



---

## Sachstand

---

### Windenergieanlagen

Physikalische Aspekte und Auswirkungen auf die Luftfauna

**Windenergieanlagen**

## Physikalische Aspekte und Auswirkungen auf die Luftfauna

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 041/23  
Abschluss der Arbeit: 6. Juli 2023  
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und  
Forschung

---

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

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Physikalisches Prinzip</b>	<b>5</b>
2.1.	Wirkungsgrad und Windschatten	5
2.2.	Leistungsregelung	6
2.3.	Strömungsprofil und Turbulenzen	7
2.4.	Wirbelschleppen an den Flügelspitzen	9
2.5.	Blattspitzengeschwindigkeit	9
<b>3.</b>	<b>Auswirkungen auf Vögel, Fledermäuse und Insekten</b>	<b>9</b>
3.1.	Onshore-Windenergieanlagen	10
3.1.1.	Vögel	10
3.1.2.	Fledermäuse	10
3.1.3.	Insekten	12
3.2.	Offshore-Windenergieanlagen	13
3.2.1.	Vögel	14
3.2.2.	Fledermäuse	15

## 1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit behandelt einzelne Aspekte zum Strömungsverhalten des Windes bei Windenergieanlagen<sup>1</sup> und Auswirkungen der Rotoren auf die Luftfauna, wie Vögel, Insekten und Fledermäuse.

In Deutschland gibt es derzeit etwa 30 000 Onshore- und gut 1.500 Offshore-Windenergieanlagen. Als Offshore-Windenergie bezeichnet man die Stromerzeugung durch Windenergieanlagen auf dem Meer und in Onshore-Windenergieanlagen wird Strom an Land erzeugt. Nach Auswertungen des Statistischen Bundesamtes war Windenergie im Jahr 2022 die „zweitwichtigste Energiequelle, deren Anteil an der Stromerzeugung nach einem vergleichsweise windarmen Vorjahr um 9,4 % auf knapp ein Viertel (24,1 %) stieg (2021: 21,6 %).“<sup>2</sup>

Gemäß dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)<sup>3</sup> sollen bis Ende 2030 in Deutschland 115 Gigawatt (GW) Windenergie an Land installiert sein.<sup>4</sup> Das Umweltbundesamt geht von etwa 58 GW aktuell installierter Leistung (Stand Ende 2022) aus und schätzt, dass den Ausbau ein jährlicher Zubau von etwa 9 GW brutto bzw. 7 GW netto erforderlich sein wird. Dabei nehmen die Experten an, dass alte Anlagen mit einer Leistung von etwa 17 GW bis Ende 2030 zurückgebaut werden. Darüber hinaus setzt das EEG mit 157 GW bis Ende 2035 und 160 GW bis Ende 2040 weitere Ausbauziele.<sup>5</sup> Offshore waren Ende 2022 insgesamt 8,1 GW installiert. Bis 2023 sollen 20 GW installierte Leistung errichtet werden.<sup>6</sup>

---

<sup>1</sup> Begrifflichkeit: Windenergie oder Windkraft ist die großtechnische Nutzung des Windes zur Energieerzeugung. Die Anlagen dazu werden als Windenergie- oder Windkraftanlagen (WEA bzw. WKA) bezeichnet.

Vgl.: Andresen Rechtsanwälte (2012). „Begriffe der Windenergie – Windenergieanlage oder Windmühle?“, <https://www.ar-law.de/allgemein/begriffe-der-windenergie-windenergieanlage-oder-windmuehle/#:~:text=Eine%20Windenergieanlage%20wird%20durchaus%20auch,die%20Begriffe%20Kleinwindanlage%20oder%20Kleinwindenergieanlage.>

<sup>2</sup> Statistisches Bundesamt (2023). „Stromerzeugung 2022: Ein Drittel aus Kohle, ein Viertel aus Windkraft“, [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23\\_090\\_43312.html#:~:text=Zweitwichtigste%20Energiequelle%20war%20die%20Windkraft,Kilowattstunden%20Strom%20erzeugt%20und%20eingespeist.](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23_090_43312.html#:~:text=Zweitwichtigste%20Energiequelle%20war%20die%20Windkraft,Kilowattstunden%20Strom%20erzeugt%20und%20eingespeist.)

<sup>3</sup> Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2014/](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/).

<sup>4</sup> Bundesregierung (2023). „Mehr Energie aus erneuerbaren Quellen“, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/energiewende-beschleunigen-2040310>.

<sup>5</sup> Umweltbundesamt (2023). „Flächen für die Windenergie an Land“, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/windenergie-an-land#flaeche>.

<sup>6</sup> Deutsche Windguard (2023). „Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland“, [https://www.windenergie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/20230116\\_Status\\_des\\_Offshore-Windenergieausbaus\\_Jahr\\_2022.pdf](https://www.windenergie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/20230116_Status_des_Offshore-Windenergieausbaus_Jahr_2022.pdf).

Umweltbundesamt (2020). „Windenergie auf See“, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/windenergie-auf-see-offshore-windenergie>.

Seit den 90er Jahren konnte die durchschnittliche Leistung der Windenergieanlagen von etwa 165 Kilowatt (kW) auf heutige mehr als 4 Megawatt (MW) gesteigert werden. Die Nabenhöhe, in der sich auch der Rotor befindet, erhöhte sich auf etwa 120 bis 160 Meter.<sup>7</sup>

## 2. Physikalisches Prinzip

Windenergieanlagen ermöglichen die Umwandlung der Windenergie in mechanische Energie zur Stromerzeugung.

