

<https://www.mdpi.com/1986214>

## Side Effects of Wind Energy: Review of Three Topics— Status and Open Questions

- Übersetzung -

Rezension

## Nebenwirkungen der Windenergie: Rückblick auf drei Themen – Status und offene Fragen

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

---

### 1. Einleitung

Windenergie gilt als eine Säule des kohlenstoffarmen Energiesystems der Zukunft [1]. In Erwägung nachstehender Gründe ist ein breiter wissenschaftlicher Konsens darüber, dass Strom aus Wind einen niedrigen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck [2], wächst die öffentliche Besorgnis über nachteilige Nebenwirkungen dieser Technologie. Darüber hinaus ist eine vergleichende Bewertung von Energietechnologien unvollständig, solange die Kosten der Windenergie nicht so gut verstanden wie die der Kohle-, Öl-, Gas- und Kernenergiekosten. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das derzeitige Verständnis von drei Nebenwirkungen der Windenergie zusammenzufassen, die bisher nicht umfassend bewertet wurden. Darüber hinaus formulieren wir offene Fragen, die untersucht werden sollten, um Strategien zur Minderung der Auswirkungen zukünftiger Windparks zu entwickeln.

Die *primäre* Wirkung von Windrotoren ist die Gewinnung kinetischer Energie aus atmosphärischen Strömungen zur Umwandlung in elektrische Energie. Dieses Feld wird von der aktuellen Forschung ausführlich behandelt und wird hier nicht diskutiert. Die vorliegende Arbeit widmet sich *sekundär* Auswirkungen von Windrotoren und Windparks, die wir als *Nebenerscheinungen* und umfassen zwei Schichten: physikalische und biologische Effekte als innere Schicht und soziale Kosten als äußere Schicht. Im Mittelpunkt dieses Reviews stehen ungelöste Fragen zur inneren Schicht, einschließlich der Umverteilung atmosphärischer Strömungen und des Einflusses von Rotoren auf Mensch und Tierwelt, sowie wie bei den landwirtschaftlichen Erträgen. In einem Teil unserer Überprüfung schlagen wir politische Anreize vor, um diese offenen Fragen zu beantworten. Neben diesem Schwerpunkt gehen wir auch kurz auf offene Fragen zu den gesellschaftlichen Kosten der Windkraft ein. Bevor wir einen Überblick über den gegenwärtigen Stand geben

**Zitiervorschlag:**Thess, A.D.; Lengsfeld, P. Nebenwirkungen der Windenergie: Überprüfung von drei Themen - Status und offen

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

Wissenschaftlicher Herausgeber:  
Byungik Chang

Erhalten: 13. September 2022  
Angenommen: 21. November 2022  
Veröffentlicht: 4. Dezember 2022

**Anmerkung des Herausgebers:**  
MDPI bleibt neutral in Bezug auf Zuständigkeitsansprüche in veröffentlichten Karten und institutionellen Zugehörigkeiten.



**Copyright:** © 2022 von den Autoren. Lizenznehmer MDPI, Basel, Schweiz. Dieser Artikel ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative

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

- <sup>1</sup> Institut für Technische Thermodynamik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR, Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart
  - <sup>2</sup> Lehrstuhl für Energiespeicherung, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart
  - <sup>3</sup> re:lookclimate gGmbH, Prenzlauer Allee 186, 10405 Berlin, Germany
- \* Korrespondenz: andre.thess@dlr.de; Telefon: +49-174-325-4573

**Zusammenfassung:** Windenergie gilt als eine Säule des kohlenstoffarmen Energiesystems der Zukunft. Während die Nebenwirkungen und sozialen Kosten fossiler Energieträger (Kohle, Öl und Gas) sowie der Kernenergie gut dokumentiert und analysiert sind, ist das Verständnis der analogen Fragen im Zusammenhang mit der 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 konventioneller Energiequellen zu vergleichen. Hier fassen wir den Wissensstand zu drei bisher nicht überzeugend bewerteten Nebenwirkungen der Windenergie zusammen. Wir konzentrieren unsere Analyse auf drei Themen, nämlich (1) den Einfluss der Windenergie auf Insekten; (2) der Einfluss der Windenergie auf die raumzeitliche 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.

**Schlüsselwörter:** Windkraft; Insektenwanderung; Insektenimpingement; Infraschallemission; Veränderung von Wettermustern

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

[www.mdpi.com/journal/sustainability](http://www.mdpi.com/journal/sustainability)

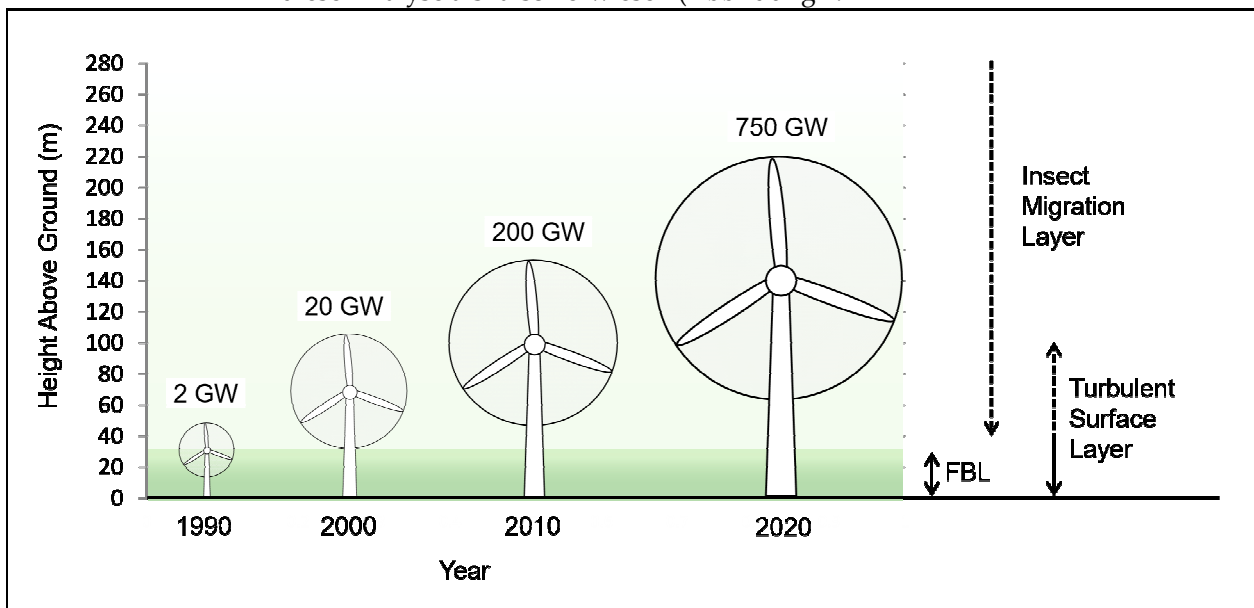
ist es angebracht, kurz auf die Definition des Begriffs der sozialen Kosten [3] und ihre Schätzung für die Kernenergie [4] einzugehen und darauf hinzuweisen, dass es unseres Wissens keine umfassende Analyse der sozialen Kosten von Windkraft gibt.

Wir nähern uns der formulierten offenen Frage mit einer Überprüfung der vorhandenen Literatur mit besonderem Schwerpunkt auf drei Themen. Im folgenden Abschnitt analysieren wir das Wissen über den Einfluss der Windenergie auf fliegende Insekten. Im Gegensatz zu den anderen Abschnitten ist das Eröffnungsthema um eine Schlüsselreferenz [5] aus der Institution des Erstautors herum aufgebaut, die aktuelle Literatur erweitert und detailliert. Wir haben uns entschieden, das Thema der Auswirkungen von Offshore-Windparks auf Meeressäuger nicht aufzunehmen, da es in [6] ausführlich diskutiert wird, was wir dringend zur weiteren Lektüre empfehlen. Abschnitt 3 widmet sich der Frage, wie sich Störungen im turbulenten Strömungsfeld auf Luftgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchtigkeit und Niederschlag in der Nähe von Windparks auswirken. In Abschnitt 4 diskutieren wir die Auswirkungen von Schall, der von Windkraftanlagen emittiert wird, auf den Menschen. Die Abschnitte 3 und 4 umfassen ein konventionelles systematisches Screening neuerer relevanter Literatur und ausgewählter Expertenbeurteilungen. 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 Windenergieanlagen und deren Fundamente sowie optische Eigenschaften haben wir daher bewusst ausgelassen. In Abschnitt 5 diskutieren wir eine Vielzahl von Aspekten zur Auswahl von Standorten für zukünftige Windparks. In Abschnitt 6 fassen wir unsere Schlussfolgerungen zusammen und heben offene Fragen hervor, die in zukünftigen Forschungen behandelt werden sollten.

## 2. Auswirkungen der Windenergieerzeugung auf fliegende Insekten

### 2.1. Korrelation von Insektenwanderung und Rotorhöhe

Im Jahr 2018 führte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) eine Studie durch, die auf einer umfassenden Literaturrecherche und vereinfachten Modellierung der möglichen Störungen mit fliegenden Insekten durch Windrotoren in Deutschland basiert [5]. Die FlyWiP-Studie liefert umfassende Belege aus der entomologischen Literatur, dass viele Insektenarten in einer höheren Höhe wandern als ihre alltägliche Fluggrenzschicht (FBL), die in der Regel bis etwa 30 m über dem Ground-Niveau reicht [7–19]. Ein weit verbreitetes Axiom, dass Insekten vor Schäden durch Windkraftanlagen sicher sind, weil sich die Blätter über dem FBL drehen, wurde durch diese Analyse als falsch erwiesen (Abbildung 1).



**Abbildung 1.** Entwicklung typischer Windkraftanlagen und weltweit installierter Windkraftleistung seit 1990. Typische Turbinenformen werden mit der alltäglichen Fluggrenzschicht (FBL) von Insekten und der turbulenten Oberflächenschicht verglichen, die Insekten während der Migration zu überwinden versuchen.

