

## Grenzen und Konsequenzen großräumiger Onshore-Windenergienutzung

# Windenergiepotenzial von Deutschland

AXEL KLEIDON

*Der Umbau unseres Energiesystems zu erneuerbaren Energien ist notwendig, um das Klima nicht weiter zu erhitzen und Klimaneutralität zu erreichen. Der weitere Ausbau der Windenergie spielt dabei in Deutschland eine wichtige Rolle. Aber wieviel Windenergie lässt sich an Land gewinnen? Und was sind die möglichen Folgen für die Atmosphäre, wenn immer mehr Windenergie genutzt wird?*



*This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.*

**B**is 2050 will die Bundesregierung das Ziel eines klimaneutralen Energiesystems erreichen. Dieses Ziel sieht einen starken Ausbau der Windenergie vor, und dafür sollen 2% der Fläche Deutschlands zur Verfügung stehen. Szenarien verschiedener Institutionen übersetzen dies in etwa 150–200 GW an installierter Leistung, die 330–770 TWh pro Jahr zur Stromerzeugung beitragen. Beispielhaft sei hier auf die Studien von Agora Energiewende und dem Bundesverband Windenergie verwiesen [1, 2]. Gegenwärtig sind

lediglich 56 GW an Leistung installiert, verteilt auf 28230 Windturbinen, die Ende 2021 in Deutschland standen [3]. Diese Windturbinen erzeugten 90,3 TWh/Jahr an Strom und trugen bislang knapp 16% zur gegenwärtigen Stromerzeugung von 570 TWh pro Jahr bei (Stand: 2021, [4]).

Dies bedeutet, dass wir einen starken Zuwachs von Windenergienutzung in den nächsten Jahrzehnten brauchen, um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen. Aber wieviel Windenergie gibt es in Deutschland, und wieviel davon kann genutzt werden? Welche Auswirkungen hat es für die Atmosphäre, wenn ihr durch die Windturbinen mehr und mehr Bewegungsenergie entzogen wird? Während bei solchen Energieszenarien häufig das technisch Mögliche im Vordergrund steht, wollen wir hier die Physik der Atmosphäre betrachten und einfache Abschätzungen ableiten, die Antworten auf diese Fragen geben können.

### Wie Windenergie nach Deutschland kommt

Um die Größenordnung abzuschätzen, wieviel Windenergie in Deutschland erzeugt werden kann, sehen wir uns zunächst an, woher und wieviel Windenergie nach Deutschland kommt. Windturbinen in Deutschland nutzen überwiegend großskalige Winde, die zusammen mit den Hoch- und Tiefdruckgebieten in den mittleren Breiten auftreten. Diese Gebiete sind direkt mit der großskaligen atmosphärischen Zirkulation verbunden. Sie wird angetrieben durch die planetaren Unterschiede in Solarstrahlung: Tropische Gebiete absorbieren mehr Solarstrahlung als die mittleren Breiten und Polargebiete, somit sind die Tropen wärmer und die Pole kälter.

Solche Temperaturunterschiede führen zu unterschiedlichen Luftdichten, mit dem Resultat, dass in warmen Gebieten der Luftdruck mit der Höhe weniger stark abfällt, was potentielle Energie erzeugt. Diese ist wiederum verbunden mit Luftdruckunterschieden in der mittleren Atmosphäre, dort, wo das Wettergeschehen hauptsächlich stattfindet. Luft wird beschleunigt, Masse wird bewegt und umgelagert. Damit wird potentielle Energie abgebaut, Wärme wird transportiert, und die Unterschiede in der solaren Erwärmung gleichen sich aus. Kinetische Energie spielt dabei eine zentrale Rolle, da sie mit der Bewegung und dem Wärmetransport direkt verbunden ist. Sie ist als Energie-

form eingebettet in eine Umwandlungskette von der einfallenden solaren Energie zu Erwärmungsunterschieden. Diese Kette führt zu potentieller Energie, aus der kinetische Energie entsteht, die letztlich durch Reibung wieder in Wärme überführt und von der Erde in Form von langwelliger Strahlung in das Weltall abgestrahlt wird.

