

Überprüfung

# Nebeneffekte der Windenergie: Rückblick auf drei Themen - Status und offene Fragen

André D. Thess<sup>1,2,\*</sup> und Philipp Lengsfeld<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut für Technische Thermodynamik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR, Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart, Deutschland

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Energiespeicherung, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, Deutschland

<sup>3</sup> re:look climate gGmbH, Prenzlauer Allee 186, 10405 Berlin, Deutschland

\* Korrespondenz: [andre.thess@dlr.de](mailto:andre.thess@dlr.de); Tel.: +49-174-325-4573

**Zusammenfassung:** Die Windenergie wird als eine Säule des kohlenstoffarmen Energiesystems der Zukunft angesehen. Während die Nebenwirkungen und sozialen Kosten der fossilen Energieträger (Kohle, Öl und Gas) sowie der Kernenergie gut dokumentiert und quantifiziert sind, ist das Verständnis der analogen Fragen in Bezug auf die Windenergie weit weniger fortgeschritten. Ein solches Verständnis ist jedoch entscheidend, um den Einfluss der Windenergie auf die Umwelt zu minimieren und ihre sozialen Kosten mit denen der konventionellen Energiequellen zu vergleichen. Hier fassen wir den Wissensstand über drei Nebenwirkungen der Windenergie zusammen, die bisher noch nicht überzeugend bewertet wurden. Wir konzentrieren unsere Analyse auf drei Themen, nämlich (1) die Auswirkungen der Windenergie auf Insekten, (2) die Auswirkungen der Windenergie auf die räumlich-zeitliche Verteilung von Luftgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchtigkeit und Niederschlag in der Nähe von Windparks und (3) die Auswirkungen der Windenergie auf den Menschen durch Lärmemissionen. Für jedes Thema formulieren wir offene Forschungsfragen, die durch verantwortungsvolle politische Anreize angegangen werden sollten, um die sozialen Kosten der Windenergie umfassend zu bewerten und Windparks mit minimalen Auswirkungen auf ihre Umwelt zu entwickeln.

**Stichworte:** Windkraft; Insektenwanderung; Insektenaufprall; Infraschallemission; Veränderung der Wettermuster

**Zitat:** Thess, A.D.; Lengsfeld, P.

Nebeneffekten der Windenergie: Überprüfung

von drei Themen - Status und offene

Fragen. *Nachhaltigkeit* **2022**, *14*,  
16186. <https://doi.org/10.3390/su142316186>

der Creative Commons Attribution (CC BY) Lizenz (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) verbreitet wird.

Akademischer Redakteur: Byungik Chang

Empfangen: 13. September 2022

Angenommen: 21. November 2022

Veröffentlicht: 4. Dezember 2022

**Hinweis des Herausgebers:** MDPI bleibt hinsichtlich der Rechtsansprüche in den veröffentlichten Karten und der institutionellen Zugehörigkeit neutral.



**Copyright:** © 2022 bei den Autoren. Lizenziert durch MDPI, Basel, Schweiz. Dieser Artikel ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen

## 1. Einführung

Die Windenergie gilt als eine der Säulen des kohlenstoffarmen Energiesystems der Zukunft [1]. Während ein breiter wissenschaftlicher Konsens darüber besteht, dass Strom aus Windenergie einen geringen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck hat [2], wächst in der Öffentlichkeit die Besorgnis über die nachteiligen Nebenwirkungen dieser Technologie. Außerdem ist eine vergleichende Bewertung von

Energietechnologien unvollständig, solange die sozialen Kosten der Windenergie nicht so gut bekannt sind wie die von Kohle, Öl, Gas und Kernenergie. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den derzeitigen Kenntnisstand über drei bisher nicht umfassend bewertete Nebenwirkungen der Windenergie zusammenzufassen. Darüber hinaus formulieren wir offene Fragen, die untersucht werden sollten, um Strategien zur Verringerung der Auswirkungen künftiger Windparks zu entwickeln.

Der Haupteffekt von Windrotoren ist die Gewinnung kinetischer Energie aus atmosphärischen Strömungen zur Umwandlung in elektrische Energie. Dieser Bereich wird in der aktuellen Forschung umfassend behandelt und soll hier nicht weiter erörtert werden. Die vorliegende Arbeit ist den *sekundären* Effekten von Windrotoren und Windparks gewidmet, die wir als *Nebenwirkungen bezeichnen* und die zwei Ebenen umfassen: physikalische und biologische Effekte als innere Ebene und soziale Kosten als äußere Ebene. Der Schwerpunkt dieser Untersuchung liegt auf den ungelösten Fragen der inneren Schicht, einschließlich der Neuverteilung der atmosphärischen Strömungen und des Einflusses der Rotoren auf Menschen und Wildtiere sowie auf die landwirtschaftlichen Erträge. In einem Teil unserer Untersuchung schlagen wir politische Anreize zur Beantwortung dieser offenen Fragen vor. Zusätzlich zu diesem Schwerpunkt gehen wir auch kurz auf offene Fragen zu den sozialen Kosten der Windenergie ein. Bevor wir einen Überblick über die vorliegende

In diesem Zusammenhang ist es angebracht, kurz auf die Definition des Konzepts der sozialen Kosten [3] und deren Schätzung für die Kernenergie [4] zu verweisen und zu erwähnen, dass es unseres Wissens nach keine umfassende Analyse der sozialen Kosten der Windenergie gibt.

Wir nähern uns der formulierten offenen Frage mit einem Überblick über die vorhandene Literatur mit besonderem Schwerpunkt auf drei Themen. Im folgenden Abschnitt analysieren wir das Wissen über die Auswirkungen der Windenergie auf Fluginsekten. Im Gegensatz zu den beiden anderen Abschnitten basiert das Eröffnungsthema auf einer Schlüsselreferenz [5] aus der Institution des Erstautors, die die aktuelle Literatur ergänzt und detailliert. Das Thema, wie sich Offshore-Windparks auf Meeressäuger auswirken, haben wir nicht aufgenommen, da es in [6] ausführlich behandelt wurde, was wir zur weiteren Lektüre dringend empfehlen. Abschnitt 3 ist der Frage gewidmet, wie sich Störungen im turbulenten Strömungsfeld auf Luftgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchtigkeit und Niederschlag in der Umgebung von Windparks auswirken. In Abschnitt 4 werden die Auswirkungen des von Windkraftanlagen ausgehenden Schalls auf den Menschen diskutiert. Die Abschnitte 3 und 4 bestehen aus einer systematischen Durchsicht aktueller einschlägiger Literatur und ausgewählten Expertenurteilen. Wir haben die drei Themen (Insekten, Strömungsfelder und Schall) für diese Überprüfung ausgewählt, weil wir sie für die wichtigsten halten. Themen wie Vögel, Partikelemissionen von Turbinenblättern, Recycling von Windturbinen und deren Verschmutzungen sowie optische Störungen haben wir daher bewusst ausgelassen. In Abschnitt 5 diskutieren wir die multikriterielle Auswahl von Standorten für zukünftige Windparks. In Abschnitt 6 fassen wir unsere Schlussfolgerungen zusammen und weisen auf offene Fragen hin, die in der künftigen Forschung behandelt werden sollten.

## 2. Auswirkungen der Windenergieerzeugung auf Fluginsekten

### 2.1. Korrelation von Insektenwanderung und Rotorhöhe

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat 2018 auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche und einer vereinfachten Modellierung eine Studie zu möglichen Beeinträchtigungen fliegender Insekten durch Windrotoren in Deutschland durchgeführt [5]. Die FlyWiP-Studie liefert umfassende Belege aus der entomologischen Fachliteratur, dass viele Insektenarten in einer höheren Höhe wandern als ihre übliche Fluggrenzschicht (FBL), die in der Regel bis ca. 30 m über dem Boden reicht [7-19]. Das weit verbreitete Axiom, dass Insekten vor Schäden durch Windkraftanlagen sicher sind, weil sich die Rotorblätter oberhalb der FBL drehen, wurde durch diese Analyse widerlegt (Abbildung 1).

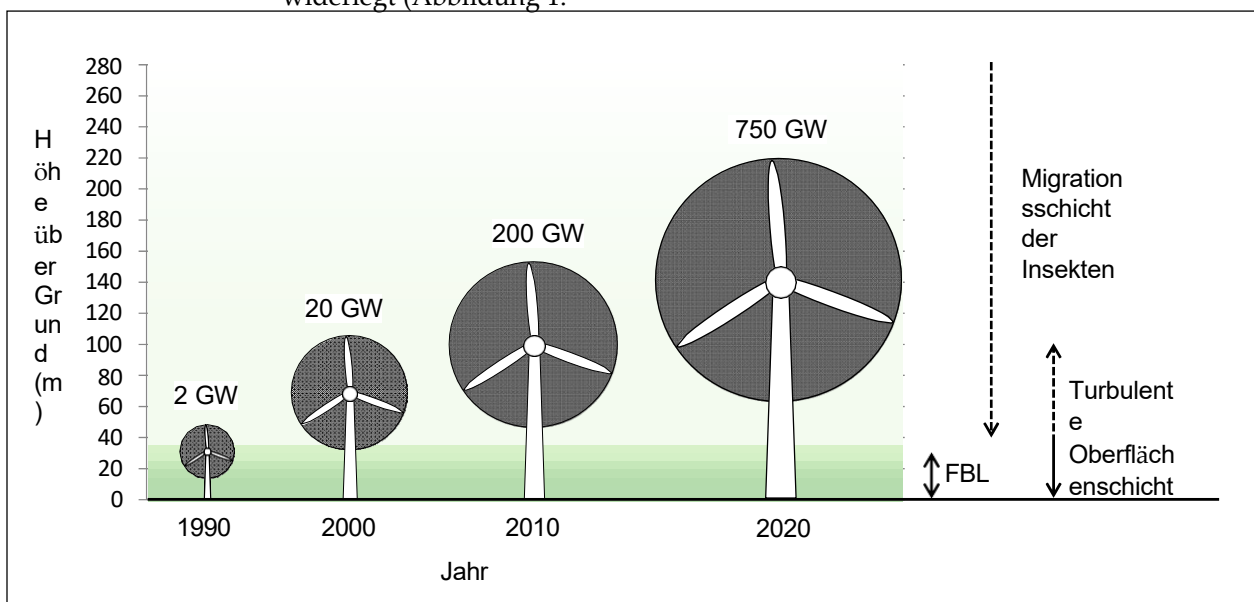


Abbildung 1. Entwicklung der typischen Höhe von Windturbinen und der weltweit installierten

---

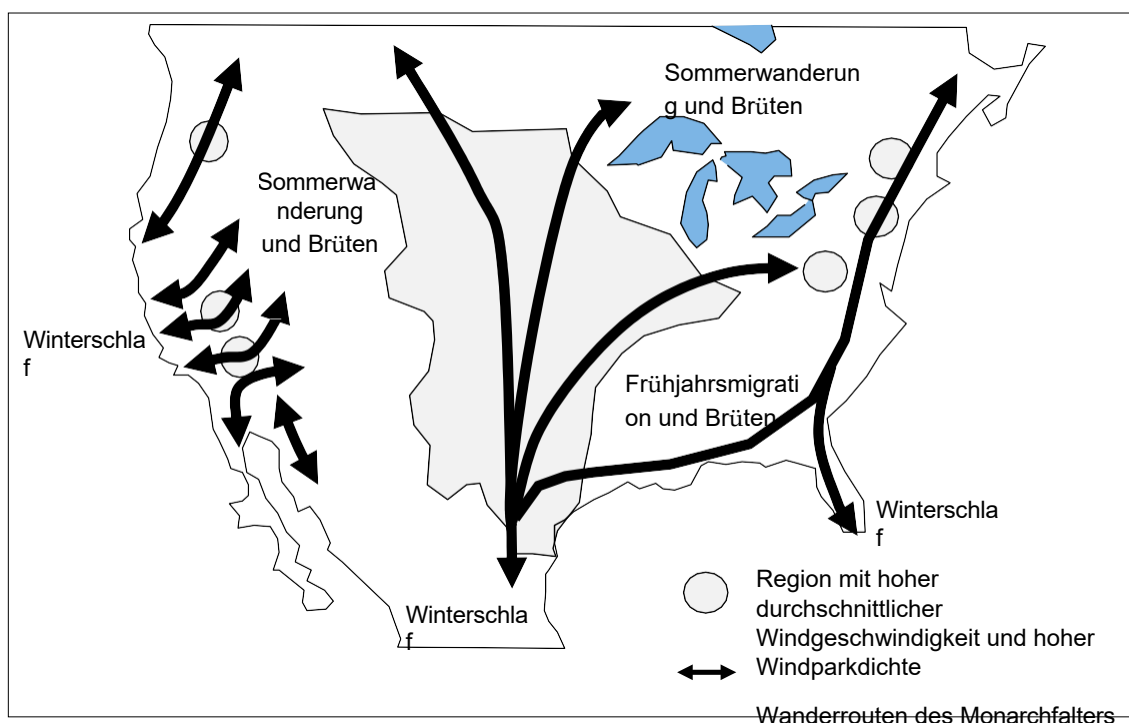
Windkraftleistung seit 1990. Typische Turbinenformen werden mit der alltäglichen Fluggrenzschicht (FBL) von Insekten und mit der turbulenten Oberflächenschicht verglichen, die Insekten während ihrer Wanderung zu überwinden versuchen.

