch die Kosten für Offshore-Kapazitäten in den letzten Jahren gestiegen. Die Investitionskosten für einen

neuen Offshore-Windpark werden auf durchschnittlich 2,0 bis 2,2 Millionen Euro pro MW für küstennahe Projekte in flachen Gewässern geschätzt. Die Hauptunterschiede in der Kostenstruktur im Vergleich zu Anlagen an Land entstehen durch teurere Fundamente, die Transformatorenstation und Seekabel. Die Kosten für mit Offshore-Anlagen erzeugten Strom belaufen sich auf ca. 6 bis 8 ct€/kWh. Die Unterschiede ergeben sich in erster Linie aus den verschiedenen Wassertiefen, der Entfernung zur Küste und den Investitionskosten.

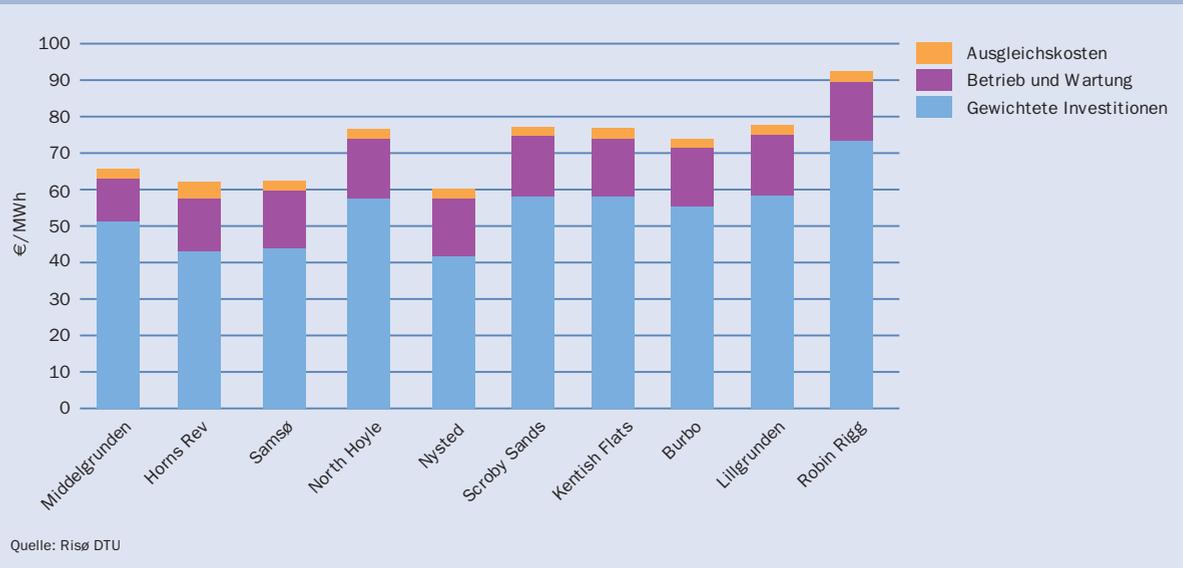
FINANZIERUNG

Die Unternehmensstruktur der Windenergiebranche befindet sich in einem Veränderungsprozess. Obwohl es weiterhin viele kleine Projekte in Privatbesitz gibt, ist eine starke Verlagerung auf größere Projekte in der Hand von Versorgungsunternehmen zu verzeichnen. Dieser Trend wird in Kapitel III.3 erläutert. Durch diese Verlagerung stehen der Branche erweiterte finanzielle Ressourcen zur Verfügung, womit die Abhängigkeit von Banken für die Finanzierung in der Anfangsphase verringert wird. Finanzkräftige Sponsoren bilden einen weiteren neuen Aspekt des Panoramas. Die Projekte werden immer größer, und der Offshore-Bereich boomt. Diese Entwicklung ist positiv, denn Banken bevorzugen Großprojekte. Bei einer allgemeinen Verschlechterung der wirtschaftlichen Lage wird möglicherweise die Projektfinanzierung leiden, aber die energische Befürwortung erneuerbarer Energien durch Politik und Umweltschutz bedeutet auch, dass die Finanzierung von Windenergie trotzdem als attraktive Option gilt.

ENERGIEPREISE UND FÖRDERMAßNAHMEN

Bei der Gruppierung der unterschiedlichen Fördermaßnahmen für Strom aus erneuerbaren Energien (RES-E) wird zwischen direkten und indirekten politischen Instrumenten unterschieden (Kapitel III.4). Direkte politische Maßnahmen zielen auf die Ankurbelung der schnellen Installation von RES-E-Technologien ab,

Abbildung S.12: Geschätzte Produktionskosten für ausgewählte Offshore-Windparks einschließlich Kosten für Regenergie (Zahlen für 2006)



während indirekte Instrumente sich auf die Verbesserung der langfristigen Rahmenbedingungen richten. Neben Regelungsinstrumenten gibt es auch freiwillige Initiativen zur Förderung von RES-E-Technologien, die in den meisten Fällen von der Bereitschaft der Verbraucher ausgehen, höhere Tarife für grünen Strom zu zahlen. Andere wichtige Kriterien für die Klassifizierung sind die Frage, ob sich die Instrumente auf den Preis oder auf die Menge richten und ob die Investitionen oder die Energieerzeugung gefördert werden. Bei der Prüfung und Bewertung der verschiedenen RES-E-Fördermodelle ist es wichtig, den Erfolg der verschiedenen Instrumente an den folgenden Kriterien zu messen:

- Effektivität: Haben die RES-E-Förderprogramme im Verhältnis zum zusätzlichen Potenzial zu einer verstärkten Bereitstellung von Kapazitäten aus erneuerbaren Energien geführt?
- Wirtschaftliche Effizienz: Wie verhält sich die absolute Förderung zu den tatsächlichen Erzeugungskosten von RES-E-Generatoren? Wie hat sich die Förderung in zeitlicher Hinsicht entwickelt?

Einzelinstrumente reichen im Allgemeinen nicht aus, um das langfristige Wachstum der erneuerbaren Energien anzukurbeln, unabhängig davon, ob es sich um ein nationales oder internationales Förderprogramm handelt.

AUSWIRKUNG DER WINDENERGIE AUF DIE ENERGIEPREISE AM SPOTMARKT

In einigen Ländern steigt der Anteil der Windenergie an der gesamten Energieerzeugung (Kapitel III.5). Diese Tendenz ist in Dänemark, Spanien und Deutschland mit Windenergieanteilen von 21, 12 und 7 Prozent besonders deutlich. Die Windenergie hat sich in diesen Ländern zu einem wichtigen Akteur auf dem Energiemarkt entwickelt und kann die Energiepreise stark beeinflussen. Da die Grenzkosten der Windenergie sehr niedrig sind (da keine Treibstoffkosten anfallen), steigt diese Energieform im unteren Bereich der Angebotskurve ein. Auf diese Weise wird die Kurve nach rechts verschoben, und die

18 WINDENERGIE - DIE FAKTEN - ZUSAMMENFASSUNG

Energiepreise sinken. Die Größenordnung der Preisentwicklung hängt dabei von der Preiselastizität der Nachfrage für Energie ab.

Wenn Windenergie einen großen Anteil des Energieangebots stellt, ist es im Allgemeinen wahrscheinlich, dass die Energiepreise in windstarken Zeiträumen fallen und in windschwache Phasen steigen. Eine in Dänemark durchgeführte Studie ergab, dass die Strompreise für die Verbraucher (unter Ausschluss von Übertragungs- und Verteilungspreis sowie der Umsatzsteuer und anderer Steuern) zwischen 2004 und 2007 ohne Windenergie rund 4 bis 12 Prozent höher gewesen wären. Das heißt, dass die Stromverbraucher im Jahr 2007 durch die Senkung der Strompreise aufgrund von Windenergie ca. 0,5 ct€/kWh sparen konnten. Diese Zahl muss neben den Einspeisetarif von ca. 0,7 ct€/kWh gestellt werden, den die Verbraucher für Windenergie zahlen. Die Kosten von Windenergie sind für die Verbraucher damit weiterhin höher als der Nutzen, aber in jedem Fall wird durch die niedrigeren Spotmarktpreise eine deutliche Senkung der Nettoausgaben erreicht.