Um aus Wind Strom zu gewinnen, muss die Bewegungsenergie<sup>8</sup> des Windes in eine Drehbewegung überführt werden. Die Bewegungsenergie treibt einen Rotor an. Ein Generator wandelt die Rotationsenergie aus der Drehbewegung in elektrischen Strom um. Dabei gilt: Je größer der Durchmesser des Rotors und je größer die Höhe, in der er betrieben wird, desto mehr Windenergie kann gewonnen werden. Eine Verdoppelung des Rotordurchmessers ergibt zudem eine Vierfachung des Windstromertrages, wobei die Rotorlänge nicht beliebig groß werden kann: An den Enden der Rotoren wirken Zentrifugalkräfte. Die Rotorflügelspitzen mit einem Durchmesser von 50 Meter würden bei einer Drehzahl von 0,3 Umdrehungen pro Sekunde (U/s) auf eine Geschwindigkeit von 340 Kilometern pro Stunde (km/h) kommen. Durch die Fliehkräfte, die dabei entstehen, können Beschleunigungen auftreten, die dem 18-fachen der Erdbeschleunigung entsprechen.<sup>9</sup>

### 2.1. Wirkungsgrad und Windschatten

Ein maximaler theoretischer Wirkungsgrad der Windenergieanlagen von gut 59 Prozent kann erreicht werden, wenn die Windgeschwindigkeit hinter dem Rotor etwa ein Drittel der Windgeschwindigkeit vor dem Rotor entspricht.<sup>10</sup> In der Praxis können Wirkungsgrade von 45 bis 50 Prozent erreicht werden. Effizienzverluste entstehen bei der Umwandlung der kinetischen Energie in

---

Im Vergleich: Ein ICE verbraucht 8 MW im Betrieb und 1 GW ist die Leistung eines typischen KKW (Kohlekraftwerks).

<sup>7</sup> Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2023). „Einführung“, <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/erneuerbare-energien/einfuehrung>.

<sup>8</sup> Die Bewegungsenergie wird auch als kinetische Energie bezeichnet.

<sup>9</sup> Wagner, H-F. (2017). „Technische Grundlagen für Windkraftanlagen“, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/energie/windenergie/technik-der-windkraft/>.

Weiterführende Informationen unter: Kusiek, A. (2022). „Windenergieanlagen: Technologie - Funktionsweise - Entwicklung“, Carl Hanser Verlag München 2022 und Kaltschmitt, M. (Hrg.) (2020). „Erneuerbare Energien: Systemtechnik - Wirtschaftlichkeit - Umweltaspekte“, Springer Vieweg 2020, 6. Auflage, Kapitel 6.

<sup>10</sup> Welt der Physik (2006). „Physik der Windenergie“, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/energie/windenergie/physik-der-windenergie/>.

elektrischen Strom, bei der Ausrichtung der Rotoren nach Windrichtung und -stärke sowie der Anbindung ans Stromnetz.<sup>11</sup>

Windenergieanlagen liefern den meisten Strom an Standorten, an denen der Wind möglichst stark und gleichmäßig weht. Auch die Geländeform und die Position der Anlagen zueinander beeinflussen die Stromausbeute.

Separat stehende Windenergieanlagen liefern am meisten Strom, wenn die Drehachse des Rotors exakt in die Windrichtung zeigt. Stehen mehrere Anlagen zusammen, wie z.B. in Windparks, reduzieren die in der ersten Reihen zum Wind stehenden Windanlagen die Windgeschwindigkeit und verursachen Turbulenzen (Windschatten). Dadurch sinkt der Energieertrag der dahinter stehenden Anlagen um bis zu 40 %. Je nach Windbedingungen wirkt sich dieser Effekt auch bei Abständen von bis zu 50 Kilometern aus. Dies ist zum Beispiel bei Offshore-Windparks der Fall. Forscher haben herausgefunden, dass sich die Stromausbeute eines Windparks steigern ließe, wenn die Windräder in der ersten Reihe um etwa 20 Grad aus ihrer direkt zum Wind gerichteten Position herausgedreht werden würden, diese zwar weniger Strom produzieren, aber auch weniger Turbulenzen. Inwieweit dieses Ergebnis zu langfristigen Erfolgen führen kann, müssen weitere Untersuchungen zeigen.<sup>12</sup>

## 2.2. Leistungsregelung

Moderne große Windenergieanlagen besitzen eine Leistungsregelung, die eine konstante Leistungsabgabe bis hin zum Abschalten der Anlage bei Sturm (circa 25 m/s) sicherstellt. Die Leistung der Anlage kann mit Hilfe der Blattwinkelverstellung kontrolliert werden, die die Rotorblätter bei Sturm auch vollständig aus dem Wind drehen kann. Die Windenergieanlage erreicht ihre Nennleistung<sup>13</sup> bei einer Windgeschwindigkeit von 9 bis 12 m/s. Die Nennleistung der Anlage darf nicht überschritten werden, weil es sonst zu Überlastungen und Materialschäden kommen könnte. Die heutigen modernen Windenergieanlagen benötigen in der Regel zum Anlaufen eine Windgeschwindigkeit von mindestens vier bis fünf Meter pro Sekunde.

---

<sup>11</sup> Kusiek, A. (2022). „Windenergieanlagen: Technologie - Funktionsweise - Entwicklung“, Carl Hanser Verlag München 2022, Seite 55.

<sup>12</sup> Löffken, J.O. (2019). „Aus dem Wind gedreht“, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/nachrichten/2019/aus-dem-wind-gedreht/>.

Gregor, Honsel, MIT Technology Review (2021). „Studie: Windparks in der Nordsee nehmen sich gegenseitig den Wind weg“, <https://www.heise.de/hintergrund/Studie-Windparks-in-der-Nordsee-nehmen-sich-gegenseitig-den-Wind-weg-6066394.html>.

Howland, M. F. et al Proceedings of the National Academy of Sciences (2019). „Wind farm power optimization through wake steering“, <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1903680116>.