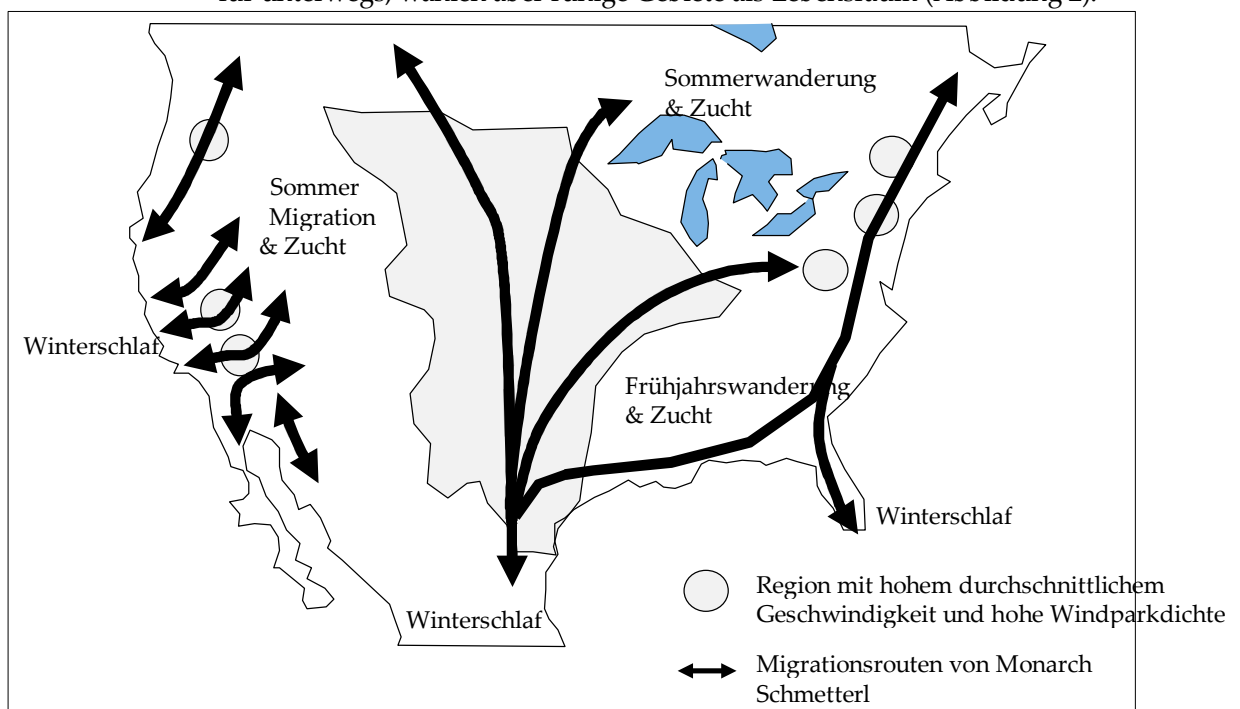
Wenn wandernde Insekten die Reife erreichen und sobald Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Jahreszeit mit ihren intrinsischen Verhaltensmustern übereinstimmen, steigen sie über die turbulente Oberflächenschicht der Atmosphäre auf, die in der Höhe zwischen 40 und 100 m über dem Boden variiert [20]. Dort finden sie starke, gerichtete, ungestörte Winde, mit denen sie als Transportvehikel zu ihren bevorzugten Paarungs-, Brut- und Futterplätzen gelangen können, was der allgemeinen Annahme widerspricht, dass fliegende Insekten intrinsisch sicher vor dem Einfangen durch moderne Windrotoren sind, die höher als ihre vermutete Fluggrenzschicht stehen. Darüber hinaus ist es wahrscheinlich, dass Insekten aus Effizienzgründen nicht viel höher steigen als nötig, um starke Winde zu finden. Dies ist die gleiche Argumentation, die Windkraftentwickler motiviert hat, Rotoren knapp über der turbulenten Oberflächenschicht zu platzieren. Es ist nicht verwunderlich, dass wandernde Insekten und Windrotoren früher oder später an den gleichen Orten aufeinandertreffen. Beschädigte Insekten wurden in Windparks gefunden und die damit verbundenen Auswirkungen und Gegenmaßnahmen eingehend analysiert [21].

Unabhängig von diesen Ergebnissen kam Ref. [22] zu dem Schluss, dass es keine signifikante Wechselwirkung zwischen fliegenden Insekten und Windparks gibt, basierend auf einer geringen Anzahl von Insekten, die während des Betriebs in Rotorhöhe mit einer Lichtfalle auf dem Dach einer Windkraftanlage gefangen werden. Im Gegensatz dazu registrierte eine andere Gruppe von Wissenschaftlern mit einem Scheimpflug LIDAR zur Identifizierung von Insektenschwärmen eine signifikante Insektenaktivität an der Rotorhöhe [23]. Ob eine beleuchtete Insektenfalle oder LIDAR das angezeigte Instrument zur Detektion von Insektenschwärmen bei den

Betriebswindgeschwindigkeiten von Windenergieanlagen von 5 bis 20 m pro Sekunde ist, wird weiter diskutiert.

### 2.2. Korrelation von Windparkanlagen und Insektenmigrationsrouten

Ein prominentes Beispiel aus den USA veranschaulicht das offensichtliche Zusammentreffen von Migrationsrouten von fliegenden Insekten und Windparks. Im Frühjahr verlässt der Monarchfalter seine Winterschlafgründe in Florida, Zentral-Mexiko und der Küste Südkaliforniens und macht sich auf den Weg nach Norden, wobei er starke Winde nutzt, die ihm helfen, große Entfernungen in relativ kurzer Zeit zu überwinden. Insekten mögen Turbulenzen nicht. Sie nutzen starke, gleichmäßige Winde für unterwegs, 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 von Windparks (USGS 2019) [25].

Die erste Generation, nachdem sie ihre Winterschlafgründe in Mexiko verlassen hat, beginnt im Frühjahr in ruhigen Gebieten im Südosten der USA zu brüten und bildet die Grundlage für zwei weitere Generationen, die später weiter nach Norden reisen und im Sommer im Norden der USA und am südlichen Rand Kanadas brüten [26,24]. Schließlich, während nur zwei Monaten im Herbst, kehrt die vierte und letzte Generation in ihren ursprünglichen Winterschlaf zurück. Es gibt Hinweise darauf, dass der Wolfsmilchkäfer auch in ähnlicher Weise innerhalb dieser Region wandert, was möglicherweise die damit verbundenen Auswirkungen auf die Bestäubung von Wolfsmilch erklärt. Es wurde berichtet, dass beide Arten massive Verluste erleiden [27].

Der von NREL (2021) entwickelte US Wind Atlas und die US Wind Turbine Database von USGS (2019) liefern sehr detaillierte und hochauflösende Informationen über Windgeschwindigkeiten und Windparks in den USA, die eine starke Übereinstimmung von Migrationsrouten und Windparks auch auf kleinräumiger Ebene deutlich zeigen [25]. Dies führt zu der leicht überprüfaren Hypothese, dass viele attraktive Standorte für die Entwicklung von Windparks entlang von Insektenwanderungsrouten liegen.

### 2.3. Modellierung des Insektenimpingement in Windparks

Das im Rahmen der FlyWiP-Studie aufgebaute Modell quantifiziert anhand von drei Parametern die Anzahl der in Deutschland gefährdeten Insekten während der Flugsaison von April bis Oktober [5].

### 2.3.1. Insektendichte in der Atmosphäre

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

Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse und des Verlustes von 75% der Insektenpopulation in Deutschland seit 1990 [31] wurde die durchschnittliche Insektendichte in Rotorhöhe im FlyWiP-Studienmodelljahr 2017 auf drei durchschnittlich große Insekten innerhalb von 10000 Kubikmetern Luft oder 3 kg Insektenbiomasse pro Kubikkilometer Luft geschätzt [5]. Die Verwendung solcher Durchschnittswerte ist ein eher konservativer Ansatz, da Schwarmereignisse zu bis zu 100-fach höheren Dichten führen können [16].

### 2.3.2. Luftvolumenstrom durch die Rotorfläche

Der zweite Modellparameter quantifiziert den Volumenstrom durch die 30.000 deutschen Windrotoren mit insgesamt 56 GW Leistung und einer Rotorfläche von 160 Quadratkilometern, die 2017 in Betrieb waren. Der entsprechende Luftstrom durch diese Rotorfläche von rund 8 Millionen Kubikkilometern errechnet sich aus Multiplikation der Rotorfläche (160 km<sup>2</sup>), der Windgeschwindigkeit bei Nennleistung (50 km/h) und der äquivalenten Volllastbetriebsstunden von Windenergieanlagen während der Insektenflugsaison in Deutschland (1000 h/a). Dies kann mit der Gleichung  $V_{\text{rotor}} = A_{\text{rotor}} \cdot V_{\text{nom-top}}$  ausgedrückt werden, wobei  $V_{\text{rotor}}$  den Luftvolumenstrom durch Windrotoren während der Insektenflugsaison in km<sup>3</sup>/Jahr bezeichnet,  $A_{\text{rotor}}$  ist die gesamte installierte Rotorfläche in km<sup>2</sup>,  $V_{\text{nom}}$  ist die nominale Betriebswindgeschwindigkeit in km/h und  $t_{\text{op}}$  ist die äquivalente Volllastbetriebszeit während der Insektenflugsaison in h/Jahr. Multipliziert man den Luftstrom und die Insektendichte, ergibt sich eine Gesamtinsektenbiomasse von 24.000 Tonnen oder 24.000 Milliarden durchschnittlich großen Insekten, die im Modelljahr (2017) durch deutsche Windrotoren fliegen [5].

### 2.3.3. Aufprallrate von Insekten, die Windrotoren überqueren

Schließlich quantifiziert der dritte Modellparameter den Anteil der Insekten, der beschädigt wird und Rückstände an den Blättern hinterlässt, wenn er durch einen Rotor. Dieser Modellparameter wird seit mehr als 30 Jahren von der Forschung der Windkraftindustrie bewertet und berücksichtigt, dass Insekteneinflüsse und Rückstände auf Rotorblättern die Effizienz und Lebensdauer von Windparks verringern [32,33]. Der vereinfachte Ansatz der FlyWiP-Studie ergibt einen Schadensfaktor von 5%, was plausibel und konservativ ist, wenn man bedenkt, dass das Verhältnis von fester Blattfläche zu kreisförmiger (meist leerer) Rotorfläche der meisten Windenergieanlagen in der gleichen Größenordnung liegt. Während des Betriebs bewegen sich die Rotorblätter mit Geschwindigkeiten von etwa 40 km/h in der Nähe des Rotorzentrums und etwa 250 km/h an der Spitze, mit geringen Chancen für eine Kreatur, einen Aufprall zu überleben, aber eine Chance (in unserem Modell 95%) lassen, den Rotorbereich ungestört zu passieren.

### 2.3.4. Schätzung der jährlichen Insekten-D-Überschreitung in einem Windpark

Die Multiplikation der drei Modellparameter (Luftströmung, Insektendichte und Schadensfaktor) ergibt einen ersten Hinweis auf eine potenziell geschädigte Insektenbiomasse durch den deutschen Windpark im Jahr 2017, die 1200 Tonnen oder 1200 Milliarden promittelgroße Insekten (bei 1 mg/cap) pro Jahr beträgt. Dies kann ausgedrückt werden als  $m_{\text{Schaden}} = V_{\text{rotor}} \cdot \delta_{\text{Insekten}} \cdot q_{\text{Schaden}}$ , wobei hier  $m_{\text{Schaden}}$  die geschädigte Insektenbiomasse in kg/Jahr bezeichnet,  $V_{\text{rotor}}$  der Luftvolumenstrom durch Windrotoren während der Insektenflugsaison in km<sup>3</sup>/Jahr ist,  $\delta_{\text{Insekten}}$  die durchschnittliche Insektendichte in Rotorhöhe in kg/km<sup>3</sup> und  $q_{\text{Schaden}}$  Der Schaden ist die

durchschnittliche Schadensrate von Insekten, die im Betrieb durch einen Rotor fliegen, in %.