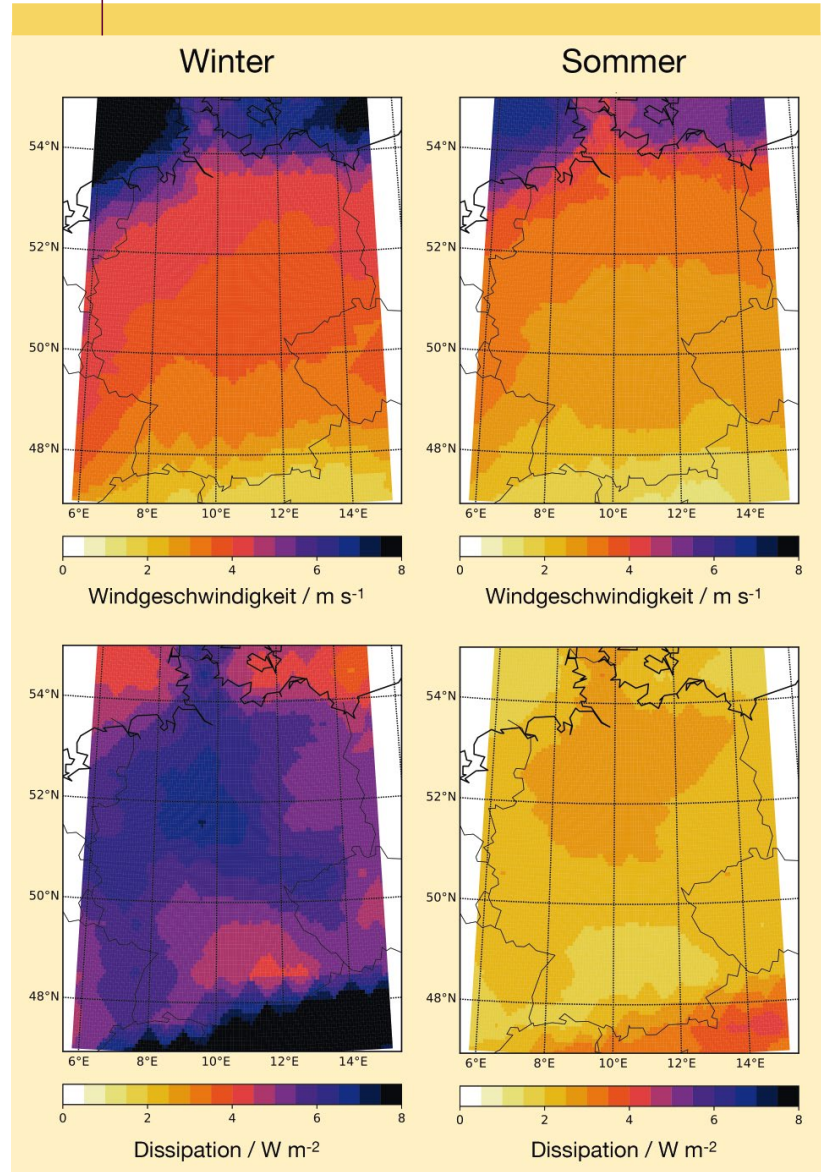
Die Leistung, die in der großskaligen Zirkulation steckt und Bewegungsenergie erzeugt, lässt sich leicht mithilfe der Thermodynamik abschätzen. Dazu betrachten wir die Erzeugung von Luftbewegung als die Folge einer Wärmekraftmaschine (oder eines „Kraftwerks“, [5]), die von der unterschiedlichen Erwärmung durch Solarstrahlung und den Temperaturunterschieden angetrieben wird. Der ausgleichende Wärmetransport ist dabei der Wärmefluss, der die Maschine antreibt, zusammen mit dem Temperaturunterschied. Damit lässt sich relativ leicht abschätzen, dass die großskalige Zirkulation lediglich etwa  $2 \text{ W m}^{-2}$  leistet. Sie erzeugt also eine entsprechend geringe Bewegungsenergie aus Erwärmungsunterschieden [6] im Vergleich zu der mittleren Absorption von  $240 \text{ W m}^{-2}$  an solarer Strahlung. Diese Größenordnung stimmt sehr gut mit der aus Beobachtungen geschätzten Leistung überein: Die Atmosphäre leistet also soviel, wie sie kann.

Die erzeugte Bewegung wird dann durch Reibung, überwiegend in der sogenannten Grenzschicht nahe der Erdoberfläche, wieder dissipiert, also in Wärme umgewandelt. Wegen der Drehimpulserhaltung ist diese Reibung aber nicht global konstant, sondern konzentriert sich in den mittleren Breiten, eben dort, wo die Westwinde relativ stark wehen und die Hoch- und Tiefdruckgebiete sich abwechseln. In diesem für die Windenergienutzung günstigeren Teil der Erde liegt auch Deutschland. Damit ist der Reibungsverlust über Deutschland mit etwa  $4 \text{ W m}^{-2}$  doppelt so hoch wie im globalen Mittel (Abbildung 1). In Abbildung 1 können wir auch sehr schön die saisonalen Variationen sehen: Im Winter sind die Reibungsverluste wesentlich höher als im Sommer. Dies wiederum lässt sich durch das atmosphärische „Kraftwerk“ erklären: Im Winter sind die Strahlungsunterschiede zwischen den Tropen und den Polargebieten größer, das Kraftwerk leistet mehr und produziert folglich stärkere Winde.

Zusammenfassend können wir Folgendes festhalten: Windenergie entsteht überwiegend in der sogenannten freien Atmosphäre, also fern der Oberfläche, von wo aus sie an die Oberfläche gebracht wird und durch Reibung dissipiert wird. Dies bedeutet, dass die bodennahe Windenergienutzung für die Atmosphäre praktisch keine Auswirkungen auf die großskalige Zirkulation haben kann. Schließlich nutzen die Windturbinen nur die kinetische Energie, die sowieso durch Bodenreibung verloren geht, während das Wettergeschehen weit oben, entkoppelt von der Oberfläche, seinen Lauf nimmt.

Eine größere und direktere Konsequenz hat das für den Nachschub von Windenergie, wenn diese von vielen Turbinen über große Flächen genutzt werden soll. Dieser Nachschub kommt von oben, und das mit einer relativ geringen

