

REPORT

Windenergie im (Klima-) Wandel

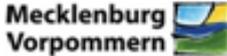
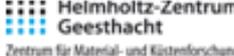
Betrachtung der Potenziale und Perspektiven der
Windenergie an der deutschen Ostseeküste unter dem
Einfluss des Klimawandels

Cindy Dengler

RADOST-Berichtsreihe
Bericht Nr. 34
ISSN: 2192-3140



Kooperationspartner

	<p>Büro für Umwelt und Küste, Kiel BfUK</p>	 <p>Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin IGB</p>
	<p>Geographisches Institut der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel CAU</p>	 <p>Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde IOW</p>
 <p>Coastal Research & Management</p>	<p>Coastal Research & Management, Kiel CRM</p>	 <p>Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin IÖW</p>
	<p>Ecologic Institut, Berlin (Koordination) Ecologic</p>	 <p>Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein, Husum LKN</p>
	<p>EUCC – Die Küsten Union Deutschland, Warnemünde EUCC-D</p>	 <p>Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein LLUR</p>
 <p>Großmann Ingenieur Consult GmbH</p>	<p>GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH – Niederlassung Rostock GICON</p>	 <p>Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg StALU MM</p>
 <p>Ingenieurbüro Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH</p>	<p>H.S.W. Ingenieurbüro Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH, Rostock HSW</p>	 <p>Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau URCE</p>
 <p>Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material- und Küstenforschung</p>	<p>Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung HZG</p>	 <p>Johann Heinrich von Thünen-Institut Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsanstalt für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Braunschweig vTI</p>
	<p>Institut für Angewandte Ökosystemforschung, Neu Broderstorf IfAÖ</p>	

REPORT

WINDENERGIE IM (KLIMA-) WANDEL

BETRACHTUNG DER POTENZIALE UND PERSPEKTIVEN
DER WINDENERGIE AN DER DEUTSCHEN OSTSEEKÜSTE
UNTER DEM EINFLUSS DES KLIMAWANDELS

Cindy Dengler
GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH

RADOST-Berichtsreihe
Bericht Nr. 34

ISSN: 2192-3140

Rostock, Juli 2014

Inhalt

Vorwort	9
1 Einleitung	12
2 Windenergie	14
2.1 Das natürliche Potenzial der Windenergie.....	14
2.1.1 Luftdichte.....	14
2.1.2 Windgeschwindigkeit.....	15
2.2 Das technische Potenzial der Windenergie.....	16
2.2.1 Technik.....	16
2.2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	18
2.3 Das wirtschaftliche Potenzial der Windenergie.....	19
2.3.1 Kosten.....	19
2.3.2 Einnahmen.....	20
3 Klima und Klimawandel	21
3.1 Klima und Klimawandel an der deutschen Ostseeküste.....	22
3.1.1 Bisherige Klimaveränderungen.....	22
3.1.2 Mögliche Klimaänderungen bis 2100.....	23
4 Entwicklung der Potenziale der Photovoltaik unter dem Einfluss des Klimawandels	26
4.1 Einfluss des Klimawandels auf die Parameter des natürlichen Potenzials.....	27
4.1.1 Luftdichte.....	27
4.1.2 Windgeschwindigkeit.....	27
4.2 Einfluss des Klimawandels auf die Parameter des technischen Potenzials.....	28
4.2.1 Technik.....	28
4.2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	29
4.3 Einfluss des Klimawandels auf die Parameter des wirtschaftlichen Potenzials.....	30
5 Zusammenfassung	32
Literaturverzeichnis	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Potenzialdefinitionen für erneuerbare Energien [vgl. WM M-V 2011]	10
Abbildung 2: Einfluss- bzw. Restriktionsbereiche bei der Nutzung erneuerbarer Energien .	11
Abbildung 3: Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland	12
Abbildung 4: Struktur der Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2013 (gesamt: 152,6 TWh).....	13

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anzahl der Wind-Volllaststunden nach typischen Standorten für Windenergieanlagen in Deutschland (in Stunden pro Jahr) [Statista 2013].....	17
Tabelle 2:	mittlere Hauptinvestitionskosten für Onshore-Windenergieanlagen [DWG 2013]	19
Tabelle 3:	Klimaänderungen an der deutschen Ostseeküste bis heute (2009) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)	23
Tabelle 4:	Mögliche Änderungen der Temperatur an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990).....	24
Tabelle 5:	Mögliche Änderungen des Niederschlags an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990).....	24
Tabelle 6:	Mögliche Änderungen der Luftfeuchte an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990).....	24
Tabelle 7:	Mögliche Änderungen der Windverhältnisse an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990).....	25
Tabelle 8:	Mögliche Änderungen der Bewölkung an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)	25
Tabelle 9:	Parameter mit Einfluss auf die Potenziale der Windenergie	26

Vorwort

Die Vorkommen der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas verringern sich kontinuierlich. In absehbarer Zeit werden diese Energieträger verbraucht sein. Um die verbleibenden Ressourcen so effizient wie möglich zu nutzen, werden Anpassungsstrategien wie gesteigerte Energieeffizienz, Energieeinsparungen und der Umstieg auf andere Energiequellen entwickelt. Aufgrund der Endlichkeit der fossilen Energieträger, aber auch aus Sicht des Klima- und Umweltschutzes wird langfristig eine 100%ige Energieversorgung aus erneuerbaren Energiequellen angestrebt. In diesem Sinn wird im Bereich der erneuerbaren Energien viel in die Forschung nach effizienten und innovativen Techniken sowie in die Anpassung rechtlicher Regelungen und technischer Richtlinien investiert.

Die erneuerbaren Energien stellen nach menschlichen Maßstäben unerschöpfliche Energiequellen dar. Dennoch können von ihrem natürlichen Dargebot bisher nur wenige Promille (Solarstrahlung, Wind) bis Prozente (Biomasse, Erdwärme) tatsächlich in Form von Strom oder Wärme genutzt werden. Die Potenziale der erneuerbaren Energien werden beeinflusst durch technischen Fortschritt und sich verändernden Rahmenbedingungen in Politik und Wirtschaft. Im Bereich der erneuerbaren Energien spricht man daher unter anderem von natürlichen, technischen und wirtschaftlichen Potenzialen der Energien.

Als natürliches Potenzial erneuerbarer Energien wird das innerhalb einer Region und einem bestimmten Zeitraum theoretisch nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten nutzbare Energieangebot eines Energieträgers (Erdwärme, Wind, Sonneneinstrahlung oder Biomasse) bezeichnet. Synonym sind auch die Bezeichnungen theoretisches oder physikalisches Potenzial im Gebrauch. Mittels physikalischer Gesetze oder auch Naturgesetze werden Zustände und deren Änderungen eines physikalischen Systems (z.B. Klimasystem) mittels messbarer, eindeutig definierter physikalischer Größen bzw. Parameter oder Variablen beschrieben. Im Bezug auf den Klimawandel sind als Parameter z.B. Lufttemperatur, Niederschlag oder Windgeschwindigkeit zu nennen.

Das technische Potenzial umfasst den Anteil am natürlichen Potenzial, der hinsichtlich der aktuell besten am Markt verfügbaren Technik sowie unter Berücksichtigung struktureller und ökologischer Restriktionen sowie gesetzlicher Vorlagen nutzbar ist. Die wirtschaftliche Machbarkeit bleibt dabei unberücksichtigt. Technische Restriktionen ergeben sich aus den Grenzen für Wirkungsgrade, Anlagengrößen und dem technischen Entwicklungspotenzial der jeweiligen Nutzungstechnologien. Strukturell ergeben sich Nutzungseinschränkungen beispielsweise durch Ortsgebundenheit (Erdwärme) oder einem begrenztem Transportradius (Biomasse) der Energiequelle. Trotz ihrer Vorteile stellen Anlagen zur Nutzung der erneuerbaren Energien auch Eingriffe in die Natur und Landschaft dar, aus denen sich Beeinträchtigungen für diese ergeben können. Zum Schutz der Natur und Landschaft wird die Nutzung der Erneuerbaren durch ökologische Restriktionen eingeschränkt. Dies erfolgt hauptsächlich durch die Gesetzgebung (z.B. Raumplanung oder Schutzgesetze).

Das wirtschaftliche Potenzial umfasst den Anteil des technischen Potenzials, der wirtschaftlich konkurrenzfähig genutzt werden kann. Es ist abhängig von konkurrierenden Systemen sowie vom vorherrschenden Energiepreisgefüge und stellt im Idealfall die Kosten-Nutzen-Situation ohne Berücksichtigung von Fördermaßnahmen dar. Im Bereich der erneuerbaren Energien sind zum Ausgleich der vergleichsweise hohen Gesamtkosten (Investition, Betrieb und Entsorgung) noch Fördermaßnahmen (z.B. EEG-Einspeise-

vergütung) notwendig. In den meisten Fällen ergibt sich daher das wirtschaftliche Potenzial aus der Konkurrenzfähigkeit der gewinnbaren Energie inklusive der aus energiepolitischen Gründen vollzogenen Fördermaßnahmen.

Nach Abzug aller bisher genannten Restriktionen verbleibt das ausschöpfbare Potenzial der erneuerbaren Energien. Dieses wird jedoch selten vollständig realisiert, da zunächst noch subjektive Hemmnisse und Zeitverzögerungen die Ausnutzung vermindern. Subjektive Hemmnisse bzw. soziale Akzeptanzprobleme treten besonders deutlich bei der Diskussion um Windkraftanlagen und Landschaftsbild hervor. So wurden bereits Projekte aus landschaftsästhetischen Gründen nicht realisiert. Zeitverzögerungen entstehen u.a. durch die Prioritätensetzung von Investoren, die sich meist zuerst auf die Projekte mit maximalem Gewinn fokussieren. Abzüglich dieser Komponenten verbleibt das erschließbare Potenzial als der tatsächlich zu erwartende Beitrag zur Energieversorgung.