Hochgerechnet auf die globale Ebene mit 750 GW heute installierter Windkraftleistung (Skalierungsfaktor:  $750 \text{ GW}/56 \text{ GW} = 13,4$ ), einschließlich Ländern mit ganzjähriger Flugsaison (Skalierungsfaktor:  $12 \text{ Monate}/6 \text{ Monate} = 2$ ) und höherer Insektendichte in Deutschland (Skalierungsfaktor:  $1/(1-75\% \text{ Verlust}) = 4$ ), könnte der globale Gesamtschaden etwa das 100-fache dieses Wertes betragen. Dies entspricht einem potenziellen windkraftbedingten Verlust von 120.000 Tonnen Insektenbiomasse oder 120.000 Milliarden Individuen pro Jahr im globalen Maßstab. Da Insektenimpingement während der Migration stattfindet, kurz bevor der jährliche Fortpflanzungsprozess der Insektenpopulation abgeschlossen ist, könnte es sich schließlich auf nachfolgende Generationen ausbreiten, verstärkt durch die Anzahl potenzieller Nachkommen jedes geschädigten weiblichen Insekts. Obwohl in vielen Analysen ein weltweiter Rückgang der Insektenbiomasse berichtet wurde, hat keine Windkraft als mögliche Ursache in Betracht gezogen [34].

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

Insektenimpingement 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 der Vermeidung von Rückständen solcher Stöße widerstehen. Die Erosion der Vorderkante des Rotorblattes verringert die wirtschaftliche Lebensdauer eines Windparks, und Rückstände, die an der Blattoberfläche haften, verringern die Effizienz der Stromerzeugung [35,36]. Zu den untersuchten Partikeln gehören Eis, Sand und fliegende Insekten. Um das Phänomen zu verstehen und mildernde Maßnahmen zu identifizieren, widmet sich ein Teil der Literatur der Quantifizierung von Insektenwirkungen. Solche Studien quantifizieren die "Insektensammeleffizienz" von Profilen und die "Bruchgeschwindigkeit" von Insekten in Abhängigkeit von ihrer Größe und dem Profildesign [32,33,37].

Ein weiterer großer Teil der Fachliteratur zur Windkraftauslegung widmet sich Maßnahmen und Entwicklungen zum Schutz von Rotorblättern vor Insektenbildung. Die Blattoberflächenstrukturen und der Klängenbetrieb wurden in der Folge optimiert, um Insektenerosion und Verschmutzung zu minimieren. Es wurden minimale Anstrengungen unternommen, um einen Aufprall zu vermeiden, aber es wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um seine Sequenzen zu vermeiden, was zu robusteren und antiadhäsiven Klängenoberflächen führte [38–40].

Schließlich widmet sich eine dritte Kategorie der Fachliteratur der Reinigung von Rotorblättern, um einen hohen Wirkungsgrad zu erhalten. Das Problem des Insektenimpingements findet sich in der Werbung von Reinigungsunternehmen und in der Motivation wissenschaftlicher Arbeiten zur Rotorblattreinigung [41–43].

In Reaktion auf die FlyWiP-Studie behauptete der Bundesverband Windenergie [44], seine zentralen Argumente und Annahmen widerlegen zu können. Obwohl wir diese Behauptung nicht für gerechtfertigt halten, räumen wir ein, dass die Dimension der Auswirkungen von Insektenverlusten durch Windkraft, insbesondere im Vergleich zu anderen Faktoren, noch nicht gut bekannt ist. Daher glauben wir, dass internationale Forschung begonnen werden sollte, um solche Auswirkungen zu quantifizieren (und möglicherweise zu vermeiden), was auch die zentrale Aussage ist, die sich aus der FlyWiP-Studie ergibt.

Ein wichtiges Argument, das in [44] vorgeschlagen wird, ist, dass Insektenschäden an Windrotorblättern ein Phänomen der Vergangenheit angehören. Wir glauben, dass diese Argumentation fehlerhaft ist. Nach unserer Interpretation lässt sich die verminderte Sichtbarkeit von Insekteneinschlägen auf moderne Windenergieanlagen durch die technischen Entwicklungen der oben genannten Blattoberflächen und durch den massiven Verlust von Insekten in der gleichen Zeitspanne erklären. Die parallele Entwicklung von Insektensterben und Windkraftausbau allein beweist sicherlich keinen kausalen Zusammenhang zwischen den beiden Phänomenen. Es scheint jedoch

genügend Beweise zu geben, um eine Untersuchung möglicher Kohärenz 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 Rückstand auf den Blättern hinterlassen würden, die im Modelljahr (2017) etwa 5% der gesamten Rotorfläche von 160 Millionen Rotormetern ausmachen, 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 die Insekteneinwirkung praktisch unsichtbar gemacht hat. Tragischerweise wurde die relative Verringerung der sichtbaren Insektenrückstände auf Rotorblättern seit 1990 fälschlicherweise als allgemein und global gültige Folge der zunehmenden Turbinenhöhe interpretiert, von der angenommen wurde, dass sie Rotoren außerhalb des Bereichs der Insektenfluggrenzschicht bringen, wie von frühen Windkraftentwicklern vorhergesagt [45,46]. Obwohl Insektenimpingement für Windkraftanlagen kein ernstes Problem mehr darstellt, könnte es daher immer noch ein Problem für wandernde Insektenpopulationen darstellen.

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

Was aus der oben diskutierten Insektenwanderung gelernt werden kann, lässt hoffen, dass die Auswirkungen der Windenergie auf fliegende Insekten schließlich zumindest auf ein bestimmtes Niveau reduziert werden könnten. Insekten wandern innerhalb einer definierten Jahreszeit und in eine definierte Richtung. Der Monarch wandert von März bis Juni nach Norden und kehrt im September und Oktober nach Süden zurück, den Rest des Jahres brütet oder überwintert er an relativ ruhigen Orten, die wahrscheinlich von windigen Migrationsrouten (und damit von den meisten Windparks) entfernt sind und während der größten Zeit innerhalb seiner Fluggrenzschicht niedrig bleiben. Die Verbesserung unseres Verständnisses der Insektenmigration und ihrer Korrelation mit der Windstromerzeugung könnte Fragen über die mögliche Notwendigkeit der Abschaltung von Windparks aufgrund von Schwarmereignissen beantworten. Andererseits würde es Aufschluss über die Frage geben, ob solche Ereignisse erst in wenigen kritischen Monaten und nur dann zu erwarten sind, wenn der Wind in die entsprechende Richtung weht, weil sonst die meisten Insekten innerhalb ihrer Fluggrenzschicht niedrig bleiben würden.

LIDAR kann Partikel in der Luft erfassen, die sich einem Windpark nähern, und den Betrieb stoppen, falls Dichten in Rotorhöhe kritisch werden. LIDAR wird seit Jahren verwendet, um die Windgeschwindigkeit von Windparks vorherzusagen [47,48] und wurde kürzlich auch zur Verfolgung von Insektenschwärmen in Rotorhöhe eingesetzt [23]. Hypothetisch könnten Windkraftanlagen, die sich an das Verhalten von Insekten anpassen und auf Schwarmereignisse reagieren, Insektenschäden ohne nennenswerte Einbußen bei der Energieausbeute reduzieren, die Effizienz verbessern und die Wartungskosten senken, indem die Rotorblätter sauber gehalten werden.

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

Sowohl die Insektenwanderung als auch der Ausbau der Windparkkapazität finden auf globaler Ebene statt [7,11–13]. Starke Beweise deuten darauf hin, dass Insektenmigrationsrouten bestehende Windparkstandorte kreuzen und die Höhe der Insektenwanderung über den Boden zumindest teilweise mit der Höhe moderner Windrotoren übereinstimmt [21,23–25,29]. Prominente Beispiele, die möglicherweise betroffen sind, sind der gemalte Schmetterling, der zwischen Zentralafrika und Europa reist [17] und der Monarchfalter, der zwischen Mexiko, den Vereinigten Staaten und Kanada reist [26]. Abgeleitet aus der Prior-Bewertung für Deutschland [5] wird der weltweite Verlust ausgewachsener Fluginsekten durch Windrotoren kurz vor Abschluss ihres Fortpflanzungszyklus auf etwa 100.000 Tonnen oder 100 Billionen Individuen pro Jahr geschätzt. Diese Größenordnung deutet nicht auf Vernachlässigbarkeit hin, insbesondere wenn man bedenkt, dass weibliche Insekten typischerweise Hunderte von

Eiern ablegen, die zusammen mit ihnen verloren gehen, was möglicherweise die Stabilität der nächsten Generation nicht absichert.

Schäden an Windkraftanlagen durch fliegende Insekten werden seit den Anfängen der Windkraftindustrie berichtet [32,36,40,42,46]. Seitdem haben intensive Bemühungen zur Vermeidung von Insektenerosion und Verschmutzung von Rotorblättern das Problem des Insektenimpingement für die Windindustrie, nicht aber für Insekten gelöst. Auf den ersten Blick scheinen Minderungsmaßnahmen zum Schutz von Insekten vor Aufprall machbar und bezahlbar, und die damit verbundenen Verluste von Windenergie scheinen akzeptabel zu sein. Wir kommen zu dem Schluss, dass internationale energiepolitische und Umweltschutzstandards verabschiedet werden sollten, um die Auswirkungen der Windenergieerzeugung auf fliegende Insektenpopulationen zu verstehen und zu mildern.

Es gibt eine Reihe offener Fragen im Zusammenhang mit Insektenimpingement in Windparks:

- Welche politischen und technischen Maßnahmen sind erforderlich, um mit der Erforschung der Interferenz von Insektenwanderung und Windkraftherzeugung zu beginnen?
- Welche Strategien und technischen Maßnahmen sind erforderlich, um Insektenverluste in Windparks zu erkennen, zu quantifizieren und zu mindern?
- Welche Strategien und Maßnahmen sind erforderlich, um den Nachweis der Kompatibilität von Windparks und fliegenden Insekten zu ermitteln und umzusetzen?
- Welche politischen, technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen auf die Windkraftindustrie ergeben sich aus dem Insektenschutz?

