

Windenergie – Erfolg und Perspektiven

Dipl.-Ing.
Jens Peter Molly
Deutsches
Windenergie-Institut
GmbH (DEWI)
Ebertstr. 96
D-26382
Wilhelmshaven
jp.molly@dewi.de

Zusammenfassung

Die Nutzung der Windenergie nahm während der vergangenen zehn Jahre einen nicht für möglich gehaltenen weltweiten Aufschwung. Waren in Deutschland zu Beginn der neunziger Jahre gerade mal 20 MW Leistung installiert, so waren es mit Ablauf dieses Jahrzehnts bereits 4445 MW, also über zweihundertmal mehr. Ähnlich dynamisch war die Entwicklung für ganz Europa, wenn auch oft erst als Folge des Booms in Deutschland. Spanien ist in der Zwischenzeit mit mehr als 2000 MW auf dem besten Wege, Deutschland in wenigen Jahren als führende Windenergienation zu verdrängen. Getragen wurde und wird dieser schnelle Ausbau der Windenergie durch eine parallel verlaufende Entwicklung zu grösseren Windenergieanlagen mit einer sich stetig verbessernden Technik und Zuverlässigkeit. In nur zehn Jahren wuchs die durchschnittliche Leistungsinstallation pro Anlage um das Sechsfache von 155 kW auf 935 kW. Und die weitere Größenentwicklung lässt derzeit noch keine Grenze erkennen. Mit Leistungen bis 5 MW und Rotordurchmessern deutlich über 100 m setzen die in der Entwicklung befindlichen Großanlagen für den Offshore-Bereich neue Maßstäbe. Dies alles wird von einem neuentstandenen Industriesektor getragen, der schon allein mit dem Markt in Deutschland 1999 einen Umsatz von mehr als 3,2 Milliarden DM erzielte.

1. Einleitung

Durch geeignete gesetzliche Rahmenbedingungen, ergänzt durch unterstützende Förderprogramme des Bundes und der Länder, nahm die Entwicklung der Windenergie in Deutschland im letzten Jahrzehnt einen für alle unerwartet schnellen Aufschwung. Aus "Garagenfirmen" wurden rasch weltweit tätige Unternehmen mit Umsätzen in Milliardenhöhe. Bemerkenswert ist auch, dass die von staatlicher Seite zur Förderung des Marktes in Kraft gesetz-

ten Programme nicht nur dieses Ziel erreichten, sondern auch eine beispiellose technische und wissenschaftliche Entwicklung auslösten, die alle Forschungsprogramme in ihrer Wirkung weit übertrafen. Daraus lässt sich schließen, dass anwendungsnahe Forschung nur zusammen mit der Wirtschaft zum erhofften Erfolg, nämlich der Markteinführung beitragen. Die Forschungs- und Entwicklungsprogramme der achtziger Jahre für Windenergieanlagen im Megawattbereich wurden dagegen in einem markt- und damit wettbewerbsfreien Raum durchgeführt und führten deshalb nicht zu unternehmerischen Investitionsentscheidungen zur Serienfertigung und damit Markteinführung. Die Hoffnungen der Politik, allein durch Forschungsförderung die serienreife von Windenergieanlagen und damit das Anwendungsinteresse der Energieversorger auszulösen, mussten Ende der achtziger Jahre als fehlgeschlagen bezeichnet werden.

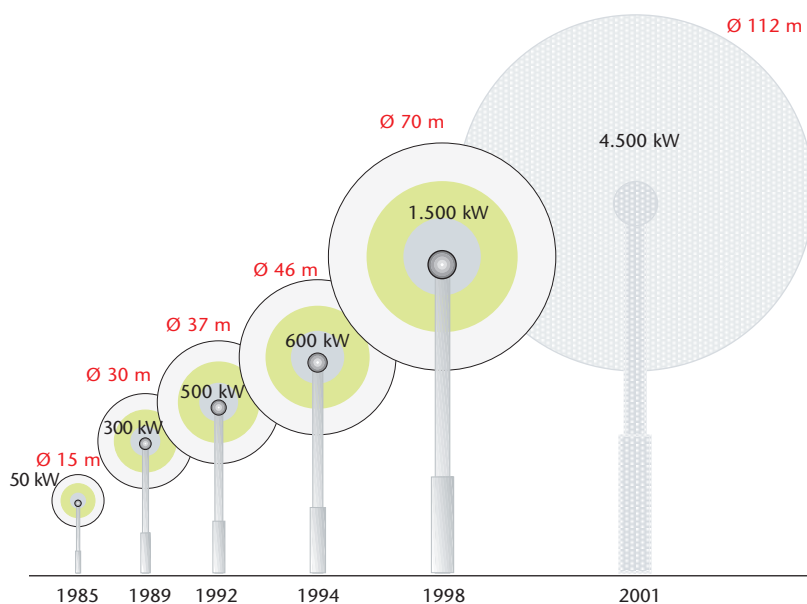
Das zurückliegende Jahrzehnt zeigte noch mehr. Nicht alle der in den verschiedenen Staaten der Welt durchgeführten Fördermaßnahmen zu Gunsten der Windenergie, zeigten Erfolg. So gibt es Staaten, die wie Deutschland einen schnellen Ausbau der Windenergie erlebten und erleben und solche, in denen trotz der existierenden staatlichen Unterstützung keine dynamischen Entwicklungen einsetzten. Beispiele hierfür sind Grossbritannien und Frankreich. In Großbritannien wird die Menge des eingespeisten Stroms nach einem Quotenmodell reguliert und in Frankreich durch ein 500 MW Programm limitiert. Beides führte zwar zu einem gewissen Ausbau der Windenergie, der aber für Erzeuger und Industrie offenbar wenig Investitionsanreize bot. So kam es z. B. in Frankreich nicht zur Entwicklung einer heimischen Herstellerindustrie. Und in Großbritannien waren die in den achtziger und Anfang der neunziger Jahre noch vorhandenen Hersteller mangels eines heimischen Marktes zum Untergang verurteilt.

