

Wie naturverträglich ist die Energiewende? – die Webanwendung EE-Monitor gibt Auskunft

Nora Mittelstädt, David Manske, Daniela Thrän

Zusammenfassung

Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wie Windenergie- oder Photovoltaik-Freiflächenanlagen sind heute fester Bestandteil des Landschaftsbildes. Neben ihrem Beitrag zum Klimaschutz können mit der Energiewende auch negative Auswirkungen auf die Natur einhergehen, wie zum Beispiel Kollisionsrisiken für Tiere oder Landnutzungsänderungen. Die Zielkonflikte zwischen Naturschutz und Energiewende können durch eine verantwortungsvolle und konsensorientierte Ausbaupolitik gemildert werden.

Um die Naturverträglichkeit und die Zielkonflikte des Ausbaus zu erkennen und zu bewerten, wurde das Informationssystem EE-Monitor (<https://ee-monitor.de>) entwickelt. Dieses webbasierte Tool ermöglicht eine detaillierte Beobachtung der Konflikte des Ausbaus erneuerbarer Energien mit der Natur und der Umwelt. Es bietet spezifische Informationen zu den Umweltwirkungen der erneuerbaren Energien und dient als Grundlage für gesellschaftliche und politische Diskussionen über eine naturverträgliche Energiewende in Deutschland.

Der EE-Monitor beinhaltet insgesamt 41 Kennzahlen, die den Ausbau erneuerbarer Energien quantitativ erfassen und Auswirkungen auf Natur und Landschaft messen. Die Kennzahlen zeigen beispielsweise, dass der Ausbau von Windenergieanlagen und Photovoltaik-Freiflächenanlagen vor allem auf landwirtschaftlichen Flächen stattfindet. Einen positiven Trend verzeichnet die steigende Flächeneffizienz der Erneuerbaren-Energien-Anlagen.

Schlagworte: Naturschutz, Energiewende, Landnutzung, Zielkonflikte, Naturverträglichkeit

1 Einführung

Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wie Windenergie- oder Photovoltaik-Freiflächenanlagen gehören heute zum gewohnten Landschaftsbild. Bereits 46,2 % des Bruttostromverbrauchs in Deutschland wurde im Jahr 2022 durch diese Anlagen gedeckt (BMWK 2023). Um eine nachhaltige und treibhausgasneutrale Stromversorgung zu erreichen, sieht das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2023) mittelfristig vor, den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch bis zum Jahr 2030 auf mindestens 80 % zu erhöhen.

Erneuerbare Energien haben insgesamt deutliche Vorteile gegenüber fossilen Energieträgern in Bezug auf Umweltverträglichkeit und Klimawirkung (Amponsah et al. 2014; Bilgili, Koçak, and Bulut 2016). Sie können sich aber auch negativ auf Natur und Landschaft auswirken (Thrän et al. 2020). So stellen die sich drehenden Rotorblätter von Windenergieanlagen ein Kollisionsrisiko für Fledermäuse und Vögel dar (Korner-Nievergelt et al. 2013). Freileitungen können Stromtod oder Kollisionen bei Vögeln verursachen (Ammermann, Ponitka, and Strauß 2019). Der Anbau von Energiepflanzen führt zu direkten und indirekten Landnutzungsänderungen und kann naturschutzfachlich wertvolle Brachflächen verdrängen oder als Monokultur die Biodiversität reduzieren (Ammermann, Ponitka und Strauß 2019). Umzäunte Photovoltaik-Freiflächenanlagen können zudem Lebensräume von Tieren zerschneiden (Ammermann, Ponitka und Strauß 2019). Darüber hinaus führen Ressourcen- und Lebenszyklusfragen bei der Herstellung und dem Betrieb von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien zu Naturverträglichkeitsproblemen (Valero et al. 2018) und verlagern sozial-ökologische Probleme in den globalen Süden.

Bei der Umsetzung naturschutz- und energiepolitischer Ziele treten daher häufig Zielkonflikte auf, die nur durch politische Abwägung und gesellschaftlichen Konsens gelöst werden können. So können beispielsweise durch einen verantwortungsvollen und behutsamen Ausbau der erneuerbaren Energien negative Auswirkungen auf Natur und Landschaft verringert oder sogar umgekehrt werden (InPositiv 2023). Ein in diesem Sinne naturverträglicher Ausbau zielt daher darauf ab, den Energiebedarf der Gesellschaft ohne Beeinträchtigung von Natur und Umwelt zu decken und mit den Zielen des Umwelt- und Naturschutzes in Einklang zu bringen. Um die Naturverträglichkeit des Ausbaus erneuerbarer Energien umfassend beurteilen zu können, müssen natur- und energiewirtschaftliche Informationen zeitlich und räumlich differenziert betrachtet werden. So können positive Entwicklungen, aber auch mögliche

Fehlentwicklungen frühzeitig erkannt und gegebenenfalls Handlungsbedarf abgeleitet werden.

