

Dietrich Spänkuch

## **Mögliche klimatische Folgen bei weltweitem Einsatz erneuerbarer Energie**

### **1. Einleitung**

Der weltweite Energiebedarf, der 2011 17 TW (1) betrug, wird im Jahr 2100 auf 1400 EJ/Jahr entsprechend 44 TW geschätzt (2). Angesichts dieses enormen Energiewachstums, der endlichen Ressourcen fossiler Energieträger sowie der beträchtlichen Klimabeeinflussung bei deren Verbrauch ist der optimale Ausbau erneuerbarer Energien eine Notwendigkeit. Mit dem weltweiten Ausbau von erneuerbarer Energie ergeben sich sowohl für die Natur als auch die Geisteswissenschaften neue Fragestellungen. Für die Meteorologie sind es im Wesentlichen drei Problemkreise. Zum einen erfordert die starke zeitliche Variabilität und Fluktuation von Wind und Sonnenstrahlung wesentlich detailliertere Vorhersagen dieser Parameter als bisher, um größte Effektivität zu erzielen als auch Schadensverhütung der Anlagen durch gefährliches Wetter zu vermeiden (z. B. 3). Zum anderen stellt sich die Frage, welche Auswirkungen zu erwartende Klimaänderungen, etwa eine Abnahme der Windgeschwindigkeit (4) auf den wirtschaftlichen Ertrag der Anlagen haben (5). Der massive Ausbau von erneuerbarer Energie ist andererseits aber auch nicht klimaneutral. Auf diesen Aspekt, der Gegenstand der folgenden Ausführungen ist, wiesen bereits in den siebziger Jahren mehrere Autoren hin (z. B. 6,7).

### **2. Das Potential erneuerbarer Energie**

Der gegenwärtige globale Energiebedarf von 17 TW könnte nach (1) durch Photovoltaik-Anlagen mit 5% Reflexion und einem Wirkungsgrad von 20% auf nur 1% der sonnenreichsten Landfläche (mittlere Globalstrahlung  $> 195 \text{ W/m}^2 \sim 1710 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ) gedeckt werden. Demgegenüber wird für die Erzeugung desselben Energieaufkommens aus Windenergie bei Installation der Windanlagen auf den windreichsten Landflächen etwa das 5,5-fache der Fläche der USA benötigt (1). Beide Energiequellen stellen global beim tech-

nisch nutzbaren Potential den Löwenanteil der Quellen erneuerbarer Energie (Tab. 1) und haben auch gegenwärtig bei weitem die höchsten Zuwachsraten.

Energieart	theoretisches	technisches
	Potential	
<b>Solar</b>	45.000	
Photovoltaik		54
Sonnenkraftwerke		257
<b>Wind</b>		
Grenzschrift	1202-178	61-107
<b>Troposph. Strahlstrom</b>	7,5	4,5
<b>Biomasse (nur Land)</b>	50	6
<b>Wasserkraft</b>	4,7	1,6
<b>Meeresenergie</b>	237	10,6
<b>Geothermie</b>	44,8	33

Tabelle 1: Globales Potential erneuerbarer Energien in TW, nach (8) modifiziert<sup>1</sup>

Dies gilt auch für Deutschland, wobei das technische Potential der Windkraft an Land und auf See mit 360 TWhr (0,04 TW) das der Photovoltaik mit 248 TWhr (0,0283 TW) übersteigt (9). Die Unsicherheiten bei der Einschätzung des globalen technischen Potentials sind mit bis zu einer Größenordnung bei Sonne und Windkraft, bedingt durch unterschiedliche Annahmen des technischen Fortschritts, unterschiedlicher Einbeziehung ökologischer und geographischer Aspekte und unterschiedlicher Methodik erheblich (10). Aber bereits die Schätzung des theoretischen Potentials der Windkraft ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Das theoretische Potential der Windkraft ergibt sich aus der Umwandlungsrate C von verfügbarer potentieller Energie der Atmosphäre in kinetische Energie, denn nur dieser Betrag kann im Extremfall der Atmosphäre entnommen werden. Würde man mehr entnehmen, würde die Atmosphäre kontinuierlich potentielle Energie verlieren. In der wissenschaftlich-technischen Literatur findet dieser Umstand oft keine Berücksichtigung ((11) und dazugehörige open discussion), sodass es gelegentlich zu utopi-

1 Bei erwartetem Stand der Technik 2050 und unter gewisser Berücksichtigung ökologischer und soziogeographischer Einschränkungen mit Ausnahme der Angaben für Wind (siehe Text).

schen Angaben des technisch nutzbaren Potentials kommt (z. B. 12,13).