Anders dagegen Deutschland, Dänemark und Spanien, in denen es Stromeinspeisungsgesetze gibt, die ein freies Spiel der Marktkräfte ermöglichen und dem entscheidungsfreudigen Hersteller und Investor die Aussicht auf Erfolg und Wachstum eröffnen. So ist es nicht verwunderlich, dass aus diesen drei Ländern über 95% aller Hersteller kommen.

2. Entwicklung der Anlagentechnik

Die Entwicklung der heutigen Windenergieanlagentechnik beruht auf einem Prozess, der vor 25 Jahren begann. Seinerzeit herrschte die Meinung unter den Experten aus Technik und Politik vor, man müsse und könne Megawattanlagen serienreif entwickeln. Man setzte darauf, daß diese Megawattanlagen von den Energieversorgern zur Energieproduktion beschafft und zur Stromerzeugung eingesetzt werden würden. Das Schwergewicht staatlicher Förderung lag damit auf der Entwicklung von Prototypen wie Growian. Eine Grundeinstellung, die bis Ende der achtziger Jahre reichte und zur Errichtung mehrerer Prototypen der Megawattklasse der ersten und zweiten Generation führte. Zu Growian gesellten sich Namen wie WKA 60, Aeolus I und II, Monopteros, ELSAM-2000, Mod-2 und Mod-5, WTS 75, etc. um nur einige aus der Reihe der fehlgeschlagenen Entwicklungen zu nennen. Erst mit Beginn der Marktförderung in den USA, später in Dänemark und Deutschland, setzte eine technische Entwicklung bei Kleinanlagen der Größe 50 kW ein, die durch den Konkurrenzkampf eines entstehenden Marktes zur funktionsfähigen und gleichzeitig wirtschaftlich verkaufbaren Windenergieanlage führte. Heute gibt es Anlagen mit 1,5 - 2,5 MW, die mit nahezu 50% Anteil am deutschen Markt ihre Funktionsfähigkeit nachgewiesen haben. Vorwiegend für die Anwendung im Offshore-Bereich sind Anlagen bis 5 MW in Entwicklung (Abb. 1).

Basierend auf dem bereits bewährten „dänischen Konzept“, der Begrenzung der Nennleistung durch aerodynamischen Strömungsabriss am Rotorblatt, der sogenannten Stallregelung, und einer direkten Kopplung des Asynchrongenerators ans Netz, begann die Technikent-



wicklung mit dem denkbar einfachsten und daher am wenigsten störanfälligen Konzept. Konsequenterweise erlebte dieser Typ von Anlagen dann auch in Kalifornien, dem ersten wirklichen Windenergiemarkt in den achtziger Jahren, einen beispiellosen Siegeszug. Durch den Erfolg bestätigt wurde dieses Konzept unverändert in die einsetzende Größenentwicklung der Anlagen übernommen und ist bis heute - auch im Megawattbereich - eine angewandte Technik. Trotz negativer Erfahrungen mit dem Stallregelungsprinzip bei einer der zwei NIBE Anlagen in Dänemark, konnte es sich bis in den Megawatt Bereich mit Rotordurchmessern von über 60 m halten. Allerdings wird der Anteil der Stallregelung bei den ganz großen Windenergieanlagen durch die augenblickliche Entwicklung langsam verdrängt, unter anderem durch die Schwierigkeiten der erstmals in der 500/600-kW-Klasse festgestellten "stall induced vibrations", die wenn überhaupt nur mit Kunstgriffen, ausreichend zu beherrschen sind.