In diesem Beitrag wird ein Informationssystem zur Erfassung der Naturverträglichkeit des Ausbaus erneuerbarer Energien mit dem Namen EE-Monitor vorgestellt. Der EE-Monitor ermöglicht eine zeitlich und räumlich differenzierte Beobachtung der Auswirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien auf Natur und Umwelt, liefert spezifische Informationen über die Auswirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien auf Tiere, Pflanzen und das Landschaftsbild und soll als Informationsgrundlage für die gesellschaftliche und politische Auseinandersetzung über eine naturverträgliche Gestaltung der Energiewende in Deutschland dienen. Der EE-Monitor ist als webbasierte Anwendung konzipiert (<https://ee-monitor.de/>) und ermöglicht es, in einem Dashboard eigene Recherchen zu ausgewählten Themen des Ausbaus erneuerbarer Energien im Kontext von Naturschutzaspekten durchzuführen und in einem WebGIS den Bestand an Erneuerbare-Energien-Anlagen in Deutschland standortgenau zu erkunden.

In diesem Beitrag werden der prinzipielle Aufbau des EE-Monitors sowie ausgewählte Inhalte vorgestellt. Dazu wird in Kapitel 2 zunächst kurz der konzeptionelle Rahmen des EE-Monitors erläutert, um anschließend in Kapitel 3 ausgewählte Kennzahlenwerte des EE-Monitors vorzustellen. Abschließend wird in Kapitel 4 ein Ausblick gegeben.

2 Erfassung der Naturverträglichkeit erneuerbarer Energien

Wie einleitend dargestellt, gehen von erneuerbaren Energien spezifische Wirkungen auf Natur und Landschaft aus. Die damit verbundenen wirkungsbezogenen Zielkonflikte entsprechen der Definition naturschutzfachlicher Konflikte, die entstehen, wenn sozio-ökonomisch motivierte Handlungen negative Auswirkungen auf verschiedene Aspekte der Biodiversität haben (Young et al. 2010). Ziel des EE-Monitors ist es daher, ausgehend von den naturwissenschaftlich-physikalischen Wirkungszusammenhängen zwischen der Umwelt und den technischen Infrastrukturen der erneuerbaren Energien, die Auswirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien auf Natur und Landschaft zu erfassen und zu beschreiben (Thrän et al. 2020). Dabei werden nicht nur Umweltzustände, sondern auch unerwünschte Umweltzustandsveränderungen als Folge des Ausbaus erneuerbarer Energien dargestellt. Systematisch lassen sich dabei zwei Ebenen unterscheiden, die miteinander in Wechselwirkung stehen. Zum einen die räumlich-

konfliktvolle Ebene, die die physischen Wirkungszusammenhänge zwischen Erneuerbare-Energien-Anlagen und der Umwelt abdeckt. Zum anderen die normativ-systemische Ebene, die die energie- und umweltpolitischen Rahmenbedingungen deskriptiv festlegt bzw. beschreibt.

Die erste Ebene beinhaltet vor allem die Erfassung der räumlichen Verteilung der Standorte von Erneuerbare-Energien-Anlagen und die Beschreibung ihrer technischen und technologischen Eigenschaften, aber auch der konkreten Umweltprobleme, die von diesen Anlagen im Hinblick auf die Schutzgüter des Naturschutzes ausgehen. Die zweite Ebene analysiert die normativen und energiepolitischen Rahmenbedingungen im Hinblick auf die Naturverträglichkeit des Energiesystems. Es ist offensichtlich, dass letztere einen entscheidenden Einfluss auf den Ausbau der Erneuerbare-Energien-Infrastruktur haben und damit auch das Ausmaß der Umweltauswirkungen beeinflussen. Umgekehrt können negative Auswirkungen auf Natur und Landschaft im Zusammenhang mit dem Ausbau erneuerbarer Energien Anlass für eine Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen oder der politischen Zielsetzungen sein.

