



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG

Energiewende und der Erhalt der Biodiversität in Deutschland – eine Metastudie



Silvana Bürck, Viviann Bolte,
Horst Fehrenbach, Annika Wehrle

Heidelberg, 2025

Kontakt: viviann.bolte@ifeu.de; horst.fehrenbach@ifeu.de

Zitierweise: Bürck, S.; Bolte, V., Fehrenbach, H.; Wehrle, A. 2025: Energiewende und der Erhalt der Biodiversität in Deutschland. Eine Metastudie. Heidelberg

Im Auftrag der gemeinnützigen MVV Stiftung Zukunft

<https://www.mvv-stiftung-zukunft.de/>



Bildnachweis: gpitfoto - stock.adobe.com (Deckblatt oben), pkawasaki - stock.adobe.com (Deckblatt unten)

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

der Schutz des Klimas und der Erhalt der Biodiversität sind gleichrangige Menschheitsaufgaben. Die Energiewende kann den Klimawandel eindämmen und dadurch auch die Vielfalt von Ökosystemen, Arten und Genen bewahren. Gleichwohl gibt es Spannungsfelder: Die Nutzung erneuerbarer Energien wie Windkraft, Photovoltaik, Geothermie oder Biomasse ist einerseits unverzichtbar, um die Klimaziele zu erreichen, erfordert aber andererseits erhebliche Eingriffe in Landschaften und Ökosysteme.

Wie können wir diesen Zielkonflikte auflösen und eine naturgerechte Energiewende gestalten? Um diese Fragen fundiert zu beleuchten, hat die gemeinnützige MVV Stiftung Zukunft das ifeu-Institut beauftragt, den aktuellen Stand der Forschung zum Spannungsfeld zwischen Energiewende und Biodiversität zusammenzutragen – in einer Weise, die auch für Nicht-Fachleute leicht zugänglich ist. Die vorliegende Metastudie gibt einen Überblick über die Auswirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien auf die Biodiversität, stellt erfolgreiche Praxisbeispiele vor und zeigt auf, wo noch Forschungs- und Handlungsbedarf besteht.

Die Ergebnisse machen Mut: Viele Spannungsfelder können aufgelöst werden, beispielsweise wenn Photovoltaik-Anlagen vermehrt auf versiegelten Flächen installiert werden, um ökologisch wertvolle Flächen zu schonen. Und es gibt Beispiele, die zeigen, wie Energiewendeprojekte sogar die lokale Artenvielfalt erhöhen können. Da diese Lösungen aber oft mit höheren Kosten verbunden sind, kommt es zu schwierigen Abwägungsentscheidungen zwischen drei konkurrierenden Zielen: Biodiversität, schnellstmögliche Umsetzung der Energiewende und Begrenzung der Energieerzeugungskosten, um die Akzeptanz der Bevölkerung zu erhalten. Diese Ausbalancierung zu meistern, erfordert mehr Forschung zu den komplexen Wechselwirkungen zwischen Technologie und Ökologie, detailliertere Monitoring-Daten zum Biodiversitätszustand von Flächen, effiziente behördliche Verfahren, intelligente Planungsinstrumente und technische Innovationen. Die MVV Stiftung Zukunft möchte dazu beitragen, diese "dicken Bretter" zu bohren.

Wir hoffen, dass dieser Sachstandsbericht Denkanstöße liefert und eine Grundlage für informierte und konstruktive Diskussionen schafft – mit dem Ziel, gemeinsam Lösungen für eine Energiewende zu finden, die sowohl dem Klimaschutz als auch der Biodiversität gerecht wird.

Dr. Oliver Kopp

Vorsitzender des Stiftungsvorstands



Inhalt

| | |
|---|-----------|
| Vorwort | 2 |
| Inhalt | 3 |
| Kurzfassung | 4 |
| 1 Hintergründe | 5 |
| 2 Methodik und Berichtstruktur | 9 |
| 3 Das Spannungsfeld Ausbau erneuerbarer Energien und Biodiversität | 10 |
| 3.1 Windenergie | 11 |
| 3.2 Solarenergie und Solarthermie | 18 |
| 3.3 Bioenergie | 24 |
| 3.4 Wasserkraft | 31 |
| 3.5 Geothermie | 36 |
| 3.6 Übertragungsnetze | 41 |
| 4 Fazit | 44 |
| Literaturverzeichnis | 47 |

Kurzfassung

Zu den vielen gravierenden Folgen des Klimawandels zählt auch der Verlust von Arten und damit der Biodiversität. Viele Pflanzen- und Tierarten können sich nicht rasch genug an die Veränderungen anpassen. Der Haupttreiber für den Klimawandel sind die Emissionen von Treibhausgasen, vor allem verursacht durch die Energieversorgung. Ein zentraler Bestandteil der Klimaschutzstrategie ist daher die Energiewende von fossilen Energien hin zu den Erneuerbaren.

Die Energiewende bringt jedoch ebenfalls Herausforderungen für den Naturschutz mit sich. Neue Anlagen und der Netzausbau können Eingriffe und Veränderungen bestehender Landschaftsstrukturen und Ökosysteme bedeuten. Das kann sich direkt und indirekt auf die Biodiversität auswirken – negativ wie auch positiv. So können von großen Windenergieanlagen Störwirkungen, insbesondere durch Kollisionsrisiken für Vögel und Fledermäuse, ausgehen. Großflächige Photovoltaikanlagen können zwar das Landschaftsbild beeinträchtigen, aber auch neue Habitatstrukturen schaffen. Wasserkraftanlagen wiederum verändern Fließgewässereigenschaften und können durch Barrierewirkungen die Wanderungsbewegungen aquatischer Arten einschränken.

Auswirkungen durch geänderte Landnutzung können vor allem mit der Gewinnung von Bioenergie einhergehen. Indirekte Landnutzungsänderungen, die sich aus dem steigenden Bedarf an Energiepflanzen oder aus der Verdrängung anderer Flächennutzungen ergeben, können zusätzliche ökologische Folgen haben. Neben diesen Effekten sind auch stoffliche Einträge, etwa durch den Anbau von Biomasse sowie Veränderungen in der landwirtschaftlichen Flächennutzung, von Bedeutung. Geothermische Anlagen und die notwendige Infrastruktur für den Stromtransport können ebenfalls lokale Lebensräume verändern und fragmentieren, was insbesondere in naturnahen Landschaften von Relevanz sein kann.

Um die potenziellen negativen Effekte des Ausbaus erneuerbarer Energien auf die Biodiversität zu minimieren, sind eine sorgfältige Standortwahl, technologische Anpassungen sowie übergreifende Steuerungsmechanismen erforderlich. Forschung ist insbesondere in den Bereichen der kollisionsvermeidenden Technologien, der optimierten Flächennutzung sowie der Wechselwirkungen zwischen Energieinfrastruktur und Artenvielfalt notwendig. Der Weg zu einer umweltverträglichen Energiewende erfordert eine ausgewogene Abwägung zwischen den Anforderungen des Klimaschutzes und dem Erhalt ökologischer Strukturen.

In dieser Studie werden für die wichtigsten Arten erneuerbarer Energie mit dem Fokus auf Stromerzeugung zunächst die jeweils möglichen Auswirkungen auf Biodiversität beschrieben und eingeordnet. In einem zweiten Schritt werden jeweils Möglichkeiten und Maßnahmen beschrieben, wie diese Auswirkungen vermieden oder verringert werden können. Wo möglich, werden auch positive Beispiele gegeben, die zeigen, wie das Spannungsfeld zwischen dem Ausbau der erneuerbaren Energien und möglichen ökologischen Konflikten aufgelöst werden kann.

1 Hintergründe

In der heutigen Zeit des Klimawandels und des Biodiversitätsverlustes ist es essenziell, Wege zu finden, wie Klimaschutz und Biodiversitätsschutz Hand in Hand gehen können. Während in den vergangenen Jahrzehnten ein starker Fokus auf den Klimaschutz gelegt wurde, ist spätestens seit der Veröffentlichung des Berichts des Weltbiodiversitätsrates IPBES¹ aus dem Jahr 2019 bekannt (IPBES 2019), dass eine weltweite Biodiversitätskrise besteht. Einer konservativen Abschätzung zufolge gibt es auf der Erde ca. acht Millionen Arten (Sweetlove 2011). Den Berichten des IPBES zufolge sind davon mindestens eine Million vom Aussterben bedroht, einige davon bereits in den kommenden Jahrzehnten. Dazu kommt, dass die Geschwindigkeit des Artensterbens rapide zugenommen hat (IPBES 2019). Manche Autor*innen sehen in der Biodiversitätskrise ein sechstes Massenaussterben (Rull 2022). Neben der Artenvielfalt zählen auch die Vielfalt der Lebensräume und die genetische Vielfalt zur Biodiversität. Die Hauptursachen des Biodiversitätsverlustes sind nach dem Weltbiodiversitätsrat (IPBES 2019) in folgender Reihenfolge:

1. die Landnutzungsänderung, v. a. die Expansion der Landwirtschaft in den Tropen,
2. die Ressourcenexploitation, v. a. die direkte Ausbeutung von Fisch und Meeresfrüchten,
3. der Klimawandel,
4. die Verschmutzung mit Luftschadstoffen, überschüssigen Nährstoffen sowie Mikro- und Nanopartikel aus Plastik und
5. die Ausbreitung von invasiven Arten.

Dies bedeutet, dass der Klimawandel, beispielsweise durch sich verändernde Habitate, maßgeblich zum Biodiversitätsverlust beiträgt. Gleichzeitig sind sich natürlich entwickelnde Ökosysteme effektive Kohlenstoffspeicher und spielen somit eine zentrale Rolle im Klimaschutz (Böttcher et al. 2021). Durch den kontinuierlichen Aufwuchs von Biomasse in der Vegetation werden klimawirksame Gase der Atmosphäre entzogen. Hinzu kommt, dass Biodiversität einen Beitrag zur Anpassung von Ökosystemen an sich verändernde Klimaverhältnisse leistet. Somit trägt Biodiversität zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung bei (Völler et al. 2022). Dies bedeutet, der Klimaschutz ist auf den Biodiversitätsschutz angewiesen und vice versa.

Die Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energieträger gilt als wichtige Voraussetzung, um den Klimawandel zu verlangsamen und das deutsche Klimaziel der Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 zu erreichen. Während der Anteil der erneuerbaren Energien im Jahr 2023 bei ca. 20 % des deutschen Endenergieverbrauchs lag, soll er in den kommenden Jahren weiterhin stark ansteigen. Die Europäische Union hat für das Jahr 2030 eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am europäischen Endenergieverbrauch auf 42,5 % in der

¹ IPBES: Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services

RED III festgelegt (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2023). Um diese Ziele zu erreichen, ist folglich ein weiterer Ausbau der erneuerbaren Energien erforderlich.

Mit dem Beschleunigungsgesetz zur Umsetzung der RED III im Bereich Windenergie an Land und Solarenergie sowie den darin verankerten Maßnahmen soll perspektivisch der Ausbau weiter beschleunigt werden (BMUV 2024; Deutscher Bundestag 2024). Dazu sind auch die Verfahrenserleichterungen nach Windenergieflächenbedarfsgesetz (WindBG) zu zählen, wonach für bis 30. Juni 2025 beantragte WEA keine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchgeführt werden muss, wenn die Anlage in einem ausgewiesenen Beschleunigungsgebiet liegt (sogenannte Go-Area). Bei der Ausweisung solcher Gebiete müssen erhebliche Umweltauswirkungen ausgeschlossen sowie eine Strategische Umweltprüfung (SUP) und ggf. auch FFH-Prüfungen durchgeführt werden. Für PV-Freiflächenanlagen gilt zwar grundsätzlich keine UVP-Pflicht, sie können aber auch nur im Geltungsbereich eines Bebauungsplans verwirklicht werden. Und bei der Aufstellung eines Bebauungsplans müssen die Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege abgewogen werden. Grundsätzlich ist die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung in der Abwägung zu berücksichtigen, nach welcher Eingriffe in Natur und Landschaft demnach vorrangig zu vermeiden sind. Ist dies nicht möglich, müssen Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen festgesetzt werden (KNE 2024a).

Der Ausbau erneuerbarer Energien ist ein wichtiger Bestandteil im Klimaschutz, kann jedoch lokale Auswirkungen auf die Biodiversität mit sich bringen. Nur beispielhaft sei an dieser Stelle die Landnutzungsänderung zu nennen, welche eine Konsequenz des Ausbaus von erneuerbaren Energieträgern ist und gleichzeitig einen zentralen Treiber des Biodiversitätsverlustes darstellt. Der Umfang und die Stärke des Eingriffs in die Natur ist dabei maßgeblich von der Standortwahl abhängig. Jedoch spielt auch die Art der erneuerbaren Energieträger eine essenzielle Rolle, ebenso wie die Art und Weise, wie diese Energieanlagen räumlich und technisch konzipiert werden.

Diese Umstände nehmen auch Einfluss auf die Kosten, die sich im Ausbau der erneuerbaren Energien und den Maßnahmen zur Minderung von nachteiligen Effekten auf die Biodiversität ergeben, sodass diese einzelfallspezifisch ausfallen. Diese Maßnahmen können bereits bei der Planung an der Anlage selbst ansetzen, sodass die Effekte vermieden oder vermindert werden. Nicht vermeidbare Eingriffe müssen nach §15 BNatSchG durch den Verursacher durch Ausgleichsmaßnahmen kompensiert werden. Sind diese nicht möglich, fallen Ersatzzahlung an. Geregelt ist dies auf Länderebene, wobei seit 2020 als bundesweite Handreichung die Bundeskompensationsverordnung (BKompV) gilt. Darin werden z. B. für Windenergieanlagen je nach Turmhöhe und Wertstufe des Landschaftsbilds Kostensätze angegeben (Bundesregierung 2020). Nach Erhebungen für das BMWK lagen die Kosten für Kompensationsmaßnahmen für Windenergieanlagen, die zwischen 2019 und 2021 in Betrieb genommen wurden, bei 29 € je KW (Lüers und Wallasch 2023). Dies ist bei Gesamtinvestitionskosten von über 1.500 € pro KW ein überschaubarer Bereich. Allerdings können auch weitere Kosten durch Maßnahmen in den regelmäßigen Betriebskosten anfallen.

In diesem Zusammenhang muss jedoch auch auf die Kosten eines voranschreitenden anthropogenen Klimawandels hingewiesen werden. Hier wird für die spezifisch für Deutschland entstehenden Kosten beispielhaft auf die Studie von Prognos (2022) und für eine globale Perspektive beispielsweise auf Kotz et al. (2024a; b) hingewiesen. Durch den Verlust von Biodiversität entstehen ebenfalls ökonomische Kosten. Beispielhaft kann hier der Verlust von bestäubenden Insekten genannt werden, der weltweit landwirtschaftliche Erträge im Wert von bis zu 577 Milliarden US-Dollar gefährdet (IPBES 2019).

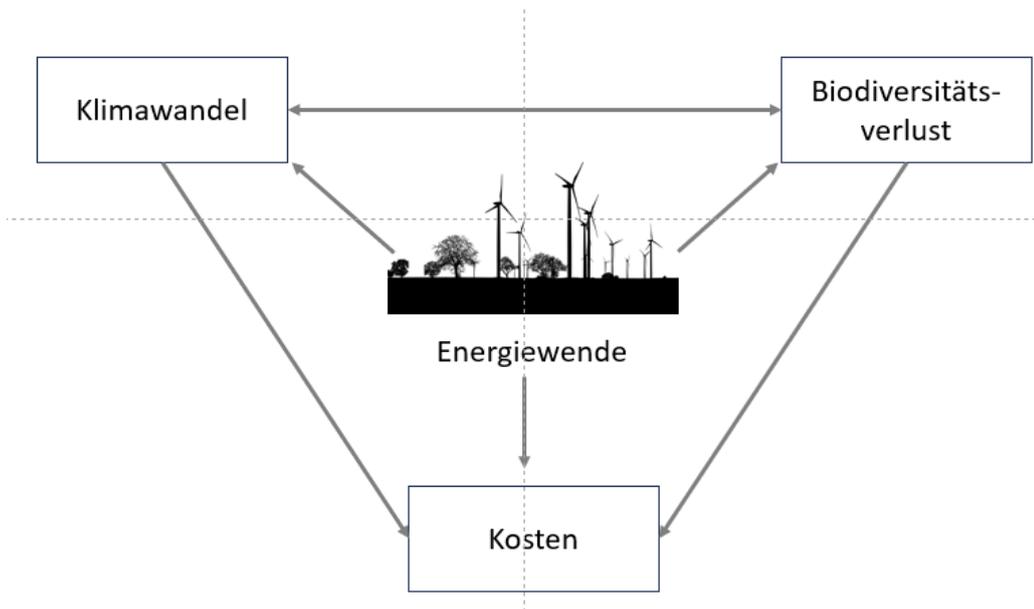
Vor diesem Hintergrund soll die vorliegende Studie das Spannungsfeld zwischen dem Ausbau erneuerbare Energieträger und Biodiversität beleuchten und Möglichkeiten eines naturverträglichen Ausbaus aufzeigen. Dazu wird für jede Technologie bzw. jeden Energieträger betrachtet, welche Auswirkungen dieser Energieträger auf die Biodiversität haben kann. Dabei werden ausschließlich dezentrale Technologien herangezogen. Jeweils im Anschluss werden Möglichkeiten der Verringerung der Auswirkungen beschrieben. Die Metastudie endet mit einem Fazit, in dem die zentralen Erkenntnisse zusammengetragen und die im Rahmen der Studie identifizierten Forschungslücken aufgezeigt werden.

Das Schema in Abbildung 1 gibt eine Skizze von wesentlichen übergreifenden Elementen dieses Spannungsfelds wieder. Sie zeigt ein grob vereinfachtes Beziehungsgeflecht, in welchem sich die Energiewende mit Biodiversitätsverlust, Klimawandel und Kosten befindet. Die wesentlichen Zusammenhänge werden wie folgt beschrieben:

- Die Energiewende ist eine zentrale Maßnahme gegen den Klimawandel.
- Durch den Bau und den Betrieb von Anlagen für erneuerbare Energie können Lebensräume verloren gehen oder verändert werden – mit Auswirkungen auf die Biodiversität, die gemäß der Rechtslage vermieden, vermindert oder letztlich ausglich werden sollen.
- Die Energiewende ist mit erheblichen Kosten für die Gesellschaft verbunden – zusätzliche Maßnahmen zum Schutz der Biodiversität können weitere Kosten verursachen.
- Klimawandel und auch der Biodiversitätsverlust erzeugen jedoch selbst erhebliche Kosten.
- Und letztlich zählt der Klimawandel zu den größten Treibern für den Biodiversitätsverlust – und auch die Degradierung von Ökosystemen führt ihrerseits zum Verlust von in der Biomasse und in Böden gebundenem Kohlenstoff und somit zu CO₂ Emissionen.

Mit den verfügbaren finanziellen Mitteln sind somit sowohl der Klimawandel als auch der Biodiversitätsverlust zu begrenzen. Idealerweise wird die Energiewende möglichst so umgesetzt werden, dass ein Optimum zwischen Klima- und Biodiversitätsschutz erreicht wird. Angesichts der heutigen Datenlage und der Komplexität der Zusammenhänge lässt sich dieses Optimum nicht einfach ableiten. Die Studie soll aber Hinweise, die in diese Richtung führen, aufarbeiten und zusammenfassen.

Abbildung 1: Schema zur Energiewende im Spannungsfeld von Biodiversitätsverlust, Klimawandel und Kosten.



Darstellung: ifeu

In diesem Sinne hat die Studie nicht den Anspruch einer vollständigen Erfassung des weiten Feldes an Veröffentlichungen zu diesem Thema. Vielmehr werden als wesentlich erachtete Studien herangezogen, um den Themenkomplex zu beleuchten. Die Auswirkungen von erneuerbaren Energien auf die Biodiversität sind abhängig von der gewählten Technologie und dem Standort und können artspezifisch unterschiedlich sein. Das Ziel der Studie ist es, zu weiteren Forschungen und konkreten Projektinitiativen in den beschriebenen Handlungsfeldern zu motivieren.

2 Methodik und Berichtsstruktur

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine Metastudie, d. h. die Inhalte entstammen einer umfassenden Literaturanalyse, die verschiedene Quellen und Perspektiven zusammenführt. Im Fokus standen Veröffentlichungen wissenschaftlicher Einrichtungen und Forschungsinstitute, die fundierte Erkenntnisse zu den komplexen Wirkungen erneuerbarer Energien auf Biodiversität liefern. Ergänzend dazu wurden Berichte und wissenschaftliche Arbeiten herangezogen, die in vom Bund geförderten Projekten entstanden sind. Darüber hinaus flossen Publikationen von Nichtregierungsorganisationen (NGOs) in die Analyse ein. Der Fokus der ausgewählten Studien liegt auf Deutschland oder auf geographische Räume, die eine Übertragbarkeit der Gegebenheiten auf Deutschland zulassen.

Bei der Sichtung und Bewertung der relevanten Literatur spielten thematische Schlagwörter eine zentrale Rolle. Konzepte wie Biodiversität, Artenvielfalt, Habitatverlust und erneuerbare Energien wurden in den ausgewerteten Dokumenten gezielt betrachtet, um sowohl Wirkungen als auch potenzielle Zielkonflikte herauszuarbeiten. Die Analyse und Auswertung der Literatur erfolgte mit Fokus auf potenzielle Konflikte zwischen erneuerbaren Energien und Biodiversität sowie mögliche Lösungsansätze für diese. Spannungsfelder zwischen erneuerbaren Energien und Biodiversität sind sowohl abhängig von der ausgewählten Technologie als auch vom Standort, an der sie steht. Hieraus ergeben sich eine Vielzahl an möglichen Spannungsfeldern, denen in dieser Studie nicht im Detail Rechnung getragen werden kann. Diese Studie konzentriert sich daher auf das übergeordnete Spannungsfeld und geht nur beispielhaft auf standort- und artspezifische Situationen ein.

Die Auswahl an erneuerbaren Energien konzentriert sich auf die für Deutschland wesentlichen Arten, wie Windenergie, Solarenergie und Solarthermie, Bioenergie und Wasserkraft, sowie die bislang noch wenig etablierte Geothermie. Zusätzlich wird der Ausbau der Übertragungsnetze betrachtet.

Für jede Energieart werden in einem eigenen Kapitel zunächst die potenziellen Auswirkungen auf Biodiversität beschrieben und im Anschluss Möglichkeiten und Maßnahmen beschrieben, wie diese Auswirkungen vermieden oder verringert werden können. Die potenziellen Auswirkungen werden dabei qualitativ eingeordnet nach ihrer Relevanz, d. h. nach ihrem relativen Beitrag zu einem Biodiversitätsverlust. Dieser ist unterteilt in drei Klassen (groß, mittel, gering). Es handelt sich somit um einen wertenden Schritt, dessen Ergebnis zwar anhand der Argumente aus der Auswirkungsanalyse begründet wird, der jedoch notwendigerweise subjektive Einschätzungen enthält und diskutiert werden kann. Jedes Kapitel fasst zum Ende die identifizierten Forschungsbedarfe stichpunktartig zusammen.

Es wird darauf hingewiesen, dass durch die Maßnahmen und Möglichkeiten zur Verringerung bzw. teilweisen Vermeidung von negativen Auswirkungen von erneuerbaren Energien auf die Biodiversität nicht zwangsläufig ein insgesamt positiver Effekt auf die Biodiversität erzielt wird. Durch die Maßnahmen können der Umfang oder die Intensität negativer Auswirkungen verringert werden.

3 Das Spannungsfeld Ausbau erneuerbarer Energien und Biodiversität

In diesem Kapitel wird das Spannungsfeld zwischen den erneuerbaren Energieträgern und der Biodiversität beleuchtet. Dabei wird in jedem Unterkapitel für jeden Energieträger untersucht, welche Auswirkungen er auf die Biodiversität haben kann. Nach Möglichkeit erfolgt dabei eine Differenzierung nach den groben Lebensabschnitten der erneuerbaren Energieträger. So werden bei Windenergie beispielsweise Auswirkungen während des Baus, während des Betriebs und während Produktion und Recyclings der Windenergieanlage beleuchtet. Zusätzlich zu den betrachteten fünf erneuerbaren Energieträgern werden Übertragungsnetze analysiert, da sie für den Ausbau der erneuerbaren Energieträger eine bedeutende Rolle spielen und bei der Untersuchung der Auswirkungen auf die Biodiversität nicht außer Acht gelassen werden dürfen. Im Anschluss an die Analyse potenzieller Auswirkungen erfolgt eine schematische Bewertung der Auswirkungen, um deren Schwere und Bedeutung einzuschätzen. Am Ende jedes Unterkapitels werden Möglichkeiten der Verringerung der Auswirkungen beschrieben.