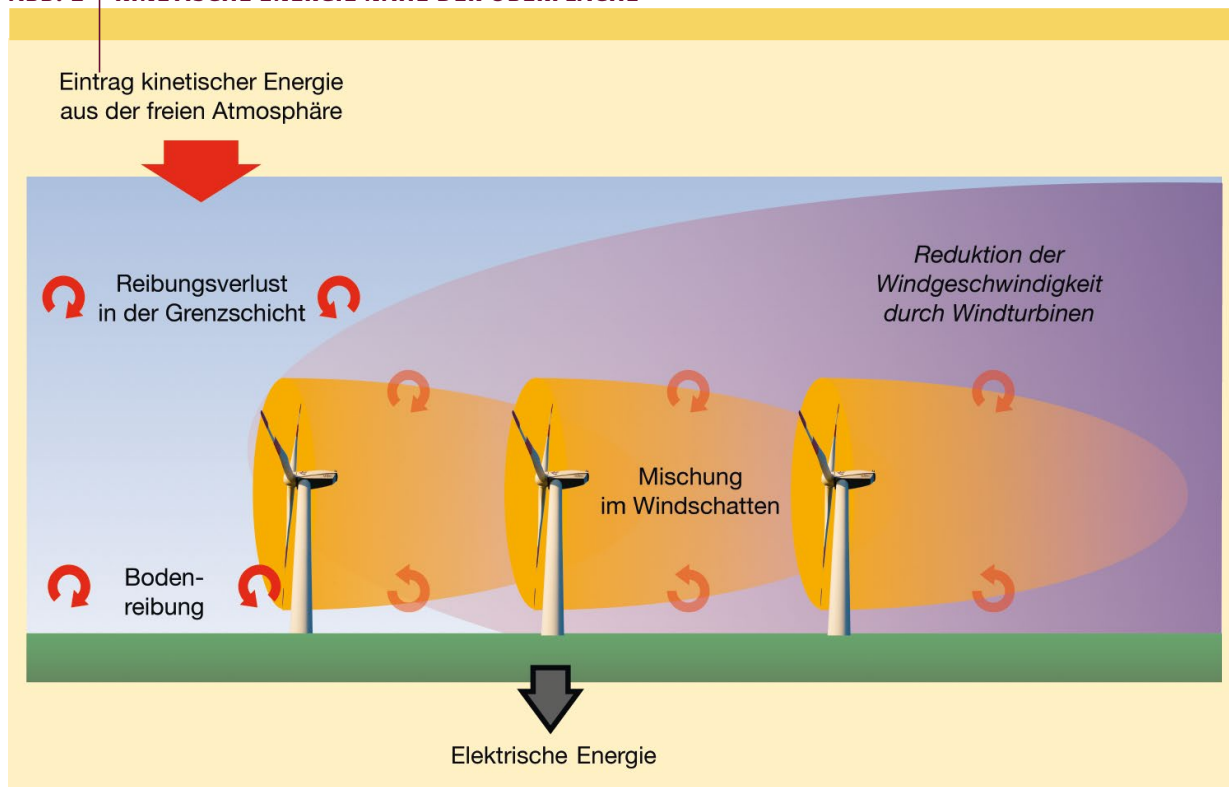
ABB. 1 | WIND UND DISSIPATION



**Oben: Windgeschwindigkeiten auf 10 m Höhe, unten: Dissipation für Winter (Dezember-Februar) und Sommer (Juni-August). Die Karten zeigen langjährige Mittel über die Jahre 1980–2010 des Wetter-Reanalysedatensatzes ERA-5 [7].**

Rate von  $4 \text{ W m}^{-2}$ . Mit dieser Rate können wir bereits abschätzen, wieviel Windenergie natürlich über Deutschland durch Reibung verloren geht. Dazu nehmen wir die  $4 \text{ W m}^{-2}$  und multiplizieren sie mit der Fläche Deutschlands von  $357000 \text{ km}^2$ . Damit erhalten wir etwa  $1430 \text{ GW}$ , was  $12500 \text{ TWh}$  oder  $45100 \text{ PJ}$  pro Jahr entspricht. Zum Vergleich: Der durchschnittliche Primärenergieverbrauch Deutschlands während des Jahres 2021 war  $393 \text{ GW}$ , oder  $12400 \text{ PJ}$  pro Jahr [4], also etwa 27% der natürlichen Reibung. An diesem Vergleich können wir erkennen, dass ein starker Ausbau der Windenergie durchaus einen beachtlichen Teil der Energie gewinnen könnte, welche die Atmosphäre natürlicherweise nach Deutschland bringt und dort durch Reibung verliert.

**ABB. 2 KINETISCHE ENERGIE NAHE DER OBERFLÄCHE**



**Kinetische Energie fließt aus der freien Atmosphäre zur Erdoberfläche. Dabei wird sie durch Mischung in der Grenzschicht und Bodenreibung in Wärme oder durch Windturbinen in elektrische Energie umgewandelt. Ein Teil der kinetischen Energie geht dann noch durch Mischung im Windschatten der Turbinen verloren.**

### Großräumige Grenzen

Um abzuschätzen, wieviel der eingebrachten Windenergie von Windturbinen umgewandelt werden kann, verfolgen wir, wie die kinetische Energie aus der freien Atmosphäre an die Oberfläche kommt (Abbildung 2). Die kinetische Energie wird dabei durch den vertikalen Austausch von horizontalem Impuls zur Erdoberfläche transportiert. Unser Ausgangspunkt für die Beschreibung ist also die Impulsbilanz, da der Gesamtimpuls ja erhalten bleibt. Die kinetische Energie dagegen bleibt nicht erhalten.

Wenn Impuls aus der freien Atmosphäre in tiefere Luftschichten mit geringen Geschwindigkeiten gebracht wird, geschieht dies unter Verlust an kinetischer Energie. Am unteren Ende des Transports geht der verbleibende Rest dieser Energie durch Reibung an der Erdoberfläche verloren. In der Abwesenheit von Windturbinen stellt sich so eine Windgeschwindigkeit nahe der Oberfläche ein, die sowohl den Antrieb von oben wie auch die Reibungseigenschaften der Oberfläche widerspiegelt. Dies kann man schön auf den Karten in Abbildung 1 erkennen: Meeresoberflächen sind in der Regel glatter, die Bodenreibung gewinnt so erst bei höheren Windgeschwindigkeiten an Bedeutung als über Land, obwohl insgesamt etwa mit der gleichen Rate Bewegungsenergie in der Grenzschicht verloren geht.

