

Windenergieanlagen und Gesundheit

Eine kritische Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Literatur

Robert J. McCunney, MD, MPH, Kenneth A. Mundt, PhD, W. David Colby, MD, Robert Dobie, MD,
Kenneth Kaliski, BE, PE und Mark Blais, PsyD

Zielsetzung: Dieser Artikel setzt sich mit der Literatur zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Windenergieanlagen auseinander. **Methoden:** Untersucht wurde die Literatur zu Schallmessungen in der Nähe von Windenergieanlagen, zu epidemiologischen und experimentellen Studien sowie zu mit Reizbarkeit im Zusammenhang stehenden Faktoren. **Ergebnisse:** 1.) Infraschallgeräusche in der Nähe von Windenergieanlagen überschreiten nicht die Hörgrenze. 2.) Epidemiologische Studien haben Zusammenhänge zwischen dem Leben in der Nähe von Windenergieanlagen und verstärkter Reizbarkeit gezeigt. 3.) Infraschall- und Tieffrequenzgeräusche verursachen für sich genommen keine Gesundheitsrisiken. 4.) Reizbarkeit steht stärker mit individuellen Merkmalen als mit den von Windenergieanlagen verursachten Geräuschen im Zusammenhang. **Diskussion:** Zu weiteren Themenbereichen zählen eine erweiterte Schallcharakterisierung, die Analyse vorhergesehener Schallwerte im Vergleich mit den nach der Installation gemessenen Werten, Langzeitgesundheitsbeurteilungen vor und nach der Installation, Experimente mit gegenüber dem Auftreten von Infraschall „verblindeten“ Teilnehmern sowie verbesserte Messverfahren zur Bewertung von Reizbarkeit.

Die Entwicklung erneuerbarer Energien, einschließlich Wind-, Solar- und Biomasseenergien, geht mit dem Bewusstsein für mögliche umweltbezogene Gesundheitsrisiken einher. Menschen, die in der Nähe von Windenergieanlagen wohnen, haben Gesundheitsbedenken aufgrund der durch den Betrieb dieser Anlagen hervorgerufenen Geräuschentwicklung geäußert. Der Zusammenhang vom Betrieb von Windenergieanlagen und der

Gesundheit der Bevölkerung wurde auch bereits in einer Reihe von Richtlinien, Bestimmungen und Rechtsstreiten untersucht und thematisiert.

Mithilfe dieser Auseinandersetzung soll versucht werden, die von Fachleuten begutachtete Literatur zur Auswertung potenzieller Gesundheitsauswirkungen auf die Bevölkerung zu beurteilen, die in der Nähe von Windenergieanlagen lebt. Sie umfasst Analysen und Kommentare zu den wissenschaftlichen Nachweisen für mögliche Auswirkungen auf die Gesundheit, wie Stress, Reizbarkeit, Schlafstörungen und andere, die mit dem Leben in der Nähe von Windenergieanlagen im Zusammenhang stehen. Außerdem befasst sich dieser Artikel mit den spezifischen Bestandteilen der Schallentwicklung durch Windenergieanlagen, wie Infraschall- und Tieffrequenzgeräuschen sowie ihre möglichen Auswirkungen auf die Gesundheit.

In diesem Artikel wird der Versuch unternommen, die folgenden Fragen zum Betrieb von Windenergieanlagen und dessen Auswirkungen auf die Gesundheit zu klären:

1. Liegen ausreichende wissenschaftliche Nachweise für den Rückschluss vor, dass der Betrieb von Windenergieanlagen die Gesundheit der Bevölkerung negativ beeinflusst? Sofern dem so ist, wodurch könnte diese Beeinflussung entstehen und wie ließe sie sich verhindern?
2. Liegen ausreichende wissenschaftliche Nachweise für den Rückschluss vor, dass der Betrieb von Windenergieanlagen bei der in der Nähe wohnenden Bevölkerung unter Umständen zu psychischem Stress, zu Reizbarkeit und zu Schlafstörungen führt? Und führen diese Auswirkungen zu einer nachteiligen Beeinflussung der Gesundheit? Sofern dem so ist, wodurch könnte diese Beeinflussung entstehen und wie ließe sie sich verhindern?
3. Liegen Nachweise dafür vor, dass bestimmte durch den Betrieb von Windenergieanlagen verursachte Geräusche, wie Infraschall- oder Tieffrequenzgeräusche für sich genommen potenzielle Auswirkungen auf die Gesundheit zeigen, die nicht mit anderen Quellen von Umgebungslärm im Zusammenhang stehen?

Die Koautoren weisen aufgrund ihrer Ausbildung und beruflichen Erfahrung Kompetenz in den Bereichen Umweltmedizin, Akustik, Epidemiologie, Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Psychologie und allgemeines Gesundheitswesen auf.

Frühere Artikel zum Betrieb von Windenergieanlagen und den damit potenziell einhergehenden gesundheitlichen Auswirkungen auf die Bevölkerung wurden bereits in der von Fachleuten kommentierten Literatur¹⁻⁶ von Landes- und Bezirksregierungen (Massachusetts, USA [2012] und Australien [2014]) sowie von Handelsverbänden publiziert.⁷

Dieser Artikel wurde in die folgenden fünf Abschnitte unterteilt:

1. Schallentwicklung: Insbesondere hinsichtlich der Art von Schall,

Publikation des Department of Biological Engineering (Dr. McCunney), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts (USA), des Department of Epidemiology (Dr. Mundt), Environ International, Amherst, Massachusetts (USA), Travel Immunization Clinic (Dr. Colby), Middlesex-London Health Unit, London, Ontario (Kanada), Dobie Associates (Dr. Dobie), San Antonio, Texas (USA), Environment, Energy and Acoustics (Mr. Kaliski), Resource Systems Group, White River Junction, Vermont (USA) sowie dem Psychological Evaluation and Research Laboratory (Dr. Blais), Massachusetts General Hospital, Boston, Massachusetts (USA). Finanziert wurde das Projekt von der Canadian Wind Energy Association (CanWEA), und zwar mithilfe einer Subvention an das Department of Biological Engineering des Massachusetts Institute of Technology (MIT). Gemäß den Richtlinien des MIT haben sich keine Mitarbeiter oder Mitglieder der CanWEA an redaktionellen Entscheidungen oder Überarbeitungen des Manuskripts beteiligt. Dr. McCunney, Dr. Mundt, Dr. Colby und Dr. Dobie sowie Herr Kaliski haben sowohl in den USA als auch in Kanada in der Vergangenheit bereits als Experten in Anhörungen zu Umweltfragen ausgesagt. Das Massachusetts Institute of Technology führte eine unabhängige Überprüfung des endgültigen Manuskripts durch, um die akademische Unabhängigkeit des Kommentars sicherzustellen und Voreingenommenheiten bei der Interpretation der Literatur zu beseitigen. Außerdem erhielten alle sechs Koautoren das gesamte Manuskript, das sie zur Einarbeitung ihrer Kommentare an den Hauptautor zurückgaben.

Die Autoren erklären, dass es keine Interessenkonflikte gebe.

Zu diesem Artikel sind weitere Inhalte in digitaler Form vorhanden. Die Zitierung von URLs erfolgt im gedruckten Text und ist in den HTML- und PDF-Versionen dieses Artikels auf der Website des Journals unter (www.joem.org) enthalten.

Korrespondenzanschrift: Robert J. McCunney, MD, MPH, Department of Biological Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Ave, 16-771, Cambridge, MA 02139 (USA) (mccunney@mit.edu).

Copyright © 2014, American College of Occupational and Environmental Medicine

Dok.-ID: 10.1097/JOM.0000000000000313

- die durch den Betrieb von Windenergieanlagen verursacht wird, wie dieser Schall gemessen wird und wie Schallmessungen bei Windenergieanlagen durchgeführt werden.
2. Epidemiologische Studien bei Bevölkerungsgruppen, die in der Nähe von Windenergieanlagen leben.
 3. Mögliche Auswirkungen der vom Betrieb von Windenergieanlagen ausgehenden Schallentwicklung auf den Hals-Nasen-Ohren-Bereich.
 4. Mögliche psychische Auswirkungen durch den Betrieb von Windenergieanlagen und Diskussion der Auswirkungen ständiger Reizbarkeit auf die psychische Gesundheit.
 5. Berichte von Regierungsstellen und anderen Organisationen zum Betrieb von Windenergieanlagen.

Methoden

Zur Feststellung bereits veröffentlichter Forschungsergebnisse zum Betrieb von Windenergieanlagen und dessen Auswirkungen auf die Gesundheit wurden die folgenden Schritte unternommen:

1. Zunächst wurde eine Anfrage bei PubMed durchgeführt, der Datenbank der National Library of Medicines (staatliche medizinische Bibliothek in den USA) mit über 5.500 indexten Fachjournale zu Wissenschafts- und Gesundheitsthemen sowie über 21 Millionen Zitierungen, um Fachpublikationen zum Betrieb von Windenergieanlagen und dessen Auswirkungen auf die Gesundheit festzustellen und zu beurteilen. Als Suchbegriffe wurden verwendet: Windenergieanlagen, Windenergieanlagen und Auswirkungen auf die Gesundheit, Infraschall, Infraschall und Auswirkungen auf die Gesundheit, Tieffrequenzschall, Windenergieanlagen-Syndrom, Windenergieanlagen und Reizbarkeit sowie Windenergieanlagen und Schlafstörungen.
2. Anschließend erfolgte eine Google-Suche nach Berichten von Regierungsstellen und nichtstaatlichen Organisationen zum Betrieb von Windenergieanlagen und der Exposition gegenüber Umgebungslärm (siehe ergänzende digitale Inhalte, Anhang 1, unter <http://links.lww.com/JOM/A179>).
3. Nach diesen Recherchen und der Feststellung vorhandener Publikationen wurde das aufgefundene Material in die fünf unten aufgeführten Hauptbereiche unterteilt (siehe Abschnitt D) und an die einzelnen Autoren der Abschnitte zur Überprüfung und Analyse übergeben. Jeder der Autoren führte dann eine eigene Untersuchung durch. Dazu zählte auch eine Prüfung der in den festgestellten Publikationen enthaltenen Literaturhinweise. Dabei wurden die Publikationen zur weiteren Überprüfung und Kommentierung ausgewählt, die sich auf Expositionen und gesundheitliche – epidemiologische oder experimentelle – Auswirkungen auf die Gesundheit bezogen oder Primärbeurteilungen zu Expositionen enthielten.
4. Aufgefundene Studien wurden in die folgenden Bereiche unterteilt:
 - I. Schall, seine Komponenten und die Messungen vor Ort in der Nähe von Windenergieanlagen.
 - II. Epidemiologie.
 - III. Auswirkungen der Schallkomponenten, wie Infraschall oder Tieffrequenzschall, auf die Gesundheit.
 - IV. Psychische Faktoren im Zusammenhang mit Reaktionen auf Windenergieanlagen.
 - V. Berichte von Regierungsstellen und anderen Organisationen.
5. Den Autoren sind auch weitere Berichte und Kommentare bekannt, die nicht in der wissenschaftlichen oder medizinischen Fachliteratur veröffentlicht wurden und die ebenfalls Bedenken über mögliche Gesundheitseinschränkungen bei Personen

thematisieren, die in der Nähe von Windenergieanlagen leben. Diese Berichte beschreiben relativ häufige Symptome mit zahlreichen Ursachen, wie Kopfschmerzen, Tinnitus und Schlafstörungen. Aufgrund der Schwierigkeiten nicht von Fachleuten überprüfte Publikationen wie diese umfassend zu erkennen sowie der unsicheren Qualitätsstufe, die mit solchen Veröffentlichungen einhergeht, wurden diese – mit Ausnahme einiger Bücher und Berichte von Regierungsstellen, die eindeutig zu identifizieren waren – nicht in die Analyse aufgenommen. Einen ähnlichen Ansatz zum Ausschluss von nicht wissenschaftlich überprüfter Literatur bei wissenschaftlichen Beurteilungen verfolgt die Internationale Krebsforschungsagentur (IARC – International Agency for Research on Cancer) der Weltgesundheitsorganisation (WHO – World Health Organization) bei ihren Überlegungen zur Feststellung von Karzinogenen beim Menschen.⁸ Allerdings würdigt die IARC auch die nicht in wissenschaftlichen Veröffentlichungen dargestellten Expositionsbeurteilungen kritisch, sofern diese in angemessener Qualität und nach internationalen Standards und Richtlinien durchgeführt wurden. Die IARC setzt diese Richtlinie bei Expositionsbeurteilungen deshalb so um, weil viele dieser Arbeiten zwar wertvolle Daten zu aufkommenden Gesundheitsrisiken durch die Exposition gegenüber einer Gefährdung enthalten, aber nicht regelmäßig veröffentlicht werden. Auch das USA National Toxicology Program (staatliches Toxikologie-Programm in den USA) beschränkt seine kritischen Analysen zu potenziellen Karzinogenen auf von Experten überprüfte Literatur. In dieser Veröffentlichung wird die Auffassung vertreten, dass hier – wegen der erheblichen Auswirkung wissenschaftlicher Studien auf das allgemeine Gesundheitswesen – in jedem Fall eine von Fachleuten überprüfte Literaturquelle als Grundlage herangezogen werden muss. Daher werden in dieser Arbeit, von Beurteilungen zu Expositionen abgesehen, ausschließlich wissenschaftlich überprüfte Studien berücksichtigt.

ERGEBNISSE

Schallcharakterisierung bei Windenergieanlagen

Dieser Teil der Arbeit konzentriert sich auf Studien, in denen die Schallentwicklung in der Nähe von Windenergieanlagen gemessen wurde. Darüber hinaus wird der Einsatz von Schallpegelmodellen bei Dosis-Wirkungs-Studien besprochen und die Literatur zur Messung der beim Betrieb von Windenergieanlagen entstehenden Infraschall- und Tieffrequenzgeräusche überprüft. Bei der Bewertung geht es um gemessene Schallpegel in Bereichen, in denen Symptome im Zusammenhang mit der Nähe zu Windenergieanlagen gemeldet wurden. Auch die zur Messung der Schallentwicklung und der Tieffrequenzgeräusche in der Nähe von Windenergieanlagen verwendeten Verfahren werden beleuchtet. Schließlich behandelt diese Veröffentlichung die Charakteristiken des von Windenergieanlagen erzeugten Schalls, die in der Nähe von vorhandenen Windenergieanlagen gemessenen Schallpegel sowie die Reaktion von Menschen auf die unterschiedlichen Schallpegel und die Schallcharakteristiken von Windenergieanlagen. Besondere Aufmerksamkeit erhalten hier die Herausforderungen und Methoden bei der Messung des von Windenergieanlagen erzeugten Schalls sowie des Tieffrequenzschalls (20 bis 200 Hz) und des Infraschalls (unter 20 Hz).

Der von Windenergieanlagen erzeugte Schall besteht aus dem von beweglichen Teilen verursachten Schall und aus dem Schall, den diese Teile bei der Interaktion mit den unbeweglichen Teilen der Windenergieanlage verursachen (Abb. 1). So können die mechanischen Bauteile in der Gondel sowohl Schall als auch

Schwingungen erzeugen, die von der Struktur, einschließlich des Turms, abgestrahlt werden. Die Rotorblätter weisen mehrere Komponenten auf, die aerodynamischen Schall hervorrufen, wie beispielsweise die Vorderkante der Blätter, die bei der Rotation den ersten Kontakt mit dem Wind hat, oder die Hinterkante und die Blattspitze. Auch die Interaktionen zwischen den Rotorblättern und dem Turm, insbesondere dann, wenn die Blätter im Windschatten des Turms liegen, können Infraschall und Tieffrequenzschall erzeugen. Bei Großwindanlagen wird diese Turmausrichtung nicht mehr verwendet.⁹

Schallpegel und Frequenz

Schall ist im Wesentlichen durch seine Tonhöhe oder Frequenz, gemessen in Hertz (Hz), und seinen Pegel, gemessen in Dezibel (dB), charakterisiert. Die Schallfrequenz entspricht der Häufigkeit pro Sekunde, in der das den Schall transportierende Medium (also die Luft, bei Windenergieanlagen) einen Kompressionszyklus durchläuft. Das normale menschliche Gehör liegt im Allgemeinen im Bereich 20 bis 20.000 Hz. Ein Klavier mit 88 Tasten umfasst beispielsweise einen Frequenzbereich von ca. 27,5 bis 4.186 Hz, das mittlere C liegt bei 261,6 Hz. Wie in der Musik können auch Frequenzbereiche als „Oktaven“ angegeben werden. Dabei ist die Frequenz in der Mitte jedes Oktavbands doppelt so hoch wie die Mitte des darunter liegenden Oktavbands (wird auch als „1/1 Oktavband“ geschrieben). Kleinere Unterteilungen können auch verwendet werden, wie „1/3 Oktavband“ und „1/12 Oktavband“. Der Schalldruckpegel jedes Frequenzbands wird in Dezibel (dB) angegeben.

Zur Darstellung des gesamten Schallpegels in einem einzelnen Wert werden die Schallpegel jedes Frequenzbands logarithmisch addiert. Da das menschliche Gehör sehr tiefe und sehr hohe Frequenzen relativ schlecht wahrnimmt, werden vor der Addition zum Gesamtschallpegel frequenzspezifische Anpassungen oder Gewichtungen des ungewichteten Schallpegels vorgenommen. Die häufigste hiervon ist die A-Bewertung, mit der die menschliche Reaktion auf verschiedene relativ tiefe Frequenzen simuliert wird (40 Phon oder ca. 50 dB). Abb. 2 zeigt einige Beispiele für Schallpegel mit A-Bewertung.