Eine erste globale Abschätzung von  $C$  von Oort und Peixoto (14) aus Analysedaten der Jahre 1963 bis 1973 ergab einen Wert von  $2 \text{ Wm}^{-2}$ . Nach neueren Untersuchungen (15-18) aus Vorhersage- und Reanalysedaten liegt  $C$  zwischen  $2 \text{ Wm}^{-2}$  und  $3,5 \text{ Wm}^{-2}$  entsprechend 102 und 178 TW. Die interdiurnen Schwankungen von  $C$  sind nach Steinheimer (18) beträchtlich mit Werten zwischen  $2 \text{ Wm}^{-2}$  und  $4,7 \text{ Wm}^{-2}$  im Extremfall und  $0,4 \text{ Wm}^{-2}$  im Mittel. Dagegen ist der Jahresgang nur schwach ausgeprägt mit Monatswerten zwischen  $3,2 \text{ Wm}^{-2}$  und  $3,6 \text{ Wm}^{-2}$ . Die angegebenen Werte von  $C$ , aus denen die theoretischen Potentiale der Windkraft von Tab. 1 folgen, berücksichtigen nicht den subskaligen Anteil der Umwandlungsrate, der von den meteorologischen Modellen nur durch Parametrisierung erfasst wird<sup>2</sup> und von Edward Lorenz (19,20) deshalb mangels entsprechender Daten der molekularen Bewegung zugeordnet wurde. Dieser subskalige Anteil beträgt nach (18) etwa 50% des skaligen Anteils. Inwiefern ein Teil dieses im Wesentlichen durch Konvektion bedingten subskaligen  $C$  technisch nutzbar ist, bedarf noch der Klärung.  $C$  ist jedoch für Windkraftanlagen wegen der natürlichen Reibung und des Windschatteneffekts der Windräder nicht voll ausschöpfbar. Nach (21,22) liegt die Grenze des nutzbaren Windpotentials bei etwa  $1 \text{ Wm}^{-2}$  entsprechend 51 TW. Unter Berücksichtigung der für die Nutzung der Windkraft einschränkenden Faktoren (Tab. 2) – (1) geographische Erreichbarkeit (Ozean,

Geografische Erreichbarkeit	< 0,2
Wegfall windschwacher Gebiete	< 0,5
Von Windrädern nicht erfasstes Volumen	< 0,3
Meteorologisch bedingte Ausfallzeiten	0,75
Technischer Wirkungsgrad	0,5
Beschränkung auf Grundschicht (200m)	0,083

Tabelle 2: Faktoren, die die Nutzung der Windkraft einschränken Zahlen nach de Castro u. a. (23)

Antarktis, Hochgebirge, aber auch Naturschutzgebiete und Städte fallen als Erntegebiete aus), (2) Wegfall windschwacher Regionen, in denen der Einsatz von Windrädern unrentabel ist, (3) Wind, der in Windparks von den Ro-

2 Prozesse unterhalb einer horizontalen Auflösung von etwa 100 km, von 0,2 bis 40 hPa vertikaler Auflösung und 6 hr zeitlicher Auflösung.

torblättern nicht erfasst wird, (4) Ausfallzeiten von Rotoren wegen zu geringer oder zu hoher Windgeschwindigkeiten, (5) Wirkungsgrad einer Windkraftanlage (nach Albert Betz hat ein verlustfreier Rotor einen Wirkungsgrad von maximal 59,3%, in der Praxis liegen die Werte gegenwärtig unter 40%) und (6) bei Beschränkung auf die untersten hunderte Meter – ergibt sich global ein technisches Potential von etwa 1 TW (23).

Besonders eklatant ist die Überschätzung des technischen Potentials der Windenergie in der wissenschaftlich-technischen Literatur für den hochtroposphärischen Strahlstrom, dem Jet (1,24).

### 3. Lokale und regionale Wirkung von Anlagen erneuerbarer Energie

Wir beschränken uns in den folgenden Ausführungen auf die Nutzung von solarer und von Windenergie und deren Wirkung vor Ort (Tab. 3). Die Installation einer Windanlage vergrößert zunächst die Rauheit der Landschaft. Ein Offshore-Windpark von 6 GW auf einer Fläche von 50km x 200km ändert die Rauheit der Meeresoberfläche um das 250-fache in die Rauheit einer flachen Landschaft (25). Damit ist eine Modifizierung des turbulenten Energie, Impuls-, Masse- und Feuchteausstauschs in der Atmosphäre und zwischen Atmosphäre und Unterlage verbunden mit Auswirkungen auf die Stabilität der planetaren Grenzschicht. Die Installation von Solaranlagen hat primär eine Abnahme der Albedo und in geringerem Maße auch der Rauheit zur Folge. Der Betrag der Albedoänderung hängt von der Albedo der Unterlage ab und ist umso größer, je heller die Unterlage ist. Für Wüsten mit Albedowerten um 0,35 ist die Reduktion durch Fotovoltaik-Anlagen (PV) etwa 0,1 (26). Eine Senkung der Albedo erhöht den Treibhauseffekt. Die Wirkung von PV in globalem Maßstab als Substitution fossiler Energie ist aber etwa 30mal stärker als die Albedoreduktion von PV (27). Eine Solaranlage modifiziert aber auch die Energiebilanz der Oberfläche, indem bei der Energieumwandlung Wärme entsteht, die zu einer Erhöhung des sensiblen Wärmeflusses trotz Erniedrigung der Bodentemperatur infolge Abschattung führt (26).

Energieart	Meteorologischer Effekt
Sonnenstrahlung	Reduktion der Albedo → Modifizierung der Energiebilanz der Oberfläche
Windkraft	Erhöhung der Rauheit der Oberfläche → Erhöhung der Turbulenz; Abnahme von Impuls

Tabelle 3: Meteorologische Effekte erneuerbarer Energie

Messungen, die eine Veränderung der meteorologischen Felder durch die Installation von Anlagen erneuerbarer Energien belegen, sind kostspielig und zeitaufwendig, weil eine Vielzahl von Parametern in Raum und Zeit mit hoher raumzeitlicher Auflösung bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen erfasst werden muss. Der Aufwand für flächendeckende direkte Messungen an Masten ist nicht praktikabel, sodass zur Begutachtung von Windparks vor allem Windkanaluntersuchungen und Modellrechnungen zum Einsatz kommen. Entsprechend spärlich ist die Anzahl experimenteller Untersuchungen.