Wenn wandernde Insekten ihre Geschlechtsreife erreicht haben, und sobald Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Jahreszeit mit ihren intrinsischen Verhaltensmustern übereinstimmen, steigen sie über die turbulente Oberflächenschicht der Atmosphäre auf, die in einer Höhe zwischen 40 und 100 m über dem Boden schwankt [20]. Dort finden sie starke, gerichtete, ungestörte Winde vor, die sie als Transportmittel nutzen können, um zu ihren bevorzugten Paarungs-, Brut- und Nahrungsgebieten zu gelangen, was der allgemeinen Annahme widerspricht, dass fliegende Insekten intrinsisch sicher sind, von modernen Windrotoren erfasst zu werden, die höher stehen als die für sie vorgesehene Flug-Grenzschicht. Außerdem ist es wahrscheinlich, dass Insekten aus Effizienzgründen nicht viel höher aufsteigen als nötig, um starke Winde zu finden. Dies ist die gleiche Überlegung, die die Entwickler von Windkraftanlagen dazu veranlasst hat, die Rotoren knapp über der turbulenten Oberflächenschicht zu platzieren. Es ist nicht verwunderlich, dass sich wandernde Insekten und Windrotoren früher oder später an denselben Orten treffen. In Windparks wurden bereits geschädigte Insekten gefunden, und es wurden eingehende Analysen der damit verbundenen Auswirkungen und Gegenmaßnahmen durchgeführt [21].

Unabhängig von solchen Erkenntnissen kam Ref. [22] zu dem Schluss, dass es keine signifikante Wechselwirkung zwischen fliegenden Insekten und Windkraftanlagen gibt, und zwar aufgrund der geringen Anzahl von Insekten, die in Rotorhöhe mit einer Lichtfalle gefangen wurden, die während des Betriebs auf der Spitze einer Windkraftanlage angebracht war. Im Gegensatz dazu registrierte eine andere Gruppe von Wissenschaftlern unter Verwendung eines Scheimpflug-LIDARs zur Identifizierung von Insektenschwärmen eine signifikante Insektenaktivität in Rotorhöhe [23]. Ob eine beleuchtete Insektenfalle oder ein LIDAR das geeignete Instrument für die Detektion von Insektenschwärmen bei den Betriebswindgeschwindigkeiten von Windenergieanlagen von 5 bis 20 m pro Sekunde ist, muss weiter diskutiert werden.

## 2.2. Korrelation zwischen den Standorten von Windparks und den Migrationsrouten von Insekten

Ein prominentes Beispiel aus den Vereinigten Staaten veranschaulicht das offensichtliche Zusammentreffen der Wanderrouen von Fluginsekten und Windparks. Im Frühjahr verlässt der Monarchfalter seine Überwinterungsgebiete in Florida, Zentralmexiko und an der südkalifornischen Küste und macht sich auf den Weg nach Norden. Dabei nutzt er die starken Winde, die ihm helfen, große Entfernungen in relativ kurzer Zeit zu überwinden. Insekten mögen keine Turbulenzen. Sie nutzen starke, gleichmäßige Winde zur Fortbewegung, wählen aber ruhige Gebiete als Lebensraum (Abbildung 2).



---

**Abbildung 2.** Migrationsrouten des Monarchfalters zwischen Mexiko und Kanada [24] und Regionen mit hoher durchschnittlicher Windgeschwindigkeit (NREL 2021) und hoher Dichte an Windparks (USGS 2019) [25].

Die erste Generation beginnt nach dem Verlassen ihrer Überwinterungsgebiete in Mexiko im Frühjahr in ruhigen Gebieten im Südosten der USA zu brüten und bildet die Grundlage für zwei weitere Generationen, die später weiter nach Norden ziehen und im Sommer im gesamten Norden der USA und im südlichen Teil Kanadas brüten [26,24]. Schließlich kehrt die vierte und letzte Generation während nur zweier Monate im Herbst in ihre ursprünglichen Überwinterungsgebiete zurück. Es gibt einige Hinweise darauf, dass auch der Milchkrautkäfer in ähnlicher Weise innerhalb dieser Region wandert, was möglicherweise die damit verbundenen Auswirkungen auf die Bestäubung des Milchkrauts erklärt. Bei beiden Arten wurden massive Verluste festgestellt [27].

Der vom NREL (2021) entwickelte US-Windatlas und die US-Windturbinen-Datenbank des USGS (2019) liefern sehr detaillierte und hochauflösende Informationen über Windgeschwindigkeiten und Windparks in den USA und zeigen deutlich eine starke Übereinstimmung von Migrationsrouten und Windparks, selbst auf kleinräumiger Ebene [25]. Dies führt zu der leicht überprüfaren Hypothese, dass viele attraktive Standorte für die Entwicklung von Windparks entlang der Migrationsrouten von Insekten liegen.

### 2.3. Modellierung von Insektenaufprall in Windkraftanlagen

Das im Rahmen der FlyWiP-Studie erstellte Modell verwendet drei Parameter, um die Anzahl der in Deutschland während der Flugsaison von April bis Oktober gefährdeten Insekten zu quantifizieren [5].

#### 2.3.1. Insektendichte in der Atmosphäre

Der erste Parameter ist der durchschnittliche Gehalt an Insekten in einem bestimmten Luftvolumen, der durch Feldmessungen zwischen den Jahren 1998 und 2004 ermittelt wurde, wobei die durchschnittliche Insektendichte bis zu mehreren tausend Metern über dem Boden quantifiziert wurde [28]. Die vertikale durchschnittliche Dichteverteilung von Insekten in der Atmosphäre wurde in den letzten Jahrzehnten untersucht [29,30] und zeigt eine exponentielle Abnahme der Dichte mit der Höhe [11,12].

Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse und des Verlusts von 75 % der Insektenpopulation in Deutschland seit 1990 [31] wurde die durchschnittliche Insektendichte in Rotorhöhe im FlyWiP-Studienmodelljahr 2017 auf drei durchschnittlich große Insekten pro 1000 Kubikmeter Luft oder 3 kg Insektenbiomasse pro Kubikkilometer Luft geschätzt [5]. Die Verwendung solcher Durchschnittswerte ist ein eher konservativer Ansatz, da Schwarmereignisse zu einer bis zu 100-fach höheren Dichte führen können [16].

#### 2.3.2. Luftvolumenstrom durch die Rotorfläche

Der zweite Modellparameter quantifiziert den Volumenstrom durch die im Jahr 2017 in Betrieb befindlichen 30.000 deutschen Windrotoren mit insgesamt 56 GW Leistung und einer Rotorfläche von 160 km<sup>2</sup>. Der entsprechende Luftstrom durch diese Rotorfläche von rund 8 Millionen Kubikkilometern errechnet sich aus der Multiplikation der Rotorfläche (160 km<sup>2</sup>), der Windgeschwindigkeit bei Anlagen-Nennleistung (50 km/h) und den äquivalenten Volllastbetriebsstunden der Windenergieanlagen während der Insektenflugzeit in Deutschland (1000 h/a). Dies lässt sich mit der Gleichung  $V_{\text{rotor}} = A_{\text{rotor}} \cdot v_{\text{nom}} \cdot t_{\text{op}}$  ausdrücken, wobei  $V_{\text{rotor}}$  den Luftvolumenstrom durch Windrotoren während der Insektenflugzeit in km<sup>3</sup>/Jahr,  $A_{\text{rotor}}$  die gesamte installierte Rotorfläche in km<sup>2</sup>,  $v_{\text{nom}}$  die Nennbetriebswindgeschwindigkeit in km/h und  $t_{\text{op}}$  die äquivalenten Volllastbetriebsstunden während der Insektenflugzeit in h/Jahr bedeuten. Multipliziert man den Luftstrom und die Insektendichte, so ergibt sich eine Gesamtinsektenbiomasse von 24.000 Tonnen bzw. 24.000 Milliarden durchschnittlich großer Insekten, die während des Betriebs im Modelljahr (2017) durch deutsche Windrotoren fliegen [5].

#### 2.3.3. Aufprallrate von Insekten beim Überqueren von Windrotoren

Der dritte Modellparameter schließlich quantifiziert den Anteil der Insekten, der

---

beim Durchfliegen eines Rotors beschädigt wird und Rückstände an den Blättern hinterlässt. Dieser Modellparameter wird seit mehr als 30 Jahren von der Forschung in der Windkraftindustrie bewertet, da man erkannt hat, dass Insekteneinflüsse und Rückstände auf den Rotorblättern die Effizienz und Lebensdauer von Windkraftanlagen verringern.



Parks [32,33]. Der vereinfachte Ansatz der FlyWiP-Studie führt zu einem Schadensfaktor von 5 %, der plausibel und konservativ ist, wenn man bedenkt, dass das Verhältnis von massiver Blattfläche zu kreisförmiger (meist leerer) Rotorfläche der meisten Windkraftanlagen in der gleichen Größenordnung liegt. Während des Betriebs bewegen sich die Rotorblätter mit Geschwindigkeiten von etwa 40 km/h in der Nähe der Rotormitte und etwa 250 km/h an der Spitze, so dass kaum eine Chance besteht, dass ein Lebewesen einen Einschlag überlebt, aber eine Chance besteht (in unserem Modell 95 %), die Rotorfläche ungestört zu passieren.

#### 2.3.4. Schätzung des jährlichen Insektenschadens in einem Windpark

Die Multiplikation der drei Modellparameter (Luftstrom, Insektendichte und Schadensfaktor) ergibt einen ersten Hinweis auf die potenziell geschädigte Insektenbiomasse durch den deutschen Windpark im Jahr 2017, die sich auf 1200 Tonnen oder 1200 Milliarden durchschnittlich große Insekten (bei 1 mg/cap) pro Jahr beläuft. Dies kann ausgedrückt werden als  $m_{\text{Schaden}} = V_{\text{rotor}} \cdot \text{Insekten} \cdot \text{Schaden}$ , wobei  $m_{\text{Schaden}}$  die geschädigte Insektenbiomasse in kg/Jahr angibt,  $V_{\text{rotor}}$  der Luftvolumenstrom durch Windrotoren während der Insektenflugzeit in  $\text{km}^3/\text{Jahr}$  ist,  $\text{Insekten}$  die durchschnittliche Insektendichte in Rotorhöhe in  $\text{kg}/\text{km}^3$  und  $\text{Schaden}$  die durchschnittliche Schadensrate von Insekten, die durch einen Rotor im Betrieb fliegen, in %.