In der Literatur werden auch andere Bewertungen genannt, wie die C-Bewertung, die relativ kontrastarm am hörbaren Spektrum verläuft, die G-Bewertung, die die menschliche Wahrnehmung und die störende Wirkung von Schall simuliert, der ganz oder teilweise im Bereich von 1 bis 20 Hz liegt sowie die Z-Bewertung, die keine Veränderung bewirkt. Die Schallbewertung wird nach der Angabe der dB-Einheit in Klammern angegeben. So wird ein mit der A-Bewertung modifizierter Schallpegel von 45 dB mit „45 dBA“ oder „45 dB(A)“ angegeben. Fehlt diese Bewertungsangabe, ist die Bewertung entweder impliziert oder die Schallpegelangabe ist unbewertet.



Abb. 1: Schemazeichnung einer heutigen Windenergieanlage

Hub	Nabe
Hub-height	Nabenhöhe
Nacelle	Gondel
Tower	Turm
Direction of rotation	Drehsinn
Rotor diameter	Rotordurchmesser
Blade trailing edge	Hinterkante
Blade leading edge	Vorderkante
Blade tip	Blattspitze
Base	Sockel



Abb. 2: Beispiele für Schalldruckpegel mit A-Bewertung

Sound pressure level (dBA)	Schalldruckpegel (dBA)
Threshold of pain and permanent damage	Schmerzgrenze / Dauerschäden
Snowmobile (operator)	Schneemobil (für den Fahrer)
NIOSH recommended 8 h exposure limit	NIOSH empfiehlt Expositions-grenze von 8 h
Vacuum cleaner (operator)	Staubsauger (für den Bediener)
Car 30 mph (at 50 feet)	Pkw mit 50 km/h (in ca. 15 m)
Conversational speech	normale Unterhaltung
Field with insects	Wiese mit Insekten
Library	Bibliothek

Neben dem Gesamtschallpegel ist beim Schall von Windenergieanlagen unter Umständen auch die

Amplitudenmodulation oder die tonale Komponente zu berücksichtigen. Die Amplitudenmodulation ist ein regelmäßiger Zyklus im Schallpegel eines reinen Tons oder Breitbandschalls. Eine übliche Windenergieanlage mit einem dreiflügeligen Rotor, die mit 15 Umdrehungen pro Minute betrieben wird, weist eine Modulationsperiode oder Zykluslänge von ca. 1,3 Sekunden auf. Töne sind Frequenzen oder schmale Frequenzbänder, die viel lauter sind als die benachbarten Frequenzen im Schallspektrum. Es gibt mehrere Normen, mit denen hervortretende Töne festgestellt werden können, einschließlich ANSI S12.9, Teil 4 und IEC 61400-11. Auch der Anteil an hoch-, mittel- oder tieffrequenten Tönen sowie zahlreiche bestimmende Faktoren des den Schall Wahrnehmenden können darüber entscheiden, wie der Schall empfunden wird. Da folglich nicht nur die Gesamtschallpegel quantifiziert werden können, wurden in Studien zusätzlich die Amplitudenmodulation, die hervortretenden Töne und der Spektralkontext gemessen.

Schalleistung und Schalldruckpegel bei Windenergieanlagen

Der Schalleistungspegel ist die von einer Schallquelle abgestrahlte Schallenergie. Dieser ist nicht von der spezifischen Umgebung der Schallquelle oder dem Standort des Empfängers relativ zur Schallquelle abhängig. Der Schalldruckpegel (SDP), der mithilfe eines Schallpegelmessers an einer bestimmten Position gemessen wird, ist abhängig von der in der Nähe abgestrahlten Schalleistung einer Schallquelle und insbesondere von der Umgebung und dem Standort des Empfängers relativ zur Schallquelle bzw. zu den Schallquellen.

Von der Charakteristik her ist der von Windenergieanlagen erzeugte Schall normalerweise ein Breitbandschall, dessen größte Schalleistung in tiefen Frequenzen liegt (also unter 1.000 Hz). Der von Windenergieanlagen erzeugte Schall liegt zwar unterhalb des

25 Hz, 1/3 Oktavbands, aber Schalleistungsdaten unterhalb dieser Frequenz werden selten veröffentlicht. Die meisten größeren Windenergieanlagen von Stromversorgern weisen Schalleistungspegel zwischen 104 und 107 dBA auf. Von Windenergieanlagen erzeugte, gemessene Schallpegel hängen von mehreren Faktoren ab, einschließlich den herrschenden Witterungsbedingungen, der Anzahl und dem Layout der Anlagen, der örtlichen Topografie, der einzelnen gemessenen Anlage, dem Abstand zwischen den Anlagen, dem Empfänger und der örtlichen Flora. Allein die meteorologischen Verhältnisse können zu Abweichungen in den Schallpegeln von 7 bis 14 dB führen.¹⁰ Abb. 3 zeigt Beispiele für von einer Windenergieanlage erzeugte und mit drei Schalleistungen in unterschiedlichen Entfernungen gemessene SDPs nach der Berechnung mit ISO 9613-2.¹¹ Messergebnisse von Schallpegeln mit A-, C- und G-Bewertung haben gezeigt, dass der von Windenergieanlagen erzeugte Schall im Verhältnis zur Entfernung logarithmisch gedämpft wird.¹²

Bei Lärmnormen stellten Hessler und Hessler¹³ fest, dass die Regierungen von Ländern außerhalb der USA im arithmetischen Mittel für den Tag 45 dBA und für die Nacht 40 dBA vorsahen. In den USA gilt für die Nacht eine Standortnorm mit einer durchschnittlichen Lärmbeschränkung von 47,7 dBA. Die Messdaten dieser Pegel können allerdings variieren. Allgemein verwendete Messdaten sind der Tag-Abend-Nacht-Lärmindex (L_{DEN} – day-evening-night), der Tag-Nacht-Lärmindex (L_{DN} – day-night), der energieäquivalente Lärmindex (L_{EQ} – equivalent average), der im Zeitraum zu 90 % überschrittene Lärmindex (L_{90}) und der mittlere Lärmindex (L_{50}). Die genaue Anwendung, mit der die Messungen durchgeführt werden sowie der Messzeitraum sind verschieden. Damit sind Schallpegelgrenzen praktisch betrachtet noch viel unterschiedlicher als die reinen numerischen Daten. Der Lärmindex

L_{EQ} ist einer der häufiger verwendeten Messwerte. Er ist der logarithmische Durchschnitt der Quadrate des relativen Schalldrucks über einen bestimmten Zeitraum. Dies führt zu einer höheren Bewertung lauterer Geräusche.

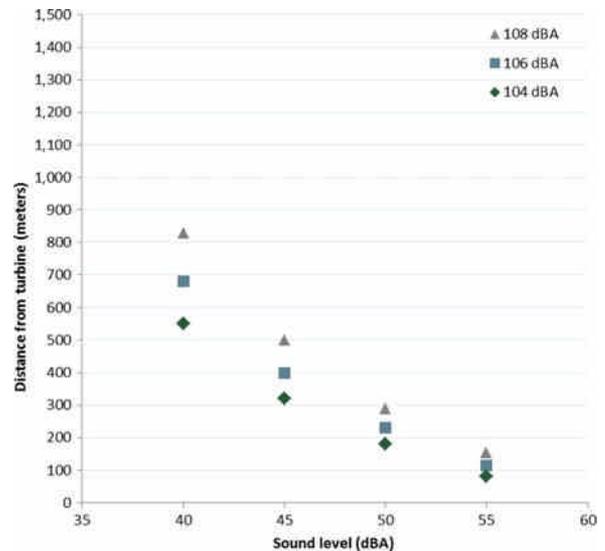


Abb. 3: Schallpegel bei unterschiedlichen Abständen und Schalleistungspegeln (RSG-Modell anhand ISO 9613-2)

Distance from turbine (meters)	Abstand zur WEA (in Meter)
Sound level (dBA)	Schalleistungspegel (dBA)

Bedingt durch zahlreiche Veränderliche, die den Schalldruckpegel von Windenergieanlagen am Empfänger beeinflussen, können die gemessenen Pegel dramatisch abweichen. In einem Windpark in Texas (USA) maßen O’Neal et al.¹⁴ die Schallpegel der nächstgelegenen Windenergieanlage in 305 m Entfernung und vier weiterer Anlagen in 610 m Entfernung. Die Werte betragen 50 bis 51 dBA und 63 dBC (L_{EQ} , 10 Minuten). Dabei erzeugten die Anlagen genug Leistung, um den maximalen Schalleistungspegel zu erreichen. Bei der gleichen Prüfung wurden in einem Haus, 290 m von der nächstgelegenen und 610 m von den anderen vier Windenergieanlagen¹⁵ entfernt, Schallpegel von 27 dBA und 47 dBC (L_{EQ} , 10 Minuten) gemessen (siehe Abb. 4).

Bullmore et al.¹⁶ maßen die Schallpegel von Windenergieanlagen aus einem Abstand von 100 bis 754 m und stellten bei unterschiedlichen Windbedingungen Schallpegel von 40 bis 55 dBA fest. Bei üblichen Abständen zum Empfänger (über 300 m) wurde der Schall bei Frequenzen über 1,25 kHz, 1/3 Oktavband auf einen Wert unter der Hörgrenze gedämpft. Bei den hier genannten Studien wurden die Messungen mit einem Mikrofon ca. 1,00 m bis 1,60 m über dem Boden durchgeführt.

Emissionscharakterisierung bei Windenergieanlagen Tieffrequenz- und Infraschall

Im Allgemeinen wird Tieffrequenzschall als Schall im Bereich von 20 bis 200 Hz definiert. Infraschall ist Schall unter 20 Hz. Anhand von in der Nähe von Windenergieanlagen (< 500 m) durchgeführten Tieffrequenz- und Infraschallmessungen wird normalerweise der von Windparks erzeugte Infraschall nachgewiesen. Dieser liegt aber nicht im hörbaren Bereich (nach ISO 226 oder nach den Publikationen der Autoren^{12, 15, 17-21, 149}). In einer Studie wurden in Entfernungen von 360 m und 200 m zu einem Windpark Schallpegel von 61 dBG bzw. 63 dBG festgestellt. Die

Hörgrenze von G-bewertetem Schallpegeln liegt bei 85 dBG. In der gleichen Arbeit wurden Infraschallpegel von 69 dBG in einer Entfernung von 250 m zu einer Klippe an der Küste und von 76 dBG in der Innenstadt von Adelaide, Australien gemessen.¹⁸ In einer anderen Studie wurde festgestellt, dass sogar bei Entfernungen von unter 136 m Infraschallpegel maximal 80 dBG betragen. Bei typischeren Abständen zum Empfänger (also von über 300 m) lagen die Infraschallpegel bei maximal 72 dBG. Dies entspricht A-bewerteten Schallpegeln von 56 bzw. 49 dBA, also über den gängigen bestehenden Schallgrenzwerten örtlich geltender Bestimmungen.¹²

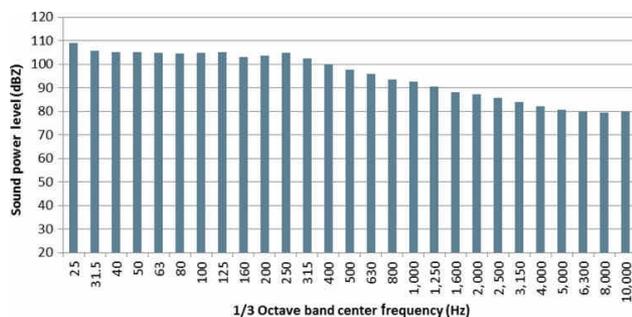


Abb. 4: Schalleistung einer Siemens SWT 2.3-93 (TX)-Windenergieanlage¹⁵

Sound power level (dBZ)	Schalleistungspegel (dBZ)
1/3 Octave band center frequency (Hz)	1/3 Oktavenband, Mittelfrequenz (Hz)

In größeren Entfernungen von Windparks (1,5 km) ist der Infraschall nicht höher als der von örtlichen Windbedingungen verursachte Pegel. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, bei den Messungen der Schallpegel von Windenergieanlagen die Pseudoschalldämmung entsprechend zu berücksichtigen.²²

Tieffrequenter Schall in der Nähe von Windparks ist normalerweise hörbar. Je nach Abstand zwischen den Windenergieanlagen und dem Messstandort überschreiten die Pegel hier ggf. die Hörgrenze im Bereich von 25 bis 125 Hz.^{12, 15, 19, 20, 23} Abb. 5 zeigt das Frequenzspektrum eines Windparks in etwa 1 km Entfernung, verglichen mit einem Lkw in ca. 15 m Entfernung, einem Schwarm Insekten oder Vögel, dem Wind in Blättern von Büschen oder Bäumen und der Hörgrenze nach ISO 387-7.

Amplitudenmodulation

Die Schallemissionen von Windenergieanlagen ändern sich mit der Drehgeschwindigkeit der Rotorblätter und werden zum Teil auch von der Amplitudenmodulation beeinflusst, einer Breitbandoszillation des Schallpegels. Der Zyklus entspricht im Allgemeinen der Häufigkeit des Rotorblattdurchgangs. Die Modulation liegt normalerweise in den 1/1 Oktavbändern zwischen 125 Hz und 2 kHz. Die Fluktuationen verhalten sich in ihrer Größenordnung innerhalb des Frequenzbereichs normalerweise nicht einheitlich. Sie sind normalerweise auch gering (etwa 2 bis 4 dB), können bei A-bewerteten Pegeln aber auch auf 10 dB und in einzelnen 1/3 Oktavbändern auf 15 dB ansteigen.^{19, 24} Stigwood et al.²⁴ fanden heraus, dass sich bei mehreren Windenergieanlagen die Modulationen der einzelnen Anlagen unter Umständen häufig einander angleichen, was für 6 bis 20 Sekunden ggf. zu einem periodischen Anstieg bei der Größenordnung der Modulation führt. Bei einigen dieser Perioden gleichen sich die Modulationen der Anlagen wiederum gegenseitig aus, was den Ausschlag der Modulation dann minimiert. Dieser Effekt trat allerdings nicht immer

auf: bei dauerhaft starker Windscherung und gleichbleibend starkem Wind aus der gleichen Richtung konnte die Synchronisation der Windenergieanlagen unter Umständen mehrere Stunden anhalten.

Die Amplitudenmodulation wird durch zahlreiche Faktoren verursacht, einschließlich dem Rotorblattdurchgang vor dem Turm (Abschattung), der Schallemissionsrichtwirkung der luftdurchströmenden Blattspitzen, einer fehlerhaften Windnachführung der Rotoren (wenn die Rotoren nicht lotrecht zur Windrichtung stehen), entstehenden Anströmungsturbulenzen sowie höheren Windscherungspegeln.^{19, 24, 25} Das Maß der Amplitudenmodulation ist nicht von der Windgeschwindigkeit abhängig. Am häufigsten wird eine „verstärkte“ Amplitudenmodulation (eine Modulation mit höherem Wert) durch Wetteranomalien verursacht.¹⁹ Das Auftreten der Amplitudenmodulation ist standortabhängig. Bei einigen Standorten tritt Amplitudenmodulation kaum auf, während dieser Effekt anderenorts bei bis zu 30 % der Zeit festgestellt werden kann.¹⁰ Einige Forscher haben vermutet, dass

Amplitudenmodulation deshalb als Ursache von Klagen über Infraschall angenommen wurde, weil die Amplitudenmodulation, also eine Modulation des Breitbandschalls, mit Infraschall verwechselt wurde.¹⁹

Tonalität

Töne sind bestimmte Frequenzen oder schmale Frequenzbänder, die bedeutend lauter sind als die benachbarten Frequenzen. Windenergieanlagen erzeugen normalerweise keinen tonalen Schall, in einigen Fällen kann dies aber durchaus der Fall sein.^{20, 26} Zumeist handelt es sich um Töne im tieferen Frequenzbereich (unter 200 Hz), die von mechanischen Komponenten in der Gondel verursacht werden. Aber auch strukturelle Schwingungen des Turms und aerodynamische Anomalien der Rotorblätter²⁷ können Töne erzeugen (siehe Abb. 5).

Schallpegel in Wohngebieten, die Schallbelästigung gemeldet haben

Schwerpunkt kürzlich durchgeführter Forschungen waren die Schallpegel in und in der Nähe von Wohngebieten, deren Bewohner über die von Windenergieanlagen erzeugte Schallentwicklung geklagt hatten. Dabei wurden diese Schallemissionen als eine möglicherweise andere Art von Umgebungslärm dargestellt.²⁸ In oder in der Nähe von Wohnhäusern wurden aber bisher im Rahmen von Studien nur wenige Schallpegelmessungen durchgeführt. Es gibt mehrere Hypothesen zur Charakteristik der Beschwerden über die Schallemission von Windenergieanlagen: Hierzu zählen Infraschall²⁸, Tieffrequenztöne²⁰, Amplitudenmodulation^{19, 29} und allgemeine Schallpegel.