<sup>13</sup> Die Nennleistung ist eine vom Hersteller genannte Leistung, die ein Gerät oder Modul unter Normalbedingungen ohne Beeinträchtigung der Lebensdauer oder Sicherheit erbringen oder abgeben kann. Quelle: <https://www.eon.de/de/gk/energiewissen/nennleistung-installierte-leistung.html#:~:text=Nennleistung%20ist%20ein%20allgemeiner%20technischer,Sicherheit%20erbringen%20oder%20abgeben%20kann.>

---

Eine moderne Windenergieanlage mit Blattverstellung hat im Allgemeinen abhängig von der Windgeschwindigkeit vier Betriebszustände:

Bei schwachem Wind von 0 bis 4 m/s kann keine Energie ins Netz eingespeist werden, und die Anlage läuft im sogenannten „Trudelbetrieb“. Die Rotorblätter drehen sehr langsam oder gar nicht. Sie werden aus dem Wind gedreht und der Anstellwinkel beträgt 90° zum Wind.

Im Teillastbetrieb, bei Windgeschwindigkeiten von 4 bis 12 m/s, läuft die Anlage und produziert Strom. Ihre Nennleistung hat sie dabei noch nicht erreicht. Der Anstellwinkel beträgt 0°. Die Rotoren stehen senkrecht auf dem Wind.

Im Volllastbereich weht der Wind mit Geschwindigkeiten von 12 bis 25 m/s. Der Wind weht so stark, dass die Anlage so geregelt werden muss, dass ihre Nennleistung nicht oder nur unwesentlich überschritten wird. Dafür werden die Rotorblätter teilweise aus dem Wind gedreht. Der Anstellwinkel liegt zwischen 0° bis circa 30°. Bei einer Verdoppelung der Windgeschwindigkeit, verachtfacht sich die Windleistung und doppelte Windgeschwindigkeit bedeutet dreifache Leistung.

Bei hohen Windgeschwindigkeiten (ab 25 m/s) werden die Anlagen im sogenannten „Sturmbe- reich“ gefahren. Oberhalb der Ausschaltgeschwindigkeit müssen die Anlagen abgestellt und die Rotorblätter aus dem Wind gedreht werden (sogenannte „Fahnenstellung“ bei 90°). In dem Geschwindigkeitsbereich davor werden die Anlagen aus dem Wind gedreht und die Rotordrehzahl und die damit verbundene eingespeiste Leistungsabgabe so herunter geregelt.<sup>14</sup>

Die Steuerung der Blattverstellung und damit auch die der Leistung erfolgt über die Rotorblatt- verstellereinheit, auch Pitchsystem genannt. Dies ist ein sensorgesteuertes System, das den Nor- malbetrieb und spezielle Zustände, wie Service oder Notfall einstellt sowie die Lastreduktion re- guliert.<sup>15</sup>

### 2.3. Strömungsprofil und Turbulenzen

Der Rotorflügel von Windenergieanlagen funktioniert nach dem gleichen physikalischen Prinzip, dem Auftriebsprinzip, wie Flugzeugprofile. Wird der Flügel in den Wind gedreht, dann entsteht unterhalb des umströmten Rotorblattquerschnitts ein höherer Druck als oberhalb. Dieser Druck- unterschied erzeugt eine Auftriebskraft, die senkrecht zur Windrichtung steht und eine deutlich kleinere Widerstandskraft, die parallel zur Windrichtung verläuft. Der Unterschied in den Druck- verhältnissen erzeugt den Auftrieb, der das Rotorblatt antreibt und somit den Rotor in Bewegung versetzt. Die Auftriebskraft hängt von der Rotorblattstellung, dem Anstellwinkel des Rotors zum

---

<sup>14</sup> Kusiek, A. (2022). „Windenergieanlagen: Technologie - Funktionsweise - Entwicklung“, Carl Hanser Verlag München 2022, Kapitel 11 und 12.

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2023). „Leistungsbegrenzung und Leistungsregelung einer Windenergieanlage“, <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/erneuerbare-energien/einfuehrung>.

<sup>15</sup> Kusiek, A. (2022). „Windenergieanlagen: Technologie - Funktionsweise - Entwicklung“, Carl Hanser Verlag München 2022, Kapitel 25.

Wind, ab. Je weiter der Rotor aus der senkrechten Stellung (Anstellwinkel = 0°) gedreht wird, desto mehr nehmen auch Auftriebs- und Widerstandskraft zu. Bis zu einem bestimmten Wert des Winkels bleibt die glatte, sogenannte „laminare“, Strömung erhalten, danach bilden sich Turbulenzen und die Strömung reißt ab.<sup>16</sup>

Eine Turbulenz ist das Gegenteil einer laminaren Strömung. Der Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung ist nicht immer abrupt. Zunächst entstehen zunehmend kleine Verwirbelungen, die sich zu einer Turbulenz ausbilden können. Es kommt in diesem Fall zu einem Strömungsabriss (der laminaren Strömung). Zudem erzeugt jede Windanlage durch die Drehbewegung der Rotoren Turbulenzen. Je nach Intensität können Turbulenzen die Rotorblätter schädigen.