3.1 Windenergie

Windenergie oder auch Windkraft ist ein erneuerbarer Energieträger zur Produktion von elektrischer Energie. Im Koalitionsvertrag hat sich die damalige Bundesregierung aus SPD, Grüne und FDP (Stand 2024) das Ziel gesetzt, 2 % der Landesfläche der Bereitstellung von Windenergie zur Verfügung zu stellen. Die Umsetzung des sogenannten Wind-an-Land-Ziels erfolgt durch das eingeführte Windenergieflächenbedarfsgesetz (WindBG), welches 2023 in Kraft getreten ist und verbindliche Ausbauziele für die Bundesländer für das Erreichen des 2 %-Ziels beinhaltet (BGB I 2022). Auch für die Bereitstellung von Windenergie auf See ist ein entsprechendes Gesetz in Kraft getreten, um den Ausbau zu beschleunigen (BMJ 2024).

Für die Nutzung der Windenergie ist die Errichtung von Windenergieanlagen (WEA) erforderlich. WEA können an Land (WEA onshore) oder auf See (WEA offshore) installiert und in Betrieb genommen werden. Dabei können Auswirkungen auf Natur und Landschaft erfolgen. Im Hinblick auf die Biodiversität sind mit dem Bau und dem Betrieb von WEA Auswirkungen auf Arten und Lebensräume und folglich auch auf die genetische Diversität verbunden. Diese Auswirkungen können artspezifisch variieren und sich je nach Standort unterscheiden.

Im Rahmen dieses Kapitels wird erläutert, welche potenziellen Auswirkungen der Ausbau von WEA auf die Biodiversität haben kann. Dabei wird unterschieden zwischen Auswirkungen während des Baus von WEA, während des Betriebs von WEA und während der Produktion und dem Recycling von WEA. Die Studie fokussiert sich auf die Auswirkungen der WEA an Land. WEA auf See werden hier nur am Rande oder zu spezifischen Aspekten betrachtet. Bei den WEA an Land wiederum kann es einen entscheidenden Unterschied machen, ob sich die Anlage im Offenland oder im Wald befindet.

Auswirkungen während des Baus von WEA

Für die Errichtung einer WEA ist neben den Rohstoffen bzw. Materialien für die WEA v. a. die Verfügbarkeit einer Fläche erforderlich. Je nach Standort können dabei landwirtschaftliche oder forstliche Flächen, Meeresflächen oder versiegelte Flächen in Anspruch genommen werden. Gegebenenfalls muss für den Bau der WEA die Fläche vorerst erschlossen werden. Dabei kann es zur **Zerschneidung von Ökosystemen** kommen, beispielsweise wenn Zuwegungen geschaffen werden, sofern nicht auf Bestandswege zurückgegriffen werden kann, oder wenn auf der zukünftigen Fundamentfläche Vegetation gemäht oder gerodet wird. Dies kann dazu führen, dass Habitate zerschnitten und Migrationswege getrennt werden. In einer kürzlich veröffentlichten Studie von Balotari-Chiebáo und Byholm (2024) wurde die Bedeutung von Zerschneidungseffekten beim Bau von WEA betont. Diffendorfer et al. (2019) konnten anhand von Modellen zeigen, dass insbesondere bei Standorten auf unzerschnittenen Flächen die Erschließung für WEA den größten Anteil an deren Auswirkungen auf die biologische Vielfalt haben kann. Eine globale Analyse zeigt, dass durch Zerschneidung und Verinselung von Ökosystemen die Biodiversität um 13-75 % reduziert werden kann (Haddad et al. 2015). Was den Bau von WEA betrifft, sind die zerschneidenden Effekte (abgesehen von verbleibenden neuen Zuwegungen) überwiegend von vorübergehender Dauer.

Neben der Zerschneidung kann es durch die Flächennutzungsänderung von einer natürlichen Fläche hin zu einer versiegelten Fundamentfläche und einem teilversiegelten Kranstellplatz zu einem **Habitatverlust** oder einer **Änderung der Habitatqualität** für diverse Lebewesen wie beispielsweise Vögel, Fledermäuse oder weitere Säugetiere kommen (Richarz 2021; Rodrigues et al. 2016).

Bei Standorten im **Wald** gehen durch die Freilegung der Fläche Waldhabitate verloren, bei Standorten im agrarischen Bereich sind Habitate der Kulturlandschaft betroffen und bei Standorten im Meer (WEA offshore) marine Habitate. Der Verlust ist stark abhängig vom jeweiligen ökologischen Wert der Habitate am Standort. Gerade innerhalb von Wäldern sind die Unterschiede sehr groß. Alte naturnahe Wälder stellen insbesondere für Fledermäuse wichtige Habitate dar, die durch den Verlust einzelner Flächen stark reduziert werden können. Aber auch junge Wälder und Nadelmonokulturen können einigen Arten noch Habitate bieten (Krüger 2019; Richarz 2021), die ebenfalls durch den Verlust von Flächen reduziert werden können. Folglich können Habitate von Fledermäusen, darunter Habitate für Wochenstuben, Jagdgebiete, Winter- und Sommerquartiere durch Baumaßnahmen im Standortbereich beeinträchtigt oder zerstört werden (Blessenohl und Stucke 2023; Millon et al. 2018). Hinzu kommt, dass viele Fledermausarten bereits stark gefährdet sind (Blessenohl und Stucke 2023) und deren Lebensraumverlust diesen Trend weiter verstärkt. Gleiches gilt für viele Vogelarten, deren Brut-, Rast- oder Jagdgebiete durch die Flächennutzungsänderung zerstört werden können (Blessenohl und Stucke 2023). Neben den Auswirkungen auf Fledermäuse und Vögel hat die Flächennutzungsänderung erhebliche Auswirkungen auf Bodenlebewesen. Zum Beispiel wird der Lebensraum von Arthropoden bei der Umwandlung einer natürlichen Fläche hin zu einer versiegelten oder teilversiegelten Fläche zerstört.

Aufgrund des Habitatverlustes und der Änderung der Habitatqualität wird ein Ausbau von WEA im Wald stark kritisiert (Richarz 2021). Am Beispiel der Pflanzenvielfalt auf teilversiegelten Flächen um die WEA kann erkannt werden, dass sich die Vegetation nur über längere Zeiträume von der Fragmentierung erholt. Forschende konnten feststellen, dass ein großer Kontrast der Diversität seltener, endemischer und bedrohter Pflanzenarten zwischen der ungestörten und der transformierten Fläche einer WEA besteht. Untersuchungen in einem speziellen Schutzgebiet in Rumänien zeigten, dass weniger als 40 % der gesamten identifizierten Arten auf den gestörten bzw. transformierten Flächen gefunden wurden. Auch nach zehnjährigen Wiederherstellungsmaßnahmen haben sich diese Habitate nicht vollständig erholt (Urziceanu et al. 2021). Die Übertragbarkeit auf in Deutschland anzutreffende Standortflächen ist dabei schwierig. Dies kann nicht allein an möglichen geografischen Unterschieden liegen, sondern auch daran, dass Projekte auf ökologisch hochwertigen Flächen angesichts von Anforderungen des Genehmigungsprozesses eher vermieden werden. Dies bedeutet aber, dass solche Flächen tatsächlich bei der Standortwahl vermieden werden.

Bei Standorten im **Offenland**, d. h. in der Regel auf Acker- und Grünland, sind die Baumaßnahmen zumeist mit deutlich weniger Eingriffstiefe verbunden. Doch auch hier gilt es zu beachten, dass Habitate für empfindliche Arten gestört oder beseitigt werden, wie z. B. Feldvögel und Wiesenbrüter (Wulfert et al. 2022).

Eine Besonderheit stellen WEA offshore dar, da hierbei nicht nur Habitate für Vögel und Bodenlebewesen sowie Meeresbewohner verloren gehen oder stark beeinträchtigt werden können sondern auch Migrationsrouten von Fledermäusen. Durch die Installation der Gründungsstrukturen im Meer werden sowohl Habitate zerstört, als auch Lebewesen (z. B.: Schweinswale) durch den Lärm gestört (Blessenohl und Stucke 2023).

Auswirkungen während des Betriebs von WEA

Während des Betriebs erfolgt weiterhin eine kontinuierliche Flächenbelegung durch die WEA. Im Vergleich zu anderen Energieträgern ist die Flächenbelegung von WEA gering. Dem Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (KNE) zufolge beträgt die Fundamentfläche derzeit gängiger WEA je nach Hersteller 350-600 m² (KNE 2022). Dazu kommt die (meist) geschotterte Kranstellfläche neben dem Fundament, welche i. d. R. dauerhaft

während des Betriebs der Anlagen bestehen bleibt und auch bei Wartungsarbeiten genutzt werden kann. Durch diese Flächenbelegungen kann eine **Zerschneidung von Ökosystemen** und ein **Verlust von Habitaten** erfolgen.

Solche Wartungsflächen fallen bei WEA offshore nicht an. Die neu errichteten Baukörper können jedoch je nach Standort See-, Zug- und Rastvögeln die Rast- und Nahrungshabitate nehmen. Außerdem können Wartungsarbeiten durch den erhöhten Verkehr für marine Säugetiere zu **Störungen** führen (Blessenohl und Stucke 2023). Windenergiesensible Vogelarten (bspw. Sterntaucher, Prachtaucher, Trottellummen) zeigen Meideverhalten noch in bis zu 20 km Entfernung zur WEA (Blessenohl und Stucke 2023). An Land weisen weitere Säugetiere wie Hirsche oder Wildkatzen unterschiedliche Verhaltensmuster gegenüber den in Betrieb genommenen WEA auf. Je nach Art handelt es sich um Gewöhnungseffekte bis hin zu Meideverhalten während der Jungtieraufzucht trotz geeigneter Habitate (Richarz 2021).

Darüber hinaus kann es beim Betrieb der WEA durch die **Beeinträchtigung des Luftraums** zu Auswirkungen auf einzelne Lebewesen kommen. Beispielsweise können Vögel, Fledermäuse oder Insekten Schlagopfer der sich drehenden Rotorblätter werden. Dies trifft bei WEA offshore auch während des Fledermaus- und Vogelzugs zu (Blessenohl und Stucke 2023; Rodrigues et al. 2016). Im Rahmen einer Studie konnte nachgewiesen werden, dass insbesondere Greifvögel wie Mäusebussard, Rotmilan oder Turmfalke aufgrund fehlenden Meideverhaltens häufig mit den Rotoren kollidieren. Die Häufigkeit der Kollision kann sich sogar populationsgefährdend auswirken (Grünkorn et al. 2016). Eine Studie von Heuck et al. (2019) ermittelte, dass Rotmilane die WEA kleinräumig umfliegen, aber gemessen an der Populationsgröße der Rotmilane Kollisionen vergleichsweise häufig auftreten. In einer jüngst veröffentlichten Studie wurden Modellierungen des Kollisionsrisikos anhand der Gänsegeier vorgenommen. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Vulnerabilität insbesondere mit der Nahrungsverfügbarkeit steigt (Morant et al. 2024). Erläuterungen zu einzelnen Vogel- und Fledermausarten können Richarz (2021) entnommen werden.

Dazu, wie groß die Tötungsrisiken durch WEA im Vergleich zu anderen Todesursachen potenziell betroffener Arten ist, liegen nur wenige Erkenntnisse vor. Das laufende EU-Forschungsvorhaben EUROKITE führt Untersuchungen zum Rotmilan und anderen Greifvögeln durch. Nach bisherigen Ergebnissen sind die festgestellten Haupttodesursachen des Rotmilans in Europa Vergiftung durch Pestizide, illegalen Abschuss, Prädation (d. h. durch andere Raubtiere), Kollision (inklusive Straßen- und Bahnverkehr), Stromschlag und Krankheit.¹ Die Fachgruppe Rotmilan der Deutschen Ornithologen-Gesellschaft kommt in einer Analyse der Verlustursachen anhand von Daten der Vogelwarte Hiddensee auf eine Mortalität von ca. 16 % durch WEA.²

Durch die veränderten Druckunterschiede in der Nähe der drehenden Rotoren können Fledermäuse ein **Barotrauma** erleiden, d. h. sie müssen nicht zwingend in Kontakt mit den drehenden Rotorblättern kommen (Baerwald et al. 2008; Richarz 2021). Diese Tatsache wird jedoch von anderen Autor*innen in Frage gestellt (Lawson et al. 2020). Zwar können mit automatischen Ultraschalldetektoren Fledermäuse identifiziert werden, jedoch ist die Anwendung dieser Technologie mit Limitierungen verbunden, aufgrund derer im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen von WEA kein ganzheitliches Bild der Fledermauspopulationen gegeben werden kann (Voigt et al. 2021). Weitere Auswirkungen, etwa auf Insekten, sind nach wie vor Gegenstand von Diskussionen (Richarz 2021). Eine Studie von Trieb et al. (2018) weist auf Kollisionspotentiale von Insekten mit den Rotorblättern der WEA hin. Eine

¹ <https://www.life-eurokite.eu/de/unsere-voegel/zahlen-fakten.html>

² https://www.ogbw.de/images/ogbw/files/2022_stellungnahme_fachgruppe_rotmilan_todesursachen_wea.pdf

andere Studie untersuchte die Anlockwirkungen von WEA auf nachtaktive Fluginsekten und schlussfolgert, dass Windenergie keinen Beitrag zum Insektensterben leistet (Trusch et al. 2020).

Hinweise auf weitere Auswirkungen von WEA auf die Biodiversität und Ökosystemleistungen, u. a. durch Lärm- und Lichtverschmutzung, geben Jones et al. (2015). Darin werden auch Vergleiche zwischen Windenergie und fossiler Energie in Bezug auf invasive Arten sowie auf Veränderungen des Kohlenstoffbestands und der Wasserressourcen gezogen. Die Autor*innen konnten zwar nur wenige Studien identifizieren, die den Zusammenhang zwischen Windenergie und invasiven Arten adressieren, jedoch kann davon ausgegangen werden, dass beispielsweise beim Bau von WEA oder bei erhöhtem Verkehr durch Wartungsarbeiten sowohl bei WEA onshore wie auch bei WEA offshore invasive Arten eingeführt werden können.

Auswirkungen während der Produktion und des Recyclings von WEA

Zum aktuellen Zeitpunkt liegen den Autor*innen keine Studien über die Auswirkungen der Produktion und des Recyclings von WEA auf die Biodiversität vor. An dieser Stelle kann auf Ökobilanzstudien zurückgegriffen werden, um eine erste Orientierung zu geben. In einer für das Umweltbundesamt verfassten Studie wurden die Umweltauswirkungen von WEA entlang des Lebensweges einer WEA bilanziert. Danach sind über alle Wirkungskategorien und -indikatoren hinweg die größten Auswirkungen bei der Produktion von WEA zu verzeichnen, was sich damit erklärt, dass die Betriebsphase kaum Material benötigt. Der vergleichsweise hohe **Materialbedarf** und die Art der eingesetzten Materialien schlagen sich in Umweltlasten jenseits des Standorts nieder und lässt sich in Treibhausgaspotenzial, Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial und Primärenergiebedarf ausdrücken (Hengstler et al. 2021). Jedoch stellen die dort errechneten ca. 7 g CO₂-Äquivalente pro kWh Windstrom durch den Bau der Anlage im Vergleich zum aktuellen Emissionsfaktor für Strommix in Deutschland von 445 g CO₂-Äquivalente pro kWh eine deutlich geringere Emission dar. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Produktion wie auch der Rückbau von WEA insgesamt geringe Umweltauswirkungen und somit auch geringe Auswirkungen auf die Biodiversität haben.

Insgesamt betrachtet gehen mit dem Bau und dem Betrieb von WEA vor allem Auswirkungen wie die direkte Störung, der Habitatverlust oder die direkte Kollision einher (Tosh et al. 2014). Diese Aussage gründet zwar auf WEA onshore, jedoch kann dies auf WEA offshore übertragen werden. Damit wirken sich WEA in mehrerlei Hinsicht auf die Biodiversität aus: Einerseits werden Lebensräume zerstört oder beeinträchtigt, wodurch sich die Lebensraumvielfalt reduziert, andererseits reduziert sich die Artenvielfalt durch die direkte Kollision.

Zusammenfassung der Schwere und Bedeutung der Auswirkungen von WEA

| | Wirkung | | | | | | |
|------------------------------|-----------------|-------------------------|-----------|-------------|------------|-------------------|-----------------|
| | Flächenbelegung | Flächennutzungsänderung | Kollision | Störwirkung | Barotrauma | Lebensraumverlust | Barrierewirkung |
| Onshore Offenland | ● | ●● | ●●● | ●● | ● | ●● | ● |
| Onshore Wald | ●● | ●●● | ●●● | ●● | ● | ●● | ● |
| Offshore | ●● | ●●● | ●●● | ●● | ● | ●●● | ●● |

Erklärung: ●●● = starke Auswirkung, ●● = mäßige Auswirkung, ● = geringe Auswirkung

Lösungsansätze zur Verringerung der Auswirkungen

In den vorherigen Abschnitten wurde neben der Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung das **Kollisionsrisiko** mit einem relativ hohen Biodiversitätsverlustrisiko bewertet. Um die Wirkung der Beeinträchtigung des Luftraums und folglich die Kollision mit **Vögeln** zu reduzieren, können Warnsignale und Ablenkflächen eingesetzt werden, die es jedoch hinsichtlich ihrer Wirksamkeit (Richarz 2021) und Vereinbarkeit mit gesetzlichen Vorgaben zu prüfen gilt. Beispielsweise können Radar- und Kamerasysteme dazu eingesetzt werden, heranfliegende Vögel frühzeitig zu erkennen und dann über entsprechende Systeme Vergrämerungsmaßnahmen freizusetzen oder die Rotoren abzuschalten (Krüger 2019). Auch eine schwarz-weiße Färbung kann eingesetzt werden, um das Kollisionsrisiko mit Vögeln zu reduzieren (Richarz 2021).

Der Kollision mit **Fledermäusen** kann entgegengewirkt werden, indem die WEA mit Detektoren ausgestattet wird, mit der eine akustische Messung der Fledermausaktivität ermöglicht wird. Mit Hilfe eines Abschaltalgorithmus können die Rotoren zu Zeiten hoher Fledermausaktivität abgeschaltet werden. Hierzu sind mehrere Forschungsvorhaben in Entwicklung, die Wirksamkeit dieser Maßnahmen wird aufgrund der Limitierungen der Fledermausdetektoren (Voigt et al. 2021) jedoch noch stark diskutiert (Richarz 2021). Im Hinblick auf die Wahl der WEA konnten Garvin et al. (2024) belegen, dass insbesondere ein größerer Rotordurchmesser bei 2 von 3 Fledermausarten die Sterblichkeitsrate erhöht. Auch die Leistungsstärke und Bodenfreiheit war ein in der Studie verwendeter Parameter zur Untersuchung der Sterblichkeitsrate ausgewählter Fledermausarten. Der Abstand des Rotors zum Boden kann eine Möglichkeit bieten, Kollisionen zu verringern; dies ist jedoch abhängig von der Fledermausart sowie des Standorts (Fachagentur Windenergie an Land 2019).

Im Rahmen eines Eckpunktepapiers (BMUV und BMWK 2022) haben sich das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz und das Bundesministerium für Wirtschaft und Klima auf zentrale Punkte geeinigt, die den beschleunigten Ausbau von WEA unter Berücksichtigung hoher ökologischer Standards ermöglichen sollen. Damit soll der Ausbau der WEA mit dem Naturschutz in Einklang gebracht werden. Dazu

zählt beispielsweise, dass bundeseinheitliche gesetzliche Standards etabliert werden sollen, die eine Prüfung der Signifikanz des Tötungsrisikos ermöglichen. Dies beinhaltet die Erstellung von Listen über betroffene Vogelarten (z. B. Rotmilan), Vermeidungsmaßnahmen und Abstände. Beispielsweise können Antikollisionssysteme oder das Abschalten aufgrund von artspezifischen Verhaltensmustern die Signifikanz eines Vogelschlags reduzieren.

Eine detaillierte Untersuchung von Minderungsmaßnahmen beim beschleunigten Ausbau der Windenergie wurde innerhalb eines vom Bundesamt für Naturschutz geförderten Projektes durchgeführt (Wulfert et al. 2023). Dabei wurde Minderungsmaßnahmen, deren Wirksamkeit und Realisierbarkeit und die damit adressierten Artgruppen dargestellt. Beispielsweise können Antikollisionssysteme insbesondere bei Rotmilan oder Seeadler das Kollisionsrisiko wirksam reduzieren. Darüber hinaus bestehen Standard-Schutzmaßnahmen. Dazu zählen baubedingte Maßnahmen wie die zeitliche Beschränkung der Baufeldfreimachung, Vergrämungsmaßnahmen vor Baubeginn, weitere Schutzmaßnahmen (z. B. Schutzzäune vor Baubeginn) oder betriebsbedingte Maßnahmen wie die Anwendung eines Abschaltalgorithmus für kollisionsgefährdeter Arten wie die Fledermaus. Es gilt jedoch zu betonen, dass diese Maßnahmen darauf abzielen, die Auswirkungen auf die Arten zu reduzieren. Eine Erhöhung der Biodiversität kann mit diesen Maßnahmen nicht erreicht werden. Weitere in diesem Themenfeld angesiedelte Projekte, die vom Bundesamt für Naturschutz gefördert werden, können der Projektdatenbank des BfN¹ entnommen werden.

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen hat in seiner Stellungnahme Handlungsansätze formuliert, um Naturschutz und Windenergienutzung in Einklang zu bringen (Sachverständigenrat für Umweltfragen 2022). Dazu zählt: 1. Gebietsschutz zu stärken und Restriktionen klar zu regeln sowie 2. Artenschutz: Potenziale der Planung zu nutzen, mehr Rechtsverbindlichkeit zu schaffen und einen strategischen Ansatz zu entwickeln.

Dem deutschen Naturschutzbund (NABU) zufolge sind die aktuellen Ausbauziele für WEA offshore von 70 GW und einer damit einhergehenden Flächennutzung von 20 % der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) in Nord- und Ostsee nicht in Einklang zu bringen mit dem Naturschutzrecht, da dadurch der Druck auf die marinen Systeme erheblich steigt. Es müssen Maßnahmen ergriffen werden, um die entsprechenden Ökosysteme zu entlasten, beispielsweise durch die Reduzierung anderer Nutzungen oder die Verordnung von entsprechenden Abschaltzeiten (Blessenohl und Stucke 2023). Das Windenergie-auf-See-Gesetz (WindSeeG) schreibt eine Sicherheitszone von 500 m ab dem äußeren Punkt der der Offshore-Windparks vor (WindSeeG §74 Abs.2). Dies dient dem Schutz der Schifffahrt und den Anlagen selbst. Der Einsatz von Grund-, Schlepp-, und Treibnetzen oder ähnlichen Fischereigeräten ist innerhalb der Sicherheitszone in Deutschland untersagt (Deutscher Bundestag 2018). Es wird davon ausgegangen, dass die erhöhte Fischabundanz in Offshore-Windparks auf den Ausschuss der aktiven Fischerei auf diesen Flächen zurückzuführen ist. Es ist mit einer Veränderung der positiven Auswirkungenprognosen in diesem Bereich zu rechnen, sollte es zu einer Veränderung des Befahrensverbotes kommen (BSH 2025).

Ein zentraler Aspekt bei Windenergie ist die Frage des **Standorts**. Kati et al. (2021) zeigen auf, dass Biodiversitätsschutz und Klimaschutz Hand in Hand gehen können, wenn beispielsweise Standorte in bereits stark fragmentierten Landschaften und außerhalb des Natura 2000-Netzwerks in Betrieb genommen werden, anstatt unzerschnittene naturnahe Landschaften weiter auf Kosten der Biodiversität zu fragmentieren. Die Forschenden entwickelten ein nachhaltiges Szenario, welches das Spannungsfeld zwischen Klimaschutz und Biodiversitätsschutz auflöste. Dadurch kann der Ausbau der Windenergie ohne größere

¹ <https://www.natur-und-erneuerbare.de/projektdatenbank/>

Einbußen parallel zum Biodiversitätsschutz erfolgen (Kati et al. 2021). Zu ähnlichen Erkenntnissen kommen Dhunny et al. (2019) in einer Fallstudie über den WEA Ausbau auf Mauritius.

Insgesamt betrachtet gilt es, passende Ansätze und Kompromissstrategien anstelle von konfliktreichen Maßnahmen zu entwickeln. Hierzu kann auf Arbeiten von Bulling und Köppel (2016) zurückgegriffen werden.

Zusammenfassung des Forschungsbedarfs

Die hier stichpunktartig zusammengefassten Forschungsbedarfe in Bezug auf WEA und Biodiversität werden in den vorangehenden Absätzen beschrieben:

- Auswirkungen von Barotrauma durch WEA auf Fledermäuse
- Auswirkungen von WEA auf Insekten
- Prüfen von Warnsignalen und Ablenkflächen auf Wirksamkeit
- Weiterentwicklung von Erkennungssystemen für Vögel und Fledermäuse

3.2 Solarenergie und Solarthermie

Photovoltaikanlagen (PVA) zur Erzeugung elektrischen Stroms aus Sonnenenergie, sprachgebräuchlich Solarparks genannt, können auf unterschiedlichen Standorten installiert werden. Je nach Ausgestaltung werden hier verschiedene Bezeichnungen verwendet, bspw. Dach-PV, Moor-PV, Freiflächen-PV, schwimmende PV oder bei einer gleichzeitigen landwirtschaftlichen Nutzung Agri-PV. Diese Bezeichnungen weisen bereits auf die unterschiedlichen Flächen hin, die für die PVA genutzt werden können. Die Laufzeit von PVA liegt bei etwa 25 bis 30 Jahren, Tendenz steigend. Eine weitere mögliche Nutzung von Sonnenenergie ist die Umwandlung in thermische Energie durch Solarthermie-Anlagen (STA). Sie eignen sich in der Regel für sehr sonnige Regionen und können ebenfalls auf Dächern oder Freiflächen installiert bzw. gebaut werden. Fokussiert wird sich in der nachfolgenden Beschreibung des Spannungsfeldes auf PVA, dessen Kernelemente jedoch auch für STA gelten.