Allgemeine Schallpegel

Wegen der sehr unterschiedlichen Lärmempfindlichkeit von Menschen können Schallpegel bei selbstberichteter Reizbarkeit stark variieren. (Lärmempfindlichkeit und Reizbarkeit werden im weiteren Verlauf dieser Veröffentlichung näher erörtert.) So haben Menschen über Reizbarkeit geklagt, die externen Schallpegeln von 38 bis 53 dBA (L_{EQ}, 10 Minuten oder 1 Stunde) ausgesetzt waren (Department of Trade and Industry¹⁹, Walker et al.²⁸, Gabriel et al.²⁹ und van den Berg et al.^{30, 149}). Dabei wurden auch in den Häusern der Betroffenen Schallpegel mit Werten zwischen 22 und 37 dBA (L_{EQ}, 10 Minuten) festgestellt.¹⁹

Tieffrequenz- und Infraschallpegel

In einigen Fällen wurden Bedenken geäußert, dass Tieffrequenz- und Infrasschall besondere Bestandteile der Schallemission von Windenergieanlagen darstellen, die zu negativen Auswirkungen auf die Gesundheit führen.³¹ Daher konzentrierten sich die Schallpegelmessungen in Bereichen, in denen Windenergieanlagen betrieben wurden, speziell auf den tiefen Frequenzbereich, bisweilen auch auf den Infrasschallbereich.

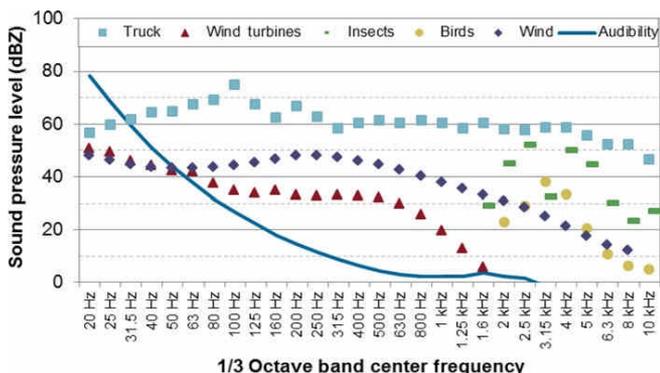


Abb. 5: Vergleich der Frequenzspektren eines in ca. 15 m vorbeifahrenden Lkw, eines Windparks in ca. 1 km Entfernung, eines Schwarms Insekten und Vögel, des Winds in Blättern und der Hörgrenze nach ISO 387-7.

[Truck = Lkw
 Wind turbines = Windpark
 Insects = Insekten
 Birds = Vögel
 Wind = Wind
 Audibility = Hörgrenze]

Sound pressure level (dBZ)	Schalldruckpegel (dBZ)
1/3 Octave band center frequency (Hz)	1/3 Oktavband mittlere Frequenz (Hz)

Der Infrasschallpegel in Wohngebieten liegt normalerweise weit unterhalb der veröffentlichten Hörgrenzen. Dies gilt auch für Personen, die besonders empfindlich auf Infrasschall reagieren. Dennoch überschreitet Tieffrequenzschall zwischen 25 und 125 Hz normalerweise die Hörgrenze.^{19, 20, 23} In einigen Fällen wurden in den Häusern von Personen, die über Gesundheitsschäden durch die räumliche Nähe zu Windenergieanlagen geklagt hatten, Oberschwingungen der Frequenz des Rotorblattdurchgangs (ca. 1 Hz, also Infrasschall) mit Schallpegeln von bis zu 76 dB gemessen. Diese liegen aber erheblich unter den veröffentlichten Hörgrenzen.²⁸

Amplitudenmodulation

Bereits in der Vergangenheit wurde Amplitudenmodulation als wesentliche Ursache für Klagen über Windenergieanlagen angesehen, wenngleich bisher nur wenige Daten vorliegen, die diese Annahme untermauern. Mit den Anwohnern eines Windparks, bei dem mehrere Beschwerden eingegangen waren, wurde unlängst eine Studie durchgeführt, die zeigte, dass die vorhergesagten Schallpegel bei den Empfängern bei maximal 33 dBA lagen. Die Anwohner wurden aufgefordert, die Geräusche zu beschreiben, die sie als störend empfanden. In 68 von 95 Fällen lag es an der Amplitudenmodulation. An die Anwohner verteilte Klangrecorder wiesen ein hohes Maß an Amplitudenmodulation nach.²⁹

Nur wenige Studien haben sich mit den Beschwerden zu den großen Windparks der Versorgungsunternehmen auseinandergesetzt, und nur bei einer wurde die Häufung der Beschwerden mit den

Schallpegeln in den Häusern der Anwohner in Beziehung gesetzt. Bei fünf Windparks im Mittelwesten der USA lag die Rate der Beschwerden der bis zu 610 m vom Rand der Anlagen entfernt lebenden Anwohner bei ca. 4 %. Mit einer Ausnahme wurden bei allen Häusern der sich Beschwerenden Schallpegel von über 40 dBA festgestellt.¹³ Zur Bewertung der Schallemissionen von Windparks verwendeten die Autoren die LA90-Kennzahlen. LA90 ist der A-bewertete Schallpegel, der in 90 % der Zeit überschritten wird. Mit dieser Kennzahl werden vom Wind und anderen Schallquellen außerhalb des Windparks verursachte kurzfristige Schallpegelspitzen ausgeschlossen.

Im Norden von Neuengland haben sich 5 % der bis zu 1.000 m von Windenergieanlagen entfernt liegenden Haushalte bei den Aufsichtsbehörden über die Schallemissionen der Anlagen beschwert.³² Dabei wurden alle Beschwerden bei der Auswertung berücksichtigt, auch die, die auf vorübergehende und später gelöste Probleme zurückzuführen waren. Ganze 48 % der Beschwerden betrafen Windparks, bei denen zumindest eine Verletzung von Lärmschutzverordnungen oder eine Abweichung von der Schallnorm festgestellt wurde. Ein Drittel der Beschwerden bezog sich dabei auf einen Windpark.

Methoden der Schallmessung

Die Zusammenstellung akkurater, vergleichbarer und sinnvoller Schallemissionsdaten ist abhängig von einer sorgfältigen und konsistenten Messmethode. Die allgemeinen Vorgaben zu den Methoden der Überwachung von Umgebungslärm sind in ANSI 12.9, Teil 2 enthalten. Diese Norm befasst sich mit den grundlegenden Anforderungen, wie beispielsweise den erforderlichen Messgeräten, den Kalibrierungsverfahren, den technischen Daten der Windschutze sowie Hinweise zur Positionierung der Mikrofone sowie zu den geeigneten meteorologischen Bedingungen. Dennoch gibt es keine Empfehlungen für die Minderung der Auswirkungen von starkem Wind (mit mehr als 5 m/s) oder für die Messung im Infrasschallbereich (unter 20 Hz).³³ Eine weitere Norm zum Thema ist IEC 61400-11, die ein Verfahren zur Bestimmung der Schalleistung einzelner Windenergieanlagen enthält. Darüber hinaus enthält diese Norm Angaben zu den Messpositionen, zur Art der erforderlichen Daten, den Analyseverfahren und den Anforderungen an die Prüfberichte sowie zur Tonhaltigkeits- und Richtwirkungsbestimmung und zu Definitionen und Beschreibungen der unterschiedlichen akustischen Parameter.³⁴ Außerdem gibt die Norm ein Verfahren für die Befestigung des Mikrofons zur Minimierung des vom Wind verursachten Pseudoschalls an, allerdings wird diese Einrichtung von einigen Spezialisten als bei Windböen unzureichend angesehen, und für Infrasschallmessungen gibt es überhaupt keine Empfehlungen.³⁵ Da das Mikrophon auf dem Boden steht, ist es für langfristige Messungen nicht geeignet.

Tieffrequenz- und Infrasschallmessung

Derzeit liegen keine Normen für die Messung der Schallemissionen von Windenergieanlagen vor, die auch den Infrasschallbereich umfassen (also Frequenzen von unter 20 Hz). Allerdings wird eine Norm in dieser Richtung gerade entwickelt (ANSI/ASA S12.9, Teil 7). Daher wurden bei allen Versuchen zur Messung von Tieffrequenz- und Infrasschall bisher entweder vorhandene Verfahren in der vorliegenden oder in abgewandelter Form verwendet oder es wurden neue Verfahren vorgeschlagen.

Das Hauptproblem bei der Messung von Tieffrequenz- und Infrasschall in der Umwelt besteht in dem vom Wind verursachten Pseudoschall, der sich aus Luftdruckfluktuationen ergibt, wenn die Luft über das Mikrophon streicht. Bei der herkömmlichen

Schallpegelüberwachung wird dieser Effekt mithilfe von Windschutzen minimiert oder dadurch, dass die bei stärkerem Wind gemessenen Daten (bis unter 5 m/s in 2 m Höhe) ignoriert werden.³⁶ Bei Windenergieanlagen, bei denen höhere Schallpegel bei Windgeschwindigkeiten von über 5 m/s auftreten, ist das keine ideale Lösung. Insbesondere bei Infraschall kann vom Wind verursachter Pseudoschall auch bei Windgeschwindigkeiten von nur 1 m/s die Messungen beeinflussen.¹² Und zahlreiche Schallpegelmessgeräte messen Infraschallfrequenzen überhaupt nicht.

Im Allgemeinen wird Infraschall mithilfe eines weiteren Windschutzes eliminiert, mit dem das Mikrofon gegen den Luftstrom stärker abgeschirmt wird.^{18, 35} Bisweilen handelt es sich dabei einfach um einen größeren Schirm, der das Mikrofon besser vor dem Luftstrom schützt.³⁵ Einer der Autoren verwendete einen Windschutz und eine Grube, um das Mikrofon zu schützen, ein weiterer nahm eine windundurchlässige Stoffbahn.³⁵ Ein Kompromiss für das in der Grube aufgestellte Mikrofon ist die Montage in Bodennähe (in eine Höhe von ca. 20 cm) und die weitgehende Verringerung von Windeinflüssen oder ein Standardbodenmikrofon auf einer Montageplatte, wie etwa in IEC 61400-11.³⁵ Die Unterschiede beim gemessenen Tieffrequenz- und Infraschall zwischen Messungen mit speziell dafür vorgesehenen Windschirmen und Messgeräten einerseits und mit Standardwindschirmen/-messeinrichtungen andererseits sind unter Umständen erheblich.^{12, 37} Bei einigen Verfahren wird die höhere Messgenauigkeit allerdings mit geringerer Genauigkeit bei höheren Frequenzen erkauft.³⁸

Zur weiteren Filterung des durch Wind verursachten Pseudoschalls schlugen einige Autoren eine Kombination von mehreren Mikrofonen und Signalverarbeitungsverfahren vor. Sinn der Signalverarbeitungsverfahren ist die Erkennung von ähnlichen Schallelementen in einem mit verschiedenen Mikrofonen einer Anordnung gemessenen Schallfeld.

Die Infraschallpegel anderer Schallquellen der Umgebung können genauso hoch sein wie die Infraschallpegel der Windenergieanlagen selbst. Eine Studie in Südaustralien über den in der Nähe und in einer bestimmten Entfernung von Windenergieanlagen gemessenen Infraschall zeigte, dass der Infraschallpegel bei Häusern in der Nähe von Windenergieanlagen nicht größer ist als der in anderen städtischen oder ländlichen Umgebungen. Der Beitrag von Windenergieanlagen zum Infraschallpegel ist unerheblich im Vergleich mit dem Hintergrundinfraschallpegel der Umgebung.²²

Schlussfolgerungen

Die Messung der Schallemissionen von Windenergieanlagen ist unter Umständen eine Herausforderung, da die Schallpegel bei stärkerem Wind und tiefen Frequenzen gemessen werden müssen. Für diese Probleme gibt es aber noch keine allgemein anerkannten Messverfahren, sodass die bei veröffentlichten Messungen verwendeten Verfahren erhebliche Abweichungen aufweisen, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse einschränkt.

Die Messungen des Tieffrequenz- und Infraschalls sowie der tonalen Schallemissionen und der Amplitudenmodulationen zeigen, dass Windenergieanlagen Infraschall emittieren, die Werte in der Nähe von Häusern der Umgebung allerdings normalerweise auch an den Stellen weit unterhalb der Hörgrenzen liegen, an denen sich Anwohner über die Emissionen beklagt haben. Der in den Schallemissionen von Windenergieanlagen häufig vorhandene Tieffrequenzschall übersteigt abhängig vom Messstandort und den Wetterbedingungen die Hörgrenze normalerweise im Bereich zwischen 25 und 125 Hz.^{12, 15, 19, 20, 23} Außerdem wurde in der Nähe von Windparks eine Amplitudenmodulation, das heißt ein wiederholter schneller (einmal pro Sekunde) Anstieg und Abfall des Breitbandschallpegels festgestellt. Die Amplitudenmodulation liegt

üblicherweise bei 2 bis 4 dB, kann aber in einigen Fällen um über 6 dB schwanken (bei A-bewerteten Schallpegeln).^{19, 24}

In einer in Alberta, Kanada, durchgeführten Studie wurden seit der ersten Inbetriebnahme einer Windenergieanlage die Klagen der Anwohner über die durch den Betrieb von Windparks verursachten Lärmemissionen untersucht. Die Windenergieleistung liegt bei über 1.100 MW, einige der Windenergieanlagen sind seit

20 Jahren in Betrieb. In diesem Zeitraum wurden fünf Beschwerden wegen Lärmemissionen bei Windparks von Versorgungsunternehmen eingereicht. Bei keiner dieser Beschwerden gab es eine Folgeklage, nachdem man sich um die Angelegenheit gekümmert hatte. Die Beschwerden waren während des Baus der Windparks häufiger. Außerdem gab es mehr Beschwerden im Zusammenhang mit anderen Energiequellen (Gas, Öl usw.). Es gab keine Beschwerden von Landwirten und Viehzüchtern aufgrund von Auswirkungen auf Ernte oder Vieh.⁴¹ Eine in Australien durchgeführte Studie ergab eine Beschwerderate von unter 1 % von Anwohnern im Umkreis von 5 km um Windenergieanlagen mit einer Leistung von über 1 MW. Die Beschwerden konzentrierten sich auf einige wenige Windparks, bei zahlreichen Windparks gab es nicht eine einzige Beschwerde.¹⁵

Die Überprüfung der in der Umgebung von Windparks eingereichten Beschwerden kann zur Bestimmung des Umfangs und Maßes der Reizbarkeit aufgrund der Lärmemissionen von Windenergieanlagen beitragen. Allerdings hat dieser Ansatz auch Grenzen. Eine Beschwerde ergibt sich unter Umständen aus einer stärkeren Reizbarkeit (ziemlich gereizt bis sehr gereizt), aber der Grad der Reizbarkeit, bei der eine Person eine Beschwerde einreicht, hängt unter Umständen von der Persönlichkeit dieser Person ab sowie ihrer Einstellung zum optischen Eindruck der Windenergieanlagen, zur Windenergie insgesamt und zum möglichen wirtschaftlichen Vorteil aus den Windenergieanlagen. (Diese Faktoren werden detailliert im weiteren Verlauf dieses Berichts behandelt.)

Nur wenige Studien haben sich mit den Schallpegeln in den Häusern von Anwohnern befasst, die das Auftreten bestimmter festgestellter Symptome den Windenergieanlagen zurechnen. Die begrenzt verfügbaren Daten zeigen einen breiten Schallpegelbereich (38 bis 53 dBA [L_{EQ}, 10 Minuten oder 1 Stunde] außerhalb der Häuser und 23 bis 37 dBA [L_{EQ}, 10 Minuten] innerhalb der Häuser).^{19, 26, 28} Die Beschwerderate in der Nähe von Windparks ist relativ gering: 3 % der Anwohner im Umkreis von 1,6 km um einen Windpark und 4 % bis 5 % im Umkreis von 1 km.^{13, 32, 41}

Epidemiologische Studien zu Windenergieanlagen

Ein wesentlicher Punkt beim Verständnis der möglichen Auswirkungen der von Windenergieanlagen erzeugten Lärmemissionen auf die Gesundheit von Menschen ist die Berücksichtigung der betreffenden Nachweise aus gut durchgeführten epidemiologischen Studien, da diese den Vorteil haben, auf den Risiken tatsächlicher Expositionen zu beruhen. Nichtsdestoweniger ist die umweltbezogene Epidemiologie eine beobachtende (gegenüber einer experimentellen) Wissenschaft, die vom Studiendesign und den Umsetzungsmerkmalen abhängt, die zahlreichen inhärenten und methodologischen Einschränkungen unterliegen. Dennoch sind die Nachweise aus mit sinnvoller Qualität durchgeführten epidemiologischen Studien wohl der beste Anzeiger dafür, ob bestimmte Expositionen – wie beispielsweise gegenüber den Lärmemissionen der Windenergieanlagen von Versorgungsunternehmen – für den Menschen gesundheitsschädlich sind. Eine kritische Überprüfung und Synthese epidemiologischer Nachweise bietet, zusammen mit der Berücksichtigung der Nachweise anderer Forschungszweige (wie Tierversuche und Expositionsbeurteilungen), eine wissenschaftliche Grundlage für die

Erkennung kausaler Zusammenhänge, den Umgang mit den Risiken und den Schutz der Allgemeingesundheit.