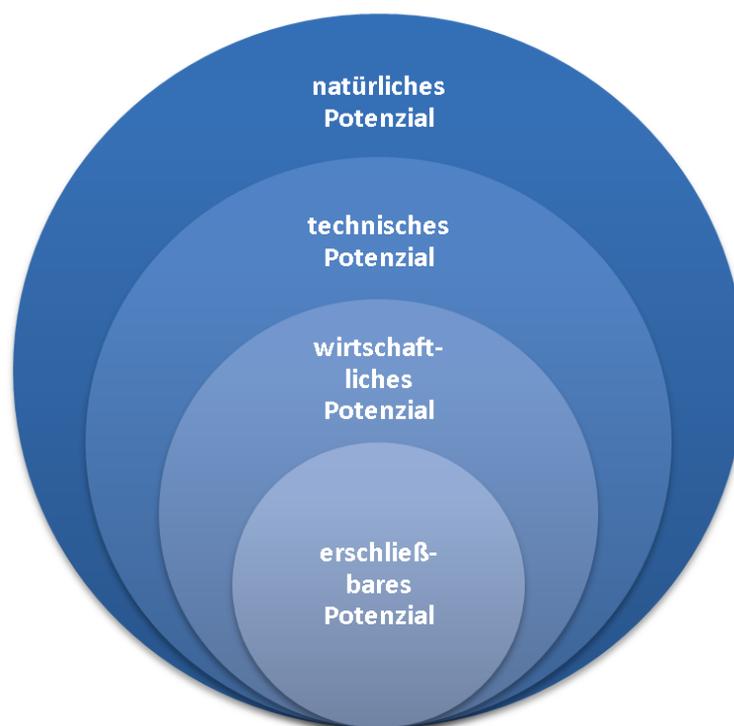


Abbildung 1: Potenzialdefinitionen für erneuerbare Energien [vgl. WM M-V 2011]

Anhand dieser Potenzialdefinitionen ist zu erkennen, dass die Möglichkeiten zur Nutzung der erneuerbaren Energien von vielen Parametern beeinflusst bzw. begrenzt werden. Diese Parameter lassen sich in die Bereiche Natur, Technik, Recht und Wirtschaft einordnen. Die technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Parameter sind das Ergebnis gesellschaftlicher Entscheidungen. So kann z.B. ein heute noch potenzieller aber verbotener Anlagenstandort durch Gesetzesänderungen morgen schon für die Nutzung wieder freigegeben werden oder andersrum. Wie viel vom erschließbaren Energiedargebot tatsächlich erschlossen wird, richtet sich vor allem nach der Höhe der Nachfrage.

Die Parameter, die das natürliche Potenzial der erneuerbaren Energien bestimmen, unterliegen physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die vom Menschen nicht bzw. nur im geringen Maße bewusst verändert werden können. Der Klimawandel und die dadurch hervorgerufenen Veränderungen der Umweltbedingungen sind laut derzeitigem Wissenstand

zwar zum größten Teil die Folge menschlichen Handelns, sie entziehen sich jedoch vollkommen der menschlichen Kontrolle. Die Veränderung von Umweltbedingungen bzw. -parametern kann sich direkt auf das natürliche Potenzial der erneuerbaren Energien auswirken. Aber auch indirekt kann der Klimawandel die Nutzung der Erneuerbaren beeinflussen. Um sich an unvermeidbare Veränderungen anpassen zu können, ist es wichtig zu wissen in wie weit der Klimawandel Auswirkungen auf die Potenzialparameter der erneuerbaren Energien und damit auf ihre Nutzungsmöglichkeiten haben wird.

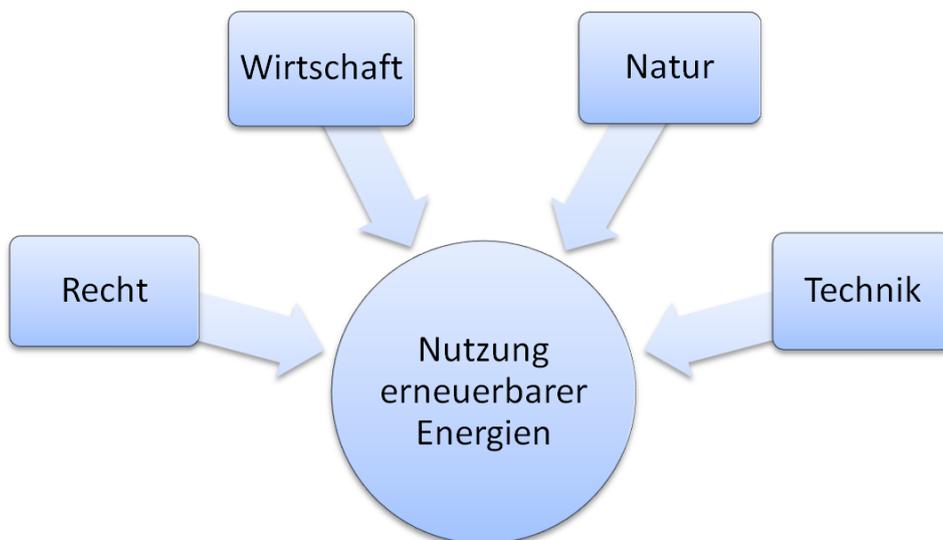


Abbildung 2: Einfluss- bzw. Restriktionsbereiche bei der Nutzung erneuerbarer Energien

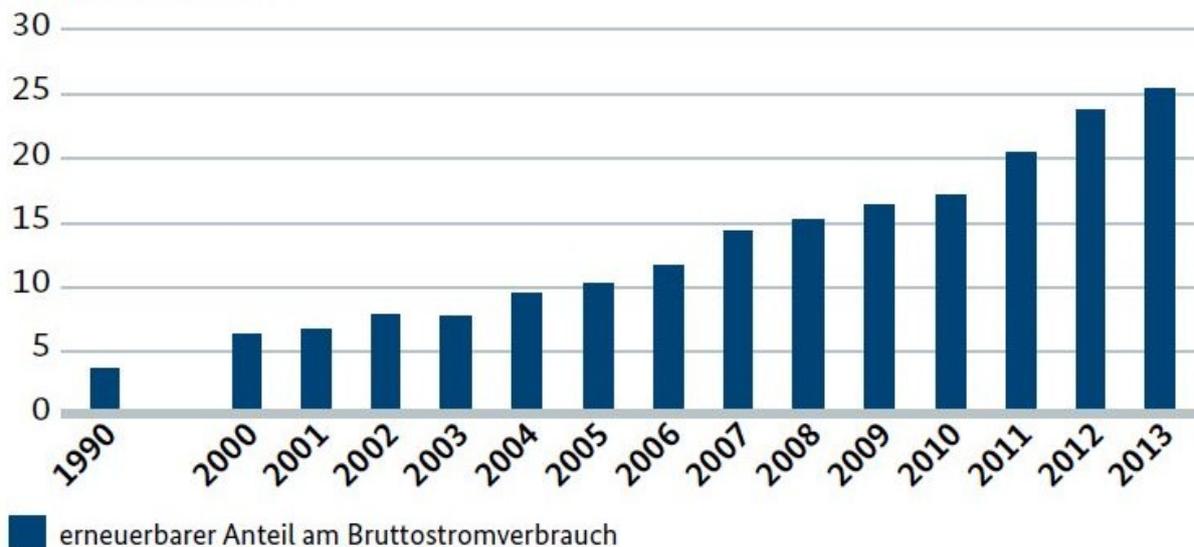
Zielstellung in der Bearbeitung des Fokusthemas Erneuerbare Energien ist es, die Auswirkungen veränderter Umweltbedingungen (Klimawandel) auf die Potenziale einiger erneuerbaren Energieformen (Geothermie, Photovoltaik, Windenergie, Biogas) und damit auf die Möglichkeiten ihrer Nutzung zu prognostizieren und ggf. erforderlich werdende strategische Anpassungsempfehlungen zu erarbeiten. Besonderes Augenmerk soll dabei auf die Erzielung von Synergieeffekten bei möglichen Kombinationen der Nutzung Erneuerbarer Energien mit technischen Anlagen aus thematisch völlig anderen Bereichen gelegt werden.

Durch das Aufzeigen der zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Erneuerbaren Energienutzungen wird es Planern und Entwicklern in der Region ermöglicht, die Ergebnisse gerade bei langfristigen Planungsleistungen in ihre Planungen mit einzubeziehen bzw. eigene Strategien daraus abzuleiten. Dies betrifft nicht nur den Bereich der Erneuerbaren Energien. Ziel ist es, auch Planern und Projektentwicklern aus regional sehr typischen Wirtschaftszweigen, wie z.B. dem Küstenschutz oder maritimen Tourismus die Möglichkeit aufzuzeigen, wie durch eine innovative Herangehensweise die Nutzung der Erneuerbaren Energien von vornherein mit in die Projektplanungen (wie z.B. Küstenschutzanlagen bzw. touristischen Einrichtungen) einbezogen werden können. Hierfür wird insbesondere das Anwendungsprojekt zur Nutzung von Geothermie bei der Planung von Küstenschutzanlagen unter Einbeziehung von touristischen Einrichtungen initiiert und dabei regionale Planer als Dritte mit einbezogen.

1 Einleitung

Mit der in 2011 beschlossenen Energiewende in Deutschland wurde auch der beschleunigte Ausbau der erneuerbaren Energien vereinbart. Bis zum Jahr 2050 soll die Stromerzeugung von rund 80% aus fossiler Energie und Kernenergie auf 80% aus erneuerbaren Energien steigen. Im Jahr 2013 konnten mit 25,4% (152,6 TWh) erstmals mehr als ein Viertel des gesamtdeutschen Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energiequellen regeneriert werden. (siehe Abbildung 3)

Anteil in Prozent



Stand: Februar 2014; Angaben vorläufig

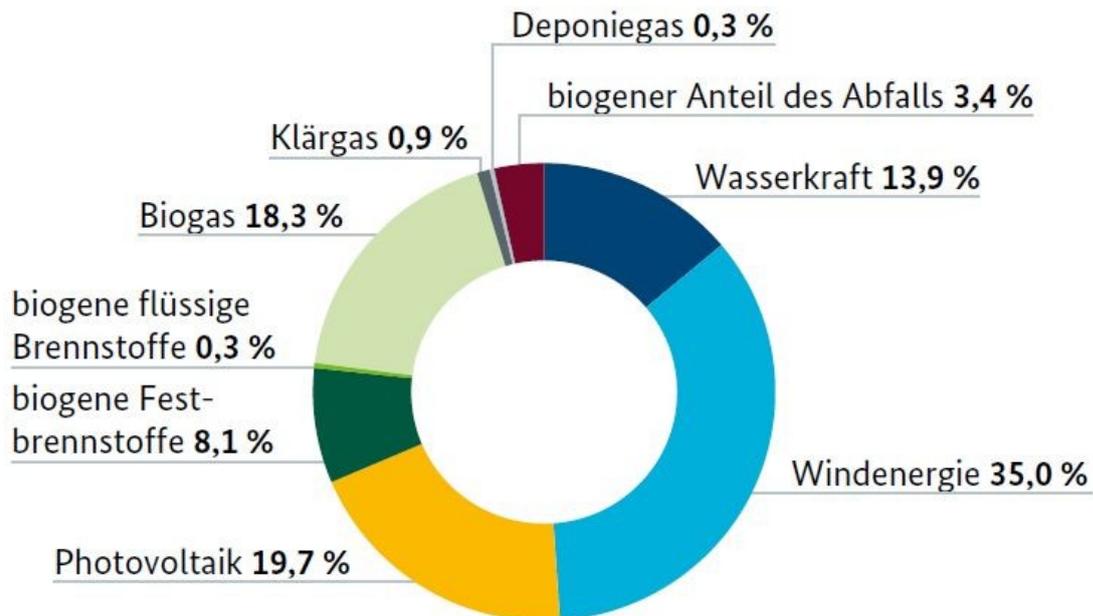
Quelle: ZSW nach Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)

Abbildung 3: Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland

Abbildung 4 zeigt die Verteilung der Strombereitstellung auf die einzelnen erneuerbaren Energien. Die Windenergie nimmt mit 8,9% (53,4 TWh) den größten Anteil ein.