Beim Einsatz von PVA können sich Auswirkungen auf Natur und Landschaft ergeben. Im Hinblick auf die Biodiversität sind mit dem Bau und dem Betrieb von PVA Auswirkungen auf Arten und Lebensräume und folglich auch auf die genetische Diversität verbunden. Diese Auswirkungen können artspezifisch variieren und sich je nach Standort unterscheiden.

In diesem Kapitel wird erläutert, welche potenziellen Auswirkungen der Ausbau von PVA auf die Biodiversität hat. Unterschieden wird zwischen Auswirkungen während des Baus von PVA, Auswirkungen während des Betriebs von PVA und Auswirkungen während der Produktion und des Recyclings von PVA.

Auswirkungen während des Baus von Solarparks

Die Umwandlung bzw. der Verlust von Habitaten und Lebensraum ist derzeit der größte Treiber des Biodiversitätsverlustes (IPBES 2019). Für die Erzeugung von Strom aus Sonnenenergie wird lokal eine Inanspruchnahme von Fläche für die Anlage erforderlich. In der Regel erfolgt dafür eine **Flächennutzungsänderung**, d. h. eine Umwandlung der Fläche von einem vorherigen Zustand in die Nutzung für PVA. Die damit einhergehenden lokalen Auswirkungen auf Natur und Landschaft unterscheiden sich je nach gewähltem Standort und den ggf. vorher herrschenden Managementsystemen (bspw. intensive oder extensive Landwirtschaft). Baubedingt erfolgt die Flächennutzungsänderung und damit die Umwandlung teils temporär durch das Freimachen des Baufeldes und der Einrichtung der Baustelle. Hier kann es zum temporären **Verlust von Habitaten** kommen. Zusätzlich erfolgt eine temporäre **Störung** durch Maschineneinsatz, Baustellenverkehr und Bautätigkeiten, die mit einer Vertreibung ansässiger Tiere einhergehen kann (KNE 2024b).

Im Zuge der Planung und Genehmigung von (Freiflächen-)PVA werden zahlreiche lokale ökologische Daten erhoben, insbesondere im Rahmen von beauftragten Monitorings. Diese Datenerfassung erfolgt jedoch derzeit weder nach einheitlichen Methoden noch in standardisierten Formaten. Zudem wird die Überprüfung der Umsetzung von Ausgleichsmaßnahmen im Rahmen der Eingriffsregelung nicht systematisch durchgeführt, sondern hängt weitgehend von den verfügbaren Kapazitäten der jeweiligen Kommunen ab (Ammermann et al. 2022). Dies führt häufig zu **ungenügenden Datengrundlagen** und anhaltenden großen Wissenslücken, die es erschweren, vollumfänglich Aussagen über die Wirkung von PVA auf die Biodiversität zu treffen. In Bezug auf die Auswirkung von PVA auf Vögel ist in vielen Fällen noch unklar, wie sich die PVA auf diese auswirkt (Strohmeier et al. 2023). Wissenslücken bestehen auch hinsichtlich der Auswirkungen bei Bau und späterem Betrieb der PVA auf neuen Standorten wie Moor-PV, Agri-PV oder schwimmende PV (Ammermann et al. 2022).

Auswirkungen während des Betriebs von Solarparks

Durch den Bau und den nachfolgenden Betrieb der PVA können sowohl der Boden als auch der Standort der ausgewählten Fläche verändert werden (Trautner et al. 2024). Hier sind beispielhaft die punktuelle Flächenversiegelung, etwa durch Transformatoren, das Überstellen der Bodenoberfläche mit Modulen und die damit einhergehende Veränderung bzw. Einschränkung und der (Teil-) **Verlust der Fläche als Habitat**, bspw. Nahrungs- und Jagdhabitats, sowie das **Entwerten der Habitatstruktur** durch die PVA zu nennen (KNE 2024b). Darüber hinaus spielen hier die Ausgestaltung der (baulichen) Strukturen sowie Pflege- und Flächenmanagement eine Rolle. Die PV-Module müssen regelmäßig sowohl von Bewuchs als auch von Staub und anderen Verunreinigungen freigehalten werden, um Brandschutz zu gewährleisten und eine Leistungsminderung zu verhindern. Zusätzlich dazu sind Wartungsarbeiten durchzuführen. Dies kann zu empfindlichen Störungen von Rast-, Brut und Nahrungsräumen führen, was schlimmstenfalls zur Aufgabe dieser Habitats führen kann (Strohmeier et al. 2023).

Neben dem lokalen Landschaftsbild können u. a. Arten, Habitats, Bodenfunktionen, Grundwasser und Mikroklima bzw. Lokalklima beeinflusst werden (Ammermann et al. 2022; Trautner et al. 2024). Durch den Ausbau der Solarenergie werden zusätzlich zu den bereits in Anspruch genommenen Flächen weitere Flächen technisch überprägt (Ammermann et al. 2022). Dieser Effekt entsteht unabhängig davon, ob es sich dabei um Freiflächen-PV, Moor-PV, Floating-PV oder Agri-PV handelt. Lediglich bei einer Nutzung von Dächern und Gebäudewänden tritt dieser Effekt nicht ein. Neben der **technischen Überprägung** der Landschaft kann es zu **Nutzungskonflikten** auf der Fläche zwischen PVA, Land- und Forstwirtschaft und Naturschutzbelangen kommen. Die je nach Standort, Bauweise und Ausgestaltung erforderlichen Ausgleichsflächen können den **Flächenbedarf** von PVA weiter erhöhen (KNE 2024b). Die Flächenumwandlung, d. h. die Veränderung der Nutzung, ist besonders kritisch, wenn es sich hierbei um sensible Flächen handelt, die wichtige Habitats und Arten aufweisen und als Biotopverbund dienen. Solche Flächen weisen einen hohen naturschutzfachlichen Wert auf und haben in der Regel eine hohe Empfindlichkeit gegenüber dem Errichten von technischen Anlagen (Gehrlein et al. 2017).

Die mit PVA bebauten Flächen werden in der Regel umzäunt, da sie nicht öffentlich zugänglich sein sollen. Die Umzäunung kann eine **Barriere** für Großsäuger, mittelgroße Säugetiere und Amphibien darstellen. In der Folge können Migrationsrouten gestört und damit der Genfluss von Populationen behindert werden, was diese mittel- und langfristig schädigt (Schlegel 2021). Der Genfluss ist ein wichtiger Anteil der Fitness von Artindividuen und nimmt Einfluss auf ihre Anpassungsfähigkeit gegenüber Störungen und Umweltveränderungen (Jaeger und Holderegger 2005). Diese **Fragmentierung von Lebensräumen** stellt einen wichtigen Treiber des Biodiversitätsverlust dar.

Die **reflektierende Oberfläche** der PVA kann als Anlockeffekt auf Arten wirken, welche sich an horizontal polarisierendem Licht orientieren (Horváth et al. 2010; Schlegel 2021). Dies gilt nicht nur für verschiedene Insekten, die mindestens ein Entwicklungsstadium ihres Lebens in Gewässern oder auf dessen Oberfläche durchlaufen, sondern auch für verschiedene Vögel. Hier kann es zu Verwechslung der PVA-Oberfläche mit Gewässern kommen oder sich eine **Attraktionswirkung** auf Vögel und Fledermäuse wegen der fälschlich angelockten Insektengruppen einstellen (Schlegel 2021). **Kollisionen** mit den PVA sind hier nicht auszuschließen (Schlegel 2021). Andere Studien sehen oder erwarten keine Kollisionsrisiken (Herdén et al. 2009) und stellen die Auswirkungen von polarisiertem Licht auf Insekten in Frage (Peschel und Peschel 2025). Hier besteht noch Forschungsbedarf. Der Kenntnisstand über Kollisionsrisiken bei vertikalen PVA ist laut des KNE noch gering (KNE 2020). Für Insekten

können empfindliche Verbrennungen bei Kontakt mit den PVA auftreten und Eiablagen auf der vermeintlichen Wasseroberfläche erfolgen (KNE 2020; Schlegel 2021). Andere Autor*innen weisen auf die Fähigkeit von Insekten hin, zu heiße Flächen zu erkennen und diese zu meiden und dass die Verschattung durch die Module das Mikroklima gerade in offenen Landschaften mildern kann (Peschel und Peschel 2025). Zu diesem Punkt besteht noch Forschungsbedarf. Gerade für seltene Arten oder solche mit geringer Populationsdichte kann der Verlust einzelner Individuen kritisch sein (KNE 2020).

Auswirkungen während der Produktion und des Recyclings von Solarparks

Zum aktuellen Zeitpunkt liegen den Autor*innen keine Studien über die Auswirkungen der Produktion und des Recyclings von PVA auf die Biodiversität vor. An dieser Stelle kann auf Ökobilanzstudien zurückgegriffen werden, um eine erste Orientierung zu geben. Die Produktion der PV-Module verursacht im Lebensweg der Anlagen laut einer Reviewstudie über mehrere Ökobilanzstudien den größten Ausstoß von **Treibhausgasen** durch die energieintensive Verarbeitung (Muteri et al. 2020). Der Klimawandel ist einer der Treiber des Biodiversitätsverlustes, sodass hieraus Folgen für die globale Biodiversität erwartet werden können. Die THG-Emissionen verschiedener PV-Module können zwischen etwa 27–43 g CO₂-Äquivalente pro kWh Solarstrom liegen, welche sich fast ausschließlich aus der Herstellung generieren (Frischknecht und Krebs 2021). Im Vergleich zum aktuellen Emissionsfaktor für Strommix in Deutschland von 445 g CO₂-Äquivalente pro kWh stellen diese eine deutlich geringere Emission dar. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Produktion wie auch der Rückbau von PVA insgesamt geringe Umweltauswirkungen und somit auch geringe Auswirkungen auf die Biodiversität haben.

Auch durch die Produktion und das Einbringen von **toxischen Stoffen** im Zuge der Rohstoffförderung (Muteri et al. 2020) können die Habitatqualitäten gemindert und direkte Schäden an Organismen hervorgerufen werden. Derartige Auswirkungen durch Produktion und Recyclings von technischen Anlagen gilt jedoch für nahezu alle rohstoffintensiven Güter und ist nicht spezifisch für PVA.

Nach der Betriebszeit kann der Rückbau der PVA eine erneute Flächennutzungsänderung mit sich bringen. Dabei können Flächen wiederhergestellt werden, jedoch auch neue **Störungen** durch Rückbauarbeiten und Maschinenverkehr entstehen. Insbesondere wenn Kabel in den Boden versenkt wurden, erfolgt hier ein erneuter starker Eingriff durch ihre Entfernung. Ein Verbleib der Kabel ist zum einen aufgrund der Schwermetalle und Kunststoffe kritisch (Herden et al. 2009), zum anderen aufgrund der Recyclingmöglichkeiten und im Sinne anzustrebender Kreislaufwirtschaft nicht nachhaltig. Die Auswirkungen durch das Recycling der Module ist gering und kann durch die Verminderung des Primärmaterialbedarfs andere Auswirkungen bei der Herstellung abschwächen.

Zusammenfassung der Schwere und Bedeutung der Auswirkungen von PV-Freiflächenanlagen

| Wirkung | Flächenbelegung | Flächennutzungsänderung | Zerschneidung und Barriereeffekte | Störungseffekte | Horizontal polarisierendes Licht | Kollisionsrisiko | Entwertung/ Verlust von Habitaten |
|-----------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------|----------------------------------|------------------|-----------------------------------|
| PV-Freiflächenanlagen | ● ● ● | ● ● ● a) | ● ● ● | ● ● | ● | ● | ● ● |

Erklärung: ● ● ● = starke Auswirkung, ● ● = mäßige Auswirkung, ● = geringe Auswirkung

a) die Flächennutzungsänderung erfolgt zunächst in jedem Fall; je nach Standort und Gestaltung der Anlage kann es sein, dass diese Änderung keine negativen Auswirkungen oder sogar eine Erhöhung der Biodiversität nach sich zieht (siehe dazu in den folgenden Absätzen)

Lösungsansätze zur Verringerung der Auswirkungen

Während des Baus verursachte Störungen können durch Bauzeitregelungen, Erhalt von wertvollen Biotopstrukturen, Minimierung oder Verzicht der Baustellenbeleuchtung und Anlage angrenzender Ausweichhabitate minimiert bis vermieden werden (KNE 2024b).

Das größte Konfliktpotenzial von PVA mit der Biodiversität liegt im **Flächenbedarf**. Das Bundesamt für Naturschutz (BfN) hat in einem Positionspapier Eckpunkte erstellt, die für einen naturverträglichen Ausbau von PVA notwendig wären. Zwei grundsätzliche Handlungsmöglichkeiten bestehen dabei:

- a. Wahl von ökologisch weniger wertvollen Flächen (z. B. Dachflächen)
- b. Freiflächenanlagen mit Flächenmanagement- bzw. Pflegesystem zur Förderung der lokalen Biodiversität

Hier wird auf die technisch ausreichend verfügbaren Potenziale von bereits versiegelten Flächen wie Dächern, Fassaden und Parkplätzen hingewiesen, die einen erheblichen Beitrag zur Reduzierung von weiterer Flächenumwandlung beitragen könnten. Diese Potenziale sind jedoch abhängig von weiteren Rahmenbedingungen, wie bspw. Statik, gesetzlichen und steuerlichen Regelungen sowie Eigentümerverhältnissen. Außerdem sind diese kleinflächigen Anlagen mit höheren Gestehungskosten verbunden (Kost et al. 2024). Die tatsächlich erschließbaren Potenziale müssen noch erhoben werden. Dennoch wird empfohlen, diese Potenziale schnellstmöglich zu erschließen und rechtliche sowie finanzielle Rahmenbedingungen zu schaffen (Ammermann et al. 2022). Bei naturnaher Gestaltung von begleitender Begrünung können PVA und STA auf Dächern und Fassaden artenreiche Lebensräume (Ammermann et al. 2022) bspw. für Vögel und Insekten darstellen. Zusätzliche Kühlungseffekte der Umgebung und der Anlagen durch die Begrünung sowie Luftreinigung und Lärmmilderung (Landeshauptstadt Hannover 2019) sind hier als Synergieeffekte zu nennen. Der Ausbau von PVA auf bereits versiegelter Fläche, d. h. auf Dächern und an Fassaden, ist daher vorrangig zu bewerten, da weitere Flächenumwandlungen und Nutzungskonflikte vermindert werden und im besten Fall die lokale Biodiversität gefördert wird.

Für Solarparks, die in der Freifläche angelegt werden sollen, ist es wichtig, von Beginn an Natur- und Landschaftsschutzerfordernisse in die Entscheidung und Planung einzubeziehen. Sensible Flächen, wie etwa Naturschutzgebiete, gefährdete Offenlandbiotope oder Überschwemmungsgebiete sollten konsequent freigehalten werden (Ammermann et al. 2022). Bevorzugt werden sollten Flächen mit hoher Vorbelastung durch ihre vorherige Nutzung und mit geringer naturschutzfachlicher Bedeutung (BSW und Nabu 2021). Hier zeigt sich bereits die Wichtigkeit, Experten einzubeziehen, die die lokale Situation und Flächen einschätzen und bewerten können. Beispielhaft können als geeignete Flächen solche im räumlichen Zusammenhang mit Verkehrswegen, Konversionsflächen mit hohem Versiegelungs- und Kontaminationsgrad oder Halden genannt werden, aber auch intensiv genutzte landwirtschaftliche Flächen sind aus naturschutzfachlicher Sicht geeignet (BSW und Nabu 2021). Die Eignung landwirtschaftlicher Flächen sollte geprüft werden, um das Befeuern von Nutzungskonflikten zu vermeiden. Agri-PV-Systeme können mögliche Nutzungskonflikte durch mehrfache Nutzung der Fläche auflösen. Hier können PVA bspw. als Witterungsschutz für Nutzpflanzen dienen. Bei entsprechender Wahl der Flächen und Gestaltung der Anlagen sowie Berücksichtigung naturschutzfachlicher Kriterien können biodiversitätsfördernde Strukturen in Freiflächensolarparks geschaffen werden (Peschel und Peschel 2023).

Der Anteil an mit Modulen überstellten Fläche spielt eine wichtige Rolle (Rosenthal et al. 2024), auch wenn der Boden unter und zwischen den Modulen unversiegelt bleibt. Sowohl bei Agri-PV als auch bei anderen Formen von PVA auf der Fläche, wie etwa Moor-PV und Freiflächen-PV sind der Aufbau der Anlagen, unabhängig vom Anlagentyp, sowie das angewendete Flächenmanagement- bzw. Pflegesystem sowie der vorherige Zustand der Fläche von zentraler Bedeutung für die Frage, ob es zu einer Förderung der lokalen Biodiversität oder einer Abnahme kommt. Der jeweilige Standort ist hier zu beachten und erfordert die Ausarbeitung angepasster Strategien.

Beim Bau der Solarparks auf vorher intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen kann mit dem Solarpark eine einhergehende extensive Nutzung der Fläche, bspw. als Grünland, erfolgen. Mögliche Praktiken sind hier zeitlich angepasste Bewirtschaftung, etwa durch Berücksichtigung von Brutzeiten, eine abschnittsweise Bewirtschaftung, Mahd des Aufwuchses und Abräumen des Mahdguts, Beweidung mit begrenzter Besatzdichte, Ausschluss von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln sowie das Belassen von Altgrasstreifen (KNE 2024b). So können wertvolle Lebensräume geschaffen und Störungen minimiert werden. Solarparks mit standortgerechter extensiver Pflege und großen Abständen zwischen den Modulreihen, im Gegensatz zu solchen mit geringen Abständen, können eine höhere Artenvielfalt aufweisen. Die daraus resultierenden von der Sonne beschienenen Flächen zwischen den Modulreihen können, bedingt durch den Standort und weiteren Faktoren, Habitate bspw. für Wildbienen, Reptilien und Pflanzen bieten (Rosenthal et al. 2024). Das Integrieren der ggf. notwendigen Ausgleichsflächen in den Solarpark kann als Maßnahme dienen, die Strukturvielfalt auf der beanspruchten Fläche zu erhöhen (BNE 2019) und einer Entwertung der Habitate ggf. vorzubeugen. Neben den Abständen zwischen den Reihen sind auch die Größe der Modulflächen sowie Abstände zwischen den Modulen wichtige Faktoren, die eine ausreichende Versickerung von Niederschlag in der Fläche ermöglichen (BSW und Nabu 2021). Dies sorgt für eine geringere Veränderung des lokalen Standortes und des Grundwassers. Für Pflanzen stellen größere Abstände zudem sicher, dass sie ausreichend Licht und Niederschlag erhalten (ISE 2024). Bifaziale Module benötigen ggf. weniger Fläche als andere PV-Module – es wurden jedoch bisher wenig Anlagen mit bifazialen Modulen realisiert, sodass der Kenntnisstand über mögliche Auswirkungen auf Vogelarten und Insekten noch gering ist (KNE 2024b).

Der Solarpark Frauendorf in Brandenburg, betrieben von Spreegas, kann hier als Positivbeispiel angeführt werden (InPositiv 2024). Der 2017 erbaute Solarpark auf 20 Hektar mit einer Gesamtleistung von 11.890 kWp wurde planerisch, laut dem Betreiber, von Beginn an als Biotop konzipiert (Spreegas 2024). Zeitlich angepasste Mahd, Blühbestände unterschiedlichen Alters und das Ausbringen von Saatgut 64 lokaler Arten sind Maßnahmen, die die Artenvielfalt erhöhen (InPositiv 2024; Spreegas 2024). Die Abstände zwischen den Reihen betragen sechs Meter und 50 Meter zum Zaun der Anlage (InPositiv 2024).

Zäune, die nicht wildtierdicht sind, d. h. die einen ausreichend großen Maschenabstand im bodennahen Bereich aufweisen, stellen ein Mittel dar, um die Barrierewirkung für Amphibien sowie kleine bis mittelgroße Säuger weitestgehend zu verringern (BSW und Nabu 2021; Peter et al. 2021; Strohmeier et al. 2023). Neben der Maschendichte weisen BSW und Nabu (2021) darauf hin, dass auch ein Bodenabstand des Zaunes von etwa 20 cm die Barrierewirkung verringern kann. Darüber hinaus wird gefordert, auf Stacheldraht im bodennahen Bereich zu verzichten (BSW und Nabu 2021). Bei PVA im Zusammenhang mit Verkehrswegen sollte sichergestellt werden, dass Migrationskorridore nicht beeinträchtigt werden. Lineare Infrastruktur zerschneidet Biotope und bildet Barrieren, die den Austausch innerhalb von manchen Arten beeinflusst, kann aber gleichzeitig Ausbreitungskorridore für andere Arten darstellen. Querungshilfen, die den Barriereeffekt unterbrechen sollen, wie etwa Grünbrücken und -unterführungen, Faunabrücken und -unterführungen und ihre jeweils benötigten Flächen müssen bei der Planung begleitender PVA berücksichtigt werden, um diese Wirkungen nicht zu beeinträchtigen. Die Empfehlungen von Peter et al. (2021) geben hier detaillierte Auskunft.

Der mögliche Anlockeffekt auf Wasserinsekten kann durch Vermeidung von Standorten in Gewässernähe oder durch entsprechende Markierungen und Folienwahl der PVA minimiert werden (Schlegel 2021).

Zusammenfassung des Forschungsbedarfs

Die hier stichpunktartig zusammengefassten Forschungsbedarfe in Bezug auf PVA und Biodiversität werden in den vorangehenden Absätzen beschrieben:

- Einheitliche und standardisierte Formate für das Monitoring bzw. die biodiversitätsbezogene Datenerhebung an PVA
- Auswirkungen von PVA auf neuen Standorten wie Moor-PV etc.
- Auswirkungen des polarisierten Lichts auf Insekten und andere Tiere
- Auswirkungen vertikaler PVA auf die Fauna
- Verbrennungsgefahr für Insekten an den PVA
- Erschließbare Potenziale von PVA auf bereits versiegelten Flächen
- Auswirkungen bifazialer Module auf Vögel und Insekten

3.3 Bioenergie

Die Basis für Bioenergie bildet Biomasse, d. h. Substrate forstlicher, agrarischer, aquatischer Herkunft oder Abfall- und Reststoffe. Dazu zählen beispielsweise Waldholz, angebaute Energiepflanzen wie Getreide, Mais, ölhaltige Pflanzen (Palmöl, Soja), Klärschlamm, Lebensmittelabfälle etc. Durch unterschiedliche Konversionspfade können diese Substrate in Produkte umgewandelt werden, die wiederum durch Verbrennung eine Energiefreisetzung ermöglichen. Beispielsweise kann in einer Biogasanlage Grünschnitt zu Biogas umgewandelt werden, welches wiederum durch die Verbrennung in Wärme umgewandelt wird. Mögliche Einsatzzwecke der energetischen Biomassennutzung sind die Bereitstellung von Strom, Wärme oder Kraftstoffen.

Laut der Fachagentur nachhaltige Rohstoffe e.V. (FNR) betrug der Anteil von Bioenergie am gesamten Primärenergieverbrauch Deutschlands im Jahr 2023 10 %. Windenergie hatte einen Anteil von 4,7 % und Solarenergie einen Anteil von 2,4 %. Somit dominiert Bioenergie unter den erneuerbaren Energieträgern (FNR 2024).

Vor dem Hintergrund der fluktuierenden Verfügbarkeit von Energie aus anderen erneuerbaren Energieträgern wie Windenergie oder Solarthermie bietet Bioenergie die Möglichkeit der kontinuierlichen Verfügbarkeit. Allerdings sind mit der Bereitstellung und Nutzung von Bioenergie Auswirkungen auf die Umwelt verbunden. Die Auswirkungen sind dabei abhängig von mehreren Faktoren wie beispielsweise:

- Der Inanspruchnahme der Fläche: Erfolgt dafür eine Flächenumwandlung?
- Der Art der Biomasse: Wird agrarische Anbaubiomasse oder Waldholz verwendet oder Abfall- und Reststoffe?
- Der Art der Biomassebewirtschaftung: Erfolgt eine intensive oder extensive Bewirtschaftung?
- Und der Art der Konversionspfade: Erfolgen energieintensive Umwandlungen, u. U. verbunden mit geringen Ausbeuten an erzeugten Energieträgern?

Zusätzlich dazu spielt die Standortwahl eine essenzielle Rolle wie auch bei den anderen Energieträgern, und es können artspezifische Unterschiede auftreten.