Methoden

Zu den Untersuchungen mit dem größten Wert für die zuverlässige Erkennung von Gesundheitsrisiken zählen gut geplante und durchgeführte Kohorten- und Fallkontrollstudien – unter der Voraussetzung, dass bestimmte Erkrankungen festgestellt werden konnten – sowie Querschnittstudien oder Befragungen. Fallberichte und Fallserien sind keine epidemiologischen Studien und wurden nicht berücksichtigt, da sie keine entsprechende Vergleichsgruppe aufweisen, was unter Umständen eine Beziehung verschleiert oder gar eine nahelegt, wo keine vorhanden ist.^{39, 40, 42} Solche Studien ergeben möglicherweise Sinn bei der Entwicklung von Hypothesen, die dann mithilfe epidemiologischer Methoden geprüft werden können, gelten aber allgemein als nicht geeignet für den Nachweis einer Kausalität. Diesen Standpunkt vertreten auch internationale Stellen, wie die WHO.⁸

Die für diesen Bericht ausgewählten epidemiologischen Studien wurden anhand von Abfragen der PubMed- und Google Scholar-Datenbanken mit den folgenden Suchbegriffen (einzeln oder in verschiedenen Kombinationen) ermittelt: „Wind“, „Windenergieanlage“, „Windpark“, „Windrad“, „Lärm“, „Schlaf“, „kardio-vasculär“, „Gesundheit“, „Symptom“, „Zustand“, „Erkrankung“, „Kohorte“, „fallkontrolliert“, „Querschnittstudie“ und „epidemiologisch“. Darüber hinaus wurde ganz allgemein das Internet durchsucht und die in festgestellten Veröffentlichungen genannten Referenzen überprüft. Als Ergebnis wurden 65 Dokumente festgestellt und beigebracht und auf die folgenden Fragen hin untersucht: 1.) Beschreibt die Arbeit eine primär epidemiologische Studie (einschließlich experimenteller oder laborbasierter Studien), die in einer wissenschaftlichen Fachpublikation aus dem Bereich Gesundheit oder Medizin oder in einem relevanten wissenschaftlichen Journal veröffentlicht wurde? 2.) Bezog sich die Studie ganz oder zumindest teilweise auf die von Windenergieanlagen erzeugten Lärmmissionen als ein Risikofaktor? 3.) Bewertete die Studie zumindest ein möglicherweise gesundheitsrelevantes Ergebnis? 4.) Wurde in der Studie versucht, dieses Ergebnis mit den von Windenergieanlagen erzeugten Lärmmissionen in Beziehung zu setzen?

Ergebnisse

Von den in der Suche zunächst gefundenen ca. 80 Beiträgen erfüllten nur 20 die Prüfkriterien (14 Beobachtungs- und 6 kontrollierte Expositionsstudien mit Beteiligung von Menschen). Diese wurden detailliert überprüft, um die relative Qualität und Gültigkeit der berichteten Ergebnisse festzustellen. Zu den anderen Dokumenten zählten mehrere Überarbeitungen und Kommentare^{4, 5, 7, 43-51}, Fallberichte, Fallstudien und Befragungen^{23, 52-54} sowie nicht in wissenschaftlich überprüften Fachmedien veröffentlichte Dokumente. Eine als Teil von Konferenzdokumenten veröffentlichte Studie wurde ebenfalls nicht in einem wissenschaftliche Fachmedium veröffentlicht, wurde aber dennoch mit aufgenommen, da es sich um die erste epidemiologische Studie zu diesem Thema zu handeln schien und offenbar der Auslöser weiterer Studien war.⁵⁵

Die 14 epidemiologischen Beobachtungsstudien wurden kritisch überprüft, um ihre relativen Stärken und Schwächen hinsichtlich ihres Studiendesigns und der allgemeinen Erwartungstreue zu beurteilen: Stichprobenverzerrung (z. B. besondere Teilnahmebereitschaft von Einzelpersonen mit Gesundheitsstörungen), Informationsverzerrung (z. B. Unter- oder Überrepräsentanz von gesundheitlichen Beschwerden, ggf. durch das Vertrauen in Selbstberichtsdaten) und irrtümliche Verzerrung (also die Verwechslung möglicher Auswirkungen mit denen eines anderen starken Risikofaktors für die

Gesundheit, die zufällig zur selben Zeit auftraten).

Abb. 6 zeigt die 14 in wissenschaftlichen Gesundheits- oder Medizinmedien veröffentlichten epidemiologischen Beobachtungsstudien, die alle als Querschnittstudien oder Befragungen bestätigt wurden. Wie aus der Abbildung hervorgeht, basieren die 14 Veröffentlichungen auf der Datenanalyse von nur 8 unterschiedlichen Studienteilnehmergruppen, sodass 6 Veröffentlichungen auf der Analyse bereits zuvor veröffentlichter Studien beruhen (so beziehen sich beispielsweise Pedersen et al.⁵⁶ und Bakker et al.⁵⁷ beide auf die Daten von Pedersen et al.⁵⁸) oder auf kombinierte Daten bereits zuvor veröffentlichter Studien (wie Pedersen und Larsman⁵⁹ sowie Pedersen und Wayne⁶⁰, die auf kombinierten Daten von Pedersen und Wayne^{61, 62} beruhen, oder Pedersen⁶³ und Janssen et al.⁶⁴, deren Grundlage kombinierte Daten von Pedersen et al.⁵⁸ und Wayne⁶¹ sowie Pedersen und Wayne⁶² waren). Aus diesem Grund wurden in den folgenden Kurzzusammenfassungen der Einzelstudien die Veröffentlichungen unter die gleiche Teilnehmergruppierung sortiert.

Zusammenfassung der epidemiologischen Beobachtungsstudien

Die möglicherweise erste epidemiologische Studie zur Beziehung zwischen Lärmmissionen von Windenergieanlagen und lärmspezifischer Reizbarkeit wurde während der Europäischen Windenergie-Konferenz 1993 veröffentlicht.⁵⁵ Die Studienprüfer befragten 574 Einzelpersonen (159 aus den Niederlanden, 216 aus Deutschland und 199 aus Dänemark). Bis zu 70 % der Teilnehmer lebten mindestens 5 Jahre in der Nähe von Windenergieanlagen. Das Ansprechverhalten wurde nicht angegeben, so dass keine Aussage zu einer möglichen Stichproben- oder Teilnehmerverzerrung getroffen werden kann. Auf der Grundlage der Messungen am Standort und der Entfernung zwischen Wohnort und Anlage wurden für jeden Teilnehmer die Schallpegel der Windenergieanlagen in 5-dBA-Schritten berechnet. Die Autoren stellten fest, dass die lärmspezifische Reizbarkeit geringfügig mit den objektiven Schallpegeln aber stärker mit den Indikatoren der Einstellungen und Persönlichkeiten der Teilnehmer korrelierte.⁵⁵

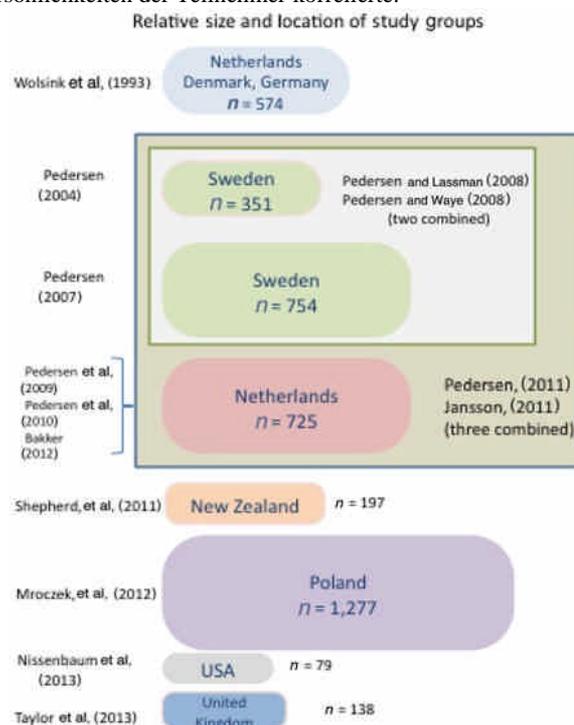


Abb. 6: Die 14 in wissenschaftlichen Gesundheits- oder Medizinmedien veröffentlichten epidemiologischen Beobachtungsstudien, die alle als Querschnittstudien oder Befragungen bestätigt wurden.

Netherlands, Denmark, Germany	Niederlande, Dänemark, Deutschland
Sweden	Schweden
Pedersen and Larsman (2008) Pedersen and Waye (2008) (two combined)	Pedersen und Larsman (2008) Pedersen und Waye (2008) (zwei Studien kombiniert)
Netherlands (three combined)	Niederlande (drei Studien kombiniert)
New Zealand	Neuseeland
Poland	Polen
United Kingdom	Großbritannien

In einer Querschnittstudie mit 351 Teilnehmern, die in der Nähe von Windenergieanlagen mit einer Leistung von 150 bis 650 kW wohnen, beschrieben Pedersen, ein Koautor der Wolsink-Studie⁵⁵, sowie Persson und Waye⁶¹ einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen den im Modell ermittelten Schätzungen der hörbaren Lärmemissionen von Windenergieanlagen und selbstberichteter Reizbarkeit. In diesem Abschnitt bedeutet „statistisch signifikant“, dass die Wahrscheinlichkeit eines zufälligen Ergebnisses bei unter 5 % lag. Von den 12 Teilnehmern, die Lärmemissionen der Windenergieanlagen von weniger als 30 dBA ausgesetzt waren, berichtete kein Befragter über Reizbarkeit wegen des Geräuschs. Allerdings stieg mit der Lärmemission über 30 dBA der Prozentsatz derjenigen an, die über Reizbarkeit klagten. Änderungen der Ergebnisse zur gesundheitlichen Situation oder zum Wohlbefinden (z. B. Tinnitus, kardiovaskuläre Erkrankungen, Kopfschmerzen und Reizbarkeit) wurden nicht beobachtet. Bei einer Lärmexposition von über 35 dBA berichteten 16 % der Befragten über Schlafstörungen. Teilnehmer, die weniger als 35 dBA ausgesetzt waren, gaben keine Schlafstörungen an. Die Autoren stellten fest, dass das Risiko einer berichteten Reizbarkeit durch die Exposition gegenüber Lärmemissionen von Windenergieanlagen statistisch signifikant pro 2,5 dBA ansteigt. Allerdings gaben sie auch an, dass es dann ein statistisch signifikantes Risiko für die Meldung von Reizbarkeit durch Lärmemissionen durch diejenigen Befragten gäbe, die sich wegen des Anblicks von Windenergieanlagen im Landschaftsbild (Meinung, gemessen auf einer Fünf-Punkte-Skala von „sehr positiv“ bis „sehr negativ“) negativ äußerten. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass die Meinungen beim Anblick von Windenergieanlagen ein wichtiger Faktor für die Häufigkeit der Meldung von Reizbarkeit durch deren Lärmemissionen sind. Über das Vertrauen in selbstberichtete Faktoren hinaus weist diese Studie Einschränkungen durch Stichproben- oder Teilnahmeverzerrung auf. Die unterschiedlichen Daten im Antwortverhalten bei sehr stark exponierten Befragten (78 %) gegenüber gering exponierten Teilnehmern (60 %) lassen dies vermuten.

Sieben Jahre lang untersuchte Pedersen⁶² in sieben Gegenden Schwedens bei verschiedenen Windenergieanlagen und unterschiedlichen Landschaften bei 754 Studienteilnehmern den Zusammenhang zwischen den im Modell entwickelten Schalldruckdaten von Windenergieanlagen einerseits und selbstberichteter Reizbarkeit sowie Einschränkungen bei Gesundheit und Wohlbefinden andererseits. Insgesamt wurden 1.309 Fragebögen verteilt, die Antwortquote lag bei 57,6 %. Der Zusammenhang von Reizbarkeit und Schalldruckdaten der Windenergieanlagen war signifikant. Weitere Einflüsse waren eine negative Einstellung zu Windenergieanlagen, Wohnort in ländlichen Gebieten, der Anblick

von Windenergieanlagen im Landschaftsbild sowie Leben in Gegenden mit hügeligem oder felsigem Gelände. Die von den Lärmemissionen der Windenergieanlagen gestörten Befragten gaben häufiger eine schlechtere Schlafqualität und negative Emotionen an als die Befragten, die sich nicht gestört fühlten. Wegen des Querschnittsdesigns kann nicht bestimmt werden, ob die Beschwerden tatsächlich durch die Lärmemissionen von Windenergieanlagen ausgelöst wurden oder ob die Befragten, die über Schlafstörungen und negative Emotionen klagten, sich grundsätzlich eher durch Lärm gestört fühlen und dies angeben. Gemessene Schalldruckpegel standen mit den untersuchten Gesundheitsauswirkungen nicht im Zusammenhang. Im gleichen Jahr berichteten Pedersen et al. über eine – wie sie es nannten – „fundierte theoretische Studie“, in der 15 Personen detailliert zu den Gründen für ihre Reizbarkeit wegen Windenergieanlagen und den einhergehenden Lärmemissionen befragt wurden. Die Antworten wiesen darauf hin, dass die Befragten die Windenergieanlagen als Eingriff in ihre Lebensumstände empfanden und sie mit einem gefühlten Verlust von Kontrolle und Einfluss in Zusammenhang brachten.⁶⁵ Es handelte sich dabei zwar nicht um eine epidemiologische Studie, aber dieser Versuch machte deutlich, welche Gründe hinter der berichteten Reizbarkeit über Windenergieanlagen zu suchen waren.

In zwei weiteren Publikationen wurden weitere Analysen der kombinierten Daten von Pedersen und Waye^{61, 62} (Beschreibung siehe oben) veröffentlicht.^{59, 60} Der Datenpool umfasste die Antworten von 1.095 Befragten, die einer Lärmemission von Windenergieanlagen von wenigstens 30 dBA ausgesetzt waren. Wie bereits in den beiden ursprünglichen Studien wurde auch hier ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Reizbarkeit wegen der Lärmemissionen und den gemessenen Schalldruckpegeln festgestellt. Insgesamt berichteten 84 Befragte (7,7 %), dass sie sich durch die Lärmemission von Windenergieanlagen ziemlich oder sehr gestört fühlten. Auch Befragte, die aussagten, dass sich Windenergieanlagen negativ auf das Landschaftsbild auswirkten, gaben unabhängig von den tatsächlichen Schalldruckpegeln mit statistisch signifikanter höherer Wahrscheinlichkeit an, dass sie sich durch die Lärmemissionen der Windenergieanlagen gestört fühlten.⁵⁹ Selbstberichteter Stress war höher bei Personen die sich ziemlich oder stark gestört fühlten, als bei Befragten, die keine Reizbarkeit angaben. Allerdings konnte dieser Zusammenhang nicht spezifisch auf die Lärmemissionen von Windenergieanlagen zurückgeführt werden. Zwischen den 84 Befragten (7,7 %), die sich durch die Lärmemissionen von Windenergieanlagen ziemlich oder stark gestört fühlten, und den anderen Teilnehmern gab es dagegen keine Unterschiede bei der Angabe selbstberichteter Gesundheitsstörungen, wie Gehörschäden, Diabetes oder kardiovaskuläre Erkrankungen.⁶⁰ Die Autoren machten keine Angaben zur Aussagekraft der Studie.

Pedersen et al.⁵⁶⁻⁵⁸ wertete die Daten von 725 Personen in den Niederlanden aus, die im Umkreis von 2,5 km eines Standorts mit wenigstens zwei Windenergieanlagen mit mindestens 500 kW lebten. Mithilfe geografischer Informationssysteme wurden im Zielgebiet der Studie 3.727 Adressen festgestellt, von denen bei 2.056 Namen und Telefonnummern ausfindig gemacht werden konnten. Nach Ausschluss von Firmen und Geschäften verblieben 1.948 Haushalte, die dann kontaktiert wurden. 725 Haushalte gaben vollständig ausgefüllte Antwortbögen zurück, was einer Antwortquote von 37 % entsprach. Dies war zwar niedriger als in zuvor durchgeführten Querschnittstudien, aber die Analyse der Nichtbeantworter zeigte, dass in allen Landschaftstypen und Schalldruckkategorien ähnliche Prozentsätze der Befragten antworteten.⁵⁷ Bei dieser Studie wurden die berechneten Schallpegel bewertet sowie andere allgemeine Schallquellen, Lärmsensitivität,

die allgemeine Einstellung und die Einschätzung des Anblicks von Windenergieanlagen im Landschaftsbild. Die Autoren berichteten einen Expositions-Reaktions-Zusammenhang zwischen berechneten A-bewerteten Schalldruckpegeln und selbstberichteter Reizbarkeit. Die Lärmemissionen von Windenergieanlagen wurden dabei als störender empfunden als Verkehrs- oder Industrielärm mit vergleichbaren Pegeln. Allerdings gab es auch eine Korrelation zwischen der Reizbarkeit und dem negativen Eindruck des Anblicks von Windenergieanlagen im Landschaftsbild. Darüber hinaus wurde ein statistisch signifikanter Rückgang bei der Angabe der Reizbarkeit durch die Lärmemissionen von Windenergieanlagen unter denjenigen Befragten festgestellt, die wirtschaftlich von den Windenergieanlagen profitierten, auch wenn sie dem gleichen oder im Allgemeinen auch einem höheren Schallpegel (über 40 dBA) ausgesetzt waren.⁵⁸ Die Reizbarkeit hing zudem mit der selbstberichteten Ablehnung wegen des Anblicks von Windenergieanlagen im Landschaftsbild (Meinung, gemessen auf einer Fünf-Punkte-Skala von „sehr positiv“ bis „sehr negativ“) zusammen. Die niedrige Antwortquote und das Vertrauen in selbstberichtete Reizbarkeit wegen der Lärmemissionen schränken die Interpretationsmöglichkeiten dieser Ergebnisse allerdings ein.