Werden nun mehr und mehr Windturbinen in einer Region aufgestellt, dann verändern diese die Bilanz aus Antrieb und Reibung, weil sie einen Teil der Bewegungsenergie entziehen (Abbildung 3). Dies führt zu einem weiteren Term in der Impulsbilanz: Statt nur über Bodenreibung wird jetzt ein Teil des Impulses zusätzlich über die Windturbinen in den Boden gebracht. Die Windgeschwindigkeit verringert sich damit in der Region. Das verschiebt dann die Aufteilung, wie die kinetische Energie dissipiert oder umgewandelt wird. Mit mehr Windturbinen reduziert sich der Verlust durch Bodenreibung, aber durch die geringeren Windgeschwindigkeiten steigt der Verlust durch Mischung weiter oben in der Grenzschicht. Das setzt dann eine Grenze, wie viel Energie Windturbinen der Grenzschicht maximal entziehen können. Da die Energieerzeugung von Windturbinen mit der Windgeschwindigkeit zur dritten Potenz steigt, produziert damit jede einzelne Windturbine weniger Strom, die Turbinen werden also weniger effizient.

Eine einfache Formulierung der Impulsbilanz zeigt, dass die Turbineneffizienz – auch Kapazitätsfaktor genannt – in etwa linear abnimmt mit der Menge an Bewegungsenergie, die der Atmosphäre durch die Turbinen entzogen wird (siehe „Vertikaler kinetischer Energietransport“ auf S. 145). Die Effizienz einer Turbine beschreibt dabei ihre Stromerzeugung im Verhältnis zur Maximalleistung, also die

**VERTIKALER KINETISCHER ENERGIETRANSPORT**

Um Ertragsminderungen beim regionalen Ausbau der Windenergie abzuschätzen, formulieren wir eine Impulsbilanz der unteren Atmosphäre. Ohne Windturbinen wird dort die Bewegungsenergie der Atmosphäre durch Reibung dissipiert und in Wärme umgewandelt [6]. Wir nutzen die Impulsbilanz, um die Reduktion der Windgeschwindigkeit der unteren Atmosphäre als Funktion der installierten Turbinenzahl zu beschreiben. Damit können wir dann ermitteln, wie der Eintrag von kinetischer Energie aus der Atmosphäre aufgeteilt wird in Verluste durch Mischung in der Grenzschicht und Bodenreibung und durch Energieerzeugung mit Windturbinen (Abbildung 2). Daraus leiten wir dann eine Näherung ab, die bestimmt, wie die mittlere Effizienz von Windturbinen sinkt, wenn regional die Windenergie ausgebaut wird.

**Impulsbilanz**

Für den Transport von kinetischer Energie aus der freien Atmosphäre an die Oberfläche gilt die Impulserhaltung. Der eingebrachte Impuls pro Fläche  $F_{in}$  wird bilanziert mit der Reibungskraft an der Oberfläche,  $F_{Reibung}$ , plus dem Impulsentzug durch die Windturbinen,  $F_{Turbinen}$ :

$$F_{in} = F_{Reibung} + F_{Turbinen}$$

Die Bodenreibung wird in der Klimaforschung typischerweise beschrieben durch turbulente Reibung:

$$F_{Reibung} = \rho C_d v^2,$$

wobei  $\rho$  die Luftdichte von etwa  $1,1 \text{ kg/m}^3$  ist,  $C_d$  der Reibungsbeiwert und  $v$  die Windgeschwindigkeit der unteren Atmosphäre. Der Reibungsbeiwert hängt von der Rauigkeit der Oberfläche, der Stabilität der Luft, und der Referenzhöhe ab. Typische Werte für sogenannte neutrale Bedingungen in 100 m Höhe sind 0,001 für das Meer, 0,005 für Gras und 0,01 für Wald.

Der Impulsentzug durch die Windturbinen wird ähnlich beschrieben wie die Reibung. Der Reibungsbeiwert wird hier durch die Querschnittsfläche,  $A_{Rotor}$ , die von den Rotorblättern der Turbinen aufgespannt wird, ersetzt:

$$F_{Turbinen} = n(\rho/2)\eta A_{Rotor} v^2.$$

Außerdem geht hier noch die Turbindichte  $n$  ein, die Anzahl von Windturbinen  $N$  pro Fläche  $A_{Region}$  (also  $n = N/A_{Region}$ ), und der Leistungsbeiwert  $\eta$ . Bei modernen Windturbinen, die nicht an ihrer Kapazitätsgrenze operieren, beträgt dieser Koeffizient typischerweise etwa  $\eta \approx 0,42$  [8].

Wenn wir die Gleichungen kombinieren, können wir die Windgeschwindigkeit ausdrücken als Funktion des Impulseintrags,  $F_{in}$ , und der installierten Windturbinen:

$$v = \left[ F_{in} / (\rho C_d + n(\rho/2)\eta A_{Rotor}) \right]^{1/2} = f_{Red}^{1/3} \cdot v_0 \tag{1}$$

Ohne Windturbinen nimmt die Geschwindigkeit einen Wert von  $v_0 = (F_{in}/\rho C_d)^{1/2}$  an. Damit kann man den Reduzierungseffekt  $f_{Red}$  durch die Windturbinen wie folgt beschreiben

$$f_{Red} = \left( 1 + n \eta A_{Rotor} / (2 C_d) \right)^{-3/2} \tag{2}$$

Anhand (2) können wir bereits sehen, dass mehr Windturbinen (höheres  $n$ ) zu einem geringeren  $f_{Red}$  und nach (1) zu reduzierten Windgeschwindigkeiten (geringeres  $v$ ) führen muss.