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

Die strömungsdynamischen Effekte von Windenergieanlagen auf das Strömungsfeld in der turbulenten atmosphärischen Grenzschicht sind grundsätzlich bekannt. Windkraftanlagen entziehen der atmosphärischen Strömung kinetische Energie. Der Einfluss einzelner Rotoren und Windparks auf das Strömungsfeld bezieht sich sowohl auf die mittlere Strömung als auch auf die turbulenten Schwankungen. Windparks erhöhen die effektive Oberflächenrauheit des Bodens und verteilen die mittlere Strömung um. Insbesondere erzeugen sie Aufwärtsströmungen (sogenannte Konvergenzzonen) stromaufwärts und abwärts (sogenannte Divergenzzonen) stromabwärts der Windparks [49]. Darüber hinaus erzeugen die Rotorblätter zusätzliche turbulente Schwankungen, die sich stromabwärts ausbreiten und die turbulente kinetische Energie pro Volumeneinheit verstärken. Der Zusammenhang zwischen den fluiddynamischen Mechanismen und den potenziellen sozialen Kosten ist in Tabelle 1 zusammengefasst, die als Leitfaden für die in diesem Abschnitt vorgestellte Diskussion dienen wird. Trotz neuerer Erkenntnisse [50], daß Windparks auch die Oberflächenströmung im Meer beeinflussen, Temperatur- und Salzgehaltsverteilungen verändern und potentielle Auswirkungen auf marine Ökosystemprozesse haben, wird dieser Aspekt in der vorliegenden Überprüfung nicht behandelt.

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

Mechanismus	Nebenwirkungen und soziale Kosten
Umverteilung der raumzeitlichen Struktur von Das Luftgeschwindigkeitsfeld	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veränderung der Leistung und der wirtschaftlichen Ertrag benachbarter Windparks</li> <li>• Veränderung der Erosionsmuster des Bodens</li> </ul>



Umverteilung der raumzeitlichen Struktur von das Temperaturfeld	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfluss auf das Wachstum von Pflanzen und Landwirtschaftlicher Ertrag</li> <li>• Einfluss auf die Tierpopulation</li> </ul>
Umverteilung der raumzeitlichen Struktur von Feuchtigkeit und Niederschlag	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfluss auf das Wachstum von Pflanzen und</li> <li>• Landwirtschaftlicher Ertrag</li> <li>• Einfluss auf das Verhalten von Tieren</li> <li>• Einfluss auf die Erosionsmuster des Bodens</li> </ul>

Auf den Längenskalen einzelner Windparks verhält sich das Temperaturfeld passiv skalar, d.h. das Temperaturfeld wird durch die turbulente atmosphärische Strömung advektiert. Die Veränderung des Strömungsfeldes durch das Vorhandensein eines Windparks verteilt das Temperaturfeld durch vertikale Durchmischung um. Das modifizierte Temperaturfeld verteilt auch Feuchtigkeit um und kann den Niederschlag beeinflussen.

Bevor wir einen Überblick über die einschlägige Literatur geben, ist es nützlich, die Größenordnung des vorliegenden Fließphänomens anhand einer einfachen Back-of-the-Envelope-Berechnung für den speziellen Fall Deutschland zu veranschaulichen. Basierend auf der installierten Windkraft von 56 Gigawatt in Deutschland, einem geschätzten jährlichen Luftstrom von  $8 \times 10^6$  km<sup>3</sup> durch die deutschen Windkraftanlagen und geschätzten 1000 Voll-Laststunden können wir die Zahlen hochskalieren, um den globalen jährlichen Luftstrom durch alle Windenergieanlagen zu erhalten (siehe Abschnitt 2). Geht man von einer weltweit installierten Windleistung von 750 Gigawatt und 2000 Volllaststunden weltweit aus, erhalten wir einen Durchsatz von 215 Mio. Kubikkilometern Luft pro Jahr. Da die Landoberfläche der Erde etwa 150 Millionen Quadratkilometer beträgt, würde das Volumen eine Oberflächenschicht mit einer Höhe von 1,5 km 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. [49] analysierten Windgeschwindigkeit und Niederschlag stromaufwärts und stromabwärts von zwei Windparks im Vereinigten Königreich, nämlich dem Windpark Walney für den Zeitraum von 1995 bis 2018 und dem Windpark Crosby 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. Diese Studie analysierte jedoch nicht, wie sich solche Änderungen der Windgeschwindigkeit möglicherweise auf benachbarte Windparks auswirken würden oder wie sie die landwirtschaftlichen Erträge verändern würden. Roy und Traiteur [51] untersuchten die Temperaturdaten in der Nähe eines Windparks in Texas und verglichen die Ergebnisse mit 306 Simulationen. Sie zeigten, dass der Windpark einen wärmenden Effekt auf die Oberflächentemperatur während der Nacht und einen kühlenden Effekt während des Tages hat, hauptsächlich aufgrund turbulenter Vermischung in der atmosphärischen Grenzschicht. Sie erwähnten, dass "Auswirkungen wahrscheinlich landwirtschaftliche Praktiken beeinflussen werden", versuchten aber nicht, sie zu quantifizieren. Zhou [52] analysierte zwischen 2003 und 2011 Satellitendaten von Windparks aus einem Bildspektrometer mit moderater Auflösung (MODIS) im westlichen Zentraltexas. Es wurde eine Erwärmung von bis zu 0,72 K pro Jahrzehnt, insbesondere nachts, nachgewiesen. In unserer Literaturrecherche haben wir einen auffälligen Mangel an experimentellen Daten außerhalb Europas und Nordamerikas beobachtet. Insbesondere fanden wir keine experimentellen Daten für Südamerika, trotz seines attraktiven Windenergiepotenzials. Darüber hinaus fanden wir keine Daten für Afrika, Asien oder Australien. Unter Bezugnahme auf unsere Diskussion über den gewünschten zukünftigen Forschungsbedarf in Abschnitt 6 gibt es einen

dringenden Bedarfan Beobachtungsdaten, sowohl am Boden als auch von Satelliten, für diese drei Kontinente.

### 3.2. Simulationsstudien

Die Literatur zu Simulationsstudien ist umfangreicher als die zu Beobachtungen. Fiedler und Bukovsky [53] fanden heraus, dass "das Vorhandensein eines Windparks im mittleren Westen, ob riesig oder klein, einen enormen Einfluss auf das Wetter und die Niederschlagsmenge für eine Saison haben kann, was mit der bekannten Empfindlichkeit langfristiger Wettervorhersagen gegenüber den Anfangsbedingungen übereinstimmt". Die von Miller und Keith [54] durchgeführten Simulationen zeigten mittels numerischer Simulation, dass die Deckung des US-Strombedarfs mit Windenergie zu einem Anstieg der US-Oberflächentemperaturen um 0,24 K führen würde. Unter Verwendung eines hochauflösenden regionalen Klimamodells mit implementierten Wind-Farm-Parametrisierungen zeigten Akhtar et al. [55], dass das jährliche mittlere Windgeschwindigkeitsdefizit innerhalb eines Windparks je nach Windparkgeometrie 2-2,5 m/s erreichen kann.

Bichet et al. [56] untersuchten die Windstillung unter Verwendung eines atmosphärischen globalen Klimamodells und untersuchten die Änderung der Rauheitslänge, der Aerosolemissionen, der Meeresoberflächentemperatur und der Treibhausgaskonzentrationen in Verbindung mit Änderungen der Oberflächenwindgeschwindigkeit. Die vom Modell simulierten Windgeschwindigkeitstrends unterschätzen im Allgemeinen die beobachteten Enden (Land und Ozean), bestätigten jedoch den Beruhigungseffekt. Huang et al. [57] simulierten die Klimaauswirkungen 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 induzieren könnte. In einer Simulationsstudie von Keith et al. [58] wurde festgestellt, dass großflächige Windkraft in der Lage ist, das Klima zu verändern, mit einem Temperaturanstieg von weniger als 0,5 K. Keine der oben genannten Studien untersuchte die sozialen Kosten, die mit diesen Veränderungen verbunden sind, die überwiegend offen bleiben.

### 3.3. Offene Fragen

Um unser Verständnis zu verbessern, haben wir folgende Forschungsfragen identifiziert:

- (1) Wie wirkt sich eine Umverteilung der Geschwindigkeit von  $d$ , wie sie durch Beobachtungen [50] und Simulationen [55] berichtet wird, auf die Wirtschaftlichkeit benachbarter Windparks aus (Verschlechterung der Leistungsabgabe und erhöhte OPEX-Kosten). Und wie hoch sind die sozialen Kosten einer verstärkten Erosion?
- (2) Wie wirkt sich eine Umverteilung der Temperaturverteilung, wie sie durch Beobachtungen [51,52] und Simulationen [54] berichtet wird, auf den Ertrag landwirtschaftlicher Tätigkeiten in der Nähe von Windparks aus und wie wirkt sie sich auf Tiere aus?
- (3) Was sind die sozialen Kosten eines veränderten Feuchtigkeits- und Niederschlagsmusters (z.B. [51,52]), ausgedrückt durch Veränderung des landwirtschaftlichen Ertrags, des Verhaltens von Tieren und der Bodenerosion?
- (4) Wie kann eine Kombination aus globaler (vgl. [56] und [58]) und regionaler Simulation (vgl. [53]) unser Verständnis des regionalen Klimas unter dem Einfluss von Windparks verbessern?
- (5) Wie kann multikriterielle Optimierung mit einer ähnlichen Methodik wie in [59– 61] angewendet werden, um Windenergiestandorte mit maximalem Ertrag und minimalen negativen Auswirkungen zu identifizieren?

Um diese Fragen beantworten zu können, ist es notwendig, die Beobachtungsgrundlage signifikant zu erweitern (z.B. [49]) und Simulationen der thermischen Strömungsdynamik mit ökonomischen Bewertungsmodellen zu koppeln. Darüber hinaus sind zusätzliche Beobachtungen erforderlich, die gleichzeitige

Messungen von Windgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchtigkeit und Niederschlag über lange Zeiträume beinhalten.

Bevor wir zum nächsten Abschnitt übergehen, scheint es angebracht, kurz auf das Phänomen der Windstillung einzugehen. Terrestrische Stillung (TS) berücksichtigt nicht den Rückgang der Windgeschwindigkeit über Land in den letzten Jahrzehnten [62,63]. Obwohl die Gründe für TS nicht vollständig verstanden werden, hat es eine gewisse Ähnlichkeit mit den hier untersuchten Phänomenen. 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. Geräuschverhalten von Windenergieanlagen*

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 betrifft den Schall, insbesondere die Exposition gegenüber Niederfrequenz und Infraschall.