Die Naturverträglichkeit der Erneuerbare-Energien-Infrastruktur hängt wesentlich von den naturschutzfachlichen Kriterien ab, die den naturverträglichen Ausbau dieser Infrastruktur bestimmen. Der EE-Monitor fasst diese Kriterien in sechs Zielfeldern zusammen, die das Spannungsfeld zwischen dem Ausbau erneuerbarer Energien und dem Naturschutz beschreiben (Abb. 1). Die Zielfelder geben Hinweise zur Bewertung und Einordnung einer naturverträglichen Energiewende. Sie basieren auf den Ergebnissen der Naturschutzforschung und den daraus abgeleiteten Empfehlungen für eine naturverträgliche Energiewende.

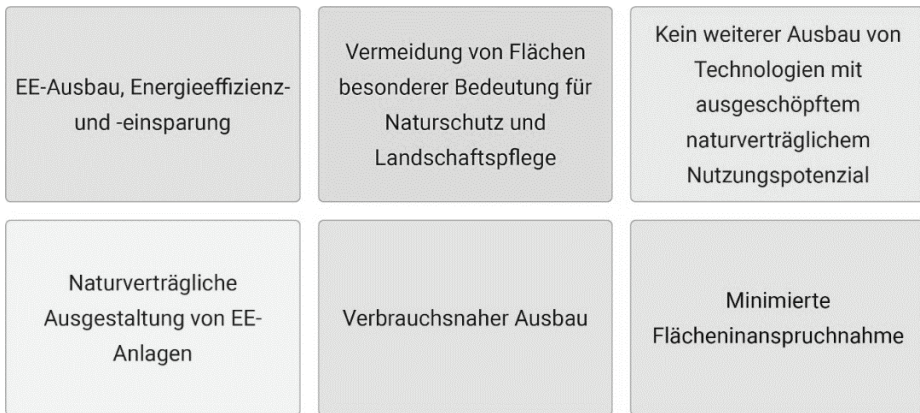


Abb. 1: Zielfelder der naturschutzfachlichen Anforderungen an eine naturverträgliche Energiewende (Quelle: EE-Monitor)

Um die Naturverträglichkeit der erneuerbaren Energien zu beurteilen, muss sowohl der Ist-Zustand analysiert als auch eine historische Betrachtung vorgenommen werden, um Entwicklungstendenzen zu erkennen. Wichtig ist auch eine räumlich differenzierte Betrachtung, um die dezentralen Ausbaustrukturen der Erneuerbare-Energien-Infrastruktur und die damit verbundenen lokalen Belastungsschwerpunkte für Natur und Landschaft zu identifizieren. Darüber hinaus ist eine Differenzierung nach Technologien erforderlich, um die Naturverträglichkeit der verschiedenen Erneuerbare-Energien-Infrastrukturen erfassen zu können. Insgesamt ermöglicht dies eine fundierte Bewertung der Umweltwirkungen verschiedener erneuerbarer Energieträger auf Natur und Umwelt.

Quantitativ wird die Naturverträglichkeit der verschiedenen Erneuerbare-Energien-Infrastrukturen durch eine Reihe von Kennzahlen erfasst, die datengestützt Informationen liefern und damit auch den jeweiligen Entwicklungsstand der Zielfelder widerspiegeln. Die Kennzahlen beziehen sich dabei auf unterschiedliche Inhalte der räumlich-konflikthaften und der normativ-systemischen Ebene und bündeln empirische Daten, die Treiber, Belastungen, Zustände, Wirkungen oder Reaktionen des Ausbaus erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft in möglichst allgemein verständlicher Form darstellen. Im Ergebnis werden wesentliche Fortschritte, aber auch Handlungsbedarfe beim Ausbau erneuerbarer Energien im Hinblick auf ihre Naturverträglichkeit und die jeweiligen Zielfelder deutlich.

Die Darstellung der Naturverträglichkeit von Erneuerbare-Energien-Infrastrukturen in Form von Kennzahlen hängt wesentlich von der Verfügbarkeit und Qualität der Daten

ab, die zur Bewertung dieses Sachverhalts herangezogen werden. Als Datengrundlage für die Kennzahlen des EE-Monitors dienen vor allem öffentlich zugängliche sowie naturschutzfachliche Daten. Bevor diese für die Berechnung von Indikatoren verwendet werden können, müssen sie in der Regel aufbereitet werden. Dies betrifft insbesondere die verwendeten Standort- und Anlagendaten der erneuerbaren Energien aus dem Marktstammdatenregister (MaStR), die in beträchtlichem Umfang fehlerhaft sein können (Manske et al. 2022). Sie werden für den EE-Monitor jährlich aufbereitet und veröffentlicht (Manske und Schmiedt 2023). Die Zusammenstellung und Aufbereitung der verwendeten Daten sowie die Berechnung der Kennzahlen selbst erfolgt skriptbasiert in der Programmiersprache R. Für einen detaillierten Einblick in die Datenzusammenstellung, -aufbereitung und Kennzahlenberechnung siehe Manske (2023).