Im Folgenden wird erläutert, welche Wirkungen auf die Biodiversität vor und während des Biomasseanbaus bestehen. Anschließend daran werden Auswirkungen während weiterer Verarbeitungsschritte erläutert.

Auswirkungen vor dem Biomasseanbau

Der agrarische Anbau von Biomasse benötigt Fläche. Entweder kann bisherige Ackerfläche für den Biomasseanbau verwendet werden, oder Flächen, auf denen bisher anderweitige Nutzungen erfolgten, werden umgewandelt. Bei letzterem Fall erfolgt eine Landnutzungsänderung¹. In Deutschland sind die Flächenanteile, die eine Umwandlung zu Ackerland erfahren, sehr gering. Betroffen ist davon in der Hauptsache Grünland, wobei in 2022 mehr Ackerland zu Grünland umgewandelt wurde als umgekehrt.² Generell ist in Deutschland die

¹ Englisch: land use change, kurz: LUC; siehe auch weiter unten indirekte Landnutzungsänderung, kurz iLUC auf Englisch.

² Siehe Nationales Inventardokument zum deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2022; Umweltbundesamt (2024) Tabelle 338

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/38_2024_cc_berichterstattung_klimarahmenkonvention.pdf

Fläche an Ackerland rückläufig. Biomasse für Energiezwecke wird jedoch auch importiert und kann in den Herkunftsländern zu Landnutzungsänderungen führen, z. B. zu Entwaldung. Hierbei müssen häufig erst Infrastrukturen geschaffen werden, die die Nutzung der Fläche ermöglichen. Beispielsweise müssen Zuwegungen angelegt werden, um Zugang zu der Fläche zu erhalten, Material zu transportieren und entsprechende Fahrzeuge oder Maschinen zur Fläche zu bringen. Mit dieser **Flächenumwandlung** in Anbaufläche oder Zuwegung geht ein **Lebensraumverlust** einher. Habitate, wie beispielsweise Brut-, Jagd- oder Quartiershabitate, die auf dieser Fläche frequentiert wurden, werden durch die Konversion hin zu einer agrarisch oder forstlich genutzten Fläche stark beeinträchtigt oder zerstört. Im Rahmen einer Studie über die Auswirkungen der Energiepflanzenbaus auf die Biodiversität untersuchten Forschende 53 Veröffentlichungen hinsichtlich der darin beschriebenen Auswirkungen (Immerzeel et al. 2013). Zwar beinhalteten die Veröffentlichungen unterschiedliche Ergebnisse, jedoch konnte identifiziert werden, dass die Landnutzungsänderung aufgrund des Lebensraumverlusts und des sich daraus ergebenden veränderten Artenspektrums die Hauptursache für die Biodiversitätsveränderung ist. Dies ist davon abhängig, welche Art Lebensraum vor der Umwandlung vorgelegen hat.

In einer weiteren Studie wurde anhand von Metaanalysen untersucht, wie sich acht der am häufigsten eingesetzten Bioenergiepflanzen auf die Biodiversität am Standort auswirken. Die Forschenden kommen zu dem Ergebnis, dass die Artenvielfalt und –häufigkeit auf den kultivierten Flächen für den Energiepflanzenbau grundsätzlich geringer sind als bei natürlichen Ökosystemen, die diese ersetzen könnten (Núñez-Regueiro et al. 2019). Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Tudge et al. (2021), indem sie aufzeigen, dass die Biokraftstoffproduktion negative Auswirkungen auf die lokale Artenvielfalt und -abundanz hat. Insbesondere die Biokraftstoffe der ersten Generation führen zu einer verringerten Abundanz von Wirbeltieren und Pflanzenvielfalt. Abschließend erläutern die Forschenden, dass eine Biomasseproduktion auf bereits kultivierten Flächen biodiversitätsfreundlicher ist als eine Flächenumwandlung vorzunehmen (Núñez-Regueiro et al. 2019).

Zusätzlich zu dem Lebensraumverlust durch die Landnutzungsänderung erfolgt durch die Anbaufläche und die Zuwegungen eine **Zerschneidung** von Lebensräumen. Durch die Schaffung oder Erhaltung von ausgedehnten Anbaugebieten ohne verbindende bzw. vernetzende Strukturelemente kann dies Barrieren zwischen Lebensräumen bilden. Für manche Lebewesen können diese Flächen bereits unüberwindbare Barrieren darstellen. Dieser Zerschneidungseffekt kann im extremen Fall so weit gehen, dass Lebewesen voneinander isoliert leben und ihre Reproduktionsfähigkeit nicht mehr gewährleistet ist. Im Jahr 2014 wurde eine Studie durchgeführt, die die Auswirkungen der Biokraftstoffproduktion auf die unterschiedlichen Ebenen der Biodiversität abbildet (Liu et al. 2014). Auf der Ebene der Arten wurde festgestellt, dass die Biokraftstoffproduktion das Risiko einer Fragmentierung des Lebensraumes und des Aussterbens einheimischer Arten erhöht.

Darüber hinaus kann es bei der Inkulturnahme der Fläche zu einer **Störung** von Lebewesen und Arten kommen. Der Grund hierfür ist zum einen das erhöhte Verkehrsaufkommen während der Kultivierung der Fläche, zum anderen die Lärmbeeinträchtigung durch Fahrzeuge oder Maschineneinsatz. Insbesondere lärmsensible Lebewesen werden dadurch stark gestört. Beispielsweise kann sich durch die menschliche Störung das Bewegungsverhalten von Tieren verändern (Doherty et al. 2021).

Auswirkungen während des Biomasseanbaus

Während des agrarischen oder forstlichen Anbaus von Biomasse für die Bioenergiebereitstellung können ebenfalls Auswirkungen auf die Biodiversität erfolgen. Grundsätzlich führt

eine intensiv bewirtschaftete **Monokultur** zu einem Verlust von Arten und Ökosystemen. Der Umfang und die Schwere der Auswirkungen hängen von mehreren Faktoren wie beispielsweise den Stoffeinträgen, der Bodenbearbeitung, der Schlaggröße und der Frequenz der Bewirtschaftung ab.

Stoffeinträge wie Dünger oder Pestizide können je nach Art und Intensität der Einträge Lebewesen direkt oder indirekt schaden. Dazu kommt, dass sie durch die Anreicherung in Boden, Gewässern und der Luft die Lebensraumqualität verschlechtern oder den Lebensraum zerstören. Bei Monokulturen erfolgt eine Konzentration auf eine einzige ertragsreiche Energiepflanze. Da diese anfälliger für Schädlinge oder andere Krankheiten ist, werden vermehrt Pestizide eingesetzt, was wiederum ein vermehrtes Artensterben und einen Verlust an Ökosystemleistungen mit sich bringen kann. Forschende erläutern, dass in der modernen Landwirtschaft nur 0,1 % der Pestizide, die auf Nutzpflanzen ausgebracht werden, tatsächlich die zur Bekämpfung anvisierten Organismen („Unkrautpflanzen“, Schadpilze und Schadinsekten) erreichen, während der Rest der Wirkstoffe in der Umwelt verbleibt (Kumar et al. 2021). Eine umfassende Beschreibung der negativen Auswirkungen von Pestiziden auf Vögel, Tiere und Menschen ist Kumar et al. (2021) zu entnehmen. Eine Übersicht über ökologische Auswirkungen beim Anbau von Rohstoffen für Biokraftstoffe geben außerdem Fehrenbach et al. (2024).

Auch die **Bodenbearbeitung** kann umfangreiche Auswirkungen auf die Biodiversität mit sich bringen, die je nach Art und Intensität der Bearbeitung variieren können. Gleichermaßen gilt hier, dass eine Intensivierung der Bearbeitung umso negativere Auswirkungen mit sich bringt. Eine intensive Bearbeitung des Bodens kann zu weitreichenden Auswirkungen bis hin zur Verschlechterung der Lebensraumqualität und zum Lebensraumverlust führen. Beispielsweise kann durch die mechanische Bearbeitung die Bodenstruktur zerstört und die Bodenfauna geschädigt werden (NABU 2023). Im Rahmen einer umfassenden Studie wurde der Biodiversitätseffekt der reduzierten Bodenbearbeitung auf Mikrobiota untersucht. Es wurde festgestellt, dass eine signifikante Änderung in der Zusammensetzung der Bodengemeinschaft in Abhängigkeit von der Intensität der Bodenbearbeitung besteht (Frøslev et al. 2021). Anhand der Untersuchung der Auswirkung der Bodenbearbeitung auf Arthropoden konnten ähnliche Erkenntnisse gewonnen werden (Patterson et al. 2018). Zusätzlich zur Bodenbearbeitung spielt die Reihenfolge der Fruchtfolge eine zentrale Rolle hinsichtlich der Auswirkungen auf Arthropoden (Patterson et al. 2018). Darüber hinaus kann eine intensive Bearbeitung durch das Freisetzen von Emissionen das Klima zusätzlich belasten (NABU 2023). Da der Klimawandel ein direkter Treiber des Biodiversitätsverlustes ist, hat die intensive Bodenbearbeitung somit in mehrerlei Hinsicht negative Auswirkungen auf die Biodiversität.

Ein weiterer Faktor, der die Auswirkungen auf die Biodiversität bestimmt, ist die Größe des **Ackerschlags**, d. h. des mit einer einheitlichen Kultur bestellten Feldes. Groß angelegte Schläge stellen eine kontinuierliche Barriere dar und führen somit zu einem Zerschneidungseffekt (NABU 2023), wie bereits bei den Auswirkungen vor dem Biomasseanbau erläutert. Durch diese kontinuierliche Barriere können beispielsweise Bestäuber, deren Flugradius begrenzt ist, die Bestäubung von teils seltenen oder spezialisierten Pflanzenarten nicht mehr ermöglichen (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft o.J.)

Zusätzlich dazu kann ein erhöhtes Verkehrsaufkommen oder ein erhöhter Maschineneinsatz während des Biomasseanbaus zu einer **Störung** von Lebewesen führen (siehe vorhergehender Abschnitt zu Auswirkungen vor dem Biomasseanbau).

Eine weitere indirekte Auswirkung, die mit dem Biomasseanbau verbunden ist, ist die **indirekte Landnutzungsänderung** (iLUC). Auch wenn der Anbau der Biomasse auf einer vorhandenen Ackerfläche erfolgt (sprich: keine direkte Landnutzungsänderung vorliegt), müssen die zuvor auf der Fläche angebauten Kulturen (z. B. für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion) woanders produziert werden. Anhand von globalen Marktmodellen können solche Verdrängungsprozesse abgeschätzt werden. Die zusätzliche Fläche wird zumeist dort erschlossen, wo sie am kostengünstigsten zur Verfügung steht. Betroffen sind nach den Ergebnissen der Modelle tropische Wälder oder Savannen. Das bedeutet, auch ein zunehmender Anbau von Bioenergiepflanzen in Deutschland kann potenziell solche indirekten Effekte anderswo auf der Welt induzieren. Diese iLUC-Thematik wurde im Rahmen der Klimabilanzierung mehrfach erläutert, so auch in Fritsche et al. (2010). Die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED)¹ schließt Biomasse, die mit einem hohen Risiko indirekter Landnutzungsänderungen verbunden ist, von der Anrechnung auf die Zielerfüllungen (Quoten) aus.

Auswirkungen während weiterer Verarbeitungsschritte

Neben der Produktion von Biomasse für die Bioenergie bringt auch die weitere Verarbeitung über unterschiedliche Konversionspfade Auswirkungen auf die Umwelt und darunter auch auf die Biodiversität mit sich. Dabei kann bereits bei der Herstellung eines Biobrennstoffs wie auch dessen Einsatz (z. B. die Verbrennung der Holzpellets in einem Biomasseheizkraftwerk) zu Auswirkungen durch das Freisetzen von Emissionen führen. Die entscheidende Frage ist dabei, wie sich der Aufwand der Erzeugung von Biomasse, der Umwandlung in einen Bioenergieträger und die **Treibhausgasemissionen** bei der Nutzung gegenüber der damit erwarteten Emissionseinsparung durch den Ersatz von fossilen Energieträgern errechnet. Die Nutzung von Biomasse zu Energiezwecken ist keineswegs klimaneutral, da der Anbau (Düngemittel, Maschineneinsatz) und die verfahrenstechnische Umwandlung energieintensiv sind. Je geringer der Nettoeinsparnutzen ausfällt, desto weniger helfen Bioenergieträger beim Klimaschutz. Da der Klimawandel ein direkter Treiber des Biodiversitätsverlustes ist (IPBES 2019), steht die weitere Verarbeitung von Biomasse in direkter Verbindung mit dem Biodiversitätsverlust.

Im Hinblick auf die Konversionspfade von Biomasse sind auch die Unterschiede in den Wirkungsgraden zu beachten. Während Holz einen ähnlichen Energiegehalt aufweist wie Braunkohle, sind die elektrischen Wirkungsgrade bei der Verbrennung von Holz mit 20 bis maximal 35 %² deutlich niedriger als bei Kohlekraftwerken mit bis zu über 40 %.³ Die tatsächlichen CO₂-Emissionen von Strom aus Holzfeuerungen sind somit höher als die von Kohle (Agostini et al. 2014). Entscheidend ist dabei, wie die Klimawirksamkeit von CO₂ aus der Holzverbrennung bewertet wird. Da mit der Entnahme von Waldholz der Kohlenstoffspeicher des Waldes verringert wird, geht damit das Potenzial an CO₂-Einsparung ein Stück weit verloren. Im CO₂-Rechner des Umweltbundesamts⁴ werden daher neuerdings diese Emissionen angerechnet (Fehrenbach et al. 2024). Hintergrund für diesen Ansatz ist die UBA-Studie BioSINK (Hennenberg et al. 2023). Darin wird basierend auf der Tatsache, dass eine Holzentnahme die Speicherleistung auf der Waldfläche reduziert, abgeleitet, dass angesichts der entgangenen Speicherleistung von Holz bei der Bilanzierung der energetischen Holznutzung keine

¹ Richtlinie (EU) 2018/2001 zuletzt geändert durch Richtlinie (EU) 2023/2413

² <https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2020/10/C.A.R.M.E.N.-Information-Biomasseheizkraftwerke.pdf>

³ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/kraftwerke-konventionelle-erneuerbare#wirkungsgrade-fossiler-kraftwerke>

Dies liegt an technischen Grenzen für Dampfkesselprozesse. Durch den gegenüber Kohle eher heterogenen Brennstoff Holz muss die Kesseltemperatur niedriger gehalten werden, wodurch der Wirkungsgrad der Dampfturbine geringer ausfällt.

⁴ https://uba.co2-rechner.de/de_DE/

Minderung der Treibhausgase bei der Energieholznutzung resultiert (Fehrenbach et al. 2022; Hennenberg et al. 2023).

Ein zentraler Aspekt beim Vergleich von Biomasse mit Solar- und Windenergie ist, dass mit Letzteren ein Vielfaches mehr an Energie pro Hektar bereitgestellt wird, als dies bei Biomasse der Fall ist (Böhm 2023). Anhand der Biokraftstoffe konnte in einer Studie aufgezeigt werden, dass an deutschen Tankstellen verkaufte Biokraftstoffe weltweit über 1,2 Mio. Hektar belegen. Dies entspricht ca. dem Fünffachen der Fläche Luxemburgs (Fehrenbach und Bürck 2022). Ausgehend von der Fahrleistung, die mit den in Deutschland vertankten Biokraftstoffen möglich ist, ermittelten die Autor*innen welche Flächenbelegung erforderlich ist, um mit einem Elektroauto, welches mit Solarenergie betrieben wird, dieselbe Fahrleistung zu erbringen. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass diese Alternative bei gleicher Kilometerleistung einen 97 % geringeren Flächenverbrauch mit sich bringt. Das bedeutet, dass die Bioenergienutzung mit einem sehr hohen Flächenverbrauch einhergeht, wobei flächeneffizientere Alternativen bestehen.

Auch im Hinblick auf die Klimawirkung stellten die Autor*innen eine Bilanz darüber auf, welche Klimawirkung mit der Nutzung von Biokraftstoffen einhergeht und demgegenüber, welche Klimawirkung mit einer Renaturierung dieser Agrarfläche einhergeht, bei gleichzeitiger Bereitstellung von Solarenergie, um dieselbe Fahrleistung zu erbringen. Während amtlichen Zahlen zufolge durch die Biokraftstoffnutzung jährlich 9,2 Mio. t CO₂ eingespart werden, geht eine Renaturierung auf derselben Fläche mit einer Einsparung von jährlich 16,4 Mio. t CO₂ einher. Wenn die Bereitstellung von Solarenergie für eine äquivalente Fahrleistung auf 3 % der Fläche und eine gleichzeitige Renaturierung auf 97 % der Fläche umgesetzt wird, führt dies zu einer Einsparung von jährlich 27,5 Mio. t CO₂. Folglich können Klimaschutz und Biodiversitätsschutz durch eine sinnvolle Kombination von flächeneffizienten Energieträgern und Renaturierungsmaßnahmen auf einer Fläche erfolgen ohne das Abhandenkommen der Energiebereitstellung (Fehrenbach und Bürck 2022).

Zusammenfassung der Schwere und Bedeutung der Auswirkungen von Bioenergie

| | Flächenbelegung | Flächennutzungsänderung und iLUC | Zerschneidung und Barriereeffekte | Störungseffekte | Stoffeinträge | Bodenbearbeitung | Emissionen |
|----------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|---------------|------------------|------------|
| agrарische Biomasse | ●●● | ●●● | ●● | ●● | ●●● | ●● | ●● |
| Forstliche Biomasse | ●● | ● | ● | ●● | ● | ● | ●● |

Erklärung: ●●● = starke Auswirkung, ●● = mäßige Auswirkung, ● = geringe Auswirkung

Lösungsansätze zur Verringerung der Auswirkungen

Auch wenn es Maßnahmen zur Verringerung der Auswirkungen gibt, ist es im Kontext Bioenergie jedoch erforderlich, die Bereitstellung und Nutzung von Bioenergie aufgrund von mehreren Punkten kritisch zu hinterfragen: Zum einen geht mit dem Biomasseanbau ein sehr hoher Flächenverbrauch einher, es bestehen flächeneffizientere Alternativen zur Bioenergienutzung, wie weiter oben ausführlich ausgeführt wurde. Zum anderen ist im Zuge des Klimaschutzes das Bestehen natürlicher Senken essenziell, was Bezug nimmt auf die ebenfalls oben angesprochene kritische Frage der Klimaneutralität von Holzverbrennung.

Die vorherige Bundesregierung wollte mit der Nationalen Biomassestrategie die Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Nutzung von Biomasse ermöglichen. Die Strategie liegt bisher in Form von Eckpunkten vor, die folgende zentrale Leitprinzipien im Sinne einer Hierarchie enthalten:

- a) die Priorisierung der stofflichen Nutzung,
- b) Vorrang der Mehrfachnutzung und zuletzt
- c) Biomasse als Energieträger (BMEL 2024).

Das in den Leitprinzipien der Biomassestrategie enthaltene Konzept der Kaskadennutzung der Biomasse wurde bereits an mehreren Stellen vorgeschlagen und deren Nutzen für den Klimaschutz ausführlich dargelegt (Carus et al. 2014; Haberl und Geissler 2000). Das Konzept zielt darauf ab, Biomasse einer Mehrfachnutzung zu unterziehen. Beispielsweise soll bei der energetischen Biomassenutzung Altholz statt Waldholz eingesetzt werden. Im Hinblick auf die Biodiversität würde dies bedeuten, dass der Druck auf natürliche Ökosysteme sinkt, da weniger Biomasse dem Ökosystem entnommen wird.

Wenn die Nutzung von Biomasse für Bioenergie unumgänglich ist, kann auf die Vorschläge des NABU (2023) zur naturverträglichen Land- und Forstwirtschaft zurückgegriffen werden. Mit diesen Maßnahmen können die Auswirkungen auf die Biodiversität reduziert und – im Gegensatz zu einer intensiven Bewirtschaftung – sogar positive Effekte erzielt werden.

Um eine **nachhaltige Landwirtschaft** umzusetzen, gilt es, Stoffeinträge zu reduzieren, eine schonende Bodenbearbeitung und eine breite, angepasste Fruchtfolge zu gewährleisten. Das Errichten von Strukturelementen, wie beispielsweise Hecken entlang der Felder, gilt ebenfalls als wichtiges Element, da sich dort Arten ansiedeln, zurückziehen oder es als Trittsteinbiotop nutzen können. Bei einer ausreichenden Anzahl von Strukturelementen können gegebenenfalls Barrieren durch die angelegten Felder überwunden werden (NABU 2023). Es wird empfohlen, dass mindestens auf 10 % der Fläche Strukturelemente errichtet werden. Damit kann auch Biomasse für die energetische Nutzung erzeugt werden, indem solche strukturierenden Elemente als Agroforst oder Kurzumtriebsplantagen in die Agrarlandschaft integriert werden. Ein weiterer positiver Nebeneffekt davon ist, dass auf der Agrarfläche deutlich mehr Kohlenstoff und damit CO₂ gespeichert wird als in den üblichen einsaisonalen Ackerkulturen. Auch aus der Wiedervernässung von vormals entwässerten und intensiv bewirtschafteten Moorböden kann Biomasse für Energiezwecke gewonnen werden. Diese sogenannte Paludikultur hat somit nicht nur Vorteile für die Biodiversität, sondern bringt auch einen gewissen positiven Beitrag für die Wirtschaftlichkeit solcher Ansätze.

Die **naturverträgliche Waldbewirtschaftung** beinhaltet zum einen ein angepasstes Waldmanagement mit einem hohen Struktureichtum, der durch unterschiedliche heimische Baumarten unterschiedlichen Alters erreicht werden kann. Damit soll eine natürliche Waldgesellschaft gefördert werden. Ein weiteres zentrales Element einer naturverträglichen

Waldbewirtschaftung ist die Sicherstellung einer eigendynamischen Entwicklung auf einem bestimmten Anteil der Fläche. Das bedeutet, dass auf diesen Flächen keine Eingriffe erfolgen. Hier können dann natürliche Prozesse in ihrer natürlichen Dynamik erfolgen. Dies ist im Zuge des Biodiversitätsschutzes essenziell. Es wird empfohlen, dass auf mindestens 10 % der Fläche eine natürliche Entwicklung ermöglicht wird. Dazu kommt, dass Totholz im Wald verbleiben soll, da es für zahlreiche Arten deren Lebensgrundlage und Habitate darstellt (NABU 2023).

Zusammenfassung des Forschungsbedarfs

Zum Thema Bioenergie und Biodiversität liegen bereits viele Forschungsarbeiten vor. Zusätzlich von Interesse wären Untersuchungen zur Wirkung auf Biodiversität durch:

- die weitere Ausbreitung von Kurzumtriebsplantagen,
- verschiedene Formen der Agroforstwirtschaft,
- die Kultur von Zwischensaaten, die z. B. für Biogas genutzt werden können,
- verschiedene Formen von Paludikulturen.

3.4 Wasserkraft

Wasserkraft ist ein erneuerbarer Energieträger, der durch die Nutzung der kinetischen und potenziellen Energie von Wasserströmen zur Bereitstellung mechanischer und/ oder elektrischer Energie beiträgt. Sie ist eine der ältesten und mit einem Anteil von ca. 15 % an der gesamten globalen Stromversorgung die bisher am häufigsten genutzte erneuerbare Energiequelle (UBA 2023). Aufgrund der starken Zunahme anderer erneuerbarer Energieträger hat der relative Anteil von Wasserkraft an der globalen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in den Jahren ab 2016 jedoch kontinuierlich abgenommen (von ca. 70 % in 2016 auf rund 50 % in 2022) (IEA 2023; Statista 2024).

Die Rolle der Wasserkraft in der Energiewende in Deutschland wird als begrenzt angesehen, da das technisch-ökologische Potenzial weitgehend ausgeschöpft und der Beitrag zur deutschen Bruttostromerzeugung gering ist. So werden in Deutschland ca. 2,9 bis 3,8 % des jährlichen Bruttostromverbrauchs durch Wasserkraft abgedeckt (UBA 2023). Geografische und ökologische Beschränkungen begrenzen eine Ausweitung. Da Wasserkraftanlagen (WKA) unabhängig vom Wetter das gesamte Jahr Strom produzieren, bleibt Wasserkraft eine „grundlastfähige“ und planbare Energiequelle, die das Stromnetz stabilisieren kann.

Die Wasserkraftnutzung erfordert den Bau von WKA, die in zwei Haupttypen unterteilt werden können: Laufwasserkraftwerke und Speicherkraftwerke. Dabei kann es zu verschiedenen Auswirkungen auf Natur und Landschaft kommen. Im Rahmen dieses Kapitels werden die potenziellen Auswirkungen von beiden Kraftwerkstypen auf die Biodiversität untersucht, wobei zwischen den Auswirkungen während des Baus, des Betriebs, der Produktion und des Rückbaus bzw. Recyclings von WKAs differenziert wird. Auswirkungen können je nach Typ und Größe der Anlagen stark variieren und sind art- und standortabhängig.