Feldmessungen erfolgten vorrangig zur Untersuchung der Nachlaufströmung von Windrädern in naher Umgebung (bis zu einigen Rotordurchmessern Entfernung) unter Nutzung des Potenzials indirekter Messverfahren wie Dopplersodar und Dopplerlidar im Scanbetrieb (z. B. 28,29). Diese Untersuchungen zeigen eine komplexe Struktur der Nachlaufströmung (Windschatten oder Wake) mit deutlicher Reduzierung der Windgeschwindigkeit und Zunahme der Turbulenz im Lee der Turbinen (Abb.).

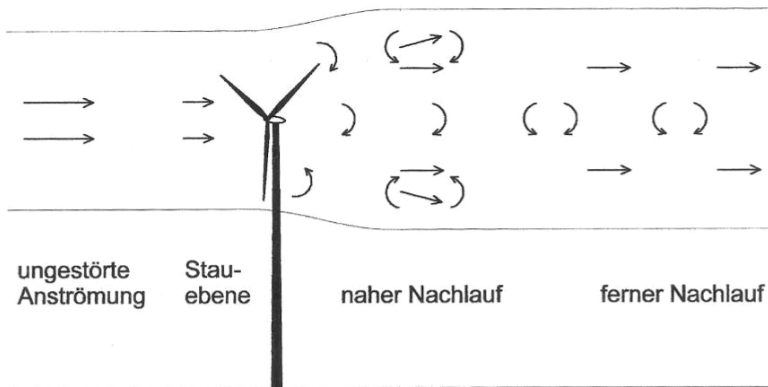


Abb.1: Schematische Darstellung des Windfeldes in der Umgebung eines Windrades. Der nahe Nachlauf wird wesentlich durch die aerodynamischen Eigenschaften der Rotoren bestimmt. Im fernen Nachlauf ist neben der atmosphärischen Turbulenz durch Rauheit der Erdoberfläche und Thermik die durch die Getriebegondel mechanisch erzeugte Turbulenz bestimmend (30,31).

Allerdings ist bei ungünstiger Anordnung von Windrädern in einem Windpark auch das Auftreten höherer Windgeschwindigkeiten innerhalb eines Windparks als Folge von Interferenz möglich (32). Bei Feldmessungen wurde durch die natürliche Variabilität des Windes i. A. ein geringeres Ge-

schwindigkeitsdefizit als im Windkanal und ein Mäandrieren der Nachlaufströmung gefunden. Das Geschwindigkeitsdefizit setzt bereits etwa eine Rotorlänge vor dem Rotor ein. Die größte Geschwindigkeitsreduzierung wird i. A. im Abstand von 1 bis 2 Rotordurchmessern im Zentrum des Windschattens gefunden und am verbreiterten Rand in etwas weiterer Entfernung von 2 bis 3 Rotordurchmessern. Sie kann in Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen bis zu etwa 80% betragen (z. B. 29). Bei labiler Schichtung mit starker Turbulenz ist die Nachlaufströmung wesentlich geringer ausgeprägt. So konnte bei solchen Bedingungen selbst bei einem großen Windpark im Mittleren Westen der USA<sup>3</sup> kein Wake-Effekt 2 km leewärts gefunden werden (33).

Von besonderer Aussagekraft sind Satellitenmessungen, da sie nicht nur die unmittelbare Umgebung von Windkraftanlagen erfassen. Aus Messungen mit SAR<sup>4</sup> (Synthetic Aperture Radar) der Satelliten ERS-2 und Envisat<sup>5</sup> am dänischen Offshore-Windpark Horns Rev in der Nordsee mit 80 Windrädern wurde die Nachlaufströmung in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit, atmosphärischer Stabilität und der Anzahl der laufenden Rotoren untersucht (34,35). Bei instabiler Schichtung ist durch die bereits vorhandene atmosphärische Turbulenz der Wake-Effekt am geringsten. Die Nachlaufströmung reichte bis 5 km leewärts. Bei neutraler Schichtung war der Wake-Effekt über 20 km nachweisbar. Dementsprechend ist der Wirkungsgrad von Windrädern bei labiler Schichtung geringer als bei stabiler Schichtung (36,37).

Die gegenüber der Umgebung veränderten Wind- und Turbulenzverhältnisse führen auch zu Änderungen der Temperatur (38-41), der Luftfeuchtigkeit (42), Verdunstung (43) und Bodenfeuchte (44) und zu Veränderungen des Gasaustauschs zwischen Unterlage und Atmosphäre (41). Aus Satellitenmessungen im IR konnte an Onshore-Windparks für wolkenlose Tage eine wenn auch marginale, doch gesicherte Temperaturzunahme der Oberflächentemperatur sowohl innerhalb als auch im Lee eines Windparks nachgewiesen werden. Zhou et al. (40) fanden aus MODIS-Aufnahmen<sup>6</sup> über Windparks in Westtexas mit über 2300 Windrädern auf einer Fläche von 40 km x 100 km

3 etwa 300 1,5 MW-Windräder mit Nabenhöhe von 80 m

4 Der Radarstrahl wird an der Meeresoberfläche von den Kapillar-Schwerewellen, die augenblicklich auf den lokalen Wind reagieren, reflektiert. Das Radarecho ist eine Funktion von Windgeschwindigkeit und Windrichtung relativ zum Radarstrahl.