Die Analyse berücksichtigt die Auswirkungen der Windenergie auf die Preise am Spotmarkt durch die Quantifizierung mit Analysen der Preisstruktur.

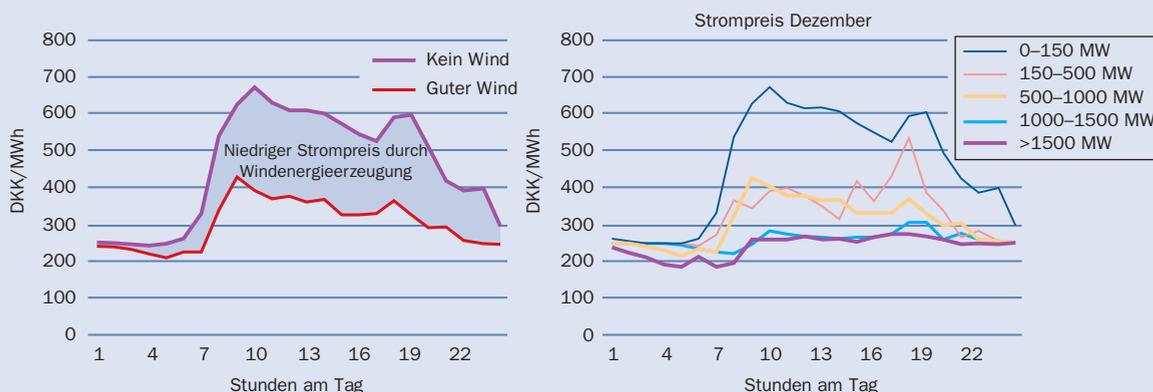
Dazu wird eine Bezugsgröße festgelegt, die einem Zustand mit einem Windenergieanteil im Stromnetz von null Prozent entspricht. Anschließend wird eine Reihe von Stufen mit steigenden Windenergieanteilen definiert und anhand der Bezugsgröße der Einfluss der Windenergie ermittelt. Diese Methode wird im linken Diagramm in Abbildung S.13 dargestellt. Der schraffierte Bereich zwischen den beiden Kurven stellt dabei den ungefähren Wert der Windenergie in Bezug auf niedrigere Energiekosten am Spotmarkt dar.

WINDENERGIE UND KONVENTIONELLE ENERGIEERZEUGUNG

Grundsätzlich bestimmen vier Elemente die Kosten herkömmlicher Stromproduktion:

1. Treibstoff;
2. CO₂-Emissionen (gemäß den Vorgaben des EU-Emissionshandels für CO₂);

Abbildung S.13: Auswirkungen der Windenergie auf den Energiepreis am Spotmarkt im westdänischen Stromnetz, Dezember 2005



Quelle: Risø DTU

3. Betrieb und Wartung;
4. Kapital einschließlich Planung und Baustellenfertigung.

Beim Einsatz von Windenergie werden die gesamten Kosten für Treibstoff und CO₂ sowie ein beträchtlicher Anteil der Betriebs- und Wartungskosten herkömmlicher Kraftwerke eingespart. Die Höhe der eingesparten Kapitalkosten hängt davon ab, in welchem Umfang die Windenergiekapazität Investitionen in neue herkömmliche Kraftwerke vermeiden kann. Dieser Aspekt steht in einem direkten Zusammenhang mit der Art der Einbindung von Windenergie in das Stromnetz.

Studien haben gezeigt, dass die Kosten für die Einspeisung der von Natur aus variablen Windenergie bei ca. 0,3 bis 0,4 ct€/kWh der erzeugten Windenergie liegen, auch bei relativ hohen Anteilen von Windkraft an der gesamten Energieproduktion (je nach Betriebsart ca. 20 Prozent). Die Abbildung auf S.14 stellt die

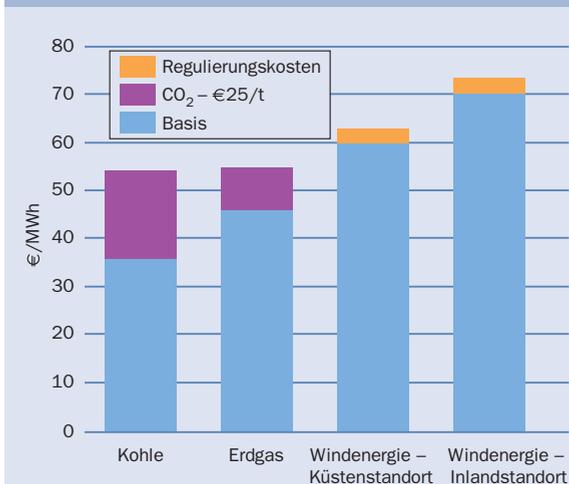
Ergebnisse der Fallstudie dar, für die angenommen wird, dass die beiden herkömmlichen Kraftwerke 2010 in Betrieb gehen.

Wie der Fallstudie entnommen werden kann, sind die Kosten der erzeugten Energie bei herkömmlichen Kraftwerken niedriger als bei Windenergieanlagen, sofern geringe Treibstoffpreise zugrunde gelegt werden. An einem europäischen Binnenstandort liegen die Kosten für Windenergie durchschnittlich 33 bis 34 Prozent über den Kosten für Energie aus Erdgas und Kohle (Kapitel III.6).

Diese Berechnung geht von den Annahmen im World Energy Outlook zu den Treibstoffpreisen aus, wobei ein Rohölpreis von 59 US\$/bbl für 2010 angenommen wird. Rohöl ist derzeit (Mitte 2008) auf den enormen Preis von 147 US\$/bbl gestiegen. Obwohl gleichzeitig der Wechselkurs für den US-Dollar gesunken ist, liegt der gegenwärtige Ölpreis damit deutlich über dem von der IEA für 2010 prognostizierten Preis. Aus diesem Grund wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, deren Ergebnisse Abbildung S.15 entnommen werden können.

Bei der Abbildung auf S.15 wurde eine Verdoppelung des Erdgaspreises gegenüber der Bezugsgröße angenommen (entspricht einem Ölpreis von 118 US\$/bbl im Jahr 2010), während für Kohle eine 50-prozentige Verteuerung und für CO₂ eine Preissteigerung von 25 €/t im Jahr 2008 auf 35 €/t zugrunde gelegt wurde. Wie in der Abbildung gezeigt, zieht dies eine erhebliche Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von Windenergie nach sich: Die Kosten für den Binnenstandort sinken unter das Niveau für Erdgaskraftwerke und liegen nur 10 Prozent über den Preisen für Kohlekraftwerke. An Küstenstandorten erzeugt Windenergie den günstigsten Strom.

Abbildung S.14: Kosten für erzeugte Energie – herkömmliche Kraftwerke und Windenergie im Vergleich, 2010 (auf der Grundlage der Zahlen für 2006 – €)



