



Fachbereich WD 5

Lebenszyklusanalyse der Stromerzeugung mit Windenergieanlagen Klimawirkung und energetische Amortisation

Lebenszyklusanalyse der Stromerzeugung mit Windenergieanlagen

Klimawirkung und energetische Amortisation

Aktenzeichen: WD 5 - 3000 - 063/25

Abschluss der Arbeit: 26.09.2025

Fachbereich: WD 5: Wirtschaft, Energie und Klima

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Überblick und Zusammenfassung	4
2.	Lebenszyklusanalyse von Windenergieanlagen	4
2.1.	Untersuchte Anlagen und deren Lebenszyklus	5
2.2.	Ergebnisse: Treibhausgasemissionen	7
2.3.	Sensitivität der Treibhausgasemissionen	9
2.4.	Ergebnisse: Energy Payback Time	11
3.	Vergleich mit anderen Energieträgern und weiteren Studien	13

1. Überblick und Zusammenfassung

Dieser Sachstand befasst sich mit der Klimabilanz von Windenergieanlagen über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg. Basierend auf spezifischen Annahmen, z. B. bzgl. der Systemgrenzen des Lebenszyklus oder der Parameter der zukünftigen Stromerzeugung, werden die Treibhausgasemissionen dargestellt, die in den einzelnen Stadien des Lebenszyklus der Anlage entstehen und auf die erzeugte elektrische Energie bezogen. Zusätzlich wird diskutiert, nach welcher Zeit sich die in die Anlage investierte Energie amortisiert. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse findet sich am Ende dieses Sachstands ein Vergleich der Klimabilanz von Windenergieanlagen mit der anderer Arten der Stromerzeugung (andere erneuerbare Energien, fossile Brennstoffe, Kernkraft).

Die größten Beiträge zu den Treibhausgasemissionen bei Windenergieanlagen entstehen während der Herstellung, insbesondere durch die Verwendung von Beton und Metallen. Durch die Wieder- und Weiterverwertung dieser Materialien am Ende der Lebensdauer der Anlage können die Gesamtemissionen reduziert werden. Sensitivitäts- und Szenarioanalysen verdeutlichen den Einfluss der getroffenen Annahmen: Die Höhe der Emissionen pro Einheit erzeugter elektrischer Energie hängt insbesondere von der Lebensdauer, dem Recycling und der Anzahl der Vollaststunden ab. Im Vergleich zu fossilen Energieträgern sind die Emissionen von Windenergieanlagen um Größenordnungen kleiner. Die energetische Amortisationszeit beträgt in der Regel wenige Monate.

2. Lebenszyklusanalyse von Windenergieanlagen

Die Sphera Solutions GmbH und das Fraunhofer-Institut für Bauphysik erstellten im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA) Ökobilanzen für Windenergie- und Photovoltaikanlagen (im Folgenden UBA-Bericht genannt):

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>.

Für den UBA-Bericht wurden u. a. die Umweltauswirkungen moderner Windenergieanlagen (WEA) über deren gesamten Lebenszyklus (siehe Abschnitt 2.1) bilanziert. „[F]ünf Industriepartner [...] stellten Primärdaten zur Verfügung, unterstützten mit der Bereitstellung geeigneter Literaturquellen oder gaben Ratschläge auf Grundlage ihres Fachwissens.“¹

¹ Umweltbundesamt (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen, Seite 270, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-bewertung-der-oekobilanzen-von>; die fünf Industriepartner werden dort namentlich genannt.

Die erstellten Ökobilanzen entsprechen den Normen ISO 14040² und ISO 14044³ und wurden einer „Kritischen Prüfung⁴ durch ein Gremium unabhängiger Experten unterzogen.“⁵ In den folgenden Abschnitten werden die zentralen Punkte des UBA-Berichts in Bezug auf WEA und ihren Treibhausgasemissionen zusammenfassend dargestellt.