Die Ergebnisse weiterer Analysen von Angaben zur Reizbarkeit wegen Lärmemissionen wurden in einem getrennten Bericht veröffentlicht,⁵⁶ der vermuten ließ, dass Straßenverkehrslärm die Reizbarkeit aufgrund der Lärmemissionen von Windenergieanlagen nicht beeinflusste und umgekehrt. Die Sichtbarkeit von und die Einstellung zu Windenergieanlagen und Straßenverkehr standen in signifikanter Weise im Zusammenhang mit der Reizbarkeit wegen der betreffenden Lärmquelle. Stress konnte mit beiden Arten der Lärmemission signifikant in Verbindung gebracht werden.^{56, 157}

Weitere Analysen der gleichen Daten mithilfe einer Strukturgleichung zeigten an, dass, wie bei der Reizbarkeit, auch die Schlafstörungen mit steigendem Schalldruckpegel von Windenergieanlagen zunahm. Allerdings zeigte sich dieser Anstieg erst bei Schalldruckpegeln ab 45 dBA signifikant. Die Analyseergebnisse der kombinierten Daten aus zwei schwedischen^{61, 62} und der niederländischen Querschnittstudie⁵⁸ wurden in zwei weiteren Arbeiten veröffentlicht. Anhand der kombinierten Daten aus diesen drei Vorgängerstudien identifizierten Pedersen et al.^{56, 58} 1.755 (also 95,9 %) der insgesamt 1.830 Teilnehmer mit ausreichenden Daten, mit denen ein Zusammenhang zwischen den berechneten A-bewerteten Schalldruckpegeln und einer Reihe von Indikatoren für Gesundheit und Wohlbefinden hergestellt werden konnte. Insbesondere betrachteten sie Schlafunterbrechungen, Kopfschmerzen, ungewohnte Müdigkeit, Spannung, Stress oder Reizbarkeit, Diabetes, Bluthochdruck, kardiovaskuläre Erkrankungen und Tinnitus.⁶³

Wie in vorangegangenen Studien, gab es auch hier Zusammenhänge zwischen der Reizbarkeit aufgrund von Lärmemissionen innerhalb und außerhalb von Gebäuden einerseits und A-bewerteten Schalldruckpegeln andererseits. Schlafunterbrechungen traten bei höheren Schallpegeln auf und hingen ebenfalls mit Reizbarkeit zusammen. Keine weiteren Variablen zur Gesundheit bzw. zum Wohlbefinden wurden konsistent mit Schalldruckpegeln in Zusammenhang gebracht. Es gab zwar keine unmittelbare Verbindung zwischen Stress und den Schalldruckpegeln, aber es konnte ein Zusammenhang mit lärmbezogener Reizbarkeit hergestellt werden.

Ein anderer auf diesen Daten basierender Bericht (in diesen Analysen 1.820 von 1.830 Teilnehmern insgesamt) legte den Grundstein für die Beziehung zwischen der Lärmexposition durch Windenergieanlagen und der Reizbarkeit innerhalb und außerhalb von Häusern.⁶⁴ Die Autoren schlossen diejenigen Teilnehmer aus, die wirtschaftlich von den Windenergieanlagen profitierten, und

vergleichen anschließend ihre Modellergebnisse mit anderen modellierten Zusammenhängen bei Straßenverkehrs- und Industrielärm. Sie stellten dar, dass die durch Windenergieanlagen verursachten Lärmemissionen ab 45 dBA mit einer größeren Reizbarkeit einhergehen als andere Lärmverursacher.

Shepherd et al.,⁶⁶ die eine frühere Bewertung zur Lärmempfindlichkeit und gesundheitsbezogenen Lebensqualität (HRQOL – Health Related Quality of Life) durchgeführt hatten,¹⁵⁸ verglichen die Befragungsergebnisse von 39 Anwohnern innerhalb von 2 km von einer Windenergieanlage im South Makara Valley in Neuseeland mit 139 geografisch und sozioökonomisch gleichen Einzelpersonen, die mindestens 8 km von einem Windpark entfernt lebten. Die Antwortquoten war bei beiden Gruppen – in der Nähe bzw. entfernter lebende Anwohner – niedrig, und zwar bei 34 % bzw. 32 %, auch wenn versucht wurde, die Befragten gegen die Studienhypothese zu verblinden. Über die Auswahl der Einzelpersonen auf der Grundlage ihrer Wohnentfernung zur nächstgelegenen Windenergieanlage hinaus, gab es keine Hinweise auf die Exposition zu Lärmemissionen von Windenergieanlagen. Das allgemeine Wohlbefinden sowie das Wohlbefinden in physischer, psychischer und sozialer Hinsicht beider Gruppen wurden mithilfe der HRQOL-Skalen beschrieben und verglichen. Die Autoren gaben an, dass es bei einigen HRQOL-Bewertungsbereichen statistisch signifikante Unterschiede zwischen beiden Gruppen gäbe. Die Anwohner im 2-km-Umkreis um eine Windenergieanlage berichteten geringere physische HRQOL-Bewertungen (einschließlich niedrigerer Einzelbewertungen für Schlafqualität und selbstberichtete Energieniveaus) sowie eine geringere umweltbezogene Lebensqualität (QOL – Quality of Life, einschließlich niedrigerer Einzelbewertungen bei Fragen zur Gesundheitsförderlichkeit der Umwelt und zur Zufriedenheit mit dem Lebensraum). Es gab keine Unterschiede bei sozialen oder psychischen HRQOL-Bewertungsbereichen. Außerdem gab die näher an Windenergieanlagen lebende Gruppe eine geringere Attraktivität ihres Lebensraums an, ohne allerdings eine Verbindung zu Lärmbelästigungen durch den Straßenverkehr oder die nähere Umgebung herzustellen. Das Fehlen konkreter Messdaten zu den Windenergieanlagen oder zu anderen Quellen (beide Punkte wurden von den Autoren als Einschränkungen anerkannt) schränkt allerdings, zusammen mit der niedrigen Antwortquote, die Aussagekraft dieser Ergebnisse ein, da sie nur unter Umständen die Emissionen der Windenergieanlagen betreffen.⁶⁶

Die möglicherweise umfassendste epidemiologische Querschnittstudie zu Lärmemissionen von Windenergieanlagen und deren Auswirkungen auf die Lebensqualität wurde im Norden von Polen mit der größten Anzahl an Windenergieanlagen durchgeführt.⁶⁷ Die Befragungen wurden bei insgesamt 1.277 Erwachsenen (703 Frauen und 574 Männer) im Alter von 18 bis 94 Jahren durchgeführt. Diese Gruppe machte eine 10 %ige Zweistufen-Stichprobe der ausgewählten Bevölkerungsgruppen aus. Auch wenn es keine Angaben zur Antwortquote gab, wurden die Teilnehmer sequenziell aufgenommen, bis eine 10 %ige Stichprobe erreicht war. Der Anteil der eingeladenen Personen, die nicht teilnehmen konnten oder wollten, wurde auf 30 % geschätzt (B. Mroczek, Dr. hab. n. zdr., E-Mail-Kommunikation, 2. Januar 2014). Die Expositionsvariable war die Nähe (einer Windenergieanlage) zum Wohnort: Dabei wohnten 220 Befragte (17,2 %) bis zu 700 m von der nächstgelegenen Windenergieanlage entfernt, 279 (21,9 %) zwischen 700 m und 1.000 m, 221 (17,3 %) zwischen 1.000 m und 1.500 m sowie 424 (33,2 %) weiter als 1.500 m. Die Indikatoren für die Lebensqualität und die Gesundheit wurden anhand des Short Form-36-Fragebogens (SF-36) gemessen. Der SF-36 umfasst 36 Fragen, insbesondere zu physischen Funktionen, physischem Rollenverhalten, physischen Schmerzen, Allgemeingesundheit,

Vitalität, Bewertung der sozialen und emotionalen Rolle sowie zur geistigen Gesundheit. Hinzu kamen eine weitere Frage zu gesundheitlichen Veränderungen sowie die visuelle Analogskala zur Beurteilung der Gesundheit. Es ist nicht geklärt, ob Alter, Geschlecht, Bildung und Beruf in den statistischen Auswertungen berücksichtigt wurden. Die Autoren berichten, dass in allen Unterskalen die Befragten, die am nächsten an Windparks lebten, die höchste Lebensqualität angaben. Die Befragten, die weiter als 1.500 m von Windenergieanlagen entfernt lebten, gaben die niedrigsten Werte an. Sie schlossen daraus, dass das Leben in der Nähe eines Windparks die Lebensqualität nicht verschlechterte sondern – in dieser Region – diese unter Umständen sogar erhöhte.⁶⁷

In einer kleineren Befragung von in der Nähe mehrerer Windenergieanlagen lebender Teilnehmer aus zwei Orten in Maine (USA) wurden Schlafqualität und Allgemeingesundheit bei 38 Teilnehmern, die 375 bis 1.400 m von der nächstgelegenen Anlage lebten, mit den Ergebnissen einer anderen Gruppe von 41 Personen verglichen, die 3,3 bis 6,6 km von der nächsten Anlage entfernt wohnten.⁶⁸ Die Teilnehmer füllten Fragebögen aus und nahmen an persönlichen Gesprächen zu einer Reihe von Gesundheits- und Einstellungsfragen teil. Die wesentlichen Antworten zur selbstberichteten Gesundheit und zu anderen Beschwerden wurden anhand der Entfernung zu Windenergieanlagen verglichen. Alter, Geschlecht, Standort und Anordnung der Haushalte wurden in mehreren Analysen statistisch berücksichtigt. Teilnehmer, die bis zu 1,4 km von einer Windenergieanlage entfernt lebten, klagten über mehr Schlafstörungen, waren am Tag müder und hatten im psychischen Abschnitt des SF-36 schlechtere Bewertungen als Personen, die über 3,3 km entfernt lebten. Statistisch signifikante Korrelationen wurden gemeldet zwischen dem Pittsburgh Sleep Quality Index (Index zur Schlafqualität in Pittsburgh), der Epworth-Schlafträchtigkeitsskala, dem SF-36-Fragebogen zur psychischen Gesundheit sowie der protokollierten Entfernung zur nächstgelegenen Windenergieanlage. Die Autoren schrieben die beobachteten Unterschiede den Windenergieanlagen zu.⁶⁸ Über methodologische Probleme, wie Stichproben- oder Berichtsverzerrung, wurde hinweggesehen. Diese Studie weist eine Reihe von methodologischen Einschränkungen auf, insbesondere die, dass alle Teilnehmer der in der Nähe von Windenergieanlagen lebenden Gruppe Kläger in einem Rechtsstreit gegen die Betreiber der Windenergieanlagen und bereits vor der Studie vom Hauptprüfer interviewt worden waren. Die Teilnehmergruppe, die weiter entfernt lebte, wurde nicht interviewt sondern wurde ohne Vorbereitung von einem Assistenten angerufen. Diese Ungleichbehandlung der beiden Gruppen ergibt eine Verzerrung der methodischen Integrität und damit der Ergebnisse. Einzelheiten zur Gruppe der entfernt lebenden Teilnehmer sowie Antwortquoten wurden nicht genannt.⁶⁸

In einer anderen Studie wurde über eine postalische Befragung der Einfluss von negativen Persönlichkeitseigenschaften (ermittelt nach der Definition der Autoren anhand separater Skalen zur Beurteilung der emotionalen Labilität, der negativen Affektivität und der Frustrationsintoleranz) auf mögliche Zusammenhänge zwischen tatsächlichen und wahrgenommenen Lärmmissionen von Windenergieanlagen sowie hinsichtlich medizinisch unerklärlicher unspezifischer Symptome untersucht.⁶⁹ Von den 1.270 identifizierten Haushalten im Umkreis von 500 m von acht Windparks mit 0,6-kW-Windenergieanlagen und im Umkreis von 1 km von vier kleinen Windparks mit 5-kW-Anlagen in zwei Städten in Großbritannien wurden nur 138 Fragebögen zurückgeschickt. Dies entsprach einer Antwortquote von 10 %. Es wurde kein Zusammenhang festgestellt zwischen berechneten und tatsächlichen Schallpegeln bzw. den unspezifischen Symptomen. Dagegen wurde bei Befragten mit negativen Persönlichkeitseigenschaften eine Korrelation zwischen wahrgenommenen Lärmmissionen und unspezifischen Symptomen

beobachtet. Trotz des berichteten repräsentativen Charakters der Gruppe im Hinblick auf die gesamte Zielgruppe, lässt die niedrige Antwortquote keine definitiven Rückschlüsse anhand der Basisdaten zu.⁶⁹

In einer Studie mit Anwohnern eines Windparks im Westen des US-Bundesstaats New York wurden 62 Personen aus 52 Haushalten befragt.⁷⁰ Der Windpark umfasste 84 Windenergieanlagen. Es wurde kein Zusammenhang zwischen selbstberichteter Reizbarkeit und kurzfristigen Schallmessungen festgestellt. Es gab allerdings eine Korrelation zwischen den Befürchtungen einer Person zu Gesundheitsrisiken und dem Auftreten von Schlafstörungen und Stress. Eine Querschnittstudie beruht zwar auf selbstberichteter Reizbarkeit und einigen Gesundheitsindikatoren und ist damit nur eingeschränkt interpretierbar. Einer der Vorteile dieser Studie ist aber, dass hier tatsächlich Schallmessungen innerhalb und außerhalb der Häuser durchgeführt wurden.

Eine kleine aber detaillierte Studie zur Reaktion auf Lärmmissionen von Windenergieanlagen wurde in Polen durchgeführt.⁷¹ Die Studienteilnehmer waren 156 Personen im Alter zwischen 15 und 82 Jahren, die in der Nähe von drei Windparks in den mittleren und nordwestlichen Landesteilen lebten. Es gab keine Ausschlusskriterien, und alle Personen, die teilnehmen wollten, erhielten einen Fragebogen, ähnlich denen, die in den Studien Pedersen 2004 und Pedersen 2007 verwendet wurden und Fragen zu den Lebensumständen, zu selbstberichteter Reizbarkeit aufgrund von Lärmmissionen durch Windenergieanlagen sowie eine Eigenbeurteilung der physischen Gesundheit und des Wohlbefindens enthielten (wie zum Beispiel zu Kopfschmerzen, Schwindel, Müdigkeit, Schlaflosigkeit und Tinnitus). Die Antwortquote lag bei 71 %. Die Entfernung zur nächstgelegenen Windenergieanlage und die modellierten A-bewerteten Schalldruckpegel wurden als Expositionsindikatoren verwendet. Ein Drittel (33,3 %) der Befragten empfanden die Lärmmissionen der Windenergieanlagen außerhalb der Häuser als störend, ein Fünftel (20,5 %) reagierte innerhalb der Häuser auf das Geräusch gereizt. Die Lärmmissionen der Windenergieanlagen wurden dabei als störender empfunden als anderer Umgebungslärm, und die selbstberichtete Reizbarkeit stieg mit höheren A-bewerteten Schalldruckpegeln an. Faktoren, wie die grundsätzliche Einstellung zu Windenergieanlagen und die „Landschaftsverunstaltung“ (der visuelle Eindruck im Landschaftsbild) beeinflussten die wahrgenommene Reizbarkeit der Lärmmissionen der Windenergieanlagen. Wie in den meisten anderen Fällen, so wird auch diese Studie durch das Querschnittsdesign und das Vertrauen in selbstberichtete Gesundheits- und Wohlbefindensindikatoren beeinträchtigt. Allerdings konzentrierten sich die Analysen auf hinreichende Anzeichen für selbstberichtete Reizbarkeit, und es wurde festgestellt, dass die Lärmmissionen der Windenergieanlagen, die Einstellung zu Windenergieanlagen allgemein und die Meinung zur „Landschaftsverunstaltung“ die meisten Fälle der berichteten Reizbarkeit erklärten.

Andere möglicherweise relevante Studien

Eine auf den Selbstberichten von 109 Personen beruhende Veröffentlichung berichtete, dass die Befragten „mit der Inbetriebnahme der Windenergieanlagen negative gesundheitliche Auswirkungen“ feststellten, von denen 102 über „Veränderungen ihrer gesundheitlichen Situation oder der Lebensqualität“ klagten. Die Autoren gaben zutreffender Weise an, dass es sich um eine Befragung selbstausgewählter Teilnehmer handelte, die auf die Zusendung eines Fragebogens reagierten, der speziell für Personen mit Gesundheitseinschränkungen gedacht war, die diese auf die Nähe zu Windenergieanlagen zurückführten. Eine Vergleichsgruppe habe

es nicht gegeben. Andererseits zogen die Autoren den unangemessenen Schluss, dass die „Ergebnisse dieser Studie einen grundlegenden Zusammenhang zwischen dem Betrieb von Windenergieanlagen und negativen Auswirkungen auf die Gesundheit nahelegten und weitere Studien erforderlich seien“. ^{48 (S. 336)} Ohne eine Vergleichsgruppe enthält ein solcher Bericht keinen handfesten Nachweis für einen Zusammenhang und ist daher bestenfalls von nur geringer Aussagekraft.