Auswirkungen während des Baus von WKA

Für die Errichtung einer WKA ist die Verfügbarkeit von Flächen sowie der Eingriff in Gewässer erforderlich. Je nach Standort können diese Eingriffe Flüsse, Stauseen oder umliegende Ökosysteme betreffen. Der Bau von Staumauern oder Wasserumleitungsstrukturen kann zur **Fragmentierung von Flussökosystemen** führen. Solche Barrierewirkungen stören beispielsweise wandernde Fischarten, wie Lachse oder Aale, deren Wanderwege zu Laichplätzen unterbrochen werden können (Lange et al. 2018). Des Weiteren führt die Isolation von Populationen zu einer Reduktion der genetischen Vielfalt, was die Anpassungsfähigkeit von Arten reduzieren und zu lokalem Aussterben führen kann (Lange et al. 2018). Neben der direkten eingeschränkten Durchgängigkeit von Fließgewässern für Organismen wirkt sich eine eingeschränkte Passierbarkeit von Feststoffen/ Sedimenten indirekt auch auf die Biodiversität aus.

Außerdem führt der große Verbauungsgrad durch WKA und die notwendige Infrastruktur zu einem direkten **Habitatverlust** (Gracey und Verones 2016). Zusätzlich können Bauaktivitäten, wie Erdarbeiten und Materialtransport, **Bodenerosion verstärken**, was die Wasserqualität durch Feinsedimente verschlechtern und sich dann auch negativ auf aquatische Organismen auswirken kann (Geidel et al. 2021).

Hinzu kommen indirekte Auswirkungen auf die Biodiversität **durch Verstärkung des Klimawandels**. Wenn Wald- und Grünflächen für WKA gerodet und überflutet werden, geht ihre Fähigkeit, Kohlenstoffdioxid zu speichern, verloren. Die dadurch verstärkte Erderwärmung verändert Lebensräume global, etwa durch extreme Wetterereignisse und steigende Temperaturen, und sie wirkt sich ebenfalls auf die Biodiversität aus (Amenda 2019).

Auswirkungen während des Betriebs von WKA

Der Betrieb von Wasserkraftanlagen hat erhebliche und kontinuierliche Auswirkungen auf die Biodiversität. So kommt es durch die **Barrierewirkung** und die Regulierung des Wasserflusses, beispielsweise durch Hydropeaking/ Schwallbetrieb (künstliche schnelle, zyklische Änderungen der Wasserabflüsse), zu abrupten Schwankungen in Wasserständen und zu veränderten Strömungsgeschwindigkeiten ober- und unterhalb von WKA. Die **Veränderungen der natürlichen Strömungsdynamik** beeinträchtigen aquatische Lebensräume stark, da sie beispielsweise zu einer Verdrängung von Jungfischen, einer gestörten Nahrungsvfügbarkeit durch Schädigung von Uferhabitaten und einer deutlichen Reduktion der Artenvielfalt führen können. Zudem können Fluktuationen Laichgebiete trockenfallen lassen und das Stranden von Fischen verursachen, was die Reproduktion gefährdet (Bipa et al. 2024).

WKA können auch **die Sedimentdynamik und Flussmorphologie verändern**, wodurch beispielsweise wichtige Lebensräume für Organismen, die am Boden von Gewässern leben, zerstört werden oder die Nährstoffversorgung in Lebensräumen flussabwärts beeinträchtigt wird (Gracey und Verones 2016). Zusätzlich können **Veränderungen der physikalisch-chemischen Bedingungen** im Wasser (wie z. B. Temperatur oder Sauerstoffgehalt) die Entwicklung von Fischeiern verzögern und Reproduktionszyklen empfindlicher Arten stören (Gracey und Verones 2016). Zudem kann dies zur vermehrten Besiedlung durch nicht-einheimische Arten führen.

Die **Fragmentierung von Flussökosystemen** und die damit einhergehende Verkleinerung des genetischen Pools von wandernden Fischarten bleibt auch während des Betriebs der Anlagen ein zentrales Problem (Lange et al. 2018). Ein weiteres Problem stellt die **direkte Schädigung von Organismen in Turbinen dar**. Fische, die durch die Turbinen geschleust werden, erleiden häufig Verletzungen oder sterben durch den plötzlichen Druckabfall und mechanische Einwirkungen (Geist 2021). Eine Studie des Leibniz-Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei zeigt, dass durchschnittlich ca. 20 % der Fische beim Passieren von Wasserkraftturbinen tödliche Verletzungen erleiden (Radinger et al. 2022).

Ein weiterer Aspekt sind **klimarelevante Emissionen aus Stauseen**, die aufgrund der Flutung von Landflächen und der anschließenden Zersetzung des organischen Materials unter Wasser entstehen (Kandarr und Wittmann 2020). Diese Emissionen können die globalen Auswirkungen auf Ökosysteme verschärfen, etwa durch steigende Temperaturen und extreme Wetterereignisse. Eine Studie aus 2011 ergab, dass die globalen Kohlenstoffemissionen aus Stauseen für Wasserkraft etwa 4 % der gesamten Kohlenstoffemissionen aus Süßwasser ausmachen (menschengemacht und natürlich) (Barros et al. 2011). Die Höhe der Emissionen ist in der Fachliteratur umstritten. Es ist jedoch klar, dass mit einer steigenden Anzahl an Stauseen die assoziierten Treibhausgas- (THG-)Emissionen zunehmen werden. Insgesamt sind die THG pro kWh jedoch deutlich geringer als bei fossilen Energieträgern, und es wird davon ausgegangen, dass Staudämme zur Wasserkraftnutzung ähnliche THG-Emissionen wie etwa Wind- und Sonnenenergie haben (Deutscher Bundestag 2022; Kandarr und Wittmann 2020; Ubierna et al. 2022).

Auswirkungen während der Produktion und des Rückbaus von WKA

Zum aktuellen Kenntnisstand gibt es nur wenige spezifische Studien, die die direkten Auswirkungen der Produktion und des Rückbaus von Wasserkraftanlagen auf die Biodiversität untersuchen. Indirekte Erkenntnisse stammen jedoch aus Ökobilanzstudien, die die Umweltauswirkungen während des gesamten Lebenszyklus von Wasserkraftwerken analysieren. Die Produktion von Wasserkraftanlagen, insbesondere der Bau von Staudämmen,

Turbinen und weiteren Infrastrukturen, erfordert einen erheblichen Material- und Energieaufwand. Der Einsatz von Beton, Stahl und Zement dominiert, wobei diese Materialien durch ihren Herstellungsprozess **Treibhausgasemissionen und Umweltbelastungen wie Versauerung und Eutrophierung verursachen**. Ökobilanzdaten zeigen, dass Bau und Materialherstellung beispielsweise etwa 37,5 % der Emissionen eines Speicherwasserkraftwerks ausmachen können (Flury et al. 2012). Durch damit **einhergehenden Klimawandelfolgen** kann die Biodiversität indirekt gefährdet werden.

Der Rückbau von Wasserkraftanlagen birgt ebenfalls Risiken für aquatische Ökosysteme, da die Mobilisierung von Sedimenten zu einer Freisetzung von Schadstoffen und zur Verschlechterung der Wasserqualität führen kann. Diese temporären negativen Effekte stellen eine Bedrohung für Fische und andere Organismen dar. Langfristig bietet der Rückbau jedoch Chancen, Flussökosysteme zu renaturieren und die Durchgängigkeit für wandernde Arten wiederherzustellen. Solche Maßnahmen haben sich als wirksam erwiesen, um die Biodiversität in ehemals fragmentierten Flusssystemen wieder zu fördern (Hart et al. 2002).

Zusammenfassung der Schwere und Bedeutung der Auswirkungen von Wasserkraft

| | Flussfragmentierung | Veränderung der Strömungsdynamik | Habitatverlust | Schädigung von Organismen durch Turbinen | Veränderte physikalisch-chemische Bedingungen | Treibhausgasemissionen | Veränderte Sedi-mentdynamik |
|--------------------|---------------------|----------------------------------|----------------|--|---|------------------------|-----------------------------|
| Wasserkraft | ● ● ● | ● ● ● | ● | ● ● | ● ● | ● | ● ● ● |

Erklärung: ● ● ● = starke Auswirkung, ● ● = mäßige Auswirkung, ● = geringe Auswirkung

Lösungsansätze zur Verringerung der Auswirkungen

Es gibt verschiedene mögliche Maßnahmen zur Reduzierung der negativen Auswirkungen der Wasserkraft auf die Biodiversität. Da in Deutschland das Potenzial für Wasserkraft weitgehend ausgeschöpft ist, wird im folgenden Abschnitt ein besonderer Fokus auf die Verbesserung bestehender Anlagen gelegt. So schreiben Experten in den Leitlinien zum nachhaltigen Ausbau der Wasserkraft im Einzugsgebiet der Donau, dass „die Kombination aus technischer Aufwertung und ökologischer Sanierung bestehender WKA eine Win-Win-Situation sowohl zur Energieerzeugung als auch für die Umweltbedingungen“ darstellt (Schwaiger et al. 2013). Auch Experten des EU-finanzierten Projekts FiThydro heben hervor, dass jede Strategie im Bereich der Wasserkraft die Verbesserung der bestehenden WKA in den Mittelpunkt stellen muss – inklusive ökologischer Verbesserungen (Europäische Kommission 2021a). Jedoch können solche Maßnahmen an ihre wirtschaftlichen Grenzen stoßen, was zu Konflikten unterschiedlicher Interessensgruppen führen kann. Daher ist bei der Sanierung von Anlagen eine gesamtheitliche Betrachtung essenziell (Geidel et al. 2021).

Ein zentraler Aspekt für den Erhalt der Flussökosysteme ist die Minimierung der negativen Auswirkungen durch veränderte Strömungsdynamiken; dies kann besonders durch die Gewährleistung einer ökologisch vertretbaren Mindestabflussmenge sichergestellt werden (Schwaiger et al. 2013). Nur so können Ziele der EU-Wasserrahmenrichtlinien eingehalten werden. Des Weiteren können Abflüsse so angepasst werden, dass sie den natürlichen

Flussregimen näherkommen. Dazu gehört eine zeitlich variierende Steuerung, die nicht nur Mindestabflussmengen berücksichtigt, sondern auch saisonale und tageszeitliche Schwankungen nachbildet (European Centre for River Restoraton 2021). So können Lebensräume für Flussorganismen erhalten bleiben.

Gegen die negativen Auswirkungen des Hydropeakings können Pufferbecken oder Ausgleichsreservoirs eingesetzt werden, um abrupte Abflussschwankungen zu glätten. Alternativ können unter anderem Betriebe verschiedener Anlagen koordiniert oder die Amplituden der Abflussschwankungen reduziert werden (Schwaiger et al. 2013). Dies schützt insbesondere empfindliche Arten, die auf stabile Lebensräume angewiesen sind.

Die regelmäßige kontrollierte Entnahme von Sedimenten oberhalb von Dämmen kann verhindern, dass diese sich dort anreichern, was zur Stabilisierung der Flussmorphologie beiträgt. Demgegenüber sollten unterhalb von WKA künstlich Sediment zugeführt werden, um den Verlust auszugleichen (Schwaiger et al. 2013). Zusätzlich können Maßnahmen ergriffen werden, um die Sedimentdurchgängigkeit beispielsweise durch den Bau von Sedimentumleitungsstrukturen zu gewährleisten (Habersack et al. 2013).

Um das Sterben von Fischen durch Turbinen zu verringern und die Passierbarkeit von WKA für Organismen zu ermöglichen, sollten fischfreundliche Turbinen sowie Schutzvorrichtungen wie Siebe an den Einlässen verbaut werden (European Centre for River Restoraton 2021). Darüber hinaus können Fischwanderhilfen, wie Fischtreppen oder Bypass-Systeme, die Wanderung von Fischen erleichtern und Populationen stabilisieren. Dabei gibt es zahlreiche Studien, die innovative Konzepte und Methoden entwickeln, um die Fischwanderung an WKA zu optimieren (Wagner et al. 2021). Im Rahmen des EU-finanzierten Projekts FIThydro haben Wissenschaftler*innen zudem ein risikobasiertes Entscheidungstools für die Planung, Genehmigung und den Betrieb von Wasserkraftwerken entwickelt, das die Umweltauswirkungen auf Fischpopulationen berücksichtigt (Europäische Kommission 2021b).

Um die THG-Emissionen durch Stauseen zu verringern, ist es besonders wirksam, die Vegetation vor der Flutung zu entfernen und so den Gehalt an organischen Stoffen zu verringern. In Folge dessen werden dann später geringere Mengen an Methan und Kohlenstoffdioxid aus den Stauseen emittiert (Kandarr und Wittmann 2020). Bei bestehenden WKA ist die Belüftung des Bodensediments eine wichtige Maßnahme, um Methanemissionen und die schädlichen Folgen der Treibhausgase zu verringern (Kandarr und Wittmann 2020).

Eine Studie des WWF fordert neben der Minimierung von negativen Auswirkungen bestehender Anlagen auch einen Rückbau von Staudämmen in Flüssen, um durch Renaturierung die negativen Auswirkungen auf Süßwasserökosysteme zu reduzieren (Thieme et al. 2021). Im Rahmen der EU 2030 Biodiversitätsstrategie wurde das Ziel definiert, „mindestens 25.000 km der EU Flüsse wieder in einen frei fließenden Zustand versetzen“ (Europäische Kommission 2020). Thieme et al (2021) heben des Weiteren einen Ausgleichsmechanismus aus einer Fallstudie aus Costa Rica hervor, bei der die Regierung ein Fließgewässer verstärkt geschützt habe, als ein anderer Fluss in der Region durch eine neue WKA beeinträchtigt wurde.

Um den möglichen Rückbau und die Sanierung von WKA differenzierter zu beleuchten, wird abschließend kurz auf die besondere Rolle von kleinen WKA in Deutschland eingegangen. In Deutschland haben über 7800 WKA, das entspricht ca. 95 % der gesamten WKA in Deutschland, eine maximale Leistung von unter 1 Megawatt (MW) (Maier 2022; Pusch et al. 2021). Diese sogenannten Kleinwasserkraftwerke haben 2020 nur ca. 15 % des Stroms aus Wasserkraft produziert, was weniger als 0,5 % der gesamten deutschen Stromproduktion

entspricht (Maier 2022; Pusch et al. 2021). In einem Memorandum 65 deutscher Fachwissenschaftler*innen (2021) wurden daher die großen negativen ökologischen Auswirkungen kleiner WKA der gleichzeitig relativ geringen Stromproduktion gegenübergestellt und Empfehlungen aufgezeigt. So weisen die Forscher*innen darauf hin, dass eine ökologische Sanierung der Kleinwasserkraftwerke kaum möglich sei und man sich daher bei eventuellen Förderungen für den (Weiter-)Betrieb von WKA auf mittelgroße und große WKA ($> 1 \text{ MW}_{\text{max}}$) konzentrieren sollte. Bei kleinen WKA sollte dahingegen Stilllegung und Rückbau staatlich gefördert werden (Pusch et al. 2021).

Zusammenfassung des Forschungsbedarfs

Die hier stichpunktartig zusammengefassten Forschungsbedarfe in Bezug auf Wasserkraft und Biodiversität sind in den vorangehenden Absätzen beschrieben:

- Treibhausgasemissionen von Wasserkraftwerken und dazugehörigen Stauseen

3.5 Geothermie

Geothermie, auch als Erdwärme bezeichnet, ist eine erneuerbare Energiequelle, die durch die Nutzung der im Erdinneren gespeicherten Wärme zur Erzeugung von elektrischer Energie und/ oder Wärme beiträgt. Die geothermischen Anwendungen lassen sich grob in zwei Kategorien unterteilen: die oberflächennahe und die tiefe Geothermie. Die oberflächennahe Geothermie nutzt Wärme aus Tiefen von bis zu 400 Metern, wo Temperaturen von maximal 25 °C herrschen (Dengler 2010). Mithilfe von Wärmepumpen kann diese Energie für das Heizen und Kühlen von Gebäuden verwendet werden. Im Gegensatz dazu ermöglicht die tiefe Geothermie Wärme aus Tiefen von bis zu 5 km zu fördern, wo sehr hohe Temperaturen herrschen – bei einer Tiefe von 3.000 bis 4.000 m weit über 100 °C (Sadik 2024). Diese Energie kann nicht nur für Fernwärmenetze, sondern auch zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Tiefe Geothermie kann unabhängig von Wettereinflüssen das ganze Jahr über zuverlässig Energie liefern.

Die Bundesregierung (Stand 2024) fördert den Ausbau der Geothermie als wichtigen Baustein der Energiewende, insbesondere für den Bereich der Wärmeversorgung (BMWK 2024). So identifizierte die „RESCUE-Studie“ des Umweltbundesamts aus dem Jahr 2019 Geothermie als eine wichtige Quelle für die treibhausgasneutrale Wärmeversorgung (Purr et al. 2019). Aber auch für die Stromerzeugung in Deutschland stellt die Geothermie aufgrund des großen technischen Erzeugungspotenzials und der Grundlastfähigkeit eine wichtige Option dar und gewinnt bei energiewirtschaftlichen Diskussionen an Bedeutung (Frick et al. 2007). Im Jahr 2022 lag die in Deutschland installierte Leistung für oberflächennahe Geothermie bei 4.700 Megawatt, während die installierte elektrische Leistung durch Tiefengeothermie 47 Megawatt betrug (Bundesverband Geothermie 2024a). Mit einem Anteil von ca. 0,4 % an der gesamten Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2022 befindet sich die Tiefengeothermie in einer frühen Entwicklungsphase.

Trotz der positiveren Umwelteffekte im Vergleich zu fossilen Referenzsystemen sollten die Auswirkungen von Geothermie-Projekten auf die Biodiversität nicht ignoriert werden. Im Rahmen dieses Kapitels werden die potenziellen Auswirkungen der Geothermie auf die Biodiversität während der Bau-, Betriebs-, und Produktionsphase analysiert. Dabei wird versucht, die wichtigsten Auswirkungen der beiden Haupttypen der Geothermie zusammenzutragen; eine detaillierte und differenzierte Betrachtung der Auswirkungen spezifischer Anlagentypen ist im Rahmen dieser Studie nicht realisierbar. In jedem Unterkapitel wird zu Beginn auf die Auswirkungen durch Tiefengeothermie und im Anschluss auf Auswirkungen durch oberflächennahe Geothermie eingegangen. Diese Auswirkungen können artspezifisch variieren und sich je nach Standort unterscheiden. Viele Studien weisen darauf hin, dass diese potenziellen negativen Auswirkungen durch geeignete Strategien und Technologien (Destatis 2024; Pawlik 2024) minimiert bzw. verhindert werden können (Brophy 1997).

Auswirkungen während des Baus von Geothermie-Anlagen

Der Bau von Tiefengeothermie-Anlagen erfordert umfangreiche Bohrungen sowie den Aufbau der Infrastruktur (z. B. Zufahrtswege, Pipelines, Kraftwerksgebäude). Diese Bauarbeiten haben sowohl direkte als auch indirekte Auswirkungen auf die Biodiversität. Eine der zentralen Herausforderungen sind der **direkte Habitatverlust und die Fragmentierung von Habitaten** durch den Bau von Geothermie-Anlagen und der notwendigen Infrastruktur wie beispielsweise Straßen (Ng et al. 2021). Besonders in ökologisch sensiblen Gebieten kann dies die lokale Artenvielfalt beeinträchtigen. Jedoch muss hier hervorgehoben werden, dass Geothermie-Anlagen im Vergleich zu vielen anderen Energieträgern üblicherweise einen geringeren Flächenbedarf haben (Shortall et al. 2015).

Ein weiteres Problem können die Störungen durch **Lärm und Vibrationen** darstellen, die während der Bohrarbeiten und durch den Einsatz schwerer Maschinen entstehen. Diese Störungen können empfindliche Arten, insbesondere Boden- und Höhlenbewohner, oder auch Vögel negativ beeinflussen (Ng et al. 2021). Auch können, wie beim Bau anderer Anlagen, durch eine **Kollision** mit Projektfahrzeugen und durch erhöhte **Lichtlevel** während der Bauphase Wildtiere sterben oder beeinträchtigt werden (Ng et al. 2021).

Bohrungen für oberflächennahe Geothermie sind weniger tief und benötigen meist keine großflächige Infrastruktur. Allerdings können sie **hydrogeologische Systeme beeinflussen**, indem sie bestehende Wasserreservoirs verändern oder den Grundwasserspiegel senken. Diese Veränderungen können sich indirekt auf aquatische Ökosysteme auswirken und gefährden sowie Lebensräume wie Feuchtgebiete oder grundwasserabhängige Vegetation. Auch bei oberflächennaher Geothermie kann der Bau aufgrund von Bohrungen zu direkten physischen Störungen der Lebensräume führen (z. B. durch Lärm und Untergrundstörungen) (Brielmann et al. 2011).

Des Weiteren können Bohrungen und Oberflächenaktivitäten bei unsachgemäßer Durchführung zu einem **Eintrag von Schadstoffen in die Grundwasserleitern oder Oberflächengewässer** führen, was die Wasserqualität negativ beeinflusst (Künzli et al. 2019).

Auswirkungen während des Betriebs von Geothermie-Anlagen

Auch wenn der Flächenbedarf und damit die **Flächenversiegelung** durch Tiefengeothermie-Anlagen zur Stromerzeugung kleiner als bei anderen Energieträgern ist (Vergleich: Geothermie ca. 400 m²/GWh, Wind ca. 1300 m²/GWh und PV ca. 3200 m²/GWh) (Bundesverband Geothermie 2024b) ergeben sich während des Betriebs von Geothermie-Anlagen spezifische Herausforderungen, die verschiedene ökologische Ebenen betreffen können.

Eine mögliche negative Auswirkung durch den Betrieb von Tiefengeothermie-Anlagen ist die **lokale thermische Veränderung in oberflächennahen Grundwasserleitern**, die durch die Nutzung und Rückführung von heißem Tiefengrundwasser oder -dampf entstehen können (Bundesverband Geothermie 2024c; Ng et al. 2021). Der Bundesverband für Geothermie und das Landesforschungszentrum Geothermie Baden-Württemberg weisen jedoch darauf hin, dass diese thermischen Veränderungen und die damit einhergehende Beeinflussung der Mikrofauna nur lokal im Nahbereich der Bohrungen zu erwarten sind (Bundesverband Geothermie 2024c; Landesforschungszentrum Geothermie 2022).

Eine Studie aus dem Jahr 2005 zeigt auf, dass durch tiefengeothermische Aktivitäten neben der Störung von Mikroorganismen, die in oberflächennahen Grundwasserleitern leben, auch **thermophile Bakterien geschädigt** werden könnten (Grant 2005). Thermophile Bakterien sind Mikroorganismen, die an sehr hohe Temperaturen angepasst sind und in geothermischen Reservoirs leben. Eine große Temperatursenkung aufgrund von Entnahme oder Injektion von Wasser hätte das Absterben zur Folge.

Tiefengeothermie-Projekte können aufgrund von z. B. undichten Stellen auch zur Freisetzung weiterer in geothermischen Flüssigkeiten gelöster Mineralien und Spurenelemente wie Arsen oder Quecksilber führen. **Diese freigesetzten Schadstoffe können Böden und Gewässer kontaminieren** und beispielsweise toxisch auf aquatische Lebensräume wirken (Ng et al. 2021). Auch die Bodenorganismen, die für die Aufrechterhaltung eines gesunden Ökosystems unerlässlich sind, sind durch solche Verunreinigungen gefährdet. Da diese Substanzen das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen aufgrund ihrer Toxizität direkt hemmen können und die Bodenfruchtbarkeit bzw. den Nährstoffkreislauf im Boden

beeinträchtigen, kann die Kontamination durch freigesetzte Elemente langfristige negative Auswirkungen auf die Pflanzenwelt und die Bodenqualität haben. Auch während des Betriebs kann Lärm (z. B. durch Kühlanlagen bei Geothermie-Anlagen zur Stromerzeugung) negative Auswirkungen auf Organismen haben. Weitere Studien zu den potenziellen Auswirkungen während des Baus und des Betriebs von Tiefengeothermie-Anlagen können dem Literatur-Review von Ng et al. (2021) entnommen werden.

Auch während des Betriebs von oberflächennahen Geothermie-Anlagen kann es zu Veränderungen in der Biodiversität kommen, insbesondere wenn die **Temperaturen von Grundwasser dauerhaft oder wiederholt stark verändert werden** (Griebler et al. 2016). Diese Temperaturschwankungen sind besonders bei offenen Systemen relevant, in denen das Grundwasser direkt als Wärmeträger genutzt wird (Brielmann et al. 2011). Bei geschlossenen Systemen mit Erdwärmesonden bleibt die Temperaturveränderung auf das unmittelbare Umfeld der Sonden beschränkt, kann sich jedoch bei hoher Dichte von Anlagen akkumulieren (Bundesverband Geothermie 2024d). Im Winterbetrieb entziehen Erdwärmepumpen dem Boden oder dem Grundwasser Wärme, wodurch es zu einer lokalen Abkühlung kommen kann. Im Sommer hingegen wird überschüssige Wärme in den Untergrund abgegeben, was zu einer Erwärmung führen kann (Brielmann et al. 2011).