Auch andere Eigenschaften der Stallregelung führen zum Verlassen dieses Regelungskonzepts. Ungenügende Eingriffsmöglichkeit in die Regelbarkeit der Anlagen ebenso wie die deutlich höheren mechanischen Belastungen der Rotorblätter bevorzugen die komplizierteren Pitch geregelten Turbinen. Bei diesen gibt es neuerdings zwei Varianten, die "Active-Stall"

Abbildung 1
Größenentwicklung der Windturbinen. Anlagen bis 5 MW in Entwicklung

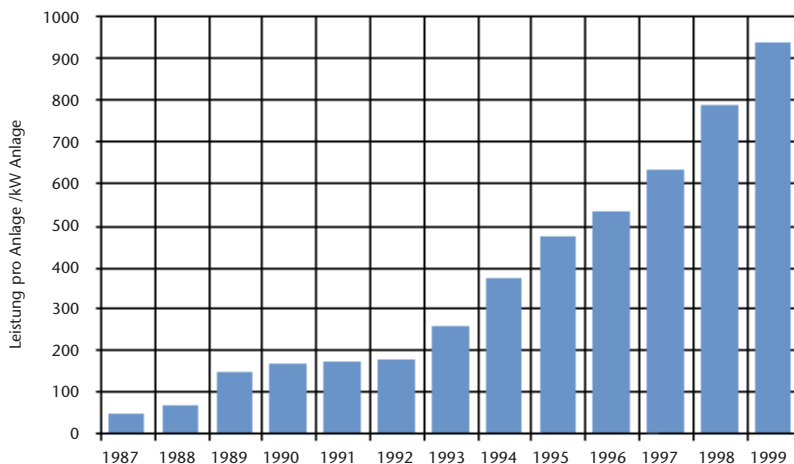
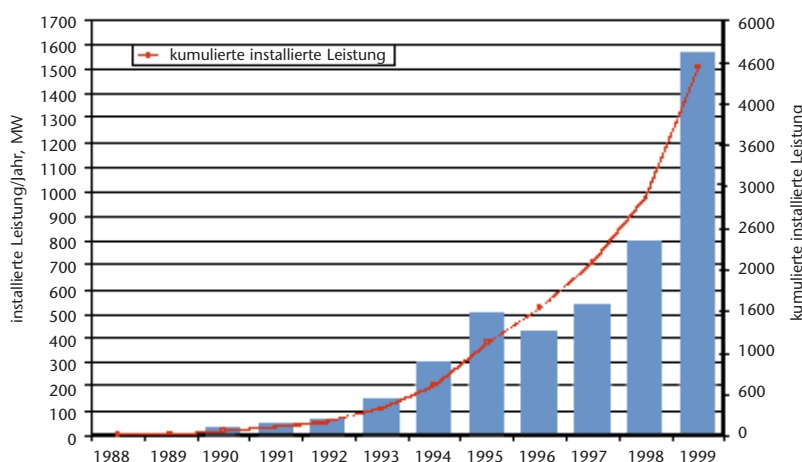


Abbildung 2
Durchschnittliche Windturbinengröße der Neuinstallation pro Jahr

und die konventionelle "Pitch-Regelung". Während bei der ersten Art mit wenigen Winkelgraden der Blattverstellung der Stall aktiv ausgelöst wird, ist bei der zweiten Variante eine Auftriebsverminderung des Blattprofils durch Anströmwinkelverkleinerung gegeben. Im ersten Fall führt der Stall zu hohen aerodynamischen Belastungen, was eine schwere Blattstruktur zur Aufnahme der Kräfte verlangt, während im zweiten Fall mit über die Nennleistung zunehmendem Wind die aerodynamischen Belastungen sinken, also Struktur- und damit Masseinsparungen möglich sind. Ob sich Active Stall durchsetzen kann, wird davon abhängen, ob sich das Prinzip auf Dauer gegenüber dem anderen technisch und damit letztlich wirtschaftlich behaupten kann.