5 Auf Envisat wurde das Advanced SAR (ASAR) eingesetzt. Beide Geräte, SAR und ASAR, arbeiten im C-Band (4-8 cm).

6 MODIS steht für MODerate resolution Imaging Spectrometer der Fernerkundungssatelliten Terra und Aqua.

nächtliche Temperaturerhöhungen unter  $1^{\circ}\text{C}$  bei stabiler Schichtung. Walsh-Thomas et al. (39) fanden aus Thematic Mapper-Daten von Landsat 5 über der San Gorgonio Wind Farm in Südkalifornien Temperaturerhöhungen bis 12 km leewärts.

Wesentlich spärlicher als für Windkraftanlagen sind Untersuchungen zu Solarkraftwerken. Direkte Messungen liegen offenbar nur von Fthenakis und Yu an einer 1 MW-Photovoltaik-Anlage in den USA vor (45). Sie zeigen einen äußerst begrenzten lokalen Effekt mit einer erhöhten Jahresdurchschnittstemperatur um  $2^{\circ}\text{C}$  in 2,5 m Höhe im Zentrum des Sonnenparks mit Abklingen des Effekts auf die Umgebungstemperatur bereits in 5 bis 18 m Höhe. Der Temperatureffekt war auch nur bis 300 m Entfernung nachweisbar. Im Gegensatz dazu führt eine Erhöhung der Albedo, wie sie in Almeria (Südspanien) durch flächenhafte Ausdehnung von Treibhäusern auf 33000 ha erfolgte, zu einer Temperaturniedrigung. Der Albedorückgang betrug etwa 0,1 gegenüber der Umgebung und der entsprechende Temperaturunterschied etwa  $2^{\circ}\text{C}$  (46).

#### **4. Modellierung**

Im Gegensatz zu den doch recht spärlichen Felduntersuchungen existiert eine Vielzahl numerischer Studien zur Nachlaufströmung von Windparks, in der Mehrzahl mit hoher räumlicher Auflösung zur Darstellung der internen Windstruktur innerhalb der Nachlaufströmung, von denen einige sogar in der Lage sind, die individuellen Rotorblätter aufzulösen (30). Für meteorologische Anwendungen sind diese hochauflösenden aerodynamischen Modelle, die auch keine Thermodynamik enthalten, viel zu rechenintensiv<sup>7</sup>. Die horizontale Gitterweite der meteorologischen Zirkulationsmodelle, ob regional oder global, ist zu grob, um Windräder oder auch Windparks explizit zu behandeln. Sie müssen daher parametrisiert werden. Dies geschieht entweder durch eine Erhöhung der Rauheitslänge bzw. eine explizite Änderung des Strömungswiderstandskoeffizienten oder durch eine Senke von Impuls und gleichzeitiger Quelle von turbulenter kinetischer Energie in den Gittern, die Windräder enthalten.

Mesoskale Regionalmodelle, wie sie in der numerischen Wetterprognose verwendet werden, benutzen bei der Windparkparametrisierung den Ansatz

---

7 Zur Berechnung der Nachlaufströmung eines Windparks bei einer einzigen meteorologischen Situation werden mit einem Computer-Cluster von 144 Prozessoren gegenwärtig mehr als 100 000 CPU-Stunden benötigt (32).

der Impulssenke und Quelle turbulenter kinetischer Energie (IS), der eine hohe vertikale Auflösung der bodennahen Luftschicht erfordert<sup>8</sup>. Globale Modelle haben dagegen eine geringe vertikale Auflösung und können damit den Ansatz IS nicht anwenden. Die Darstellung von Windparks als IS ist adäquater als die durch Rauheitsanpassung (RA), da diese die durch die Rotorblätter erzeugte Turbulenz nicht berücksichtigen kann (50,51). Fitch et al. (48) zeigten in einem numerischen Vergleich beider Parametrisierungen an einem Modell eines Onshore-Windparks von 10 km x 10 km mit 100 Windrädern von 126 m Länge und einer Nabenhöhe von 100 m bei 5 MW Leistung eine nahezu konträre Darstellung der Nachlaufströmung im Tagesverlauf. Während IS nachts bei stabiler Schichtung eine ausgeprägte Nachlaufströmung mit um bis zu 19-fach größerem Windnachlass zeigt als RA, ist tagsüber bei RA bei labiler Schichtung die Nachlaufströmung stärker ausgeprägt mit bis zu 5-fach größerem Geschwindigkeitsdefizit als bei IS. Auch findet man bei IS die größte Windreduktion in Nabenhöhe, bei RA dagegen in Bodennähe. Weiterhin bringt RA einen größeren Fluss sensibler Wärme als IS, was zu bis zu über 2°C höheren Temperaturen gegenüber dem Referenzfall führt, während IS tagsüber marginale Abkühlung zeigt. Der umgekehrte Effekt wird nachts bei stabiler Schichtung erhalten: leichte Erwärmung in Bodennähe bis 0,5°C bei IS und Abkühlung bis 1,5°C bei RA. Die Ergebnisse von IS stimmen qualitativ gut mit Large-Eddy-Simulationen (LES) überein (45), die vorwiegend zur Modellierung der Strömung innerhalb der Windparks angewendet wird, und ihrerseits durch Windtunnelexperimente bestätigt sind. Die Outputs der bisherigen Simulationen mit globalen Modellen sind daher fraglich.