2.1. Untersuchte Anlagen und deren Lebenszyklus

Betrachtet wurden WEA in Windparks an drei prototypischen Standorten (Offshore, Onshore-Starkwind, Onshore-Schwachwind). Die Parameter der einzelnen Standorte sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Kennzahlen der drei prototypischen Standorte.⁶

	Offshore	Onshore (Starkwind)	Onshore (Schwachwind)
Anzahl der WEA im Windpark	80	20	5
Leistung pro WEA	8,0 MW	3,6 MW	3,8 MW
Nabenhöhe	99 m	125 m	136 m
Durchschnittliche Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe	10,0 m/s	7,8 m/s	6,5 m/s
Energieertrag pro Jahr	30.000 – 35.000 MWh	11.400 – 14.600 MWh	9.800 – 13.200 MWh
Volllaststunden pro Jahr	4.000 – 4.500 h	3.400 – 3.800 h	2.800 – 3.200 h

Die Autoren des UBA-Berichts ordnen diese Parameter – insbesondere die Volllaststunden – wie folgt ein:

2 International Organization for Standardization (ISO) (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, ISO 14040:2006, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>.

3 International Organization for Standardization (ISO) (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, ISO 14044:2006, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en>.

4 Im Sinne der genannten Normen, siehe ISO 14040 Kapitel 7 und ISO 14044 Kapitel 6.

5 Umweltbundesamt (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen, Seite 31, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-bewertung-der-oekobilanzen-von>.

6 Daten entnommen aus: Umweltbundesamt (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen, Tabellen 73, 74, 75 und 88, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-bewertung-der-oekobilanzen-von>.

„[Es] ergeben sich für Offshore-WEA durchschnittliche Vollaststunden von ca. 3.200 Stunden pro Jahr und für Onshore-WEA durchschnittliche Vollaststunden von ca. 1.800 Stunden pro Jahr. Diese weichen von den in [Tabelle 1] genannten Vollaststunden ab. Grund hierfür ist, dass [...] bei den Analysen ausschließlich technisch mögliche, optimale Bedingungen für die Aufstellung in Deutschland untersucht werden. Im Fall der WEA werden für den jeweiligen betrachteten Standort optimale Windbedingungen und Vollaststunden angenommen. Aufgrund der zunehmenden Verknappung von windreichen Standorten werden in Kapitel 7.5 Szenarioanalysen mit reduzierten Vollaststunden durchgeführt.“⁷

Die genannten Szenarioanalysen und ihre Ergebnisse werden in Abschnitt 2.3 des vorliegenden Sachstands dargestellt.

Die Ökobilanz der WEA „beinhaltet den kompletten Lebensweg der Produktsysteme und umfasst den Rohstoffabbau, die Aufbereitung und Herstellung von Vorprodukten, die Produktion, sowie die Nutzung und das Lebensende der Produktsysteme“⁸, also konkret:⁹

- Herstellung der WEA (inkl. Herstellung der Materialien, deren Transport zum Werk),
- Herstellung der Kabel (inkl. Herstellung der Materialien, deren Transport zum Werk),
- Herstellung der Umspannwerke (inkl. Herstellung der Materialien, deren Transport zum Werk),
- Logistik (also Transport der WEA und der zum Aufbau der WEA und der Infrastruktur notwendigen Maschinen und Materialien zum Aufstellort),
- Installation (also der Energieeinsatz zum Aufbau der WEA und der notwendigen Infrastruktur),
- Betrieb und Wartung (Verbrauchsmaterialien und ihr Transport und ihre Entsorgung),
- Rückbau (inkl. Transport und Verwertung, Beseitigung oder Deponierung der rückgebauten Materialien).

Den Treibhausgasemissionen (in Gramm CO₂-Äquivalenzen¹⁰, g CO₂ Äq.) gegenübergestellt wurde der Stromertrag über die Lebensdauer der WEA, der ins Stromnetz eingespeist wird (in

7 Ebd., Seite 281; im Original mit weiteren Quellenangaben.

8 Ebd., Seite 122 f.

9 Vgl. im Folgenden ebd.; detaillierte Ausführungen zu den einzelnen Punkten finden sich im Bericht des Umweltbundesamts in den Kapiteln 7.1.3.2 bis 7.1.3.4.

10 Diese Treibhausgasemissionen berücksichtigen verschiedene Emissionen mit Klimawirkung. Die Beiträge anderer Gase als CO₂ werden entsprechend ihrer Klimawirkung relativ zu CO₂ gewichtet.