**Kinetische Energiebilanz**

Die Bilanz kinetischer Energie sieht dann so aus: Der Eintrag von kinetischer Energie,  $J_{ke}$ , der mit dem vertikalen Transport von Impuls verbunden ist, wird beschrieben durch den Impulsfluss sowie der horizontalen Windgeschwindigkeit der freien Atmosphäre,  $v_{in}$ :

$$J_{ke} = F_{in} \cdot v_{in}$$

Dieser Eintrag entspricht der Rate an Energie, die unter natürlichen Bedingungen durch Reibung verloren geht, also durch Dissipation (Abbildung 1). Er wird bilanziert mit den verschiedenen Termen, die kinetische Energie abbauen: der Energieertrag durch die Windturbinen  $Y$ , der Bodenreibung,  $D_{Reibung}$ , und den Reibungsverlusten durch Mischung innerhalb der Grenzschicht und im Windschatten der Turbinen,  $D_{Grenzschicht}$ :

$$J_{ke} = Y + D_{Reibung} + D_{Grenzschicht} \tag{3}$$

Der Energieertrag der Windturbinen wird beschrieben durch

$$Y = F_{Turbinen} \cdot v = f_{Red} \cdot n(\rho/2)\eta A_{Rotor} v_0^3 \tag{4}$$

der Verlust durch Bodenreibung mit

$$D_{Reibung} = F_{Reibung} \cdot v = f_{Red} \cdot \rho C_d \cdot v_0^3 \tag{5}$$

sowie durch Mischung mit

$$D_{Grenzschicht} = F_{in} \cdot (v_{in} - v) = J_{ke} - f_{Red} \cdot (2 C_d + n \eta A_{Rotor}) \cdot (\rho/2) v_0^3$$

Die Aufteilung dieser Terme, und wie sie sich mit mehr Turbinen verändern, ist in Abbildung 3 gezeigt.

**Ertrag und Effizienz der Windturbinen**

Der Ertrag durch die Windturbinen nimmt also mit der Anzahl von Windturbinen (höheres  $n$ ) zu. Für sehr kleine Werte von  $n$  ergibt dieser Ausdruck nach (4) in etwa:

$$Y \approx n(\rho/2)\eta A_{Rotor} \cdot v_0^3$$

Mit zunehmenden  $n$  steigt die Stromerzeugung an, aber weil die Windgeschwindigkeit und  $f_{Red}$  mit  $n$  abnimmt, ergibt sich mit (5) ein Maximum der erzeugten Energie:

$$Y_{max} = 2 / (3^{3/2}) \cdot \rho C_d v_0^3 \approx 38\% \text{ von } D_{Reibung} (n=0),$$

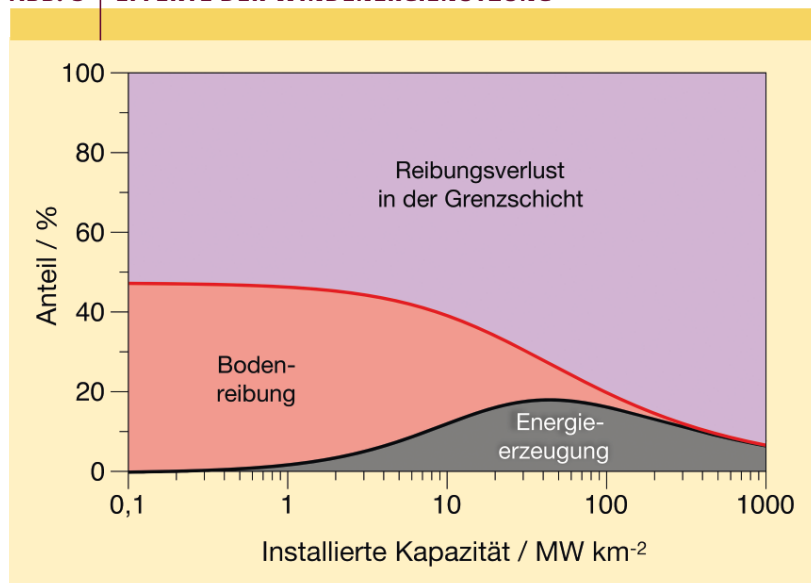
für ein  $n_{opt} = 4 C_d / (\eta A_{Rotor})$  und einen Wert von  $f_{Red} = 2 / (3^{3/2})$ . Es können also nur maximal etwa 38% der Energie genutzt werden, die unter natürlichen Bedingungen ohne Windturbinen durch Bodenreibung dissipiert werden.

Die mittlere Effizienz der Turbinen,  $f_{cap}$ , erhalten wir, indem wir den Ertrag  $Y$  durch die installierte Kapazitätsdichte,  $Y_{ic}$ , also die installierte Kapazität an Turbinen über eine Fläche in Einheiten von  $\text{MW km}^{-2}$ , teilen. Dies ergibt letztlich:

$$f_{cap} = f_{cap,max} \cdot [1 - f_{Red} \cdot (Y/Y_{max})] \approx f_{cap,max} \cdot [1 - 0,58 \cdot (Y/Y_{max})]$$

Die Reduktion der Effizienz hängt also vorrangig von dem Energieentzug durch die Turbinen ab und weitestgehend nicht von ihren technischen Details. Damit lässt sich der Reduzierungseffekt für verschiedene Ausbauszenarien abschätzen.