Turbulenzen sind Strömungszustände von Flüssigkeiten und Gasen, die im Allgemeinen durch die Bildung und den Zerfall von Wirbeln durch Einflüsse, wie z.B. der Reibung des Windes an rauen Flächen, wie Rotorblättern oder Wäldern, entstehen. In der Atmosphäre sind Turbulenzen immer vorhanden. Eine Turbulenz entsteht bei Veränderungen der Windgeschwindigkeit zwischen zwei über- oder nebeneinander befindlichen Luftschichten. Auch die Reibung der bewegten Luft an der Erdoberfläche führt zu Turbulenzen. Die Turbulenz kann vom Zentimeterbereich bis zu einigen 10 Metern reichen. Die höchste Turbulenz tritt in der bodennahen Schicht bis etwa 100 Meter auf. Darüber liegt eine Schicht mit geringer Turbulenz, die bis 1000 Meter reicht.<sup>17</sup>

Die Turbulenzintensität des Windes einer Windenergieanlage wird auf Nabenhöhe durch das Standortgelände und benachbarte Windenergieanlagen beeinflusst. Simulationsprogramme können die Turbulenzintensität bestimmen, die u.a. als Basis für den Nachweis der Standorteignung der Windenergieanlage dient.<sup>18</sup>

Um die gegenseitige Abschattung von Windenergieanlagen durch Turbulenzen zu minimieren, muss ein ausreichender Abstand zwischen den Anlagen bei der Planung bestimmt werden. Bei Offshore-Windparks gibt es im Vergleich zu Onshore-Parks aufgrund der höheren Windgeschwindigkeiten auf dem Meer eine stärkere Reduzierung der Windgeschwindigkeit und eine Zunahme der Turbulenz im Abstrom der Anlage.<sup>19</sup>

---

<sup>16</sup> Kaltschmitt, M. (Hrg.) (2020). „Erneuerbare Energien: Systemtechnik - Wirtschaftlichkeit - Umweltaspekte“, Springer Vieweg 2020, 6. Auflage, Kapitel 6.1.2.

<sup>17</sup> Deutscher Wetterdienst (2023). „Turbulenz“, <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Funktionen/glossar.html?lv2=102672&lv3=102824>.

<sup>18</sup> Kusiek, A. (2022). „Windenergieanlagen: Technologie - Funktionsweise - Entwicklung“, Carl Hanser Verlag München 2022, Kapitel 8.

Windbranche.de (2018). „Forscher entschlüsseln Turbulenz-Problem bei Rotorblättern“, <https://www.windbranche.de/news/nachrichten/artikel-35238-forscher-entschlsseln-turbulenz-problem-bei-rotorblttern>.

<sup>19</sup> Kaltschmitt, M. (Hrg.) (2020). „Erneuerbare Energien: Systemtechnik - Wirtschaftlichkeit - Umweltaspekte“, Springer Vieweg 2020, 6. Auflage, Kapitel 6, Seite 522.



## 2.4. Wirbelschleppen an den Flügelspitzen

Wirbelschleppen bilden sich als Randwirbel an den Rotorspitzen nicht nur von Windenergieanlagen, sondern auch bei Flugzeugen aus. Dadurch können die Flugsicherheit nachfolgender Flugobjekte beeinträchtigt werden. Ausbreitung und Auswirkung der Wirbelschleppen werden durch die Windgeschwindigkeit, die Größe und Anzahl der Rotorblätter sowie die Konfiguration der Windenergieanlage beeinflusst. Die Auswirkungen der Wirbelschleppen können durch einen ausreichenden Abstand – von anderen Windenergieanlagen und Flugobjekten – minimiert werden. Stetige Forschung und technologische Entwicklungen sollen helfen, die Auswirkungen von Wirbelschleppen zu minimieren und die Sicherheit und Effizienz von Windenergieanlagen weiter zu optimieren.<sup>20</sup>

## 2.5. Blattspitzengeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit an der Flügelspitze ist die größte am Rotorblatt einer Windenergieanlage auftretende Geschwindigkeit und entspricht der Umfangsgeschwindigkeit der Nabe. Die Rotornenn Drehzahl ist die Rotordrehzahl der Windenergieanlage, die normalerweise unabhängig von der Windgeschwindigkeit aufgrund des zulässigen Schallpegels nicht überschritten werden darf.<sup>21</sup> Die Rotornenn Drehzahl ergibt sich aus dem Rotordurchmesser und der Umfangsgeschwindigkeit an der Rotorblattspitze von etwa 72 bis 78 m/s.

Mit zunehmenden Rotordurchmesser steigt auch die Blattspitzengeschwindigkeit. Ein Rotordurchmesser von 100 Meter hat bei einer Rotornenn Drehzahl von 14,7 U/min eine maximale Umfangsgeschwindigkeit von 77 m/s (277 km/h). Bei einer langsamen Umdrehung von rund fünf Umdrehungen pro Minute (5 U/min), bewegt sich das äußere Ende des Rotorblatts mit einer Geschwindigkeit von 130 km/h. Bei 16,5 Umdrehungen pro Minute dreht sich das Ende des Rotorblattes dann mit 390 km/h.<sup>22</sup>

## 3. Auswirkungen auf Vögel, Fledermäuse und Insekten

Auswirkungen von Windenergieanlagen auf Vögel, Insekten und Fledermäuse hängen von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich der Standortwahl, der Art der Tierpopulationen in der Umgebung und der Gestaltung und Platzierung der Anlagen. Um die Auswirkungen auf die Tierwelt zu minimieren, werden vor dem Windparkbau Umweltverträglichkeitsprüfungen durchgeführt und Maßnahmen ergriffen, um Kollisionen und andere negative Effekte zu reduzieren. Die Rotorblätter der drehenden Rotoren stellen im Allgemeinen eine Gefahr für die Tierwelt, wie Fledermäuse, Vögel und Insekten dar. Vogel- oder Fledermausschutzsysteme oder die Standortwahl,

---

<sup>20</sup> pro-physik.de (2021). „Auf der Spur der Wirbelschleppen“, <https://www.pro-physik.de/nachrichten/auf-der-spur-der-wirbelschleppen>.

<sup>21</sup> Kusiek, A. (2022). „Windenergieanlagen: Technologie - Funktionsweise - Entwicklung“, Carl Hanser Verlag München 2022, Kapitel 10.