Rechnet man diese Zahlen auf die globale Ebene hoch, mit einer heute installierten Windkraftkapazität von 750 GW (Skalierungsfaktor:  $750 \text{ GW}/56 \text{ GW} = 13,4$ ), einschließlich Ländern mit einer ganzjährigen Flugsaison (Skalierungsfaktor:  $12 \text{ Monate}/6 \text{ Monate} = 2$ ) und einer höheren Insektendichte als in Deutschland (Skalierungsfaktor:  $1/(1-75\% \text{ Verlust}) = 4$ ), könnte der globale Gesamtschaden etwa das Hundertfache dieses Wertes betragen, was einem potenziellen windkraftbedingten Verlust von 120.000 Tonnen Insektenbiomasse oder 120.000 Milliarden Individuen pro Jahr im globalen Maßstab entspricht. Da das Auftreffen von Insekten während der Migration erfolgt, kurz bevor der jährliche Reproduktionsprozess der Insektenpopulation abgeschlossen ist, könnte es sich auf die nachfolgenden Generationen ausbreiten, was durch die Anzahl der potenziellen Nachkommen jedes geschädigten weiblichen Insekts noch verstärkt wird. Trotz dieser Beweise wurde zwar in vielen Analysen über einen weltweiten Rückgang der Insektenbiomasse berichtet, aber in keiner wurde die Windenergie als mögliche Ursache berücksichtigt [34].

#### 2.4. Intensive Forschungsanstrengungen zum Schutz und zur Reinigung von Rotorblättern

Insektenbefall ist keine Fiktion; in den letzten 30 Jahren wurden erhebliche wissenschaftliche und industrielle Anstrengungen unternommen, um Rotorblattoberflächen zu entwickeln, die der Erosion durch luftgetragene Partikel und dem Anhaften von Rückständen aus solchen Einwirkungen widerstehen. Die Erosion der Blattvorderkante verringert die wirtschaftliche Lebensdauer eines Windparks, und an der Blattoberfläche haftende Rückstände verringern die Effizienz der Stromerzeugung [35,36]. Zu den untersuchten Partikeln gehören Eis, Sand und fliegende Insekten. Um das Phänomen zu verstehen und Abhilfemaßnahmen zu finden, widmet sich ein Teil der Literatur der Quantifizierung der Auswirkungen von Insekten. In solchen Studien werden die "Insektenauffangeffizienz" von Tragflächen und die "Bruchgeschwindigkeit" von Insekten in Abhängigkeit von ihrer Größe und der Tragflächenkonstruktion quantifiziert [32,33,37].

Ein weiterer großer Teil der Fachliteratur zum Thema Windkraftanlagen widmet sich Maßnahmen und Entwicklungen zum Schutz der Rotorblätter vor Insektenbefall. Die Struktur der Blattoberfläche und der Betrieb der Blätter wurden optimiert, um die Erosion und den Bewuchs durch Insekten zu minimieren. Es wurden minimale Anstrengungen unternommen, um einen Aufprall zu vermeiden, aber erhebliche Anstrengungen zur Vermeidung seiner Folgen, was zu stabileren und antiadhäsiven Blattoberflächen führte [38-40].

Eine dritte Kategorie der Fachliteratur schließlich ist der Reinigung von Rotorblättern gewidmet, um einen hohen Wirkungsgrad zu erhalten. Das Problem des

---

Insektenbefalls findet sich in der Werbung von Reinigungsfirmen und in der Begründung wissenschaftlicher Arbeiten zur Rotorblattreinigung [41-43].

Als Reaktion auf die FlyWiP-Studie hat der Bundesverband WindEnergie [44] behauptet, die wichtigsten Argumente und Annahmen der Studie widerlegen zu können. Obwohl wir diese Behauptung nicht für gerechtfertigt halten, räumen wir ein, dass die Dimension der Auswirkungen des Insektenverlustes durch

Windkraft, insbesondere im Vergleich zu anderen Faktoren, ist noch nicht gut bekannt. Daher sind wir der Meinung, dass internationale Forschungsarbeiten eingeleitet werden sollten, um solche Auswirkungen zu quantifizieren (und möglicherweise zu vermeiden), was auch die zentrale Aussage der FlyWiP-Studie ist.

Ein Hauptargument, das in [44] vorgebracht wird, ist, dass Schäden durch Insektenbefall an Windrotorblättern ein Phänomen der Vergangenheit sind. Wir sind der Meinung, dass diese Argumentation fehlerhaft ist. Nach unserer Interpretation lässt sich die geringere Sichtbarkeit von Insektenbefall an modernen Windenergieanlagen durch die oben erwähnten technischen Entwicklungen der Blattoberflächen und durch den massiven Verlust von Insekten im gleichen Zeitraum erklären. Die parallele Entwicklung von Insektenrückgang und Windkraftausbau allein beweist zwar noch keinen kausalen Zusammenhang zwischen den beiden Phänomenen. Es scheint jedoch genügend Anhaltspunkte zu geben, um die Untersuchung eines möglichen Zusammenhangs zu rechtfertigen.

Geht man beispielsweise davon aus, dass die oben berechneten 1200 Milliarden Insekten, die während einer Saison in Deutschland verloren gehen, etwa 10 % ihres Körpergewichts als Rückstände auf den Blättern hinterlassen, die im Modelljahr (2017) etwa 5 % der gesamten Rotorfläche von 160 Millionen Quadratmetern ausmachen, so würde der Rückstand pro Quadratmeter Rotorblatt einen Wert von 15 g pro Jahr betragen. Das bedeutet, dass das enorme Wachstum des deutschen Windparks in den letzten 30 Jahren, zusammen mit dem massiven parallelen Verlust von Insekten, den Insektenbefall praktisch unsichtbar gemacht hat. Tragischerweise wurde der relative Rückgang der sichtbaren Insektenrückstände auf den Rotorblättern seit 1990 fälschlicherweise als allgemein und global gültige Konsequenz der zunehmenden Anlagenhöhe interpretiert, von der man annahm, dass sie die Rotoren aus dem Bereich der Insektenflug-Grenzschicht bringt, wie es die frühen Windkraftentwickler vorausgesagt hatten [45,46]. Obwohl dies heute kein ernsthaftes Problem mehr für Windkraftanlagen darstellt, könnte das Insekten-Impingement daher immer noch ein Problem für wandernde Insektenpopulationen sein.

### *2.5. Maßnahmen zur Vermeidung von Insektenschäden durch Rotorblätter*

Die oben beschriebenen Erkenntnisse über die Migration von Insekten lassen hoffen, dass die Auswirkungen der Windenergie auf fliegende Insekten zumindest auf ein gewisses Maß reduziert werden könnten. Insekten wandern innerhalb einer bestimmten Jahreszeit und in einer bestimmten Richtung. Der Monarch wandert von März bis Juni nach Norden und kehrt im September und Oktober in den Süden zurück. Den Rest des Jahres brütet oder überwintert er an relativ ruhigen Orten, die wahrscheinlich weit von windigen Wanderrouen (und damit von den meisten Windparks) entfernt sind, und hält sich die meiste Zeit über tief in seiner Fluggrenzschicht auf. Ein besseres Verständnis der Insektenwanderung und ihres Zusammenhangs mit der Windenergieerzeugung könnte offene Fragen in Bezug auf die mögliche Notwendigkeit der Abschaltung von Windparks aufgrund von Schwarmereignissen beantworten. Andererseits würde es Licht in die Frage bringen, ob solche Ereignisse nur in einigen kritischen Monaten und nur bei entsprechender Windrichtung zu erwarten sind, da die meisten Insekten sonst tief in ihrer Flugschicht bleiben würden.

LIDAR kann Partikel in der Luft erfassen, die sich einem Windpark nähern, und den Betrieb stoppen, wenn die Dichte in Rotorhöhe kritisch wird. LIDAR wird seit vielen Jahren zur Vorhersage der Windgeschwindigkeit im Anflug auf Windparks eingesetzt [47,48] und wurde kürzlich auch zur Verfolgung von Insektenschwärmen in Rotorhöhe verwendet [23]. Hypothetisch gesehen könnten Windturbinen, die sich an das Verhalten der Insekten anpassen und auf Schwarmereignisse reagieren, den Schaden an den Insekten verringern, ohne dass es zu erheblichen Einbußen beim Energieertrag kommt.

### *2.6. Offene Fragen zu Windparks und fliegenden Insekten*

Sowohl die Insektenwanderung als auch der Ausbau der Windparkkapazitäten

finden auf globaler Ebene statt [7,11-13]. Vieles deutet darauf hin, dass die Migrationsrouten von Insekten bestehende Windparkstandorte kreuzen und die Höhe der Insektenwanderung über dem Boden zumindest teilweise mit der Höhe moderner Windrotoren übereinstimmt [21,23-25,29]. Prominente Beispiele, die möglicherweise betroffen sind, sind der Distelfalter, der zwischen Zentralafrika und Europa wandert [17], und der Monarchfalter, der zwischen Mexiko, den Vereinigten Staaten und Kanada unterwegs ist [26]. Abgeleitet aus einer früheren Abschätzung für Deutschland [5] ist der weltweite Verlust an massenhaften Fluginsekten durch Windrotoren kurz vor Abschluss ihres Reproduktionszyklus

wird auf etwa 100.000 Tonnen oder 100 Billionen Individuen pro Jahr geschätzt. Diese Größenordnung ist nicht zu vernachlässigen, insbesondere wenn man bedenkt, dass männliche Insekten in der Regel Hunderte von Eiern ablegen, die zusammen mit ihnen verloren gehen, wodurch die Stabilität der nächsten Generation möglicherweise nicht gesichert ist.

Über Schäden an Windkraftanlagen durch fliegende Insekten wird seit den Anfängen der Windkraftindustrie berichtet [32,36,40,42,46]. Seitdem haben intensive Bemühungen zur Vermeidung von Insektenerosion und Verschmutzung der Rotorblätter das Problem des Insektenaufpralls für die Windindustrie gelöst, nicht aber für die Insekten. Auf den ersten Blick scheinen Maßnahmen zum Schutz von Insekten vor Impingement machbar und erschwinglich zu sein, und die damit verbundenen Verluste an Windenergie scheinen akzeptabel zu sein. Wir kommen zu dem Schluss, dass eine internationale Energiepolitik und Umweltschutznormen verabschiedet werden sollten, um die Auswirkungen der Windenergieerzeugung auf Fluginsektenpopulationen zu verstehen und zu mindern.

Es gibt eine Reihe offener Fragen im Zusammenhang mit dem Aufprall von Insekten in Windparks:

- Welche politischen und technischen Maßnahmen sind erforderlich, um mit der Erforschung der Wechselwirkung zwischen Insektenmigration und Windenergieerzeugung zu beginnen?
- Welche politischen und technischen Maßnahmen sind erforderlich, um Insektenverluste in Windparks zu erkennen, zu quantifizieren und abzumildern?
- Welche Politiken und Maßnahmen sind erforderlich, um den Nachweis der Verträglichkeit von Windparks und Fluginsekten zu ermitteln und umzusetzen?
- Welche politischen, technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen hat der Insektenschutz auf die Windkraftindustrie?

### 3. Auswirkungen auf Luftgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchtigkeit und Niederschlag

Die strömungsdynamischen Auswirkungen von Windkraftanlagen auf das Strömungsfeld in der turbulenten atmosphärischen Grenzschicht sind im Prinzip gut bekannt. Windkraftanlagen entziehen der atmosphärischen Strömung kinetische Energie. Der Einfluss von einzelnen Rotoren und Windparks auf das Strömungsfeld betrifft sowohl die mittlere Strömung als auch die turbulenten Fluktuationen. Windparks erhöhen die effektive Oberflächenrauigkeit des Bodens und führen zu einer Umverteilung der mittleren Strömung. Insbesondere erzeugen sie eine Aufwärtsströmung (sog. Konvergenzzonen) stromaufwärts und eine Abwärtsströmung (sog. Divergenzzonen) stromabwärts der Windparks [49]. Außerdem erzeugen die Rotorblätter zusätzliche turbulente Fluktuationen, die sich stromabwärts ausbreiten und die turbulente kinetische Energie pro Volumeneinheit verstärken. Der Zusammenhang zwischen den strömungsdynamischen Mechanismen und den potenziellen sozialen Kosten ist in Tabelle 1 zusammengefasst, die als Leitfaden für die Diskussion in diesem Abschnitt dienen soll. Trotz neuerer Erkenntnisse [50], dass Windparks auch die unterirdische Strömung im Meer beeinflussen, die Temperatur- und Salzgehaltsverteilung verändern und potenzielle Auswirkungen auf marine Ökosystemprozesse haben, wird dieser Aspekt in der vorliegenden Übersicht nicht behandelt.

