

„Alle erneuerbaren Technologien wirken sich auf das Klima aus, da sie bei der Stromerzeugung Wärme, Strömung und Feuchtigkeit umverteilen.“ Lee Miller, *The Warmth of Wind Power*, in: *Physics Today*, Aug. 2020, 58/59 <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.3.4553>

"As wind turbines harvest energy, they redistribute heat in the lower atmosphere. Farmers have been exploiting the effect for decades." - "Wenn Windräder Wind „ernten“, verteilen sie Wärme in der unteren Atmosphäre um. Farmer kennen den Effekt seit Jahrzehnten."

"Wind turbines alter the climate through atmospheric mixing – by redistributing heat in the lower atmosphere, which is completely unrelated to the mechanisms of climate change." - "Windräder verändern das Klima durch atmosphärische Durchmischung - indem sie Wärme in der unteren Atmosphäre umverteilen, was völlig unabhängig vom Klimawandel erfolgt."

#### Temperaturanstieg durch Windkraft

Wenn Windturbinen Energie ernten, verteilen sie die Wärme in der unteren Atmosphäre um. Landwirte nutzen den Effekt seit Jahrzehnten.

Lee Miller

Im vergangenen Jahr 2019 erzeugten Windkraftanlagen in den USA 300 Milliarden kWh. Das sind 7,3% des Strombedarfs des Landes, mehr Strom als mit jeder anderen erneuerbaren Technologie, einschließlich Wasserkraft.

Windräder erreichen nun Höhen von 300 m, jede Turbine mit Rotorblättern von 50 m Länge – einem halben Fußballfeld. Die USA haben rund 60.000 Turbinen und die Zahl wird ansteigen, da sie in Clustern zu mehreren 1000 aufgestellt werden. Da die Turbinen kinetische Energie ernten, reduzieren sie Windgeschwindigkeiten und erzeugen turbulente Nachläufe. Diese wiederum verändern den Austausch zwischen Wärme, Luftfeuchtigkeit und Bewegung zwischen der Erdoberfläche und der Unteren Atmosphäre. Seltsamerweise sind diese Effekte nicht auf die unmittelbare Umgebung der Turbinen beschränkt. Man kann sie noch in mehreren Dutzend Kilometern Entfernung von der Turbine feststellen. Da zunehmend Turbinen in der Landschaft aufgestellt werden, ist es wichtig, den Umwelteinfluss zu verstehen, den sie bewirken.

#### **Die Energie des Windes**

Unterschiede in der solaren Erwärmung zwischen dem Erdäquator und seinen Polen führen zu Druckgradienten, die die Windströmungen des Planeten erzeugen. Reibung mit der Oberfläche verlangsamt sie. Diese ausgleichenden Effekte tragen zur Erhaltung unseres Klimas bei. **Der Einfluss der Reibung ist besonders stark in den niedrigsten 1–3 km, wo etwa die Hälfte aller turbulenten atmosphärischen Dissipationen (Umwandlung von kinetischer in thermische Energie) stattfindet. Windkraftanlagen sind daher in einer Luftsäule eingebunden, die auf natürliche Weise atmosphärische Leistung (Energie) mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von etwa 1 W / m abführt**

Lassen Sie uns diese Durchschnittsgröße im Zusammenhang betrachten. Im Jahr 2018 lag der US-Stromverbrauch bei etwa 0,07 W / m<sup>2</sup>. Die Windenergie könnte einen erheblichen Teil dieser Rate decken, würde jedoch die Abdeckung eines erheblichen Teils der Landoberfläche des Landes mit Turbinen erfordern. In Betrieb befindliche US-Windparks nehmen derzeit weniger als 1% der Landfläche des Landes ein und erzeugen Strom mit Raten zwischen 0,5 und 1,5 W / m<sup>2</sup>. (Der Wert bezieht verschiedene Faktoren mit ein, einschließlich der Größe der Windparks, der Turbinendichte und der unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten der Regionen.) Dennoch ist die Vergleichbarkeit der Dissipations- und Erzeugungsraten bemerkenswert und ein Beweis für die Effizienz der Windkraftanlagen für den Entzug von Windenergie.

#### **Umverteilung von Wärme**

Windkraftanlagen verändern das Klima durch atmosphärische Durchmischung - indem sie die Wärme der unteren Atmosphäre umverteilen, was völlig unabhängig von den Mechanismen des Klimawandels erfolgt. Die natürlichen Unterschiede der atmosphärischen Vermischung zwischen Tag und Nacht machen sich hinsichtlich des Effekts der Turbinen auf das leeseitige Klima enorm bemerkbar (= die natürlichen Unterschiede zwischen Tag und Nacht werden durch Windparks vermindert).