Der Wind wird vom Menschen seit Jahrhunderten als Energiequelle für mechanische Antriebe und zur Fortbewegung genutzt. Als Folge der Ölkrise in den 70er Jahren und eines gestiegenen Umweltbewusstseins der Bevölkerung, wuchs die weltweite Nutzung der Windkraft zur Stromerzeugung in den letzten drei Jahrzehnten rapide an. Die moderne Windkrafttechnik hat sich zu einem starken Industrie- und Wirtschaftszweig entwickelt, der zurzeit mit der intensiven Weiterentwicklung von Offshore-Windkraftanlagen einen weiteren großen Fortschritt in der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien anstrebt.

Deutschland bleibt mit ca. 33.729,83 MW installierter Leistung (Stand 31.12.2013) führend in Europa. China führt weltweit bei der insgesamt installierten Leistung, gefolgt von den USA und Deutschland auf Platz drei. [BWE 2013]



Stand: Februar 2014; Angaben vorläufig

Quelle: ZSW nach Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)

Abbildung 4: Struktur der Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2013 (gesamt: 152,6 TWh)

Für die deutsche Energiewende spielt die Windenergie eine Schlüsselrolle. Unter Berücksichtigung der externen Kosten ist die Onshore-Windenergie schon jetzt die günstigste verfügbare Energiequelle. Der Kostenvorteil gegenüber nichterneuerbaren Energiequellen wird zukünftig noch deutlicher werden.

Durch die Nutzung erneuerbarer Energieträger konnten im Jahr 2013 Treibhausgase von knapp 146 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten vermieden werden. Auf den Stromsektor entfielen über 105 Millionen Tonnen. Ca. 40 Millionen Tonnen (27,5%) Treibhausgas-Emissionen konnten allein durch die Nutzung von Windenergie eingespart werden. [BMWi 2013] Windenergie steht nach der Bioenergie an zweiter Stelle bei der Vermeidung von Treibhausgasen und trägt wesentlich zu einer klimaneutralen Energieversorgung und damit zum Klimaschutz bei.

Andersherum könnte der Klimawandel aber auch die Nutzung der Windenergie beeinflussen. Wie sich die Potenziale der Windenergie unter dem Einfluss des Klimawandels entwickeln, soll hier näher betrachtet werden. Der vorliegende Bericht befasst sich mit der Analyse und Prognose der Potenziale der Windenergie an der deutschen Ostseeküste. Dabei wurde folgende Vorgehensweise gewählt.

1. Erläuterungen zur Windenergie und ihren Potenzialparametern
2. Betrachtung des Klimas und des Klimawandels an der deutschen Ostseeküste
3. Ermittlung eventueller Veränderungen der Potenzialparameter durch den Klimawandel und Schlussfolgerung der Entwicklungsperspektiven der Stromerzeugung durch Windenergie aufgrund veränderter Potenzialparameter

2 Windenergie

Der Begriff Wind bezeichnet im Allgemeinen die Verlagerung von Luftteilchen in Bezug zu deren Geschwindigkeit und Richtung [DWD 2010]. In Bewegung geraten die Luftteilchen durch Druckunterschiede in der Erdatmosphäre, die wiederum durch solare Einstrahlung entstehen. Windenergie ist also eine indirekte Form von Solarenergie, die durch moderne Windenergieanlagen (WEA) oder auch Windkraftanlagen (WKA) teilweise in elektrische Energie umgewandelt werden kann.

2.1 Das natürliche Potenzial der Windenergie

Das natürliche Potenzial der Windenergie wird von der Quantität und Qualität des Winddargebotes an einem Standort bestimmt.

Die Qualität der Windenergie hängt im Wesentlichen von der Windgeschwindigkeit und der Luftdichte ab. Diese Parameter bestimmen, mit welcher Kraft der Wind an einer Oberfläche angreift. Die Windkraft, bzw. -energie nimmt quadratisch mit der Windgeschwindigkeit zu, das heißt, doppelte Windgeschwindigkeit bedeutet vierfache Kraft.

Im Idealfall steht am Standort der Windenergieanlage ein ausreichend kräftiger Wind über lange Zeiträume (Quantität) zur Verfügung. Somit wäre eine konstante Stromerzeugung aus Windenergie möglich.

2.1.1 Luftdichte

Wie oben schon beschrieben, entsteht Wind als Folge der Sonneneinstrahlung bzw. der Globalstrahlung und der damit verbundenen Lufterwärmung. Über Landmassen und Wasseroberflächen erwärmt sich die Luft unterschiedlich stark. Eine Erwärmung führt zur Ausdehnung der Luft und damit zu unterschiedlicher Luftdichte und unterschiedlichem Luftdruck. Als Ausgleichsströmung, abgelenkt durch die Erdrotation und andere Einflüsse, entsteht Wind.

Die Luftdichte bezeichnet die Masse Luft pro Volumeneinheit (z.B. kg/m^3). Sie ist abhängig von der Höhe im Bezug zum Meeresspiegel und damit dem Luftdruck, der Lufttemperatur sowie von der Luftfeuchte.

Der Luftdruck entsteht durch die Gewichtskraft der Luftsäule, die auf die Erdoberfläche einwirkt. Er ist höhenabhängig und nimmt, wie auch die Luftdichte, mit zunehmender Höhe ab. Der mittlere Luftdruck der Erdatmosphäre beträgt auf Meereshöhe 1013,25 hPa. Die Luftdichte beträgt auf Meereshöhe und bei einer Lufttemperatur von Null Grad $1,292 \text{ kg/m}^3$.

Ebenso verringert sich die luftdichte mit steigendenden Lufttemperaturen, da bei höheren Temperaturen sich die Luft ausdehnt bzw. die Anzahl der Luftmoleküle pro Volumeneinheit sinkt. Schon bei einer Erhöhung der Lufttemperatur von 0°C auf 5°C , verringert sich die Luftdichte um $0,023 \text{ kg/m}^3$ auf $1,269 \text{ kg/m}^3$. Durchschnittlich verändert sich die Luftdichte um 1,018% pro fünf Grad Celsius. Bei 20°C Lufttemperatur beträgt die Luftdichte $1,2041 \text{ kg/m}^3$ und damit $0,088 \text{ kg/m}^3$ weniger als bei Null Grad.

Eine exakte Dichtebestimmung der Luft erfordert zudem die Berücksichtigung der Luftfeuchte, da diese die Gaskonstante der Luft verändert. Generell kann man sagen, dass mit steigender Luftfeuchte die Luftdichte abnimmt. Die Ursache dafür liegt in der molaren Masse der Gasteilchen, welche für die Dichte eines Gases entscheidend ist. Die molare Masse von Wassermolekülen (18 g/mol) ist geringer, als die der Hauptbestandteile von Luft (Stickstoff 28 g/mol, Sauerstoff 32 g/mol, Kohlendioxid 44 g/mol, Argon 40 g/mol). Die mittlere molare Masse und damit die Dichte der Luft sinken mit dem Anteil an Wasser. [Wiki 2013]

Je höher die Luftdichte ist, desto höher ist der Energiegehalt der Luft und damit des beim Druckausgleich entstehenden Windes. Dies ist für die Stromerzeugung aus Windenergie insofern von Bedeutung, da die durch Windenergieanlagen nutzbare Windenergie nur 59,3% vom Gesamtenergiegehalt des Windes bzw. seiner Strömungsenergie beträgt. Dieser Wert wird Betzcher Leistungsbeiwert ($c_{p,Betz} = 0,593$) genannt. Die restlichen 40,7% Windenergie bestehen zum einen aus der verbliebenen Bewegungsenergie nach dem Durchgang des Windes durch das Windrad und zum anderen aus dem Wind, der dem Windrad ausweicht und es verlustfrei umströmt. [BWE 2013]

2.1.2 Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit bezeichnet die durch die Luft, bzw. ein Luftteilchen, zurückgelegte Wegstrecke pro Zeiteinheit (z.B. m/s). Wind entsteht beim Ausgleich zweier Luftdruckgebiete. Die Luft strömt dabei immer von Hochdruckgebieten zu den Tiefdruckgebieten. Je höher die Differenz des Luftdrucks der Gebiete, desto stärker fällt der Luftstrom bzw. die Windgeschwindigkeit aus. Die bisher höchsten gemessenen Windgeschwindigkeiten um 500–650 km/h traten bisher nur in großen Höhen bei den sogenannten Jetstreams auf. [Wiki 2013]

Moderne Windenergieanlagen wandeln die Bewegungsenergie, also die kinetische Energie des Windes mit Hilfe von Generatoren in elektrische Energie um. Dabei gilt, je stärker, gleichmäßiger (Qualität) und über die Zeit konstanter (Quantität) der Wind weht, desto mehr Strom kann durch eine WEA erzeugt werden.

Beste Windnutzungsbedingungen herrschen auf dem Meer (offshore). Über der nahezu ebenen Wasseroberfläche können die Winde ungebremst maximale Geschwindigkeiten entwickeln und über längere Zeitabschnitte konstant halten. Die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten über dem Meer sind folglich höher, als die über Land. Für die Nordsee werden in einem Bereich ca. 10 km von der Küste entfernt Windgeschwindigkeiten von 8 – 9 m/s angenommen. Die Energieausbeute der Offshore-WKA kann so bis zu 40% höher ausfallen als an Land [BWE 2013].

An Land (onshore) hängt die Windgeschwindigkeit stark von Oberflächenbeschaffenheit bzw. Rauigkeit des Geländes ab. Je stärker die Bodenrauigkeit ausgeprägt ist, desto stärker wird der Wind abgebremst. Durch Bäume, Häuser, Antennenmasten oder andere in die Höhe ragende Hindernisse, erreicht die Windgeschwindigkeit nur langsam höhere Werte. Zudem erzeugen die Hindernisse Turbulenzen, die ungünstig auf die WEA einwirken können. Mit relativ flachem Gelände und wenig Landschaftsinventar bieten Küstenregionen sehr gute Bedingungen zur Windkraftnutzung. Aber auch im Binnenland können WEA effizient

eingesetzt werden, wenn sie möglichst hoch gebaut werden. Denn mit wachsendem Abstand, nimmt der hemmende Einfluss der „rauen“ Geländeoberfläche auf den Wind ab.