Kilowattstunden, kWh):¹¹ „Die funktionelle Einheit der WEA ist 1 kWh elektrische Energie, eingespeist in das deutsche Stromnetz.“¹²

2.2. Ergebnisse: Treibhausgasemissionen

Abbildung 1 zeigt die Treibhausgasemissionen, die laut UBA-Bericht bei der Stromerzeugung mit WEA entstehen, für WEA an den drei gewählten Standorten Offshore, Onshore-Starkwind, Onshore-Schwachwind (Tabelle 1). Dargestellt sind die Treibhausgasemissionen pro eingespeister elektrischer Energie in g CO₂ Äq/kWh. Die kleinste Klimawirkung hat die Stromerzeugung mit WEA demnach bei Offshore-Anlagen, die größte bei Onshore-Anlagen an Schwachwind-Standorten.

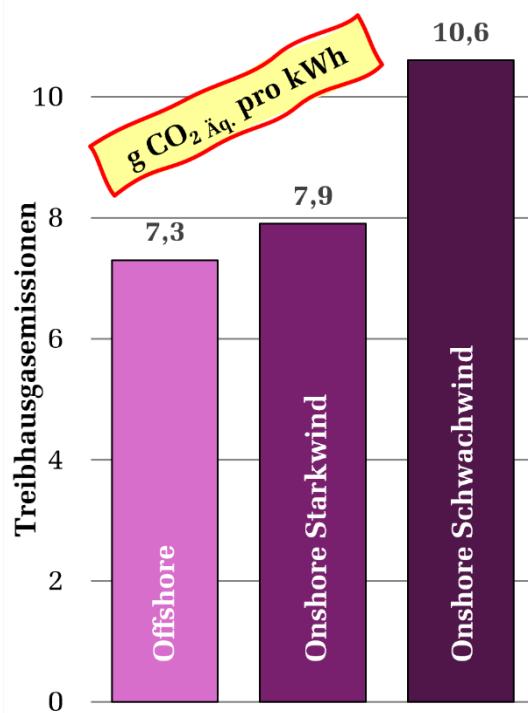


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen, die bei der Stromerzeugung mit WEA an den drei gewählten Standorten Offshore, Onshore-Starkwind, Onshore-Schwachwind (siehe Tabelle 1) pro kWh entstehen.¹³

11 Umweltbundesamt (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen, Seite 121, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-bewertung-der-oekobilanzen-von-windenergie-und-photovoltaikanlagen>.

12 Ebd.

13 Eigene Darstellung. Daten entnommen aus: Ebd., Tabelle 2.

Der UBA-Bericht schlüsselt die Beiträge der einzelnen Abschnitte des Lebenszyklus einer WEA weiter auf. Abbildung 2 zeigt diese Beiträge für den Standort Onshore (Starkwind).¹⁴ Der dominierende Beitrag zu den Treibhausgasemissionen geht auf die Herstellung der WEA zurück. „Verursacht wird der hohe Anteil an den Gesamtergebnissen hauptsächlich durch die Menge und die Herstellung der eingesetzten Materialien, wie Beton und Metalle (Stahl, Gusseisen, Edelstahl, Aluminium und Kupfer).“¹⁵