**Tabelle 1.** Zusammenfassung der dynamischen Mechanismen der Flüssigkeiten und ihrer Nebenwirkungen und sozialen Kosten.

MechanismusSeiteneffekte und soziale Kosten	
Umverteilung der räumlich-zeitlichen Struktur von das Luftgeschwindigkeitsfeld	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veränderung von Leistung und Wirtschaft</li> </ul>
Umverteilung der räumlich-zeitlichen Struktur des Temperaturfeldes	Umverteilung der räumlich-zeitlichen

- 
- Veränderung der Erosionsmuster des Bodens
  - Einfluss auf das Wachstum der Pflanzen und den landwirtschaftlichen Ertrag
  - Auswirkung auf die Tierpopulation
  - Einfluss auf das Wachstum der Pflanzen und den landwirtschaftlichen Ertrag
  - Beeinflussung des Verhaltens von Tieren
  - Einfluss auf die Erosionsmuster des Bodens
- 

Auf den Längenskalen der einzelnen Windparks verhält sich das Temperaturfeld wie ein passiver Skalar, d.h. das Temperaturfeld wird von der turbulenten atmosphärischen Strömung fortgetragen. Die Veränderung des Strömungsfeldes durch die Anwesenheit eines Windparks führt zu einer Umverteilung der

Temperaturfeld als Ergebnis der vertikalen Durchmischung. Das veränderte Temperaturfeld führt auch zu einer Umverteilung der Feuchtigkeit und kann sich auf den Niederschlag auswirken.

Bevor ein Überblick über die einschlägige Literatur gegeben wird, ist es sinnvoll, die Größenordnung der vorliegenden Strömungsphänomene anhand einer einfachen Rückrechnung für den Sonderfall Deutschland zu verdeutlichen. Ausgehend von der in Deutschland installierten Windleistung von 56 Gigawatt, einem geschätzten jährlichen Luftstrom von  $8 \times 10^6$  km<sup>3</sup> durch die deutschen Windkraftanlagen und geschätzten 1000 Volllaststunden können wir die Zahlen hochskalieren, um den globalen jährlichen Luftstrom durch alle Windkraftanlagen zu erhalten (siehe Abschnitt 2). Geht man von einer weltweit installierten Windleistung von 750 Gigawatt und 2000 Volllaststunden aus, ergibt sich ein Durchsatz von 215 Millionen Kubikkilometern Luft pro Jahr. Da die Landoberfläche der Erde etwa 150 Millionen Quadratkilometer groß ist, würde dieses Volumen eine Oberflächenschicht von 1,5 km Höhe einnehmen.

Für den folgenden Überblick über die vorhandene Literatur auf diesem Gebiet unterteilen wir die Diskussion in Beobachtungen und Simulationen.

### 3.1. Beobachtungsstudien

Beobachtungen sind weit weniger zahlreich als Simulationen. Die Autoren von ref. [49] analysierten die Windgeschwindigkeit und den Niederschlag stromaufwärts und stromabwärts von zwei Windparks im Vereinigten Königreich, nämlich dem Walney-Windpark für den Zeitraum von 1995 bis 2018 und dem Crosby-Windpark von 1997 bis 2018. Die Autoren verglichen die Daten auch mit einem Kontrollstandort in Saint Bees und zeigten, dass die Windgeschwindigkeit um etwa 8 Prozent und der Niederschlag um etwa 10 Prozent abnimmt. In dieser Studie wurde jedoch nicht untersucht, wie sich solche Änderungen der Windgeschwindigkeit möglicherweise auf benachbarte Windparks auswirken oder wie sie die landwirtschaftlichen Erträge verändern würden. Roy und Traiteur [51] untersuchten Temperaturdaten in der Nähe eines Windparks in Texas und verglichen die Ergebnisse mit 306 Simulationen. Sie wiesen nach, dass der Windpark die Oberflächentemperatur nachts erwärmt und tagsüber abkühlt, was hauptsächlich auf die turbulente vertikale Durchmischung in der atmosphärischen Grenzschicht zurückzuführen ist. Sie erwähnten, dass sich die Auswirkungen wahrscheinlich auf die landwirtschaftlichen Praktiken auswirken", versuchten jedoch nicht, diese zu quantifizieren. Zhou [52] analysierte Satellitendaten von Windparks aus einem Bildspektrometer mit mittlerer Auflösung (MODIS) in West-Zentraltexas zwischen 2003 und 2011. Es wurde eine Erwärmung von bis zu 0,72 K pro Jahrzehnt, insbesondere nachts, nachgewiesen. Bei unserer Literaturrecherche haben wir einen auffälligen Mangel an experimentellen Daten außerhalb Europas und Nordamerikas festgestellt. Insbesondere fanden wir keine experimentellen Daten für Südamerika, trotz seines attraktiven Windenergiepotenzials. Auch für Afrika, Asien und Australien haben wir keine Daten gefunden. Unter Bezugnahme auf unsere Diskussion über den gewünschten zukünftigen Forschungsbedarf in Abschnitt 6 besteht ein dringender Bedarf an Beobachtungsdaten, sowohl bodengestützt als auch von Satelliten, für diese drei Kontinente.

### 3.2. Simulation Studien

Die Literatur zu Simulationsstudien ist umfangreicher als die zu Beobachtungen. Fiedler und Bukovsky [53] stellten fest, dass "das Vorhandensein eines riesigen oder kleinen Windparks im Mittleren Westen einen enormen Einfluss auf das Wetter und die Niederschlagsmenge in einer Saison haben kann, was mit der bekannten Empfindlichkeit langfristiger Wettervorhersagen gegenüber den Ausgangsbedingungen übereinstimmt". Die von Miller und Keith [54] durchgeführten Simulationen haben mit Hilfe numerischer Simulationen gezeigt, dass die Deckung des US-Strombedarfs durch Windenergie zu einem Anstieg der Oberflächentemperaturen in den USA um 0,24 K führen würde. Unter Verwendung eines hochauflösenden regionalen Klimamodells mit implementierten Windparkparametrisierungen zeigten Akhtar et al. [55], dass das jährliche mittlere Windgeschwindigkeitsdefizit innerhalb eines Windparks bis zu 2-

2,5 m/s, abhängig von der Geometrie des Windparks.

Bichet et al. [56] untersuchten den Windstillstand mit Hilfe eines globalen atmosphärischen Klimamodells und untersuchten Änderungen der Rauigkeitslänge, der Aerosolemissionen, der Meeresoberflächentemperatur und der Treibhausgaskonzentrationen in Verbindung mit Änderungen der Oberflächenwindgeschwindigkeit. Die vom Modell simulierten Windgeschwindigkeitstrends unterschätzen im Allgemeinen die beobachteten Trends (Land und Ozean), bestätigten aber den Windstille-Effekt. Huang et al. [57] simulierten das Klima



Auswirkungen von Windparks in China unter verschiedenen Einsatzszenarien. Sie zeigten, dass die Strömung über relativ großen Windparks eine regionale Erwärmung mit einem Maximum von mehr als 0,8 K in Nordchina verursachen könnte. In einer Simulationsstudie von Keith et al. [58] wurde festgestellt, dass groß angelegte Windkraftanlagen das Klima verändern können, wobei der Temperaturanstieg weniger als 0,5 K betrug. In keiner der oben genannten Studien wurden die mit diesen Veränderungen verbundenen sozialen Kosten untersucht, die in erster Linie offene Fragen bleiben.

### 3.3. Offene Fragen

Um unser Verständnis zu verbessern, haben wir die folgenden Forschungsfragen ermittelt:

- (1) Wie wirkt sich eine Umverteilung des Geschwindigkeitsfeldes, wie sie in Beobachtungen [50] und Simulationen [55] festgestellt wurde, auf die Wirtschaftlichkeit der angrenzenden Windparks aus (Verschlechterung der Stromerzeugung und erhöhte OPEX-Kosten), und wie hoch sind die sozialen Kosten der verstärkten Erosion?
- (2) Wie wirkt sich eine Umverteilung der Temperaturverteilung, wie sie in Beobachtungen [51,52] und Simulationen [54] festgestellt wurde, auf den Ertrag landwirtschaftlicher Tätigkeiten in der Nähe von Windparks aus, und wie wirkt sie sich auf Tiere aus?
- (3) Wie hoch sind die sozialen Kosten eines veränderten Feuchtigkeits- und Niederschlagsmusters (z. B. [51,52]), die sich in veränderten landwirtschaftlichen Erträgen, verändertem Verhalten von Tieren und Bodenerosion ausdrücken?
- (4) Wie kann eine Kombination aus globalen (vgl. [56] und [58]) und regionalen Simulationen (vgl. [53]) unser Verständnis des regionalen Klimas unter dem Einfluss von Windparks verbessern?
- (5) Wie kann eine multikriterielle Optimierung mit einer ähnlichen Methodik wie in [59- 61] angewandt werden, um Windenergiestandorte mit maximalem Ertrag und minimalen negativen Auswirkungen zu identifizieren?

Zur Beantwortung dieser Fragen ist es notwendig, die Beobachtungsbasis deutlich zu erweitern (z.B. [49]) und Simulationen der thermischen Fluidodynamik mit ökonomischen Bewertungsmodellen zu koppeln. Darüber hinaus sind zusätzliche Beobachtungen erforderlich, die gleichzeitige Messungen von Windgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchtigkeit und Niederschlag über lange Zeiträume umfassen.

Bevor wir mit dem nächsten Abschnitt fortfahren, scheint es angebracht, kurz auf das Phänomen der Windstille einzugehen. Terrestrischer Windstillstand (TS) bezeichnet den Rückgang der Windgeschwindigkeit über Land in den letzten Jahrzehnten [62,63]. Obwohl die Gründe für TS nicht vollständig geklärt sind, weist es einige Ähnlichkeiten mit den hier behandelten Phänomenen auf. Insbesondere die Auswirkungen von TS, einschließlich der sozialen Kosten, die mit dem Einfluss auf landwirtschaftliche Erträge und Bodenerosion verbunden sind, ähneln dem vorliegenden Thema.

## 4. Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit durch Schall und Infraschall

### 4.1. Lärmcharakteristiken von Windturbinen

Der Ausbau der Windenergie, insbesondere an Land, wurde auch im Zusammenhang mit möglichen gesundheitlichen Bedenken für den Menschen diskutiert. In diesem Zusammenhang wurden mehrere Punkte angesprochen, aber das Hauptproblem ist die Lärmbelastung, insbesondere die Belastung durch Niederfrequenz- und Infraschall.

Der Schall von Windkraftanlagen hat mehrere besondere Eigenschaften. Er kann sich relativ frei ausbreiten, da er in größerer Höhe als die umgebenden Hindernisse erzeugt wird. Der Schall von Windkraftanlagen umfasst niederfrequente (20-200 Hz) und Infraschallwellen (unter 20 Hz), die aufgrund der Absorption durch die Atmosphäre praktisch keine Dämpfung aufweisen, während natürliche oder gebaute Strukturen im Vergleich zu Wellen mit höheren Frequenzen einen viel geringeren Einfluss auf ihre Ausbreitung haben. Bei großen Entfernungen nimmt der langwellige Schall fast ausschließlich nach geometrischen Prinzipien ab; bei einer Verdopplung der Entfernung wird die Schallenergie auf die vierfache Fläche verteilt (und damit verdünnt). Entsprechend sinkt der Geräuschpegel um sechs Dezibel (dB). Der Lärm von Windkraftanlagen wird in der Nacht nicht gedämpft, im Gegensatz z. B. zu Verkehrslärm. Die Geräuschemission von Windkraftanlagen hängt hauptsächlich von den Windverhältnissen ab (ohne Berücksichtigung der in [64] ausführlich erörterten Auswirkung der Eisbildung auf den Rotorblättern). Unter ähnlichen Wetterbedingungen bleibt die Geräuschemission unabhängig von der Jahreszeit gleich. Darüber hinaus ist der von der Blattrotation ausgehende Schall regelmäßig variierend/intermittierend und wird typischerweise als ausgeprägtes Rauschen oder Klopfen beschrieben. Weitere Einzelheiten sind in [65,66] zu finden.