ABB. 3 | EFFEKTE DER WINDENERGIENUTZUNG



**Je mehr Windturbinen der Atmosphäre Energie entziehen (grau), desto mehr geht von der eingetragenen Energie durch Mischung oberhalb des Turbinenfelds verloren (lila). Dies führt zu einer relativ geringen Grenze, wieviel Windenergie von der eingetragenen Energie durch Turbinen genutzt werden kann.**

Kapazität ihres Generators. Die Effizienz entspricht somit der Auslastung der Turbine. Eine einzeln stehende Turbine hat die höchste Effizienz, wir nennen sie  $f_{\text{cap,max}}$ . Sie kann aus aktuellen Beobachtungen bestimmt werden und ist gegenwärtig in Deutschland etwa  $f_{\text{cap,max}} \approx 20\%$  [8]. Mit wachsender Zahl an Windturbinen in einer Region sinkt die Effizienz ( $f_{\text{cap}}$ ) wegen der verringerten Windgeschwindigkeit:

$$f_{\text{cap}} = f_{\text{cap,max}} \cdot \left(1 - \beta \cdot \left(f_{\text{cap,max}} \cdot Y_{\text{ic}}\right) / Y_{\text{max}}\right).$$

Der Effekt durch die geschwächten Winde wird hier durch den Ausdruck in den Klammern beschrieben. Der Parameter  $\beta$  bestimmt, wie stark die Effizienz mit dem Zubau abnimmt. Klimamodellsimulationen liefern einen Wert von  $\beta = 0,8$ , eine einfache theoretische Abschätzung ergibt einen etwas geringeren Wert  $\beta = 1 / \sqrt{3} \approx 0,58$  (siehe „Vertikaler kinetischer Energietransport“). Die Zahl der Windturbinen geht hier über die gesamte installierte Kapazität der Turbinen ein, die über eine Region auf einer gewissen Fläche verteilt sind ( $Y_{\text{ic}}$ , mit der Einheit  $\text{MW km}^{-2}$  oder  $\text{W m}^{-2}$ ). Der Eintrag von kinetischer Energie durch die Atmosphäre fließt über  $Y_{\text{max}}$  ein, was den maximal für Windenergieerzeugung nutzbaren Anteil beschreibt (siehe „Vertikaler kinetischer Energietransport“).

Wir wollen kurz die Plausibilität der Gleichung veranschaulichen, bevor wir sie anwenden. Ist die Zahl der Turbinen, die in einer Region installiert sind, sehr gering, so ist  $f_{\text{cap,max}} \cdot Y_{\text{ic}}$  viel kleiner als  $Y_{\text{max}}$ , und der Ausdruck in Klammern in der Gleichung ist etwa 1. Dann erreicht die Effizienz der Windturbinen nahezu den maximalen Wert

einer isoliert stehenden Windturbine, also  $f_{\text{cap}} = f_{\text{cap,max}}$ . Mehr Turbinen führen zu mehr Entzug von Windenergie der Atmosphäre, also wird  $f_{\text{cap,max}} \cdot Y_{\text{ic}}$  größer, und der Ausdruck in Klammern ist kleiner als 1. Die Effizienz der Windturbinen nimmt also ab.

Dieser Effekt ist stärker in Regionen und Jahreszeiten ausgeprägt, wo die Atmosphäre wenig kinetische Energie einbringt, dort ist die Rate  $Y_{\text{max}}$  vergleichsweise gering. Wenn mehr Windturbinen in der Region installiert sind als der maximal mögliche Ertrag, also  $f_{\text{cap,max}} \cdot Y_{\text{ic}} > Y_{\text{max}}$ , dann gilt diese lineare Näherung nicht mehr, und man muss den Ertrag anders ermitteln. Dabei handelt es sich aber um unrealistische Szenarien eines drastischen Ausbaus der Windenergie.

### Abschätzungen für Deutschland

Mit der Gleichung können wir nun verschiedene Ausbauszenarien betrachten, die eine bestimmte installierte Kapazität über gewisse Flächen verteilen, und damit die Auswirkungen des Energieentzugs der Turbinen auf den Stromertrag und auf die Atmosphäre abschätzen. Diese Szenarien bestimmen den Wert von  $Y_{\text{ic}}$ .

Dies nutzen wir zunächst für die bereits installierten Windturbinen im Jahr 2021. Wir teilen dazu die 56 GW installierte Kapazität durch die Fläche Deutschlands von  $357\,000 \text{ km}^2$  und erhalten eine installierte Kapazitätsdichte von  $Y_{\text{ic}} = 56 \cdot 10^9 \text{ W} / (357 \cdot 10^9 \text{ m}^2) = 0,16 \text{ W m}^{-2}$ . Den maximal möglichen Ertrag  $Y_{\text{max}}$  schätzen wir aus dem Mittelwert von etwa  $4 \text{ W m}^{-2}$  ab. Davon geht etwa die Hälfte durch Mischung in der Grenzschicht verloren (Abbildung 3), vom Rest kann maximal 38% genutzt werden (siehe „Vertikaler kinetischer Energietransport“). Wir erhalten also  $Y_{\text{max}} = 0,76 \text{ W m}^{-2}$ .

Mit der Gleichung erhalten wir für die Effizienz statt 20% einen Wert von  $f_{\text{cap}} = 19,3\%$ , was den Ertrag um etwa 3,5% absenkt. Diesen Wert können wir jetzt mit der installierten Kapazität von 56 GW multiplizieren, und erhalten einen jährlichen Stromertrag von 95 TWh statt 98 TWh ohne Windreduktionseffekt. Beide Zahlen vergleichen sich recht gut mit dem berichteten Beitrag der Windenergie von 90 TWh pro Jahr [3]. Der Effekt durch Windentzug ist gegenwärtig also recht gering. Eine genauere Betrachtung, welche die Verteilung der 56 GW über die Bundesländer beinhaltet, ist in Abbildung 4 dargestellt (siehe auch Tabelle 1 im Zusatztext zum Download, unter „Zusatzmaterial“). Sie führt insgesamt zu sehr ähnlichen Ergebnissen in Form eines Ertrags von 94 TWh pro Jahr, also einer Reduktion von 4,4%.