Der Sound von Windkraftanlagen weist mehrere Besonderheiten auf. Er kann sich relativ frei ausbreiten, da es in größeren Höhen erzeugt wird als umliegende Hindernisse. Der Schall von Windkraftanlagen umfasst niederfrequente (20-200 Hz) und Infraschallwellen (unter 20 Hz), die aufgrund atmosphärischer Absorption praktisch keine Dämpfung aufweisen, während natürliche oder gebaute Strukturen einen viel geringeren Einfluss auf ihre Ausbreitung haben als Wellen bei höheren Frequenzen. Bei großen Entfernungen nimmt der langwellige Schall fast ausschließlich nach geometrischen Prinzipien ab; Verdoppelt sich der Abstand, wird die Schallenergie über das Vierfache der Fläche verteilt (und damit verdünnt). Dementsprechend sinkt der Geräuschpegel um sechs Dezibel (dB). Der Lärm von Windkraftanlagen wird nachts nicht verringert, im Gegensatz zu z.B. Verkehrslärm. Die Geräuschemission von Windkraftanlagen hängt weitgehend von den Windverhältnissen ab (wobei der in [64] ausführlich diskutierte Effekt der Eisansammlung auf Rotorblätter ignoriert wird). Unter ähnlichen Wetterbedingungen bleibt die Schallemission unabhängig von der Jahreszeit gleich. Darüber hinaus variiert das Geräusch, das von der Blattrotation ausgeht, regelmäßig variierend / intermittierend und wird typischerweise als ausgeprägtes Schwenken oder Pochen beschrieben. Weitere Einzelheiten finden sich in [65,66].

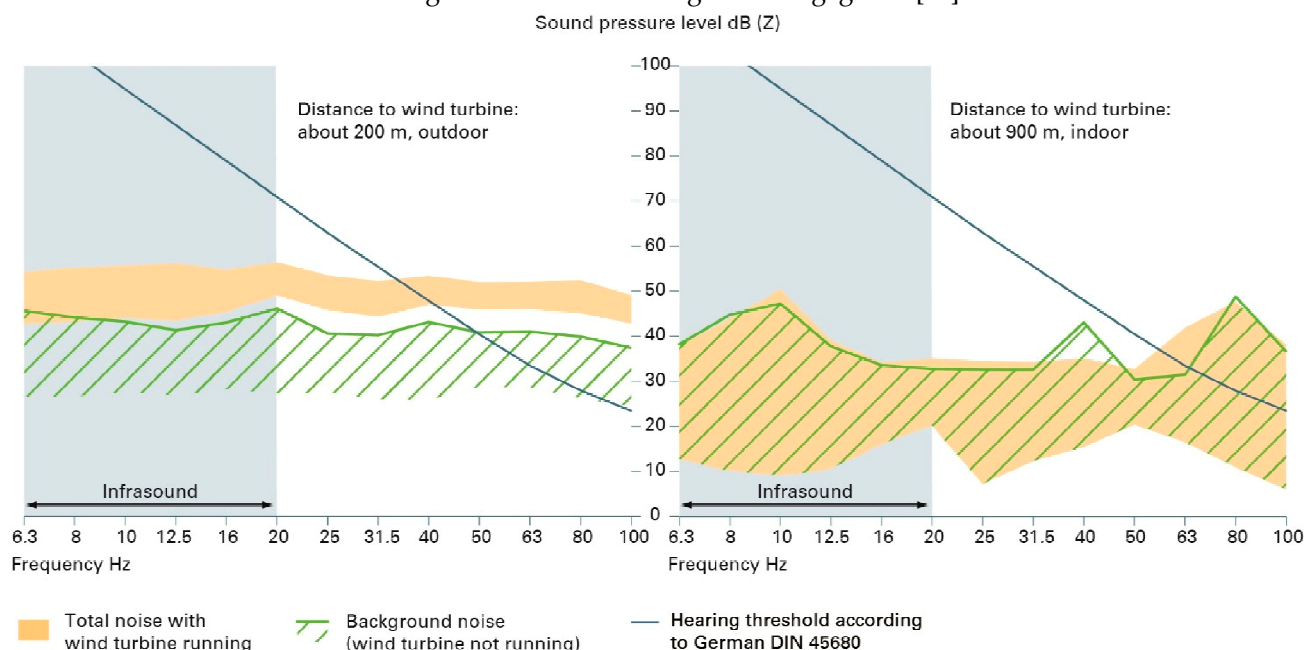
##### *4.2. Schallemission von Windenergieanlagen*

Die Schallemission von Windkraftanlagen ist insbesondere bei größeren Entfernungen nicht einfach zu messen, da die gemessenen Geräuschpegel durch Umgebungsbedingungen 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 Raumschallmessungen, die in der Nähe von zwei Windkraftanlagen durchgeführt wurden [65]. Die Ergebnisse waren eindeutig; die unbewerteten äquivalenten Dauerschalldruckpegel in Häusern in der Nähe von Windkraftanlagen waren etwa 20 dB höher als bei früheren Langzeitmessungen in Naturräumen (Entfernung zu Windparks betrug etwa 1,5 km, aber Parks waren mit 17 Windkraftanlagen beträchtlich) [65]. Nach den äquivalenten Dauerschalldruckpegeln lagen die wichtigsten Frequenzen unter 1 Hz und Frequenzen unter 2 Hz, wenn die höchsten äquivalenten Pegel berücksichtigt werden, mit Werten so hoch wie  $L_{Z,max} = 93$  dB bzw.  $L_{Z,max} = 97$  dB an den beiden Orten [65].

Die bewusste Hörschwelle für den Infraschallbereich beginnt bei ca. 80 dB und reicht bei tieferen Frequenzen bis über 100 dB. Die Schwellenwerte für potenzielle gesundheitliche Bedenken sind jedoch erheblich niedriger [67], wobei die schwedischen EPA-Leitlinien (Naturvårdsverket) für den Lärmpegel nahelegen, dass äquivalente (A-bewertete) Lärmpegel 40 dB(A) in Wohnungen nicht überschreiten dürfen. In Bezug auf

die höheren Hörschwellen zeigen die Messungen aus Finnland, dass Infraschall stark genug ist, um selbst diese Schwellenwerte zu erreichen oder sogar zu überschreiten.

Messungen staatlicher Einrichtungen in Bayern/Deutschland in eine ähnliche Richtung [68]. Obwohl im Allgemeinen unterhalb der Hörerkennungsschwelle, war niederfrequentes und Infraschallgeräusch von Windenergieanlagen bei Messungen in 200 m Entfernung von modernen Windkraftwerken (Höhe 40 m und 2300 bzw. 2400 KW) deutlich über dem Hintergrundpegel nachweisbar [68]. In einer Entfernung von 900 m ist der Unterschied zum Hintergrund nicht mehr klar erkennbar. Es ist zu beachten, dass in relativ unmittelbarer Nähe der Pegel der niedrigsten gemessenen Infraschallfrequenz deutlich über 35 oder 40 dB liegt, sogar über 50 dB [68]. Dieses zentrale 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 Innenräumen. Die graue schattierte Frequenz zeigt den Infraschallanteil an. Die Messungen wurden unter mittleren Windgeschwindigkeiten von 8 bis 13 m/s durchgeführt. Das Geräusch der Windkraftanlagen ist in unmittelbarer Nähe klar vom Hintergrund im Freien getrennt, aber nicht von Hintergrundgeräuschen auf größere Entfernungen in Innenräumen zu unterscheiden. Alle Infraschallkomponenten liegen deutlich unter den Hör- und Wahrnehmungswerten nach DIN, wie angegeben (Mit freundlicher Genehmigung von: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Nadeeka Pinto, die Daten und Zahlen wurden in Ref. [68], S. 8 von pdf veröffentlicht). Das schwedische EPA legt den Schwellenwert für Einwohner jedoch auf 40 dB fest.

Ein unabhängiger Bericht aus Taiwan enthält auch Daten zu niederfrequenten Lärmpegelmessungen (LFN) sowohl in Häusern als auch im Freien in der Nähe von Windkraftanlagen [69]. Die Messung ergab beträchtliche LFN-Werte. Die durchschnittlichen LFN-Werte in Innenräumen lagen in vier der sieben überwachten Haushalte über 30 dB (LAeq) (gemessene Häuser befanden sich in Abständen von 290–330 m von der nächsten Windkraftanlage) [69]. Die Untersuchung ergab einen deutlichen Einfluss auf die LFN in Bezug auf den Abstand zu den Turbinen, die verwendeten Gebäudeoberflächen und die Art der installierten Fenster sowie deren Offen- oder Geschlossenheit. [69].

#### 4.3. Experimentelle Nachweise über mögliche physiologische und psychologische Wirkungen

Mögliche physiologische und psychologische Effekte der niederfrequenten und Infraschall-Exposition beim Menschen wurden in Audiokammern und in Freilandexperimenten gemessen, z.B. [65,66]. Die bereits erwähnte, von der Regierung initiierte Untersuchung in Finnland umfasste eine vollständige Teilstudie über

Untersuchungen zur kontrollierten Infraschallexposition ("Provokationsexperimente") mit Freiwilligen, die eine Audiokammer verwenden, die ebenfalls separat veröffentlicht wurde [70].

In einem Experiment wurde die Belästigung im Zusammenhang mit verschiedenen Eigenschaften des Windschalls untersucht, d.h. Vorhandensein von Infraschall, Amplitudenmodulation und Aufnahmeort. Das Vorhandensein von Infraschall hatte keinen systematischen Einfluss auf die bewertete Belästigung; Die Bewertungen waren mit und ohne Infraschall sehr ähnlich. Es wurde jedoch ein Effekt der Aufnahmeort- und Amplitudenmodulation (AM) gefunden; Windkraftanlagenreize wurden als störender eingestuft als Yard-Stimuli, und maximale AM-Stimuli wurden als störender bewertet als minimale AM-Stimuli [70].

Neben indirekten Messungen mit Audiokammern können auch direkte Messungen der Auswirkungen auf den Menschen durch tatsächlich betriebene Windkraftanlagen eingesetzt werden. In einer kürzlich veröffentlichten Felduntersuchung aus Taiwan wurden Veränderungen der Herzfrequenzvariationen (HRVS) von rekrutierten Probanden gemessen, während gleichzeitig an zwei ausgewiesenen Stellen mit Interventionsdesign LFN-Messungen (Low-Frequency-Noise) durchgeführt wurden [69]. Die Ergebnisse zeigten einen signifikanten Zusammenhang zwischen LFN-Exposition und Veränderungen der HRV, insbesondere in Bezug auf den SDNN-Parameter (Standard-d-Eviation aller normalen zu normalen R-R-Intervalle), was auf mögliche gesundheitliche Auswirkungen der Exposition gegenüber LFN hinweist [69].

#### 4.4. Nachweise aus der Praxis für mögliche Auswirkungen auf die Gesundheit

In Bezug auf die dritte Dimension der realen Evidenz, die potenzielle gesundheitliche Auswirkungen dokumentiert, kann man mit Fug und Recht sagen, dass die verfügbaren Daten umfangreich sind. Mit zunehmender Installation von Windkraftanlagen wird erwartet, dass zusätzliche Daten in signifikanten Mengen verfügbar werden. Eine Zusammenfassung findet sich in [67,71,72].