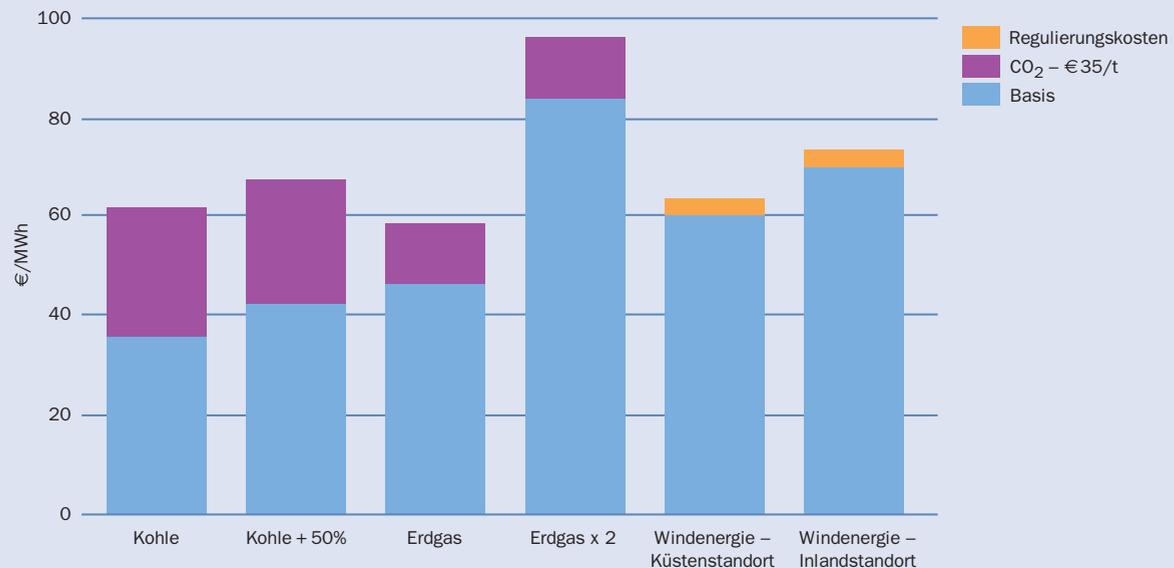
Quelle: Risø DTU

BESCHÄFTIGUNG

Windenergieunternehmen in der EU beschäftigen zurzeit 108.600 Mitarbeiter. Unter Berücksichtigung indirekter Arbeitsplätze steigt diese Zahl auf 180.000

20 WINDENERGIE - DIE FAKTEN - ZUSAMMENFASSUNG

Abbildung S.15: Sensitivitätsanalyse der Kosten für erzeugte Energie unter der Annahme steigender Preise für fossile Brennstoffe und CO₂ – herkömmliche Kraftwerke und Windenergie im Vergleich, 2010 (auf Grundlage der Zahlen für 2006 – €)



Quelle: Risø DTU

(Kapitel III.7). Ein großer Anteil der direkten Beschäftigung in der Windenergiebranche (rund 77 Prozent) entfällt auf Dänemark, Deutschland und Spanien. Die installierte Gesamtkapazität dieser drei Länder entspricht 70 Prozent der insgesamt in der EU installierten Kapazität. Durch die Inbetriebnahme von Produktions- und Betriebsstandorten in aufstrebenden Märkten und die Verlagerung vieler Tätigkeiten im Umfeld der Windenergie, z. B. Werbung, Betrieb und Wartung sowie ingenieurtechnische und juristische Dienstleistungen, auf die lokale Ebene ist die Branche mittlerweile gleichmäßiger verteilt als 2003. Die Mehrzahl der Arbeitsplätze entfällt auf die Hersteller von Windkraftanlagen und Bauteilen (59 Prozent).

Zusätzlich zu den 108.600 direkten Arbeitsplätzen beeinflusst die europäischer Windenergiebranche auch die Beschäftigung in Sektoren; die nicht in direkter Beziehung zu Windenergie stehen. Circa 43.000 Menschen waren 2007 in indirekter Weise im Windenergiesektor beschäftigt. Zusammengerechnet hat der europäische Windenergiesektor damit mehr als 150.000 Menschen beschäftigt. EWEAs Analyse kommt zu dem Schluß, dass in der EU pro neu installiertes Megawatt 15,1 Arbeitsplätze geschaffen werden. Darüberhinaus werden pro Megawatt gesamter installierter Kapazität 0,4 Arbeitsplätze in Betrieb und Wartung und anderen bereits installierte Anlagen betreffenden Aktivitäten entwickelt.

Tabelle S.3: Direkte Beschäftigung durch Windkraftunternehmen in ausgewählten europäischen Ländern

Land	Anzahl direkter Arbeitsplätze
Belgien	2.000
Bulgarien	100
Dänemark	23.500
Deutschland	38.000
Finnland	800
Frankreich	7.000
Griechenland	1.800
Großbritannien	4.000
Irland	1.500
Italien	2.500
Niederlande	2.000
Österreich	700
Polen	800
Portugal	800
Schweden	2.000
Spanien	20.500
Tschechien	100
Ungarn	100
Übrige EU	400
GESAMT	108.600

Quelle: Eigene Schätzungen auf Grundlage folgender Quellen: EWEA (2008a); ADEME (2008); AEE (2007); DWIA (2008); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit der Bundesrepublik Deutschland (BMU) (2008)

gehandelt werden. Die Richtlinie ist in der Förderung erneuerbarer Energien, insbesondere der Windenergie, von überwältigendem Erfolg geprägt, und die Richtlinie ist der Hauptgrund für den weltweiten Erfolg der europäischen Branchen für erneuerbare Energien und die globale Führungsposition europäischer Windenergieunternehmen.

Die schrittweise Umsetzung der Richtlinie von 2001 in den Mitgliedstaaten und die einstimmige Entscheidung des Europäischen Rates auf dem Frühjahrsgipfel im März 2007 für einen verbindlichen Anteil erneuerbarer Energien in der EU von 20 Prozent bis 2020 sind Schritte in die richtige Richtung und drücken gesteigerte politische Zustimmung aus. Im Dezember 2008 wurde vom Europäischen Parlament und vom Europäischen Rat eine neue Richtlinie auf der Grundlage eines Vorschlags der Europäischen Kommission vom Januar 2008 verabschiedet. Diese wird den Anteil erneuerbarer Energien am EU-Energiemix 2005 von 8,5 Prozent im Jahr 2005 auf 20 Prozent im Jahr 2020 erhöhen. Damit muss im Jahr 2020 mehr als ein Drittel des Stroms in der EU aus erneuerbaren Energien stammen, gegenüber 15 Prozent im Jahr 2007. Dass die Windenergie den größten Beitrag zu dieser Steigerung leisten wird, ist bereits jetzt eindeutig.

ENERGIEMIX IN DER EU

Teil IV: Branche und Märkte

2001 verabschiedete die EU ihre Richtlinie zur Förderung von Strom aus erneuerbaren Energien im Elektrizitätsbinnenmarkt. Diese Richtlinie ist noch immer die wichtigste gesetzgebende Maßnahme weltweit zur Integration von Strom aus erneuerbaren Energien, darunter Windenergie. Die Richtlinie umfasst ein Richtziel von 21 Prozent des Endbedarfs in der EU, der 2010 über erneuerbare Energien gedeckt werden soll, und regelt die Strommärkte, auf denen diese

Mit einer Gesamtleistung von insgesamt über 430 GW haben Wärmekraftwerke, zusammen mit großen Atom- und Wasserkraftwerken, lange das Rückgrat der Energieerzeugung in Europa gebildet. Aber Europa bewegt sich immer stärker von herkömmlichen Energiequellen weg, hin zu Technologien der erneuerbaren Energien (Kapitel IV.1). Zwischen 2000 und 2007 stieg die Gesamtleistungskapazität der EU um 200 GW auf 775 GW bis Ende 2007. Die bemerkenswertesten Verschiebungen in diesem Mix sind die Erhöhung der Gaskapazität auf 164 GW, die sich damit

22 WINDENERGIE - DIE FAKTEN - ZUSAMMENFASSUNG

fast verdoppelte, und das Wachstum der Windenergiekapazität von 13 auf 57 GW, die sich mehr als vervierfachte.