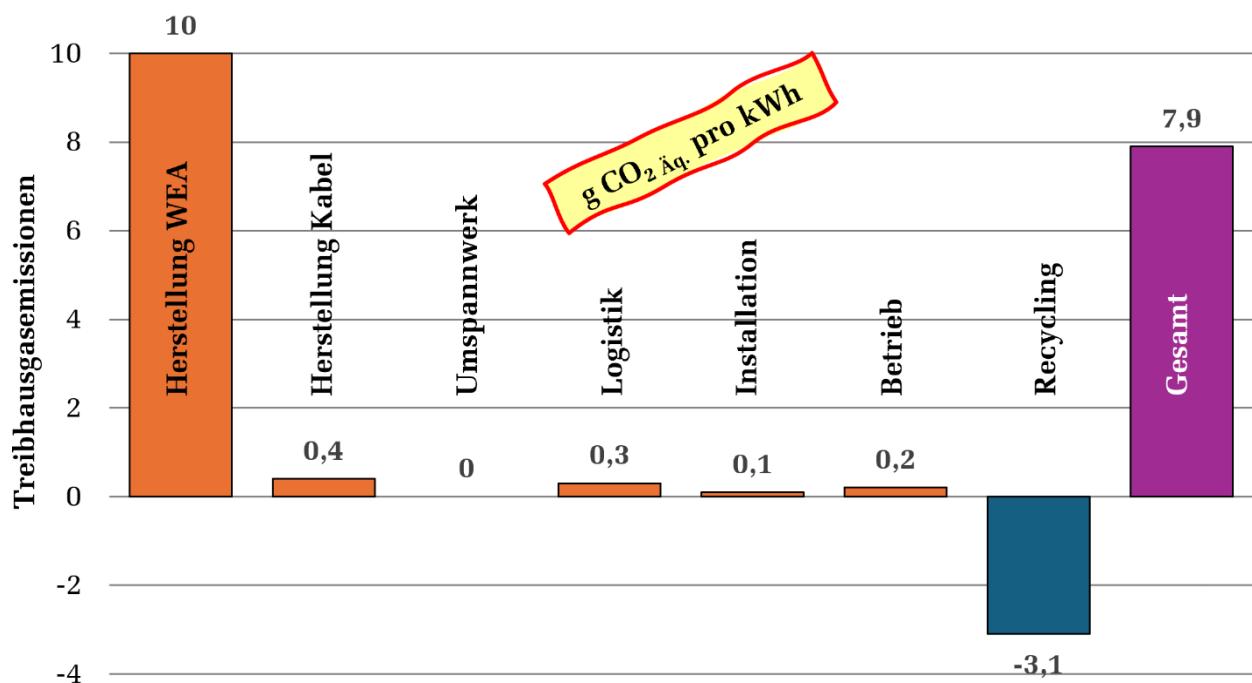


Abbildung 2: Beiträge der einzelnen Schritte im Lebenszyklus zu den Gesamt-Treibhausgasemissionen pro kWh (lila Balken ganz rechts) am Standort Onshore (Starkwind).¹⁶

Das Recycling dieser Materialien am Lebensende der WEA hat ebenfalls große Auswirkungen auf die bilanzierten Treibhausgasemissionen. Insbesondere für das Recycling der Metalle ergeben sich Gutschriften, die die Treibhausgasemissionen merklich reduzieren.^{17,18}

14 An den anderen beiden Standorten ist die Aufteilung vergleichbar, siehe: Ebd., Tabellen 92 und 94.

15 Ebd., Seite 34.

16 Eigene Darstellung. Daten entnommen aus: Ebd., Tabelle 93; der Beitrag des Umspannwerks ist größer null, wird aber auf null gerundet.

17 Ebd., Seite 34 f. und Seite 296 f.

18 Für allgemeine Erläuterungen zu diesem sog. „Avoided Burden“-Ansatz siehe: Ebd., Seite 124 f. Für Erläuterungen zur Anwendung dieses Ansatzes auf WEA siehe: Ebd., Kapitel 7.1.3.4.

Die Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung der WEA entstehen, sind in Abbildung 3 einzelnen Bauteilen bzw. Herstellungsprozessen zugeordnet. Dargestellt sind Ergebnisse für den Standort Onshore (Starkwind). Die größten Beiträge liefern hier der Turm, gefolgt von der Gondel und dem Fundament. Für Offshore-Anlagen unterscheidet sich die Aufteilung der Treibhausgasemissionen. Dort liefert den größten Beitrag das Fundament, gefolgt von der Gondel und dem Turm.¹⁹