Forscher der School of Public Health der Universität von Sydney (Australien) organisierten eine Studie zur Untersuchung psychisch begründeter Erklärungen für die etwa im Jahr 2009 festgestellten Klagen über den Anstieg der Lärmemissionen von Windenergieanlagen bzw. den gesundheitlichen Einschränkungen, einschließlich der Ursachen für die damit einhergehende geografisch unverhältnismäßige Verteilung dieser Klagen.⁵² Sie erhielten die Aufzeichnungen der Windparkbetreiber zu den eingegangenen Klagen über Lärmemissionen und gesundheitliche Einschränkungen von Anwohnern aller 51 Windparks (mit insgesamt 1.634 Windenergieanlagen), die von 1993 bis 2012 betrieben wurden. Weiter gestützt wurden ihre Feststellungen durch Dokumente, wie öffentliche Anfragen der Regierung, Medienberichte und vor Gericht abgegebene eidesstattliche Erklärungen. Von den 51 Windparks gab es bei 33 (64,7 %) keine Aufzeichnungen der Lärmemissionen oder Klagen über gesundheitliche Einschränkungen. Hierzu zählten alle Windparks in Westaustralien und in Tasmanien. Die Forscher stellten fest, dass von 129 Personen, die Beschwerden eingereicht hatten, 94 (73 %) in der Nähe von sechs Windparks lebten, die von Windkraftgegnern aufs Korn genommen worden waren. Sie beobachteten außerdem, dass 90 % der Beschwerden erst eingingen, nachdem Windkraftgegner im Jahr 2009 Gesundheitsbedenken in ihre Argumentation aufgenommen hatten. Die Autoren schlossen, dass ihre Ergebnisse mit ihrer Hypothese von den psychisch begründeten Erklärungen übereinstimmen.

Diskussion

In dieser aktualisierten Überprüfung wissenschaftlicher Fachpublikationen gab es keine Kohorten- oder Fallkontrollstudien. Das Fehlen von Fallkontrollstudien ist weniger überraschend und auch weniger problematisch, da bisher keine bestimmte Erkrankung oder Gruppe von Erkrankungen festgestellt wurde, die wahrscheinlich durch die Lärmemissionen von Windenergieanlagen erklärt werden könnte. Einzelberichte von Symptomen im Zusammenhang mit Windenergieanlagen umfassen zahlreiche unspezifische Symptome, wie Kopfschmerzen, Stress und Schlafstörungen, die auf einen Großteil der Bevölkerung zutreffen und viele anerkannte Risikofaktoren aufweisen. Solche Symptome im Nachhinein mit Windenergieanlagen oder auch – wie bei fallkontrollierten Studien erforderlich – gemessenen Lärmemissionen von Windenergieanlagen in Zusammenhang zu bringen, verhindert nicht, dass Erinnerungsverzerrungen die Ergebnisse beeinflussen.

Und auch wenn Querschnittstudien und Befragungen den Vorteil einer relativ einfachen und kostengünstigen Durchführung aufweisen, so sind sie doch für eine Reihe von Verzerrungen anfällig. Der wichtigste Faktor ist allerdings, dass durch die gleichzeitige Feststellung der Exposition (beispielsweise gegenüber der Lärmemissionen von Windenergieanlagen) und der gesundheitlichen Folgen oder Beschwerden darüber die zeitliche Abfolge des Exposition-Folge-Zusammenhangs nicht dargestellt werden kann. Solange nicht bewiesen werden kann, dass die Exposition vor der Folge steht – und nicht der umgekehrte Fall gilt, dass Klagen über schlechte Gesundheit, wie beispielsweise Schlaflosigkeit, Kopfschmerzen, Anspannung, Stress und Reizbarkeit, die Wahrnehmung oder Verärgerung wegen einer Exposition verstärken

– kann der kausale Zusammenhang nicht definitiv bewertet werden.

Schlussfolgerungen

Eine kritische Überprüfung und Synthese der aus acht bisher bewerteten Studienteilnehmergruppen zur Verfügung stehenden und in 14 Veröffentlichungen dargestellten Nachweise vermittelt einige Einsichten in die Hypothese, dass die Lärmemissionen von Windenergieanlagen der Gesundheit der anwohnenden Bevölkerung schadet. Zu diesen Einsichten zählen:

- Bisher wurde kein eindeutiger oder konsistenter Zusammenhang zwischen den Lärmemissionen von Windenergieanlagen und berichteten Erkrankungen oder anderen Anzeichen für eine Gefährdung der Gesundheit von Menschen beobachtet.
- Bei den meisten befragten Bevölkerungsgruppen gab es einen normalerweise geringfügigen Teil, der über einen bestimmten Grad an Reizbarkeit über Windenergieanlagen berichtete. Weiterführende Auswertungen ergaben allerdings folgendes:
 - Bestimmte Eigenschaften des von Windenergieanlagen emittierten Schalls, wie Unterbrechung oder Rhythmik verstärken die gemeldeten Wahrnehmungen und die Reizbarkeit unter Umständen.
 - Zudem werden die Wahrnehmung und die Reizbarkeit durch den Kontext beeinflusst, in dem die Lärmemissionen von Windenergieanlagen ausgestrahlt werden. Hierzu zählen die städtische gegenüber der ländlichen Umgebung, die Topografie, die Merkmale der Landschaft sowie der Anblick der Windenergieanlagen im Landschaftsbild.
 - Faktoren, wie die Einstellung zu den optischen Auswirkungen einer Windenergieanlage auf das Landschaftsbild, die Einstellung zu Windenergieanlagen im Allgemeinen, die Persönlichkeitsmerkmale der Befragten oder ggf. bestehende wirtschaftliche Vorteile, die bisherige Betriebsdauer der Windenergieanlagen wurden alle mit selbstberichteter Reizbarkeit in Verbindung gebracht.
 - Es gibt überhaupt keine oder nur eine geringfügige Korrelation zwischen Reizbarkeit und objektiven Schallmessungen oder berechneten Schalldruckpegeln.
- Beschwerden, wie Schlafstörungen, wurden mit dem A-bewerteten Schalldruck von Windenergieanlagen über 40 bis 45 dB in Zusammenhang gebracht. Andere Merkmale der Allgemeingesundheit oder des Wohlbefindens dagegen nicht. Es gibt eine Verbindung zwischen Stress und Reizbarkeit, nicht aber mit berechneten Schalldruckpegeln.⁶³
- Studien zur Lebensqualität, einschließlich der Skalen zur physischen und psychischen Gesundheit sowie der Nähe von Wohnorten zu Windenergieanlagen, zeigten widersprüchliche Ergebnisse: In einer Studie (mit nur 38 Teilnehmern in einer Entfernung von 2 km von der nächstgelegenen Windenergieanlage) wurden von näher wohnenden Teilnehmern niedrigere HRQOL-Werte angegeben als von Teilnehmern, die in größerer Entfernung lebten,⁶⁶ aber in der größten durchgeführten Studie (mit 853 Teilnehmern in einer Entfernung von bis zu 1.500 m zur nächstgelegenen Windenergieanlage)⁶⁷ wurde festgestellt, dass Personen, die näher an den Anlagen wohnten, eine höhere Lebensqualität und bessere Gesundheit meldeten als weiter entfernt wohnende Teilnehmer.⁶⁷

Da diese statistischen Korrelationen aus Querschnittstudien und Befragungen stammen, bei denen die Abfolge von Exposition und Ergebnis nicht festgestellt werden kann und die Auswirkungen verschiedener Formen der Verzerrung (insbesondere Stichproben-/Freiwilligen- und Erinnerungsverzerrung) unter Umständen

erheblich sind, kann der Wert der kausalen Zusammenhänge nicht bestimmt werden. So können Aussagen, wie „Wir schlussfolgern, dass die Lärmmissionen von Windenergieanlagen bei Anwohnern bis zu einer Entfernung von 1,4 km von zwei untersuchten Windenergieanlagen zu Schlafstörungen und tagsüber zu Schläfrigkeit und zu Einschränkungen der psychischen Gesundheit geführt haben.“ auf der Grundlage des tatsächlich verwendeten Studiendesigns und vor dem Hintergrund wahrscheinlich bestehender Verzerrungen nicht aufrechterhalten werden.⁷⁰

Ungeachtet der naturgemäßen Einschränkungen von Querschnittstudien und Befragungen – die für sich genommen ggf. schon ausreichen, um einige der berichteten Korrelationen zu erklären – gibt es mehrere mögliche Erklärungen für die in zahlreichen Studien berichtete durch Windenergieanlagen verursachte Reizbarkeit, einschließlich der Persönlichkeitsmerkmale und grundsätzlichen Einstellungen der Studienteilnehmer.⁶⁹ Pedersen und sein Kollege,⁵⁹ die an der Mehrzahl der Veröffentlichungen zu diesem Thema beteiligt waren, merkten an, dass „die verstärkten negativen Reaktionen [auf Windenergieanlagen] ggf. eher mit einer ästhetischen Reaktion im Zusammenhang stehen als mit den vielschichtigen Auswirkungen einer gleichzeitigen audiovisuellen Stimulation, und die Gefahr einer Behinderung der psychophysiologischen Wiederherstellung nicht ausgeschlossen werden konnte.“^(S. 389) Sie stellten außerdem fest, dass Windenergieanlagen unter Umständen deshalb mit höherer Wahrscheinlichkeit Reizbarkeit hervorrufen, weil sie von einigen Anwohnern als visuell und akustisch aufdringlich wahrgenommen werden.⁶⁵ Andere Erklärungen, die zwischen 1993 und 2012 bei Windparkbetreibern in Australien eingingen und auf der Auswertung aller Beschwerden über die Verschlechterung der Gesundheit beruhten, legen den Einfluss des Aktivismus von Windkraftgegnern und ihrer entsprechenden Öffentlichkeitsarbeit zu wahrscheinlichen gesundheitlichen Beschwerden nahe und bezeichneten die Beschwerden als „kommunizierte Erkrankungen“.⁵²

Wie zuvor erwähnt, bezogen sich die 14 Arbeiten, die den Auswahlkriterien für eine kritische Überprüfung und Synthese entsprachen, auf lediglich acht unabhängige Studiengruppen. Drei Veröffentlichungen basierten auf einer Studiengruppe aus den Niederlanden⁵⁸, während sich vier weitere Publikationen mit den kombinierten Daten zweier schwedischer Befragungen^{61, 62} bzw. mit allen drei Studien zusammen befassten. Die Ergebnisse mehrerer Studien auf den Grundlagen der gleichen Daten stellen keine unabhängigen Beobachtungen dar, was die Masse an verfügbaren Nachweisen unter Umständen größer und konsistenter erscheinen lässt, als sie tatsächlich ist. Dies bedeutet nicht notwendigerweise, dass die beobachteten Zusammenhänge (bzw. das Fehlen von Zusammenhängen zwischen berechneten Schalldruckpegeln von Windenergieanlagen und Erkrankungen oder anderen Gesundheitsindikatoren) ungültig sind, sondern nur, dass die Konsistenz der Berichte untereinander wegen der gleichen Datenbasis nicht als unabhängige Ergebnisbestätigung überinterpretiert werden sollte. Vielleicht viel wichtiger ist hier der Punkt, dass es sich bei allen acht Studien um Querschnittstudien oder Befragungen handelte, die aufgrund ihres Designs nur begrenzt in der Lage sind, das Vorhandensein oder Fehlen echter Gesundheitsfolgen darzustellen.

Unlängst durchgeführte kontrollierte Laboruntersuchungen zur Exposition unterstützten die Ansicht, dass Berichte über Reizbarkeit und andere Beschwerden unter Umständen zumindest teilweise die vorgefasste Meinung zu der Möglichkeit widerspiegeln, dass die Lärmmissionen von Windenergieanlagen die Gesundheit schädigen^{52, 71, 72} und dies sogar eher noch an der Farbe der Anlage⁷³ liegt als am tatsächlichen Umgebungslärm.

Vor sechzig Jahren hielt Sir Austin Bradford Hill vor dem Royal College of Occupational Medicine einen Vortrag mit dem Titel „Beobachtungen und Experiment“. In diesem Vortrag stellte Hill dar, dass ein Beobachter unter Umständen viel geduldiger sein müsse als der Durchführende eines Experiments, da er ja das Eintreffen der natürlichen Abfolge der Ereignisse abwarten müsse, die er zu studieren wünsche. Er müsse auch mehr Phantasie aufbringen, um die Korrelationen zu errahnen, die unter der Oberfläche seiner Beobachtungen liegen. Und er müsse logischer vorgehen und weniger dogmatisch, also auch den Fehlschluss „Post hoc, ergo propter hoc“ (*lat.* „nach diesem, also auch wegen diesem“) vermeiden und die Korrelation nicht mit der Kausalität gleichsetzen.^{74 (S. 1000)}

Es ist zwar üblich und angemessen, die offensichtliche Notwendigkeit für weitere Forschungen zu unterstreichen, man sollte aber auch betonen, dass weitere Forschungen der gleichen Art – also anhand von Querschnittstudien und Befragungen – kaum mehr Informationen erbringen, insbesondere nicht für öffentliche Grundsatzentscheidungen. Am besten, weil viel informativer, wären großangelegte und gut durchgeführte prospektive Kohortenstudien, in denen zunächst der ausgehende Gesundheitsstatus erfasst und dann das Einsetzen einer neuen Erkrankung oder gesundheitlichen Einschränkung im Lauf der Zeit nach der Inbetriebnahme einer Anlage objektiv gemessen werden kann. Im Gegenteil: Die Phänomene, die jetzt als Exposition von Windenergieanlagen dargestellt werden – also in erster Linie Umgebungslärm und optisches Bild – sind vielen anderen Umwelt- und von Menschenhand verursachten Phänomenen (z. B. das Geräusch einer Brandung einerseits oder eines Heizlüfters, einer Klimaanlage oder des Straßenverkehrs andererseits) nicht unähnlich, bei denen die Forschung und die praktische Erfahrung keine unmittelbare Gesundheitsgefährdung für den Menschen nahelegt.

Schallkomponenten und Gesundheit: Infraschall, Tieffrequenzschall und mögliche Auswirkungen auf die Gesundheit

Einleitung

Dieser Abschnitt befasst sich mit den möglichen Auswirkungen von Infra- und Tieffrequenzschall auf die Gesundheit. Hintergrund ist die Behauptung, dass die Frequenz des von Windenergieanlagen erzeugten Schalls spezielle Merkmale aufweist, die gegenüber anderen Umweltschallquellen besondere Gesundheitsgefährdungen mit sich bringen können.

Windenergieanlagen erzeugen zweierlei Schall: Die Getriebe und Generatoren verursachen ein mechanisches Geräusch, aber das ist weniger auffällig als der aerodynamische Schall der Rotorblätter, deren Spitzen Geschwindigkeiten von über 320 km/h erreichen können. Windenergieanlagen mit dreiflügeligen Rotoren drehen häufig einmal in 3 Sekunden, das heißt die Durchgangsfrequenz der Rotorblätter liegt bei 1 Hz (Hz = Zyklen pro Sekunde). Aus diesem Grund steigt und fällt der aerodynamische Schall häufig ca. einmal pro Sekunde und ergibt einen Klang, den manche Menschen als rauschendes oder pulsierendes Geräusch beschreiben.

Tabelle 1:

Hörgrenze beim Menschen bei verschiedenen Frequenzen	
Frequenz (Hz)	Hörgrenze (dB SDP)
100	27
25	69
10	97

SDP – Schalldruckpegel

Mehrere Studien^{44, 75, 76} haben gezeigt, dass bei Entfernungen von 300 m oder mehr der von Windenergieanlagen erzeugte Schall bei Frequenzen unter 50 Hz unterhalb der menschlichen Hörgrenze liegt. Die am besten hörbaren Frequenzen (deren akustische Energie die Hörgrenze des Menschen am weitesten übersteigt) liegen im Bereich zwischen 500 und 2.000 Hz. Bei der genannten Entfernung zu einer einzelnen Windenergieanlage liegen die Gesamtpegel normalerweise zwischen 35 und 45 dBA.^{77, 78} Dies ist in einem typischen Wohnhaus bei einem Umgebungsschallpegel von 30 dBA und offenem Fenster unter Umständen hörbar (ein Raum mit einem Umgebungsschallpegel von 30 dBA wird von den meisten Menschen als ruhig oder sehr ruhig angesehen). Im Außenbereich sinken die Schallpegel bei doppelter Entfernung von der Schallquelle im Allgemeinen um jeweils 6 dB, so dass sich bei einer Entfernung von 1.200 m Schallpegel von 23 bis 33 dBA ergeben, was normalerweise unterhalb des Umgebungsschallpegels in geschlossenen Räumen liegt. Bei einem Windpark mit 12 Großwindenergieanlagen gingen Møller und Pedersen⁷⁹ in einer Entfernung von ca. 450 m von 35 dBA aus.

Wie in diesem Bericht bereits dargestellt, wird die Schallintensität normalerweise in Dezibel (dB) gemessen. Einen Schall mit einem Schalldruckpegel von 0 dB entspricht dem leisesten Ton, den junge Menschen hören können. Grundsätzlich aber hören Menschen nur in dem Frequenzbereich gut, der für die gesprochene Sprache verwendet wird, ca. 500 bis 5.000 Hz. Bei tieferen Frequenzen liegen die Hörgrenzen viel höher.⁷⁵ Frequenzen unter 20 Hz werden zwar üblicherweise als „Infraschall“ bezeichnet, Geräusche in diesem Frequenzbereich sind dennoch hörbar, aber nur bei extremer Intensität (ein Geräusch mit einem Schalldruckpegel von 97 dB hat 10 Millionen mal so viel Energie wie ein Geräusch mit 27 dB [siehe Tabelle 1]).

Komplexe Geräusche wie die von Windenergieanlagen erzeugten enthalten in mehreren Frequenzbereichen Energie. Die umfassendste Beschreibung solcher Geräusche umfasst dB-Pegel für jedes der unterschiedlichen Frequenzbänder (z. B. 22 bis 45 Hz, 45 bis 90 Hz, 90 bis 180 Hz, . . ., 11.200 bis 22.400 Hz). Einfacher, und in den meisten Fällen völlig ausreichend, ist es, die allgemeine Schallintensität mithilfe von Messgeräten zu erfassen, die den von Menschen gut hörbaren Frequenzbereich in vollem Maß und Frequenzen unter 500 Hz und über 5.000 Hz weniger stark bewerten. Die Ergebniswerte werden dann in A-bewerteten Dezibel (dBA) angegeben. In dBA gemessene Schallpegel liegen gut im hörbaren Bereich. An einer sehr ruhigen Stelle können gesunde, junge Menschen Geräusche auch unter 20 dBA normalerweise wahrnehmen.