WINDENERGIE AUF DEM EUROPÄISCHEN ENERGIEMARKT

Die EU ebnet mit ihren politischen Maßnahmen den Weg für den Einsatz der Technologien für erneuerbare Energien. Die Windenergie hat sich dabei mit einer jährlichen Gesamtwachstumsrate von über 20 Prozent für die installierten MW zwischen 2000 und 2007 (Abbildung S.16) eindeutig als wichtige Energiequelle für den europäischen Energiemarkt etabliert. Windenergie macht über einen fünfjährigen Zeitraum 30 Prozent der gesamten in der EU installierten Kapazität aus und hat damit, nach dem Erdgas (55 Prozent), in den letzten zehn Jahren den zweitgrößten Beitrag zur Installation von Kapazität in der

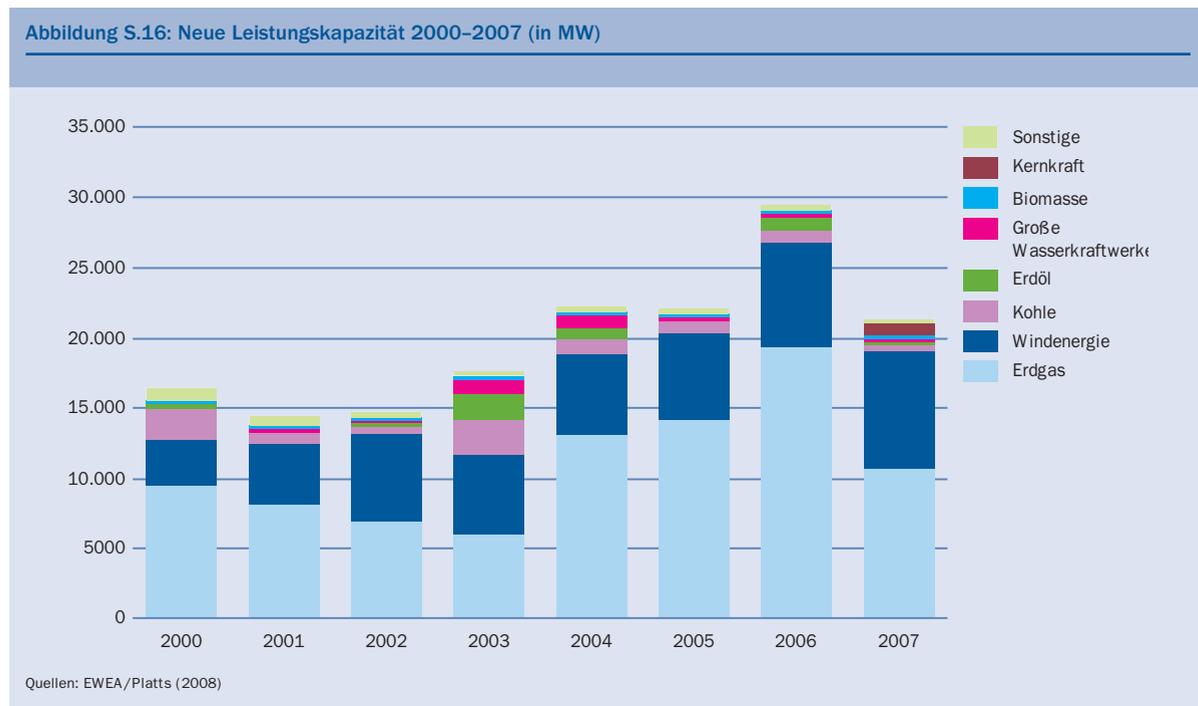
EU geleistet. Im Jahr 2007 stellte die Windenergie 40 Prozent der auf diesen Jahreszeitraum bezogenen in der EU installierten Kapazität. Die Windenergie kann damit einen höheren Anstieg als alle anderen Technologien zur Energieerzeugung in Europa, einschließlich Erdgas, verzeichnen.

Der Anteil der Windenergie ist auf über 10 Prozent der installierten Gesamtkapazität und bei fünf europäischen Märkten – Deutschland, Spanien, Dänemark, Portugal und Irland – auf über 5 Prozent des nationalen Strombedarfs angewachsen, wobei der Anteil in Spanien und Dänemark sogar mehr als 10 Prozent beträgt.

DIE AKTUELLE LAGE AUF DEM WINDENERGIEMARKT DER EU

Die in der EU installierte Windkraftkapazität ist in den letzten 11 Jahren jährlich um durchschnittlich 25 Prozent gestiegen: von 4.753 MW im Jahr 1997 auf

Abbildung S.16: Neue Leistungskapazität 2000–2007 (in MW)

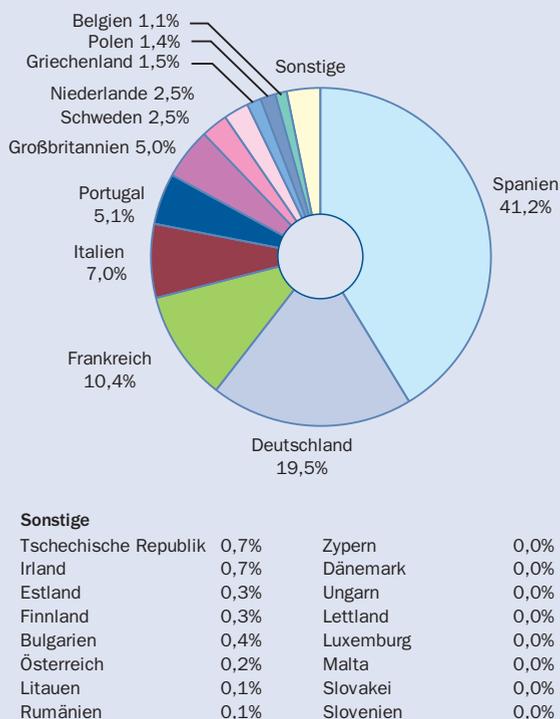


56.535 MW 2007 (Kapitel IV.2). Bezogen auf die jährlich installierte Kapazität ist der Markt der EU für Windenergieanlagen jährlich um 19 Prozent gewachsen: von 1.277 MW in 1997 auf 8.554 MW im Jahr 2007. 2007 bildete Spanien den mit Abstand größten Markt für Windenergieanlagen, gefolgt von Deutschland, Frankreich und Italien. In acht Ländern sind mittlerweile über 1000 MW installiert: Deutschland, Spanien, Dänemark, Italien, Frankreich, Großbritannien, Portugal und die Niederlande. Die drei Pionierländer der Windenergie Deutschland, Spanien und Dänemark weisen 70 Prozent der in der EU installierten Windkraftkapazität auf (vgl. Abbildungen S.17 und S.18).

Die mehr als 56.000MW an Windenergie-Gesamtkapazität, die Ende 2007 in der EU installiert waren, decken in einem Jahr mit durchschnittlichen Windverhältnissen 3,7 Prozent des Strombedarfs der EU-27-Länder.

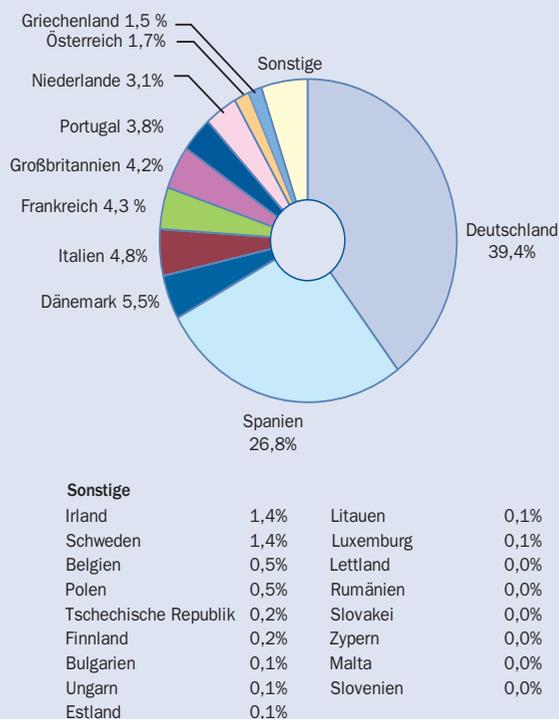
Über Offshore-Anlagen erzeugte Windenergie stellte dabei mit 1080 MW, die Ende 2007 installiert waren, einen Anteil von 1,9 Prozent der in der EU installierten Kapazität und machte EU-intern 3,5 Prozent der Stromerzeugung aus Windenergie aus. Der Markt bewegt sich weiterhin unterhalb seines Stands von 2003 und hat sich langsamer als erwartet entwickelt.