Solche Temperaturveränderungen führen zu einer **Veränderung der Artenzusammensetzung und Aktivitäten der stark angepassten und empfindlichen Grundwasserfauna** (bestehend aus Flohkrebse, Asseln, Würmern, Milben und Mikroorganismen etc.), zu einer veränderten Löslichkeit von beispielsweise Sauerstoff und Nährstoffen sowie veränderten chemischen Prozessen im Wasser (Lehmpful 2015). So kann beispielsweise eine Erwärmung das Wachstum bestimmter Bakterien fördern, während eine Abkühlung den Stoffwechsel verlangsamen und biogeochemische Kreisläufe verändern kann. Es ist hier wichtig zu verstehen, dass die Störung von Mikroorganismen weitreichende Konsequenzen für das gesamte Ökosystem haben kann und alle Lebewesen beeinflusst, die in der Nahrungskette auf mikrobielle Aktivitäten angewiesen sind (Griebler et al. 2016). Griebler et al (2016) zeigen in ihrer Studie detailliert auf, wie sich im Kühlprozess eine Erwärmung des Grundwassers auf die Biodiversität auswirkt und weisen auf die Notwendigkeit hin, die Langzeitauswirkungen zu untersuchen.

Zudem kann der Betrieb neben den direkten Auswirkungen auf Organismen auch zu einer Verringerung des Sauerstoffgehalts führen und so indirekt die Lebensbedingungen für sauerstoffabhängige Organismen verschlechtern. Die daraus resultierenden anaeroben Bedingungen fördern Prozesse wie die **Freisetzung von Schwefelwasserstoff und Methan**, ein starkes Treibhausgas (Griebler et al. 2016). Neben der Freisetzung von Schwefelwasserstoff und Methan können die Temperaturveränderungen im Untergrund auch die Löslichkeit von Mineralien verändern und dazu führen, dass **natürlich gebundene Stoffe (z. B. Eisen, Mangan oder Arsen) freigesetzt werden** (Griebler et al. 2016). Die Auswirkungen solcher Stoffe können, wie bei der Tiefengeothermie beschrieben, zu einer Kontamination von Gewässern und Böden führen.

Auswirkungen während der Produktion und Recyclings von Geothermie-Anlagen

Wie bei anderen Kraftwerkstypen führt die Produktion der Anlagen vor allem durch die Herstellung der Baumaterialien wie Beton und Stahl, und durch Transport- und Dienstleistungen zu **Treibhausgasemissionen**. Wenn der im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern hohe Eigenstrombedarf (ca. 20 % der Bruttostromerzeugung) aus dem Netz bezogen wird, können die Emissionen aus der Vorkette (ca. 6 CO₂-Äq pro kWh) im Vergleich zu den Emissionen während des Betriebes eher gering sein (ca. 194 CO₂-Äq pro kWh) (Memmler et

al. 2017). Die Emissionen durch den Bezug von Hilfsenergie sind jedoch stark von dem Strommix des Netzes abhängig, und es ist wichtig festzuhalten, dass die Tiefengeothermie deutlich niedrigere Emissionen über den Gesamtlebenszyklus im Vergleich zu fossilen Energieträgern aufweist (Memmler et al. 2017).

Zusammenfassung der Schwere und Bedeutung der Auswirkungen von Geothermie

| | Thermische Veränderungen in Grundwasserleitern | Lärm und Vibrationen | Direkter Habitatverlust und Fragmentierung | Freisetzung von Gasen und Mineralien aus geothermale Wasser | Eintrag von Schadstoffen in Grundwasserleitern |
|--------------------|--|----------------------|--|---|--|
| Wasserkraft | ● ● ● | ● ● ● | ● | ● | ● |

Erklärung: ● ● ● = starke Auswirkung, ● ● = mäßige Auswirkung, ● = geringe Auswirkung

Lösungsansätze zur Verringerung der Auswirkungen

Um mögliche Verunreinigungen von Grundwasser durch tiefe Geothermie zu vermeiden, stehen laut Plenefisch et al. (2015) bereits detaillierte Regelwerke und Maßnahmenkataloge zur Verfügung, deren Einhaltung und Überwachung eine ausschlaggebende Rolle spielen. Darüber hinaus empfehlen Plenefisch et al. (2015) ein Monitoring der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers und des Grundwasserstandes, das sich nach den zu erwartenden Risiken aus Eintrag von Tiefenwässern und Frac-Fluiden, den (hydro-)geologischen Verhältnissen wie Störungszonen und Deckschichten sowie den geplanten hydraulischen Gesteinsbehandlungen richtet. Ein Weiterführen des Monitorings während der Betriebsphase wird empfohlen. Somit kann auf Veränderungen reagiert werden und schädigende Wirkungen auf Boden- und Wasserorganismen verhindert oder minimiert werden. Das Erstellen von Grundwassertemperaturkarten, -potentialkarten und -stresskarten kann dazu beitragen, mögliche Effekte im Vorhinein besser abschätzen zu können. Hier kann als Beispiel das österreichische Projekt „ESR20-040 – Heat below the city“ für die Stadt Wien genannt werden (Griebler et al. 2021). So könnten Veränderungen der hydrologischen Systeme sowie thermische Veränderungen erkannt werden. Außerdem erlauben Monitoringsysteme, die bereits während der Planung und Genehmigung durchgeführt werden, durch lange Datenreihen fundiertere Aussagen. Beispielhaft können hier der „thermische Impact“ aus der vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebenen Studie zu Veränderungen des Grundwassers durch oberflächennahe Geothermie sowie die Bewertungsmethoden für Grundwasserökosysteme (Griebler et al. 2015; UBA 2014) genannt werden. Auch seismische Ereignisse können durch Monitoring der Aktivitäten und entsprechende Frühwarnsysteme und Reaktionsschema minimiert werden (Plenefisch et al. 2015).

Die während des Betriebs der tiefen Geothermieanlage freigesetzten Gase wie toxischer Schwefelwasserstoff und klimawirksames Gas Kohlenstoffdioxid können durch technische Lösungen aufgefangen und abgeschieden werden. Beispielhaft sei hier eine Studie von Clark et al. (2019) genannt, die ein Vorgehen von Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (engl.: Carbon capture and storage, CCS) beschreibt. Angemessene Behandlung von Abfallstoffen und Abwasserbehandlungen sind bei Geothermie zwingend notwendig, um Schäden an der Biodiversität durch chemische Belastung zu verringern und zu vermeiden. Das

Vorbeugen von Leckagen des Thermalwassers ist fundamental, um Auswirkungen möglichst gering zu halten.

Geothermische Kraftwerke führen im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien in geringerem Maße zu einer technischen Überprägung der Landschaft und können in Siedlungsgebiete integriert werden (NABU 2024), sodass eine weitere Zerschneidung der Landschaft und Habitate verringert werden kann.

Zusammenfassung des Forschungsbedarfs

Die hier stichpunktartig zusammengefassten Forschungsbedarfe in Bezug auf Geothermie und Biodiversität werden in den vorangehenden Absätzen beschrieben:

- Langzeitauswirkungen der Temperaturänderungen im Grundwasser durch Geothermie-Anlagen auf die Biodiversität

3.6 Übertragungsnetze

Die Übertragungsnetze in Deutschland sind ein zentraler Bestandteil des Energiesystems. Sie stellen sich vorrangig aus Hochspannungsleitungen zusammen, die Spannungen von 220 kV bis 380 kV übertragen. Der weitere Ausbau des Übertragungsnetzes im Rahmen der Energiewende umfasst nach dem 2024 von der Bundesnetzagentur bestätigten Netzentwicklungsplans 4800 km neue Leitungen und etwa 2500 km Verstärkung bereits bestehender Verbindungen gegenüber dem bestehenden Bundesbedarfsplan (Bundesnetzagentur 2024a), um 2045 eine Klimaneutralität des Stromsystems erreichen zu können. Zusätzlich werden weitere Leitungen u. a. in Form von Seekabeln nötig, um den offshore produzierten Strom an das landseitige Übertragungsnetz anzubinden.

Bei Hochspannungsleitungen im Übertragungsnetz wurden bisher fast vollständig Freileitungen eingesetzt (Bundesnetzagentur 2024b). In den regionalen Verteilnetzen wurden vermehrt Erdkabel verwendet. In den Übertragungsnetzen finden Erdkabel noch nicht lange Verwendung (Bundesnetzagentur 2024c). Auch bei den Übertragungsnetzen variieren die Auswirkungen auf die Biodiversität je nach Bauweise, Standort und Begleitmaßnahmen und können auf Arten unterschiedlich Einfluss nehmen.

Auswirkungen während des Baus von Übertragungsnetzen

Für das Verlegen von Erdkabeln müssen, je nachdem, ob Gleich- oder Wechselstrom transportiert wird, unterschiedlich breite Kabelgraben für die Trassen ausgehoben werden. Diese Bauweise wird als offen bezeichnet und wird mehrheitlich durchgeführt. Der Graben wird bis zu zwei Meter tief gegraben (Bundesnetzagentur 2024c). Beim Bau kann in der Folge durch Bodenverdichtung, Störung des Bodengefüges und des Bodenwasserhaushaltes der **Boden beeinträchtigt** werden (efzn 2011), mit potenziellen Auswirkungen auf Bodenorganismen und Pflanzen. In Feuchtgebieten kann es durch baubedingte Auswirkungen auf das Grundwasser zu Drainagen kommen (efzn 2011). Zusätzlich müssen vor dem Bau ggf. Rodungen im Trassenbereich für Zufahrtswege und weitere Arbeitsbereiche vorgenommen werden (Bundesnetzagentur 2024c), und zwar sowohl bei Erdkabeln als auch bei Freileitungen (Bundesnetzagentur 2024b). Dies kann zu **Zerschneidung** und (z. T. temporärem) Habitatverlust führen. Zusätzlich kann ein **Falleneffekt** der Gräben während der Bauphase von Erdkabeln auftreten (Ahmels et al. 2016). Benötigte Nebenanlagen, in Form von Umspannwerken, Kabelübergabestationen, Konvertern oder anderem, verursachen ähnliche Auswirkungen während der Bauphase bezogen auf Licht, Lärm, Beeinträchtigung von Boden, Flächenumwandlung und damit einhergehend **Störeffekte und Habitatverluste** (Runge et al. 2012).

Auswirkung während des Betriebs von Übertragungsnetzen

Freileitungen stellen **Kollisionsrisiken** für Vögel, insbesondere Großvögel wie Störche, Kraniche und Greifvögel dar. Ein gleichzeitiger Kontakt von stromführenden und erdenden Leitungsseilen der Freileitungen können zu tödlichen Stromschlägen führen. Hohe Geschwindigkeiten der Vögel im Horizontalflug und evolutionsbedingte Blindflecken erschweren eine Kollisionsvermeidung für die Vögel (BfN 2020). Darüber hinaus spielen artspezifische Flughöhe, bevorzugte Habitatnutzung und Manövrierfähigkeit der Vögel eine Rolle (Schomerus et al. 2017).

Die Trassen der Übertragungsnetze, sowohl bei Freileitungen als auch bei Erdkabeln, können gerade in bewaldeten Ökosystem zu **Zerschneidungen** führen. Hier kann es zu **Habitatverlust** und Standortverlust sowie **Störungen** bei Rast und Brut kommen (efzn 2011). Dies

gilt auch für Nebenanlagen aufgrund von Einzäunung und Versiegelung (Runge et al. 2012). Die Trasse und die definierten Schutzstreifen von Erdkabeln müssen von Bewuchs mit tiefwurzelnenden Pflanzen freigehalten werden (Bundesnetzagentur 2024c), sodass pflegerische Maßnahmen sowie die notwendigen Wartungsarbeiten zu **Störungen** von Arten führen können. Bei Freileitungen sind in bewaldeten Ökosystemen ebenfalls pflegerische Maßnahmen notwendig, um die Schneise der Freileitung von Baumbewuchs freizuhalten (efzn 2011).

Die Erdkabel können unter Höchstlast zu einer **Erwärmung** des Bodens führen und gerade in sensiblen Lebensräumen Veränderungen, bspw. durch Austrocknung, nach sich ziehen (efzn 2011). Eine Erwärmung des Bodens führt zu erhöhter mikrobieller Aktivität im Bereich der Trasse, was insbesondere im Zusammenhang mit Entwässerungseffekten das Risiko der Humuszehrung birgt. Dies kann zu örtlichen Standortveränderungen führen, was insbesondere für wertvolle Lebensräume mit hohem organischen Bodenanteil wie bspw. Mooren von Bedeutung sein kann (Ahmels et al. 2016). Die Auswirkungen auf das Bodenleben durch die Erwärmung und magnetische Felder muss laut mehreren Studien noch untersucht werden (Ahmels et al. 2016; Emmerling et al. 2025; NABU 2013; Pophof et al. 2023).

Auswirkungen während des Rückbaus von Übertragungsnetzen

Die Auswirkungen während des Rückbaus von Freileitungen und Erdkabeln entsprechen in der Regel denen der Bauphase. Zusätzlich kann hier der Verlust von Habitaten genannt werden, die sich im Laufe der Zeit unter Freileitungen entwickelt haben (Runge et al. 2012). Dies gilt auch für die Habitats, die sich über den Erdkabeltrassen entwickelt haben.

Zusammenfassung der Schwere und Bedeutung der Auswirkungen von Übertragungsnetzen

| | Habitatverlust | Zerschneidungs- und Barriereeffekte | Störungseffekte | Kollisionsrisiko | Erwärmung des Bodens |
|--------------------------|----------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|----------------------|
| Übertragungsnetze | ●●● | ●● | ●● | ●●● | ● |

Erklärung: ●●● = starke Auswirkung, ●● = mäßige Auswirkung, ● = geringe Auswirkung

Lösungsansätze zur Verringerung der Auswirkungen

Eine Vielzahl der Auswirkungen während der Bauphase, wie Verlust von (Teil-)Habitaten, Störeffekte z. B. in der Brutzeit oder Falleffekte können durch Bauzeitenregelungen, Aufstellen von Schutzzäunen oder Absammeln und Umsetzen minimiert werden (Ahmels et al. 2016; efzn 2011). Die Reduktion von Arbeitsstreifen, Lagerplätzen und weiteren vermindern den benötigten Flächenbedarf in der Bauphase und damit den potenziellen Habitatverlust. Störeffekte können durch Bauzeitbeschränkung auf Jahreszeiten mit geringer Aktivität geschützter Arten sowie durch die Mahd der Fläche vor der Brutzeit minimiert werden (Runge et al. 2012).

Die dauerhafte Beeinträchtigung von Böden und Grundwasserhaushalt und damit den lokalen Ökosystemen durch Erdkabel kann durch bauliche Vorsorgemaßnahmen, bspw. durch den korrekten Rückbau der Bodenschichtung, minimiert werden. Die Erwärmung des Bodens bei Höchstspannungskabeln ist nicht auszuschließen, kann jedoch durch

entsprechende bauliche Maßnahmen und Temperaturmonitoring, um lokale übermäßige Erwärmung rechtzeitig zu erkennen, minimiert werden (efzn 2011).

Eine Zerschneidung von bewaldeten oder auch geschützten Ökosystemen durch die Trassen kann durch eine Waldüberspannung verringert werden (efzn 2011). Diese steht jedoch im potenziellen Konflikt mit der Minimierung von Kollisionsrisiken durch niedrigere Mastbauten in Anpassung an die Vegetationshöhe (Schomerus et al. 2017). Die Kollisionsgefahr mit Freileitungen ist innerhalb der Freileitungen und auch für verschiedene Vogelarten unterschiedlich, sodass bei der Planung und Genehmigung das Risiko für die am Standort vorkommenden Arten ermittelt werden sollte (BfN 2020). Kollisionsgefahr mit den Leiter- und Erdseilen von Freileitungen können zum Teil minimiert werden, indem sogenannte Vogelschutzmarker an den Erdseilen angebracht werden. Die Erdseile sind in der Regel die dünnsten Seile und am schwersten erkennbar, sodass diese die höchste Kollisionsgefahr darstellen und daher am häufigsten die Markierung tragen (BfN 2020). Weitere Maßnahmen zur Minimierung von Kollisionen wären die Reduktion auf Einebenmasten, Umstellen auf Erdkabel oder das Umgehen der Gebiete mit konflikträchtigen Arten. In Gebieten mit erhöhter Kollisionsgefahr sollten Vogelschutzmarker grundsätzlich angebracht werden (Schomerus et al. 2017). Bei einer Umstellung von Freileitungen auf Erdkabel müssen jedoch die Auswirkungen der Erdkabel in Betracht gezogen werden. Ausführliche Information zum Vogelschutz kann bei Liesenjohann et al. (2019) sowie Bernotat et al. (2018) gefunden werden. Standortbezogene Prüfungen durch Expert*innen sind hier ein wichtiges Mittel.

Bei entsprechendem Flächenmanagement können auf den Trassen unter Freileitungen auch Strukturvielfalt und Arten gefördert werden. So benötigen Wildkatzen besonders strukturreiche Waldränder und -innensäume, die bei ausreichender Deckung der Trassen bereitgestellt werden können (Moning 2021). Chancen bei entsprechend angepasster Pflege der Flächen bieten sich auch für weitere Arten, hierzu siehe Moning (2021).

Zusammenfassung des Forschungsbedarfs

Die hier stichpunktartig zusammengefassten Forschungsbedarfe in Bezug auf Übertragungsnetze und Biodiversität werden in den vorangehenden Absätzen beschrieben:

- Auswirkungen des Wärmeeintrags von Erdkabeln auf Bodenorganismen
- Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf Organismen an Land und auf See

4 Fazit

Die Energiewende mit den erneuerbaren Energien als Fundament ist für den Kampf gegen den Klimawandel unerlässlich. Mit diesem drohen vielfache ökonomische, soziale und ökologische Folgen. Eine dieser Folgen ist auch der Verlust von Biodiversität. Somit ist der Klimawandel nach der Umwandlung von Naturflächen durch die Expansion der Landwirtschaft in den Tropen und der Ausbeutung von natürlichen Ressourcen der größte **Treiber** für den Biodiversitätsverlust auf globaler Ebene. Erneuerbare Energien sind ein entscheidender Lösungsansatz gegen den Klimawandel. Doch auch sie sind nicht frei von Auswirkungen – gerade auch auf Flora, Fauna, Habitate, mithin auf die Biodiversität. Somit besteht die Herausforderung darin, Klima- und Biodiversitätsschutz zusammen zu denken.

Anders als die fossilen Energien mit ihrer globalen Klimawirkung treten die Effekte erneuerbarer Energien zumeist unmittelbar am Standort auf. Ob und welche Effekte auftreten, ist daher in hohem Maße abhängig vom Standort der Anlagen und Infrastrukturen sowie den betroffenen Arten. Eine standortgerechte Planung ist daher essenziell, um negative Effekte auf die Biodiversität zu vermeiden oder zu vermindern. Das Spannungsfeld lässt sich somit durch gründliche Vorbereitung bei der Standortwahl abschwächen. Je nach Art der erneuerbaren Energie müssen unterschiedliche Problemfelder beachtet und angepasste Maßnahmen ergriffen werden.

Eine ökologische Baubegleitung, welche für eine erfolgreiche, sachgerechte Durchführung der Maßnahmen sorgt und diese dokumentiert, ist ein wesentlicher Schritt zur Minderung oder Vermeidung von negativen Auswirkungen auf die Umwelt und damit auch auf die Biodiversität. Nach dem Bundesnaturschutzgesetz stellen erneuerbare Energieanlagen wie WEA oder PV-Freiflächenanlagen grundsätzlich einen Eingriff in Natur und Landschaft dar. Beeinträchtigungen durch Planung und Umsetzung sind soweit wie möglich zu vermeiden, zu vermindern und unvermeidbare Beeinträchtigungen auszugleichen oder zu ersetzen. Die Naturschutzbelange sind im Zug von Genehmigungsverfahren anhand von Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP), artenschutzrechtlichen Prüfungen und im Falle von Natura 2000-Flächen auch anhand einer FFH-Verträglichkeitsprüfung¹ zu untersuchen und zu gewährleisten. Angesichts des Zeitdrucks zur Umsetzung der Energiewende sieht die EU-Gesetzgebung und ihre Umsetzung in deutsches Recht eine *Beschleunigung des Verfahrens zur Genehmigungserteilung für Projekte im Bereich der erneuerbaren Energien und für die damit verbundene Netzinfrastruktur* vor². Dieser nachvollziehbare Schritt sollte jedoch nicht dazu führen, dass sich die Prioritäten deutlich zu Ungunsten der Biodiversität verschieben.

Um biodiversitätsschädigende Auswirkungen zu vermeiden oder wenigstens zu minimieren, sollte daher bei jedem Projekt im Bereich der erneuerbaren Energien immer eine gründliche **Prüfung der standortbezogenen Situation** und Bedingungen vorgenommen und mit Expert*innen nach passenden Lösungen gesucht werden. Grundsätzlich sollte auf Eingriffe in

¹ FFH: Flora, Fauna, Habitat

² Verordnung (EU) 2022/257, Artikel 6; umgesetzt in deutsches Recht durch das *Gesetz zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weitere Maßnahmen im Stromsektor*, sowie durch die Neufassung des EnWG (Energiewirtschaftsgesetz)

schützenswerten Biotopen verzichtet oder diese Eingriffe möglichst geringgehalten werden. Die Erschließung neuer Flächen für erneuerbare Energien, die aus naturschutzfachlicher Sicht als sensibel gelten, sollte möglichst vermieden werden. Um einen Ausbau dennoch zu ermöglichen, sollte auf Flächen mit geringem ökologischem Wert fokussiert werden. Außerdem ist die Nutzung bereits bebauter Flächen wie z. B. bei Dach- oder Fassaden-PV-Anlagen mit grundsätzlich geringen bis keinen Biodiversitätskonflikten verbunden. Diese weisen gegenüber PV-Freiflächenanlagen jedoch höhere Gestehungskosten auf (Kost et al. 2024). Für Betreiber, aber auch für die Politik und die Gesellschaft, ist daher stets auch die Abwägung, welche Kosten mit welchem ökologischen Nutzen verbunden sind und von wem sie getragen werden sollen, ein entscheidender Prozess.

Der Standort kann entscheidende Informationen darüber liefern, welche erneuerbare Energie die geringsten Auswirkungen auf die lokale Biodiversität ausübt und im besten Fall sogar **Chancen einer Biodiversitätsförderung** bietet. So können Zerschneidung der Landschaft und Habitate vermieden, Kollisionsrisiken, Störwirkungen und Lebensraumverlust minimiert werden. Je nach erneuerbarer Energie bieten sich technische und planerische Maßnahmen an, die, sofern eine Wirkung nicht vermieden werden kann, zumindest eine Reduktion erzielen können. Eine konsequente Durchführung und Kontrolle ist hier jedoch Voraussetzung der Wirksamkeit.

Vieles zu den potenziellen und tatsächlichen Konflikten von erneuerbaren Energien mit Biodiversität ist bekannt. Es besteht dennoch weiterer **Forschungsbedarf**, z. B. im Bereich der Auswirkungen von möglichen Barotraumatata durch Windenergieanlagen auf Fledermäusen. Außerdem braucht es weitere methodische Entwicklungen, um eine passende Standortwahl für Windenergieanlagen zu ermöglichen, bei denen eine hohe Windausbeute und geringe Auswirkungen auf die Biodiversität vereinbar sind. Zwar werden Vorranggebiete für die Windkraft regionalplanerisch durch Restriktionsanalysen ausgewählt, doch lassen sich viele potenzielle Konflikte mit dem Naturschutz erst direkt am Standort ermitteln. Die Autor*innen konnten keine Studien zu den Wirkungen von Windenergieanlagen auf Reptilien identifizieren. Mögliche negative oder positive Wirkungen auf Reptilien in Wald- oder Offenlandstandorten sollten untersucht werden. Weitere Forschung im Bereich der Windenergieanlagen ist im Bereich von Offshore-Windenergie und den dortigen Umweltauswirkungen in Bezug auf den Ausbau notwendig, ferner im Bereich der Wirkungen von landseitigen Anlagen auf Insekten.

Für Solaranlagen liegen in einigen Fällen nicht ausreichend oder keine einheitlichen Daten vor. Um die Vergleichbarkeit zu erhöhen und eine bessere Aussagekraft zu erreichen, sollten einheitliche Untersuchungsstandards und Datenformate erarbeitet und etabliert werden sowie die lokal erhobenen Kontroll- und Monitoringdaten zentral gesammelt, ausgewertet und verfügbar gemacht werden (Ammermann et al. 2022). Das Bundesamt für Naturschutz sowie das KNE weisen auf verschiedene noch unzureichend untersuchte Wirkungen und ihre Folgen hin. Hierzu zählen mögliche Kollisionswirkungen von Vögeln und Fledermäusen mit den PVA, die Folgen der Attraktionswirkung der PVA auf Insektenpopulationen aufgrund des horizontal polarisierenden Lichts sind, oder Auswirkungen von PVA auf neuen Flächenkategorien wie Moor- oder Agri-PV (Ammermann et al. 2022; KNE 2020). Darüber hinaus besteht Bedarf in der Entwicklung von Umsetzungsstrategien für das Ausbauen der Dach- und Fassaden-PV; hier stehen jedoch rechtliche und finanzielle Rahmenbedingungen im Vordergrund (Ammermann et al. 2022).