Abbildung 3
Entwicklung der Installierten Leistung in Deutschland pro Jahr



3. Marktentwicklung in Deutschland, Europa und der Welt

Während der letzten zehn Jahre entwickelte sich der weltweite Markt der Windenergie ausserordentlich schnell (Abb. 2), vorwiegend getrieben durch die Aufstellungszahlen in Deutschland. Waren 1990 gerade mal etwa 30 MW in Deutschland installiert, so waren es Ende 1999 mit fast 4500 MW 150 mal soviel. Allein 1999 wurden mit 1568 MW mehr als 1/3 der gesamten installierten Leistung in Deutschland aufgebaut (Abb. 3). 1991 verkündete die Umweltministerin von Niedersachsen, es sei das Ziel des Landes im Jahr 2000 mindestens 1000 MW mit etwa 8000 Windturbinen in Niedersachsen zu betreiben. Mit 1204 MW Ende 1999 wurde das Ziel nicht nur erreicht sondern überschritten. Mit nur 2124 Windturbinen wurde wegen des enormen Größtenwachstums der Anlagen nur etwa ein Viertel der vorausgesagten Anzahl aufgestellt. Aus einer Branche, die vorwiegend aus enthusiastischen Kleinherstellern bestand, wurde ein Industriezweig, der allein in Deutschland im Jahr 1999 mehr als 3,2 Milliarden DM umsetzt und damit direkt und indirekt mehr als 50.000 Personen beschäftigt. Mit der Zunahme des Umsatzes ging eine Marktberreinigung einher. Einigen Herstellern gelang es nicht, sich zu behaupten, andere schlossen sich zu größeren Einheiten zusammen, während wieder andere durch multinationale Konzerne aufgekauft wurden, die im sich schnell entwickelnden, weltweiten Markt der Windenergie ein großes Geschäft witterten und sich entsprechend engagierten. Damit sind auch die Chancen einer weltweiten, nachhaltigen Windenergieentwicklung verbessert. Denn große Konzerne können in diesem immer noch risikoreichen und von der Politik abhängigen Geschäft auftretende Durststrecken finanziell besser durchstehen.

Neben Deutschland wurde Spanien in Europa zu einem weiteren Motor der Windenergieentwicklung. Mit heute bereits über 2000 MW installierter Leistung und künftigen Zuwachsraten von über 1000 MW pro Jahr, könnte Spanien Deutschland als Windenergieland Nr. 1 in naher Zukunft ablösen. In diesem weniger

dicht besiedelten und mit höheren Windgeschwindigkeiten gesegneten Land bildete sich eine ähnliche Windenergiestruktur wie in Deutschland und Dänemark. Lokale Hersteller, Projektentwickler und Betreiber bilden auch dort eine alle Elemente umfassende, lokale Marktstruktur. Immer mehr Länder interessieren sich für die Einführung der Windenergie, so dass die Prognosen für die Welt für die nächsten fünf Jahre von Jahr zu Jahr nach oben korrigiert werden müssen und derzeit mit etwa 45000 MW beziffert werden. Der größte Anteil entfällt davon auf Europa (Abb. 4), wo für Ende 2004 rund 35000 MW prognostiziert werden. Die heute weltweit rund 13900 MW wurden

durch einen Zuwachs im Jahr 1999 von über 3900 MW erreicht, gegenüber 1998 eine Steigerungsrate von 50%. Der größte Anteil davon entfiel mit 3200 MW auf Europa, wobei auf Deutschland mit fast 1600 MW wiederum 50% kamen. Möglich wurden diese enormen Steigerungsraten durch die 1999 aufgestellten Windturbinen der Megawattklasse, die über die Hälfte aller Installationen in Deutschland ausmachten. Neue Märkte entstehen in Europa in der Türkei, die einen großen Bedarf an neu zu installierender Kraftwerksleistung in den nächsten 25 Jahren benötigt, wovon bis zu 7000 MW aus dem Wind kommen könnten. Ein riesiges Entwicklungspotenzial zur Wind-

	Installierte Leistung Ende 1999, MW	Installierte Leistung im Jahr 1999, MW	prognostizierte Leistung bis 2004, MW
USA	2.445	477	4.845
Kanada	126	43	626
Süd- und Mittelamerika	97	28	697
Summe Amerika	2.668	548	6.168
Deutschland	4.442	1.568	12.142
Spanien	1.812	932	9.912
Dänemark	1.738	325	3.338
Niederlande	433	54	1.208
Großbritannien	362	24	1.312
Italien	277	80	1.477
Schweden	220	44	1.145
Griechenland	158	103	808
Irland	74	10	329
Portugal	61	10	261
Finnland	39	21	244
Österreich	34	9	214
Frankreich	25	4	725
Norwegen	13	4	863
Türkei	9	0	579
Schweiz	3	0	123
Andere europ. Länder	39	4	219
Summe Europa	9.739	3.192	34.899
V.R. China	262	25	1.362
Indien	1035	43	2.185
Japan	68	38	518
Andere asiatische Länder	11	9	161
Summe Asien	1.376	115	4.226
Mittlerer Osten	18	0	273
GUS	19	0	419
Andere Länder	5	2	185
Summe andere Kontinente	161	68	2.121
Summe Welt	13.934	3.924	47.414