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die 41 Kennzahlen, die derzeit im EE-Monitor enthalten sind.

Tab. 1: Die 41 Kennzahlen des EE-Monitors

Nr.	Kennzahl
1	Ausbaustatus und Ausbauziele der Windenergie an Land
2	Ausbaustatus und Ausbauziele der Windenergie auf See
3	Ausbaustatus und Ausbauziele der Photovoltaik
4	Ausbaustatus und Ausbauziele der Bioenergie
5	Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch
6	Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch
7	Bruttostromverbrauch
8	Endenergieproduktivität
9	Primärenergieverbrauch
10	Abstand von Windenergieanlagen zu Schutzgebieten
11	Anzahl von Windenergieanlagen in Schutzgebieten
12	Fläche von Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Schutzgebieten
13	Anzahl von Bioenergie-Stromerzeugungseinheiten mit fester und flüssiger Biomasse in Schutzgebieten
14	Anzahl von Biogas-Stromerzeugungseinheiten in Schutzgebieten
15	Anzahl von Wasserkraftanlagen in Schutzgebieten
16	Leitungsdichte von Freileitungen im Laub-, Nadel- und Mischwald und in FFH-Waldgebieten
17	Leitungsdichte von Freileitungen in Gebieten freileitungsempfindlicher Avifauna
18	Leitungsdichte von Freileitungen in Schutzgebieten
19	Anteil der Silomais-Anbaufläche an der Ackerfläche
20	Energiebezogener Substrateinsatz von nachwachsenden Rohstoffen in Biogasanlagen
21	Leistungsdichte von Biogas-Stromerzeugungseinheiten je Ackerfläche

Nr.	Kennzahl
22	Anzahl von Wasserkraftanlagen kleiner 1 MW
23	Anlagendichte der Wasserkraftanlagen an Fließgewässern
24	Anteil von durchgängigen Wasserkraftanlagen
25	Anteil von Windenergieanlagen mit Abschaltauflagen zum Schutz von Tieren
26	Leistungsdichte der Windenergie
27	Leistungsdichte der Photovoltaik-Freiflächenanlagen
28	Leistungsdichte der Bioenergie
29	Leistungsdichte der Wasserkraft
30	Leistungsdichte der erneuerbaren Energien Gesamt
31	Länge von Freileitungen der Hoch- und Höchstspannung
32	Bruttostromverbrauch nach Region
33	Anlagendichte der Windenergie auf Acker, Grünland und bebauten Flächen sowie im Laub-, Nadel- und Mischwald und in FFH-Waldgebieten
34	Anlagendichte der Windenergie je Bodenbedeckungsklasse
35	Flächeneffizienz von Windenergieanlagen im Offenland und Wald
36	Anteil von Photovoltaik-Gebäudeanlagen an installierter Photovoltaik-Gesamtleistung
37	Flächenverteilung von Photovoltaik-Freiflächenanlagen auf Infrastrukturbegleitflächen
38	Flächenverteilung von Photovoltaik-Freiflächenanlagen nach ackerbaulichem Ertragspotenzial
39	Flächenverteilung von Photovoltaik-Freiflächenanlagen nach Bodenbedeckungsklassen
40	Flächeneffizienz von Photovoltaik-Freiflächenanlagen
41	Flächenanteil von Photovoltaik-Freiflächenanlagen je Bodenbedeckungsklasse

3 Naturverträglichkeit der erneuerbaren Energien

Die Naturverträglichkeit der erneuerbaren Energien wird, wie dargestellt, derzeit durch 41 Kennzahlen abgebildet. Im Folgenden werden ausgewählte Inhalte und Kennzahlenwerte des EE-Monitors für die Technologien Windenergie, Photovoltaik-Freiflächenanlagen, Bioenergie, Wasserkraft und Freileitungen näher vorgestellt. Die Verteilung der Anlagen erneuerbarer Energien weisen starke regionalspezifische Unterschiede auf: Während im Norden die Windenergienutzung überwiegt, wird erneuerbarer Strom im Süden vor allem mithilfe von Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse produziert.