Man kann für Onshore-Windparks nach (47-49 und 52) mit Windreduzierung und weiteren Auswirkungen in Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen bis etwa 100 km leewärts rechnen. Die Wakes von Offshore-Windparks reichen nach Modellrechnungen von Ludewig (51) mit einem gekoppelten Atmosphäre-Ozeanmodell weit über 100 km mit drei deutlich unterscheidbaren Zonen: der eigentlichen Nachlaufströmung mit Windstärkereduktionen bis zu 80%, einer Brandungszone vor dem Windpark, die bis zu einer Höhe über 1 km reicht, und die Nachlaufströmung auf beiden Seiten flankierende Bereiche erhöhter Windgeschwindigkeit<sup>9</sup>. Mit zunehmender

8 Fitch et al. (47-49) benutzten bei ihren Simulationen im Feingitter des Windparks 8 vertikale Schichten im Rotorbereich, im größeren Gitter der Umgebung noch 4 Gitterstützpunkte.

9 Diese Struktur ist auch bei Onshore-Anlagen zu erkennen, die Flanken erhöhter Windgeschwindigkeit sind hier aber nur schwach ausgeprägt (47,48).



Windgeschwindigkeit nimmt die Fläche der Flanken durch abnehmende Länge und Breite ab. Die erhöhte Turbulenz zeigt sich auch in merklichen Änderungen von Temperatur und Feuchte der bodennahen Luft und der Flüsse von sensibler und latenter Wärme. Die Offshore-Simulationen zeigen zudem Luftdruckänderungen an der Meeresoberfläche von  $\pm 1$  hPa im Lee. Die Wirkung der Offshore-Anlagen beschränkt sich aber nicht nur auf die Atmosphäre. Die veränderten Wind- und Luftdruckverhältnisse an der Meeresoberfläche führen zu veränderten Strömungsverhältnissen im Ozean in einem Gebiet, das weit – über das Zwanzigfache – der Dimension des Windparks hinausgeht<sup>10</sup> (53). Charakteristisch ist eine Dipolstruktur der ozeanischen Strömung mit upwelling backbord und downwelling steuerbord (53-55), die bis zum Meeresgrund in 60 m Tiefe reicht (53).

Das Lokal- und Regionalklima wird durch Windparks nach den bisherigen Ausführungen mit Sicherheit modifiziert. Die Auswirkungen sind nach Simulationen mit einem atmosphärischen Regionalmodell, also ohne Ozean, für Europa nach Vautard et al. (56) für die zu erwartenden Windparks bis 2020 aber marginal ( $\pm 0,3^\circ\text{C}$  Temperaturänderung und bis zu 5% Niederschlagsänderung) und damit wesentlich geringer als die durch die Treibhausgase zu erwartenden Änderungen. Weitere Untersuchungen mit einem gekoppelten Atmosphäre-Ozeanmodell sind aber erforderlich, um belastbare Aussagen zu erhalten.

Die bisherigen Untersuchungen mit globalen Modellen (57-59), die Temperaturerhöhungen von  $1^\circ\text{C}$  über Onshore-Anlagen (58) und geringeren Einfluss von Offshore-Anlagen (59) sowie signifikante Änderungen von Temperatur, Niederschlag und Bewölkung auch in entfernten Gebieten erbrachten, sind nach den Untersuchungen von Fitch et al. (47-49) und Ludewig (53) jedoch revisionsbedürftig.

Im Gegensatz zur Parametrisierung von Windparks ist die Parametrisierung von Solarkraftwerken durch Änderung der Oberflächenalbedo und der Rauheitslänge einfacher. Photovoltaik-Anlagen (PV), installiert in der Sahara und den arabischen Wüsten auf  $10^6$  km<sup>2</sup> mit 10% Wirkungsgrad bei 2% Albedoänderung, führen nach Wang (60) mit einem globalen Ozean-Atmosphäre-Modell zu Erhöhungen der Oberflächentemperatur bis zu  $1^\circ\text{C}$  in den installierten Gebieten und unterschiedlichen Temperaturänderungen weltweit, sowohl positiv als auch negativ, u.a. zu etwa  $0,5^\circ\text{C}$  Erhöhung in der

10 Bei Verwirklichung der Pläne der Nordseeräumer ist mit einer signifikanten Änderung der Strömungsverhältnisse der Nordsee zu rechnen.

Antarktis. Simulationen mit einem regionalen Wettervorhersagemodell (25 km horizontale Auflösung) und einer hypothetischen PV-Anlage in Kalifornien von 1 TW Spitzenkapazität auf einer Fläche von 18750 km<sup>2</sup> in der Mojawewüste ergab im Sommer über der Anlage eine Temperaturerhöhung von 0,4°C und Modifizierung der lokalen und regionalen Windverhältnisse bis 300 km leewärts<sup>11</sup> (61).