Abbildung 4
Status und weltweite
Entwicklung der
Windenergie

energienutzung haben auch die Länder Südamerikas, wo Brasilien mit seinen sehr guten Windbedingungen und einem vor der Vollendung stehenden Stromeinspeisungsgesetz wohl als erstes die ökonomischen Voraussetzungen für eine großflächige Anwendung schaffen wird. Die Windenergie steht weltweit aber erst am Anfang einer Entwicklung, die nicht nur fossile Energieressourcen schont, sondern die Umwelt vor den Schadstoffen eines zusätzlichen Energiehungers der Weltbevölkerung bewahrt und Arbeitsplätze schafft. Selten ist es der Politik gelungen, durch Fördermaßnahmen einen neuen Industriezweig so effektiv und erfolgreich auf die Erfolgsschiene zu bringen.

4. Erforderliche Rahmenbedingungen für die Entwicklung der Windenergie

Wird die Entwicklung der Windenergie in einzelnen Ländern näher betrachtet, so kann festgestellt werden, dass für den Erfolg weniger die Windverhältnisse ausschlaggebend waren, als vielmehr die gesetzlichen und administrativen Rahmenbedingungen. Überall dort, wo Stromeinspeisungsgesetze für eine Mindestvergütung und die Abnahme des Stroms sorgten, entwickelte sich die Windenergie sehr dynamisch (Dänemark, Deutschland, Spanien). Dort wo Quoten und Ausschreibungsmodelle vorherrschten, war der Markt so uninteressant, dass sich die interne Industrie nicht entwickeln konnte und von der Bildfläche verschwand, sofern sie überhaupt existierte (Frankreich, Holland und England). Am umfassendsten sind wohl die Rahmenbedingungen in Deutschland geregelt. Mit dem Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) ist der weitere Ausbau der Windenergie gesichert, basierend auf den schon früher geregelten positiven Bedingungen des Baugesetzbuchs, das Industrieflächen für Windparks vorschreibt, wenn die Gemeinden einen geregelten Ausbau wollen. Denn wenn sie ausgewiesen sind, dann können nur in diesen Gebieten Windturbinen aufgestellt werden. Wenn Gemeinden solche Flächen aber nicht ausweisen, dann ist die Windturbine privilegiert und kann praktisch überall aufgestellt werden ohne große Möglichkeiten der Ablehnung.

Die Regelung im Baugesetzbuch führte zu einer umfangreichen Flächenausweisung für die Windenergie, so dass bis heute genügend Flächen für den Ausbau zur Verfügung stehen.

Eine ähnlich positive Vorschrift findet sich, mit wahrscheinlich nicht erwarteter Wirkung, im neuen EEG. Dort wird geregelt, dass die Energieversorger den Ausbau der Hochspannungsebene zu bezahlen haben. Bisher sind viele Projekte gescheitert, weil die Energieversorgungsunternehmen (EVU) eine Aufnahme der Energie, mit dem Argument verweigerten, die Hochspannungsebene sei kapazitätsmäßig erschöpft. Die neue Regelung veranlasst die Energieversorger, die Netzaufnahmekapazitäten einer erneuten Prüfung zu unterziehen, mit dem Ziel, einen vorzeitigen, Kosten verursachenden Ausbau zu vermeiden. Neu am EEG ist auch, dass jetzt EVU's von den erhöhten Vergütungen für die Windenergie ebenfalls profitieren und sich deshalb beispielsweise bei Großwindparks im Offshore-Bereich engagieren könnten. Außerdem wird ein bundesweiter Ausgleich der ungleichen finanziellen Belastungen aus der Windenergie geregelt, so dass küstennahe Energieversorger mit ihrer hohen Stromaufnahme aus Windenergie künftig nicht mehr benachteiligt sind.

Neues Förderziel ist die Anwendung der Windenergie im Offshore-Bereich. Im EEG wird der Offshore-Nutzung eine erhöhte Vergütung gewährt, vorausgesetzt der Offshore-Windpark geht vor Ende des Jahres 2006 in Betrieb. Bei den vielen bisher ungelösten rechtlichen und administrativen Schwierigkeiten ein relativ knapper Zeitraum. Das EEG regelt auch die Aufnahme der Energie aus dem Offshore-Bereich, eine Regelung die bisher fehlte und daher zum Streit mit den EVU führte. Die möglichen zur Nutzung geeigneten Flächen in Nord- und Ostsee weisen eine Kapazität für einige tausend MW auf, die wegen der hohen Windgeschwindigkeiten über See aus energetischer Sicht besonders interessant sind.

5. Künftige Entwicklung der Windenergie

Drei Bereiche der künftigen Windenergieentwicklung können betrachtet werden. Die Chancen für eine weitere Verbreitung der Nutzung auf der Welt, der Schritt zu Offshore Windparks und die für die technische Entwicklung notwendige Forschung, die eng mit der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit einhergehen wird.