<sup>22</sup> <https://www.enercity-erneuerbare.de/infothek/wie-schnell-sind-windraeder>.  
[https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d1536-2/\\*/\\*Blattspitzengeschwindigkeit.html?op=Wiki.getwiki#:~:text=Die%20Blattspitzengeschwindigkeit%20ist%20die%20gr%C3%B6%C3%9Fte.Windgeschwindigkeit%20errechnet%20sich%20die%20Schnelllaufzahl](https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d1536-2/*/*Blattspitzengeschwindigkeit.html?op=Wiki.getwiki#:~:text=Die%20Blattspitzengeschwindigkeit%20ist%20die%20gr%C3%B6%C3%9Fte.Windgeschwindigkeit%20errechnet%20sich%20die%20Schnelllaufzahl).

die die Zugrouten und die bevorzugten Lebensräume der Tiere mit berücksichtigt, sollen helfen, Kollisionen zu vermeiden.

### 3.1. Onshore-Windenergieanlagen

#### 3.1.1. Vögel

Die im Februar 2023 in Gänze in Kraft getretene Novellierung des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) soll das artenschutzrechtliche Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen an Land verbessern. Im Rahmen der Novellierung sind unterschiedliche Länderregelungen vereinheitlicht worden. Darüber hinaus gibt es eine Standardisierung zur Beurteilung der Erhöhung des Tötungsrisikos für Brutvögel durch den Betrieb von Windenergieanlagen an Land. Auch die Voraussetzungen der artenschutzrechtlichen Ausnahme sollen konkretisiert werden. Die artenschutzrechtliche Prüfung erfolgt anhand einer abschließenden Liste von 15 kollisionsgefährdeten Brutvogelarten.<sup>23</sup>

Onshore-Anlagen können heutzutage mit Hilfe automatischer Vogeldetektionssysteme abschalten, wenn sich ein sogenannter „schlaggefährdeter“ Vogel nähert.<sup>24</sup>

#### 3.1.2. Fledermäuse

Windenergieanlagen erzeugen an ihren Rotoren lokal stark schwankende Luftdruckverhältnisse, welche Fledermäuse nicht durch ihr Echolot erkennen können. Plötzlicher Unterdruck sorgt dafür, dass ihre sackartigen Lungen wie ein Ballon schlagartig expandieren, wodurch angrenzende Adern und Venen reißen können. Vögel besitzen dagegen weniger flexible, röhrenförmige Lun-

---

<sup>23</sup> Bundesregierung (2022). „Windräder schneller bauen, Vögel schützen“, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/windkraft-artenschutz-2022454>.

Deutscher Bundestag (2023). Gesetzentwurf der Fraktionen SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP „Entwurf eines Vierten Gesetzes zur Änderung des Bundesnaturschutzgesetzes“, BT-Drs 20/2354, <https://dserver.bundestag.de/btd/20/023/2002354.pdf>.

Umweltministerkonferenz (2020). „Standardisierter Bewertungsrahmen zur Ermittlung einer signifikanten Erhöhung des Tötungsrisikos im Hinblick auf Brutvogelarten an Windenergieanlagen (WEA) an Land – Signifikanzrahmen“, [https://www.umweltministerkonferenz.de/documents/vollzugshilfe\\_signifikanzrahmen\\_11-12-2020\\_1608198177.pdf](https://www.umweltministerkonferenz.de/documents/vollzugshilfe_signifikanzrahmen_11-12-2020_1608198177.pdf), Seite 5.

Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG) Stand 08.12.2022, [https://www.gesetze-im-internet.de/bnatschg\\_2009/BNatSchG.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/bnatschg_2009/BNatSchG.pdf).

<sup>24</sup> Weinhold, N. Erneuerbare Energien (2022). „Rotmilane erkennen Gefahrenbereichs des Rotors“, 03/2022, Seite 40.

Detaillierte Informationen unter: Wulfert, K. et al. (2022). „Vögel und Windenergienutzung Best Practice-Beispiele und planerische Ansätze zur Konfliktlösung“, [https://www.natur-und-erneuerbare.de/fileadmin/Daten/Download\\_Dokumente/01\\_Skripte/BfN-Schriften-634-Voegel-Windenergie-2022.pdf](https://www.natur-und-erneuerbare.de/fileadmin/Daten/Download_Dokumente/01_Skripte/BfN-Schriften-634-Voegel-Windenergie-2022.pdf).

gen, in die Luft immer nur einbahnstraßenartig ein- und ausströmt, sodass ihnen starke Druckunterschiede nicht gefährlich werden können. Wie Vögel sind auch Fledermäuse kollisionsgefährdet.<sup>25</sup>

Bei der Betrachtung des Tötungsrisikos wäre generell zu bedenken, dass Fledermäuse bei Temperaturen unter 10°C und Windgeschwindigkeiten über acht Meter pro Sekunde meist gar nicht fliegen. Ab dieser Windgeschwindigkeit steigt jedoch erst die Nettoenergieproduktion von Windrädern.<sup>26</sup>

Das Verhalten von Fledermäusen und die Auswirkungen von Windenergieanlagen auf Fledermäuse untersuchen Forscher intensiv. Hierzu einige Beispiele:

Der Betrieb von Windenergieanlagen insbesondere im Wald führt zu Konflikten mit dem Fledermausschutz. Fledermäuse, die oberhalb der Baumkronen nach Insekten jagen, könnten direkt von den rotierenden Rotoren der Windenergieanlagen getötet werden oder Schaden durch ein Barotrauma<sup>27</sup> in den Luftverwirbelungen an den Rotorblättern erleiden. Fledermäuse, die in der Vegetation unter den Baumkronen jagen, verlieren durch die Rodungen einen Teil ihres Lebensraums. Forscher des Leibniz-Instituts für Zoo- und Wildtierforschung untersuchten Fledermäuse, die unterhalb der Baumkrone im engen Raum nach Nahrung suchen, sogenannte „Waldspezialisten“. Sie stellten fest, dass diese Waldspezialisten in der Nähe von Windenergieanlagen „deutlich weniger aktiv sind, insbesondere in der Nähe von Anlagen mit großen Rotoren, sowie in den Hochsommermonaten. Zudem nimmt die Aktivität dieser Fledermausart ab einer Entfernung von 450 Metern in Richtung der Anlagen um fast 50 Prozent ab. Windenergieanlagen würden, so die Forscher, „nicht nur eine Bedrohung für solche Fledermäuse darstellen, die oberhalb der Baumkronen nach Insekten jagen, sondern auch den Lebensraum für Fledermäuse, die unterhalb der Baumkrone in den Wäldern leben und dort nach Insekten jagen, beeinträchtigen.“

Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass Windenergieanlagen nicht in Wäldern, sondern in der offenen Landschaft aufzustellen und insbesondere naturnahe Wälder mit einer abwechslungsreichen Vegetationsstruktur als Standorte zu vermeiden sind. Sollten Windenergieanlagen dennoch im Wald errichtet werden müssen, so wären, nach Meinung der Forscher, Ausgleichsmaßnahmen unerlässlich.<sup>28</sup>

---

<sup>25</sup> Spektrum der Wissenschaft (2008). „Fledermaus-Impllosion durch Windräder“, <https://www.spektrum.de/news/fledermaus-implosion-durch-windraeder/965732>.

<sup>26</sup> NABU (2016). „Gefährlicher Flug in den Windpark“, <https://mecklenburg-vorpommern.nabu.de/tiere-und-pflanzen/aktionen-und-projekte/fledermauszug/21333.html>.

<sup>27</sup> Barotrauma: Eine Gewebeschädigung, die durch eine Veränderung des Drucks entsteht, durch den das in den verschiedenen Körperstrukturen enthaltene Gas verdichtet wird oder sich ausdehnen kann. Quelle: <https://www.msmanuals.com/de-de/heim/verletzungen-und-vergiftung/tauchverletzungen-und-verletzungen-durch-druckluft/barotrauma>.

<sup>28</sup> Leibniz-Institut für Zoo- und Wildtierforschung (Leibniz-IZW) im Forschungsverbund Berlin e.V. (2022). „Windräder in Wäldern verdrängen Waldfledermäuse“, <https://www.izw-berlin.de/de/pressemitteilung/windraeder-in-waeldern-verdraengen-waldfledermaeuse.html>.

Eine Forschungsgruppe unter Federführung des Leibniz-Instituts für Zoo- und Wildtierforschung befasst sich speziell mit artenschutzrechtlichen Aspekten der Windkraftplanung im Wald im Zusammenhang mit dem Schutz von Fledermäusen. Die Autoren erläutern die verwendeten Methoden und den rechtlichen Rahmen. Im Fokus stehen dabei die Vermeidung direkter Tötungen von Fledermäusen und die Verringerung der Beeinträchtigung ihres Lebensraums. Die Autoren stellen länderspezifische Arbeitshilfen zur Verfügung, die den Umfang der Untersuchungen, die erforderlichen Erfassungsmethoden und den zeitlichen und räumlichen Rahmen festlegen. In diesen Arbeitshilfen werden auch Maßnahmen zur Kompensation potenziell negativer Auswirkungen eines Eingriffs empfohlen.<sup>29</sup>

Dabei unterstützt das Tool „ProBat“, eine softwarebasierte Methode zur Festlegung fledermausfreundlicher Betriebsalgorithmen für Windenergieanlagen. ProBat basiert auf Forschungsergebnissen über das Verhalten von Fledermäusen und deren Interaktion mit Windenergieanlagen. Das Tool berücksichtigt verschiedene Faktoren wie die Flugroute von Fledermäusen, deren Aktivitätsmuster und die Betriebsweise einzelner Windenergieanlagen. Auf Grundlage dieser Informationen werden Empfehlungen zur Optimierung des Betriebs der Anlagen gegeben, um das Risiko von Kollisionen zu verringern. Es kann beispielsweise die Abschaltung der Windturbinen während Zeiten erhöhter Fledermausaktivität oder die Anpassung der Rotorblattgeschwindigkeit beinhalten. Das ProBat-Tool unterstützt zudem die Planung und den Betrieb von Windparks, um eine bessere Verträglichkeit mit dem Fledermausschutz zu erreichen.<sup>30</sup>

### 3.1.3. Insekten

Die Insektenflughöhe hängt von verschiedenen Faktoren, wie Insektengattung, Wetter, Luftdruck, Tagestemperatur und den Windverhältnissen ab. Im Rahmen des Projekts „FliWip“ haben Forscher des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) die Wechselwirkungen von Fluginsekten und Windparks untersucht. Die Forscher gehen davon aus, dass sich Fluginsekten aufgrund ihrer Nahrungsquellen und Nisthabitaten generell bodennah in Höhen zwischen 0 und 30 m aufhalten und überwiegend nur in Höhen von 1 bis 2 m anzutreffen sind. Aufgrund der zunehmenden Nabenhöhe treten mit Windenergieanlagen, nach Meinung der Forscher, weniger

---

Ellerbrok, J. et al., Journal of Applied Ecology (2022). „Activity of forest specialist bats decreases towards wind turbines at forest sites“, <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2664.14249>.

Hurst, J. et al. (2020). „Windkraft im Wald und Fledermausschutz – Überblick über den Kenntnisstand und geeignete Erfassungsmethoden und Maßnahmen“, [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-61454-9\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-61454-9_2)  
Detaillierte Informationen zum Kenntnisstand der Forschung unter: Voigt, C.C. (Hrsg.) (2020). „Evidenzbasierter Fledermausschutz in Windkraftvorhaben“, Springer Spektrum 2020.

<sup>29</sup> Hurst, J. et al. (2020). „Windkraft im Wald und Fledermausschutz – Überblick über den Kenntnisstand und geeignete Erfassungsmethoden und Maßnahmen“, [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-61454-9\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-61454-9_2).