### 4.2. Schallemissionen von Windturbinen

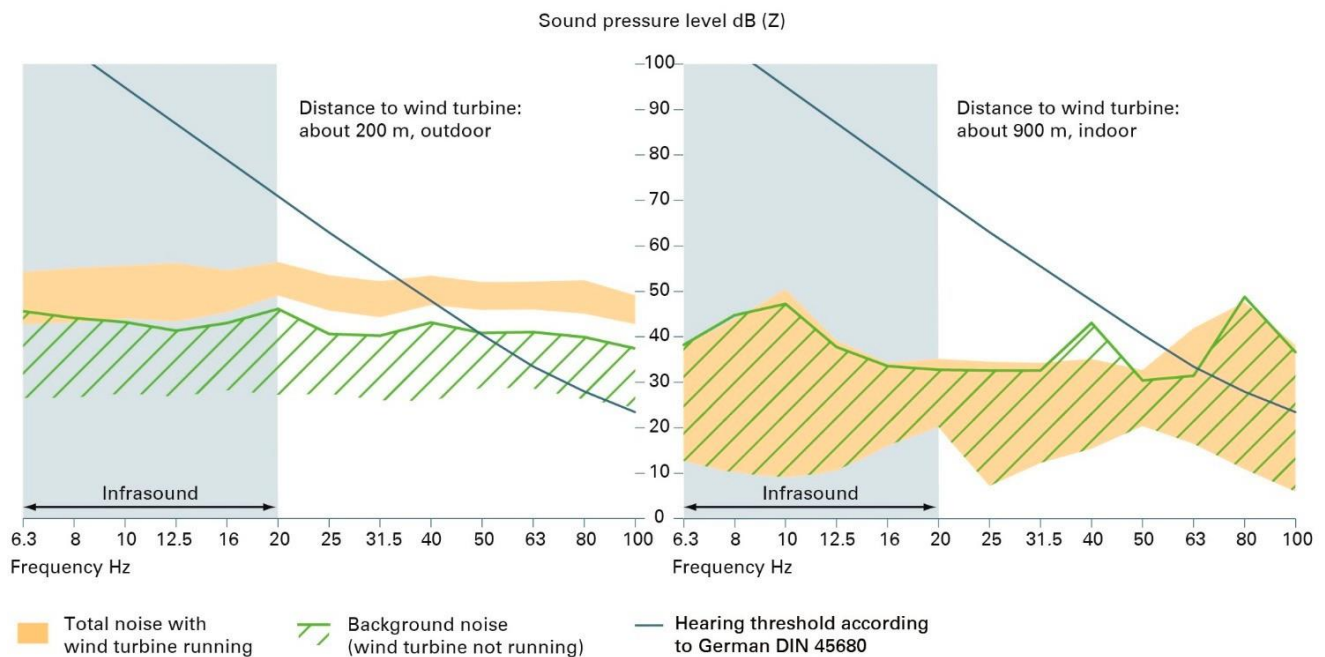
Die Schallemission von Windturbinen ist nicht einfach zu messen, insbesondere bei größeren Abständen, da die gemessenen Geräuschpegel durch Umweltbedingungen und andere Geräusche beeinflusst/verändert werden. Es liegen jedoch einige aufschlussreiche Daten aus einem umfangreichen, von der Regierung in Auftrag gegebenen Projekt in Finnland vor. Ein Teil bezieht sich auf Schallmessungen in Innenräumen, die in der Nähe von zwei Windturbinenstandorten durchgeführt wurden [65]. Die Ergebnisse waren eindeutig: Die unbewerteten äquivalenten Dauerschallpegel in Häusern in der Nähe von Windkraftanlagen waren etwa 20 dB höher als bei früheren Langzeitmessungen in natürlichen Gebieten (die Entfernung zu Windparks betrug etwa 1,5 km, aber die Parks waren mit 17 Windkraftanlagen sehr groß) [65]. Nach den äquivalenten Dauerschallpegeln lagen die wichtigsten Frequenzen unter 1 Hz und Frequenzen unter 2 Hz, wenn die höchsten äquivalenten Pegel betrachtet werden, mit Werten bis zu  $L_{Z,max} = 93$  dB bzw.  $L_{Z,max} = 97$  dB an den beiden Standorten [65], um eine vollständige Übersicht zu erhalten.

Die bewusste Hörschwelle für den Infraschallbereich beginnt bei etwa 80 dB und reicht bei niedrigeren Frequenzen bis über 100 dB. Die Schwellenwerte für eine mögliche Gesundheitsgefährdung liegen jedoch deutlich niedriger [67], wobei die schwedische EPA (Natur- värdsverket) in ihren Lärmpegelrichtlinien vorschlägt, dass der äquivalente (A-bewertete) Lärmpegel in Wohnhäusern 40 dB(A) nicht überschreiten darf. Was die höheren Hörschwellen betrifft, so zeigen die Messungen aus Finnland, dass Infraschall stark genug ist, um diese Schwellen zu erreichen oder sogar zu überschreiten.

Messungen staatlicher Einrichtungen in Bayern, Deutschland, weisen in eine ähnliche Richtung [68]. Obwohl sie im Allgemeinen unterhalb der Hörschwelle liegen, waren tieffrequente und Infraschallgeräusche von Windenergieanlagen bei Messungen in 200 m Entfernung von modernen Windenergieanlagen (Höhe von 40 m und 2300 oder 2400 KW) deutlich über dem Hintergrundpegel zu erkennen [68]. In einer Entfernung von 900 m ist der Unterschied zum Hintergrund nicht mehr deutlich zu erkennen. Es ist anzumerken, dass der Pegel der niedrigsten gemessenen Infraschallfrequenzen in relativ geringer Entfernung deutlich über 35 oder 40 db liegt und sogar 50 dB überschreitet [68].

---

Dieses wichtige Ergebnis ist in Abbildung 3 wiedergegeben [68].



**Abbildung 3.** Emissionsmessungen von staatlichen Einrichtungen in Bayern, Deutschland, für eine 2-3-MW-Windkraftanlage in unmittelbarer Nähe im Freien und in einiger Entfernung in Innenräumen. Die grau schattierte Frequenz zeigt den Infraschallanteil an. Die Messungen wurden bei mittelstarkem Wind von 8 bis 13 m/s durchgeführt. Das Geräusch der Windkraftanlage ist im Freien in unmittelbarer Nähe deutlich vom Hintergrund zu unterscheiden, in größeren Entfernungen in Innenräumen jedoch nicht. Alle Infraschallkomponenten liegen deutlich unter den Hör- und Wahrnehmungspegeln nach der deutschen DIN, wie angegeben (Mit Genehmigung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, Nadeeka Pinto, die Daten und die Abbildung wurden in Ref. [68], S. 8 des pdf). Das schwedische Umweltbundesamt setzt jedoch den Schwellenwert für Anwohner auf 40 dB fest.

Ein unabhängiger Bericht aus Taiwan enthält ebenfalls Daten über Messungen des niederfrequenten Lärms (LFN) sowohl in Häusern als auch im Freien in der Nähe von Windkraftanlagen [69]. Die Messungen ergaben erhebliche LFN-Pegel. Die durchschnittlichen LFN-Pegel in Innenräumen lagen nachts in vier der sieben überwachten Haushalte über 30 dB (LAeq) (die gemessenen Häuser befanden sich in einer Entfernung von 290-330 m von der nächsten Windkraftanlage) [69]. Die Untersuchung ergab einen deutlichen Einfluss der Entfernung zu den Windrädern, der verwendeten Baumaterialien und der Art der eingebauten Fenster und ob diese geöffnet oder geschlossen sind, auf die LFN [69].

#### 4.3. Experimentelle Beweise für mögliche physiologische und psychologische Auswirkungen

Mögliche physiologische und psychologische Wirkungen von Niederfrequenz- und Infraschallexposition beim Menschen wurden in Audiokammern und in Freilandexperimenten gemessen, z. B. [65,66]. Die bereits erwähnte, von der Regierung initiierte Untersuchung in Finnland beinhaltet eine vollständige Teilstudie zu kontrollierten Infraschall-Expositionsuntersuchungen ("Provokationsexperimente") mit Freiwilligen unter Verwendung einer Audiokammer, die ebenfalls separat veröffentlicht wurde [70].

In einem Experiment wurde die Belästigung in Abhängigkeit von verschiedenen Merkmalen des Windturbinengeräusches, d.h. Vorhandensein von Infraschall, Pegel der Amplitudenmodulation und Aufnahmeort, untersucht. Das Vorhandensein von Infraschall hatte keinen systematischen Einfluss auf die bewertete Belästigung; die Bewertungen waren mit und ohne Infraschall sehr ähnlich. Es wurde jedoch eine Auswirkung des Aufnahmeortes und der Amplitudenmodulation (AM) festgestellt; Stimuli von Windkraftanlagen wurden als störender empfunden als Stimuli von Höfen, und Stimuli mit maximaler AM wurden als störender empfunden als Stimuli mit minimaler AM [70].

Neben indirekten Messungen mit Hilfe von Schallkammern können auch direkte Messungen der Auswirkungen auf den Menschen durch tatsächlich in Betrieb befindliche Windkraftanlagen durchgeführt werden. In einer kürzlich veröffentlichten Felduntersuchung aus Taiwan wurden Veränderungen der Herzfrequenzvariationen (HRVS) von rekrutierten Probanden gemessen, während gleichzeitig Messungen von tieffrequentem Lärm (LFN) an zwei festgelegten Standorten mit einem Interventionsdesign durchgeführt wurden [69]. Die Ergebnisse zeigten einen signifikanten Zusammenhang zwischen der LFN-Exposition und den Veränderungen der HRV, insbesondere in Bezug auf den SDNN-Parameter (Standardabweichung aller normalen bis normalen R-R-Intervalle), was auf mögliche gesundheitliche Auswirkungen der LFN-Exposition hinweist [69].

#### 4.4. Reale Beweise für mögliche gesundheitliche Auswirkungen

Was die dritte Dimension der realen Belege für mögliche gesundheitliche Auswirkungen betrifft, so kann man mit Fug und Recht behaupten, dass die verfügbaren Daten umfangreich sind. Es wird erwartet, dass mit der zunehmenden Installation von Windturbinen zusätzliche Daten in erheblichem Umfang zur Verfügung stehen werden. Eine Zusammenfassung ist in [67,71,72] zu finden.

Was die Prävalenz der Symptome betrifft, so weisen die kürzlich in Deutschland und Finnland erhobenen Daten in eine klare Richtung. Die Prävalenz der gemeldeten Symptome scheint hoch zu sein, wie z. B. die Daten aus Finnland zeigen.

In der finnischen VNTEAS-Studie wurde eine Erhebungsstrategie festgelegt, um die Teilnahme von Einwohnern in Gebieten zu ermöglichen, die zuvor als die Gebiete mit den wahrscheinlichsten Symptomen identifiziert wurden, die intuitiv mit dem Infraschall von Windkraftanlagen in Verbindung gebracht werden [65]. Ein selbstverwalteter Fragebogen wurde im April 2019 an alle Personen in der Stichprobe ( $n = 4\ 847$ ) versandt, und im Juni 2019 wurde ein Erinnerungsschreiben an nicht antwortende Personen ( $n = 3\ 986$ ) verschickt. Nach dem ersten Versand lag die Rücklaufquote bei 18 % und die endgültige Rücklaufquote bei 28 % ( $n = 1\ 351$ ). Insgesamt 5 % aller Befragten (70 Personen) berichteten über Symptome, die sie intuitiv mit dem Infraschall von Windkraftanlagen in Verbindung brachten (im Bericht als "symptomatische Befragte" bezeichnet). In der nächstgelegenen Zone lag die Prävalenz bei 15% (34 Personen). Von den symptomatischen Befragten berichteten 49 % (34 Personen) über Ohrensymptome (z. B. Druckgefühl im Ohr oder Tinnitus), 45 % (32 Personen) über Schlafstörungen, 26 % (18 Personen) über Herzsymptome (z. B. Herzrhythmusstörungen), 24 % (17 Personen) über Kopfschmerzen; 21 % (15 Personen) berichteten über Schwindel, 13 % (9 Personen) über Angstzustände, 9 % (6 Personen) über Müdigkeit, Bluthochdruck oder Gelenk- und andere Schmerzen und 7 % (5 Personen) über Übelkeit oder Konzentrationsschwierigkeiten (Daten hier nicht dargestellt) [65]. Ähnliche Ergebnisse wurden in einer in Deutschland durchgeführten Umfrage berichtet [66].