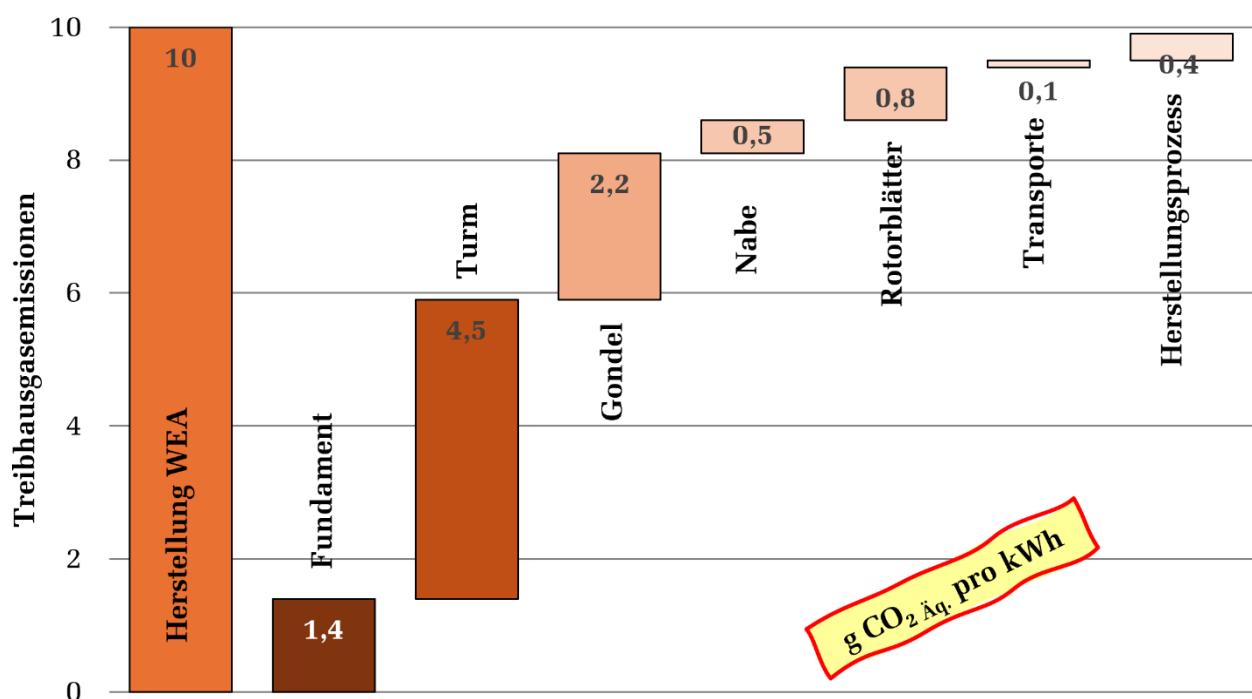


Abbildung 3: Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung der WEA anfallen (ganz links in Abbildung 2), können den einzelnen Bauteilen bzw. Herstellungsprozessen zugeordnet werden; Standort Onshore (Starkwind).²⁰

2.3. Sensitivität der Treibhausgasemissionen

Die Autoren des UBA-Berichts führten eine Sensitivitäts²¹- und eine Szenarioanalyse²² durch, mit der sie die Abhängigkeit der Ergebnisse von den getroffenen Annahmen untersuchten. In der Sensitivitätsanalyse wurden insbesondere die Längen der notwendigen Verkabelungen und die

19 Ebd, Seite 290.

20 Eigene Darstellung. Daten entnommen aus: Ebd., Seite 296; dass sich die einzelnen Anteile zu 9,9, nicht zu 10 g CO₂ Äq./kWh addieren, liegt am Runden der einzelnen Beiträge.

21 Ebd., Kapitel 7.4.

22 Ebd., Kapitel 7.5.

Lebensdauer der WEA variiert.²³ Am sensitivsten reagierten die Ergebnisse dabei auf Änderungen in der Lebensdauer der WEA: Je größer die Lebensdauer, umso geringer die Treibhausgasemissionen pro elektrischer Energie.²⁴

In der Szenarioanalyse wurden für jeden Standort drei Szenarien berechnet, die vom Basisszenario (siehe Tabelle 1) in jeweils einem Punkt abweichen. Für den Standort Onshore (Starkwind) sind das die folgenden Punkte:

- Recyclingansatz: Keine recycelten Materialien bei der Herstellung, kein Recycling der Materialien nach Ende der Lebensdauer.²⁵
- Größeres Fundament: Annahme eines Fundaments unter Auftrieb (durch Grundwasser), so dass ein größeres Fundament als im Basisszenario notwendig ist.²⁶
- Vollaststunden: Die Vollaststunden werden im Vergleich zum Basisszenario um 20 Prozent reduziert.

Wie sich diese geänderten Annahmen auf die Treibhausgasemissionen pro kWh auswirken, ist in Abbildung 4 dargestellt. Abbildung 4 macht deutlich, dass sich insbesondere der Recyclingansatz und die Anzahl der Vollaststunden auf die Treibhausgasemissionen auswirken. Die Autoren des UBA-Berichts ordnen diese Ergebnisse wie folgt ein:

„Auf Basis der durchgeführten Sensitivitäts- und Szenarioanalysen [...] wurden die Ergebnisbandbreiten für die betrachteten Umweltwirkungskategorien²⁷ berechnet. Ausgehend vom Ergebnis des Basisszenarios variieren die Ergebnisse je nach Standort und betrachteter Wirkungskategorie zwischen -51 % bis +61 %. Die großen Ergebnisbandbreiten zeigen, dass die Unsicherheiten in den Ergebnissen bedeutsam sind. Sie erscheinen aber als ausreichend robust im Hinblick auf das Ziel und den Untersuchungsrahmen der Studie.“²⁸