Abbildung S.17: Anteile der Mitgliedstaaten an neuen Kapazitäten (2007)



Quelle: EWEA (2008)

Abbildung S.18: Marktanteile der Mitgliedstaaten Ende 2007 an der Gesamtkapazität



Quelle: EWEA (2008)

24 WINDENERGIE - DIE FAKTEN - ZUSAMMENFASSUNG

EUROPÄISCHE WINDBRANCHE: AKTEURE UND INVESTITIONSENTWICKLUNGEN

Das sensationelle Wachstum der Windkraft als Einsatzgebiet für Investitionen in neue Energie-

erzeugungskapazitäten hat ein breit gestreutes Spektrum an Akteuren über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg angezogen (Kapitel IV.3). Die Palette reicht von lokalen, standortbezogenen Ingenieurbüros bis hin zu global agierenden, vertikal

Tabelle S.4: Gesamte installierte Windenergie in der EU und Prognosen für 2010 (in MW)

Land	Gesamt installiert								
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2010
Belgien	13	32	35	68	96	167	194	287	800
Bulgarien					10	10	36	70	200
Dänemark	2417	2489	2889	3116	3118	3128	3136	3125	4150
Deutschland	6113	8754	11.994	14.609	16.629	18.415	20.622	22.247	25.624
Estland			2	2	6	32	32	58	150
Finnland	39	39	43	52	82	82	86	110	220
Frankreich	66	93	148	257	390	757	1567	2454	5300
Griechenland	189	272	297	383	473	573	746	871	1500
Großbritannien	406	474	552	667	904	1332	1962	2389	5115
Irland	118	124	137	190	339	496	746	805	1326
Italien	427	682	788	905	1266	1718	2123	2726	4500
Lettland			24	27	27	27	27	27	100
Litauen			0	0	6	6	48	50	100
Luxemburg	10	15	17	22	35	35	35	35	50
Malta			0	0	0	0	0	0	0
Niederlande	446	486	693	910	1079	1219	1558	1746	3000
Österreich	77	94	140	415	606	819	965	982	1200
Polen			27	63	63	83	153	276	1000
Portugal	100	131	195	296	522	1022	1716	2150	3500
Rumänien			1	1	1	2	3	8	50
Schweden	231	293	345	399	442	510	571	788	1665
Slowakei			0	3	5	5	5	5	25
Slowenien			0	0	0	0	0	0	25
Spanien	2235	3337	4825	6203	8264	10.028	11.623	15.145	20.000
Tschechien			3	9	17	28	54	116	250
Ungarn			3	3	3	17	61	65	150
Zypern			0	0	0	0	0	0	0
Gesamt EU*	12.887	17.315	23.098	28.491	34.372	40.500	48.031	56.535	80.000

Anmerkung: * Ab 2004 EU-25, ab 2007 EU-27.

Quelle: EWEA (2008)

integrierten Versorgungsunternehmen – sie alle haben zur Erfolgsgeschichte der Windenergie in Europa beigetragen.

Europa ist die Region, die den Weg für eine großflächige Integration von Windenergie in großem Maßstab bereitet hat, und hier herrscht unter rund einem Dutzend Anbietern auch der härteste Wettbewerb um Marktanteile. Der europäische Markt ist hinsichtlich der Anteilsverteilung extrem stabil; seit einer Konsolidierungsphase führender Anbieter in den Jahren 2003 und 2004 haben sich nur wenige größere Verschiebungen ergeben. Von 2004 bis 2007 hielten drei Unternehmen einen Marktanteil von jeweils durchschnittlich 15 Prozent der jährlich neu hinzugekommenen MW, gefolgt von vier Akteuren mit Anteilen zwischen 5 und 10 Prozent.

Das Supply Chain Management bildet einen Schlüsselfaktor im Wettbewerb innerhalb der Lieferung von Windenergieanlagen. Den Beziehungen von Anlagenherstellern und Bauteillieferanten kommt mittlerweile eine entscheidende Bedeutung zu. Diese Beziehungen unterlagen während der letzten drei Jahren immer größeren Belastungen, da die rapide ansteigende Nachfrage kürzere Anlaufzeiten, höhere Investitionen und eine größere Beweglichkeit bei der Wertschöpfung in einer rasch wachsenden Branche erforderlich gemacht hat.

Darüber hinaus erfährt die Wertschöpfungskette der europäischen Windenergie dynamische Verlagerungen durch Umverteilungen beim Eigentum der Vermögenswerte, Wettbewerb um Wachstum auf bereits stärker gesättigten Märkten und Anstrengungen der Akteure um die Vergrößerung des Maßstabs in einem immer stärker auf ganz Europa ausgerichteten Umfeld.

Die wachsende Zahl von Akteuren mit Interesse an Entwicklung, Besitz und Betrieb von Windkraftanlagen hat die Qualität des Wettbewerbs verändert, der verstärkt anhand der Schlüsselemente Kenntnis der lokalen Marktbedingungen, technisches Fachwissen und Finanzkraft über die Positionierung in der Wertschöpfungskette entschieden wird.

POSITIONIERUNG DER HAUPTAKTEURE

Die Verlagerungen bei der Eigentumsverteilung der Vermögenswerte im Bereich Windkraft in Europa zeigen klar die räumliche Expansion und den vergrößerten Maßstab der Branche. Während sich die Branche Ende der 90er Jahre auf Dänemark und Deutschland und Einzelanlagen in Hand von Landwirten konzentrierte, zählen heute Dutzende multinationale Akteure mit mehreren GW installierter Kapazität zu den Eigentümern. Heute sind für die Struktur des Marktes in Europa fünf Hauptgruppen kennzeichnend:

1. Versorgungsunternehmen;
2. Die größten unabhängigen Stromerzeuger Europas;
3. unabhängige spanische Stromerzeuger;
4. deutsche Investoren;
5. andere europäische Investoren/unabhängige Stromerzeuger.

Der am stärksten ausgeprägte Trend der vergangenen fünf Jahre ist die steigende Präsenz von Versorgungsunternehmen in der Branche. Der Anteil von Versorgungsunternehmen an der gesamten installierten Windkraftkapazität stieg von 17 Prozent im Jahr 2002 auf 25 Prozent in 2007. Der größte Sprung ereignete sich in den Jahren 2005 und 2006, als die größten Windenergieversorger jährlich neu installierte Kapazitäten von deutlich mehr als 500 MW verzeichneten.

GEPLANTE INVESTITIONEN

Für den Zeitraum 2007 bis 2010 gaben die MW-bezogenen 15 größten Energieversorger und unabhängigen Stromerzeuger über 18 GW in der Planung an. Ausgehend von den gegenwärtigen Kostenschätzungen pro installiertem MW entspricht dies Investitionen in Windenergieanlagen von gut 25 Milliarden Euro. Insgesamt wird für den europäischen Windenergiemarkt bis 2010 ein Wachstum von mehr als 9 GW pro Jahr erwartet. Das entspricht jährlichen Investitionen von über 10 und bis zu 16 Milliarden Euro.

26 WINDENERGIE - DIE FAKTEN - ZUSAMMENFASSUNG

Angesichts der kontinuierlichen Einbindung dieser Technologie in den allgemeinen Energiemarkt kann gesagt werden, dass sich der europäische Windenergiemarkt samt seinem Umfeld mittlerweile zu einer ernst zu nehmenden Kraft entwickelt hat. Obwohl die Windkraft auf Märkten wie Deutschland, Spanien und Dänemark neben den herkömmlichen Energiequellen zu einem festen Bestandteil im Energiemix avanciert ist, steht die Branche weiterhin einer doppelten Herausforderung gegenüber: Die Windenergie konkurriert nicht nur mit anderen erneuerbaren Energien, sondern muss sich darüber hinaus bei großen Energieerzeugern, die ihre Portfolios erweitern und diversifizieren möchten, als gute Wahl behaupten.



DER STATUS GLOBALER WINDENERGIEMÄRKTE

Die in Kapitel IV.4 behandelte globale Windenergiebranche installierte 2007, ihrem bisher erfolgreichsten Jahr, 20.000 MW. Durch diese Entwicklung, mit den USA, China und Spanien an der Spitze, erhöhte sich die installierte Kapazität auf 94.122 MW weltweit. Das entspricht einer Steigerung von 31 Prozent gegenüber 2006 und einer Steigerung der weltweit installierten Kapazität von rund 27 Prozent.