Selbst wenn man einräumt, dass die genauen Mechanismen und Dosis-Wirkungs-Korrelationen noch nicht vollständig geklärt sind, und in Anbetracht der eher niedrigen Barrieren in den Erhebungen, scheint es doch weit hergeholt, alle diese Berichte einem Nocebo-Effekt zuzuschreiben, wie in einem Hypothesenpapier von Crichton et al. aus dem Jahr 2014 [73].

Nimmt man alle vorhandenen Daten zusammen, scheint sich ein Muster herauszukristallisieren - ein umfassender Überblick über die Literatur zu gesundheitlichen Auswirkungen von Windenergieanlagen, den Schmidt und Klokner 2014 im Auftrag des Schweizer Bundesamts für Umwelt veröffentlicht haben, sieht folgendermaßen aus [67]:

"Gegenwärtig scheint es vernünftig zu sein, den Schluss zu ziehen, dass der Lärm von Windturbinen das Risiko von Belästigung und Schlafstörungen bei exponierten Personen in einer Dosis-Wirkungs-Beziehung erhöht. Es scheint eine tolerierbare Grenze von etwa 35 dB LAeq zu geben". Die Ungewissheit über die genauen Schlussfolgerungen, die daraus zu ziehen sind, ist jedoch spürbar: "Diese Schlussfolgerungen werden jedoch durch ein potenzielles Risiko für Selektions- und

Informationsverzerrungen beeinträchtigt, selbst bei den größeren Querschnittsstudien, die derzeit die besten Beweise liefern.

In einem Ende August 2021 veröffentlichten "Update" einer von der niederländischen Regierung in Auftrag gegebenen Studie wird dieser Punkt in einem wichtigen Absatz bekräftigt, aber auch mit einem Vorbehalt versehen: "Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass tieffrequente Geräusche Teil des Gesamtgeräuschs von Windturbinen sind und die gleichen Auswirkungen haben wie normaler Schall; sie können lästig sein und Auswirkungen auf den Schlaf haben, und wenn sie chronisch sind, können sie zu weiteren gesundheitlichen Auswirkungen führen" [72].

#### 4.5. Offene Fragen und ein möglicher Weg nach vorn

Was die Frage nach möglichen gesundheitlichen Problemen für Menschen und Windkraftanlagen betrifft, insbesondere im Hinblick auf Schall und Infraschall, so scheint die Hauptfrage nicht zu sein, "ob" - die Wirkung ist real. Die Schall- und Infraschallemissionen von Windkraftanlagen und Windparks sind Phänomene, die zu gesundheitlichen Bedenken führen. Die Schlüsselfrage lautet: Was ist der beste regulatorische Weg?

Im Jahr 2014 kamen Schmidt und Klokke zu dem Schluss, dass "es (...) vernünftig erscheint, zu dem Schluss zu kommen, dass bei der Planung zukünftiger Windparks ein vorsichtiger Ansatz erforderlich ist. Darüber hinaus gibt es Hinweise darauf, dass Lärmbelastigung und Schlafstörungen miteinander zusammenhängen und dass ein gestörter Schlaf möglicherweise zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen kann" [67].

Die Frage, welche Art von Regulierungsrahmen und -standards angemessen sind, ist derzeit noch nicht vollständig geklärt, und die Antwort wird sich wahrscheinlich in jedem größeren betroffenen Land weltweit leicht unterscheiden. Eine ähnliche Herausforderung stellt sich jedoch wahrscheinlich in allen Kontinenten: Die Festlegung robuster und pragmatischer Rahmenbedingungen scheint notwendig zu sein, um einen weiteren akzeptablen Ausbau von Windenergieanlagen zu ermöglichen. Der Regelungsrahmen sollte sich nicht nur auf die Entfernung zu bewohnten Gebieten beziehen, sondern auch auf das Design und die Merkmale der eigentlichen Turbinen sowie möglicherweise auf die Betriebszeiten. Lärmgrenzwerte sind ein offensichtlicher Schlüsselbegriff. Einfach zu behaupten, dass Windturbinen Infraschall unterhalb der Hörschwelle emittieren, erscheint zu simpel; der vom schwedischen Umweltbundesamt festgelegte viel niedrigere Schwellenwert von 40 dB scheint angemessener zu sein. Detailliertere Messungen könnten jedoch von Nutzen sein.

Die sozialen Kosten der zunehmenden Gesundheitsprobleme in Regionen, die stark vom Ausbau der Windenergie betroffen sind, sind ein weiterer wichtiger Bereich für künftige Forschungen. Dies scheint derzeit noch nicht ausreichend erforscht zu sein.

Ein interessanter Vorschlag ging aus der Arbeit des unabhängigen wissenschaftlichen Ausschusses für Windkraftanlagen der australischen Regierung hervor, der die Aufgabe hatte, den Ansatz zur Bestimmung des Mindestabstands von Windkraftanlagen zu lärmsensiblen Empfängern und deren Management zu optimieren [6]. In einer im Juni 2020 veröffentlichten Zusammenfassung schlug das Komitee vor, dass die "Belastigung" das primäre Maß für die Festlegung von Grenzwerten für den Lärm von Windkraftanlagen sein sollte. Ihrer Ansicht nach ist der angemessene Grenzwert ein Wert, der sicherstellt, dass nicht mehr als 10 % der Bevölkerung stark belästigt werden, wenn sie dem Lärm ausgesetzt sind. Dieser Grenzwert scheint zwischen 34-40 dB LAeq (10 min) außerhalb von Wohngebieten zu liegen, mit einem Mittelwert von 37 dB LAeq (10 min) [6]. Sollte dieser innovative Ansatz umgesetzt werden, was wünschenswert erscheint, ist eine begleitende Forschung erforderlich.

Weitere Forschungsarbeiten sind erforderlich, um die folgenden Kernpunkte zu vertiefen und zu verbessern:

- Definition und Verfeinerung von gesundheitsrelevanten Infraschall-Schwellenwerten, um datenbasierte Regeln für die Abstände zwischen Windparks und Wohngebieten zu erstellen;
- Soziale Kosten von Gesundheitsproblemen in Regionen, die stark von Windparks betroffen sind; und
- Realitätsprüfung des innovativen australischen Vorschlags zur Festlegung von Regulierungsrahmen auf der Grundlage des Ziels, unter einer Schwelle für "hochgradig verärgerte Einwohner" zu bleiben.

#### 5. Diskussion und Bezug zu bestehenden Entwicklungs- und Standortauswahlkriterien

Die Nebenwirkungen der Windenergie sollten Teil der Entwicklungs- und Standortauswahlkriterien sein. Es gibt bereits eine umfangreiche Literatur zu diesem Thema, z. B. Fallstudien zu Standortauswahlkriterien für Offshore-Windparks [61] sowie

für Onshore-Projekte [59]. Die Autoren haben die Literatur systematisch durchsucht und ausgewertet, um eine taxo- nomische Übersicht zu diesem Thema zu erstellen [60].

Es überrascht nicht, dass die in Abschnitt 4 beschriebenen Auswirkungen auf den Standort (potenzielle Auswirkungen auf die Gesundheit) bereits in gewissem Maße in den Kriterien für die Standortwahl enthalten sind, und zwar sowohl direkt (z. B. Entfernung zu Städten) als auch indirekt (z. B. Entfernung zu Stromleitungen und anderen Infrastrukturen im Zusammenhang mit menschlichen Siedlungen).

Die Auswirkungen auf Flora und Fauna sind derzeit auch Teil der Diskussion über die Kriterien für die Standortwahl, wobei Vögel und Meeresarten ausdrücklich erwähnt werden.



über wandernde Insekten scheint derzeit nicht in Betracht gezogen zu werden. In keinem der drei oben erwähnten Beispiele kommt das Wort "Insekten" vor.

Drittens: Während Klimafaktoren, die die Leistung und den Ertrag und damit die wirtschaftliche Bewertung der geplanten Windparks beeinflussen, bei den Kriterien für die Standortwahl ausgiebig erörtert werden, scheint die Frage der möglichen Auswirkungen von Windparks auf das lokale Wetter und Klima nicht berücksichtigt zu werden. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da die generelle Richtung wahrscheinlich durch einen politischen Rahmen vorgegeben werden muss, da das Anliegen über einzelne Windparks hinausgeht und z.B. durch eine Begrenzung der Windparkdichte in bestimmten Regionen erreicht werden könnte, wie in [57] vorgeschlagen. Eine Änderung des politischregulatorischen Rahmens würde die Kriterien für die Standortwahl direkt beeinflussen. Gil-Garcia zum Beispiel listet in Tabelle 6 ihrer systematischen Übersichtsarbeit [60] eine ganze Reihe von Kriterien der "politischen Kategorie" auf.

## 6. Zusammenfassung und politische Implikationen

Die vorliegende Arbeit stellt eine Überprüfung von drei unerwünschten Nebenwirkungen der Windenergieerzeugung dar, die ein potenzielles Risiko für die Tierwelt, die lokale Umwelt und die menschliche Gesundheit darstellen könnten, aber bisher nicht angemessen behandelt wurden.

Da die Energiepolitik bisher keinen befriedigenden Nachweis über die Verträglichkeit der Windenergie mit diesen drei Nebeneffekten verlangt hat, bleiben die Größenordnung und die mögliche Bedeutung ihrer Auswirkungen unbekannt, und es kann noch lange dauern, bis mögliche und vielleicht notwendige Maßnahmen zur Abschwächung realisiert werden.

Die Literatur bestätigt die Übereinstimmung von Insektenwanderung und Rotorblättern sowohl in Bezug auf die Höhe über dem Boden als auch in Bezug auf die geografische Verteilung, was auf die Motivation sowohl der Insekten als auch der Windkraftentwickler zurückzuführen ist, starke Winde für ihre Zwecke zu nutzen. Schäden an Insekten, die Rotoren kreuzen, sind eine unbestreitbare Tatsache, und ihre Größenordnung wird auf einen jährlichen Verlust von etwa 100.000 Tonnen oder 100 Billionen Individuen pro Jahr geschätzt. Die damit zusammenhängende offene Frage ist, ob dieser vereinfacht geschätzte Betrag per se vernachlässigbar ist und ob er weitere Untersuchungen und damit verbundene politische Anreize zum Schutz rückläufiger Arten rechtfertigt.

Jüngste theoretische Arbeiten haben mehrere Fragen zu den Auswirkungen von Windparks auf lokale Wettermuster und die Bodenstruktur aufgeworfen und Hinweise auf Veränderungen der durchschnittlichen Luftgeschwindigkeit, der Temperatur, der Feuchtigkeit und des Niederschlags geliefert, die Auswirkungen auf die Tierwelt und die Landwirtschaft haben könnten.

Schließlich kann der von Windenergieanlagen während des Betriebs emittierte Schall und Infraschall die Menschen und möglicherweise auch die in ihrer Nähe lebenden Tiere erheblich belästigen, insbesondere wenn im Laufe der Jahre messbare gesundheitliche Auswirkungen auftreten.

In Anbetracht der Tatsache, dass der jährliche Volumenstrom durch den heutigen globalen Windpark einer Luftsäule von 1,5 km über der gesamten Landoberfläche des Planeten entspricht, und in Anbetracht der Größe und Geschwindigkeit der Rotorblätter, die im Lebensraum vieler Arten, einschließlich des Menschen, eingesetzt werden, sind wir der Ansicht, dass den drei unerwünschten Auswirkungen und möglichen Abhilfemaßnahmen, die in dem vorliegenden Papier erörtert werden, zusätzliche Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Außerdem sollten die damit verbundenen offenen Fragen rechtzeitig beantwortet werden.