23 Ebd., Tabellen 103, 104 und 105.

24 Ebd., Abbildungen 92, 93 und 94.

25 Ebd., Seite 316 f.

26 Ebd., Seite 320.

27 Neben Treibhausgasemissionen betrachtet der UBA-Bericht auch andere Umweltauswirkungen. Die hier genannte Ergebnisbandbreite tritt aber bei den – in der vorliegenden Arbeit diskutierten – Treibhausgasemissionen auf.

28 Umweltbundesamt (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen, Seite 35, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-bewertung-der-oekobilanzen-von>.

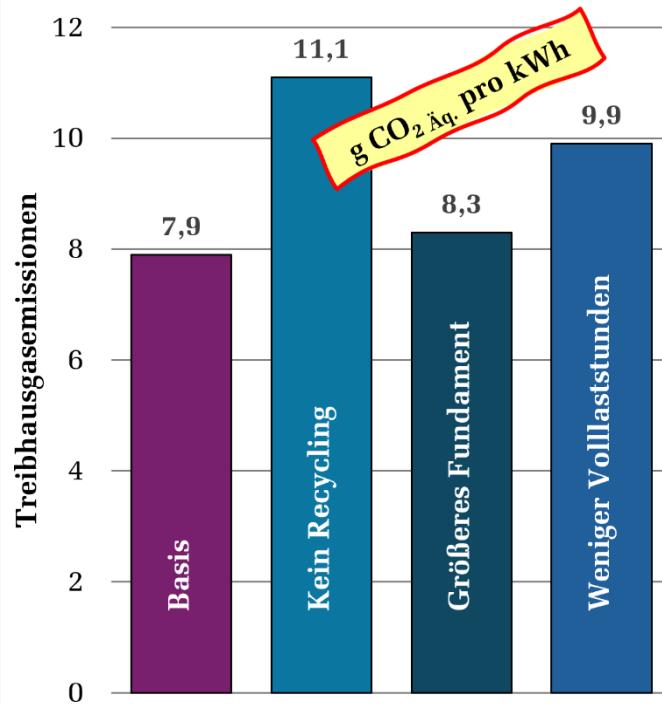


Abbildung 4: Treibhausgasemissionen pro erzeugter Einheit elektrischer Energie am Standort Onshore (Starkwind); Vergleich des bisher dargestellten (Basis-) Szenarios (Parameter siehe Tabelle 1) mit den Szenarien kein Recycling, größeres Fundament und kleinere Anzahl an Vollaststunden.²⁹

2.4. Ergebnisse: Energy Payback Time

Die Autoren des UBA-Berichts untersuchten auch, wann sich die im gesamten Lebenszyklus der WEA investierte Energie amortisiert:

„Die energetische Amortisationszeit (Energy Payback Time, EPBT) beschreibt den Zeitpunkt, an dem sich die betrachteten Produktsysteme energetisch amortisieren. [...] Die Größe bezieht sich auf den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf.³⁰ [...]“

Bei der EPBT ist zu beachten, dass diese von den anlagen- und standortspezifischen Einflussfaktoren abhängig ist. Sie ist beispielsweise vom Primärenergiebedarf des für die Berechnung

29 Eigene Darstellung. Daten entnommen aus: Ebd., Abbildungen 98, 99 und 100.

30 Gemeint ist hier die Energiemenge (nicht erneuerbarer) natürlich vorkommender Energieträger (also der Heizwert von Kohle, Gas, Öl, usw.), die in das Stromerzeugungssystem gegeben werden muss, um eine Kilowattstunde Strom zu erzeugen. Weitere Ausführungen siehe z. B.: Glossar des Energieversorgers Vattenfall: <https://www.vattenfall.de/glossar/jahres-primaerenegiebedarf>.

hinterlegten Referenzstrommixes abhängig, aber auch von den Faktoren, die den jährlichen Stromertrag einer Anlage beeinflussen. Daher variiert die EPBT von Standort zu Standort.“³¹

