



---

## Fachbereich WD 5

---

### Literatur zu den Auswirkungen von Windenergieanlagen

---

Windenergieanlagen spielen eine zentrale Rolle in der Energiewende. Gleichzeitig wird die Frage nach möglichen Einflüssen auf lokale und regionale Klimaprozesse immer wieder diskutiert. In dieser Kurzinformation wird auf bestehende (wissenschaftliche) Literatur verwiesen, die hierzu verschiedene Aspekte aufgreift.

#### 1. Lebenszyklusanalysen zur Treibhausgasbilanz

Mit den Treibhausgasemissionen von Windenergieanlagen, betrachtet über ihren gesamten Lebenszyklus, beschäftigten sich die Sphera Solutions GmbH und das Fraunhofer-Institut für Bauphysik in einer Studie im Auftrag des Umweltbundesamts. Der Lebenszyklus einer Windenergieanlage beinhaltet typischerweise den Bau, den Betrieb und den Rückbau sowie die damit einhergehende Infrastruktur (bei Verbrennungskraftwerken kommt außerdem die Bereitstellung und die Verbrennung der Energieträger dazu). Diese Studie zeichnet aus, dass sie prototypische Standorte in Deutschland betrachtet. Ebenfalls diskutiert wird der Einfluss der Annahmen, auf denen die Berechnung basiert. Die Treibhausgasemissionen von Windenergieanlagen liegen bei den getroffenen Annahmen laut Studie zwischen 5 und 16 g CO<sub>2</sub> Äq./kWh. Ein Großteil der Treibhausgasemissionen entsteht bei der Herstellung durch die Verwendung von Beton und Metall. Verglichen mit den Emissionen fossiler Stromerzeugung sind die Emissionen von Windenergieanlagen klein.

Umweltbundesamt (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen,  
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-bewertung-der-oekobilanzen-von->

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt die Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) im Projekt mit dem Titel „Life cycle inventory models on wind power production in the Swiss and European context“ (Laufzeit 2024-2026), in dem Treibhausgasemissionen für Bauteile und Infrastrukturelemente wie Rotorblätter, Türme, Fundamente, Umspannwerke und Kabel erfasst werden. Hier kommt man zu dem Ergebnis, dass Windstrom trotz unterschiedlicher Anlagen- und Standortparameter weiterhin sehr geringe Treibhausgasemissionen aufweist (ca. 10–23 g CO<sub>2</sub> Äq./kWh).

---

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (2025): Von der Turbine ins Netz: Umfassende Sachbilanz der Windstromerzeugung 2025, Pressemitteilung, <https://www.zhaw.ch/de/lsfm/institute-zentren/iunr/aktuelles/news/detailansicht-news/event-news/von-der-turbine-ins-netz-umfassende-sachbilanz-der-windstromerzeugung-2025>.

Zu vergleichbaren Ergebnissen kommt auch eine Studie aus dem Jahr 2016:

Bonou et al. (2016): Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy – from theory to application, Applied Energy, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.058>.

## 2. Treibhausgasbilanz im Vergleich mit anderen Energieträgern

Eine Übersicht über die Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung mit verschiedenen Energieträgern, betrachtet über den gesamten Lebenszyklus der Kraftwerke, findet sich in Übersichtsarbeiten des United Nations Economic Commission for Europe und des Intergovernmental Panel on Climate Change.

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) (2022): Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources, Abbildung 1, <https://www.un-library.org/content/books/9789210014854>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014): Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Annex III: Technology-specific cost and performance parameters, Table A.III.2, [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_annex-iii.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf).

## 3. Mikroklimatische Effekte, kumulative Effekte und offene Forschungsfragen

Die wissenschaftliche Studienlage spricht derzeit dafür, dass insbesondere größere Windparks das lokale Mikroklima beeinflussen können, also z. B. Temperatur, Feuchte, Windgeschwindigkeit und Boden- bzw. Vegetationsparameter. Die Studien belegen und betonen vor allem räumlich begrenzte, standortabhängige und einzelfallabhängige Effekte. Sie betrachten in der Regel Windparks, weil hier die Effekte eher in nachweisbaren Größen auftreten als bei Einzelanlagen. Im Folgenden werden verschiedene Studien und Meta-Studien vorgestellt.