Hinsichtlich der Prävalenz der Symptome weisen die jüngst in Deutschland und Finnland erhobenen Daten in eine klare Richtung. Die Prävalenz der gemeldeten Symptome scheint hoch zu sein, wie beispielsweise die Daten aus Finnland zeigen.

In der finnischen VNTEAS-Studie wurde eine Stichprobenstrategie etabliert, um die Beteiligung der Bewohner in Gebieten zu ermöglichen, die zuvor als die problematischsten in Bezug auf die intuitiv mit Windkraft-Infraschall assoziierten Symptome identifiziert wurden [65]. Im April 2019 wurde an alle Personen der Stichprobe ( $n = 4\ 84\ 7$ ) und im Juni 2019 eine Mahnung an Antwortverweigerer ( $n = 3\ 986$ ) versandt. Nach dem ersten Mailing 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 Windkraft-Infraschall assoziierten (im Bericht als "symptomatische Befragte" bezeichnet). In der Zone mit der geringsten Entfernung betrug die Prävalenz 15% (34 Individuen). Von den symptomatischen Befragten berichteten 49% (34 Personen) über Ohrsymptome (z. B. Druckempfindungen im Ohr oder Tinnitus); 45% (32 Personen) berichteten über Schlafstörungen; 26% (18 Personen) berichteten über kardiale Symptome (z. B. Arrhythmie); 24% (17 Personen) berichteten über Kopfschmerzen; 21% (15 Personen) berichteten über Zziness; 13% (9 Personen) berichteten über Angstzustände; 9% (6 Personen) berichteten über Müdigkeit, Bluthochdruck oder Gelenk- und andere Schmerzen; und 7% (5 Personen) berichteten über Übelkeit oder Konzentrationsschwierigkeiten (Daten hier nicht gezeigt) [65]. Ähnliche Ergebnisse wurden in einer in Deutschland erhobenen Erhebung wiedergegeben [66].

Selbst wenn man zugibt, dass die genauen Mechanismen und Dosis-Wirkungs-Korrelationen nicht vollständig ausgearbeitet sind, und angesichts der eher niedrigen Barriere in den Erhebungen, scheint es immer noch weit hergeholt, alle diese Reaktionen einem Nocebo-Effekt zuzuschreiben, wie in einem Hypothesenpapier von Crichton et al. aus dem Jahr 2014 [73].

Nimmt man alle vorhandenen Daten zusammen, so scheint sich ein Muster abzuzeichnen: Eine umfassende Übersicht, die die Literatur über die gesundheitlichen

Auswirkungen von Windenergieanlagen im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt untersucht, die 2014 von Schmidt und Klokke veröffentlicht wurde, formuliert es wie folgt [67]:

"Derzeit scheint es vernünftig zu folgern, dass Lärm von Windkraftanlagen das Risiko von Belästigung und Schlafstörungen bei exponierten Probanden in einer Dosis-Wirkungs-Beziehung erhöht. Es scheint eine tolerierbare Grenze von etwa LAeq von 35 dB zu geben." Dennoch ist die Unsicherheit über die genauen Schlussfolgerungen spürbar: "Diese Schlussfolgerungen sind jedoch selbst in den größeren Querschnittsstudien, die die derzeit beste Evidenz liefern, von einem potenziellen Risiko für Selektion und Informationsverzerrung betroffen."

In einer kürzlich von der niederländischen Regierung in Auftrag gegebenen Anstrengung, die Ende August 2021 veröffentlicht wurde, bekräftigt ein wichtiger zusammenfassender Absatz den Punkt, während er auch einen Vorbehalt hinzufügt: "Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass niederfrequenter Schall Teil des Gesamtschalls von Windkraftanlagen ist und die gleichen Auswirkungen hat, die normaler Schall hat; Es kann lästig sein und Auswirkungen auf das (Einschlafen) haben und, wenn es chronisch ist, kann dies zu weiteren gesundheitlichen Auswirkungen führen" [72].

#### 4.5. Offene Fragen und mögliche weitere Schritte

In Bezug auf die Frage nach möglichen gesundheitlichen Bedenken für Menschen und Windkraftanlagen, insbesondere im Hinblick auf Schall und Infraschall, ist die Hauptfrage nicht "ob" - der Effekt ist real. 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 (...) Es ist vernünftig, zudem Schluss zu kommen, dass bei der Planung künftiger Windparks ein vorsichtiger Ansatz erforderlich ist. Darüber hinaus gibt es Hinweise darauf, dass Lärmbelästigung und Schlafstörungen zusammenhängen und dass Schlafstörungen möglicherweise zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen können" [67].

Die Frage, welche Art von Regulierungsrahmen und Standards angemessen sind, ist derzeit nicht vollständig geklärt, und die Antwort wird wahrscheinlich in jedem wichtigen betroffenen Land weltweit leicht unterschiedlich sein. Eine ähnliche Herausforderung dürfte jedoch auf den Kontinenten bestehen: Die Festlegung robuster und pragmatischer Rahmenbedingungen scheint notwendig zu sein, um einen weiteren akzeptablen starken Ausbau der Windenergieversorger zu ermöglichen. Der Regulierungsrahmen sollte sich nicht nur auf die Entfernung zum bewohnten Raum beziehen, sondern auch auf die Konstruktion und die Merkmale der tatsächlichen Turbinen sowie möglicherweise auf die Betriebsstunden. Lärmgrenzwerte sind ein offensichtlicher Schlüsselpunkt. Einfach zu argumentieren, dass Windkraftanlagen Infraschall unterhalb der Hörschwelle emittieren, scheint zu einfach zu sein; der vomschwedischen EPA festgelegte viel niedrigere Grenzwert von 40 dB erscheint angemessener. Detailliertere Messungen können jedoch von Wert sein.

Die sozialen Kosten erhöhter Gesundheitsprobleme in Regionen, die stark vom Ausbau der Windkraftproduktion betroffen sind, sind ein weiterer wichtiger Aspekt für die zukünftige Forschung. Dies scheint im Moment etwas untererforscht zu sein.

Ein interessanter Vorschlag ergab sich aus der Arbeit des Independent Scientific Committee on Wind Turbines der australischen Regierung, das den Ansatz zur Bestimmung des Mindestabstands von Windenergieanlagen zu lärmempfindlichen Empfängern und deren Management optimieren sollte [6]. In einer im Juni 2020 veröffentlichten Zusammenfassung schlug der Ausschuss vor, dass "Belästigung" die primäre Maßnahme sein sollte, um die Grenzwerte für Windkraftanlagen festzulegen. Ihrer Ansicht nach ist die angemessene Grenze diejenige, die sicherstellt, dass nicht mehr als 10% der Bevölkerung stark verärgert wären, wenn sie ihr ausgesetzt wären. Dieser Schwellenwert scheint außerhalb von Wohnungen zwischen 34 und 40 dB LAeq (10 min) zu liegen, mit einem Mittelwert von 37 dB LAeq (10 min) [6]. Wenn dieser innovative Ansatz umgesetzt würde, was wünschenswert erscheint, ist eine Begleitforschung gerechtfertigt.

Weitere Untersuchungen sind gerechtfertigt, um die folgenden Schlüsselpunkte zu detaillieren und voranzutreiben:

- Definition und Verfeinerung gesundheitsrelevanter Grenzwerte für den Infraschallpegel, um datengestützte Regeln für die Entfernung zwischen Windparks und Wohngebieten zu erstellen;
- Soziale Kosten von Gesundheitsproblemen in Regionen, die stark von Windparks betroffen sind; und
- Realitätstest des innovativen australischen Vorschlags, regulatorische Rahmenbedingungen auf der Grundlage eines Ziels festzulegen, unterhalb einer Schwelle für "höchst verärgerte Einwohner" zu bleiben.

## **5. Erörterung und Bezug zu bestehenden Entwicklungs- und Standortauswahlkriterien**

Nebenwirkungen der Windenergiesollten Teil der Entwicklungs- und Standortauswahlkriterien sein. Es gibt bereits umfangreiche Literatur zu diesem Thema, z.B. zu Fallstudien zu Standortauswahlkriterien für Offshore-Windparks [61], sowie zu Onshore-Projekten [59]. Die Behördenrecherchierten und sichtigten systematisch die Literatur, um eine taxonomische Überprüfung dieses Themas zu erstellen [60].

Es überrascht nicht, dass die in Abschnitt 4 (mögliche Auswirkungen auf die Gesundheit) beschriebenen Standorteffekte bereits direkt (z. B. Entfernung zu Städten) und indirekt, z. B. Entfernung zu Stromleitungen und anderen Infrastrukturen im Zusammenhang mit menschlichen Siedlungen, in gewisser Weise in den Kriterien für die Standortauswahl enthalten sind.

Die Auswirkungen auf Flora und Fauna sind derzeit auch Teil der Diskussionen über die Kriterien für die Standortauswahl, wobei Vögel und Meeresschutzgebiete ausdrücklich erwähnt werden; die möglichen Auswirkungen auf wandernde Insekten scheinen jedoch derzeit nicht in Betracht gezogen zu werden. Keine der drei oben genannten erschöpfenden Referenzen enthält auch nur das Wort "Insekten".

Drittens: Während Klimafaktoren, die die Leistung und Leistung und damit die wirtschaftliche Bewertung der geplanten Windparks beeinflussen, in den Standortauswahlkriterien ausführlich diskutiert werden, scheint die Frage nach möglichen Auswirkungen von Windparks auf das lokale Wetter und Klima nicht berücksichtigt zu werden. Dies mag nicht so überraschend sein, da die allgemeine Richtung wahrscheinlich durch einen politischen Rahmen vorgegeben werden muss, da die Sorge über einzelne Windparks hinausgeht und z.B. durch eine Begrenzung der Dichte von Windparks in bestimmten Regionen erreicht werden könnte, wie in [57] vorgeschlagen. Eine Änderung des politisch-regulatorischen Rahmens würde sich direkt auf die Kriterien für die Standortauswahl auswirken. Zum Beispiel listet Gil-Garcia einen vollständigen Satz von "Political Category"-Kriterien in Tabelle 6 ihres systematischen Reviews auf [60].

## **6. Zusammenfassung und politische Implikationen**

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

Da die Energiepolitik bisher keinen zufriedenstellenden Nachweis der Verträglichkeit der Windenergie in Bezug auf diese drei Nebenwirkungen verlangt, bleiben die Größenordnung und die mögliche Bedeutung ihrer Auswirkungen unbekannt, und es kann lange dauern, bis mögliche und möglicherweise notwendige Maßnahmen zur Minderung realisiert werden.