Veith, M. Veith, M. (2023). „Windkraft und Fledermausschutz im Wald – eine kritische Betrachtung der Planungs- und Zulassungspraxis“, Kapitel 7, [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-65745-4\\_7](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-65745-4_7).

in Voigt, C.C. (2023). „Evidenzbasiertes Wildtiermanagement“.

<sup>30</sup> Naturstiftung David, ProBat (2023). <https://www.probat.org/>.

Kollisionen auf. Allerdings nutzen Insektenarten die höheren Windgeschwindigkeiten in größeren Höhen in Zeiten ihrer Fortpflanzung. Sie fliegen zu dieser Zeit in Höhen von 80 bis 1.200 m. Die Experten haben das Kollisionsrisiko auf 5 % geschätzt. Die Forscher empfehlen eine „empirische Überprüfung der in der Studie theoretisch berechneten Verluste, um die Zusammenhänge von Insektenmigration und Windparkbetrieb besser verstehen und zeitnah Maßnahmen zur Überwachung und Vermeidung von Insektenschlag entwickeln und umsetzen zu können.“<sup>31</sup>

Die Reduzierung der lokalen Anzahl an Insekten, kann auch Auswirkungen auf die Nahrungsgrundlage von Vögeln und Fledermäusen haben, die sich von Insekten ernähren.

### 3.2. Offshore-Windenergieanlagen

Das im Januar 2022 in Kraft getretene „Wind-auf-See-Gesetz“ (WindSeeG) soll den Ausbau der Windenergieanlagen auf See fördern. Das Gesetz sieht im Rahmen des Artenschutzes auch die Bündelung von Umweltschutzprüfungen vor.<sup>32</sup> Die Prüfungen erfolgen in der Planung und im Betrieb der Windenergieanlagen und untersuchen mögliche Auswirkungen auf marine Säugetiere, Rast- und Zugvögel, Fledermäuse, sowie das Benthos<sup>33</sup> und Fischpopulationen.<sup>34</sup>

Im Folgenden wird auf die Beeinträchtigung von Vögeln und Fledermäusen durch die Rotoren von Offshore-Windenergieanlagen eingegangen.

---

<sup>31</sup> BWE (2019). „Windenergie und Insekten“, [https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/03-naturschutz/20190313\\_Infopapier\\_Windenergie\\_Insekten.pdf](https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/03-naturschutz/20190313_Infopapier_Windenergie_Insekten.pdf).

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (2018). Projekt „FliWip“, [https://www.dlr.de/tt/desktopdefault.aspx/tabid-18036/28636\\_read-74370/](https://www.dlr.de/tt/desktopdefault.aspx/tabid-18036/28636_read-74370/).

<sup>32</sup> Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See (WindSeeG), <https://www.gesetze-im-internet.de/windseeg/>.

Die Bundesregierung (2022). „Mehr Windenergie auf See“, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/windenergie-auf-see-gesetz-2022968>.

<sup>33</sup> Benthos = Gesamtheit aller bodenbewohnenden Organismen.

<sup>34</sup> Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2013). „Standard Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4)“, [https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/Anlagen/Downloads/Offshore/Standards/Standard-Auswirkungen-Offshore-Windenergieanlagen-Meeresumwelt.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=24](https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/Anlagen/Downloads/Offshore/Standards/Standard-Auswirkungen-Offshore-Windenergieanlagen-Meeresumwelt.pdf?__blob=publicationFile&v=24).

Bundesamt für Naturschutz (2023). „Offshore-Windkraft“, <https://www.bfn.de/offshore-windkraft>.

Bundesamt für Naturschutz (2023). „Auswirkungen“, <https://www.bfn.de/auswirkungen>.

Bundesamt für Naturschutz (2023). „Minimierung der Belastungen“, <https://www.bfn.de/minimierung-der-belastungen>.

### 3.2.1. Vögel

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie weist daraufhin, dass „die artspezifische Kollisionsgefahr für Zugvögel mit Offshore-Windenergieanlagen weitgehend unbekannt ist und in ihrem Ausmaß bisher nicht zuverlässig eingeschätzt werden kann.“ Der Grund liegt in der personengestützten Untersuchung durch Zählung der Kadaver, die auf See nicht so möglich ist, wie an Land.<sup>35</sup> Um Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen, wie die Kollisionsgefahr für Seevögel zu minimieren, sind Bereiche, die als Rast-, Nahrungs- oder Überwinterungsgebiet für diese Arten von besonderer Bedeutung sind, nach Meinung der Experten, von der Standortwahl auszuschließen. Dazu werden Konzentrationsgebiete sensibler Arten und ausgewiesene Vogelschutzgebiete bei zukünftigen Planungen freigehalten. Darüber hinaus sind (Luft-)Korridore zwischen verschiedenen Seevogelhabitaten in der Planung zu berücksichtigen. Zusätzlich können Radaranlagen die Abschaltung der Windanlagen ermöglichen, wenn sich Zugvögel nachts nähern. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass Zugvögel die Anlagen um- sowie überfliegen und die Kollisionsgefahr gering ist.<sup>36</sup>

Die Auswirkungen von Windenergieanlagen auf See und das Verhalten von Seevögeln untersuchen Forscher intensiv. Eine Studie zur Erfassung und Quantifizierung des Meideverhaltens von Seevögeln in der Nähe von Offshore-Windenergieanlagen und ihrem Kollisionsrisiko kam zu dem Ergebnis, dass das Ausweichverhalten höher als vermutet ist. Während der zweijährigen Untersuchungszeit beobachteten die beteiligten Wissenschaftler in einem Windpark vor der Küste Großbritanniens sechs Kollisionen.<sup>37</sup> In sich anschließenden 10 Forschungsprojekten finden vertiefende Untersuchungen statt. Dazu gehört auch das Seevögelmonitoring mit dem Ziel Kollisionsmodelle zu entwickeln.<sup>38</sup>

---

<sup>35</sup> Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2022). „Flächenvoruntersuchung N-6.6“, [https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Flaechenvoruntersuchung/\\_Anlagen/Down-loads/AJ2024\\_N6\\_6N6\\_7/N-06-06\\_2019-2020\\_MigBir\\_final-report\\_DE.pdf?\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Flaechenvoruntersuchung/_Anlagen/Down-loads/AJ2024_N6_6N6_7/N-06-06_2019-2020_MigBir_final-report_DE.pdf?_blob=publicationFile&v=4).