Parameter des natürlichen Potenzials der Windenergie

Das natürliche Potenzial der Windenergie hängt von der Quantität und Qualität des Winddargebotes an einem Standort und damit im Wesentlichen von folgenden Parametern ab:

- Windgeschwindigkeit
- Luftdichte

2.2 Das technische Potenzial der Windenergie

Das technische Potenzial der Windenergie ist der Anteil des natürlichen Potenzials, der unter Berücksichtigung der Grenzen der Nutzungstechnologien sowie infrastruktureller und ökologischer Restriktionen tatsächlich nutzbar gemacht werden kann.

2.2.1 Technik

Aufgrund der langen Geschichte der Windenergienutzung haben sich vielfältige Bauweisen von Windrädern entwickelt. Im Rahmen dieser Arbeit kann nicht auf alle Variationen eingegangen werden. Im Folgenden wird auf Basis der Angaben des Bundesverbandes Windkraft e.V. [BWE 2013] die derzeit geläufigste Form von Windenergieanlagen grob beschrieben.

Grundsätzlich gliedern sich alle WEA (offshore/onshore) in die Bestandteile Fundament, Turm, Gondel und Rotor. Der konstruktive Aufbau von Fundament und Turm variiert je nach den gegebenen Standortbedingungen (Tragfähigkeit des Untergrundes, Witterungsverhältnisse, onshore/offshore). Als Fundamentformen für Onshore-Anlagen kommen Flach- oder Pfahlgründungen aus Stahlbeton, für Offshore-Anlagen Schwerkraftgründungen (Betonsenkkästen), Stahlpfeiler oder Pfahlstrukturen mit Dreibein oder Fachwerkstruktur in Betracht. Als gängige Turmbauart hat sich derzeit der Stahlrohrturm durchgesetzt. Weitere Varianten sind abgespannte Masten und Gittertürme aus Stahl oder Betontürme aus Stahlbeton. Um mitunter extremen Witterungsverhältnissen (Starkwind, Frost, Offshore u.a. Wellen, See- und Eisgang, etc.) standhalten zu können, müssen Fundament und Turm v.a. den Anforderungen an die Standsicherheit gerecht werden. Die wesentlichen Komponenten zur Energieerzeugung sind einerseits der Rotor, bestehend aus Nabe und Rotorblättern, und andererseits der in der Maschinengondel untergebrachte Generator und das Getriebe. Der Generator ist das Herzstück jeder WEA. Durch ihn wird die mechanische Energie des Rotors in elektrische Energie umgewandelt.

Der jährliche Stromertrag einer WEA richtet sich nach ihrer Nennleistung. Die Nennleistung moderner Windenergieanlagen liegt bei durchschnittlich 2-3 MW. Besonders leistungsstarke Anlagen erbringen sogar 5-6 MW. Als Nennleistung wird die unter optimalen Betriebsbedingungen technisch maximal mögliche Leistung einer Windenergieanlage bezeichnet. Unter optimalen Betriebsbedingungen versteht man zum einen das Vorhandensein eines hohen natürlichen Windangebots und zum anderen die Abwesenheit

von Störfaktoren, die einem reibungslosen Betrieb entgegenwirken. Solche Faktoren resultieren zum großen Teil aus besonderen Witterungsverhältnissen wie z.B. starke Temperaturschwankungen oder starke Windbelastungen. Zum Schutz der WEA vor Schäden und vorzeitigem Verschleiß werden sie z.B. bei Windgeschwindigkeiten über 25 m/s (90 km/h) oder sonstig ungünstigen Witterungsbedingungen (z.B. bei zu starker Eisbildung) abgeschaltet.

Die Betriebsdauer einer WEA abzüglich der potenziellen Abschaltzeiten aufgrund widriger Witterungsbedingungen sowie aufgrund von Wartungsarbeiten oder durch sonstige ungeplante Störungen wird auch in Voll- und Teillaststunden ausgedrückt. Aufgrund der möglichen Ausfälle ist die insgesamt in einem Jahr von einer WEA umgesetzte Arbeit kleiner als die maximal mögliche. Die Stromerzeugung mittels WEA hängt auch vom Windangebot ab. Je besser das Windangebot und je weniger Betriebsausfälle, desto höher die Anzahl erreichter Volllaststunden. Die für WEA an verschiedenen Standorten nach derzeitigem Stand erreichbaren Volllaststunden sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Anzahl der Wind-Volllaststunden nach typischen Standorten für Windenergieanlagen in Deutschland (in Stunden pro Jahr) [Statista 2013]

WEA-Standort	Anzahl Volllaststunden in Stunden pro Jahr
Offshore: höhere Entfernung von der Küste	3.600
Offshore: mittlere Entfernung von der Küste	3.200
Offshore: geringe Entfernung von der Küste	2.800
Onshore: Atlantikküste UK	2.700
Onshore: Küstennähe und windreiche Standorte	2.000
Onshore: Binnenland Deutschland	1.300

Wesentlichen Einfluss auf die Nennleistung hat, neben dem Windangebot, die Dimensionierung der Anlage. Höhere Türme steigern generell die Energieproduktion einer WEA, da einerseits mit steigender Höhe stärkere und konstantere Windgeschwindigkeiten zur Verfügung stehen und andererseits größere Rotoren installiert werden können. Als Faustformel gilt, dass pro zunehmenden Meter Turmhöhe, mit je 1% mehr Energieertrag gerechnet werden kann. Größere Rotorflächen können mehr Wind zur Energieproduktion nutzen. Eine Verdoppelung des Durchmessers bewirkt eine Vervierfachung der Fläche und folglich eine viermal größere verfügbare Windleistung. Übliche Anlagen von 2013 haben einen Rotordurchmesser von ca. 100 m und somit eine durchströmte Fläche von ca. 7.900 m². Die Anzahl, der aerodynamisch optimal designten Rotorblätter, beträgt derzeit standardmäßig drei. Dies ist v.a. das Ergebnis der Gegenüberstellung der Kosten- und Leistungsdaten von WEA verschiedener Blattanzahl. Dreiblatt-Anlagen sind laufruhig und haben gute Wirkungsgrade. Hergestellt werden die langen und leichten Rotorblätter aus Verbundmaterialien wie Glas- oder Kohlenfaser. Um den Rotor der jeweiligen Windrichtung nachführen zu können, ist er samt Gondel drehbar auf dem Turm aufgelagert.

2.2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Bei der Planung von Windenergieanlagen ist eine Vielzahl rechtlicher Regelungen zu beachten. Im ersten Schritt ist meist die Erstellung einer gebietsbezogenen Planung durch die zuständige Gemeinde erforderlich. Die Gemeinden sind infolge der Regelungen des Baugesetzbuches (BauGB) dazu berechtigt, mithilfe von Flächennutzungs- und Bebauungsplänen, auf gemeindlicher oder regionaler Ebene Vorrangflächen bzw. Eignungsgebiete für die Windkraftnutzung auszuweisen. Diese Eignungsgebiete werden durch Ausschussverfahren bezogen auf die Ziele der Raumordnung und Landesplanung ermittelt. Der Ausschluss bestimmter Flächen von der Windenergienutzung erfolgt im Wesentlichen zum Schutz von

- Natur, Landschaft und Umwelt (vor allem Artenschutz)
- Kultur- und Sachgütern (z.B. Infrastruktur, Siedlungen, etc.)
- Mensch, insbesondere die Lebensqualität und Gesundheit / Erholung betreffend.

Dem Bau und Betrieb von WEA in ausgewiesenen Eignungsgebieten stehen im Idealfall keine öffentlichen Belange, wie z.B. der Natur- und Landschaftsschutz, entgegen. In der Realität werden die rechtlich geregelten Ausschlusskriterien jedoch intensiv diskutiert. Die Windenergiebranche und deren Befürworter sind der Ansicht, dass das Flächenpotenzial für Windenergie bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist. Aus naturschutzfachlicher Sicht wird der Ausbau von Windparks jedoch zu unbedacht vorangetrieben und dadurch die Belange des Natur- und Landschaftsschutzes nicht genügend berücksichtigt. Trotz des relativ geringen Flächenverbrauchs einer WEA birgt jedoch ihre Größe ein großes Konfliktpotenzial.

Ist die gebietsbezogene Planung geklärt, ist in einem einzelfallbezogenen Genehmigungsverfahren die Genehmigungsfähigkeit der Anlage zu prüfen. Genehmigungsvoraussetzung ist die Erfüllung bauplanungsrechtlicher und evtl. weiterer spezifischer Anforderungen, die sich aus tangierten Fachgesetzen (z.B. Luftverkehrsgesetz LuftVG, Straßenrecht etc.) ergeben. Im Mindesten benötigen WEA ab einer Gesamthöhe von 50 m, neben einer Baugenehmigung, einer Genehmigung durch das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG), in dessen Rahmen auch eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) erfolgen kann. Hier werden noch einmal die wesentlichen möglichen Auswirkungen (z.B. Lärm, Lichtemissionen, etc.), die durch die Errichtung und den Betrieb einer WEA entstehen betrachtet. In der Regel sind mit der Erteilung der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung alle Anforderungen berücksichtigt und keine weiteren Genehmigungen einzuholen.

Parameter des technischen Potenzials der Windenergie

Das technisch nutzbare Potenzial der Windenergie wird vor allem von folgenden Parametern beeinflusst:

- Leistungsfähigkeit der technischen Anlagen (Nennleistung, Anlagendimension)
- Optimale Betriebsbedingungen
- rechtliche Standortplanung
 - Bundesbaugesetz (BauG), Raumordnungsgesetz (ROG)
 - Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG)
 - etc..

2.3 Das wirtschaftliche Potenzial der Windenergie

Wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit bzw. auf das wirtschaftliche Potenzial haben die Kosten und Einnahmen, die durch Errichtung und Betrieb einer WEA entstehen. Wenn die laufenden Kosten, niedriger als die erzielten Einnahmen sind, spricht man von einem rentablen Betrieb.

Die gute Planungssicherheit, die das Erneuerbaren-Energien-Gesetz seit dem Jahr 2000 geboten hat, führte zu einer rasanten Entwicklung in der Windbranche. Stetige Innovationen und technologische Verbesserungen ließen neue Dimensionen von Windenergieanlagen möglich werden. Mit zunehmender Größe der Windenergieanlagen wurden die Kosten pro Kilowattstunde Strom geringer und vor allem die möglichen Erträge pro bebauter Fläche immer größer.