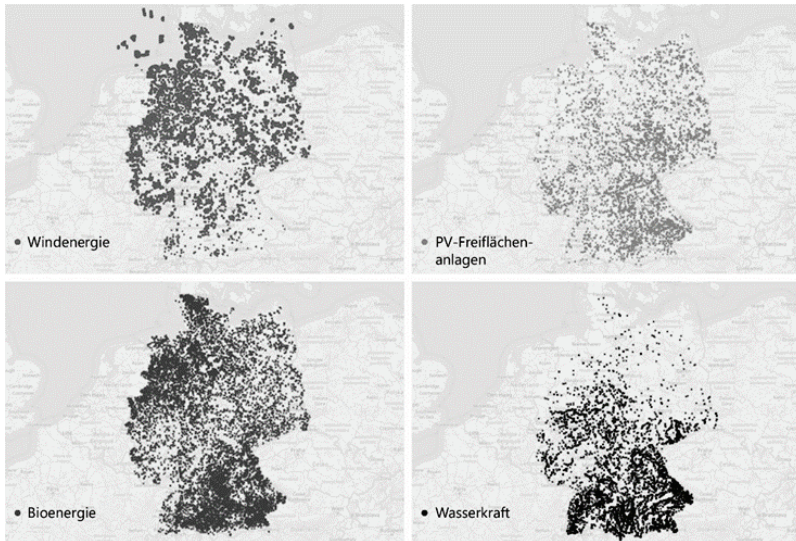


Abb. 2: Standortverteilung von Windenergie, PV-Freiflächenanlagen, Bioenergie, Wasserkraft im Jahr 2020 (Quelle: EE-Monitor)

3.1 Windenergie

Die naturschutzfachlichen Kennzahlen des EE-Monitors verdeutlichen technologie-spezifische und technologieübergreifende Trends: Beispielsweise nimmt die Anlagendichte von Windenergieanlagen in allen Waldtypen kontinuierlich zu (Kennzahl 33). Im Jahr 2010 lag sie bei 0,0029 Anlagen pro Quadratkilometer Wald, 2020 bei 0,019 Anlagen pro Quadratkilometer Wald. Im Vergleich dazu: auf bereits bebauten Flächen beträgt die Anlagendichte 0,0048 Anlagen pro Quadratkilometer. Zu dieser Tendenz lässt sich ergänzen, dass die Flächeneffizienz von Windenergieanlagen im Wald mit 2 kW/ha geringer ausfällt als im Offenland (Kennzahl 35).

Das Monitoring des EE-Monitor macht deutlich, dass der Ausbau der Windenergie vor allem auf landwirtschaftlichen Flächen stattfindet. Die höchste Dichte von Windenergieanlagen lässt sich auf der Bodenbedeckungskategorie „Ackerflächen“ feststellen (Kennzahl 34).

Gleichzeitig nahm der Abstand von Windenergieanlagen zu Schutzgebieten bis zum Jahr 2010 kontinuierlich ab, ist aber seitdem relativ konstant (Kennzahl 10). 5 125 Windenergieanlagen (17%) befinden sich in Schutzgebieten. Die Menge der Anlagen in Schutzgebieten hat sich seit 2000 versiebenfacht, das Verhältnis im Vergleich zu allen Anlagen ist etwa gleichgeblieben (Kennzahl 11).

Die meisten in Schutzgebieten betriebenen Windenergieanlagen stehen in Naturparks (2020: 3 908 Anlagen) und Landschaftsschutzgebieten (2020: 1 630 Anlagen). In Nordrhein-Westfalen befinden sich 945 Anlagen innerhalb der Grenzen von Landschaftsschutzgebieten. Bundesweit stehen 471 Anlagen in Europäischen Vogelschutzgebieten. Biosphärenreservate und Nationalparks sind weitgehend frei von Windenergieanlagen (Kennzahl 11).

3.2 Photovoltaik

Ähnlich wie bei der Errichtung von Windenergieanlagen werden Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) hauptsächlich auf landwirtschaftlichen Flächen gebaut. Im Jahr 2020 befanden sich 61 % aller PV-FFA auf solchen Flächen, und dieser Anteil ist seit 2011 konstant geblieben. Nur ein Drittel der PV-FFA wurde bis 2020 auf bebauten Flächen installiert (Kennzahl 39). Im Jahr 2020 befanden sich 21 % der PV-FFA neben Autobahnen, Bundesstraßen oder Schienenwegen. Fast ein Drittel der Anlagen, die im Jahr 2020 errichtet wurden, wurden in Deutschland entlang von Autobahnen oder Bahnstrecken platziert (Kennzahl 37).