<sup>36</sup> Bundesamt für Naturschutz (2020). „Technische Systeme zur Minderung von Vogelkollisionen an Windenergieanlagen“, <https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/service/Dokumente/skripten/skript571.pdf>.

Bundesamt für Naturschutz (2018). „Wirksamkeit von Maßnahmen gegen Vogelkollisionen an Windenergieanlagen“, <https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/service/Dokumente/skripten/skript518.pdf>.

Visuelle und Radaruntersuchungen zum Flugverhalten einzelner Vogelarten unter: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (2020). „Vogelzug über der deutschen AWZ der Ostsee – Methodenkombination zur Einschätzung des Meideverhaltens und Kollisionsrisikos windkraftsensibler Arten mit Offshore-Windenergieanlagen“, [https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Flaechenvoruntersuchung/Verfahren/O-01-03/\\_Anlagen/Downloads/O-01-03\\_Vogelzugstudie.pdf?\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Flaechenvoruntersuchung/Verfahren/O-01-03/_Anlagen/Downloads/O-01-03_Vogelzugstudie.pdf?_blob=publicationFile&v=1).

<sup>37</sup> Skov, H., et al. The Carbon Trust. United Kingdom (2018). Final report „ORJIP Bird Collision and Avoidance Study“, [https://ctprodstorageaccountp.blob.core.windows.net/prod-drupal-files/documents/resource/public/orjip-bird-collision-avoidance-study\\_april-2018.pdf](https://ctprodstorageaccountp.blob.core.windows.net/prod-drupal-files/documents/resource/public/orjip-bird-collision-avoidance-study_april-2018.pdf), Seite 12, Offshore Renewables Joint Industry Programme (ORJIP).

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (2023). Vogelzug über Nord- und Ostsee: Zugmuster und mögliche Auswirkungen der Offshore-Windenergie (TRACKBIRD), <https://www.ftz.uni-kiel.de/de/forschungsabteilungen/ecolab-oekologie-mariner-tiere/laufende-projekte/trackbird>.

<sup>38</sup> CarbonTrust (2023). „Offshore Renewables Joint Industry Programme (ORJIP) for Offshore Wind“, Stage 2, <https://www.carbontrust.com/our-work-and-impact/impact-stories/offshore-renewables-joint-industry-programme-orjip-for-offshore-wind>.



Forscher des Max-Planck-Instituts für Verhaltensbiologie und der University of East Anglia haben Hotspots in Europa identifiziert, an denen Vögel durch Windkraftanlagen und Stromleitungen besonders gefährdet sind. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ihrer Arbeit lag auf dem Flugverhalten von Vogelarten, insbesondere den Schwarzmilanen, die mit Windenergieanlagen kollidieren können. Die Forscher stellten fest, dass Schwarzmilane die Turbinen in einer Entfernung von einem Kilometer umfliegen. Weitere Datenerhebungen und -auswertungen sollen helfen, die Auswirkungen auf die Tierwelt beim Ausbau der Windenergie zu minimieren.<sup>39</sup>

### 3.2.2. Fledermäuse

Fledermäuse leben nicht nur an Land. Es gibt Arten, die auch über die Nord- und Ostsee wandern. Insbesondere in Küstenregionen können Offshore-Windenergieanlagen diese Fledermäuse gefährden. Dies gilt insbesondere dann, wenn in Nord- und Ostsee während der Wanderungszeiten im Frühjahr und im Spätsommer erhöhte Fledermausaktivitäten zu verzeichnen sind.

Laufende Untersuchungen sollen zeigen, zu welchen Zeiten die Fledermäuse fliegen, wo sich die Flugrouten befinden und mit welchen Schutzmaßnahmen Kollisionen weitgehend vermieden werden können. Da Fledermäuse die Meere nur während weniger Nächte – windarme Nächte in den Wanderperioden – queren, wären durch Schutzmaßnahmen wie die Verlangsamung der Rotordrehzahl oder die Abschaltung, keine hohen Ertragseinbußen zu erwarten.<sup>40</sup>

\*\*\*

---

<sup>39</sup> Max-Planck-Instituts für Verhaltensbiologie (2022). „Flug in eine saubere und sichere Zukunft“, <https://www.mpg.de/18547303/windkraft-vogel-tod>.

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (2023). „Ausbau der Offshore-Windenergie in Deutschland: Auswirkungen auf Seevögel in Nord- und Ostsee (OWP-Seevögel)“, <https://www.ftz.uni-kiel.de/de/forschungsabteilungen/ecolab-oekologie-mariner-tiere/laufende-projekte/owp-seevoegel>.

<sup>40</sup> Bundesamt für Naturschutz (2023). „Batmobil – Auswirkungen von Offshore-Windparks auf Fledermäuse in Nord- und Ostsee“, <https://www.bfn.de/projektsteckbriefe/batmobil-auswirkungen-von-offshore-windparks-auf-fledermaeuse-nord-und-ostsee>.

Detaillierte Beschreibungen zu Untersuchungen an Wanderfledermäusen unter: Kruszynski, C. et al. (2020). „Identifying migratory pathways of Nathusius' pipistrelles (*Pipistrellus nathusii*) using stable hydrogen and strontium isotopes“, <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/rcm.9031>.