Die führenden Länder in Bezug auf die installierte Kapazität sind Deutschland (22,3 GW), die USA (16,8 GW), Spanien (15,1 GW), Indien (7,8 GW) und

China (5,9 GW). Der wirtschaftliche Wert des globalen Windenergiemarktes belief sich 2007 auf 25 Milliarden Euro (37 Milliarden US-Dollar) für neue Erzeugungsanlagen und führte zu einer Gesamtinvestition von 34 Milliarden Euro (50,2 Milliarden US-Dollar).

Europa bleibt weiterhin der führende Markt für die Windenergie: Neuinstallationen machten 43 Prozent der weltweiten Gesamtsumme aus, und europäische Unternehmen lieferten 2007 66 Prozent der Windenergiekapazität.

MÄRKTE IN USA UND CHINA WACHSEN WEITERHIN STARK

Die USA gaben für 2007 den Rekord von 5.244 MW installierter Kapazität an, die sich damit gegenüber den Zahlen für 2006 mehr als verdoppelt hat und für 2007 über 30 Prozent der neuen Stromerzeugungskapazität stellte. Die gesamte Erzeugungskapazität der Windkraft wuchs in den USA im Jahr 2007 um 45 Prozent, womit die insgesamt installierte Kapazität jetzt 16,8 GW beträgt. Während Windenergie in der EU 2008 jedoch ca. 4 Prozent des Strombedarfs deckte, erzeugten US-amerikanische Windparks im selben Jahr rund 48 Milliarden kWh Strom und decken damit nur gut 1 Prozent des Stromverbrauchs in den USA.

China vergrößerte die Windenergiekapazität im Laufe des Jahres 2007 um 3.449 MW. Im Vergleich zu 2006 entspricht das einem Marktwachstum von 156 Prozent, und China belegt nun mit über 6.000 MW Ende 2007 den fünften Rang bei der insgesamt installierten Windenergiekapazität. Experten gehen jedoch davon aus, dass die Entwicklung sich noch in den Anfängen befindet und das eigentliche Wachstum in China noch gar nicht stattgefunden hat. Europäische Hersteller sind zur Ausschöpfung dieses Potenzials gut positioniert.

HINDERNISSE BEI VERWALTUNG UND NETZZUGANG

Der Integration von Strom aus erneuerbaren Energiequellen in den europäischen Elektrizitätsmarkt steht

eine Reihe von Hindernissen gegenüber. In Kapitel IV.5 werden am Beispiel von vier EU-Mitgliedstaaten die Hindernisse, die bei der Beantragung von Baugenehmigungen, Flächennutzungsgenehmigungen und Netzzugang auftreten, aus der Perspektive eines Entwicklers erläutert.

Hürden sind immer dann vorhanden, wenn die Verfahren, an die sich die Projektentwickler halten müssen, nicht kohärent festgelegt sind. Dazu zählen auch mangelnde Transparenz und überzogene behördliche Anforderungen. Solche Hindernisse bestehen in allen EU-Mitgliedstaaten, aber die Auswirkungen auf die Bereitstellung erneuerbarer Energien unterscheiden sich von Land zu Land. Behördliche, gesellschaftliche und finanzielle Hürden und Konflikte beim Netzananschluss schränken die Wettbewerbsfähigkeit der Windenergie auf dem europäischen und dem globalen Markt auf ernst zu nehmende Weise ein.

Teil V: Umwelt

Die verfügbaren Energiequellen ziehen nicht alle im selben Maß negative Folgen für die Umwelt oder die Erschöpfung der natürlichen Ressourcen nach sich. Fossile Energieträger verbrauchen natürliche Ressourcen und sind die Hauptverursacher von Umweltbelastungen. Dagegen wirken sich erneuerbare Energien im Allgemeinen und die Windenergie im Besonderen geringer auf die Umwelt aus und ziehen wesentlich weniger negative Folgen nach sich als herkömmliche Energieträger.

UMWELTNUTZEN

In Kapitel V.1 wird die Methode der Lebenszyklusanalyse zur Bewertung von Emissionen und Umweltfolgen beschrieben und anhand einschlägiger europäischer Untersuchungen dargelegt, welche Emissionen und Umweltauswirkungen durch die Stromerzeugung mit Offshore-Projekten und an Land betriebenen Windparks über deren Lebensdauer hinweg entstehen. Ebenfalls analysiert werden die durch Strom aus Windkraft

gegenüber Technologien der Stromerzeugung mit fossilen Energieträgern eingesparten Emissionen und Umweltbelastungen.

UMWELTBELASTUNGEN

Das Ausmaß der Auswirkungen von Windenergie auf die Umwelt ist wesentlich geringer als die durch herkömmliche Energiequellen verursachten Belastungen. Dennoch müssen auch die durch Windkraft entstehenden Umweltfolgen eingeschätzt werden. Mögliche nachteilige Einflüsse auf Fauna und nahe liegende Siedlungen wurden sowohl für Offshore- als auch für Land-Projekte untersucht. Die einzelnen Umweltbelastungen, darunter die Folgen für das Landschaftsbild, der Geräuschpegel, die Auswirkungen auf Vogelwelt und Populationen von Meeresorganismen sowie elektromagnetische Interferenzen, werden in Kapitel V.2 behandelt.

Die Windenergie wird durch die Verringerung von CO₂-Emissionen bei der Energieerzeugung eine Schlüsselposition bei der Eindämmung des Klimawandels besetzen. Die Entstehung internationaler Märkte für Emissionszertifikate, die durch die flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls befördert wurde, sowie die Verbesserung regionaler Emissionshandelssysteme wie das EU-ETS könnten zusätzliche Anreize für Entwicklung und Einsatz von Technologien für erneuerbare Energien, insbesondere der Windenergie, schaffen.



POLITISCHE MAßNAHMEN ZUR EINDÄMMUNG DES KLIMAWANDELS

Die Windkraft verfügt über das Potenzial, die CO₂-Emissionen bei der Energieerzeugung drastisch zu senken. Kapitel V.3 bietet einen Überblick zur Entwicklung des internationalen Emissionsrechtehandels, bewertet die Auswirkungen des Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (Clean Development Mechanism) und der Gemeinsamen Umsetzung (Joint Implementation) auf die Windenergie und skizziert den Weg zu einer Klimaordnung für die Zeit nach 2012. Das Kapitel enthält darüber hinaus eine Zusammenfassung zum europäischen Emissionshandelssystem EU-ETS mit einer Erörterung der bisherigen Leistungen, des Zuteilungsverfahrens und Vorschlägen für die Zeit nach 2012.

EXTERNE EFFEKTE UND WINDENERGIE IM VERGLEICH ZU ANDEREN TECHNOLOGIEN

Externe Effekte und die Kosten der Umweltbelastungen werden von den Elektrizitätsmärkten bisher nicht berücksichtigt. Daher ist es wichtig, dass die externen Effekte der verschiedenen Stromerzeugungstechnologien mit den entsprechenden externen Kosten ermittelt werden. Auf dieser Grundlage können dann die externen mit den internen Kosten der Elektrizität und konkurrierende Energieerzeugungssysteme, z. B. herkömmliche Stromerzeugungstechnologien, mit der Windenergie verglichen werden (Kapitel V.4).

Die ersten wissenschaftlichen Untersuchungen zu externen Kosten der Stromerzeugung wurden Ende der 80er Jahre durchgeführt, unter denen die Externalities-of-Energy-Studie (ExternE) an erster Stelle steht. In dieser Studie wurde der Versuch unternommen, ein konsistentes Verfahren zur Bewertung der externen Effekte von Stromerzeugungstechnologien zu entwickeln. Untersuchungen und Verfahren des ExternE-Projekts werden regelmäßig überarbeitet. Das Projekt bewertet die externen Kosten von Windenergie mit weniger als 0,26 ct€/kWh. Für die herkömmliche

Stromerzeugung auf Grundlage fossiler Brennstoffe sind diese Kosten deutlich höher.

In den Kapiteln V.4 und V.5 stellt *Windenergie – Die Fakten* die Ergebnisse empirischer Analysen zu Emissionen und externen Kosten zur Verfügung, die in den einzelnen EU-27-Staaten in den Jahren 2007, 2020 und 2030 über den Ersatz herkömmlicher fossiler Energieträger durch Windenergie eingespart werden. Für 2007 beläuft sich die Summe der eingesparten externen Kosten auf über 10 Milliarden Euro, und mit der Erhöhung des Windenergieanteils in den nächsten Jahrzehnten wird ein Anstieg dieser Zahl erwartet (Tabelle S.5).