Die Stromgestehungskosten von Windenergieanlagen wurden 2005 noch mit rund 0,09 €/kWh angegeben. Berechnungen für das Jahr 2012 gehen von 0,06 bis 0,08 €/kWh für die Windenergie an Land aus. Die Kosten für Strom aus Offshore-Windenergieanlagen liegen darüber. Hier sind gegenwärtig günstigstenfalls 0,11 €/kWh zu erreichen. [DWG 2013]

2.3.1 Kosten

Die Investitionskosten einer WEA sind verhältnismäßig hoch. Je nach Anlagentyp (onshore/offshore) betragen die Hauptinvestitionskosten für Onshore-Anlagen ca. 1.200 €/kW (siehe Tabelle 2) und für Offshore-Anlagen zwischen 1.200 – 2.200 €/kW [BWE 2013]. Tabelle 2 zeigt, dass die Investitionskosten mit zunehmender Nennleistung sinken.

Die Hauptinvestitionskosten tragen einen Anteil von 73-78% an der Gesamtkosten und beinhalten die Kosten für die WEA, den Transport zum Aufstellungsort sowie für die Installation. Die verbleibenden „Investitionsnebenkosten“, also Kosten, die einmalig vor der Inbetriebnahme der WEA anfallen, beinhalten die Kosten für des Fundament, die Netzanbindung, die Erschließung, der Planung und Sonstigem.

Tabelle 2: mittlere Hauptinvestitionskosten für Onshore-Windenergieanlagen [DWG 2013]

Leistungsklasse	Nabenhöhe		
	< 100 m	100 – 120 m	>120 m
unter 2 MW	1.090 €/kW	1.200 €/kW	-
2 – 3,5 mW	1.010 €/kW	1.150 €/kW	1.340 €/kW

Wesentliche Betriebskosten fallen für Wartung und Reparatur sowie Pachtzahlungen, aber auch technische und kaufmännische Betriebsführung an. Erfahrungsgemäß steigen die Kosten für Wartung und Reparatur in der zweiten Dekade der Anlagenlebensdauer von etwas über 1 ct/kWh auf 1,47 ct/kWh und machen damit den mit Abstand größten Betriebskostenanteil aus. Pachten weisen mit 0,51 ct/kWh den zweitgrößten Kostenfaktor unter den Betriebskosten auf. Versicherungen, Rücklagen und sonstige Kosten liegen zusammengerechnet bei 42 ct/kWh. [DWG 2013]

2.3.2 Einnahmen

Der wirtschaftliche Betrieb von Windenergieanlagen über einen langen Zeitraum wird durch eine gesicherte Vergütung für den eingespeisten Strom gewährleistet. Die kalkulierte Lebensdauer von Windenergieanlagen beträgt 20 Jahre. Die Höhe der Vergütung wird in Deutschland durch eine im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) geregelte Einspeisevergütung für Strom aus regenerativen Energiequellen festgelegt. Der Gesetzestext formuliert weiterhin die Pflicht einer „vorrangige[n] Abnahme, Übertragung, Verteilung und Vergütung“ von Strom aus erneuerbaren Energiequellen gegenüber konventionellen Energieträgern.

Für 2013 beträgt die Anfangsvergütung für Windenergie an Land in den ersten fünf Jahren nach Inbetriebnahme der Anlage 8,8 ct/kWh. Die Anlagenbetreiber erhalten für die weiteren fünfzehn Jahre die Grundvergütung 4,8 ct/kWh. Je nach Windstärke eines jeweiligen Standorts kann dieser Betrag jedoch variieren. Nicht miteinberechnet wurde hierbei eine so genannte Systemdienstleistungsbonus für Anlagen an Land von 0,48 ct/kWh sowie eine Repowering-Bonus von 0,49 ct/kWh. Für Strom aus Offshore-Anlagen ergibt sich 2013 eine Grundvergütung von 3,5 ct/kWh und eine Anfangsvergütung in den ersten zwölf Jahren ab der Inbetriebnahme der Anlage 13,0 ct/kWh. [EEG 2012]

Voraussetzung für einen optimalen Energieertrag ist der störungsfreie Betrieb und damit die vollständige Ausnutzung der für eine WEA an ihrem jeweiligen Standort erreichbaren Volllaststunden. (s. Tabelle 1)

Parameter des wirtschaftlichen Potenzials der Windenergie

Das wirtschaftliche Potenzial der Windenergie wird vor allem von folgenden Parametern beeinflusst:

- Kosten (Investitionskosten, Betriebskosten)
- Einnahmen (Fördertarife, Energieverkauf)

3 Klima und Klimawandel

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) definiert das Klima als die Zusammenfassung aller Wettererscheinungen, die den durchschnittlichen Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. in einer Region charakterisieren. Es wird repräsentiert durch die statistischen Gesamteigenschaften (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, Andauerwerte u.a.) von Wetterelementen über einen genügend langen Zeitraum (ca. 30 Jahre). Als Wetter- oder auch Klimaelemente gelten u.a. die physikalischen Parameter Lufttemperatur, -feuchtigkeit und Luftdruck, solare Strahlung, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Bewölkung. Die Mittelwerte der Klimaelemente aus dem Zeitraum 1961 – 1990 werden als "Normalwerte" bezeichnet. Dieser Zeitraum wurde von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) als international gültige Referenzperiode festgelegt. [DWD]

Der Begriff „Klimawandel“ ist ein von den Medien unserer Zeit geprägter Begriff. Unter ihm wird die Änderung des Klimas verstanden, die direkt oder indirekt aus den Aktivitäten der Menschen, die Zusammensetzung der Erdatmosphäre verändernd, resultiert. Zusätzlich kommen die über vergleichbare Zeiträume beobachteten natürlichen Klimaschwankungen hinzu. [IPPC 2007] Der Klimawandel zeigt sich bisher in ungewöhnlich stark veränderten Durchschnittswerten und Variabilität von Klimaelementen. Am deutlichsten ist dies anhand des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur um 0,8°C seit dem Jahr 1990 zu erkennen. Aus diesem Grund wird im Zusammenhang mit dem Klimawandel häufig auch von der globalen Erwärmung gesprochen.

Um der anthropogen verstärkten globalen Erwärmung entgegenzuwirken und potenzielle Folgen abzumildern oder zu verhindern, wurde bisher intensiv Klimaschutz (Mitigation) betrieben. Eine sehr bekannte Klimaschutzmaßnahme ist z.B. die Minderung von Treibhausgasemissionen durch die Nutzung von erneuerbaren Energien statt fossiler Energieträger. Da nach dem derzeitigen Stand wissenschaftlicher Erkenntnisse der Klimawandel nicht mehr aufzuhalten ist, sind Maßnahmen zur Anpassung (Adaption) notwendig um die Schäden für die natürlichen und anthropogenen Systeme so gering wie möglich zu halten. Für die Entwicklung und Durchführung entsprechender Anpassungsmaßnahmen müssen die zu erwartenden Klimafolgen und ihre Auswirkungen auf wichtige Bereiche wie die Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, Küsten- und Hochwasserschutz, Biodiversität und Naturschutz, Gesundheit, Energie etc. bekannt sein.

Welche Klimaveränderungen und deren Folgen uns in Zukunft noch erwarten, versucht man mittels einer Vielzahl an Bemessungen, Berechnungen und Klimamodellierungen (z.B. REMO, WETTREG) herauszufinden. Jedoch sind nahezu alle bisherigen Prognosen über die zukünftige Entwicklung des Klimas mit großen Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten resultieren zum einen aus der begrenzten Kenntnis über das Klimasystem sowie der externen Einflussfaktoren auf das Klima. Zum anderen sind sie in den Defiziten von Klimamodellen begründet.

Trotz dieser Unsicherheiten lassen sich auf der Grundlage bisheriger Erfahrungen sowie der gegenwärtigen Klimasituation jedoch u.a. folgende Tendenzen des Klimawandels erkennen und ableiten:

- ansteigende Temperaturen der erdnahen Atmosphäre sowie der Meere bzw. Oberflächengewässer

- veränderte Niederschlagsverhältnisse (langfristig abnehmender Trend bei Sommerniederschlägen; zunehmende Winterniederschläge)
- Anstieg des Meeresspiegels u.a. aufgrund schmelzender Gletscher und Eisschilde
- häufigere und intensivere Extremwetterereignisse (High-Impact-Weather) z.B. Starkregenereignisse, Hitzewellen, Tornados etc.

3.1 Klima und Klimawandel an der deutschen Ostseeküste

Das Gesamtgebiet von Deutschland gehört zum warm-gemäßigten Regenklima der mittleren Breiten. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 8,2°C und die durchschnittliche Sonnenscheindauer 1.528 Stunden im Jahr. Die überwiegend westlichen Winde bringen ganzjährig feuchte Luftmassen vom Atlantik heran und damit Niederschlagsmengen bis zu 789 l/m² im Jahr. Der ozeanische Einfluss sorgt in der Regel für milde Winter und nicht zu heiße Sommer. Das Klima in Mecklenburg-Vorpommern ist sehr kontinental geprägt. Im Landesinneren herrschen relativ große Temperaturunterschiede zwischen Winter und Sommer. An der Küste ist der Jahresgang der Temperaturen hingegen gedämpft, wobei die Temperaturminima und -maxima verzögert sind. Das Klima in Schleswig-Holstein ist auf Grund der Lage zwischen Nord- und Ostsee stark ozeanisch geprägt mit relativ geringen Temperaturjahresgängen. Die Temperaturminima und -maxima treten verhältnismäßig spät auf. Die Niederschlagsmengen sind sehr hoch. Vor allem im Herbst sorgen die warmen Meeresflächen für kräftigen Feuchtenachschub und entsprechende Regenfälle.

Hinsichtlich der vorherrschenden Temperaturen liegt die Ostseeküste im bundesweiten Mittelfeld. Allerdings gehört die Ostseeküste zu den sonnenreichsten Gegenden Deutschlands. Mit durchschnittlich 1.648 Sonnenstunden lag Mecklenburg-Vorpommern z.B. im Jahr 2009 an erster Stelle. Im Jahr 2010 war mit insgesamt 1.827 Sonnenstunden die Greifswalder Oie der sonnigste Ort in Deutschland. [DWD] Grund für die Wolkenarmut an der Ostseeküste ist zum einen die Tatsache, dass Tiefdruckgebiete meist sehr schnell über die Ostseeregion hinweg ziehen. Die in Küstengebieten durchschnittlich stärkeren Winde lassen Wolkendecken auch schnell wieder aufreißen. Zudem haben sich Regenwolken schon häufig im Westen abgeregnet. Im Winter wirkt sich die Nähe zu skandinavischen Hochdruckgebieten so aus, dass sich Wolken weiträumig auflösen. Im Sommer verdunstet aus dem kühlen Meer weniger Wasser. Deshalb bilden sich in der Ostseeregion weniger Wolken als im Binnenland.