Die energetischen Amortisationszeiten für die WEA an den drei untersuchten Standorten betragen im Basisszenario zwischen 2,5 und 4,5 Monaten, siehe Abbildung 5. Zugrunde gelegt wurde hier der deutsche Strommix mit einem Primärenergiebedarf von 7,627 Megajoule pro Kilowattstunde.³² Legt man den dänischen Strommix zugrunde, dessen Primärenergiebedarf etwa halb so groß ist, betragen die energetischen Amortisationszeiten zwischen 5,9 und 10,7 Monaten.³³



Abbildung 5: Energetische Amortisationszeiten für die drei untersuchten Standorte im Basisszenario mit dem deutschen Strommix.³⁴

Die Autoren des UBA-Berichts führen hierzu aus:

31 Umweltbundesamt (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen, Seite 307, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-bewertung-der-oekobilanzen-von-windenergie-und-photovoltaikanlagen>.

32 Ebd.

33 Ebd.

34 Eigene Darstellung. Daten entnommen aus: Ebd., Tabelle 97.

„Laut Herstellerangaben liegt die durchschnittliche Laufzeit der Anlagen bei 20 - 25 Jahren. Selbst bei geringeren Anlagenlaufzeiten ist es äußerst unwahrscheinlich, dass sich WEA aus energetischer Sicht nicht amortisieren.“³⁵

3. Vergleich mit anderen Energieträgern und weiteren Studien

Die im UBA-Bericht ermittelten Treibhausgasemissionen sind vergleichbar mit denen, die in Überblicksarbeiten anderer³⁶ Institutionen aufgeführt werden, z. B.:

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-ilibrary.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.

Die Ergebnisse des UNECE-Berichts sind in Abbildung 6 dargestellt. Abbildung 6 zeigt eine minimale und eine maximale Abschätzung für die jeweiligen Energieträger. Die Spannbreite der möglichen Treibhausgasemissionen einzelner Energieträger (also die Unterschiede zwischen Minimum und Maximum in Abbildung 6) ergeben sich z. B. aus unterschiedlichen Kraftwerkstypen, regionalen Unterschieden oder aus der erforderlichen Infrastruktur. Auch hier werden die gesamten Lebenszyklen der Kraftwerke betrachtet.³⁷ Abbildung 6 zeigt einerseits, dass die im UNECE-Bericht aufgeführten Treibhausgasemissionen pro mit WEA erzeugter kWh mit denen des UBA-Berichts vergleichbar sind. Abbildung 6 macht andererseits deutlich, dass die Emissionen fossiler Energieträger um Größenordnungen größer sind als die erneuerbarer Energien.³⁸

35 Ebd., Seite 307; im Original mit weiteren Quellenangaben.

36 Es sei darauf hingewiesen, dass sich die Systemgrenzen, also welche Aspekte in die Betrachtung einbezogen werden und welche nicht, zwischen einzelnen Studien unterscheiden.

37 United Nations Economic Commission for Europe (UNECE): Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources, <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210014854>; dort wird in Tabelle 1 aufgeführt, welche Aspekte bei der Analyse der Treibhausgasemissionen berücksichtigt und welche unberücksichtigt bleiben.

38 Die große Spannbreite bei der Photovoltaik zwischen minimal 8 und maximal 83 g CO₂ Äq./kWh erklärt sich über die unterschiedlichen eingesetzten Techniken. Werte über 35 g CO₂ Äq./kWh kommen laut UNECE-Bericht ausschließlich bei polykristallinen Silizium-Solarpanelen vor (Seite 40), die bis 2015 den größten Marktanteil hatten (Seite 31). Die zeitliche Entwicklung der Marktanteile der verschiedenen Photovoltaik-Technologien zwischen 2000 und 2019 ist in Abbildung 18 des UNECE-Berichts aufbereitet. Hinzukommt, dass hier ein Großteil der entstehenden Treibhausgasemissionen mit der notwendigen Infrastruktur zusammenhängt (bei Photovoltaik bis zu 99 Prozent, Seite 7). Die konkreten Gegebenheiten vor Ort (z. B. große Anlagen auf der Freifläche oder kleine Anlagen auf dem Hausdach, Anzahl der Sonnenstunden pro Jahr) unterscheiden sich sehr stark. Dementsprechend können sich auch die Treibhausgasemissionen pro erzeugter Einheit elektrischer Energie sehr stark unterscheiden.