Wir können nun ein Szenario von 200 GW an installierter Kapazität nehmen und damit die Abschätzung wiederholen. Damit ergibt sich eine Kapazitätsdichte von  $Y_{\text{ic}} = 200 \cdot 10^9 \text{ W} / (357 \cdot 10^9 \text{ m}^2) = 0,6 \text{ W m}^{-2}$ , und die Effizienz sinkt um etwa 13% auf  $f_{\text{cap}} = 17,5\%$ . Der jährliche Stromertrag geht entsprechend zurück und kommt statt auf 350 TWh ohne den Reduzierungseffekt auf nun nur noch 307 TWh.

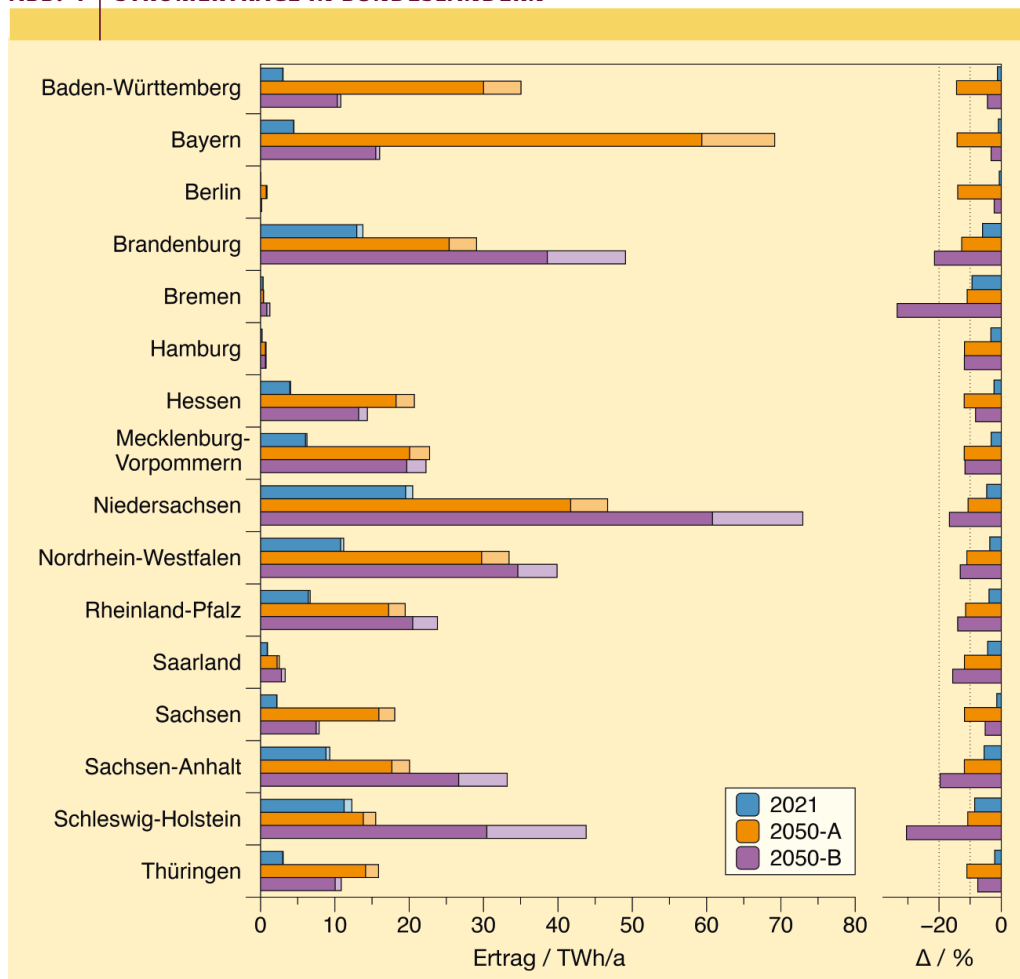
Abbildung 4 zeigt eine Abschätzung, die genauer als die hier vorgestellte berechnet ist, auf der Skala von Bundesländern als Szenario 2050A. Hier sinkt der Ertrag auf 313 TWh pro Jahr, also etwa 11 % weniger. Im ebenfalls dargestellten Szenario 2050B wird angenommen, dass die Windenergienutzung dort stärker ausgebaut wird, wo sie heute schon stark vertreten ist, also überwiegend in den nördlichen Bundesländern. Dies Szenario zeigt eine etwas höhere Abnahme um 13 % auf 304 TWh pro Jahr.

### Schlussfolgerungen

Bei einem Ausbau der Windenergie auf 200 GW an installierter Kapazität wäre also mit Ertragseinbußen von um die 10–15 % zu rechnen. Trotzdem würde sie noch sehr viel Energie erzeugen – mehr als die Hälfte des gegenwärtigen Strombedarfs Deutschlands. Passenderweise geschieht das überwiegend im Winter, zu einer Zeit, in der die Photovoltaik nicht viel leisten kann. Dabei wären die Verluste sogar deutlich geringer als diejenigen, die beim Ausbau der Offshore-Windenergie zu erwarten sind [9]. Dies hat einfach damit zu tun, dass über Land wesentlich mehr Platz zur Verfügung steht und somit die Windturbinen effizienter Energie erzeugen können. Wenn sie gleichmäßig verteilt sind, dann sollte dieser reduzierende Effekt geringer ausfallen, wie im Szenario 2050A gezeigt. Sollten zukünftige Turbinen größer und leistungsfähiger werden – eine häufige Annahme in Szenarien – dann entziehen diese Turbinen der Atmosphäre mehr Energie. Also sollte sich der Reduktionseffekt entsprechend verstärken. Insgesamt zeigt diese Abschätzung, dass der Stromertrag geringer ausfallen wird als in den eingangs erwähnten Szenarien [1, 2] angenommen. Der Effekt ist also bedeutend, aber nicht gravierend.