Die Literatur bestätigt die Übereinstimmung von Insektenwanderung und Rotorblättern sowohl in Bezug auf die Höhe über dem Boden als auch in der geografischen Verbreitung, die sich aus der Motivation sowohl von Insekten als auch von Windkraftentwicklern ergibt, starke Winde für ihre Zwecke zu nutzen. Schäden an Insekten, die Rotoren überqueren, sind eine unwiderlegbare Tatsache, und ihre

Größenordnung wird konservativ auf einen jährlichen Verlust von etwa 100.000 Tonnen oder 100 Billionen Individuen pro Jahr geschätzt. Die damit verbundene offene Frage ist, ob diese vereinfacht geschätzte Menge per se vernachlässigbar ist und ob sie 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 Bodenstruktur aufgeworfen und Hinweise auf Veränderungen der durchschnittlichen Luftgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchtigkeit und Niederschläge geliefert, die sich auf Wildtiere und Landwirtschaft auswirken könnten.

Schließlich hat das Schall- und Unterschallgeräusch, das von Windkraftanlagen während des Betriebs emittiert wird, ein erhebliches Potenzial, Menschen und möglicherweise Wildtiere, die in ihrer Nähe leben müssen, zu stören, insbesondere wenn im Laufe der Jahre messbare gesundheitliche Auswirkungen auftreten.

Angesichts 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 angesichts der Größe und Geschwindigkeit von Rotorblättern, die in der Lebensumwelt vieler Arten, einschließlich des Menschen, eingesetzt werden, glauben wir, dass den drei unerwünschten Auswirkungen und möglichen Minderungsmaßnahmen, die in dem vorliegenden Papier diskutiert werden, zusätzliche Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Darüber hinaus sollten die damit verbundenen offenen Fragen rechtzeitig beantwortet werden.

Sind diese Fragengeklärt, muss noch eine umfassende Methodik nach dem Vorbild der skizzierten [59,60,74] entwickelt werden, die auf multikriterieller Optimierung basiert, um Standortentscheidungen für zukünftige Windparks auf maximale energetische Effizienz und möglichst geringe Nebeneffekte zu stützen.

**Autorenbeiträge:** Beide Autoren (A.D.T., P.L.) trugen gleichermaßen zur Konzeptualisierung, Literaturrecherche, Analyse, Erstellung, Überprüfung und Bearbeitung des Papiers bei. Alle Autoren haben die veröffentlichte Version des Manuskripts gelesen und zugestimmt." **Förderung:** Diese Forschung erhielt keine Drittmittel.

**Erklärung des Institutional Review Board:** Nicht zutreffend.

**Einwilligungserklärung:** Nicht zutreffend.

**Datenverfügbarkeitserklärung:** Nicht zutreffend.

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

**Interessenkonflikte:** Die Autoren erklären keinen Interessenkonflikt.

### Abkürzungen

AM	Amplitudenmodulation
VON	Deutsche Industrie Norm (German Industrial Standard)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EPA	Umweltschutzbehörde
FBL	Fluggrenzschicht fliegender Insekten
FlyWiP	Interferenz von fliegenden Insekten und Windparks (Studientitel)
HRV	Variation der Herzfrequenz
LAeq	Äquivalenter Schalldruckpegel (A-bewertet)
LFN	Niederfrequentes Rauschen
AUSTEILEN	Lichtdetektions- und Entfernungsmesstechnik
LZ/LZ,max	(Maximum) unbewerteter äquivalenter Schalldruckpegel
NREL	National Renewable Energy Laboratory, USA
SDNN	Standardabweichung aller Normal-zu-Normal-R-Intervalle
USGS	U.S. Geological Survey (englisch)



V-Rotor-Luftvolumenstrom durch Windrotoren während der Insektenflugsaison in  $\text{km}^3/\text{Jahr}$

Eine installierte Rotorfläche in  $\text{km}^2$   
 $V_{\text{nom}}$  Nennwindgeschwindigkeit in  $\text{km/h}$   
 $t_{\text{Ä}}$  Äquivalente Vollastbetriebsstunden während der Insektenflugsaison in  $\text{h/Jahr}$   
 $m$  geschädigte Insektenbiomasse in  $\text{kg/Jahr}$   
 $\delta_{\text{Insekten}}$  durchschnittliche Insektendichte in Rotorhöhe in  $\text{kg/km}^3$   
 $Q_{\text{durchschnittliche}}$  Schadensrate von Insekten, die durch einen Rotor fliegen, in %

## Referenzen

1. Veers, P.; Dykes, K.; Lantz, E.; Barth, S.; Bottasso, C.L.; Carlson, O.; Clifton, A.; Grün, J.; Grün, P.; Holttinen, H.; et al. Große Herausforderungen in der Wissenschaft der Windenergie. *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, Available online: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger> (accessed on 30.11.2022).
3. Deutscher Bundestag—Wissenschaftliche Dienste (2006): Externe Kosten der Stromerzeugung. Available online: <https://www.bundestag.de/resource/blob/435208/195507506cec0bec78beaef0c8c3895/wd-5-131-06-pdf-data.pdf> (abgerufen am 20. November 2022).
4. Huhtala, A.; Remes, P. Quantifizierung der sozialen Kosten der Kernenergie: Wahrgenommenes Unfallrisiko bei Kernkraftwerksplänen. *Energiepolitik* **2017**, *105*, 320–331.
5. Trieb, F., Interferenz fliegender Insekten und Windparks (FliWip), Studienbericht, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oktober 2018. Online verfügbar: [www.dlr.de/tt/fluginsekten](http://www.dlr.de/tt/fluginsekten) (abgerufen am 20. November 2022).
6. Davy, J.L.; Burgemeister, K.; Hillman, D.; Carlile, S. Ein Überblick über die möglichen Auswirkungen von Windturbinenlärm im australischen Kontext. *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. Die Auswahl der Flughöhe erhöht die Orientierungsleistung bei hochfliegenden nachtaktiven Insektenmigranten. *Anim.* **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. Eine Luftnetzstudie von Insekten, die in großer Höhe über England wandern. *Stier. 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.; Die Gattung ist in der Gattung "Hill" zusammengefasst. Flugorientierungsverhalten fördert optimale Migrationstrajektorien bei hochfliegenden Insekten. *Science* **2010**, *327*, 682–685. <https://doi.org/10.1126/science.1182990>.
10. Chapman, J.W.; Reynolds, D.R.; Wilson, K. Langfristige saisonale Migration bei Insekten: Mechanismen, evolutionäre Treiber und ökologische Konsequenzen. *Ecol. Lett.* **2015**, *18*, 287–302. <https://doi.org/10.1111/ele.12407>.
11. Contreras, R.F.; Frasier, S.J. Hochauflösende Beobachtungen von Insekten in der atmosphärischen Grenzschicht. *J. Atmos. Ocean. Technol. Am. Meteorol. Soc.* **2008**, *25*, 2176–2187. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1059.1>.
12. Drake, V.A. Die vertikale Verteilung von Makroinsekten, die in der nächtlichen Grenzschicht wandern: Eine Radarstudie. *Gebunden. Schicht 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. Massive saisonale Bioströme von hochfliegenden Insektenmigranten. *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. Eigenschaften und Treiber des Marienkäferflugs in großer Höhe: Erkenntnisse aus dem vertikal aussehenden entomologischen Radar. *PLoS ONE* **2013**, *8*, e82278. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082278>.
15. Mikkola, K. Die Roten Admirale *Vanessa atalanta* (Lepidoptera: Nymphalidae) selektieren Nordwinde auf der Wanderung nach Süden. *Entomol. Fenn.* **2003**, *14*, 15–24. Online verfügbar: [http://www.entomologiacafennica.org/Volume14/EF\\_14\\_1/2Mikkola.pdf](http://www.entomologiacafennica.org/Volume14/EF_14_1/2Mikkola.pdf) (abgerufen am 20. November 2022).
16. Reynolds, D.R.; Chapman, J.W.; Drake, V.A. Reiter im Wind: Die Aeroökologie von Insektenmigranten. Chilson, P.B.; Frick, W.F.; Kelly, J.F.; Liechti, F.; Hrsg., *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.; Fuchs, R.; Heliola, J.; et al. Mehrgenerationen-Langstreckenwanderung von Insekten: Untersuchung des gemalten Schmetterlings in der Westpaläarkt. *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 Massenmigration und Zucht des gemalten Schmetterlings *Vanessa cardui* in der Subsahara: Die Europa-Afrika-Migration revisited. *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> (abgerufen am 20. November 2022).
20. Stull, R.B. Eine Einführung in die Grenzschichtmeteorologie. In *der Bibliothek für Atmosphären- und Ozeanographische Wissenschaften*; Springer Science & Business Media: Berlin, Deutschland, 1988; ISBN 978-94-009-3027-8.