Tieffrequenz- und Infraschall

Wie weiter oben im Abschnitt „Tieffrequenz- und Infraschallpegel“ bereits detaillierter dargestellt, werden Geräusche im Frequenzbereich von 20 bis 250 Hz im Allgemeinen als Tieffrequenzschall (TFS) bezeichnet. Die möglichen Auswirkungen von durch Windenergieanlagen verursachtem Tieffrequenzschall auf die menschliche Gesundheit wurden in einer Studie mit 4 großen und 44 kleineren Anlagen in den Niederlanden untersucht.¹⁷ Sehr nahe bei den Anlagen lagen die Infraschallpegel unterhalb der Hörgrenze. Die Autoren legen nahe, dass Tieffrequenzschall möglicherweise ein wichtiger Punkt bei den Lärmemissionen von Windenergieanlagen ist. Allerdings stellten sie keine Verbindung von gemessenen oder im Modell entwickelten Schallpegeln mit gesundheitlichen Messungen, wie Reizbarkeit, her.

In einer Literaturstudie zu Tieffrequenz- und Infraschall wurde geschlossen, dass Tieffrequenzschall von Windenergieanlagen in der Nähe von Häusern die Schallpegel anderer allgemeiner Geräusche,

wie beispielsweise Straßenverkehr, nicht überstieg.⁴⁴ Die Autoren gaben an, dass „ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Schallpegeln und selbstberichteten Schlafstörungen in zwei der drei (epidemiologischen) Untersuchungen festgestellt wurde“.^(S. 1) Es wurde zwar vermutet, dass Tieffrequenzschall von Windenergieanlagen andere und schwerwiegendere Gesundheitsstörungen verursacht, allerdings fehlen hierfür die empirischen Nachweise.⁴⁴

Geräusche mit Frequenzen unter 20 Hz (also Infraschall) können bei sehr hohen Pegeln hörbar sein. Bei noch höheren Pegeln nehmen Betroffene auch Symptome von sehr tieffrequenten Geräuschen wahr: Ohrendruck (bei Schalldruckpegeln von gerade 127 dB), Ohrenschmerzen (bei Pegeln von über 145 dB), Vibrationen im Brust- oder Bauchbereich, Erstickungsgefühl, Husten und Übelkeit (bei Pegeln über 150 dB).^{80, 81} Bei der NASA werden Infraschallexpositionen mit einem Schalldruckpegel von unter 140 dB für Astronauten als sicher angenommen. Die ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) empfiehlt einen Schalldruckgrenzwert von 145 dB für 1/3 Oktavbandpegel zwischen 1 und 80 Hz.⁸¹ Wie bereits festgestellt, lag der in der Nähe von Wohnhäusern gemessene Infraschall von Windenergieanlagen viele Größenordnungsstufen unter diesen Pegeln.

Falls die Geräusche von Windenergieanlagen doch hörbar sind, empfinden einige Personen sie ggf. als störend, wie in diesem Bereich bereits dargestellt wurde. Einige Autoren vertreten allerdings die Hypothese, dass sich sogar unhörbarer Schall, insbesondere bei tiefen Frequenzen, auf Menschen auswirkt, bei denen bestimmte Rezeptortypen aktiviert werden, wie die folgenden:

1. die äußeren Haarzellen der Innenohrschnecke.⁸²
2. die Haarzellen des normalen vestibulären Systems,⁸³ insbesondere die otolithischen Organe⁸⁴
3. die Haarzellen des vestibulären Systems, nachdem ihre Flüssigkeitsdynamik durch Infraschall unterbrochen wurde⁸²
4. die als Schwingungssensoren dienenden viszerale Gravizeptoren.⁸³

Zur Bewertung dieser Hypothesen ergibt es Sinn, sich bestimmte Aspekte der Anatomie und die Physiologie des Innenohrs (insbesondere die Unterschiede zwischen der Cochlea und den vestibulären Organen), die vibrotaktile Sensitivität gegenüber luftübertragenem Schall sowie die Arten von Nachweisen vor Augen zu führen, die zwar derzeit noch fehlen, in der Theorie aber eine oder mehrere dieser Hypothesen untermauern könnten.

Funktionsweise des Innenohrs

Das Innenohr umfasst die Cochlea (das Hörorgan) und die fünf vestibulären Organe (drei halbkreisförmige Kanäle und die beiden otolithischen Organe, die die Informationen zur Position und Bewegung des Kopfs übertragen). Die Cochlea und die vestibulären Organe haben etwas Wichtiges gemein: Sie wandeln Schallwellen oder Bewegungen des Kopfs mithilfe von Haarzellen in Nervenimpulse um, die dann an das Gehirn übertragen werden können. Haarzellen sind Mechanorezeptoren, die nur dann Nervenimpulse auslösen können, wenn ihre Stereozilien (Sinneshärchen) gebogen sind.

Die Anatomie der Cochlea stellt sicher, dass ihre Sinneshärchen gut auf Luftschallübertragung und schlecht auf Kopfbewegungen reagieren, während die vestibulären Organe die Sinneshärchenreaktionen auf Kopfbewegungen optimieren und auf Luftschall minimieren. Insbesondere sind die Sinneshärchen der Cochlea nicht mit der otischen Kapsel verbunden und das runde

Fenster ermöglicht den Flüssigkeiten der Cochlea sich freier zu bewegen, wenn luftübertragener Schall die Gehörknöchelchen (Stapedes) im ovalen Fenster vor- und zurückbewegt. Dagegen sind die vestibulären Haarzellen mit der otischen Kapsel verbunden und die sie umgebenden Flüssigkeiten liegen nicht zwischen den beiden Fenstern und können sich daher bei luftübertragenem Schall auch nicht so frei bewegen. Dies macht es, einfach gesprochen, unwahrscheinlich, dass nicht hörbarer Schall von Windenergieanlagen das vestibuläre System beeinflussen kann.

Reaktion auf Luftschall

Luftschall bewegt das Trommelfell und die Gehörknöchelchen vor und zurück. Diese Bewegung am ovalen Fenster verdrängt Flüssigkeit im Innenohr, was eine Bewegung der Membrane in der Cochlea zur Folge hat. Dadurch werden die Stereozilien der Haarzellen gebogen. Dennoch hängt diese Verlagerung der Haarzellen in der Cochlea davon ab, dass zwei Fenster dass Innenohr vom Mittelohr trennen (die Haarzellen der Cochlea liegen dazwischen). Wenn das ovale Fenster (die feste durch ein dünnes ringförmiges Band gehaltene Grundplatte der Gehörknöchelchen) nach innen gedrückt wird, bewegt sich das runde Fenster (eine von einer Schleimhaut umgebene Kollagenmembran) nach außen und umgekehrt. Wird das runde Fenster im Experiment verschlossen,⁸⁵ wird die Empfindlichkeit der Cochlea gegenüber Schall um 35 dB reduziert.

Die vestibulären Haarzellen liegen dagegen nicht zwischen den beiden Fenstern der Cochlea, sodass vom Luftschall bewegte Innenohrflüssigkeit sie nicht wirksam erreichen kann. Stattdessen sind die vestibulären Haarzellen mit dem Schädelknochen verbunden und können dadurch zuverlässig auf Kopfbewegungen reagieren (die Haarzellen der Cochlea sind nicht unmittelbar mit dem Schädelknochen verbunden). Erwartungsgemäß können die vestibulären Haarzellen aber auch auf Schwingungen des Kopfes (knochengeleiteter Schall) reagieren, wie bei einer Stimmgabel, die an das Mastoid gehalten wird. Sehr intensiver Luftschall kann ebenfalls Schwingungen am Kopf verursachen. Personen mit schwerer Leitungsschwerhörigkeit können Luftschall auf diese Weise wahrnehmen, aber auch nur dann, wenn der Schall gegenüber bei Menschen mit normaler Hörfähigkeit um 50 bis 60 dB verstärkt wird.

Die Cochlea enthält zwei Arten von Haarzellen. Häufig wird gesagt, dass wir mit unseren inneren Haarzellen (IHC – inner hair cells) hören, denn alle afferenten Neuronen des Typs I, die von Schallwellen verursachte Impulse zum Gehirn transportieren, sind mit den IHCs verbunden. Die äußeren Haarzellen (OHC – outer hair cells) sind als eine Art Vorverstärker von Bedeutung, mit denen auch sehr leise Geräusche gehört werden können. Sie sind eigens auf ganz spezielle Frequenzen eingerichtet, und wenn sie sich bewegen, erzeugen sie Flüssigkeitsströme, die dann die Stereozilien der IHCs verlagern.

Obwohl sie viel zahlreicher sind als die IHCs, erhalten die OHCs nur eine sehr geringfügige afferente Innervation von den „Typ II“-Neuronen, deren Funktion unbekannt ist. Salt und Hullar⁸² haben festgestellt, dass die OHCs messbare als cochleare Mikrofonien bezeichnete elektrische Reaktionen auf sehr tiefe Frequenzen (z. B. 5 Hz) erzeugen, die für Tiere vermutlich nicht hörbar sind. Sie nahmen an, dass die afferenten Fasern vom Typ II der OHCs unter Umständen die Informationen zum Gehirn transportieren. Dennoch scheint es, dass bisher niemand Aktionspotenziale von cochlearen Neuronen des Typs II aufgezeichnet oder abgesehen von den cochlearen Mikrofonien je andere physiologische Reaktionen auf nicht hörbare Schallwellen aufgenommen hat.^{86, 87} Anders ausgedrückt, wie Salt und Hullar⁸² anerkennen, „bedeutet die Tatsache, dass einige Bestandteile des Innenohrs (wie die OHCs) unter Umständen auf (luftübertragenen) Infraschall im

Frequenzbereich und Pegel wie der von Windenergieanlagen generierte Schall reagieren, nicht notwendigerweise, dass sie auch wahrgenommen werden oder in irgendeiner Form eine Funktion stören“.^(S. 19)

Reaktionen der vestibulären Organe

Wie bereits erwähnt, sind die vestibulären Haarzellen wirksam mit dem Schädelknochen verbunden. Die drei halbkreisförmigen Kanäle in jedem Ohr dienen dazu, auf Bewegungen des Kopfs (Drehung, Neigung, Schiefelage, auch in beliebiger Kombination) zu reagieren. Wird der Kopf geschüttelt, um ein „Nein“ zu signalisieren, bleibt die Flüssigkeit in den Kanälen hinter der Kopfbewegung zurück und die Haarzellen werden gekrümmt. Die otolithischen Organe (Utriculus und Sacculus) enthalten Kalziumkarbonatkristalle (Statokorien), die dichter sind als die Innenohrflüssigkeit. Diese Anordnung ermöglicht auch die Erkennung einer statischen Kopfposition. Wenn der Kopf geneigt wird, biegt die Wirkung der Erdanziehung auf die Statokorien die Haarzellen. Die otolithischen Organe reagieren auch auf die lineare Beschleunigung des Kopfs, ähnlich wie bei einem Fahrzeug, das beschleunigt wird.

Zahlreiche Personen, die über Windenergieanlagen klagen, berichteten über Schwindel, was unter Umständen auf vestibuläre Störungen hindeutet. Dies hat zu der Annahme geführt, dass die von Windenergieanlagen verursachten Lärmemissionen, insbesondere der nicht hörbare Infraschall, die vestibulären Organe stimulieren können.^{83, 84} Pierpont⁸³ führte den Begriff des „Wind Turbine Syndrome“ (Windenergieanlagen-Syndrom) ein. Grundlage ist eine Fallserie von 10 Familien, die über Symptome berichteten, die sie mit der Nähe ihrer Häuser zu Windenergieanlagen in Zusammenhang brachten. Die Autorin lud Personen zur Teilnahme ein, die glaubten, dass sie wegen der räumlichen Nähe ihres Lebensumfelds zu Windenergieanlagen an bestimmten Symptomen litten. Dieser Ansatz stellte eine erhebliche Stichprobenverzerrung dar, die die Ergebnisse und ihre Bedeutungen beeinflussen konnten. Darüber hinaus wurden Telefonbefragungen durchgeführt, es gab keine medizinischen Untersuchungen, diagnostische Studien oder Überprüfungen, und die Dokumentation der medizinischen Daten erfolgte als Bestandteil der Fallserien. Des Weiteren gab es keine Schallmessungen. Dennoch beschrieb die Autorin eine Reihe von unspezifischen Symptomen, die sie als „Windenergieanlagen-Syndrom“ bezeichnete. Die Fallserie war zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht in einem wissenschaftlichen Fachjournal veröffentlicht worden. Es gibt dafür zwar keine medizinische Bestätigung, aber die Vertreter dieser Theorie von der „Gesundheitsstörung“ legen nahe, dass der Betrieb von Windenergieanlagen Symptome wie Kopfschmerzen, Gedächtnisverlust, Müdigkeit, Schwindel, Tachykardien, Reizbarkeit, Konzentrationsstörungen und Angst auslöst.⁸⁸

Zur Unterstützung ihrer Hypothesen gab Pierpont einen Bericht von Todd et al.⁸⁹ an, der zeigte, dass die vestibulären Organe des Menschen auf knochenübertragenen Schall reagierten, der unterhalb der Hörgrenze lag. Dies ist, wie bereits erwähnt, aber nicht überraschend, da das vestibuläre System darauf ausgelegt ist, auf die Bewegungen des Kopfs zu reagieren (einschließlich der Schwingungen durch direkten Kontakt mit einer Schwingungsquelle). Das relevante Problem ist, wie das vestibuläre System auf Luftschall reagiert, und hier ist die Beweislage eindeutig. Eine Reaktion des vestibulären Systems auf Luftschall erfordert Schallpegel, die weit über der Hörgrenze liegen.^{90, 91} Klinische Tests der vestibulären Funktion verwenden Luftschall mit einem Pegel von über 120 dB, was zu Bedenken wegen eines akustischen Traumas führt.⁹²

Salt und Hullar⁸² räumen ein, dass ein normales vestibuläres System auf nicht hörbaren Luftschall wahrscheinlich nicht reagiert:

„Die Haarzellen in anderen Sinnesstrukturen, wie den Sacculi, können Infraschallfrequenzen zwar möglicherweise erkennen, aber die auditorische Reizleitung dieser Strukturen ist ineffizient, sodass sie durch luftübertragenen Infraschall wahrscheinlich nicht beeinflusst werden.“^(S. 12) Des Weiteren stellen sie die Hypothese auf, dass Infraschall unter Umständen endolymphatische Hydrops auslöst, eine Erkrankung, bei der die Kammern mit Innenohrflüssigkeit anschwellen und möglicherweise die normale Haarzellenfunktion stören. Aber auch hier räumen sie das Fehlen von Nachweisen ein: „... es wurde nie überprüft, ob Stimuli im Infraschallbereich endolymphatische Hydrops auslösen.“^(S. 19) In einer vorangegangenen Forschungsarbeit konnte Salt⁹³ mithilfe von Luftschall bei Tieren vorübergehende Hydrops auslösen. Dies gelang aber nur bei Pegel von 115 bis 200 Hz, die viele Größenordnungen über den Pegeln liegen, die bei oder in Wohnhäusern in der Nähe von Windenergieanlagen auftreten.

Vibrotaktile Sensitivität des Menschen gegenüber luftübertragenem Schall

Sehr lauter Schall kann Schwingungen von Kopf und Körper verursachen. Wie bereits erwähnt, kann eine Person mit fehlender Mittelohrfunktion aber intakter Cochlea Schall mit einem Schalldruckpegel von 50 bis 60 dB hören. Völlig gehörlose Menschen können Luftschall über den vibrotaktilem Sinn aufnehmen, aber nur bei Pegeln, die weit über der Hörgrenze liegen, beispielsweise bei einem Schalldruckpegel von 128 dB bei 16 Hz.⁹⁴ Die vibrotaktile Wahrnehmung hängt von den Rezeptoren in Haut und Gelenken ab.

Pierpont⁸⁴ stellte die Hypothese auf, dass die „viszeralen Gravizeptoren“^{95, 96} die somatosensorische Rezeptoren enthalten, luftübertragenen Infraschall über die Lunge und das Zwerchfell und die abdominalen Organe erkennen könnten. Diese Rezeptoren scheinen zwar gut geeignet zu sein, um eine Körperneigung oder möglicherweise Schwingungen am ganzen Körper zu erkennen, es liegt allerdings kein Nachweis dafür vor, dass Luftschall sensorische Rezeptoren im Abdomen stimulieren kann. Luftschall wird ohnehin vom Körper fast vollständig reflektiert. Als Takahashi et al.⁹⁷ Schwingungen des Brust- und Bauchbereichs mithilfe von Luftschall herbeizuführen, die über der umgebenden Eigenschwingung des Körpers lagen, mussten sie bei 20 bis 50 Hz einen Pegel von über 100 dB einsetzen.