Weltweite Entwicklung

Märkte wie Deutschland, Dänemark, Spanien und neuerdings auch wieder USA, die durch eine sehr dynamische Entwicklung der Windenergie geprägt sind, sind Vorbild für immer mehr Länder, sich auch in der Windenergie zu engagieren. Zwei grundsätzlich verschiedene Motivationen liegen dabei vor. Das Ziel der Schadstoffreduktion das hauptsächlich den Industrienationen der nördlichen Hemisphäre Ansporn ist, und der Mangel an Energie, der Entwicklungs- und Schwellenländer zu neuen Wegen in der Energieversorgung führt. Der erste Schritt zur Windenergienutzung ist dort, wie in den industrialisierten Ländern, die Einspeisung ins Netz. Allerdings muss sich der Nutzer verstärkt mit der Tatsache beschäftigen, dass die Einspeisung der Energie meist in schwache, nicht sehr stabile Netze erfolgt, die schnell an ihre Kapazitätsgrenze stossen können.

Bei genauerer Betrachtung der internen Situation kommen viele Länder zum Schluss, dass kleinere Anlagen im Bereich von einigen zehn kW im Verbund mit einem Diesel ein wichtiges Anwendungsziel wäre, als der netzparallele Betrieb. Projekte in dieser Richtung stossen aber auf wenig Gegenliebe bei den Herstellern, da die notwendige Betreuung solcher meist sehr abgelegenen betriebenen kleinen Anlagen zu kostenintensiv für die Firmen wäre. Die fälschlicherweise als riesiger Markt bezeichnete Wind-Diesel-Anwendung ist demnach nur ein riesiges Potenzial, das unter heutigen Gesichtspunkten nicht erschlossen werden kann. Dies wird erst dann geschehen, wenn in diesen Ländern durch netzgebundene Anwendung die für kleine Windturbinen erforderliche Basis

für Fertigung, Wartung und Betreuung geschaffen werden konnte und die Konkurrenzsituation der in diesen Ländern am Markt tätigen Hersteller die Suche nach neuen Anwendungsbereichen verlangt. Die Erschließung des Wind-Diesel-Potenzials ist somit erst im zweiten Schritt der Windenergienutzung zu erwarten. Alle Versuche, den zweiten vor dem ersten Schritt tun zu wollen, werden wohl nur in Ausnahmefällen von Erfolg gekrönt sein.

Offshore-Anwendung

Mit der zunehmenden Belegung der Onshore-Standorte rückt der Betrieb von Windparks im küstennahen Offshore-Bereich in den Blickpunkt des Interesses. Gleichzeitig haben die Windturbinen heute Einheitsgrößen von über 2 MW erreicht, die eine Offshore-Anwendung erst sinnvoll machen. Jeder der großen, weltweit tätigen Hersteller hat bereits heute Offshore-Anlagen mit einer Leistung zwischen 2,5 und 5 MW in der Entwicklung. Dänemark legte einen Entwicklungsplan mit 4000 MW offshore auf, von dem die ersten Stufen im Jahr 2001/2002 verwirklicht wird. In der Nordsee und auch Ostsee werden von deutschen Projektentwicklern Windparks mit Blockgrößen von bis zu 500 MW geplant, die vor Ende des Jahres 2006 in Betrieb gehen sollen, damit sie noch die Vergünstigung einer im EEG festgelegten erhöhten Vergütung in Anspruch nehmen können.

Mit der Offshore-Anwendung gehen auch neue technische Probleme einher. Korrosion durch die Salzatmosphäre, Erosion durch Wassertröpfchen, Wartungsarmut und hohe Lebensdauer verbunden mit der Optimierung der Fundamentierung unter dem Gesichtspunkt der Wassertiefe und Wellenbewegung sowie die Energieübertragung an Land sind die Fragen die es zu lösen gilt. Auch der Transport und Aufbau der geplanten großen Megawatt-Windturbinen verlangen neue Lösungsansätze. Damit ergibt sich zu den schon vorhandenen Fragestellungen eine ganze neue Palette an Problemen, die zur Lösung ansteht.

Forschung

Heutige Forschung und Entwicklung in der Windenergie wird in Deutschland von staatlicher Seite als nicht mehr erforderlich eingestuft, da Windenergie ein kommerzielles Stadium erreicht habe und man deshalb die Forschung der Industrie überlassen könne. Häufig wird unter Forschung im Bereich Windenergie nur die Verbesserung der Windenergieanlage gesehen, was aber falsch ist, da in der Anwendung sehr viele ungelöste Fragen aufgetaucht sind, die dringend einer Beantwortung bedürfen, um die wirtschaftlichen Risiken zu reduzieren. Forschung und Entwicklung umfassen daher zwei wesentliche Bereiche der Windenergie, die Anlagentechnik und die Anwendung.