**Tagsüber erwärmt die solare Einstrahlung die Bodenoberfläche, was eine Konvektion (= vertikale Luftbewegung) vom Boden her bewirkt. Der Prozess wirkt zusammen mit Windgeschwindigkeiten, Lufttemperatur und Feuchtigkeit bis in Höhen von 1-3 km, also weit über die physikalische Ausdehnung der Windräder hinaus. Im Endergebnis sind die tagsüber arbeitenden Turbinen eingebunden in eine bereits durchmischte Luftsäule und haben daher nur einen geringen Einfluss auf die Oberflächentemperatur.**

In der Nacht ist die Atmosphäre ohne sonnengetriebene Konvektion oberhalb von 50–150 m normalerweise nicht gut durchmischt. Diese dünne, ruhige Luftschicht schützt die Atmosphäre vor Oberflächenreibung und ermöglicht die Entwicklung vertikaler Gradienten in Windgeschwindigkeit, Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Diese nächtlichen Bedingungen sind in der Meteorologie bekannt. **Da die Windkraft etwa proportional zum Würfel der Windgeschwindigkeit ist, bietet die Verwendung längerer Rotorblätter, höherer Türme und erhöhter Topographie erhebliche Vorteile, um den stärkeren Höhenwind zu erreichen. Windkraftanlagen sind mehr konstruiert zur Extraktion kinetischer Energie, anstatt die Winde um sie herum zu lenken - wie etwa Baumkronen – die dadurch bewirkte Ausbremsung (Verlangsamung und Turbulenzen) bewirkt einen steileren vertikalen Windgeschwindigkeitsgradienten (= vertikale Windrichtung), und dies wiederum bewirkt dramatisch erhöhte vertikale Mischraten von Luftmassen in größerer Höhe mit den bodennahen Luftmassen.**

(Die Turbulenzen der Wirbelschleppen verursachen eine vertikale Vermischung zwischen der Luft, die sich horizontal auf einer Ebene bewegt, und der Luft auf den Ebenen unmittelbar darüber und darunter.)

Andere Faktoren wie etwa die Aufstellung der Turbinen in Reihen sowie die Umgebung der Windparks kann das Ausmaß des beschriebenen Effekts beeinflussen. **Wenn die normalerweise wärmere und trockenere Luft nach unten gewirbelt und mit oberflächennaher Luft durchmischt wird, steigen die Temperaturen nahe der Bodenoberfläche.**

Daher sind nachts größere klimatische Auswirkungen zu erwarten als tagsüber, auch von Turbinen am gleichen Standort mit denselben Windgeschwindigkeiten. **Tag-und-Nacht-Unterschiede wurden in fast einem Dutzend Studien anhand von oberflächen- oder weltraumgestützten Beobachtungen über Texas, Iowa, Illinois und Kalifornien diskutiert.** Direkt gekoppelt mit der Turbinen-Atmosphären-Wechselwirkung, umfassen **die Effekte Unterschiede in Temperatur, Strömung (!) und Verdunstungsraten (!!).** Auch im Ausland wurden Auswirkungen wie langsamere Windgeschwindigkeiten und erhöhten Turbulenzen der Turbinen-Nachläufe festgestellt, **bei Deutschlands Nordsee-Offshore-Windparks bis 50 bis 75 km weit im Lee der Turbinen.**

Die jüngste Veröffentlichung mehrerer kostenloser öffentlicher Datensätze ermöglicht es nun, die Oberflächenerwärmung durch Windenergie relativ einfach zu bewerten. Das US Geological Survey unterhält die US-Windturbinendatenbank, die Geodaten und technische Daten zu etwa 60 000 in Betrieb befindlichen US-Windturbinen enthält. Daten von der NASA Landsat 8 Satellit ist auch kostenlos und öffentlich verfügbar. Obwohl hauptsächlich zur Überwachung der Vegetation verwendet, misst Landsat 8 auch Bodenoberflächentemperaturen - genauer gesagt, das Emissionsvermögen im IR (IR-Spektroskopie) bei einer räumlichen Auflösung von 8100 Quadratmetern.