## 5. Nutzung des Jetstream

Sowohl Wind als auch Sonnenstrahlung nehmen mit der Höhe zu. Es ist daher naheliegend, nach deren technischen Nutzungslösungen zu suchen (z. B. 62-64). Der hochtroposphärische Strahlstrom mit Windgeschwindigkeiten bis zu 500 km erscheint besonders attraktiv. Sein theoretisches Potential ist allerdings beschränkt und liegt nach Miller u. a. (1, 24) bei nur etwa 7,5 TW mit erheblichen klimatischen Folgen mit über 20°C Temperaturanstieg in der polaren Stratosphäre, bedingt durch kräftige Zunahme des Wärmetransports durch den Jetstream hindurch, und einer stabileren Schichtung der Atmosphäre mit geringerer Wellenaktivität. Der Jetstream ist ein Ergebnis der Balance zwischen Druckgradient und Corioliskraft. Um den Jetstream aufrecht zu erhalten, reicht daher eine relativ geringe Generierung an kinetischer Energie aus. Diese Erzeugungsrate ist nach den Ausführungen von Kap. 2 die obere Schranke für die Nutzung des Jetstream als Quelle erneuerbarer Energie. Bei Berücksichtigung einschränkender Faktoren, wie entsprechend gemäß Tab. 2 für die Grundschicht ausgeführt, ist in etwa mit 2 TW möglichem Nutzungspotential zu rechnen.

## 6. Zusammenfassung

Der Ausbau erneuerbarer Energie erfolgt weltweit. Über deren Potential bestehen jedoch große Unstimmigkeiten bis zu einer Größenordnung. Insbesondere wird das Potential der Windkraft beträchtlich überschätzt. Begrenzt durch die Generierungsrate an kinetischer Energie beträgt das Potential der Windkraft in den untersten hundert Metern der Atmosphäre etwa 1 TW und für den Jetstream etwa 2 TW.

Felduntersuchungen zur Erfassung der raumzeitlichen Struktur der meteorologischen Felder im Nah- und Fernbereich von Anlagen erneuerbarer

---

11 Im Winter sind die Unterschiede der Albedo von PV-Anlage und Umgebung geringer und damit auch die zu erwartenden Effekte.

Energie sind äußerst kostenaufwendig und de facto nicht vorhanden. Es existieren nur vereinzelt Auswertungen von Satellitendaten von einigen wenigen meteorologischen Parametern.

Den Ergebnissen numerischer Simulationen kommt daher eine große Bedeutung zu. In den Klimamodellen können Windräder und auch Windparks nicht explizit behandelt werden. In den Regionalmodellen mit höherer räumlicher Auflösung werden Windkraftanlagen als Impulssenke und Quelle turbulenter kinetischer Energie parametrisiert, in den globalen Klimamodellen mit geringerer Auflösung als Änderung der Oberflächenrauheit. Beide Parametrisierungen führen bei einem Vergleich in einem Regionalmodell zu wesentlich unterschiedlichen Ergebnissen, wobei die Parametrisierung als Impulsquelle und Senke kinetischer Energie von Windtunnelexperimenten gestützt wird. Die bisherigen Aussagen globaler Klimamodelle, soweit sie die Nutzung der Windenergie betreffen, sind daher revisionsbedürftig.

Großflächige Photovoltaik-Anlagen, wie sie in der Sahara und den arabischen Wüsten denkbar sind, erhöhen nicht nur die Temperatur in den direkt betroffenen Gebieten sondern haben auch anderwärts klimatische Auswirkungen.

Im Windschatten von Windrädern und Windparks ist die Windgeschwindigkeit vermindert und die Turbulenz erhöht. Die Stärke dieser Effekte hängt stark von der atmosphärischen Schichtung ab. Sie ist am stärksten bei stabiler Schichtung mit einer Länge bis zu 60 km bei Onshore-Anlagen und von etwa 130 km bei Offshore-Anlagen. Offshore-Anlagen modifizieren nicht nur das atmosphärische Windfeld und die damit verbundenen Änderungen weiterer meteorologischer Parameter sondern auch die Strömungsverhältnisse im Ozean.

## **Literatur**

- (1) Miller, L. (2012). Limits and consequences of the large-scale deployment of renewable energy technologies, Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Technical Report 27
- (2) Reilly, J. und S. Paltsev (2007). Biomass Energy and Competition on Land, Report No. 145, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change (Cambridge, MA) [http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC\\_Rpt145](http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC_Rpt145).
- (3) Lange, M. und U. Focken (2006). Physical Approach to Short-Term Wind Power Prediction (Berlin: Springer)
- (4) McVicar, T. L. et al. (2012). Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *J. Hydrol.* 416-417, 182-205 doi:10.1016/j.jhydrol.2011.10.024