Der Anteil von Photovoltaik-Gebäudeanlagen an der Gesamtleistung der installierten Photovoltaikanlagen beträgt aktuell 70,64 % (Stand 2020). Dabei ist dieser Anteil im westlichen Teil Deutschlands deutlich höher als im Osten. Dort ist wiederum der Anteil der Photovoltaik-Freiflächenanlagen höher (Kennzahl 36).

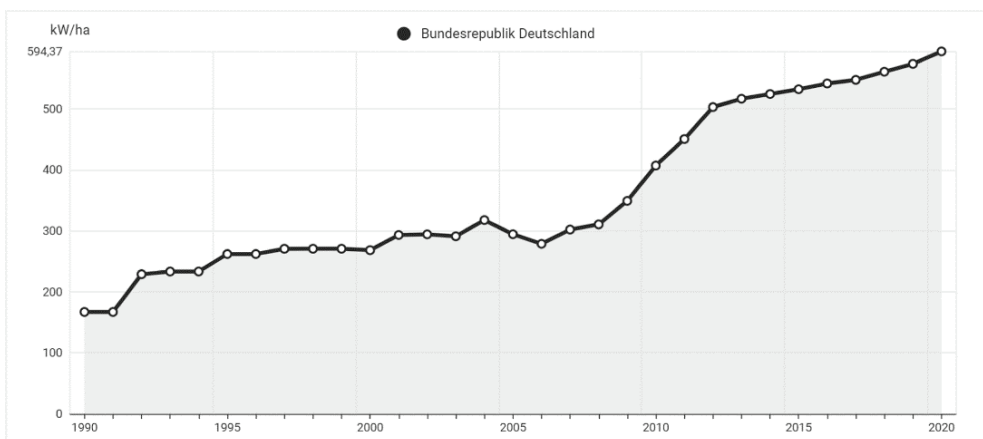


Abb. 3: Flächeneffizienz von Photovoltaik-Freiflächenanlagen (kumuliert) (Quelle: EE-Monitor)

Ein positiver Trend zeigt sich in der raschen Steigerung der Flächeneffizienz von PV-Freiflächenanlagen: Die Flächeneffizienz aller Freiflächen-Photovoltaikanlagen (im Gesamtbestand) hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten mehr als verdoppelt. Gleichzeitig hat sich die Flächeneffizienz der neu hinzugebauten Freiflächen-Photovoltaikanlagen in den letzten 20 Jahren vervierfacht. Angesichts der Leistungswerte der derzeit installierten Anlagen ist zu erwarten, dass die Flächeneffizienz auch weiterhin zunimmt (Kennzahl 40).

Zwischen 2010 und 2020 hat sich die mit Photovoltaik-Freiflächenanlagen belegte Fläche innerhalb von Schutzgebieten mehr als verdreifacht. Etwa die Hälfte dieser Anlagen befindet sich in Landschaftsschutzgebieten. In Biosphärenreservaten, FFH-Gebieten und Nationalparks gibt es kaum Photovoltaik-Freiflächenanlagen.

Vor allem in Bayern ist die Flächenbelegung in Schutzgebieten durch Photovoltaik-Freiflächenanlagen besonders hoch. Mehr als ein Drittel aller Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Schutzgebieten befinden sich dort (Kennzahl 12).

3.3 Bioenergie und Wasserkraft

Auch die Kennzahlen im Bereich Bioenergie zeigen regionale Schwerpunkte: Zum Beispiel verdeutlicht der hohe Anteil von Silomais an den Ackerflächen die Flächenwirkung der Energieproduktion, besonders in Bundesländern wie Niedersachsen und Schleswig-Holstein (Kennzahl 19).

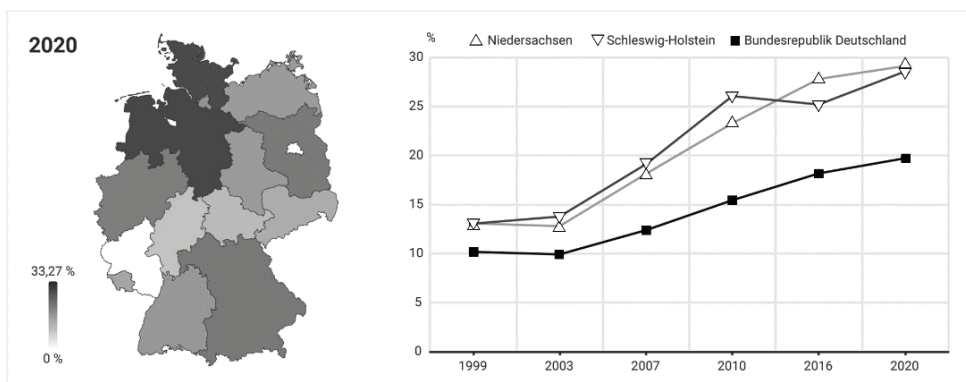


Abb. 4: Anteil der Silomais-Anbaufläche an der Ackerfläche (Quelle: EE-Monitor).