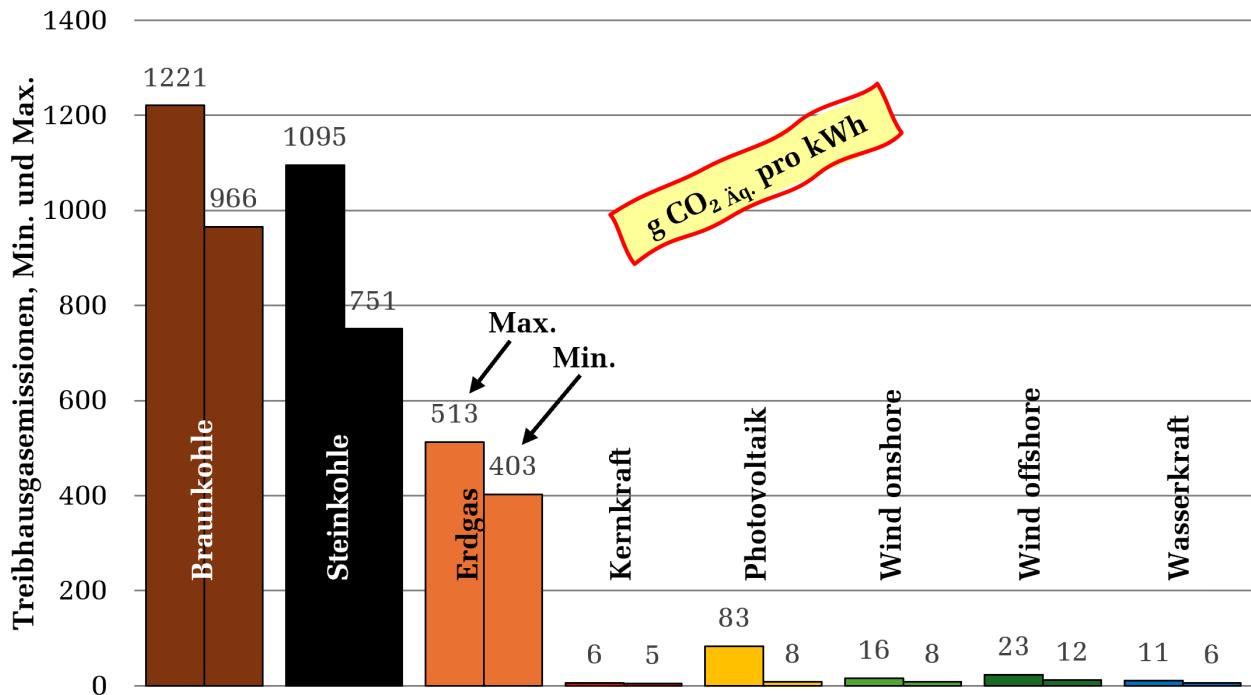


Abbildung 6: Schätzung der Treibhausgasemissionen, die bei der Stromerzeugung mit verschiedenen Energieträgern entstehen. Dargestellt sind für jeden Energieträger Schätzungen für einen Maximal- und einen Minimalwert.³⁹

39 Eigene Darstellung. Daten entnommen aus: Ebd., Abbildung 1 bzw. für Braunkohle, Seite 21; nicht dargestellt werden Konfigurationen mit CCS (Entwicklungsstand, siehe Quelle in Fn. Fehler! Textmarke nicht definiert.) und die Wasserkraftvariante 600 MW (Ausreißer, siehe Begründung im UNECE-Bericht Seite 49); im Bereich Solarenergie werden nur Werte für Photovoltaik dargestellt, nicht aber für Solarthermische Kraftwerke (Concentrated Solar Power).

Im UNECE-Bericht werden außerdem Kraftwerksvarianten mit Carbon Capture and Storage (CCS) untersucht, also mit CO₂-Abscheideanlagen. Laut Bericht fallen die Treibhausgasemissionen bei Berücksichtigung von CCS wesentlich geringer aus (Max. 221 g CO₂ Äq./kWh, Min. 92 g CO₂ Äq./kWh) als ohne CCS.³⁹ Zum derzeitigen Entwicklungsstand von CCS-Technologien siehe: Wissenschaftliche Dienste (2024): Methoden des Kohlenstoffmanagements – Kohlenstoffabscheidung, -wiederverwendung und -speicherung, WD 5 – 3000 – 111/24, <https://www.bundestag.de/resource/blob/1025894/WD-5-111-24-pdf.pdf.pdf>.