- (5) Pryor, S.C. und R.J. Barthelmie (2010). Climate change impacts on wind energy: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 430-437,
- (6) Schneider, S. H. und R. D. Dennett (1975). Climate barriers to long-term energy growth. *Ambio* 4 2, 65-74
- (7) Gustavson, M. R. (1979). Limits to wind power utilization. *Science* 204, 13-17
- (8) Krewitt, W. u. a. (2009). Role and Potential of Renewable Energy and Energy Efficiency for Global Energy Supply. *Climate Change* 18/2009, ISSN 1862-4359, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 336 S.
- (9) Klaus, T. et al. (2010). Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, S.58
- (10) Edenhofer, O. et al. (2011). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, S. 183, IPCC, Cambridge Univ. Press
- (11) Gans, F., L. M. Miller und A. Kleidon (2012). The problem of the second wind turbine – a note on a common but flawed wind power estimation method. *Earth Syst. Dynam.* 3, 79-86 [www.earth-syst-dynam.net/3/79/2012/doi:10.5194/esd-3-79-2012](http://www.earth-syst-dynam.net/3/79/2012/doi:10.5194/esd-3-79-2012)
- (12) Jacobson, M. Z. und C. L. Archer (2012). Saturation wind power potential and its implications for wind energy. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 109(39), 15679-15684, doi:10.1073/pnas.1208993109
- (13) Marvel, K., B. Kravitz und K. Caldeira (2013). Geophysical limits to global wind power. *Nature Climate Change* 3, 118-121, doi: 10.1038/nclimate1683
- (14) Oort, A. H. und J. P. Peixoto (1983). Global angular momentum and energy balance requirements from observations. *Adv. Geophys.* 25, 355-490
- (15) Li, L. et al. (2007). Lorenz energy cycle of the global atmosphere based on reanalysis datasets'. *Geophys. Res. Lett.* 34, S. L16813 doi:10/1029/2007GL029985
- (16) Boer, G. J. und S. Lambert (2008). The energy cycle in atmospheric models. *Climate Dyn.* 30, 371-390
- (17) Haimberger, L. und M. Hantel (2000). Implementing convection into Lorenz's cycle, Part II. A new estimate of the conversion rate into kinetic energy. *Tellus* 52A, 75-92
- (18) Steinheimer, M. (2008). *Der konvektive Anteil am globalen Energiekreislauf*, Dissertation Universität Wien
- (19) Lorenz, E. N. (1955). Available potential energy and the maintenance of the general circulation, *Tellus* 7, 157-167
- (20) Lorenz, E. N. (1967). *The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere*. WMO-No 218 TP 115, World Meteorological Organization
- (21) Best, R. W. B. (1979). Limits to wind power. *Energy Conversion* 19, 71-72
- (22) Adams, A. S. und D. W. Keith (2013). Are global wind power resource overestimated? *Environ. Res. Lett.* 8, 015021, doi:10.1088/1748-9326/8/1/015021
- (23) de Castro C., M. Mediavilla, L. J. Miguel und F. Frechoso (2011). Global wind power potential: Physical and technological limits. *Energy Policy* 39, 6677-6682

- (24) Miller, L. M., F. Gans und A. Kleidon (2011). Jet stream wind power as a renewable energy resource: little power, big impacts. *Earth Syst. Dynam.* 2, 201-212, doi:10.5194/esd-2-201-2011
- (25) Corten, G. P. und A. J. Brand (2004). Resource decrease by large scale wind farming. ECN-RX--04-124
- (26) Koepke, P. und W. Thomas (1993). Energy balance of solar power plants: Results of a one-dimensional model. *Beitr. Phys. Atmos.* 66, 31-43
- (27) Nemet, G. F. (2009). Net radiative forcing from widespread deployment of photovoltaics. *Environ. Sci. Technol.* 43, 2173–2178. doi: 10.1021/es801747c
- (28) Barthelmie, R. J. et al. (2003). Offshore wind turbine wakes measured by sodar. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 20, 466-477
- (29) Smalikho, I. N. et al. (2013). Lidar investigation of atmosphere effect on a wind turbine wake, *J. Atmos. Oceanic Technol.* 30, 2554-2570
- (30) Sanderse, B., S. P. van der Pijl und B. Koren (2011). Review of computational fluid dynamics for wind turbine wakes aerodynamics. *Wind Energ.* 14, 799-819, doi: 10.1002/we.458
- (31) Linde, M. (2011). Modellierung des Einflusses von Windkraftanlagen auf das umgebende Windfeld. Diplomarbeit Meteorologisches Institut Universität Hamburg
- (32) Archer, C. L., S. Mirzaeifesar und S. Lee (2013). Quantifying the sensitivity of wind farm performance to array layout options using large-eddy simulation, *Geophys. Res. Lett.* 40, 4963-4970, doi:10.1002/grl.50911
- (33) Smith, C. M., R. J. Barthelmie und S. C. Pryor (2013). In situ observations of the influence of a large onshore wind farm on near-surface temperature, turbulence intensity and wind speed profiles. *Environ. Res. Lett.* 8, Online at stacks.iop.org/ERL/8/034006/mmedia doi:10.1088/1748-9326/8/3/034006
- (34) Christiansen, M. B. und C. B. Hasager (2005). Wake effects of large offshore wind farms identified from satellite SAR, *Remote Sensing of Environment* 98, 251-268
- (35) Christiansen, M. B. (2006). Wind energy applications of synthetic aperture radar. Risø-PhD-27(EN), Nov 2006
- (36) Hansen, K. S. et al. (2012). The impact of turbulence intensity and atmospheric stability on power deficits due to wind turbine wakes at Horns Rev wind farm. *Wind Energy*, 15, 183–196, doi:10.1002/we.512.
- (37) Schepers, J. G., T. S. Obdam, und J. Prospathopoulos,(2012). Analysis of wake measurements from the ECN Wind Turbine Test Site Wieringermeer, EWTW. *Wind Energy*, 15, 575–591, doi:10.1002/we.488.
- (38) Baidya Roy S. und J. J. Traiteur, (2010). Impacts of wind farms on surface air temperatures. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 107, 17 899–17 904, doi:10.1073/pnas.1000493107.