21. Voigt, C. Insektentote an Windkraftanlagen, wenn die Artenvielfalt sinkt. *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. Available online: [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) (accessed on 20 November 2022).
23. Jansson, S.; Malmqvist, E.; Brydegaard, M.; Åkesson, S.; Rydell, J. Ein Scheimpflug-Lidar beobachtete Insektenschwärme an einer Windkraftanlage. *Ecol. Indisch.* **2020**, *117*, 106578, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106578>.
24. Yates, D. Bericht: Milkweed Verluste erklären möglicherweise nicht vollständig Monarch Butterfly Rückgänge, Illinois News Bureau. 2017. Online verfügbar: <https://news.illinois.edu/view/6367/474116> (abgerufen am 20. November 2022).
25. NREL. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Windressourcenkarten und -daten. Online verfügbar: <https://www.nrel.gov/gis/wind-resource-maps.html> (abgerufen am 3. Mai 2019).
26. Flockhart, D.T.T.; Wassenaar, L.I.; Martin, T.G.; Hobson, K.A.; Wunder, M.B.; Norris, D.R. Verfolgung der generationenübergreifenden Besiedlung der Brutgebiete durch Monarchfalter im Osten Nordamerikas. *B* **2013**, *280*, 20131087. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2013.1087>.
27. Attisano, A.; Tregenza, T.; Die Gattung ist in der Gattung "Homo" zusammengefasst. Moore, P.J. Oosorptions- und Wanderstrategie der Wolfsmilchwanze, *Oncopeltus fasciatus*. *Anim.* **2013**, *86*, 651–657. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2013.07.013>.
28. Weidel, H. Die Verteilung des Aeroplanktons über Schleswig-Holstein. Doctoral Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Kiel, Germany, 2008. Available online: [https://macau.uni-kiel.de/receive/diss\\_mods\\_00003018](https://macau.uni-kiel.de/receive/diss_mods_00003018) (accessed on 20 November 2022).
29. Johnson, C.G. Die Verteilung von Insekten in der Luft und die empirische Beziehung von Dichte zu Höhe. *J. Anim. Ecol.* **1957**, *26*, 479–494. <https://doi.org/10.2307/1760>.
30. Johnson, C.G. *Migration und Verbreitung von Insekten durch Flucht*; Methuen: London, Großbritannien, 1969.
31. Hallmann, C.A.; Sorg, M.; Jongejans, E.; Siepel, H.; Hofland, N.; Schwan, H.; Stenmans, W.; Müller, A.; Sumser, H.; Hörren, T.; et al. Mehr als 75 Prozent Rückgang der gesamten fliegenden Insektenbiomasse in Schutzgebieten über 27 Jahre. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0185809, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>.
32. Wilcox, B.; Weiß, E. Computergestützte Analyse von Insektenaufprallmustern auf Rotorblättern von Windkraftanlagen. *Windenergie* **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.; Weiß, E.B.; Maniaci, D.C. Rauheitsempfindlichkeitsvergleiche von Windturbinenblattprofilen, 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) (abgerufen am 20. November 2022).
34. Sánchez-Bayo, F.; Wyckhuys, K. Weltweiter Rückgang der Entomofauna: Ein Überblick über ihre Treiber. *Biol. Konservierung* **2019**, *232*, 8–27, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>.
35. Corten, G.P. Strömungstrennung an Rotorblättern von Windkraftanlagen. Ph.D. Diplomarbeit, 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 Windkraftanlagen halbieren. *Nature* **2001**, *412*, 41–42. <https://doi.org/10.1038/35083698>.
37. Ehrmann, R.S.; Wilcox, B.; Weiß, E.B.; Maniaci, D.C. Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Leistung von Windkraftanlagen, SANDIA Report SAND2017-10669; Sandia National Laboratories: Albuquerque, NM, USA, 2017. Online verfügbar: [http://energy.sandia.gov/wpcontent/uploads/2017/10/LEE\\_Ehrmann\\_SAND2017-10669.pdf](http://energy.sandia.gov/wpcontent/uploads/2017/10/LEE_Ehrmann_SAND2017-10669.pdf) (abgerufen am 20. November 2022).
38. Dalili, N.; Edrissy, A.; Carriveau, R. Ein Überblick über oberflächentechnische Aspekte, die für die Leistung von Windkraftanlagen von entscheidender Bedeutung sind. *Erneuern. Stützen. Energy Rev.* **2009**, *13*, 428–438, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.11.009>.
39. Fiore, G.; Selig, M.S. Simulation von Schäden an Windturbinenblättern durch luftgetragene Partikel. *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. Schadensminderungstechniken in Windturbinenblättern: Eine Überprüfung. *Wind Eng.* **2017**, *41*, 185–210. <https://doi.org/10.1177/0309524X17706862>.
41. Yaqub, R.; Heidary, K. Autonomes Reinigungssystem für Windturbinenblätter. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), Oshawa, ON, Kanada, 14.–17. August 2017. <https://doi.org/10.1109/SEGE.2017.8052797>.
42. Blade Cleaning – Limpieza de Palas, Quick Facts, Website. 2018. Online verfügbar: [http://www.bladecleaning.com/problematica\\_EN.htm](http://www.bladecleaning.com/problematica_EN.htm) (abgerufen am 19. Juni 2018).
43. HLS Wind, Windturbinenreinigung, Turbinenreinigung Internet-Promotion, 2019. Online verfügbar: <http://hlswind.co.uk/windturbine-cleaning/> (abgerufen am 2. Mai 2019).
44. Bundesverband Windenergie (BWE), Informationspapier – Windenergie und Insekten. 2019. Available online:

- [https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/03naturschutz/20190313\\_Infopapier\\_Windenergie\\_Insekten.pdf](https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/03naturschutz/20190313_Infopapier_Windenergie_Insekten.pdf) (abgerufen am 20. November 2022).
45. Keuper, A. Windenergie ist aktiver Umwelt- und Naturschutz. *DEWI Mag.* **1993**, *2*, 37–49. Available online: [http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Magazin\\_02/10.pdf](http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Magazin_02/10.pdf) (accessed on 20 November 2022).
  46. Hinsch, C.; Westermann, D. Rotorblattreinigung—Was Schafft der Regen, Was der Reiniger? DEWI Magazin Nr. 9. August 1996. Available online: [http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Magazin\\_09/08.pdf](http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Magazin_09/08.pdf) (accessed on 20 November 2022).
  47. Harris, M.; Hand, M.; Wrigh, A. Lidar for Turbine Control, Technical Report NREL/TP-500-39154, 2006. Online verfügbar: <https://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39154.pdf> (abgerufen 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> (abgerufen am 20. November 2022).
  49. Al Fahel, N.; Bogenschütze, C.L. Beobachtete Onshore-Niederschlagsänderungen nach der Installation von Offshore-Windparks. *Bull. Atmos. Sci. Technol.* **2020**, *1*, 179–203.
  50. Christiansen, N.; Daewel, U.; Djath, B.; Schrum, C. Entstehung großräumiger hydrodynamischer Strukturen durch atmosphärische Offshore-Windpark-Wakes. *Vorderseite. März Sci.* **2022**, *64*, 1–17. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.818501>.
  51. Roy, S.B.; Verräter, J.J. Auswirkungen von Windparks auf die Oberflächenlufttemperaturen. *USA* **2010**, *107*, 17899–17904.
  52. Zhou, L.; Tian, Y.; Baidya Roy, S.; Thorncroft, C.; Bosart, L.F.; Hu, Y. Auswirkungen von Windparks auf die Landoberflächentemperatur. *Nat. 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. *Umwelt. Res. Lett.* **2011**, *6*, 045101.
  54. Müller, L.M.; Keith, D.W. Klimatische Auswirkungen der Windkraft. *Joule* **2018**, *2*, 2618–2632.
  55. Akhtar, N.; Geyer, B.; Rockel, B.; Sommer, P.S.; Schrum, C. Der beschleunigte Einsatz von Offshore-Windenergie verändert das Windklima und reduziert zukünftige Stromerzeugungspotenziale. *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 1–12.
  56. Bichet, A.; Wild, M.; Folini, D.; Schär, C. Ursachen für dekadische Schwankungen der Windgeschwindigkeit über Land: Sensitivitätsstudien mit einem globalen Klimamodell. *Geophys. Res. Lett.* **2012**, *39*, L11701.
  57. Huang, J.-B.; Lou, P.-K.; Sonne, H.-W.; Luo, Y.; Zhao, Z.-C. Numerische experimentelle Studie zu den möglichen 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. Der Einfluss von Großwindkraft auf das globale Klima. *USA* **2004**, *101*, 16115–16120.
  59. Sánchez-Lozano, J.M.; García-Cascales, M.S.; Lamata, M.T. Identifizierung und Auswahl potenzieller Standorte für die Entwicklung von Onshore-Windparks in der Region Murcia, Spanien. *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. Kategorisierung und Analyse relevanter Faktoren für optimale Standorte in Onshore- und Offshore-Windenergieanlagen: Ein taxonomischer 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-basierte MCDM-Lösung für die optimale Auswahl von Offshore-Windstandorten: Der Fall Golf von Maine. *Erneuern. Energie* **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. Terrestrische Stillbildung wird sich im 21. Jahrhundert fortsetzen. *Res. Sq.* **2021**, *Preprint*. <https://doi.org/>
  63. Zhang, Z.; Wang, K. Beruhigung und Wiederherstellung der Oberflächenwindgeschwindigkeit basierend auf Beobachtung, Reanalyse und geostrophischer Windtheorie über China von 1960 bis 2017. *J. Clim.* **2020**, *33*, 3989–4008.
  64. Arbinge, P. Die Auswirkungen auf die Geräuschemission von Windkraftanlagen durch Eisansammlung an Rotorblättern. Harvard 2012. Online verfügbar: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:605419/FULLTEXT01.pdf> (abgerufen am 20. November 2022).
  65. Maijala, P.; Turunen, A.; Kurki, I.; Vainio, L.; Pakarinen, S.; Kaukinen, C.; Lukander, K.; Tiittanen, P.; Yli-Tuomi, T.; Taimisto, P.; et al. Infraschall erklärt keine Symptome im Zusammenhang mit Windkraftanlagen. *Hrsg. Gov. Anal. Assess. Res. Act.* **2020**, *34*, 1–155. Online verfügbar: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-907-3> (ab 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.; Schreckenber, D.; et al. Lärmwirkungen von Infraschallimmissionen, UBA-Publikationen, Text 163/2020, ISSN 1862-4804. Available online: (<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/laermwirkungen-von-infraschallimmissionen> (accessed on 20 November 2022)).
  67. Schmidt, J.H.; Klokner, M. Gesundheitliche Auswirkungen im Zusammenhang mit der Lärmbelastung von Windkraftanlagen: Eine systematische Übersicht. *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. Available online: [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) (accessed on 20 November 2022).

- 
69. Chiu, C.H.; Lung, S.C.C.; Chen, N.; Hwang, J.S.; Tsou, M.C.M. [Auswirkungen von niederfrequentem Lärm von Windkraftanlagen auf die Herzfrequenzvariabilität bei gesunden Personen]. *Sci Rep* **2021**, *11*, 17817. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97107-8>.
  70. Maijala, P.M.; Kurki, I.; Vainio, L.; Pakarinen, S.; Kuuramo, C.; Lukander, K.; Virkkala, J.; Tiippana, K.; Stickler, E.A.; Sainio, M. Belästigung, Wahrnehmung und physiologische Auswirkungen von Infraschall von Windkraftanlagen. *J. Acoust. Soc. Am.* **2021**, *149*, 2238. <https://doi.org/10.1121/10.0003509>.
  71. van Kamp, I.; van den Berg, F. Gesundheitliche Auswirkungen im Zusammenhang mit Windkraftanlagenlärm, einschließlich niederfrequentem Schall und Infraschall. *Acoust. Aust.* **2018**, *46*, 31–57. <https://doi.org/10.1007/s40857-017-0115-6>.
  72. van Kamp, I.; van den Berg, F. Gesundheitliche Auswirkungen auf den Sound von Windkraftanlagen : Ein Update. *J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 9133. <https://doi.org/10.3390/ijerph18179133>.
  73. Crichton, F.; Chapman, S.; Cundy, T.; Petrie, K.J. Der Zusammenhang zwischen gesundheitlichen Beschwerden und Windkraftanlagen: Unterstützung für die Nocebo-Erwartungshypothese . *Vorder-. Public Health* **2014**, *2*, 220. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2014.00220>.
  74. Bailey, H.; Brooks, K.L.; Thomson, P.L. Bewertung der Umweltauswirkungen von Offshore-Windparks :Lessonslearned und Empfehlungen für die Zukunft. *Aquat. Biosyst.* **2014**, *10*, 8. <https://doi.org/10.1186/2046-9063-10-8>.