3.1.1 Bisherige Klimaveränderungen

Wie sehr sich das Klima in Deutschland und insbesondere in M-V und S-H verändert hat, geht aus den langjährig dokumentierten Messdaten des Deutschen Wetterdienstes hervor. So ist z.B. zu erkennen, dass in der deutschen Ostseeregion die Klimaerwärmung bisher weniger stark ausgeprägt ist als in anderen Regionen Deutschlands. Mit 0,4°C ist der Temperaturanstieg in Mecklenburg-Vorpommern einer der geringsten. Der Temperaturanstieg in Schleswig-Holstein beträgt 0,8°C und liegt damit genau im Trend der weltweiten mittleren Erwärmung. Infolge der Erwärmung stieg auch die Anzahl der Sommertage sowie der tropischen Nächte. Die Anzahl der Frosttage nahm ab. Im Vergleich

zu den 1940er Jahren wurden in den letzten Jahren bis zu 10 Sommertage mehr und bis zu 20 Frosttage weniger gezählt.

Wie die Temperaturen so haben auch die durchschnittlichen Niederschlagsmengen in Deutschland zugenommen. Deutschlandweit betrug die Zunahme bisher 8%. Schleswig-Holstein liegt mit 10 bis 13% weit über dem bundesweiten Durchschnitt. In Mecklenburg-Vorpommern ist dagegen mit 1,5% eine sehr geringe Zunahme zu verzeichnen. Insgesamt nimmt der Niederschlag besonders in den Wintermonaten zu. In den Sommermonaten bleiben die Niederschläge relativ konstant oder zeigen leicht abnehmende Tendenzen. In Schleswig-Holstein ist dagegen auch im Sommer eine Zunahme an Niederschlägen zu verzeichnen.

Tabelle 3: Klimaänderungen an der deutschen Ostseeküste bis heute (2009) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)

Klimaelemente	BRD	M-V	S-H
durchschnittliche Temperatur	+0,8°C	+0,4°C	+0,8°C
absolute Niederschlagsmenge	+8%	+1,5%	+10-13%
Windverhältnisse	keine Änderungen	keine Änderungen	keine Änderungen
Sonnenscheindauer	zunehmend	zunehmend	zunehmend

Quelle: zusammengestellt aus Daten des DWD

Eine systematische Veränderung der Windverhältnisse in Deutschland bzw. an der deutschen Ostseeküste konnte bisher nicht festgestellt werden. Die Sonnenscheindauer erfährt dagegen deutschlandweit seit den 1990er Jahren einen relativ starken Aufwärtstrend. Besonders auffällig ist die sehr geringe Anzahl von Jahren ab 1990 in denen die durchschnittliche Sonnenscheindauer unter dem Referenzwert von 1960-1990 (ca. 1.520 h) liegt. [DWD 2010]

3.1.2 Mögliche Klimaänderungen bis 2100

Deutschlands Küstenregionen von Nord- und Ostsee erwarten bis zum Ende des 21. Jahrhunderts einen vergleichsweise geringen Temperaturanstieg von 2,1 bis 4,8°C. Ursache dafür ist die Nähe zum Meer und das relativ ausgeglichene und gemäßigte Küstenklima. Allerdings wird sich die Häufigkeit so genannter Temperaturkenntage (Eistage, Frosttage, Sommertage, Tropennächte) zum Teil deutlich verändern. In den Sommermonaten kann es aufgrund der Erwärmung zu einem Anstieg der Sommertage um bis zu 38 Tage kommen. Ebenso steigt vermutlich die Anzahl der Tropennächte um bis zu 23 Nächte. In den Wintermonaten führt die Erwärmung an der Ostseeküste zu einem Rückgang der Frosttage um 18 bis mögliche 50 Tage.

Tabelle 4: Mögliche Änderungen der Temperatur an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)

Temperatur	Jahr			Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max
Ø Temperatur [°C]	+2,1	+3	+4,8	+1,5	+2,7	+4,6	+1,9	+3	+5,1	+2,3	+3,2	+4,7	+1,9	+3,4	+4,8
Sommertage	+7,4	+16,8	+38,3	0	+1,5	+3,5	+5,7	+12,2	+30,3	+0,9	+2,6	+5,5	0	0	0
heiße Tage	+2,1	+5,8	+14,7	+0,1	+0,3	+0,6	+1,6	+4,9	+12,7	+0,1	+0,5	+1,8	0	0	0
tropische Nächte	+1,2	+8,9	+23	0	+0,2	+0,8	+1,2	+7,8	+19,1	+0,1	+0,9	+3,1	0	0	0
Frosttage	-17,9	-34,5	-50,1	-3,5	-7,4	-11,8	0	0	0	-1,3	-3,8	-6,1	-12,3	-24,5	-33,2
Eistage	-8,1	-15,6	-24	-0,6	-1,7	-2,9	0	0	0	-0,1	-0,9	-1,8	-6,9	-12,7	-21

Quelle: zusammengestellt aus Daten des Norddeutschen Klimabüros, Stand05/ 2011

Laut Klimaberechnungen werden die jährlichen Niederschlagsmengen an der Ostseeküste um bis zu 14% zunehmen. Insbesondere in den Wintermonaten werden die Niederschläge um 15 bis zu 64% intensiver. Eine starke Abnahme um bis zu 38% ist dagegen bei den sommerlichen Niederschlägen zu erwarten. In deren Folge wird mit zunehmend außergewöhnlichen Trockenheiten in den Frühjahrs- und Sommermonaten zu rechnen sein.

Tabelle 5: Mögliche Änderungen des Niederschlags an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)

Niederschlag	Jahr			Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max
Regen [%]	0	+7	+14	+1	+12	+27	-6	-17	-38	-2	+8	+19	+15	+30	+64
Regentage	-12,1	-3	+3,3	-1,6	+1,1	+5	-2,3	-7,9	-17,2	-4,3	-0,6	+1,5	+1,5	+4,5	+8,1
Schnee [%]	-61	-82	-92	-35	-72	-98	0	0	0	-9	-67	-96	-64	-83	-96
Schneetage	-0,2	-3,1	-4,8	-0,1	-0,5	-0,7	0	0	0	-0,2	-0,1	0	-0,1	-2,4	-3,9

Quelle: zusammengestellt aus Daten des Norddeutschen Klimabüros, Stand05/ 2011

Tabelle 6: Mögliche Änderungen der Luftfeuchte an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)

Luftfeuchte	Jahr			Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max
relative Luftfeuchte [%]	-1	0	+1	+1	+1	+2	-2	-1	+1	-1	0	0	-2	-1	+1
bodennaher Wasserdampfgehalt [%]	+17	+22	+26	+16	+20	+25	+14	+19	+22	+18	+23	+29	+19	+28	+30

Quelle: zusammengestellt aus Daten des Norddeutschen Klimabüros, Stand05/ 2011

Seit Aufzeichnung der Wetterdaten sind für die Windverhältnisse in Deutschlands Küstenregionen keine systematischen Veränderungen zu erkennen. Trotzdem ist es laut Klimaberechnungen möglich, dass vor allem im Winter die durchschnittlichen

Windgeschwindigkeiten um bis zu 15% und damit auch die Sturmstärken bis zu 14% zunehmen können. Die Anzahl der Sturmtage bleibt dagegen relativ stabil.

Tabelle 7: Mögliche Änderungen der Windverhältnisse an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)

Wind	Jahr			Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max
mittlere Windgeschwindigkeit [%]	+1	+2	+4	+1	+2	+6	-10	-1	+2	-2	+2	+4	0	+5	+15
Sturmintensität [%]	0	+2	+4	-2	+2	+5	-8	-1	+2	-3	+2	+5	0	+5	+14
Sturmtage	+2,2	+3	+4,6	-0,1	+0,2	+0,6	-0,3	0	+0,6	+0,7	+1,3	+2,1	+0,5	+1,5	+3
windstille Tage	-0,2	-0,6	-1,3	-0,2	-0,4	-0,7	-0,2	+0,1	+0,3	-0,3	-0,1	0	-0,5	-0,3	0

Quelle: zusammengestellt aus Daten des Norddeutschen Klimabüros, Stand05/ 2011

Die jährlich durchschnittliche Sonnenscheindauer wird im Vergleich zu heute (1961-1990) bis Ende des 21. Jahrhunderts generell um 5 bis 7% abnehmen. Hauptsächlich infolge zunehmender Bewölkung ist vorwiegend in den Wintermonaten mit bis zu 27% weniger Sonnenstunden zu rechnen.

Tabelle 8: Mögliche Änderungen der Bewölkung an der deutschen Ostseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990)

Bewölkung	Jahr			Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max	min	Ø	max
Sonnenscheindauer [%]	-5	-6	-7	-8	-14	-16	-5	0	+6	-4	-3	0	-12	-20	-27
Bedeckungsgrad [%]	-6	0	+2	-5	+1	+4	-13	-5	+1	-5	-1	+1	-1	+1	+5

Quelle: zusammengestellt aus Daten des Norddeutschen Klimabüros, Stand05/ 2011

4 Entwicklung der Potenziale der Photovoltaik unter dem Einfluss des Klimawandels

Im Kapitel 2 wurden die Parameter mit Einfluss auf die Potenziale der Windenergie kurz erläutert. In der folgenden Tabelle 9 werden die Parameter noch einmal sowohl den Potenzialdefinitionen als auch nach Themenbereichen zugeordnet. Wie sich diese Parameter unter dem Einfluss des Klimawandels verhalten könnten, wird in diesem Kapitel betrachtet. Ziel ist es mögliche Entwicklungsperspektiven der Potenziale der erneuerbaren Energien unter dem Einfluss des Klimawandels aufzuzeigen. Dabei werden im Folgenden Thesen aufgestellt, die auf der Interpretation vorhandener Daten und bekannter Zusammenhänge basieren. Die Auflistung der Thesen erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie sollen vor allem als Anstöße zu Diskussionen und evtl. tiefergehenden Forschungen dienen.