In einer Überblicksstudie aus dem Jahr 2024 werden 152 Studien ausgewertet, um den Forschungsstand, Forschungslücken und Strategien zur Minderung der Umweltauswirkungen von Onshore-Windenergie zu diskutieren. Die untersuchten Auswirkungen betreffen die abiotische und biotische Umwelt, insbesondere Vögel und Fledermäuse, sowie Lärm- und visuelle Beeinträchtigungen. Viele Auswirkungen sind laut Überblicksstudie in hohem Maße fallspezifisch. Für viele Auswirkungskategorien bestehen weiterhin Wissenslücken. Sie müssen laut Übersichtsstudie im Kontext anderer anthropogener Einflüsse und der Vorteile der Windenergie betrachtet werden.

Sander et al. (2024): Global Review on Environmental Impacts of Onshore Wind Energy in the Field of Tension between Human Societies and Natural Systems, Energies, <https://doi.org/10.3390/en17133098>.

Ein Übersichtsartikel aus dem Jahr 2025 geht auf die Umweltauswirkungen der Onshore-Windenergie ein, insbesondere Auswirkungen auf die Vegetation, den Boden und die Hydrologie. Die Art und das Ausmaß der Auswirkungen variierten je nach Ökosystem und geografischem Kontext. Viele der betrachteten Studien dokumentieren Auswirkungen, die zu einer Verschlechterung

rung der lokalen Ökosysteme führen, allerdings wird nur bei einer Minderzahl die Notwendigkeit von Ausgleichs- oder Renaturierungsmaßnahmen ausgemacht. Unklar sind die langfristigen, kumulativen Effekte auf Hydrologie und Mikroklima. Während der direkte Landverbrauch gering ist, lassen sich die lokalen mikroökologischen Verschiebungen derzeit kaum vorhersagen.

Seifert et al. (2025): The emerging need for ecosystem restoration to mitigate the impacts of onshore wind energy, *Sustainable Environment*, <https://doi.org/10.1080/27658511.2025.2567100>.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch eine Studie, die den Einfluss von Windenergieanlagen auf die Vegetation anhand von Windparks in China untersucht. Hier wird auch betont, dass der Einfluss auf die Vegetation stark von den konkreten Gegebenheiten vor Ort abhängt.

Fei et al. (2025): The impact of the wind farm on the vegetation and the microclimate via remote sensing: a case study in Hebei Province, China, *Energy, Ecology and Environment*, <https://doi.org/10.1007/s40974-025-00386-4>.

Das Bureau of Ocean Energy Management (BOEM) ist eine dem US-Innenministerium unterstellte Behörde, in dessen Auftrag 2022 die Studie „Supporting National Environmental Policy Act Documentation for Atlantic Offshore Wind Energy Development Related to Microclimates“ erstellt wurde. Ziel der Studie, die sich auf Windparks auf See bezieht, ist es zu erläutern, wie sich Mikroklimata innerhalb von Offshore-Windparks bilden, und aufzuzeigen, dass Mikroklimaefekte zwar für Planungszwecke wichtig sind, ihre Auswirkungen an Land und auf das Gesamtklima jedoch vernachlässigbar sind.

Bureau of Ocean Energy Management (2022): Supporting National Environmental Policy Act Documentation for Atlantic Offshore Wind Energy Development Related to Microclimates, <https://www.boem.gov/sites/default/files/documents/renewable-energy/state-activities/Microclimate%20white%20paper.pdf>.

Eine vom Helmholtz-Zentrum Hereon verfasste Studie kommt anhand numerischer Simulationen zu dem Ergebnis, dass die geplanten Offshore-Windparks in der Nordsee Einfluss auf die Windverhältnisse (Windgeschwindigkeiten und deren vertikale Verteilung, vertikale Durchmischung, usw.) im Bereich der Windparks haben. Diese Änderungen können lokal z. B. die Temperaturen und oder die Luftfeuchtigkeit beeinflussen. Die Forschenden empfehlen deshalb, diese Effekte in künftigen Klima- und Ökosystemmodellen der Nordsee zu berücksichtigen, weil hier der Flächenanteil an geplanten Windparks relativ hoch ist:

Akhtar et al. (2022): Impacts of accelerating deployment of offshore windfarms on near-surface climate, *Nature Scientific Reports*, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22868-9>.

Zu ähnlichen Ergebnissen kam eine Studie bereits im Jahr 2018, die neben numerischen Simulationen auch Messwerte berücksichtigt:

Siedersleben et al. (2018): Micrometeorological impacts of offshore wind farms as seen in observations and simulations, *Environmental Research Letters*, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaea0b>.