Wasserkraftanlagen kleiner als 1 MW weisen im Verhältnis zu ihrem energetischen Ertrag eine unverhältnismäßig große Umweltwirkung auf. Dennoch nimmt die Anzahl solcher Anlagen stetig zu (Kennzahl 22).

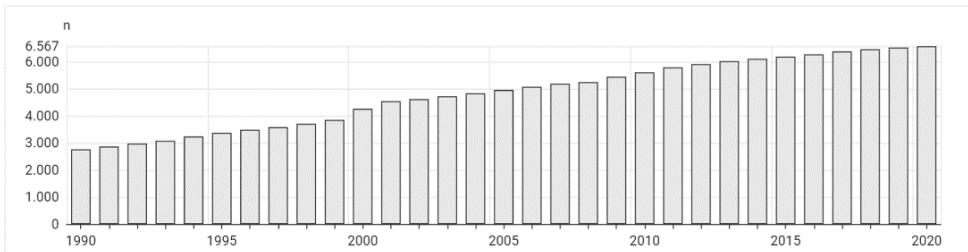


Abb. 5: Anzahl von Wasserkraftanlagen kleiner 1 MW (Quelle: EE-Monitor).

3.4 Stromnetzausbau

Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien geht auch der Ausbau des Stromnetzes einher. Im Monitoring sind 61.000 km Freileitungen der Hoch- und Höchstspannung verzeichnet (Kennzahl 31). Davon durchqueren 24.334 km Schutzgebiete in Deutschland, was einer durchschnittlichen Freileitungslänge von 1,3 Metern pro Hektar Schutzgebietsfläche entspricht (Kennzahl 18).

4 Fazit

Die politische Förderung der beschleunigten Energiewende verschärft Konflikte zwischen dem Ausbau erneuerbarer Energien und dem Naturschutz. Die Web-Anwendung des EE-Monitors (<https://ee-monitor.de>) ermöglicht es der Öffentlichkeit, detaillierte Daten zum regionalen Vergleich und Zeitverlauf aktueller Konfliktfelder zwischen Energiewende und Naturschutz einzusehen.

Kann aus dem Monitoring abgeleitet werden, ob die Energiewende naturverträglich verläuft? Die Ergebnisse zeigen, dass das Naturschutzgesetz Schutzgebiete mit hohem Schutzstatus, wie Naturschutzgebiete und Biosphärenreservate (Kernzone), erfolgreich vor dem Bau von Anlagen schützt. In Europäischen Vogelschutzgebieten, Naturparks, Landschaftsgebieten und Wäldern hingegen gibt es einen fortschreitenden Ausbau von Anlagen. Dies deutet darauf hin, dass viele Standortentscheidungen im Sinne der Vermeidung von Konflikten mit Siedlungsgebieten getroffen worden sind.

Die historischen Daten ermöglichen es, Entwicklungen im Ausbau zu beobachten und Trends für die Zukunft abzuleiten, wie z. B. die Zunahme von Windenergieanlagen in Landschaftsschutzgebieten, Naturparks und Wäldern.

Der EE-Monitor bietet eine gute Ausgangslage, um Bewertungsmaßstäbe zu integrieren, die den Grad an Naturverträglichkeit des Ausbaus bewerten können. Neue Kennzahlen und Datensätze können zudem leicht in die Anwendung integriert werden. Durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz kann die Datenverarbeitung automatisiert und die Visualisierung von Ausbauszenarien erleichtert werden.

Von den Kennzahlen lassen sich bestimmte Maßnahmen ableiten, die die Naturverträglichkeit der Energiewende fördern, darunter die drastische Senkung des Energieverbrauchs, die Minimierung des flächenverbrauchenden Ausbaus durch mehr Flächeneffizienz, Repowering, Agri-PV und Priorisierung von Dach-PV sowie die Vorab-Identifizierung geeigneter Standorte (Positivplanung) und etablierte Beteiligungsmaßnahmen zur Bearbeitung von Flächenfragen und -konflikten.