Tabelle 9: Parameter mit Einfluss auf die Potenziale der Windenergie

	Kategorie	Parameter
natürliches Potenzial	Natur	<ul style="list-style-type: none"> • Windgeschwindigkeiten • Luftdichte
technisches Potenzial	Technik	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsfähigkeit der technischen Anlagen (Nennleistung, Anlagendimensionierung) • Optimale Betriebsbedingungen
	Recht	<ul style="list-style-type: none"> • rechtliche Standortplanung <ul style="list-style-type: none"> • Raumordnungsgesetz (ROG), • Bundesbaugesetz (BauG), Landesbaugesetze (LBauG) • Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG), Gesetz zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) • etc.
wirtschaftliches Potenzial	Wirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten <ul style="list-style-type: none"> • Investitionskosten • Betriebskosten (Wartung, Instandhaltung, Reparaturen, Versicherung, Finanzierung, Steuern) • Einnahmen <ul style="list-style-type: none"> • Fördertarife

4.1 Einfluss des Klimawandels auf die Parameter des natürlichen Potenzials

Das natürliche Potenzial der Windenergie hängt von der Quantität und Qualität des Winddargebotes an einem Standort und damit im Wesentlichen von den Parametern Windgeschwindigkeit und Luftdichte ab.

4.1.1 Luftdichte

Die Luftdichte variiert, wie im Kapitel 2.1.1 schon beschrieben, abhängig von der Höhe über dem Meeresspiegel, der Lufttemperatur und der Luftfeuchte. Im Kapitel 3.1.2 wird dargestellt, wie sich die Lufttemperatur (Tabelle 4) sowie auch die Luftfeuchte (Tabelle 6) in der Ostseeregion infolge des Klimawandels verändern könnten. Der Temperaturanstieg für die Ostseeregion bis zum Ende des 21. Jahrhunderts beträgt laut Klimaberechnungen 2,1 bis 4,8°C. Für die Luftfeuchte ist dagegen kein klarer Trend zu erkennen.

Aufgrund der zunehmenden mittleren Jahreslufttemperaturen sowie der potenziell vermehrt auftretenden Sommer- und heiße Tage, an denen Temperaturen größer 25 bzw. 30°C herrschen, ist mit einer Verringerung der Luftdichte und folglich mit geringeren Windleistungen zu rechnen. Eine Lufttemperaturänderung um 10°C hat eine Windleistungsänderung von 3% zur Folge. [Burkert 2014] Eine Windenergieanlage erbringt also bei gleicher Windgeschwindigkeit und -10°C Lufttemperatur ca. 9% mehr Leistung als bei +20°C.

4.1.2 Windgeschwindigkeit

Ob der Klimawandel einen Einfluss auf die mittleren Windgeschwindigkeiten nimmt, war bisher relativ unklar. Seit Aufzeichnung der Wetterdaten sind für die Windverhältnisse in Deutschlands Küstenregionen keine systematischen Veränderungen zu erkennen. Trotzdem ist es laut neueren Klimaberechnungen möglich, dass die Windgeschwindigkeit in der Ostseeregion im Jahresmittel bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zu heute (1961-1990) um ein bis vier Prozent zunimmt (Tabelle 7). Vor allem im Winter können die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten um bis zu 15% sowie die Sturmstärken bis zu 14% zunehmen. Für die Anzahl der Sturmtage ist eine Zunahme um zwei bis fünf Tage hauptsächlich in den Herbst- und Wintermonaten sehr wahrscheinlich. Auch für den Offshore-Bereich wurde eine potenzielle Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeiten um drei bis fünf Prozent ermittelt. Bei extremen Windgeschwindigkeiten ist mit einer Zunahme von weniger als 5% zum Ende des Jahrhunderts zu rechnen.

Eine Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeiten trägt zur Steigerung des natürlichen Potenzials der Windenergie bei. Vor allem, wenn sich die Windgeschwindigkeiten im Bereich der sogenannten Nenngeschwindigkeit (11 – 15 m/s) der Windenergieanlagen befinden, können sie effizient ihre Nennleistung erbringen. Ab Windgeschwindigkeiten von 25 m/s schalten sich Windenergieanlagen ab um Schäden durch zu hohe Belastungen zu vermeiden. Durch zukünftig häufigere und stärkere Stürme vor allem in den Herbst- und Wintermonaten könnte es zu vermehrten Abschaltungen kommen.

Eine Veränderung des natürlichen Potenzials der Windenergie ist nicht eindeutig zu erkennen. Auf der einen Seite trägt eine potenzielle Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeiten vor zur Steigerung des natürlichen Potenzials der Windenergie bei. Andererseits wird das natürliche Potenzial der Windenergie durch die abnehmende Luftdichte infolge des Lufttemperaturanstiegs beeinträchtigt. Es ist davon auszugehen, dass sich diese Effekte gegenseitig neutralisieren und keine nennenswerte Veränderung des natürlichen Potenzials stattfindet.

4.2 Einfluss des Klimawandels auf die Parameter des technischen Potenzials

Das technisch nutzbare Potenzial der Windenergie hängt zum einen von der Leistungsfähigkeit der technischen Anlagen (Nennleistung, Anlagendimension) und den vorherrschenden Betriebsbedingungen ab. Zum anderen wird es maßgeblich durch die aktuelle Gesetzeslage und den daraus resultierenden Restriktionen vor allem die Standortplanung betreffend beeinflusst.

4.2.1 Technik

Die Nennleistung einer WEA ist die unter optimalen Betriebsbedingungen technisch maximal mögliche Leistung. Unter optimalen Betriebsbedingungen versteht man zum einen das Vorhandensein eines hohen natürlichen Windangebots (natürliches Potenzial) und zum anderen die Abwesenheit von Störfaktoren, die einem reibungslosen Betrieb entgegenwirken. Solche Faktoren resultieren zum großen Teil aus besonderen Witterungsverhältnissen wie z.B.:

- starke Temperaturschwankungen,
- starke Windbelastungen (Stürme, Turbulenzen, Böen, etc.),
- Eis / Frost,
- UV-Strahlung,
- Salzwasser,
- Wellengang / Strömung.

Solche teils extremen Witterungsverhältnisse erhöhen das Risiko für vorzeitige Verschleißerscheinungen an den Windenergieanlagen bzw. an einzelnen Anlagenteilen infolgedessen es zu einer verminderten Leistungsfähigkeit bis hin zum (zeitweisen) Ausfall einer Windenergieanlage kommen kann. Die Betriebsdauer, welche bei modernen Windenergieanlagen mit mindestens 20 Jahren angenommen wird, kann ebenfalls infolge hoher witterungsbedingter Belastung beeinträchtigt werden.

Mit dem Klimawandel kann es zu Veränderungen der genannten Witterungsbedingungen kommen. So ergaben Klimaberechnungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zu heute (1961-1990) einen Rückgang der Frosttage um durchschnittlich 34 Tage und der Eistage um durchschnittlich 15 Tage im Jahr (siehe Kapitel 3.1.2). Dies bedeutet eine Verbesserung der Betriebsbedingungen für Windenergieanlagen. Dagegen werden jedoch bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zu heute (1961-1990) häufigere Extremwetterereignisse sowie Sturmtage erwartet. Zur Vermeidung von Schäden werden Windenergieanlagen bereits ab Windgeschwindigkeiten größer 15 m/s gedrosselt und ab ca. 25 m/s abgeschaltet. Im günstigsten Fall ist also mit verminderten Energieerträgen zu rechnen. Im Extremfall können Windenergieanlagen durch starke Stürme, Hagel- oder Blitzeinschlag beschädigt werden.

Im Offshore-Bereich (westliche Ostsee) ergaben neuere Forschungen (siehe RADOST-Modul 2) folgende möglichen Veränderungen der Umweltbedingungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zu heute:

- sinkender Salzgehalt der Ostsee
- steigende Temperaturen der oberflächennahen Wasserschichten um 1,8 – 2,8°C
- Anstieg der mittleren Windgeschwindigkeiten um bis zu 5%
- Zunahme von Starkwindereignissen um bis zu 5%
- Zunahme extremer Wellenhöhen um bis zu 0,5 m
- Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten um bis zu 3 cm/s

Aufgrund der Zunahme der Windgeschwindigkeiten, Starkwindereignisse sowie der extremen Wellenhöhen ist mit einer erhöhten mechanischen Belastung der Windenergieanlagen und dadurch mit einem erhöhten Schadenspotenzial zu rechnen. Steigende Wassertemperaturen in Verbindung mit geringeren Strömungsgeschwindigkeiten bieten gute Voraussetzungen für einen vermehrten Bewuchs an den unter Wasser befindlichen Bauteilen einer Offshore-Windenergieanlage. Starker Bewuchs birgt das Risiko einer biologisch induzierten Korrosion. Dagegen verringert sich mit abnehmendem Salzgehalt des Ostseewassers das Risiko der elektrochemischen Korrosion, was insbesondere die Bauteile im Übergangsbereich von Wasser zu Luft befinden.

Insgesamt verstärken die für den Offshore-Bereich prognostizierten Umweltveränderungen also vorwiegend das Schadenspotenzial für die Windenergieanlagen und beeinträchtigen dadurch das technische Potenzial der Offshore-Windenergienutzung. Im Onshore-Bereich gibt es positive Entwicklungen wie z.B. weniger Frosttage, aber auch beeinträchtigende Umweltveränderungen wie z.B. häufigere Extremwetterereignisse.

4.2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Der Klimawandel kann sich auf die planerischen und zulassungsrechtlichen Voraussetzungen der Windenergienutzung nur indirekt auswirken. Zum einen können die negativen Folgen des Klimawandels den Leidensdruck der Bevölkerung soweit erhöhen, dass sie bereit ist den Klimaschutz über den Schutz z.B. des Landschaftsbildes zu stellen und die Gesetzgebung zugunsten der Windenergienutzung zu verändern. Die Entscheidung

einiger Bundesländer Windenergienutzung nun auch in Wäldern zuzulassen, unterstützt diese These.

Weiterhin ist es möglich, dass sich Verbreitungsgebiete geschützter bzw. von durch Windenergieanlagen gefährdeter Tierarten verschieben und so die für diese Arten ursprünglich eingerichteten Schutzgebiete für die Windenergienutzung freigegeben werden könnten. Allgemein anerkannt ist bereits, dass die direkten Wirkungen des Klimawandels wie z.B. Temperaturerhöhung oder Veränderung der Niederschlagsverhältnisse einen erheblichen Anpassungsdruck auf die Ökosysteme und die Biodiversität erzeugen. Es kann von einer erheblichen Veränderung von Flora, Fauna und Ökosystemen ausgegangen werden, so z.B. in Form von

- Verschiebung der Klima- und damit der Vegetationszonen nach Norden,
- Verlängerung der Vegetationsperioden,
- Abwanderung bzw. Aussterben hochangepasster sensibler Arten
- Arealausweitung gewöhnlicher Arten und
- Zuwanderung wärmeliebender Arten (z.B. aus dem Mittelmeerraum).