Eine Übersichtsarbeit aus dem Jahr 2020 vergleicht Messwerte, die an verschiedenen Onshore- und Offshore-Windparks sowie einzelnen Windenergieanlagen gemessen wurden. Außerdem wird diskutiert, wie sich Windenergieanlagen gegenseitig beeinflussen. Der Schwerpunkt liegt hier auf den Messmethoden.

Sun et al. (2020): A review of full-scale wind-field measurements of the wind-turbine wake effect and a measurement of the wake-interaction effect, Renewable and Sustainable Energy Reviews, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110042>.

#### 4. Ausgewählte Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages zur Windenergie aus den Jahren 2020–2026

Mit den **Treibhausgasemissionen** von Windenergieanlagen haben sich die Wissenschaftlichen Dienste u. a. in folgender Arbeit beschäftigt:

- Wissenschaftliche Dienste (2025): Lebenszyklusanalyse der Stromerzeugung mit Windenergieanlagen – Klimawirkung und energetische Amortisation, WD 5 – 3000 – 063/25, <https://www.bundestag.de/resource/blob/1134238/WD-5-063-25.pdf>.

Mit den **mikroklimatischen Effekten** von Windenergieanlagen haben sich die Wissenschaftlichen Dienste u. a. in folgenden Arbeiten beschäftigt:

Wissenschaftliche Dienste (2020): Wissenschaftliche Literatur zu mikroklimatischen Auswirkungen von Windkraftträdern, WD 8 – 3000 – 076/20, <https://www.bundestag.de/resource/blob/819216/9800521ffbace171ced09737243e38dd/wd-8-076-20-pdf-data.pdf>.

Wissenschaftliche Dienste (2020): Lokale mikroklimatische Effekte durch Windkraftträder, WD 8 – 3000 – 083/20, <https://www.bundestag.de/resource/blob/819218/a668b4852a5af0f8bd065ac999ee0d05/WD-8-083-20-pdf-data.pdf>.

Wissenschaftliche Dienste (2025): Windenergieanlagen – Auswirkungen auf das Grundwasser, WD 8 – 3000 – 060/26, <https://www.bundestag.de/resource/blob/1128428/WD-8-060-25.pdf>.

Mit den Fragen zur **Lärmauswirkung**, zum **Kollisionsrisiko**, zu **Verdrängungseffekten** und zu **Mikroplastik** haben sich die Wissenschaftlichen Dienste u. a. in folgenden Arbeiten beschäftigt:

Wissenschaftliche Dienste (2025): Wirkungen von Windkraftanlagen auf Mensch und Umwelt – Stand der Wissenschaft zur Lärmauswirkung, zum Kollisionsrisiko, zu Verdrängungseffekten und zu Mikroplastik, WD 8 – 055/25, <https://www.bundestag.de/resource/blob/1135670/WD-8-055-25.pdf>.

Mikroplastikemissionen aus Windkraftanlagen – Definition sowie Vorkommen von Mikroplastik und Relevanz von Windkraftanlagen als Emittenten, WD 8 – 3000 – 065/25, <https://www.bundestag.de/resource/blob/1126652/WD-8-065-25.pdf>.

Mit **Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen** für Windenergieanlagen haben sich die Wissenschaftlichen Dienste u. a. in folgenden Arbeiten beschäftigt:

Wissenschaftliche Dienste (2025): Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen für unvermeidbare Eingriffe in Natur und Landschaft beim Ausbau erneuerbarer Energien, WD 5 – 3000 – 044/25, <https://www.bundestag.de/resource/blob/1149790/WD-5-044-25.pdf>.

Mit der **Flächeninanspruchnahme** von Windenergieanlagen haben sich die Wissenschaftlichen Dienste u. a. in folgenden Arbeiten beschäftigt:

Wissenschaftliche Dienste (2025): Flächeninanspruchnahme durch Erneuerbare Energien, WD 5 – 3000 – 039/25, <https://www.bundestag.de/resource/blob/1134240/WD-5-071-25.pdf>.

Mit dem **Ressourcenbedarf** und dem **Recycling** von Windenergieanlagen haben sich die Wissenschaftlichen Dienste u. a. in folgenden Arbeiten beschäftigt:

Wissenschaftliche Dienste (2023): Ressourcenbedarf für den Ausbau der Windenergie an Land, WD 5 – 3000 – 070/23, <https://www.bundestag.de/resource/blob/968860/WD-5-070-23-pdf.pdf>.

Wissenschaftliche Dienste (2026): Recycling von Windenergieanlagen – Forschungsaktivitäten, WD 8 – 3000 – 024/26, <https://www.bundestag.de/resource/blob/1182918/WD-8-024-26.pdf>.

\* \* \*