AKZEPTANZ VON WINDENERGIE UND WINDPARKS IN DER GESELLSCHAFT

Die Erfahrungen mit der Windenergie in der EU zeigen, dass die Befürwortung durch die Gesellschaft für den Erfolg der Entwicklung von Windenergie entscheidend ist (Kapitel V.6). Die soziologische Forschung zur Windenergie konzentriert sich bisher auf drei Hauptaspekte:

1. Bewertung des Grades an Unterstützung der Windenergie durch die Öffentlichkeit (öffentliche Befürwortung);
2. Bestimmung und Analyse der gesellschaftlichen Reaktionen auf lokaler Ebene (kommunale Befürwortung);
3. Analyse der Schlüsselfaktoren für die Akzeptanz durch wichtige Interessengruppen und politische

Tabelle S.5: Eingesparte externe Kosten der Energieerzeugung

	2007	2020 (Schätzung)	2030 (Schätzung)
Durch Windenergie eingesparte externe Kosten (Mrd. Euro, Preise von 2007)	10,2	32,9	69,2

Anmerkung: Eine der Voraussetzungen für die komplette Ausschöpfung des für 2020 und 2030 erwarteten Umweltnutzens besteht in der fortlaufenden Anpassung der finanziellen Förderinstrumente und der Beseitigung von Hindernissen für die Marktintegration der Windenergie.

Entscheidungssträger (Befürwortung durch Interessengruppen).

Die Vorgehensweise bei der Entwicklung und Verwaltung von Windparks und die Art, wie die Öffentlichkeit damit umgeht, ist möglicherweise viel wichtiger bei der Herausbildung der gesellschaftlichen Reaktionen auf neue Projekte als die physischen oder technischen Merkmale dieser Technologie an sich. Diese Faktoren wirken sich nämlich entscheidend auf die Beziehungen zwischen betroffenen Kommunen, Entwicklern und Behörden aus. Für den Umgang mit der gesellschaftlichen Akzeptanz technologischer Belange gibt es keine festen Regeln. Durch die angemessene Berücksichtigung dieser vielfältigen Aspekte können Entwickler und Behörden jedoch aus bereits gemachten Erfahrungen lernen und Wege finden, die öffentliche Befürwortung der Entwicklung von Windenergie aufrechtzuerhalten und zu steigern.

Teil VI: Szenarien und Zielvorgaben

Das Weißbuch der Europäischen Kommission von 1997 zu erneuerbaren Energien stellte die Zielvorgabe auf, den Anteil dieser Energiequellen am Energiemix der EU bis 2010 von 6 auf 12 Prozent zu verdoppeln. Dazu gehörte eine Zielvorgabe von 40.000 MW Windenergie in der EU bis 2010, durch die 80 TWh Strom erzeugt und jährlich 72 Millionen Tonnen an CO₂-Emissionen eingespart werden sollten. Diese 40.000 MW wurden im Jahr 2005 erreicht.

Die EWEA übernahm für ihre Zielvorgabe 1997 die 40.000 MW des Weißbuchs der Europäischen Kommission. Drei Jahre später erhöhte die EWEA ihre Zielvorgabe aufgrund der guten Entwicklungen auf dem deutschen, spanischen und dänischen Markt für Windenergieanlagen jedoch um 50 Prozent auf 60.000 MW bis 2010 und 150.000 MW bis 2020 (Kapitel VI.1 und VI.2). 2003 erhöhte die EWEA ihre Zielvorgabe erneut, in diesem Fall um 25 Prozent auf 75.000 MW bis 2010 und 180.000 MW bis 2020. Aufgrund der Erweiterung der EU um 12 neue

Mitgliedstaaten erhöhte die EWEA ihr Referenzszenario für 2010 auf 80.000 MW, behielt aber die Zielvorgabe von 180.000 MW für 2020 bei und legte das Ziel von 300.000 MW bis zum Jahr 2030 fest (Abbildung S.19).

Sollte das Referenzszenario Realität werden, steigt die Windenergieerzeugung auf 177 TWh im Jahr 2010, auf 477 TWh im Jahr 2020 und auf 935 TWh im Jahr 2030 (Kapitel VI.3). Das Referenzszenario der Europäischen Kommission geht von einer Steigerung des Strombedarfs um 33 Prozent zwischen 2005 und 2030 aus (entspricht 4408 TWh). Unter der Voraussetzung, dass sich der Strombedarf in der EU entsprechend den Schätzungen der Europäischen Kommission entwickelt, wird der Anteil der Windenergie am Stromverbrauch der EU im Jahr 2010 die Marke von 5 Prozent erreichen, 2020 auf 11,7 Prozent steigen und 2030 21,2 Prozent betragen.

Wenn darüber hinaus die Pläne der Politik zur Steigerung der Energieeffizienz umgesetzt werden, wird die Windkraft außerdem einen größeren Anteil an der Deckung des zukünftigen Strombedarfs haben als im Referenzszenario vorgesehen. 2006 veröffentlichte die Europäische Kommission neue Szenarien für Energieeffizienz und erneuerbare Energien bis zum Jahr 2030.

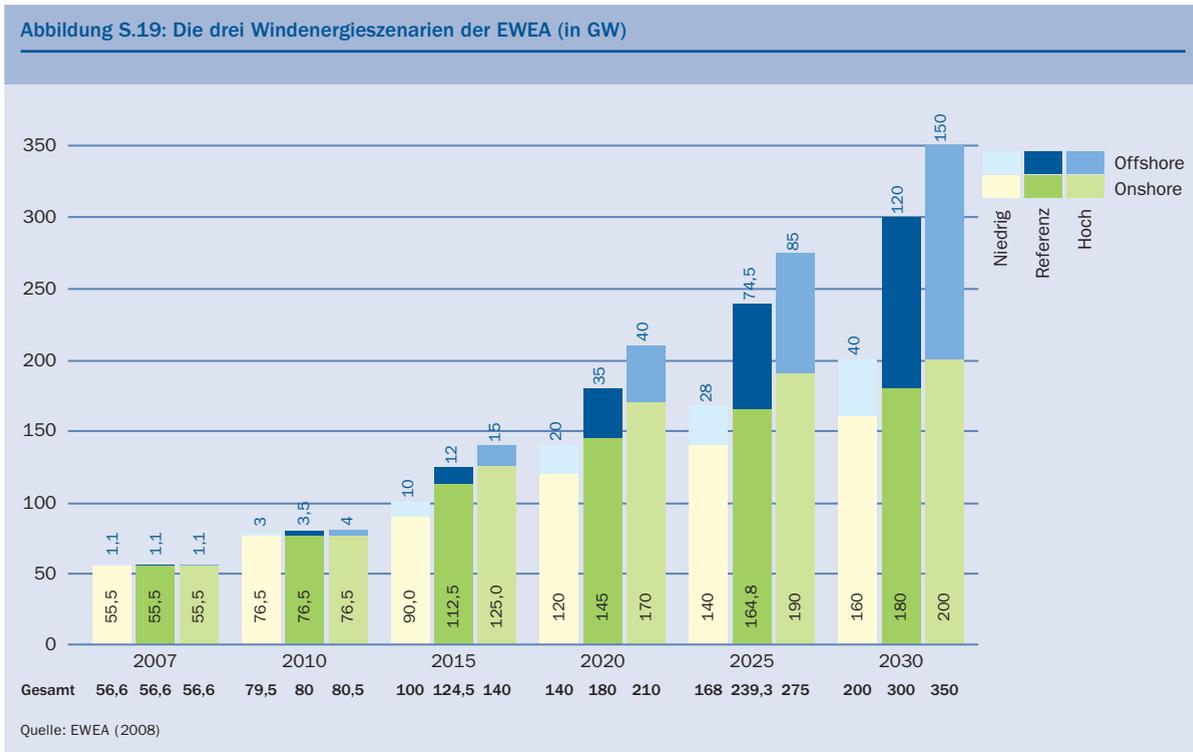
Entwickelt sich der Strombedarf in der EU entsprechend dem „Combined high renewables and efficiency case“ (RE&Eff) der Europäischen Kommission, so wird der Anteil der Windenergie am Strombedarf 2010 5,2 Prozent, 2020 14,3 Prozent und 2030 28,2 Prozent betragen.