Nach der Beantwortung dieser Fragen muss eine umfassende Methodik entwickelt werden, die sich an den in [59,60,74] skizzierten Verfahren der multikriteriellen Optimierung orientiert, um Standortentscheidungen für künftige Windparks auf eine maximale energetische Effizienz und möglichst geringe Nebenwirkungen zu stützen.

**Beiträge der Autoren:** Beide Autoren (A.D.T., P.L.) trugen gleichermaßen zur Konzeptualisierung,

Literaturrecherche, Analyse, dem Schreiben, der Überprüfung und dem Redigieren der Arbeit bei. Alle Autoren haben die veröffentlichte Version des Manuskripts gelesen und ihr zugestimmt.

**Finanzierung:** Diese Forschung erhielt keine externen

Mittel. **Stellungnahme des Institutional Review Board:**

Nicht zutreffend. **Erklärung zur informierten**

**Zustimmung:** Nicht zutreffend.

**Erklärung zur Datenverfügbarkeit:** Nicht anwendbar.

**Danksagung:** Die Autoren danken Franz Trieb für aufschlussreiche Diskussionen und für die freundliche Genehmigung, veröffentlichtes und unveröffentlichtes Material aus seiner Forschung für Abschnitt 2 zu verwenden.

**Interessenkonflikte:** Die Autoren erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

### Abkürzungen

AM Amplitudenmodulation

DIN Deutsche Industrie Norm (Deutsche Industrie Norm)

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

EPA Umweltschutzbehörde FBL

Fluggrenzschicht von Fluginsekten

FlyWiP Interference of Flying Insects and Wind Parks (Titel der

Studie) HRV Heart rate variation

LAeq Äquivalenter Schalldruckpegel (A-bewertet)

LFN Niederfrequentes Geräusch

LIDAR Light detection and ranging remote sensing

technology LZ/LZ<sub>max</sub> (Maximum) unbewerteter äquivalenter

Schalldruckpegel NREL Nationales Laboratorium für

erneuerbare Energien, U.S.

SDNN Standardabweichung aller normal-zu-normalen R-R-

Intervalle USGSU U.S. Geological Survey

*v*<sub>rotor</sub> Luftvolumenstrom durch Windrotoren während der Insektenflugzeit in km<sup>3</sup>/Jahr

*A*<sub>rotor</sub> gesamte installierte Rotorfläche in km<sup>2</sup>

*v*<sub>nom</sub> Nennbetriebswindgeschwindigkeit in km/h

*t*<sub>top</sub> äquivalente Vollastbetriebsstunden während der Insektenflugzeit in h/Jahr

***m d a m a g e*** beschädigte Insektenbiomasse in kg/Jahr

***δ i n s e c t s*** durchschnittliche Insektenichte in Rotorhöhe in kg/km<sup>3</sup>

***ρ d a m a g e*** durchschnittliche Schadensquote von Insekten, die im Betrieb durch einen Rotor fliegen, in %

### Referenzen

1. Veers, P.; Dykes, K.; Lantz, E.; Barth, S.; Bottasso, C.L.; Carlson, O.; Clifton, A.; Green, J.; Green, P.; Holttinen, H.; et al. Grand challenges in the science of wind energy. *Science* **2019**, *366*, 6464.
2. Lauf, T.; Memmler, M.; Schneider, S. Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger-Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (2019), ISSN 1862-4359, Online verfügbar: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energietraeger> (Zugriff am 30.11.2022).
3. Deutscher Bundestag-Wissenschaftliche Dienste (2006): Externe Kosten der Stromerzeugung. Online verfügbar: <https://www.bundestag.de/resource/blob/435208/195507506cec0befc78beaef0c8c3895/wd-5-131-06-pdf-data.pdf> (Zugriff am 20. November 2022).
4. Huhtala, A.; Remes, P. Quantifizierung der sozialen Kosten der Kernenergie: Perceived risk of accident at nuclear power plants. *Energiepolitik* **2017**, *105*, 320-331.
5. Trieb, F., Interference of Flying Insects and Wind Parks (FlyWiP), Studienbericht, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oktober 2018. Online verfügbar: [www.dlr.de/tt/fluginsekten](http://www.dlr.de/tt/fluginsekten) (Zugriff am 20. November 2022).
6. Davy, J.L.; Burgemeister, K.; Hillman, D.; Carlile, S. A Review of the Potential Impacts of Wind Turbine Noise in the Australian Context. *Acoust. Aust.* **2020**, *48*, 181-197. <https://doi.org/10.1007/s40857-020-00192-4>.
7. Aralimarad, P.; Reynolds, A.M.; Lim, K.S.; Reynolds, D.R.; Chapman, J.W. Flight altitude selection increases orientation performance in high-flying nocturnal insect migrants. *Anim. Behav.* **2011**, *82*, 1221-1225. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2011.09.013>.
8. Chapman, J.; Reynolds, D.; Smith, A.; Smith, E.; Woiwod, I. An aerial netting study of insects migrating at high altitude over England. *Bull. Entomol. Res.* **2004**, *94*, 123-136. <https://doi.org/10.1079/ber2004287>.
9. Chapman, J.W.; Nesbit, R.L.; Burgin, L.E.; Reynolds, D.R.; Smith, A.D.; Middleton, D.R.; Hill, J.K. Flight Orientation Behaviors Promote Optimal Migration Trajectories in High-Flying Insects. *Science* **2010**, *327*, 682-685. <https://doi.org/10.1126/science.1182990>.
10. Chapman, J.W.; Reynolds, D.R.; Wilson, K. Long-range seasonal migration in insects: Mechanismen, evolutionäre Triebkräfte und ökologische Folgen. *Ecol. Lett.* **2015**, *18*, 287-302. <https://doi.org/10.1111/ele.12407>.
11. Contreras, R.F.; Frasier, S.J. High-Resolution Observations of Insects in the Atmospheric Boundary Layer. *J. Atmos. Ocean. Tech. nol. Am. Meteorol. Soc.* **2008**, *25*, 2176-2187. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1059.1>.
12. Drake, V.A. The vertical distribution of macro-insects migratory in the nocturnal boundary layer: Eine Radarstudie. *Bound. Layer Meteorol.* **1984**, *28*, 353-374 [https://doi.org/0006-8314/84/0284-0353\\$03.30](https://doi.org/0006-8314/84/0284-0353$03.30).

13. Hu, G.; Lim, K.S.; Horvitz, N.; Clark, S.J.; Reynolds, D.R.; Sapir, N.; Chapman, J.W. Mass seasonal bioflows of high-flying insect migrants. *Sci. Res. Rep.* **2016**, *354*, 1584-1587.
14. Jeffries, D.L.; Chapman, J.; Roy, H.E.; Humphries, S.; Harrington, R.; Brown, P.M.J.; Handley, L.-J.L. Characteristics and Drivers of High-Altitude Ladybird Flight: Insights from Vertical-Looking Entomological Radar. *PLoS ONE* **2013**, *8*, e82278. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082278>.
15. Mikkola, K. Der Rote Admiral Vanessa atalanta (Lepidoptera: Nymphalidae) wählt auf seinem Weg nach Süden nördliche Winde aus. *Ento-mol. Fenn.* **2003**, *14*, 15-24. Online verfügbar: [http://www.entomologicafennica.org/Volume14/EF\\_14\\_1/2Mikkola.pdf](http://www.entomologicafennica.org/Volume14/EF_14_1/2Mikkola.pdf) (Zugriff am 20. November 2022).
16. Reynolds, D.R.; Chapman, J.W.; Drake, V.A. Riders on the Wind: The Aeroecology of Insect Migrants. Chilson, P.B.; Frick, W.F.; Kelly, J.F.; Liechti, F.; Eds., *Aeroecology*, Springer Nature: Berlin, Deutschland, 2017, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68576-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68576-2_7).
17. Stefanescu, C.; Páramo, F.; Åkesson, S.; Alarcón, M.; Ávila, A.; Brereton, T.; Carnicer, J.; Cassar, L.F.; Fox, R.; Heliola, J.; et al. Multi-generational long-distance migration of insects: Study the painted lady butterfly in the Western Palaearctic. *Ecography* **2012**, *36*, 474-486 <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1600-0587.2012.07738.x/abstract>.
18. Talavera, G.; Vila, R. Entdeckung der Massenwanderung und Zucht des Schmetterlings Vanessa cardui in der Sub-Sahara: Die Europa-Afrika-Wanderung neu betrachtet. *Biol. J. Linn. Soc.* **2017**, *120*, 274-285 <https://doi.org/10.1111/bij.12873>.
19. Witze, A. Fliegende Insekten erzählen Geschichten von Fernwanderungen. *Sci. News* **2018**, *193*, 22. Online verfügbar: <https://www.sciencenews.org/article/flying-insects-tell-tales-long-distance-migrations> (Zugriff am 20. November 2022).
20. Stull, R.B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. In *Atmospheric and Oceanographic Sciences Library*; Springer Science & Business Media: Berlin, Deutschland, 1988; ISBN 978-94-009-3027-8.
21. Voigt, C. Insektensterben an Windkraftanlagen als Senken für die biologische Vielfalt. *Conserv. Sci. Pract.* **2021**, *3*, e366. <https://doi.org/10.1111/csp2.366>.
22. Trusch, R.; Falkenberg, M.; Mörtter, R. Anlockwirkung von Windenergieanlagen auf nachtaktive Insekten. *Carolinea* **2020**, *78*, 73-128, ISSN 0176-3997. Online verfügbar: [https://www.smnk.de/fileadmin/page\\_content/pressemitteilungen/Carolinea\\_78\\_2020\\_Anlockwirkung\\_von\\_WEA.PDF](https://www.smnk.de/fileadmin/page_content/pressemitteilungen/Carolinea_78_2020_Anlockwirkung_von_WEA.PDF) (Zugriff am 20. November 2022).
23. Jansson, S.; Malmqvist, E.; Brydegaard, M.; Åkesson, S.; Rydell, J. A Scheimpflug lidar used to observe insect swarming at a wind turbine. *Ecol. Indic.* **2020**, *117*, 106578, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106578>.
24. Yates, D. Bericht: Milkweed Losses May Not Fully Explain Monarch Butterfly Declines, Illinois News Bureau. 2017. Online verfügbar: <https://news.illinois.edu/view/6367/474116> (Zugriff am 20. November 2022).
25. NREL. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Wind Resource Maps and Data. Online verfügbar: <https://www.nrel.gov/gis/wind-resource-maps.html> (abgerufen am 3. Mai 2019).
26. Flockhart, D.T.T.; Wassenaar, L.J.; Martin, T.G.; Hobson, K.A.; Wunder, M.B.; Norris, D.R. Tracking multi-generational colonization of the breeding grounds by monarch butterflies in eastern North America. *Proc. R. Soc. B* **2013**, *280*, 20131087. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2013.1087>.
27. Attisano, A.; Tregenza, T.; Moore, A.J.; Moore, P.J. Oosorption and migratory strategy of the milkweed bug, *Oncopeltus fasciatus*. *Anim. Behav.* **2013**, *86*, 651-657. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2013.07.013>.
28. Weidel, H. Die Verteilung des Aeroplanktons über Schleswig-Holstein. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Kiel, Deutschland, 2008. Online verfügbar: [https://macau.uni-kiel.de/receive/diss\\_mods\\_00003018](https://macau.uni-kiel.de/receive/diss_mods_00003018) (Zugriff am 20. November 2022).
29. Johnson, C.G. The distribution of insects in the air and the empirical relation of density to height. *J. Anim. Ecol.* **1957**, *26*, 479-494. <https://doi.org/10.2307/1760>.
30. Johnson, C.G. *Migration and Dispersal of Insects by Flight*; Methuen: London, UK, 1969.
31. Hallmann, C.A.; Sorg, M.; Jongejans, E.; Siepel, H.; Hofland, N.; Schwan, H.; Stenmans, W.; Müller, A.; Sumser, H.; Hörrén, T.; et al. More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0185809, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>.
32. Wilcox, B.; White, E. Computational analysis of insect impingement patterns on wind turbine blades. *Wind Energy* **2016**, *19*, 483-495. <https://doi.org/10.1002/we.1846> <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/we.1846>.
33. Wilcox, B.J.; White, E.B.; Maniaci, D.C. Roughness Sensitivity Comparisons of Wind Turbine Blade Sections, Sandia National Laboratories, Sandia Report SAND2017-11288 2017. Online verfügbar: [http://energy.sandia.gov/wp-content/uploads/2017/10/LEE\\_Wilcox\\_SAND2017-11288.pdf](http://energy.sandia.gov/wp-content/uploads/2017/10/LEE_Wilcox_SAND2017-11288.pdf) (Zugriff am 20. November 2022).
34. Sánchez-Bayo, F.; Wyckhuys, K. Worldwide decline of the entomofauna: Ein Überblick über seine Ursachen. *Biol. Conserv.* **2019**, *232*, 8-27, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>.
35. Corten, G.P. Flow Separation on Wind Turbine Blades. Dissertation, Universität Utrecht, Utrecht, Niederlande, 2001; S. 107, ISBN 90-393-2582-0, NUGI 837.
36. Corten, G.P.; Veldkamp, H.F. Aerodynamik: Insekten können die Leistung von Windturbinen halbieren. *Nature* **2001**, *412*, 41-42. <https://doi.org/10.1038/35083698>.
37. Ehrmann, R.S.; Wilcox, B.; White, E.B.; Maniaci, D.C. *Effect of Surface Roughness on Wind Turbine Performance*, SANDIA Report SAND2017-10669; Sandia National Laboratories: Albuquerque, NM, USA, 2017. Online verfügbar: [http://energy.sandia.gov/wp-content/uploads/2017/10/LEE\\_Ehrmann\\_SAND2017-10669.pdf](http://energy.sandia.gov/wp-content/uploads/2017/10/LEE_Ehrmann_SAND2017-10669.pdf) (Zugriff am 20. November 2022).
38. Dalili, N.; Edrissy, A.; Carriveau, R. A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance. *Erneuern. Sustain. Energy Rev.* **2009**, *13*, 428-438, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.11.009>.