Wie der Klimawandel sich auf die rechtlich geregelte Standortplanung für Windparks auswirken wird, kann nur gemutmaßt werden. Eine klare Entwicklung kann hier nicht abgeleitet werden.

Die Entwicklung der rechtlichen Rahmenbedingungen aufgrund des Klimawandels ist noch unklar. Für die Anlagentechnik kann jedoch ein erhöhtes Schadenspotenzial aufgrund der klimawandelbedingt zunehmenden Extremwetterereignisse prognostiziert werden, was sich auf das technische Potenzial der Windenergie beeinträchtigend auswirkt.

4.3 Einfluss des Klimawandels auf die Parameter des wirtschaftlichen Potenzials

Wirtschaftlich ist eine WEA, die genug Ertrag leistet um damit die Kosten (Investitions- und Betriebskosten) zu decken und darüber hinaus Gewinn erzielt. Der Energieertrag ist abhängig von einem konstanten hohen Windangebot (natürliches Potenzial) sowie von einem langen und störungsfreien Betrieb der Windenergieanlage (technisches Potenzial). Die Vergütung der produzierten Energie erfolgt derzeit vorwiegend über die vom Gesetzgeber garantierte EEG-Vergütung. Das heißt, dass die Windenergienutzung noch stark von Fördermitteln abhängig ist.

Für die Entwicklung des natürlichen Potenzials der Windenergie ist, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, noch keine klare Tendenz ersichtlich. Der Zunahme der mittleren

Windgeschwindigkeiten steht die abnehmende Luftdichte und damit der Windleistung infolge zunehmender Lufttemperaturen entgegen.

Das technische Potenzial der Windenergie wird aufgrund von klimawandelbedingten Umweltveränderungen wahrscheinlich leicht beeinträchtigt. Zunehmende Extremwetterereignisse und Stürme onshore wie auch offshore erhöhen das Schadensrisiko für Windenergieanlagen. Die Folge können lange Stillstandzeiten in Verbindung mit einer aufwändigen Sanierung bis hin zur Stilllegung oder gar irreparable Schäden an den Anlagen sein. Ertragsausfälle und hohe Reparaturkosten beeinträchtigen die Wirtschaftlichkeit der Windenergienutzung.

Vereinzelt verändern sich Umweltbedingungen zugunsten der Windenergienutzung. So ist z.B. zukünftig mit weniger Frost- und Eistagen und dadurch mit weniger Schäden durch Eis und Frost zu rechnen.

Neben den potenziell erhöhten Betriebskosten können auch zukünftige Investitionskosten durch die veränderten Umweltbedingungen steigen. Zukünftige Windenergieanlagen müssen in ihrer Standfestigkeit verstärkt werden um stärkeren Windbelastungen standhalten zu können. Erhöhte Windgeschwindigkeiten sowie Wellenhöhen erschweren den Aufbau sowie auch die Wartung von Offshore-Windenergieanlagen. Neue Konstruktionsverfahren und / oder evtl. verstärkter Materialeinsatz können zur Erhöhung der Kosten führen.

Auf dem derzeitigen Stand der Technik birgt der Klimawandel mit seinen Folgen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ein erhöhtes Risiko für das technische Potenzial der Windenergienutzung. Bei voraussichtlich gleichbleibendem natürlichen Potenzial der Windenergie geht mit der Beeinträchtigung des technischen Potenzials auch die Beeinträchtigung des wirtschaftlichen Potenzials einher.

5 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht ist das Ergebnis des Arbeitspaketes 1.7.4 des Fokusthemas Erneuerbare Energien im Forschungsprojekt Radost – Regionale Anpassungsstrategien für die deutsche Ostseeküste. Ziel dieses Berichts war die Analyse und Prognose der Potenziale der Windenergie an der deutschen Ostseeküste unter dem Einfluss des Klimawandels. Dabei wurde folgende Vorgehensweise gewählt.

1. Erläuterungen zur Windenergie und ihren Potenzialparametern
2. Betrachtung des Klima und des Klimawandels an der deutschen Ostseeküste
3. Ermittlung eventueller Veränderungen der Potenzialparameter durch den Klimawandel und Schlussfolgerung der Entwicklungsperspektiven der Windenergie aufgrund veränderter Potenzialparameter

Grundlage für die Betrachtungen in diesem Bericht bildeten unter anderem die Ergebnisse der Arbeitspakete 1.7.1 „Bericht über die Umweltparameter der erneuerbaren Energien“ und 1.7.2 „Matrix der Umweltparameter der erneuerbaren Energien“.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Analyse und Prognose der Potenziale der Windenergie unter dem Einfluss des Klimawandels lauten folgendermaßen:

Natürliches Potenzial

Voraussetzungen für ein hohes natürliches Potenzial der Windenergie, onshore sowie offshore, sind konstante Windgeschwindigkeiten im Bereich der sogenannten Nenngeschwindigkeit (11 – 15 m/s) der Windenergieanlagen sowie eine möglichst hohe Luftdichte. Eine Veränderung des natürlichen Potenzials der Windenergie durch den Klimawandel ist nicht eindeutig zu erkennen. Auf der einen Seite trägt eine potenzielle Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeiten zur Steigerung des natürlichen Potenzials der Windenergie bei. Andererseits wird das natürliche Potenzial der Windenergie durch die abnehmende Luftdichte infolge des Lufttemperaturanstiegs beeinträchtigt. Es ist davon auszugehen, dass sich diese Effekte gegenseitig neutralisieren und keine nennenswerte Veränderung des natürlichen Potenzials stattfindet.

Technisches Potenzial

Das technische Potenzial der Windenergie wird aufgrund von klimawandelbedingten Umweltveränderungen wahrscheinlich leicht beeinträchtigt. Zunehmende Extremwetterereignisse und Stürme onshore wie auch offshore erhöhen das Schadensrisiko für Windenergieanlagen. Die Folge können lange Stillstandzeiten in Verbindung mit einer aufwändigen Sanierung bis hin zur Stilllegung oder gar irreparable Schäden an den Anlagen sein. Die Entwicklung der rechtlichen Rahmenbedingungen, die die Errichtung und den Betrieb von WEA regeln, hinsichtlich des Einflusses des Klimawandels ist nicht eindeutig abzusehen.

Wirtschaftliches Potenzial

Ertragsausfälle und hohe Reparaturkosten infolge klimawandelbedingt zunehmender Extremwetterereignisse können die Wirtschaftlichkeit der Windenergienutzung beeinträchtigen. Vereinzelt verändern sich Umweltbedingungen zugunsten der Windenergienutzung. So ist z.B. zukünftig mit weniger Frost- und Eistagen und dadurch mit weniger Schäden durch Eis und Frost zu rechnen. Neben den potenziell erhöhten Betriebskosten können auch zukünftige Investitionskosten durch die veränderten Umweltbedingungen steigen. Zukünftige Windenergieanlagen müssen in ihrer Standfestigkeit verstärkt werden um stärkeren Windbelastungen standhalten zu können. Erhöhte Windgeschwindigkeiten sowie Wellenhöhen erschweren den Aufbau sowie auch die Wartung von Offshore-Windenergieanlagen. Neue Konstruktionsverfahren und / oder evtl. verstärkter Materialeinsatz können zur Erhöhung der Kosten führen.

Literaturverzeichnis

- BMWi 2013 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2013, Stand Okt. 2014
- Burkert 2014 Andreas Burkert, Herbert Niederhausen: Elektrischer Strom - Gesteuerung, Übertragung, Verteilung, Speicherung und Nutzung elektrischer Energie im Kontext der Energiewende, Stand 12.09.2014 (Verlag Vieweg + Teubner)
- BWE 2013 Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE): Statistische Daten zur installierten Windenergieleistung, Stand 31.12.2013, URL: <http://www.wind-energie.de/>
- Dengler 2010 Dengler C. (2010): Umweltparameter erneuerbarer Energien - Ermittlung relevanter Umweltparameter für die erneuerbaren Energien: Geothermie, Photovoltaik, Windenergie, Biogas - RADOST-Berichtsreihe, Bericht Nr. 2, ISSN: 2192-3140
- DWD Deutscher Wetterdienst, URL: www.dwd.de
- DWD 2010 Deutscher Wetterdienst (2010): Zahlen und Fakten zur DWD-Presskonferenz am 27. April 2010 in Berlin
- DWD 2010 Deutscher Wetterdienst (DWD): Wetterlexikon, URL: www.dwd.de/lexikon, Abfragezeitraum Nov 2010
- DWG 2013 Deutsche WindGuard GmbH (DWG): Kostensituation der Windenergie an Land in Deutschland, Zusammenfassung, Berichtsnummer: SP13008A0, Stand Nov. 2013
- EEG 2012 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG), konsolidierte (unverbindliche) Fassung des Gesetzestextes in der ab 1. Januar 2012 geltenden Fassung
- Norddeutscher Klimaatlas Norddeutscher Klimaatlas, Anbieter: Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH, URL: <http://www.norddeutscher-klimaatlas.de/>
- Norddeutsches Klimabüro 2011 Norddeutsches Klimabüro (2011): Regionale Klimaszenarien in der Praxis, Beispiel deutsche Ostseeküste, Stand Mai 2011, URL: <http://www.norddeutsches-klimabuero.de/>
- Statista 2013 Statista - Das Statistik-Portal: Statistik zu Volllaststunden Windenergie, URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/224720/umfrage/wind-volllaststunden-nach-standorten-fuer-wea/>, Abfragezeitraum Nov. 2013
- Wiki 2013 Wikipedia - Die Freie Enzyklopädie, URL: www.wikipedia.org, Abfragezeitraum Nov. 2013
- WM MV 2011 Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern (2011): Aktionsplan Klimaschutz Mecklenburg-Vorpommern 2010, Teil A - Grundlagen und Ziele

Impressum

Herausgeber

Ecologic Institut gemeinnützige GmbH
Pfalzburger Str. 43/44
10717 Berlin
www.ecologic.eu

Inhalt erstellt durch:

GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH
Carl-Hopp-Straße 4a
18069 Rostock
<http://www.gicon.de>

Web

<http://www.klimzug-radost.de>

Bildrechte

Deckblatt: Foto rechts: Windpark in der Ostsee vor der dänischen Küste © BWE / Christian Hinsch
Foto links: Windpark in Sachsen-Anhalt © Windpark Druiberg

ISSN 2192-3140

Das Projekt "Regionale Anpassungsstrategien für die deutsche Ostseeküste" (RADOST) wird im Rahmen der Maßnahme „Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten“ (KLIMZUG) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



KLIMZUG



Klimawandel in Regionen