Wir können aus diesen Berechnungen auch Rückschlüsse auf die Auswirkungen auf die Atmosphäre ziehen. Der Reduktionseffekt wird verursacht durch geringere Windgeschwindigkeiten, sie sinken in diesen Szenarien lediglich auf  $(1 - (\beta/3) \cdot (f_{cap,max} \cdot Y_{ic})/Y_{max})$ , nehmen also um 3,4 % ab. Der Faktor 1/3 in der Formel kommt daher, dass Windgeschwindigkeiten nur mit der Potenz von 1/3 von der entzogenen Energie eingehen (Inverse des Turbinenertrags, der proportional zu  $v^3$  ist) – Linearisieren ergibt dann den Faktor 1/3.

ABB. 4 | STROMERTRÄGE IN BUNDESLÄNDERN



**Stromerträge aus Windenergie, abgeschätzt für den gegenwärtigen Stand sowie für zwei Ausbauszenarien nach Bundesländern. Die hellfarbigen Balken zeigen die Abschätzungen, die den Effekt auf die Atmosphäre nicht berücksichtigen, die dunkelfarbigen Balken beinhalten den Reduktionseffekt auf die Windgeschwindigkeiten durch die Windturbinen. Die relativen Verluste im Vergleich zu Berechnungen ohne verringerte Windgeschwindigkeiten sind rechts gezeigt. Zum Vergleich: Der gesamte Strombedarf Deutschlands im Jahr 2021 betrug 570 TWh.**

Die Menge an Energie, die durch die Windturbinen entzogen wird, ist dabei für die Atmosphäre wirklich gering: Beim Ausbau von 200 GW wären dies nur etwa 300 TWh von den 12500 TWh pro Jahr, die durch natürliche Reibungsverluste dissipiert werden. Das entspricht lediglich 2,4 %. Das großskalige Wettergeschehen der Atmosphäre wird also von den Windturbinen nicht beeinflusst, insbesondere, weil die entzogene Bewegungsenergie ja sowieso sonst durch Reibung in der Grenzschicht verloren gegangen wäre.

### Zusammenfassung

Die Windenergienutzung in Deutschland soll bis 2050 mit bis zu 200 Gigawatt ausgebaut werden, was in etwa einer Vervielfachung im Vergleich zu heute entspricht. Diese Windturbinen werden der Atmosphäre dabei Windenergie entziehen und damit die Atmosphäre beeinflussen. Dies

wirkt sich auf die Effizienz der Windenergienutzung aus, weil die Windgeschwindigkeiten in den betroffenen Regionen sinken müssen. Mithilfe der Impulsbilanz und den damit verbundenen kinetischen Energieflüssen lässt sich abschätzen, dass deshalb der Stromertrag um etwa 10 bis 15 % sinkt. Der Effekt ist geringer, wenn die Windturbinen gleichmäßiger über mehr Fläche verteilt sind. Trotz dieser Effekte lässt sich mit der Windenergie sehr viel Strom erzeugen, die betrachteten Szenarien würden mehr als die Hälfte des gegenwärtigen Strombedarfs damit decken. Die Auswirkungen auf die Atmosphäre sind dabei sehr gering. Die umgesetzte Windenergie beträgt lediglich 2,4 % des Verlusts an kinetischer Energie, die ohnehin auf natürliche Weise durch Reibung in der unteren Atmosphäre verloren geht.

#### Zusatzmaterial



#### Stichwörter

Windenergie, Volllaststunden, Energiewende, kinetische Energie, erneuerbare Energie, Wind, Szenarien, klimatische Auswirkungen.

#### Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

#### Literatur

- [1] Agora Energiewende, Klimaneutrales Stromsystem 2035, <https://t1p.de/Agora2035>.
- [2] Bundesverband Windenergie, Wie viele Windenergieanlagen braucht das Land?, <https://t1p.de/BWECheck>.
- [3] Deutsche Windguard, Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland 2021, <https://t1p.de/Windguard>.

- [4] Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2021, Stand: 26. September 2022, <https://t1p.de/EBilanz>.
- [5] A. Kleidon, Physik in unserer Zeit **2019**, 43(3), 136.
- [6] A. Kleidon, Meteorol. Z. **2021**, 30(3), 203.
- [7] Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage, ERA5, <https://t1p.de/ERA5>.
- [8] S. Germer, A. Kleidon, PLoS ONE **2019**, 14(2), e0211028.
- [9] A. Kleidon, Physik in unserer Zeit **2023**, 54(1), 30.

#### Zusatzmaterial

Den Zusatztext „Ergänzung zum Windenergiepotenzial von Deutschland“ finden Sie unter „Supporting Information“ auf <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.202301670/supinfo>.

#### Der Autor



(Foto: R. Wernicke)

Axel Kleidon studierte Physik und Meteorologie an der Universität Hamburg und der Purdue University, Indiana, USA. Am Max-Planck-Institut für Meteorologie promovierte er 1998 über den Einfluss von tief wurzelnder Vegetation auf das Klimasystem. Danach forschte er an der Stanford University in Kalifornien und an der University of Maryland. Seit 2006 leitet er die unabhängige Forschungsgruppe „Theorie und Modellierung der Biosphäre“ am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena. Seine Forschungsinteressen reichen von der Thermodynamik des Erdsystems bis zu den natürlichen Grenzen erneuerbarer Energiequellen.

#### Anschrift

Dr. Axel Kleidon, Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Postfach 10 01 64, 07701 Jena. [akleidon@bgc-jena.mpg.de](mailto:akleidon@bgc-jena.mpg.de)