Im Bereich der Biomasse ist es notwendig, das nachhaltig verfügbare Biomassepotenzial für die Nutzung in der Bioenergie zu identifizieren. Das Interesse an Biomasse als Rohstoff steigt in vielen Sektoren, sodass es hier schnell zu einem größeren Bedarf, als nachhaltig

realisierbar ist, kommen kann. Die bisherigen Bemühungen um eine Nationale Biomassestrategie, die dem Naturschutz und der Biodiversität hohe Priorität einräumt, sollten unbedingt zu einem Ergebnis geführt werden. Daraus können Prioritäten für die Nutzung der begrenzt verfügbaren nachhaltigen Biomasse hervorgehen, zudem Erkenntnisse bezüglich der zu bevorzugenden Biomassearten und Produktionsweisen. Als Beispiel sei hier der Anbau von Gehölzen in der Landwirtschaft genannt, sei es in Form von Agroforstsystemen oder Kurzumtriebsplantagen, die Struktur und Diversität in den Agrarraum bringen können.

Grundsätzlich sollten die Bilanzierungsmöglichkeiten von Auswirkungen auf die Biodiversität weiterentwickelt werden, da solche Methoden dabei helfen können, informierte Entscheidungen zu treffen. Dies kann beispielsweise im Bereich der Ökobilanzierung oder des Corporate Sustainability Assessment erfolgen. Außerdem ist entscheidend, nicht nur die Auswirkungen während des Baus und Betriebs der jeweiligen Anlagen zu untersuchen, sondern auch die Auswirkungen in der Vorkette, während der Produktion der Bestandteile sowie des Rückbaus, der Entsorgung und des Recyclings, zu betrachten. Zusätzlich ist das Sammeln von Daten vor und während des Baus, des Betriebs, des Rückbaus und der nachfolgenden Nutzung mit standardisierten Methoden und Formaten notwendig, um Wissenslücken zu schließen und vergleichbare Ergebnisse zu ermöglichen.

Eingangs wurde als Ziel formuliert, dass die für die Energiewende erforderlichen Mittel sowohl im Kampf gegen den Klimawandel als auch gegen den Verlust der Biodiversität optimal eingesetzt werden sollen. Es bleibt noch vieles unklar, wie dieses Ziel erreicht werden kann. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Literaturverzeichnis

- Agostini, A.; Giuntoli, J.; Boulamanti, A. (2014): Carbon accounting of forest bioenergy : Conclusions and recommendations from a critical literature review. DOI: 10.2788/2960 <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC70663> (06.01.2025).
- Ahmels, P.; Brandmeyer, O.; Bruns, E.; Grünert, J.; Voß, U. (2016): Auswirkungen verschiedener Erdkabelsysteme auf Natur und Landschaft. Bundesamt für Naturschutz. https://www.natur-und-erneuerbare.de/fileadmin/Daten/Download_Dokumente/02_Abschlussberichte_anderer_Form/BfN-Erdkabelsysteme-Natur-Landschaft-2016.pdf (19.12.2024).
- Amenda, L. (2019): Warum Wasserkraftwerke negative Umweltauswirkungen haben. In: *Wild Recreation*. <https://wildrecreation.com/2019/05/10/warum-wasserkraftwerke-negative-umweltauswirkungen-haben/>. (23.12.2024).
- Ammermann, K.; Bunzel, K.; Igel, F. (2022): Eckpunkte für einen naturverträglichen Ausbau der Solarenergie. Bundesamt für Naturschutz, DE. <https://doi.org/10.19217/pos223> (15.10.2024).
- Baerwald, E. F.; D’Amours, G. H.; Klug, B. J.; Barclay, R. M. R. (2008): Barotrauma is a significant cause of bat fatalities at wind turbines. In: *Current Biology*. Vol. 18, No. 16, S. R695–R696. DOI: 10.1016/j.cub.2008.06.029.
- Balotari-Chiebáo, F.; Byholm, P. (2024): Quantifying land impacts of wind energy: a regional-scale assessment in Finland. In: *Environment, Development and Sustainability*. DOI: 10.1007/s10668-024-05048-9.
- Barros, N.; Cole, J. J.; Tranvik, L. J.; Prairie, Y. T.; Bastviken, D.; Huszar, V. L. M.; del Giorgio, P.; Roland, F. (2011): Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. In: *Nature Geoscience*. Nature Publishing Group. Vol. 4, No. 9, S. 593–596. DOI: 10.1038/ngeo1211.
- Bernotat, D.; Rogahn, S.; Rickert, C.; Follner, K.; Schönhofer, C. (2018): BfN-Arbeitshilfe zur arten- und gebietsschutzrechtlichen Prüfung bei Freileitungsvorhaben. Bundesamt für Naturschutz. <https://www.bfn.de/sites/default/files/2022-03/skript512.pdf> (18.12.2024).
- BfN (2020): Vogelschutzmarker an Freileitungen – ein Fachkonventionsvorschlag zur Berücksichtigung der artspezifischen Schutzwirkung in Planungen und Genehmigungsverfahren. Bundesamt für Naturschutz. <https://www.bfn.de/sites/default/files/2022-03/PraxisInfo%20Vogelschutzmarker%20an%20Freileitungen.pdf> (18.12.2024).
- BGB I (2022): Gesetz zur Erhöhung und Beschleunigung des Ausbaus von Windenergieanlagen an Land. https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F%2A%5B%40attr_id=%27bgbl122s1353.pdf%27%5D#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl122s1353.pdf%27%5D__1734010876652 (12.12.2024).
- Bipa, N. J.; Stradiotti, G.; Righetti, M.; Pisaturo, G. R. (2024): Impacts of hydropeaking: A systematic review. In: *Science of The Total Environment*. Vol. 912, S. 169251. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169251.
- Blessenohl, R.; Stucke, K. (2023): Naturverträglicher Ausbau der Windenergie: Wie der Ausbau der Windenergie an Land und auf See unter Berücksichtigung von Natur-

- und Artenschutz gelingen kann. <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/wind/231108-nabu-windenergie-positionspapier.pdf> (12.12.2024).
- BMEL (2024): Die Nationale Biomassestrategie. In: *BMEL.de*. <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/bioeconomie-nachwachsende-rohstoffe/nationale-biomassestrategie.html>. (13.12.2024).
- BMJ (2024): Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See (Windenergie-auf-See-Gesetz - WindSeeG) § 1 Zweck und Ziel des Gesetzes. https://www.gesetze-im-internet.de/windseeg/_1.html. (12.12.2024).
- BMUV (2024): Pressemitteilung Nr. 099/24 Bundesregierung beschleunigt Genehmigungsverfahren für Windenergie an Land und Solarenergie. In: *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz*. <https://www.bmuv.de/PM11093>. (13.12.2024).
- BMUV; BMWK (2022): Beschleunigung des naturverträglichen Ausbaus der Windenergie an Land. Eckpunktepapier. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Artenschutz/eckpunkte_windenergie_land_artenschutz_bf.pdf (12.12.2024).
- BMWK (2024): Entwurf eines Gesetzes zur Beschleunigung der Genehmigungsverfahren von Geothermieanlagen, Wärmepumpen und Wärmespeichern sowie.
- BNE (2019): Solarparks - Gewinne für die Biodiversität. Bundesverband Neue Energiewirtschaft. https://www.bne-online.de/wp-content/uploads/20191119_bne_Studie_Solarparks_Gewinne_fuer_die_Biodiversitaet.pdf (17.10.2024).
- Böhm, J. (2023): Vergleich der Flächenenergieerträge verschiedener erneuerbarer Energien auf landwirtschaftlichen Flächen – für Strom, Wärme und Verkehr. In: *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft*. Vol. 101, No. 1, S. 1–35. DOI: [10.12767/buel.v101i1.462](https://doi.org/10.12767/buel.v101i1.462).
- Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Reise, J.; Benndorf, A. (2021): Treibhausgasneutralität: Wie können natürliche Senken in Deutschland zur »grünen Null« beitragen? Vol. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl&D. Kasang (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Boden&Landnutzung*, S. S. 319-327. DOI: [10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.44](https://doi.org/10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.44).
- Brielmann, H.; Lueders, T.; Schreglmann, K.; Ferraro, F.; Avramov, M.; Hammerl, V.; Blum, P.; Bayer, P.; Griebler, C. (2011): Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. In: *Grundwasser*. Vol. 16, No. 2, S. 77–91. DOI: [10.1007/s00767-011-0166-9](https://doi.org/10.1007/s00767-011-0166-9).
- Brophy, P. (1997): Environmental advantages to the utilization of geothermal energy. In: *Renewable Energy*. Vol. 10, No. 2–3, S. 367–377. DOI: [10.1016/0960-1481\(96\)00094-8](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)00094-8).
- BSH (2025): Umweltbericht zum Flächenentwicklungsplan 2025 für die deutsche Ostsee. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Flaechenentwicklungsplan_2025/Anlagen/Downloads_FEP2025/Umweltbericht_Ostsee.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (28.02.2025).
- BSW; Nabu (2021): Kriterien für naturverträgliche Photovoltaik-Freiflächenanlagen Gemeinsames Papier, Stand April 2021. Bundesverband Solarwirtschaft e.V., Naturschutzbund Deutschland e.V. https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/solarenergie/210505-nabu-bsw-kriterien_fuer_naturvertraegliche_solarparks.pdf (16.10.2024).
- Bulling, L.; Köppel, J. (2016): Exploring the trade-offs between wind energy and biodiversity conservation. Edward Elgar Publishing. DOI: [10.4337/9781783478996.00019](https://doi.org/10.4337/9781783478996.00019) <https://china.elgaronline.com/view/edcoll/9781783478989/9781783478989.00019.xml> (12.12.2024).

- Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (o.J.): Artenvielfalt erhalten. In: *Praxis-Agrar*. <https://www.praxis-agrar.de/umwelt/biologische-vielfalt/artenvielfalt-erhalten>. (13.12.2024).
- Bundesnetzagentur (2024a): Bundesnetzagentur be-stä-tigt mit dem Netz-ent-wick-lungs-plan Strom 2023-2037/2045 das Über-tra-gungs-netz für die Kli-ma-neu-tra-li-tät. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20240301_NEP.html. (18.12.2024).
- Bundesnetzagentur (2024b): Höchstspannungs-Freileitungen. <https://plus.netzausbau.de/N2000/DE/Technik/Freileitungen/freileitungen-node.html>. (18.12.2024).
- Bundesnetzagentur (2024c): Erdkabel. <https://plus.netzausbau.de/N2000/DE/Technik/Erdkabel/erdkabel-node.html>. (18.12.2024).
- Bundesregierung (2020): Verordnung über die Vermeidung und die Kompensation von Eingriffen in Natur und Landschaft im Zuständigkeitsbereich der Bundesverwaltung (Bundeskompensationsverordnung - BKompV). <https://www.gesetze-im-internet.de/bkompv/>.
- Bundesverband Geothermie (2024a): Geothermie in Zahlen. <https://www.geothermie.de/aktuelles/geothermie-in-zahlen>. (23.12.2024).
- Bundesverband Geothermie (2024b): Flächenbedarf. In: *Bundesverband Geothermie*. <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/f/flaechenbedarf>. (11.02.2025).
- Bundesverband Geothermie (2024c): Grundwasser. In: *Bundesverband Geothermie*. <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/g/grundwasser>. (25.02.2025).
- Bundesverband Geothermie (2024d): Offenes System (Geothermie). In: *Bundesverband Geothermie*. <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/o/offenes-system-geothermie>. (25.02.2025).
- Carus, M.; Raschka, A.; Fehrenbach, H.; Rettenmaier, N.; Dammer, L.; Köppen, S.; Thöne, M.; Dobroschke, S.; Diekmann; Hermann, A.; Hennenberg, K.; Essel, R.; Piotrowski; Detzel, A.; Keller, H.; Kauertz, B.; Gärtner, S.; Reinhardt, J. (2014): Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekologische-innovationspolitik-mehr> (06.07.2022).
- Clark, D. E.; Galeczka, I. M.; Dideriksen, K.; Voigt, M. J.; Wolff-Boenisch, D.; Gislason, S. R. (2019): Experimental observations of CO₂-water-basaltic glass interaction in a large column reactor experiment at 50 °C. In: *International Journal of Greenhouse Gas Control*. Vol. 89, S. 9–19. DOI: 10.1016/j.ijggc.2019.07.007.
- Dengler, C. (2010): Umweltparameter Erneuerbarer Energien. GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH, Rostock. https://www.ecologic.eu/sites/default/files/news/2021/RADOST-2-UMWELTPARAMETER_022.pdf.
- Destatis, S. B. (2024): Energieerzeugung. In: *Statistisches Bundesamt*. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Erzeugung/_inhalt.html. (23.12.2024).
- Deutscher Bundestag (2018): Kurzinformation. Befahren und Fischen in Offshore-Windparkgebieten. <https://www.bundestag.de/resource/blob/564572/b8f2f9f5629062a48a2b6e1e4396989d/wd-5-082-18-pdf-data.pdf> (28.02.2025).
- Deutscher Bundestag (2022): Treibhausgasemissionen der Wasserkraft - Berücksichtigung in der Emissionsbilanz und im Nationalen Treibhausgasinventar. *Sachstand*, Berlin. <https://www.bundestag.de/resource/blob/916774/149e701025457a6a043ee8270de1226e/WD-8-052-22-pdf.pdf> (23.12.2024).

- Deutscher Bundestag (2024): Gesetzentwurf der Bundesregierung. Entwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2023/2413 in den Bereichen Windenergie an Land und Solarenergie sowie für Energiespeichieranlagen am selben Standort. Drucksache 20/12785. Deutscher Bundestag. https://dserver.bundestag.de/btd/20/127/2012785.pdf?utm_source=chatgpt.com (06.02.2025).
- Dhunny, A. Z.; Allam, Z.; Lobine, D.; Lollchund, M. R. (2019): Sustainable renewable energy planning and wind farming optimization from a biodiversity perspective. In: *Energy*. Vol. 185, S. 1282–1297. DOI: [10.1016/j.energy.2019.07.147](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.147).
- Diffendorfer, J. E.; Dorning, M. A.; Keen, J. R.; Kramer, L. A.; Taylor, R. V. (2019): Geographic context affects the landscape change and fragmentation caused by wind energy facilities. In: *PeerJ*. Vol. 7, S. e7129. DOI: [10.7717/peerj.7129](https://doi.org/10.7717/peerj.7129).
- Doherty, T. S.; Hays, G. C.; Driscoll, D. A. (2021): Human disturbance causes widespread disruption of animal movement. In: *Nature Ecology & Evolution*. Nature Publishing Group. Vol. 5, No. 4, S. 513–519. DOI: [10.1038/s41559-020-01380-1](https://doi.org/10.1038/s41559-020-01380-1).
- efzn (2011): Ökologische Auswirkungen von 380-kV-Erdleitungen und HGÜ-Erdleitungen. Band 1 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse. Energie-Forschungszentrum Niedersachsen. <https://d-nb.info/1020733411/34> (19.12.2024).
- Emmerling, C.; Herzog, M.; Hoffmann, C.; Schieber, B. (2025): Operational Soil Warming by Underground Transmission Lines Impacts on Soil Microorganisms and Related Metabolic Activities. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. S. jpln.202400554. DOI: [10.1002/jpln.202400554](https://doi.org/10.1002/jpln.202400554).
- Europäische Kommission (2020): Factsheet, Bringing nature back into our lives EU 2030 Biodiversity strategy.
- Europäische Kommission (2021a): So kann eine nachhaltige Wasserkraft umgesetzt werden | Research and Innovation. <https://projects.research-and-innovation.ec.europa.eu/de/projects/success-stories/all/so-kann-eine-nachhaltige-wasserkraft-umgesetzt-werden>. (23.12.2024).
- Europäische Kommission (2021b): FIThydro | DSS. <https://www.dss.fithydro.wb.bgu.tum.de/home/ui>. (23.12.2024).
- Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2023): Richtlinie (EU) 2023/2413 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023 zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001, der Verordnung (EU) 2018/1999 und der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates.
- European Centre for River Restoration (2021): River restoration & hydropower. *European River Symposium 2021*, <https://www.ecrr.org/River-Restoration/Hydropower>. (23.12.2024).
- Fachagentur Windenergie an Land (2019): Windenergie und Fledermausschutz. Diskussionsveranstaltung zu aktuellen Erkenntnissen aus Forschung und Praxis. https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/FA_Wind_Dokumentation_Windenergie_und_Fledermausschutz_10-2019.pdf (27.02.2025).
- Fehrenbach, H.; Bischoff, M.; Böttcher, H.; Reise, J.; Hennenberg, K. J. (2022): The Missing Limb: Including Impacts of Biomass Extraction on Forest Carbon Stocks in Greenhouse Gas Balances of Wood Use. In: *Forests*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Vol. 13, No. 3, S. 365. DOI: [10.3390/f13030365](https://doi.org/10.3390/f13030365).
- Fehrenbach, H.; Bürck, S. (2022): Carbon opportunity costs of biofuels in Germany—An extended perspective on the greenhouse gas balance including foregone carbon storage. In: *Frontiers in Climate*. Vol. 4, S. 941386. DOI: [10.3389/fclim.2022.941386](https://doi.org/10.3389/fclim.2022.941386).
- Fehrenbach, H.; Bürck, S.; Schlamp, T.; Abdalla, N.; Bolte, V.; Köppen, S. (2024): Ökologische Auswirkungen von Agrokraftstoffen.

https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Agrokraftstoffe/Studie_%C3%B6kologische_Auswirkungen_Agrosprit.pdf.

- Flury, K.; Frischknecht, R.; Itten, R. (2012): Erkenntnisse aktueller Ökobilanzen zu Strom aus Wasserkraft. In: *Bulletin*. No. 2/2012.
- FNR (2024): Primärenergieverbrauch 2023. In: *Mediathek FNR*. <https://mediathek.fnr.de/primarenergieverbrauch.html>. (13.12.2024).
- Frick, S.; Schröder, G.; Rychtyk, M.; Bohnenschäfer, W.; Kaltschmitt, M. (2007): Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung. Institut für Energetik und Umwelt gemeinnützige GmbH, Leipzig. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/endbericht_fkz_205_42_110-gesamtausgabe.pdf (20.12.2024).
- Frischknecht, R.; Krebs, L. (2021): Fact Sheet: Environmental life cycle assessment of electricity from PV systems. IEA PVPS. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/11/IEA-PVPS-Task12-LCA-PV-electricity_-Fact-Sheet.pdf (23.04.2025).
- Fritsche, U. R.; Sims, R. E. H.; Monti, A. (2010): Direct and indirect land-use competition issues for energy crops and their sustainable production – an overview. In: *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. Vol. 4, No. 6, S. 692–704. DOI: 10.1002/bbb.258.
- Frøsløv, T. G.; Nielsen, I. B.; Santos, S. S.; Barnes, C. J.; Bruun, H. H.; Ejrnæs, R. (2021): The biodiversity effect of reduced tillage on soil microbiota. In: *Ambio*. Vol. 51, No. 4, S. 1022–1033. DOI: 10.1007/s13280-021-01611-0.
- Garvin, J. C.; Simonis, J. L.; Taylor, J. L. (2024): Does size matter? Investigation of the effect of wind turbine size on bird and bat mortality. In: *Biological Conservation*. Vol. 291, S. 110474. DOI: 10.1016/j.biocon.2024.110474.
- Gehrelein, U.; Mengel, A.; Milz, E.; Hoheisel, D.; Barthelmes, B.; Düsterhaus, B.; Mathias, C.; Liesen, J.; Baranek, E.; Schubert, S. (2017): Nationale Naturlandschaften (NNL) und erneuerbare Energien. Ein Handlungsfaden. Bundesamt für Naturschutz, DE. <https://doi.org/10.19217/skr467> (21.10.2024).
- Geidel, T.; Dworak, T.; Schmidt, D. G.; Rogger, D. M. (2021): Ausgewählte Fachinformationen zur Nationalen Wasserstrategie. *Abschlussbericht*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-03_texte_86-2021_fachinformation_wasserstrategie_0.pdf?utm_source=chatgpt.com (23.12.2024).
- Geist, J. (2021): Editorial: Green or red: Challenges for fish and freshwater biodiversity conservation related to hydropower. In: *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. Vol. 31, No. 7, S. 1551–1558. DOI: 10.1002/aqc.3597.
- Gracey, E. O.; Verones, F. (2016): Impacts from hydropower production on biodiversity in an LCA framework—review and recommendations. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 21, No. 3, S. 412–428. DOI: 10.1007/s11367-016-1039-3.
- Grant, T. (2005): California geothermal law and its impacts on thermophile biodiversity. In: *The Federalist society*. Vol. 6, No. 2.
- Griebler, C.; Brielmann, H.; Haberer, C. M.; Kaschuba, S.; Kellermann, C.; Stumpp, C.; Hegler, F.; Kuntz, D.; Walker-Hertkorn, S.; Lueders, T. (2016): Potential impacts of geothermal energy use and storage of heat on groundwater quality, biodiversity, and ecosystem processes. In: *Environmental Earth Sciences*. Vol. 75, No. 20, S. 1391. DOI: 10.1007/s12665-016-6207-z.
- Griebler, C.; Kellermann, C.; Stumpp, C.; Hegler, F.; Kuntz, D.; Walker-Hertkorn, S. (2015): Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften – Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_54_2015_auswirkungen_thermischer_veraenderungen_infolge_der_nutzung_obenflaechennaher_geothermie_0.pdf (20.12.2024).