### **Bildgebung der lokalen Wärme**

In den letzten sieben Jahren hat Landsat 8 306 Tages- und 32 Nachtbilder über Nordtexas aufgenommen. Nachdem ich die Daten der Bewölkung gefiltert hatte, da die Oberfläche für den Satelliten unsichtbar war, untersuchte ich Bilder, die im Winter 2019 aufgenommen wurden. Die beiden Tagesbilder vom 16. Januar 2019, die in den Feldern a und b der Abbildung gezeigt werden, sind typisch: In der Temperaturkarte dieses Tages (Tafel b) ist kein Erwärmungseffekt sichtbar. Ein nächtlicher Erwärmungseffekt ist jedoch in Tafel c ersichtlich. Diese Bilder wurden am 24. Januar um 22.34 Uhr aufgenommen - der frühestmögliche nächtliche Schnappschuss der Region seit dem 16. Januar. **Bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt und Nordwinden, die sich auf der Höhe der Turbinen mit 11 m / s bewegten, erstreckte sich die Erwärmung um 2 bis 4 ° C mehrere Kilometer leewärts mit dem Wind hinter den Turbinen und wurde mit den aufeinander folgenden Turbinenreihen räumlich ausgedehnter.** Das Abwärtsziehen von wärmerer Luft tritt

jedoch wahrscheinlich nicht jede Nacht leewärts der Turbinen auf. (Tatsächlich war im Nachtbild am 9. Januar 2019, eine Woche zuvor, kein Erwärmungseffekt erkennbar.)

Die genauen Bedingungen, die nötig sind, um den Erwärmungseffekt zu erzielen, sind unklar. Daher bin ich mir nicht sicher, wie routinemäßig oder weit verbreitet sie in Texas oder anderswo sind, insbesondere angesichts der begrenzten nächtlichen Verfügbarkeit der Landsat 8-Beobachtungen. Der Effekt hängt wahrscheinlich auch von oberflächennahen Turbulenzen und Windgeschwindigkeiten ab. **Andere Beobachtungsstudien mit gröberen (1 × 1 km) Auflösungssatellitendaten über einem anderen Windpark in Texas schätzten einen jährlichen Erwärmungseffekt bei Nacht auf 0,3 ° C. Eine Modellstudie schätzte, dass der Effekt im Durchschnitt näher an 0,6 ° C liegt. (D.h., es gibt vermutlich einen noch wesentlich stärkeren Erwärmungseffekt durch Windräder als in der Studie von Miller & Keith 2018 angegeben = 0,26 °C.) Obwohl der Zusammenhang zwischen Windkraft und wärmeren Oberflächentemperaturen überraschend sein mag, haben Avocado-, Zitrus- und Apfelbauern seit den 1940er Jahren flugzeugähnliche Propeller im Schlepptau betrieben, um Frostschäden an ihren Pflanzen zu minimieren.** Eine Validierungsstudie aus dem Jahr 1970 kam zu dem Schluss, dass eine „Windmaschine“ die Oberflächentemperaturen in den Frühlingnächten auf einer Fläche von 20 Morgen um etwa 2 ° C erwärmte. Andere klimatische Effekte, wie z. B. Änderungen der Verdunstung und des Wärmeflusses, können ebenfalls vor dem Wind auftreten, sind jedoch mit Satellitensensoren schwer zu messen.

Zusätzliche Ressourcen: EM Bates, „Temperaturinversion und Frostschutz mit der Windmaschine“, *Agric. Meteorol.* 9, 335 (1971/1972).

LM Miller, DW Keith, „Klimatische Auswirkungen der Windkraft“, *Joule* 2, 2618 (2018). LM Miller, DW Keith, „Beobachtungsbasierte Solar- und Windkraftkapazitätsfaktoren und Leistungsdichten“ *Env. Res. Lett.* 13, 104008 (2018).

A. Platis et al., „First vor Ort Hinweise auf Wachen im fernen Feld hinter den Windparks an Land.“ *Sci. Rep.* 8, 2163 (2018).

SB Roy, J. Traiteur, „Auswirkungen von Windparks auf die Oberflächenluft-Temperaturen“ *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 107, 17899 (2010).

L. Zhou et al., „Auswirkungen von Windparks auf die Landoberflächentemperatur“ *Nat. Klimawandel* 2, 539 (2012)

Physics Today AUGUST 2020 | PHYSIK HEUTE 59, 60

## **The warmth of wind power--AER senior scientist Lee Miller explains how wind turbines can change local climate**

**Publish Date:** 01 August 2020

**Article Source:** *Physics Today*

**Article Link:** [The warmth of wind power](#)

We will have a lot more wind power in the future — wind power is a scalable approach to reducing carbon emissions and future climate change. However, wind power can also cause changes in the local climate. In his [recent article in Physics Today](#), Dr. Lee Miller of AER used the high-resolution capabilities of NASA's Landsat 8 thermal sensor to show an example of wind turbines causing a 2-5°C surface warming effect for several kilometers downwind. **These warmer surface temperatures are in no way related to climate change, as wind turbines are not adding heat to the Earth system. Instead, wind turbines are redistributing atmospheric heat down to the surface, an effect that was studied as far back as the 1970s to reduce frost severity in orchards (Penn State Extension, 1971 science article). As the number of wind farms increase, the amount of land affected by this process will increase.**