Bei der Windenergieanlage selbst wird heute jegliche Forschungs- und Entwicklungsaktivität in den Firmen durch das ungebremste Größtenwachstum der Anlagen dominiert. Es geht darum, die nächste Windturbinengröße technisch zu beherrschen, damit sie verkauft werden kann. Der Konkurrenzkampf der Firmen untereinander wird fast alleine über die Größe der Anlagen ausgetragen, nicht über deren Qualität, Langlebigkeit oder durch Detailoptimierung erreichten besonderen Wirtschaftlichkeit. Ein Meter mehr Rotordurchmesser mit dem entsprechend höheren Jahresenergieertrag ist auf dem Markt mehr wert als die Verlängerung der Lebensdauer einzelner Komponenten. Dieser Entwicklungswettlauf wird erst dann aufhören, wenn das Größtenwachstum ein natürliches Ende gefunden hat. Erst dann werden Entwicklungen zur Kostenreduktion, Lebensdauererhöhung oder auch besondere Regelungsstrategien zur Erhöhung des Energieertrags eine wesentliche Rolle als Unterscheidungsmerkmal der Produkte spielen. Mit anderen Worten, Forschung und Entwicklung zur Verbesserung der Windenergieanlagen wird noch lange ein Thema sein müssen, um die Konkurrenzfähigkeit der Windenergie im Vergleich mit anderen Energieträgern zu verbessern.

Im Anwendungsbereich der Windenergie taten sich mit der weltweiten Verbreitung der Windenergie ganz neue Probleme auf. Die gerade in

Dänemark und Norddeutschland übliche Anwendung im turbulenzarmen Flachland mit der dort gegebenen sicheren rechnerischen Bestimmung der Windressource spiegelte eine Beherrschung der Materie vor, die in Wahrheit nicht vorhanden ist. Deutlich wurde dies mit dem Betrieb von Windenergieanlagen im hügeligen bis bergigen Binnenland Deutschlands und erst recht in den oft schroffen Geländestrukturen der Mittelmeeranrainerstaaten.

Im sogenannten komplexen Gelände versagen die bisherigen Vorhersagemodelle für den langjährigen Windenergieertrag am Standort. Die oft erheblichen Turbulenzen schädigen die Windenergieanlagen oder reduzieren ihre Lebenserwartung durch deutlich schnellere Ermüdung des Materials. Die Risiken für Investoren und Banken steigen, aber auch für die Firmen, die die Windgutachten erstellen, auf deren Ertragsprognose hin zwei- bis dreistellige Millionensummen investiert werden. Um die im komplexen Gelände auftretenden Veränderungen des Windes und dessen Auswirkungen besser vorhersagen zu können, sind erhebliche Forschungsaufwendungen erforderlich, die sich allerdings auch wirtschaftlich auszahlen, wenn es gelingt, durch verbesserte Modelle die Risiken zu vermindern. Wegen der erforderlichen aufwändigen Modellierung des Windes über komplexen Geländestrukturen handelt es sich hier um echte Grundlagenforschung, aus der sich der Staat, wenn er die verstärkte Windenergienutzung will, nicht zurückziehen darf. Da weltweit gesehen nicht die ebene, flache Geländestruktur der Normalfall für den Betrieb von Windparks ist, sondern das Bergland, ist dieser Forschungsbereich für eine weltweite Verbreitung der Windenergie von ganz besonders grundlegender Bedeutung.

6. Schadstoffvermeidung, Energierückzahlzeit, Recycling und Kostensenkungspotenzial

In einer Abschätzung [2] wird für das Jahr 2005 ein Anteil von 4,5% (21.390 GWh) der Windenergie an der Stromversorgung Deutschlands prognostiziert. Damit ergibt sich das in *Abb. 5* dargestellte CO₂-Vermeidungspotenzial.

Die Energierückzahlzeit für die Herstellung der Windenergieanlagen, deren Aufbau und Abbruch wird in der Größenordnung von sechs bis zehn Monaten veranschlagt, je nach dem Windaufkommen am Standort. Untersuchungen zum Recycling oder Weiterverwertung von Windenergieanlagen nach dem Erreichen der Lebensdauer haben gezeigt, dass die befürchteten Probleme für die Entsorgung der Kunststoffteile wie Rotorblätter und Gondelverkleidungen kein spezielles Problem darstellen. Die Mengen stellen trotz der grossen Stückzahlen von heute keinen grossen Beitrag dar im Vergleich zu anderen Bereichen mit glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) [3,4].