Die Europäische Kommission hat das Referenzszenario seit 1996 fünfmal geändert. In den seitdem vergangenen 12 Jahren wurden die Zielvorgaben für die Windenergie bis 2010 und 2020 fast verzehnfacht: von 8.000 MW auf 71.000 MW (2010) und von 12.000 MW auf 120.000 MW (2020) im neuesten Referenzszenario der Europäischen Kommission von 2008.

Überraschend ist, dass das Referenzszenario von 2008 deutlich niedrigere Zahlen als jenes aus dem Jahr 2006 nennt. Die Vorgabe von 71.000 MW für 2010 bedeutet, dass der europäische Windenergiemarkt in

30 WINDENERGIE - DIE FAKTEN - ZUSAMMENFASSUNG

Abbildung S.19: Die drei Windenergieszenarien der EWEA (in GW)



den kommenden drei Jahren gegenüber dem aktuellen Markt um ca. 50 Prozent schrumpfen wird. Im Vergleich zu aktuellen Marktleistungen, Wachstumstrends und unabhängigen Marktanalysen hat sich das Referenzszenario der Europäischen Kommission von der Realität entfernt und unterschätzt die langfristigen Aussichten der Branche stark.

Die Referenzszenarien der Europäischen Kommission und der IEA für die Windenergie gehen beide von einer deutlichen Verlangsamung des Marktwachstums aus. Die Europäische Kommission nimmt dabei in Bezug auf die 71-GW-Zielvorgabe bis 2010 eine starke Verlangsamung um 50 Prozent an (im Vergleich zum Szenario der EWEA). Die erweiterten Szenarien der Europäischen Kommission und der IEA entsprechen jedoch der Zielvorgabe der EWEA für 2010. Das Szenario der Europäischen Kommission von 2006 übertrifft die Prognose der EWEA von 180 GW bis 2020 sogar.

Die Anlagenpreise sind seit 2005 gestiegen. Einer der großen Vorteile der Windenergie besteht

jedoch darin, dass der „Treibstoff“ nichts kostet. Die Gesamtkosten der Erzeugung von Windenergie lassen sich damit über die 20- bis 25-jährige Lebensdauer einer Windkraftanlage sehr genau prognostizieren. Die zukünftigen Preise für Kohle, Öl oder Gas und für Emissionszertifikate haben keinerlei Einfluss auf die

Tabelle S.6: Anteil der Windenergie am Strombedarf der EU

	2000	2007	2010	2020	2030
Windenergieerzeugung (TWh)	23	119	177	477	935
Strombedarf laut Referenzszenario (TWh)*	2.577	3.243	3.568	4.078	4.408
Strombedarf nach RE&Eff (TWh)*	2.577	3.243	3.383	3.345	3.322
Anteil der Windenergie (Referenzszenario)	0,9%	3,7%	5,0%	11,7%	21,2%
Anteil der Windenergie (RE&Eff)	0,9%	3,7%	5,2%	14,3%	28,2%

*Quellen: Eurelectric, EWEA und Europäische Kommission

Tabelle S.7: Einsparungen (in Milliarden Euro) in Abhängigkeit von Treibstoff- und CO₂-Preisen (pro Tonne)

Gesamtbeträge (Treibstoffpreise entsprechend einem Ölpreis von 90 US\$; CO₂-Preis von 25 €)	2008–2010	2011–2020	2021–2030	2008–2020	2008–2030
Investition	31.062	120.529	187.308	151.591	338.899
Eingesparte CO ₂ -Kosten	21.014	113.890	186.882	134.904	321.786
Eingesparte Treibstoffkosten	51.165	277.296	455.017	328.462	783.479
Gesamtbeträge (Treibstoffpreise entsprechend einem Ölpreis von 50 US\$; CO₂-Preis von 10 €)	2008–2010	2011–2020	2021–2030	2008–2020	2008–2030
Investition	31.062	120.529	187.308	151.591	338.899
Eingesparte CO ₂ -Kosten	8.406	45.556	74.753	53.962	128.714
Eingesparte Treibstoffkosten	30.456	165.057	270.843	195.513	466.356
Gesamtbeträge (Treibstoffpreise entsprechend einem Ölpreis von 120 US\$; CO₂-Preis von 40 €)	2008–2010	2011–2020	2021–2030	2008–2020	2008–2030
Investition	31.062	120.529	187.308	151.591	338.899
Eingesparte CO ₂ -Kosten	33.623	182.223	299.011	215.846	514.857
Eingesparte Treibstoffkosten	67.002	363.126	595.856	430.128	1.025.984

Quelle: EWEA (2008)

Kosten der Windenergieerzeugung. Wie in Kapitel VI.4 dargestellt, handelt es sich dabei wohl um den Wettbewerbsvorteil der Windenergie auf dem globalen Energiemarkt, dem die größte Bedeutung zukommt.

In den drei Jahrzehnten von 2000 bis 2030 werden sich die Gesamtinvestitionen in die Windenergie auf 390 Milliarden Euro belaufen. Gemäß dem Referenzszenario der EWEA werden die Investitionen in die Windenergie in den EU-27-Staaten zwischen 2008 und 2030 ca. 340 Milliarden Euro betragen.

Wie Tabelle S.7 zeigt, wirken sich veränderte Annahmen zu CO₂-Emissionen und Treibstoffpreisen sehr stark auf die durch die Installation von Windkraftanlagen eingesparten CO₂-Emissionen und Treibstoffmengen aus. Bei niedrigen Preisen für CO₂-Emissionen (10 €/t) und Brennstoff (einem Ölpreis von 50 US\$/bbl entsprechend) über den Bezugszeitraum belaufen sich die Einsparungen an Treibstoff- und CO₂-Kosten durch Investitionen in Windenergie in den kommenden 23 Jahren auf 466 Milliarden Euro statt 783 Milliarden

Euro. Bei hohen CO₂- (40 €/t) und Treibstoffpreisen (einem Ölpreis von 120 US\$/bbl entsprechend) können durch Windenergie über die drei Jahrzehnte von 2000 bis 2030 Treibstoff- und CO₂-Kosten von über 1 Billion Euro eingespart werden.

Tabelle S.7 zeigt die unterschiedlich großen Einsparungen in Abhängigkeit vom Ölpreis (pro Barrel) und CO₂ (pro Tonne).

Gemäß Prognosen des Global Wind Energy Council (GWEC) wird der globale Markt für Windenergieanlagen um mehr als 155 Prozent wachsen, von 94 GW im Jahr 2007 auf 240,3 GW installierte Gesamtkapazität 2012 (Kapitel VI.5). Insbesondere für den US-amerikanischen und den chinesischen Markt wird ein extremes Wachstum erwartet.

Laut GWEC könnte die Windenergie im Jahr 2020 je nach Steigerung der Nachfrage zwischen 11,5 und 12,7 Prozent und 2030 sogar zwischen 20,2 und 24,9 Prozent – also ein Fünftel bis ein Viertel – des globalen Stromverbrauchs decken (Kapitel VI.6).

Copyright © European Wind Energy Association 2009

Alle Rechte vorbehalten

Da sich der Windenergie-Sektor durch höchste Dynamik und ständige Weiterentwicklung auszeichnet, können sich Daten und Zahlen im vorliegenden Band im Jahr 2009 leicht verändert haben, obwohl sie im Oktober 2008 korrekt waren. Alle neuesten Statistiken und Information sind auf der Wind Energy – The Facts-Webseite zu finden: www.windfacts.eu.

Die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieser Publikation liegt bei den AutorInnen. Sie gibt nicht unbedingt die Meinung der Europäischen Gemeinschaften wieder. Die Europäische Kommission übernimmt keine Verantwortung für jegliche Verwendung der darin enthaltenen Informationen.