- Griebler, C.; Stumpp, C.; Götzl, G. (2021): ESR20-040 - Heat below the city. <https://www.wwf.at/funding/programmes/esr/ESR20-040/pdf/>. (20.12.2024).
- Grünkorn, T.; Blew, T.; Coppack, O.; Krüger, O.; Nehls, G.; Potiek, A.; Reichenbach, M.; Von Röhn, J.; Timermann, H.; Weitekamp, S. (2016): Ermittlung der Kollisionsraten von (Greif-)Vögeln und Schaffung planungsbezogener Grundlagen für die Prognose und Bewertung des Kollisionsrisikos durch Windenergieanlagen (PROGRESS), Zusammenfassung. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.bioconsult-sh.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/2016/PROGRESS_Zusammenfassung.pdf&ved=2ahU-KEwix18rNu6KKAxW5_bslHYixLv8QFnoECBYQAQ&usg=AOvVaw3XdjZsNbfksW2b47Aa6fi3 (12.12.2024).
- Haberl, H.; Geissler, S. (2000): Cascade utilization of biomass: strategies for a more efficient use of a scarce resource. In: *Ecological Engineering*. Vol. 16, S. 111–121. DOI: 10.1016/S0925-8574(00)00059-8.
- Habersack, H.; Wagner, B.; Schoder, A.; Hauer, C. (2013): Die Bedeutung von Feststoffhaushalt und Sedimentdurchgängigkeit für eine nachhaltige Nutzung der Wasserkraft. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*. Vol. 65, No. 9–10, S. 354–361. DOI: 10.1007/s00506-013-0108-0.
- Haddad, N. M.; Brudvig, L. A.; Clobert, J.; Davies, K. F.; Gonzalez, A.; Holt, R. D.; Lovejoy, T. E.; Sexton, J. O.; Austin, M. P.; Collins, C. D.; Cook, W. M.; Damschen, E. I.; Ewers, R. M.; Foster, B. L.; Jenkins, C. N.; King, A. J.; Laurance, W. F.; Levey, D. J.; Margules, C. R.; Melbourne, B. A.; Nicholls, A. O.; Orrock, J. L.; Song, D.-X.; Townshend, J. R. (2015): Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. In: *Science Advances*. Vol. 1, No. 2, S. e1500052. DOI: 10.1126/sciadv.1500052.
- Hart, D. D.; Johnson, T. E.; Bushaw-Newton, K. L.; Horwitz, R. J.; Bednarek, A. T.; Charles, D. F.; Kreeger, D. A.; Velinsky, D. J. (2002): Dam Removal: Challenges and Opportunities for Ecological Research and River Restoration: We develop a risk assessment framework for understanding how potential responses to dam removal vary with dam and watershed characteristics, which can lead to more effective use of this restoration method. In: *BioScience*. Vol. 52, No. 8, S. 669–682. DOI: 10.1641/0006-3568(2002)052[0669:DRCAOF]2.0.CO;2.
- Hengstler, J.; Russ, M.; Stoffregen, A.; Hendrich, A.; Weidner, S.; Held, M.; Briem, A.-K. (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_35-2021_oekobilanzen_windenergie_photovoltaik.pdf (12.12.2024).
- Hennenberg, K.; Bürck, S.; Fehrenbach, H.; Pfeiffer, M.; Köppen, S. (2023): Trägt die Energienutzung von Waldholz zum Klimaschutz bei? Vol. AFZ-Der Wald, No. 3/2023.
- Herden, C.; Bahram, G.; Jörg, R. (2009): Naturschutzfachliche Bewertungsmethoden von Freilandphotovoltaikanlagen. <https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/Service/Dokumente/skripten/skript247.pdf> (17.12.2024).
- Heuck, C.; Sommerhage, M.; Stelbrink, P.; Höfs, C.; Geisler, K.; Gelpke, C.; Koschkar, S. (2019): Untersuchung des Flugverhaltens von Rotmilanen in Abhängigkeit von Wetter und Landnutzung unter besonderer Berücksichtigung vorhandener Windenergieanlagen im Vogelschutzgebiet Vogelsberg – Abschlussbericht. Im Auftrag des Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen. https://landesplanung.hessen.de/sites/landesplanung.hessen.de/files/2022-11/flugverhaltenrotmilan_abschlussbericht_200206.pdf (26.02.2025).
- Horváth, G.; Blahó, M.; Egri, Á.; Kriska, G.; Seres, I.; Robertson, B. (2010): Reducing the Maladaptive Attractiveness of Solar Panels to Polarotactic Insects. In:

- Conservation Biology*. Vol. 24, No. 6, S. 1644–1653. DOI: [10.1111/j.1523-1739.2010.01518.x](https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01518.x).
- IEA (2023): Renewables - Energy System. In: IEA. <https://www.iea.org/energy-system/renewables>. (23.12.2024).
- Immerzeel, D. J.; Verweij, P. A.; van der Hilst, F.; Faaij, A. P. C. (2013): Biodiversity impacts of bioenergy crop production: a state-of-the-art review. In: *GCB Bioenergy*. Vol. 6, No. 3, S. 183–209. DOI: [10.1111/gcbb.12067](https://doi.org/10.1111/gcbb.12067).
- InPositiv (2024): Sonnenenergie: Mehr als Strom und Wärme – wie die Sonne doppelt liefert. <https://www.erneuerbare-energien-und-natur.de/sonnenenergie> (23.10.2024).
- IPBES (2019): Global Assessment Report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. <https://zenodo.org/record/6417333#.ZB2oNPazNUQ> (03.01.2023).
- ISE (2024): Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/agri-photovoltaik-chance-fuer-landwirtschaft-und-energiewende.html> (23.10.2024).
- Jaeger, J. A. G.; Holderegger, R. (2005): Schwellenwerte der Landschaftszerschneidung. Vol. 14, No. 2.
- Jones, N. F.; Pejchar, L.; Kiesecker, J. M. (2015): The Energy Footprint: How Oil, Natural Gas, and Wind Energy Affect Land for Biodiversity and the Flow of Ecosystem Services. In: *BioScience*. Vol. 65, No. 3, S. 290–301. DOI: [10.1093/biosci/biu224](https://doi.org/10.1093/biosci/biu224).
- Kandarr, J.; Wittmann, F. (2020): Stauseen setzen große Mengen Methan frei. Deutsches GeoForschungszentrum GFZ. S. 168 KB. DOI: [10.2312/ESKP.014](https://doi.org/10.2312/ESKP.014).
- Kati, V.; Kassara, C.; Vrontisi, Z.; Moustakas, A. (2021): The biodiversity-wind energy-land use nexus in a global biodiversity hotspot. In: *Science of The Total Environment*. Vol. 768, S. 144471. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.144471](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144471).
- KNE (2020): Anfrage Nr. 237 zu Auswirkungen (vertikaler) Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf Natur- und Artenschutz. Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende. <https://www.naturschutz-energiewende.de/fragenundantworten/237-auswirkung-pv-freiflaechenanlagen-fauna/> (17.12.2024).
- KNE (2022): KNE | Zum Flächenbedarf der Windenergie | Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende. <https://www.naturschutz-energiewende.de/wortmeldung/wortmeldung-zum-flaechenbedarf-der-windenergie/>. (12.12.2024).
- KNE (2024a): Berücksichtigung des Naturschutzes bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen auf Konversionsflächen. <https://www.naturschutz-energiewende.de/fragenundantworten/88-beruecksichtigung-naturschutz-pv-freiflaechenanlagen-konversionsflaechen/>. (15.04.2025).
- KNE (2024b): Möglichkeiten und Grenzen des artenschutzrechtlichen Ausgleichs in Solarparks. Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende. <https://www.naturschutz-energiewende.de/publikationen/moeglichkeiten-und-grenzen-des-artenschutzrechtlichen-ausgleichs-in-solarparks/> (18.10.2024).
- Kost, C.; Müller, P.; Schweiger, J.; Fluri, V.; Thomsen, J. (2024): Studie: Stromgestehungskosten erneuerbare Energien. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2024_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf.
- Kotz, M.; Kuik, F.; Lis, E.; Nickel, C. (2024a): Global warming and heat extremes to enhance inflationary pressures. In: *Communications Earth & Environment*. Vol. 5, No. 1, S. 116. DOI: [10.1038/s43247-023-01173-x](https://doi.org/10.1038/s43247-023-01173-x).
- Kotz, M.; Levermann, A.; Wenz, L. (2024b): The economic commitment of climate change. In: *Nature*. Vol. 628, No. 8008, S. 551–557. DOI: [10.1038/s41586-024-07219-0](https://doi.org/10.1038/s41586-024-07219-0).

- Krüger, O. (2019): Windkraft und Greifvögel – Probleme und mögliche Lösungen. In: *Windkraft und Naturschutz. Was Experten dazu sagen*. Deutsche Wildtier Stiftung, Hamburg.
- Kumar, J. K. S.; Monica, S. S.; Vinothkumar, B.; Suganthi, A.; Paramasivam, M. (2021): Impact of Pesticide Exposure on Environment and Biodiversity: A Review. In: *Agricultural Reviews*. No. Of. DOI: [10.18805/ag.R-2325](https://doi.org/10.18805/ag.R-2325).
- Künzli, M.; McCall, A.-K.; Niederer, C. (2019): Abschätzung der Gefährdung von Stoffen aus der Erdwärmenutzung auf das Grundwasser. In: *SVGW*. https://www.aquaetgas.ch/de/wasser/trinkwasser/20190301_grundwasser-und-erdwaermenutzung/. (23.12.2024).
- Landesforschungszentrum Geothermie (2022): Fragen und Antworten zur Tiefen Geothermie. Landesforschungszentrum Geothermie, Karlsruhe. https://www.lfzg.de/downloads/Brosch%C3%BCren/Kopie%20von%20FAQ-Brosch%C3%BCre%20komplett_compres.pdf (28.02.2025).
- Landeshauptstadt Hannover (2019): Dachbegrünung und Photovoltaik. Eine Handreichung der Landeshauptstadt Hannover. Information des Fachbereichs Umwelt und Stadtgrün Landeshauptstadt Hannover. <https://www.hannover.de/Media/01-DATA-Neu/Downloads/Landeshauptstadt-Hannover/Planen,-Bauen,-Wohnen/%C3%96kologisches-Bauen/Information-Dachbegr%C3%BCnung-und-Photovoltaik> (23.10.2024).
- Lange, K.; Meier, P.; Trautwein, C.; Schmid, M.; Robinson, C. T.; Weber, C.; Brodersen, J. (2018): Basin-scale effects of small hydropower on biodiversity dynamics. In: *Frontiers in Ecology and the Environment*. Vol. 16, No. 7, S. 397–404. DOI: [10.1002/fee.1823](https://doi.org/10.1002/fee.1823).
- Lawson, M.; Jenne, D.; Thresher, R.; Houck, D.; Wimsatt, J.; Straw, B. (2020): An investigation into the potential for wind turbines to cause barotrauma in bats. In: *PLOS ONE*. Vol. 15, No. 12, S. e0242485. DOI: [10.1371/journal.pone.0242485](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242485).
- Lehmphul, K. (2015): Oberflächennahe Geothermie: Welche Auswirkungen hat sie? In: *Umweltbundesamt. Text*, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/oberflaechennahe-geothermie-welche-auswirkungen-hat>. (25.02.2025).
- Liesenjohann, M.; Blew, J.; Fronczek, S.; Reichenbach, M.; Bernotat, D. (2019): Artspezifische Wirksamkeiten von Vogelschutzmarkern an Freileitungen. Methodische Grundlagen zur Einstufung der Minderungswirkung durch Vogelschutzmarker – ein Fachkonventionsvorschlag. Bundesamt für Naturschutz. <https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/service/Dokumente/skripten/skript537.pdf> (18.12.2024).
- Liu, Y.; Xu, Y.; Zhang, F.; Yun, J.; Shen, Z. (2014): The impact of biofuel plantation on biodiversity: a review. In: *Chinese Science Bulletin*. Vol. 59, No. 34, S. 4639–4651. DOI: [10.1007/s11434-014-0639-1](https://doi.org/10.1007/s11434-014-0639-1).
- Lüers, S.; Wallasch, A.-K. (2023): Kostensituation der Windenergie an Land - Stand 2023. Deutsche WindGuard. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eeg-eb-wal-kostensituation-20231123.pdf?__blob=publicationFile&v=6.
- Maier, S. (2022): Faktenblatt: Kleine Wasserkraft. BUND. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/fluesse/fluesse_gewaesser_faktenblatt_kleine_wasserkraft.pdf (11.02.2025).
- Memmler, M.; Lauf, T.; Wolf, K.; Schneider, S. (2017): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger- Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2016. Climate Change Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-10-26_climate-change_23-2017_emissionsbilanz-ee-2016.pdf?utm_source=chatgpt.com (23.12.2024).

- Millon, L.; Colin, C.; Brescia, F.; Kerbiriou, C. (2018): Wind turbines impact bat activity, leading to high losses of habitat use in a biodiversity hotspot. In: *Ecological Engineering*. Vol. 112, S. 51–54. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2017.12.024](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.024).
- Moning, C. (2021): Leben unter Strom – Pilotstudie zum ökologischen Trassenmanagement unter Energiefreileitungen. ANLigen Natur No. 1.
- Morant, J.; Arrondo, E.; Sánchez-Zapata, J. A.; Donázar, J. A.; Margalida, A.; Carrete, M.; Blanco, G.; Guil, F.; Serrano, D.; Pérez-García, J. M. (2024): Fine-scale collision risk mapping and validation with long-term mortality data reveal current and future wind energy development impact on sensitive species. In: *Environmental Impact Assessment Review*. Vol. 104, S. 107339. DOI: [10.1016/j.eiar.2023.107339](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107339).
- Muteri, V.; Cellura, M.; Curto, D.; Franzitta, V.; Longo, S.; Mistretta, M.; Parisi, M. L. (2020): Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels. In: *Energies*. Vol. 13, No. 1, S. 252. DOI: [10.3390/en13010252](https://doi.org/10.3390/en13010252).
- NABU (2013): Stromfluss unter der Erde. Einsatz von Erdkabeln beim Übertragungsnetzausbau. NABU-Stiftung Nationales Naturerbe. <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/150416-nabu-erdkabel-leitfaden.pdf> (19.12.2024).
- NABU (2023): Naturverträglichkeit nutzbarer Biomasse. Hintergrund | Biomasse NABU Tea, Energie und Klima, Berlin. <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/biomasse/230929-hintergrund-biomasse-nabu.pdf> (13.12.2024).
- NABU (2024): Erneuerbare Energie aus der Tiefe. Klimafreundlichen Energieversorgung mit Geothermie möglich. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/energie/erneuerbare-energien-energie-wende/geothermie/10643.html>. (20.12.2024).
- Ng, C.; White, T.; Katariya, V.; Pollard, E. (2021): Geothermal Power Generation and Biodiversity: the Business Case for Managing Risk and Creating Opportunity. Proceedings World Geothermal Congress 2020+1 *Congress Report*, Reykjavik, Iceland. https://www.researchgate.net/profile/Edward-Pollard/publication/350837574_Geothermal_power_generation_and_biodiversity_the_business_case_for_managing_risk_and_creating_opportunity/links/60756c64299bf1f56d521c98/Geothermal-power-generation-and-biodiversity-the-business-case-for-managing-risk-and-creating-opportunity.pdf (20.12.2024).
- Núñez-Regueiro, M. M.; Siddiqui, S. F.; Fletcher Jr, R. J. (2019): Effects of bioenergy on biodiversity arising from land-use change and crop type. In: *Conservation Biology*. Vol. 35, No. 1, S. 77–87. DOI: [10.1111/cobi.13452](https://doi.org/10.1111/cobi.13452).
- Patterson, E. S. P.; Sanderson, R. A.; Eyre, M. D. (2018): Soil tillage reduces arthropod biodiversity and has lag effects within organic and conventional crop rotations. In: *Journal of Applied Entomology*. Vol. 143, No. 4, S. 430–440. DOI: [10.1111/jen.12603](https://doi.org/10.1111/jen.12603).
- Pawlik, V. (2024): Geothermienutzung zur Bruttostromerzeugung in Deutschland in den Jahren 2003 bis 2023. In: *Statista*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/233222/umfrage/stromerzeugung-aus-geothermie-in-deutschland/>. (23.12.2024).
- Peschel, R.; Peschel, T. (2023): Photovoltaik und Biodiversität – Integration statt Segregation! - Solarparks und das Synergiepotenzial für Förderung und Erhalt biologischer Vielfalt. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung (NuL)*. Vol. 55, No. 2, S. 18–25. DOI: [10.1399/NuL.2023.02.01](https://doi.org/10.1399/NuL.2023.02.01).
- Peschel, R.; Peschel, T. (2025): Artenvielfalt im Solarpark. Eine bundesweite Feldstudie. Bundesverband Neue Energiewirtschaft. https://sonne-sammeln.de/wp-content/uploads/2025_bne_Studie_Artenvielfalt_PVA.pdf (16.04.2025).
- Peter, F.; Reck, H.; Trautner, J.; Böttcher, M.; Strein, M.; Herrmann, M.; Meinig, H.; Nissen, H.; Weidler, M. (2021): Empfehlungen zur Sicherung von Lebensraumverbund und

- Wildtierwegen bei der Bündelung von Verkehrswegen und Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) Zentrale Ergebnisse aus einem Experten-Workshop an der Internationalen Naturschutzakademie auf der Insel Vilm und dessen Nachbereitung. In: *Artenschutz und Biodiversität*. S. 1–5. DOI: [10.55957/DMLT4356](https://doi.org/10.55957/DMLT4356).
- Plenefisch, T.; Brückner, L.; Ceranna, L.; Gester mann, N.; Houben, G.; Tischner, T.; Wegler, U.; Wellbrink, M.; Bönnemann, C. (2015): Tiefe Geothermie - mögliche Umweltauswirkungen infolge hydraulischer und chemischer Stimulationen. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_104_2015_tiefe_geothermie.pdf (20.12.2024).
- Pophof, B.; Henschenmacher, B.; Katt nigg, D. R.; Kuhne, J.; Vian, A.; Ziegelberger, G. (2023): Biological Effects of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields from 0 to 100 MHz on Fauna and Flora: Workshop Report. In: *Health Physics*. Vol. 124, No. 1, S. 39–52. DOI: [10.1097/HP.0000000000001624](https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001624).
- Prognos (2022): Kurzzusammenfassung. Extremweterschäden in Deutschland seit 2018. https://www.prognos.com/sites/default/files/2022-07/Prognos_KlimawandelfolgenDeutschland_Kurzzusammenfassung_Extremwetersch%C3%A4den%20seit%202018_AP2_3d_.pdf (15.04.2025).
- Purr, K.; Günther, J.; Lehmann, H.; Nuss, P. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE Studie. Climate Change UBA, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet_auflage2_juni-2021.pdf (20.12.2024).
- Pusch, M.; Borcharding, J.; Arlinghaus, R.; Borchardt, D.; Hering, D.; Jähnig, S.; Tockner, K.; Settele, J.; Weitere, M. (2021): Memorandum „Energiewende nicht auf Kosten der aquatischen Biodiversität“. https://www.igb-berlin.de/sites/default/files/media-files/download-files/memorandum_klimaschutz_vs_biodiversitaet.pdf (11.02.2025).
- Radinger, J.; van Treeck, R.; Wolter, C. (2022): Evident but context-dependent mortality of fish passing hydroelectric turbines. In: *Conservation Biology*. Vol. 36, No. 3, S. e13870. DOI: [10.1111/cobi.13870](https://doi.org/10.1111/cobi.13870).
- Richarz, K. (2021): Windenergie im Lebensraum Wald. Gefahr für die Artenvielfalt. Situation und Handlungsbedarf.
- Rodrigues, L.; Bach, L.; Dubourg-Savage, M.-J.; Karapandža, B.; Kovač, D.; Kervyn, T.; Dekker, J.; Kepel, A.; Bach, P.; Collins, J.; Harbusch, C.; Park, K.; Micevski, B.; Minderman, J. (2016): Leitfaden für die Berücksichtigung von Fledermäusen bei Windenergieprojekten: Überarbeitung 2014. UNEP/EUROBATS, Bonn. https://www.eurobats.org/sites/default/files/documents/publications/publication_series/EUROBATS_6_deu_2014_A4.pdf (12.12.2024).
- Rosenthal, S.; Pertagnol, J.; Beithan, S.; Günnewig, D.; Peters, W.; Wern, B. (2024): Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Bundesamt für Naturschutz, DE. <https://doi.org/10.19217/skr705> (23.10.2024).
- Rull, V. (2022): Biodiversity crisis or sixth mass extinction? In: *EMBO reports*. John Wiley & Sons, Ltd. Vol. 23, No. 1, S. e54193. DOI: [10.15252/embr.202154193](https://doi.org/10.15252/embr.202154193).
- Runge, K.; Baum, S.; Meister, P.; Rottgardt, E. (2012): Umweltauswirkungen unterschiedlicher Netzkomponenten. Oecos GmbH. https://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/Bedarfsermittlung/2012/UB/GutachtenRunge.pdf?__blob=publicationFile.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (2022): Klimaschutz braucht Rückenwind: Für einen konsequenten Ausbau der Windenergie an Land: Stellungnahme. Sachverständigenrat für Umweltfragen, Berlin. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2022_02_stellungnahme_windenergie.pdf?__blob=publicationFile&v=17.

- Sadik, O. (2024): Geothermie | Greenpeace. In: *Greenpeace*. <https://www.greenpeace.de/klimaschutz/energiewende/erneuerbare-energien/geothermie>. (20.12.2024).
- Schlegel, J. (2021): Auswirkungen von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf Biodiversität und Umwelt. https://www.researchgate.net/publication/356776665_Auswirkungen_von_Freiflaechen-Photovoltaikanlagen_auf_Biodiversitaet_und_Umwelt_Literaturstudie (18.10.2024).
- Schomerus, T.; Runge, K.; Marthen, W.; Pohlmann, H.; Butzeck, C.; Lauer, J.; Griem, M.; Lutz, L.; Sattler, P. (2017): Bewertung innovativer 380 kV- Freileitungsmastsysteme bezüglich deren rechtlicher Zulässigkeit sowie Landschaftsbildauswirkungen in unterschiedlichen Einsatzgebieten. https://www.natur-und-erneuerbare.de/fileadmin/Daten/Download_Dokumente/02_Abschlussberichte_anderer_Form/Bewertung-innov-380kV-FreileitungsmastSysteme.pdf (19.12.2024).
- Schwaiger, K.; Schrittwieser, J.; Koller-Kreimel, V.; Hödl-Kreuzbauer, E.; Gabor, O.; Jula, G.; Bizjak, A.; Mah, P. R.; Zvanut, N. S.; Mair, R. (2013): Leitlinien zum nachhaltigen Ausbau der Wasserkraft im Einzugsgebiet der Donau. Internationale Kommission zum Schutz der Donau. <https://www.icpdr.org/sites/default/files/nodes/documents/guiding-principles-german-final.pdf> (23.12.2024).
- Shortall, R.; Davidsdottir, B.; Axelsson, G. (2015): Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 44, S. 391–406. DOI: 10.1016/j.rser.2014.12.020.
- Spreegas (2024): Naturschutz und Energieerzeugung gehen im Solarpark Frauendorf Hand in Hand. <https://www.spreegas.de/unternehmen/portrait/engagement/weitere-engagements/artikel-naturschutz-und-energieerzeugung-gehen-im-solarpark-frauendorf-hand-in-hand.html> (23.10.2024).
- Statista, V. (2024): Verteilung der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien weltweit nach Energieträger in den Jahren 2016 bis 2022. In: *Statista*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/610641/umfrage/ee-strommix-weltweit/>. (23.12.2024).
- Strohmeier, B.; Dvorak, M.; Hihenegger, J. (2023): Photovoltaik-Freiflächenanlagen und Vogelschutz in Österreich -Konflikt oder Synergie? BirdLife Austria. https://www.researchgate.net/publication/370119316_Photovoltaik-Freiflaechenanlagen_und_Vogelschutz_in_Oesterreich_-_Konflikt_oder_Synergie (21.10.2024).
- Sweetlove, L. (2011): Number of species on Earth tagged at 8.7 million. In: *Nature*. Nature Publishing Group. DOI: 10.1038/news.2011.498.
- Thieme, M. L.; Tickner, D.; Grill, G.; Carvallo, J. P.; Goichot, M.; Hartmann, J.; Higgins, J.; Lehner, B.; Mulligan, M.; Nilsson, C.; Tockner, K.; Zarfl, C.; Opperman, J. (2021): Navigating trade-offs between dams and river conservation. In: *Global Sustainability*. Vol. 4, S. e17. DOI: 10.1017/sus.2021.15.
- Tosh, D.; Montgomery, W.; Reid, N. (2014): A review of the impacts of wind energy developments on biodiversity. Report prepared by the Natural Heritage Research Partnership (NHRP) between Quercus, Queen’s University Belfast and the Northern Ireland Environment Agency (NIEA) for the Research and Development Series No. 14/02. <https://tethys.pnnl.gov/publications/review-impacts-onshore-wind-energy-development-biodiversity> (12.12.2024).
- Trautner, J.; Attinger, A.; Dörfel, T. (2024): Photovoltaik-Freiflächenanlagen und Naturschutz – Feststellungen und Empfehlungen aus einer Orientierungshilfe für die regionale Planung. In: *Anliegen Natur*. 46 Vol. 1, S. 5–14.
- Trieb, F.; Gerz, T.; Geiger, M. (2018): Modellanalyse liefert Hinweise auf Verluste von Fluginsekten in Windparks. Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt. <https://www.dlr.de/de/medien/publikationen/sonstige-publikationen/2018/et-1810-10-3-trieb-bcdr-51-5-ohne/@@download/file> (26.02.2025).

- Trusch, R.; Falkenberg, M.; Mortter, R. (2020): Anlockwirkung von Windenergieanlagen auf nachtaktive Insekten. https://www.smnk.de/fileadmin/page_content/pressemitteilungen/Carolinea_78_2020_Anlockwirkung_von_WEA.PDF (26.02.2025).
- Tudge, S. J.; Purvis, A.; De Palma, A. (2021): The impacts of biofuel crops on local biodiversity: a global synthesis. In: *Biodiversity and Conservation*. Vol. 30, No. 11, S. 2863–2883. DOI: 10.1007/s10531-021-02232-5.
- UBA (2014): Entwicklung biologischer Bewertungsmethoden und -kriterien für Grundwasserökosysteme. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba_bericht_grundwasser_web.pdf (20.12.2024).
- UBA (2023): Nutzung der Wasserkraft. In: *Umweltbundesamt. Text*, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/nutzung-der-wasserkraft>. (23.12.2024).
- Ubierna, M.; Santos, C. D.; Mercier-Blais, S. (2022): Water Security and Climate Change: Hydropower Reservoir Greenhouse Gas Emissions. In: A. K. BISWAS: / C. TORTAJADA: *Water Security Under Climate Change*. Water Resources Development and Management Springer Singapore, Singapore. S. 69–94. DOI: 10.1007/978-981-16-5493-0_5.
- Urziceanu, M.; Anastasiu, P.; Rozyłowicz, L.; Sesan, T. E. (2021): Local-scale impact of wind energy farms on rare, endemic, and threatened plant species. In: *PeerJ*. Vol. 9, S. e11390. DOI: 10.7717/peerj.11390.
- Voigt, C. C.; Russo, D.; Runkel, V.; Goerlitz, H. R. (2021): Limitations of acoustic monitoring at wind turbines to evaluate fatality risk of bats. In: *Mammal Review*. Vol. 51, No. 4, S. 559–570. DOI: 10.1111/mam.12248.
- Völler, S.; Oberleitner, I.; Felderer, A.; Balas, M. (2022): Klimawandelanpassung und Biodiversität. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Abteilung VI/1 – Allgemeine Klimapolitik, Wien. https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:d879e03a-a6ea-433b-a5e3-9d4be49f2e88/Publication_Biodiversitaet_A5_12-2022.pdf (13.12.2024).
- Wagner, F.; Warth, P.; Schmalz, W. (2021): Evaluierung von Fischschutz- und Fischabstiegsmaßnahmen an einem Wasserkraftstandort für die Umsetzung des WHG § 35. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-19_texte_81-2021_fischschutz.pdf?utm_source=chatgpt.com (23.12.2024).
- Wulfert, K.; Vaut, L.; Köstermeyer, H.; Blew, J.; Lau, M. (2023): Artenschutz und Windenergieausbau. Anordnung von Minderungsmaßnahmen bei der Genehmigung von WEA in Windenergiegebieten, die den Voraussetzungen des § 6 WindBG entsprechen. https://www.boschpartner.de/fileadmin/user_upload/Arbeitsbereiche/Forschung_und_Entwicklung/Kurzpapier_Genehmigung_Schutzmassnahmen.pdf.