- (39) Walsh-Thomas, J. M. et al. (2012). Further evidence of impacts of large-scale wind farms on land surface temperature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 6432-6437
- (40) Zhou, L. Y. et al. (2012). Impacts of wind farms on land surface temperature. *Nat. Climate Change*, 2, 539-543, doi: 10.1038/nclimate1505.
- (41) Rajewski, D. A et al. (2013). CWEX: Crop/Wind-energy EXperiment: Observations of surface-layer, boundary-layer and mesoscale interactions with a wind farm. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 94, 655-672, doi:10.1175/BAMS-D-11-00240.1
- (42) Baidya Roy S. (2011). Simulating impacts of wind farms on local hydrometeorology. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 99, 491-498 doi:10.1016/j.jweia.2010.12.013
- (43) Henschen, M., et al. (2011). „Do wind turbines affect weather conditions? A case study in Indiana“ *Journal of Purdue Undergraduate Research*, 1, 22-29
- (44) Fischer K et al. 2011, The effects of wind farms on soil moisture.pdf von chron.com
- (45) Fthenakis, V. und Y. Yu (2013). Analysis of the potential for a heat island effect in large solar farms. 39<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference [http://www.clca.columbia.edu/13\\_39th%20IEEE%20PVS](http://www.clca.columbia.edu/13_39th%20IEEE%20PVS) (Zugriff am 24.3.2014)
- (46) Campra, P. et al. (2008). Surface temperature cooling trends and negative radiative forcing due to land use change toward greenhouse farming in southeastern Spain. *J. Geophys. Res.*, 113, D18109, doi: 10.1029/2008JD009912, 2008
- (47) Fitch, A. C. et al. (2012). Local and mesoscale impacts of wind farms as parameterized in a mesoscale NWP model. *Mon. Wea. Rev.* 140, 3017-3038. doi: 10.1175/MWR-D-11-00352.1
- (48) Fitch, A. C., J. B. Olson und J. K. Lundquist (2013). Parameterization of wind farms in climate models. *J. Climate* 26, 6439-6458, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00376.1
- (49) Fitch, A. C., J. K. Lundquist und J. B. Olson (2013). Mesoscale influences of wind farms throughout a diurnal cycle. *Mon. Wea. Rev.* 141, 2173-2198, doi: 10.1175/MWR-D-12-00185.1
- (50) Keith, D. W. et al. (2004). The influence of large-scale wind power on global climate. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 101, 46, 16115-16120
- (51) Bergman, J. C. (2011). Interactive comment on “Jet stream wind power as a renewable energy resource: little power, big impacts” by L M Miller et al., *Earth Syst. Dynam. Discuss.* 2, C244-C250
- (52) Baidya Roy S. (2011). Simulating impacts of wind farms on local hydrometeorology. *J Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 99, 491-498
- (53) Ludewig, E. (2013). Influence of offshore wind farms on atmosphere and ocean dynamics. Dissertation Universität Hamburg
- (54) Broström, G. (2008). On the influence of large wind farms on the upper ocean circulation. *J. Marine Syst.* 74, 585-591

- (55) Paskyabi, M. B. und I. Fer (2012). Upper ocean response to large wind farm effect in the presence of surface gravity waves. *Energia Procedia* 24, 245-254, doi:10.1016/j.egypro.2012.06.106.
- (56) Vautard R. et al. (2014). Regional climate model simulations indicate limited climatic impacts by operational and planned European wind farms. *Nature Communications* 5:3196. doi:10.1038/ncomms4196
- (57) Keith, D. et al., (2004). The influence of large-scale wind power on global climate. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 101, 16 115–16 120, doi: 10.1073/pnas.0406930101.
- (58) Wang, C. und R. G. Prinn, (2010). Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 2053–2061, doi: 10.5194/acp-10-2053-2010.
- (59) Wang, C. und R. G. Prinn (2011). Potential climatic impacts and reliability of large-scale offshore wind farms. *Environ. Res. Lett.*, 6, 025101, doi:10.1088/1748-9326/6/2/025101.
- (60) Wang, C. (2011). Potential climate impact of large-scale deployment of renewable energy technologies.  
[http://www.E234372\\_4\\_EPRI\\_0710\\_Wind\\_Wang.pdf](http://www.E234372_4_EPRI_0710_Wind_Wang.pdf) (Zugriff am 20.9.2013)
- (61) Millstein, D. und S. Menon (2011). Regional climate consequences of large-scale cool roof and photovoltaic array deployment. *IOP PUBLISHING, Environ. Res. Lett.* 6 (2011) 034001 (9pp) doi:10.1088/1748-9326/6/3/034001
- (62) Aglietti, G. S. et al. (2009). Harnessing high-altitude solar power. *IEEE Trans. Energy Convers.* 24, 442-450, doi:10.1109/TEC.2009.2016026
- (63) Perković, L. et al. (2013) Harvesting high altitude wind energy for power production: The concept based on Magnus' effect. *Appl. Energy* 101, 151-160.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.061>
- (64) Ahmed, M., A. Hably und S. Bacha (2012). High-altitude wind power systems: A survey on flexible power kites. XX<sup>th</sup> Intern. Conf. on Electrical Machines (ICEM'2012), Marseille (France), 2085-2091, doi:10.1109/ICEIMach.2012.6350170