Das Kostenreduktionspotenzial bei der Herstellung von Windenergieanlagen ist heute noch nicht ausgeschöpft. Allerdings muss auch festgehalten werden, dass die oft angesprochenen Serieneffekte nicht so gravierend sein können, wie beispielsweise im Automobilbau, weil die Stückzahlen wesentlich geringer sind. Kostenreduktionen durch Massenfertigung lassen sich nach gängigem Verständnis nur mit Zehnerpotenzsprüngen in der Fertigungsmenge realisieren. So ist eine Kostenreduktion durch diesen Effekt von 100 Anlagen auf 1000 Anlagen im

Potenzieller Jahresenergieertrag	Anteil am Reduktionsziel 25% der CO ₂ -Emission der Energieversorgung	Anteil am Reduktionsziel 25% der CO ₂ -Emission der Stromversorgung
8251 GWh (31.12.99)	1,9%* - 3,0%**	5,7%* - 9,1%**
21390 GWh (Prognose 2005)	4,9%* - 7,8%**	14,7%* - 23,5%**

*Substitution von Kohle, Öl, Gas und Kernenergie **Substitution von Kohle, Öl, Gas

Jahr von etwa 15% möglich, aber kaum realisierbar. Im Bereich der MW-Anlagen stellen 100 Stück heute 100 bis 200 MW Jahresproduktion dar, eine Menge die nur wenige Hersteller erreichen. Den nächsten Sprung auf 1000 Einheiten pro Jahr erreicht kein heutiger Hersteller, denn dies bedeutete 1000 MW bis 2000 MW pro Jahr und Firma. Die weltweite Produktion 1999 betrug aber nur knapp 4000 MW, geliefert von mehr etwa 15 Herstellern, das heißt die Durchschnittsproduktion liegt bei ungefähr 250 MW pro Hersteller. Ein weiteres Reduktionspotenzial liegt in der technischen Verbesserung der Anlagen. Allerdings findet heute im wesentlichen der Konkurrenzkampf

Abbildung 6
Beitrag der Windenergienutzung am CO₂-Reduktionsziel der Bundesrepublik [2]

	spez. CO ₂ -Vermeidung	Jahresenergieertrag - Stand 31.12.1999	Prognose bis 2005
Brennstoffersparnis entsprechend dem Strommix (1995) ohne Kernenergie	0,93 kg/kWh	7,67 Mio. t CO ₂	19,89 Mio. t CO ₂
Brennstoffersparnis entsprechend dem aktuellen Strommix (1995)	0,60 kg/kWh	4,95 Mio. t CO ₂	12,84 Mio. t CO ₂
Brennstoffersparnis aus Kohle, Öl und Gas	0,89 kg/kWh	7,34 Mio. t CO ₂	19,04 Mio. t CO ₂
Brennstoffersparnis aus Kohle, Öl, Gas und Kernenergie	0,58 kg/kWh	4,786 Mio. t CO ₂	12,41 Mio. t CO ₂

Abbildung 5
CO₂ Vermeidungspotenzial in Deutschland bei der Verwendung von Windenergie zur Stromerzeugung [2]

über die Größe der Anlage statt und nicht mit dem Versuch, sie preiswerter zu machen. Dennoch wird auch diese Entwicklung in absehbarer Zeit verstärkt einsetzen und wahrscheinlich ein Kostenreduktionspotenzial von weiteren 10 bis 20% erschließen. Weiter ist anzunehmen, dass konventionelle Energieträ-

ger künftig verstärkt die von ihnen verursachten Umweltschäden finanziell tragen müssen, so dass in zehn bis zwanzig Jahren die Windenergie keine besonderen Rahmenbedingungen mehr benötigen wird, um mit den konventionellen Energieerzeugern konkurrieren zu können.

*Abbildung 7
DEWI Windenergie-
Testfeld nördlich von
Wilhelmshaven mit
Anlagen der
Megawatt-Klasse
und Messmasten*



7. Literatur

- [1] BTM Consult ApS:
World Market Update 1999, Ringkøbing,
March 2000
- [2] Rehfeldt, K.
Potenziale der Offshore-Windenergienutzung und ihr Beitrag zum Klimaschutz. Workshop Offshore-Windenergienutzung, Technik, Naturschutz, Planung, 27.06.2000, Wilhelmshaven
- [3] Hinsch, Christian; Söker, Holger.
Wenn die Gondeln Trauer tragen....
Entsorgungsmöglichkeiten von
Windkraftanlagen, DEWI Magazin Nr. 6,
Februar 1995
- [4] Kehrbaum Ralph,
Perspektiven eines Recycling
von Windkraftanlagen,
DEWI Magazin Nr. 7, August 1995