Die Kennzahlen des Monitorings zeigen, wo in der Landschaft die Energiewende stattfindet und besonderes Augenmerk erfordert: Wie soll zum Beispiel der steigende Ausbau von Photovoltaik-Freiflächenanlagen im Randbereich von Autobahnen und Schienen bewertet werden? Ist dies eine Nutzung von konfliktarmen Flächen oder handelt es sich um ein Phänomen der Überbündelung von Infrastrukturen? Welche zusätzlichen Kriterien müssen angewendet werden, um die Naturverträglichkeit einer Photovoltaik-Freiflächenanlage zu bewerten, wie zum Beispiel Modulabstand, Umzäunung, Korridore und andere Faktoren?

Um die Naturverträglichkeit der Energiewende zu fördern, bedarf es eines konstanten Monitorings. Die politisch gewollte Beschleunigung der Energiewende erfordert auch zukünftige Forschung in Bereichen wie Doppelnutzungen der Fläche (Moor-PV, Paludikultur, Agri-PV) und weiteren integrierten PV-Technologien (Road-PV, Schwimmende PV), die Berücksichtigung naturräumlicher Voraussetzungen der Bundesländer sowie die Analyse regionalspezifischer Bedingungen für eine naturverträgliche Energiewende. Der EE-Monitor ist anschlussfähig für die Integration neuer Aspekte, wie z. B. die Abbildung von Agri-PV oder Moor-PV.

5 Literatur

- Ammermann, K.; Ponitka, J.; Strauß C. (2019): 'Combining Climate Protection and Nature Conservation: Requirements for an Environmentally Friendly Energy Transition'. In *The European Dimension of Germany's Energy Transition*, edited by Erik Gawel, Sebastian Strunz, Paul Lehmann, and Alexandra Purkus, 311–33. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03374-3_18.
- Amponsah, N. Y.; Troldborg, M; Kington, B.; Aalders, I.; Lloyd Hough, R. (2014): 'Greenhouse Gas Emissions from Renewable Energy Sources: A Review of Lifecycle Considerations'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (November): 461–75. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.087>.
- Bilgili, F.; Koçak, E.; Bulut Ü. (2016) 'The Dynamic Impact of Renewable Energy Consumption on CO2 Emissions: A Revisited Environmental Kuznets Curve Approach'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54 (February): 838–45. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.080>.
- BMWK. 2023. 'Zeitreihen Zur Entwicklung Der Erneuerbaren Energien in Deutschland Unter Verwendung von Daten Der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)'. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). <https://www.erneuerbare-energien.de>.
- InPositiv. 2023. 'Wie erneuerbare Energien positiv auf Natur und Artenvielfalt wirken können.' 26.6.2023. 2023. <https://www.erneuerbare-energien-und-natur.de>.
- Korner-Nievergelt, F.; Brinkmann, R.; Niermann, I.; Behr, O. (2013): 'Estimating Bat and Bird Mortality Occurring at Wind Energy Turbines from Covariates and Carcass Searches Using Mixture Models'. Edited by R. Mark Brigham. *PLoS ONE* 8 (7): e67997. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067997>.
- Manske, David. (2023): 'EE-Monitor - Technical Report'. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8073746>.
- Manske, D.; Grosch, L.; Schmiedt, J.; Mittelstädt, N. Thrän, D. (2022): 'Geo-Locations and System Data of Renewable Energy Installations in Germany'. *Data* 7 (9): 128. <https://doi.org/10.3390/data7090128>.
- Manske, D.; Schmiedt, J. (2023): 'Geo-Locations and System Data of Renewable Energy Installations in Germany'. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8188601>.
- Thrän, D.; Bunzel, K.; Klenke, R.; Koblenz, B.; Lorenz, C.; Majer, S.; Manske, D. (2020): 'Naturschutzfachliches Monitoring des Ausbaus der erneuerbaren Energien im Strombereich und Entwicklung von Instrumenten zur Verminderung der Beeinträchtigung von Natur und Landschaft'. BfN-Skripten 562. Bonn - Bad Godesberg: Bundesamt für Naturschutz. <http://doi.org/10.19217/skr562>.

- Valero, A.; Valero, A.; Calvo, G.; Ortego, A.; Ascaso, S.; Palacios, J.-L. (2018): 'Global Material Requirements for the Energy Transition. An Exergy Flow Analysis of Decarbonisation Pathways'. *Energy* 159 (September): 1175–84. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.149>.
- Young, J. C.; Marzano, M.; White, R. M.; McCracken, D. I.; Redpath, S. M.; Carss, D. N.; Quine, C. P.; Watt, A. D. (2010): 'The Emergence of Biodiversity Conflicts from Biodiversity Impacts: Characteristics and Management Strategies'. *Biodiversity and Conservation* 19 (14): 3973–90. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9941-7>.