39. Fiore, G.; Selig, M.S. Simulation of Damage for Wind Turbine Blades Due to Airborne Particles. *Wind Eng.* **2015**, *39*, 399-418, <https://doi.org/10.1260/0309-524X.39.4.399>.
40. Shohag, M.A.S.; Hammel, E.C.; Olawale, D.O.; Okoli, O.I. Damage mitigation techniques in wind turbine blades: Ein Überblick. *Wind Eng.* **2017**, *41*, 185-210. <https://doi.org/10.1177/0309524X17706862>.
41. Yaqub, R.; Heidary, K. Autonomous wind turbine blades cleaning system. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), Oshawa, ON, Canada, 14-17 August 2017. <https://doi.org/10.1109/SEGE.2017.8052797>.
42. BladeCleaning-Limpieza de Palas, Quick Facts, Website. 2018. Online verfügbar: [http://www.bladecleaning.com/problemat-ica\\_EN.htm](http://www.bladecleaning.com/problemat-ica_EN.htm) (Zugriff am 19. Juni 2018).
43. HLS Wind, Windturbinenreinigung, Turbinenreinigung Internet-Promotion, 2019. Online verfügbar: <http://hlswind.co.uk/wind-turbine-cleaning/> (abgerufen am 2. Mai 2019).
44. Bundesverband Windenergie (BWE), Informationspapier-Windenergie und Insekten. 2019. Online verfügbar: [https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/03-naturschutz/20190313\\_Infopapier\\_Windenergie\\_Insekten.pdf](https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/03-naturschutz/20190313_Infopapier_Windenergie_Insekten.pdf) (Zugriff am 20. November 2022).
45. Keuper, A. Windenergie ist aktiver Umwelt- und Naturschutz. *DEWI Mag.* **1993**, *2*, 37-49. Online verfügbar: [http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Magazin\\_02/10.pdf](http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Magazin_02/10.pdf) (Zugriff am 20. November 2022).
46. Hinsch, C.; Westermann, D. Rotorblattreinigung-Was Schafft der Regen, was der Reiniger? *DEWI Magazin* Nr. 9. August 1996. Online verfügbar: [http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Magazin\\_09/08.pdf](http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Magazin_09/08.pdf) (Zugriff am 20. November 2022).
47. Harris, M.; Hand, M.; Wrigh, A. Lidar for Turbine Control, Technischer Bericht NREL/TP-500-39154, 2006. Online verfügbar: <https://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39154.pdf> (Zugriff am 20. November 2022).
48. Simley, E.; Pao, L.Y. LIDAR Wind Speed Measurements of Evolving Wind Fields, University of Colorado, Subcontract Report NREL/SR-5000-55516, Boulder, Colorado 2012. Online verfügbar: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/55516.pdf> (Zugriff am 20. November 2022).
49. Al Fahel, N.; Archer, C.L. Beobachtete Veränderungen des Niederschlags an Land nach der Errichtung von Offshore-Windparks. *Bull. Atmos. Sci. Technol.* **2020**, *1*, 179-203.
50. Christiansen, N.; Daewel, U.; Djath, B.; Schrum, C. Emergence of large-scale hydrodynamic structures due to atmospheric offshore wind farm wakes. *Front. Mar. Sci.* **2022**, *64*, 1-17. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.818501>.
51. Roy, S.B.; Traiteur, J.J. Auswirkungen von Windparks auf die Oberflächenlufttemperaturen. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2010**, *107*, 17899-17904.
52. Zhou, L.; Tian, Y.; Baidya Roy, S.; Thorncroft, C.; Bosart, L.F.; Hu, Y. Impacts of wind farms on land surface temperature. *Nat. Clim. Change* **2012**, *2*, 539-543.
53. Fiedler, B.H.; Bukovsky, M.S. The effect of a giant wind farm on precipitation in a regional climate model. *Environ. Res. Lett.* **2011**, *6*, 045101.
54. Miller, L.M.; Keith, D.W. Climatic impacts of wind power. *Joule* **2018**, *2*, 2618-2632.
55. Akhtar, N.; Geyer, B.; Rockel, B.; Sommer, P.S.; Schrum, C. Accelerating deployment of offshore wind energy change wind climate and reduce future power generation potentials. *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 1-12.
56. Bichet, A.; Wild, M.; Folini, D.; Schär, C. Causes for decadal variations of wind speed over land: Sensitivitätsstudien mit einem globalen Klimamodell. *Geophys. Res. Lett.* **2012**, *39*, L11701.
57. Huang, J.-B.; Lou, P.-K.; Sun, H.-W.; Luo, Y.; Zhao, Z.-C. Numerische experimentelle Studie über die potenziellen klimatischen Auswirkungen von großen Windparks in China. *Adv. Clim. Change Res.* **2019**, *10*, 143-149.
58. Keith, D.W.; DeCarolis, J.F.; Denkenberger, D.C.; Lenschow, D.H.; Malyshev, S.L.; Pacala, S.; Rasch, P.J. The influence of large-scale wind power on global climate. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2004**, *101*, 16115-16120.
59. Sánchez-Lozano, J.M.; García-Cascales, M.S.; Lamata, M.T. Identification and selection of potential sites for onshore wind farms development in Region Murcia, Spain. *Energy* **2014**, *73*, 311-324, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.024>.
60. Gil-García, I.C.; García-Cascales, M.S.; Fernández-Guillamón, A.; Molina-García, A. Categorization and Analysis of Relevant Factors for Optimal Locations in Onshore and Offshore Wind Power Plants: A Taxonomic Review. *J. Mar. Sci. Eng.* **2019**, *7*, 391. <https://doi.org/10.3390/jmse7110391>.
61. Gil-García, I.C.; Ramos-Escudero, A.; García-Cascales, M.; Dagher, H.; Molina-García, A. Molina-García, Fuzzy GIS-based MCDM solution for the optimal offshore wind site selection: Der Fall des Golfs von Maine. *Renew. Energy* **2022**, *183*, 130-147. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.058>.
62. Chen, D.; Deng, K.; Azorin-Molina, C.; Yang, S.; Zhang, G.; Minola, L. Terrestrial stilling will continue during the 21st century. *Res. Sq.* 2021, *Vorabdruck*. <https://doi.org/>.
63. Zhang, Z.; Wang, K. Stilling and recovery of the surface wind speed based on observation, reanalysis, and geostrophic wind theory over China from 1960 to 2017. *J. Clim.* **2020**, *33*, 3989-4008.
64. Arbinge, P. The Effect on Noise Emission from Wind Turbines Due to Ice Accretion on Rotor Blades. Harvard 2012. Online verfügbar: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:605419/FULLTEXT01.pdf> (Zugriff am 20. November 2022).
65. Majjala, P.; Turunen, A.; Kurki, I.; Vainio, L.; Pakarinen, S.; Kaukinen, C.; Lukander, K.; Tiittanen, P.; Yli-Tuomi, T.; Taimisto, P.; et al. Infrasound Does Not Explain Symptoms Related to Wind Turbines. *Publ. Gov. Anal. Assess. Res. Act.* **2020**, *34*, 1-155. Online verfügbar: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-907-3> (Zugriff am 20. November 2022).

66. Krahé, D.; Di Loro, A.A.; Müller, U.; Elmenhorst, E.M.; De Gioannis, R.; Schmitt, S.; Belke, B.; Benz, S.; Großarth, S.; Schreckenberger, D.; et al. Lärmwirkungen von Infraschallimmissionen, UBA-Publikationen, Text 163/2020, ISSN 1862-4804. Online verfügbar: (<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/laermwirkungen-von-infraschallimmissionen>) (Zugriff am 20. November 2022).
67. Schmidt, J.H.; Klokke, M. Health Effects Related to Wind Turbine Noise Exposure: A Systematic Review. *PLoS ONE* **2014**, *9*, e114183. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114183>.
68. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LfGL): Windenergieanlagen, Infraschall und Gesundheit 2022. Online verfügbar:[https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw\\_117\\_windkraftanlagen\\_infraschall\\_gesundheit.pdf](https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_117_windkraftanlagen_infraschall_gesundheit.pdf) (Zugriff am 20. November 2022).
69. Chiu, C.H.; Lung, S.C.C.; Chen, N.; Hwang, J.S.; Tsou, M.C.M. Effects of low-frequency noise from wind turbines on heart rate variability in healthy individuals. *Sci Rep* **2021**, *11*, 17817. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97107-8>.
70. Majjala, P.M.; Kurki, I.; Vainio, L.; Pakarinen, S.; Kuuramo, C.; Lukander, K.; Virkkala, J.; Tiippana, K.; Stickler, E.A.; Sainio, M. Annoyance, perception, and physiological effects of wind turbine infrasound. *J. Acoust. Soc. Am.* **2021**, *149*, 2238. <https://doi.org/10.1121/10.0003509>.
71. van Kamp, I.; van den Berg, F. Health Effects Related to Wind Turbine Sound, Including Low-Frequency Sound and Infrasound. *Akust. Aust.* **2018**, *46*, 31-57. <https://doi.org/10.1007/s40857-017-0115-6>.
72. van Kamp, I.; van den Berg, F. Health Effects Related to Wind Turbine Sound: An Update. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 9133. <https://doi.org/10.3390/ijerph18179133>.
73. Crichton, F.; Chapman, S.; Cundy, T.; Petrie, K.J. The link between health complaints and wind turbines: Unterstützung für die Nocebo-Erwartungshypothese. *Front. Public Health* **2014**, *2*, 220. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2014.00220>.
74. Bailey, H.; Brooks, K.L.; Thomson, P.L. Assessing environmental impacts of offshore wind farms: Lessons learned und Empfehlungen für die Zukunft. *Aquat. Biosyst.* **2014**, *10*, 8. <https://doi.org/10.1186/2046-9063-10-8>.