Weitere erwähnenswerte Studien

Der Einfluss einer vorgefassten Meinung auf die Stimmung und physische Symptome nach der Exposition gegenüber tieffrequentem Schall wurde anhand von 54 Studenten untersucht, die, in zwei Gruppen aufgeteilt, je eine Reihe von Kurzvideos zu sehen bekamen. Eine Videoreihe unterstützte die Auffassung, dass der von Windenergieanlagen generierte Schall Auswirkungen auf die Gesundheit hatte, die anderen Videos vermittelten das Gegenteil. Nach einer Ruhepause von 10 Minuten wurden die Studenten computergeneriertem Infraschall (mit 40 dB bei 5 Hz) ausgesetzt, anschließend wurden sie zu ihrer Stimmung und einer Reihe von physischen Symptomen befragt.⁷¹ In einem doppelt verblindeten Protokoll sahen die Teilnehmer zuerst entweder eine Präsentation mit hohem Erwartungscharakter, in der Personen in der ersten Person über Symptome berichteten, die im Zusammenhang mit Windenergieanlagen standen. Oder sie sahen eine Präsentation mit niedrigem Erwartungscharakter, in der Fachleute mit wissenschaftlicher Argumentation darstellten, dass Infraschall keine Symptome verursacht. Anschließend wurden die Teilnehmer 10 Minuten lang Infraschall ausgesetzt und 10 Minuten mit vorgetäuschem Infraschall. Vor und während jeder 10-minütigen Exposition berichteten die Teilnehmer von physischen Symptomen.

Die Studie zeigte, dass gesunde Freiwillige, die Informationen mit hohem oder niedrigem Erwartungscharakter erhielten, nach denen die Exposition gegenüber Infraschall physische Beschwerden verursacht, tatsächlich über Symptome berichteten, die mit dem Grad der Erwartung übereinstimmten. Diese Daten zeigen, dass die Erwartungen der Teilnehmer zu den Lärmemissionen von Windenergieanlagen die Muster ihrer selbstberichteten Symptome beeinflussten, unabhängig davon, ob die Exposition tatsächlich stattfand oder nur vorgetäuscht wurde. Dieses als „Nocebo“-Reaktion bekannt gewordene Konzept – im Wesentlichen genau das Gegenteil des „Placebo“-Effekts – wird im weiteren Verlauf dieses Berichts noch detaillierter erörtert. Eine Nocebo-Reaktion bezeichnet eine vorgefasste negative Reaktion auf die Erwartung eines Ereignisses.⁹⁸

In einer weiteren Studie wurde bestimmt, inwieweit positive oder negative Gesundheitsdaten über den von Windenergieanlagen erzeugten Infraschall die Symptome der Teilnehmer und ihre Wahrnehmung nach der Exposition gegenüber Windparkinfraschall beeinflussen.⁷² So wurden 60 Studenten zunächst Kurzvideos mit hoher bzw. niedriger Erwartungscharakteristik gezeigt, die die Auffassung unterstützten oder zurückwiesen, dass der von Windenergieanlagen erzeugte Schall die Gesundheit beeinträchtigte. Anschließend wurden diese Studenten tieffrequentem Schall ausgesetzt und sie danach sowohl zu physischen Symptomen als auch zu ihren Stimmungen befragt. Eine Videoreihe zeigte Informationen, die nahelegten, dass die Exposition gegenüber dem von Windenergieanlagen erzeugten Schall, insbesondere Infraschall, ein Gesundheitsrisiko darstelle. Die andere Reihe verglich den Schall von Windenergieanlagen dagegen eher mit einer Art Unterschall, wie er auch bei Naturphänomenen auftritt, beispielsweise im Fall von Wind und Meereswellen. Auf diese Weise sollten die positiven Auswirkungen auf die Gesundheit hervorgehoben werden. Während zweier 7-minütiger Hörsitzungen wurden die Studenten dann einer Dauerbeschallung sowohl mit Infraschall (50,4 dB, 9 Hz) als auch mit hörbarem Windparkschall (43 dB) unterzogen, der 1 km von einem Windpark entfernt aufgenommen worden war. Anschließend wurden sie zu ihrer Stimmung und einer Reihe von Symptomen befragt. Beiden Gruppen – der mit hoher und der mit niedriger Erwartungscharakteristik – wurde mitgeteilt, dass sie den Schall eines Windparks hörten und dieser Schall sowohl hörbare Bestandteile als auch Unterschall enthielte und in beiden Sitzungen den gleichen Pegel habe. Die Teilnehmer, die den Windparkschall hörten, spürten eine Placebo-Reaktion, hervorgerufen durch die positiven Erwartungen vor der Exposition. Bei ihnen war die Erwartung geweckt worden, dass Infraschall der Gesundheit zuträglich sei und sie berichteten dann auch von gesundheitlich positiven Auswirkungen. Sie schlossen daraus, dass Berichte über Symptome oder negative Auswirkungen durch positive Erwartungen beseitigt werden könnten.

Studenten wurden 10 Minuten lang dem aufgenommenen Schall in jeweils 100 m Entfernung von mehreren Windenergieanlagen in Schweden ausgesetzt und anschließend zu Merkmalen möglicher Reizbarkeit befragt.⁹⁹ Der Schall wurde stets mit einem Pegel von 40 dBAeq abgespielt (das „eq“ steht für den durchschnittlichen Pegel über die 10 Minuten hinweg). Nach der ersten Exposition wurden die Studenten weitere 3 Minuten beschallt, während sie die Fragebögen ausfüllten. Die Autoren berichteten, dass die Bewertungen der Reizbarkeit, der relativen Reizbarkeit und der Schallwahrnehmung bei den mit gleichem Schallpegel abgespielten unterschiedlichen Aufnahmen der Windenergieanlagen auch unterschiedlich ausfielen. Verschiedene psychoakustische Parameter (Schärfe, Loudness, Rauheit, Fluktuationsstärke und Modulation) wurden beurteilt und in Profile zusammengefasst. Attribute wie „klatschen“, „rauschen“ und „pfeifen“ wurden eher notiert und als möglicherweise störend

empfundener als „tieffrequent“ und „mahlend“, die weniger eindringlich und möglicherweise auch weniger störend dargestellt wurden.

Erwachsene wurden mit dem aufgezeichneten Schall einer koreanischen 1,5 MW-Windenergieanlage beschallt und zu ihrem Grad der Lärmbelästigung befragt.¹⁰⁰ 40 Minuten lang wurde den Teilnehmern eine Reihe von 25 zufälligen 30-Sekunden-Aufzeichnungen von Windenergieanlagenschall vorgespielt, die immer von wenigstens 10 Sekunden Stille unterbrochen wurden. Nach einer Ruhepause von 3 Minuten wurde das Muster wiederholt. Die Teilnehmer berichteten über ihr Maß an Reizbarkeit auf einer Skala von 1 bis 11. Die Autoren stellten fest, dass die Amplitudenmodulation der Lärmemissionen von Windenergieanlagen eine statistisch signifikante Auswirkung auf die Wahrnehmung der Lärmbelästigung durch die Teilnehmer zeitigte.

Die Auswirkungen der psychologischen Komponenten auf die Wahrnehmung des von Windenergieanlagen erzeugten Schalls wurden auch in Italien mit Erwachsenen aus städtischen und ländlichen Gebieten beurteilt. Der aus unterschiedlichen Entfernungen (150 m, 250 m und 500 m) aufgenommene Schall von Windenergieanlagen wurde abgespielt. Dabei wurden Bilder von Windenergieanlagen gezeigt und die Teilnehmer zu ihren Reaktionen auf die Bilder befragt.⁷³ Die Bilder unterschieden sich in der Farbe sowie in der Anzahl und der Entfernung der Anlagen. Die Bilder zeigten nur geringe Auswirkungen auf die Reaktionen der Teilnehmer hinsichtlich der Anzahl der Windenergieanlagen. Die Farben der Anlagen wirkten sich dagegen auf die Reaktionen der Einzelpersonen zu den optischen und akustischen Reizen aus, wenn auch in unterschiedlicher Weise.

Windenergieanlagen und Epilepsie

Schnell sich ändernde optische Reize, wie Blinklicht oder hin- und herwechselnde Muster, können bei empfindlichen Personen Anfälle auslösen (auch wenn diese Personen sonst keine spontan auftretenden Anfälle erleiden). Reize mit einer Änderungsfrequenz von 12 bis 30 Hz lösen mit der höchsten Wahrscheinlichkeit solche Anfälle aus.¹⁰¹ Drehende Rotorblätter (eines Deckenventilators, eines Hubschraubers oder einer Windenergieanlage), die eine Lichtunterbrechung bewirken, können Flimmern oder Flackern hervorrufen. Dies führt zu der Sorge, dass Windenergieanlagen unter Umständen ebenfalls Anfälle auslösen können. Aber die Rotoren von Großwindenergieanlagen (mit 2 MW oder mehr) drehen sich normalerweise mit einer Frequenz von unter 1 Hz. Bei drei Rotorblättern läge die Lichtunterbrechungsrate damit bei unter 3 Hz, was ein vernachlässigbares Risiko eines fotoepileptischen Anfalls darstellt.¹⁰²

Smedley et al.¹⁰³ setzten ein komplexes Simulationsmodell zum Risiko eines Anfalls durch Windenergieanlagen um. Sie gingen dabei von den ungünstigsten denkbaren Annahmen aus: ein unbewölkter Himmel, ein Beobachter, der genau durch das Rotorblatt einer Windenergieanlage hindurch direkt in die Sonne blickt, aber dabei die Augen geschlossen hält (weil dadurch das Licht breiter über die Retina verteilt wird). Sie schlussfolgerten, dass ein Risiko eines Anfalls bei einem Abstand von bis zu neun Mal der Höhe einer Windenergieanlage bestünde, aber nur dann, wenn die Frequenz der Rotors über 3 Hz betrüge, was bei einer großen Windenergieanlage nur selten vorkommt. Kleinere Anlagen, die üblicherweise nur den Strom für ein Gebäude liefern, drehen sich häufig mit einer höheren Frequenz, was unter Umständen ein höheres Risiko der Verursachung eines Anfalls darstellt. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit gab es keinen veröffentlichten Bericht eines fotoepileptischen Anfalls, der dadurch ausgelöst wurde, dass jemand den Rotor einer Windenergieanlage ansah.

Windenergieanlagen und Schlaf

Schlafstörungen treten in der Bevölkerung allgemein relativ häufig auf und haben zahlreiche Ursachen, wie unter anderem bestimmte Erkrankungen, Depressionen, Stress oder die Einnahme bestimmter Medikamente. Auch Lärm oder Geräusche sind dafür bekannt, dass sie den Schlaf stören können. Der wesentliche Punkt im Zusammenhang mit Windenergieanlagen ist, ob der Lärm laut genug ist, um den Schlaf zu stören. Zahlreiche Umweltstudien zum Lärm durch Luft-, Schienen- und Autobahnverkehr haben sich mit den Auswirkungen auf den Schlaf befasst. Viele davon wurden im Positionspapier der Weltgesundheitsorganisation WHO zu den Richtlinien zum nächtlichen Lärm (Nighttime Noise Guidelines) zusammengefasst (Abb. 7).¹⁰⁴ Dieses Konsensdokument basiert auf einer Expertenanalyse zum Umgebungslärm von anderen Quellen, wie Transport, Luftfahrt und Eisenbahnwesen. Die WHO veröffentlichte die Zahlen (siehe Abb. 7), um anzudeuten, dass eine erhebliche Schlafstörung durch Umgebungslärm bereits bei einem Schallpegel ab 45 dBA einsetzt. Diese Zahl entstammt der Analyse eines Datenpools von 24 unterschiedlichen Studien zum Umgebungslärm, wobei Studien zu den Geräuschemissionen von Windenergieanlagen in der Analyse nicht enthalten sind. Dennoch enthalten diese Studien erhebliche Daten zur Exposition gegenüber Umgebungslärm, die im Sinne von Parallelen den durch den Betrieb von Windenergieanlagen entstehenden Schallpegeln gegenübergestellt werden können.

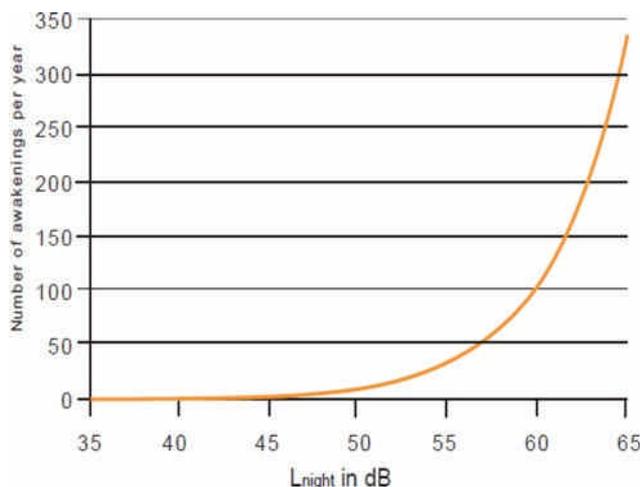
Der Position der WHO gegenüber behauptete ein Autor in einer Arbeit, dass sich bereits der normale Betrieb von Windenergieanlagen mit Umgebungslärm von unter 45 dBA erheblich auf das Schlafverhalten auswirken und einhergehende Folgen für die Gesundheit auslösen könne.¹⁰⁵ Ein anderer Autor wiederum bestritt die Grundlage dieser Aussage und hob hervor, dass Hanning 17 Überarbeitungen des Themas mit anderen Gesichtspunkten und unterschiedlichen Ergebnissen ignoriert habe.¹⁰⁶

Schlafstörungen seien eine potenzielle nicht das Gehör betreffende Auswirkung von Lärmemissionen, und die Forschung habe gezeigt, dass es zwischen der Lärmemissionen von Windenergieanlagen und Schlafunterbrechungen einen Zusammenhang gebe.^{4, 57, 63, 66, 107} Wie bei den anderen überprüften Variablen, wird auch die Quantifizierung von Schlafqualität normalerweise mit groben Mitteln durchgeführt. Tatsächlich gab dieser Prüfer keine Studien an, bei denen eine Schlafmessung mit Mehrfachauswahl durchgeführt wurde. Forschungsstudien verlassen sich bei der Messung der Schlafqualität üblicherweise auf die Einfachabfrage, die teilweise nur mit „Ja“/„Nein“ beantwortet wurde. Solche groben Messungen der Schlafqualität sind unglücklich, da schlechtes Schlafen ein plausibler Pfad ist, auf dem die Lärmemissionen von Windenergieanlagen sowohl das psychische Wohlbefinden als auch die physische Gesundheit beeinträchtigen.

Gestörter Schlaf kann mit negativen Auswirkungen auf die Gesundheit in Zusammenhang gebracht werden.¹⁰⁸ Aufwachgrenzen hängen allerdings sowohl von physischen als auch von psychischen Faktoren ab. Signifikation ist ein psychologischer Faktor, der sich auf die Bedeutung oder Einstellung bezieht, die mit einem Geräusch in Zusammenhang gebracht wird. Geräusche mit einer hohen Signifikation werden einen Schlafenden bereits bei geringerer Intensität erwachen lassen als Geräusche ohne Signifikation.¹⁰⁸ Wie bereits erwähnt, bringen Personen das Geräusch einer Windenergieanlage häufig mit bestimmten Attributen in Verbindung. Das bedeutet, dass die durch Windenergieanlagen verursachten Schlafstörungen unter Umständen von psychologischen Faktoren beeinflusst werden, die mit der Quelle des Geräuschs im Zusammenhang stehen.

Shepherd et al.⁶⁶ stellten einen signifikanten Unterschied bei der wahrgenommenen Schlafqualität zwischen ihrer Windpark- und einer Vergleichsgruppe fest. Die Windparkgruppe berichtete eine geringere Schlafqualität. Bei der Windparkgruppe korrelierte die Lärmempfindlichkeit stark mit der Schlafqualität. Bei beiden Gruppen zeigten die Schlafqualität ähnlich starke positive Beziehungen mit der physischen und der psychischen HRQOL. Pedersen⁶³ stellte fest, dass bei zwei von drei überprüften Studien die Schallpegelexposition mit Schlafunterbrechungen im Zusammenhang stand. Allerdings waren die Auswirkungen durch die Schallexposition minimal.

Bakker et al.⁵⁷ fanden heraus, dass die Schallexposition in ruhigen Gebieten mit Schlafstörungen in Verbindung stand ($d = 0,40$), was aber nicht für Personen in lauterer Gebieten galt ($d = 0,02$). Dennoch zeigten Daten von extremen Schallexpositionen⁵⁷, dass Personen in lauten Gebieten (über 45 dBA) signifikant mehr Schlafstörungen aufwiesen als Personen in leisen Gebieten (mit unter 30 dBA). Die Bewertung der Reizbarkeit stand stärker mit Schlafstörungen im Zusammenhang.⁵⁷ Außerdem ging bei der Anwendung struktureller Gleichungsmodelle (SEM – structural equation model) die direkte Verbindung zwischen dem Schallpegel und den Schlafstörungen verloren und die Reizbarkeit gab die Auswirkungen der von Windenergieanlagen verursachten Schallpegel auf die Schlafstörungen wieder. Den überprüften Studien nach zu urteilen erscheint es, dass Schlafstörungen mit Schallpegelexpositionen im Zusammenhang stehen. Allerdings sind diese Zusammenhänge minimal und die Bewertungen der Reizbarkeit standen stärker und konsistenter mit selbstberichteten Schlafstörungen in Verbindung.



Source: Miedema, Passchier-Vermeer and Vos, 2003

Abb. 7: Ungünstigste Vorhersage von durch Lärm verursachtem Erwachen aus WHO-Bericht¹⁰⁴ (Kapitel 3), Miedema et al.¹⁶³

Number of awakenings per year	Anzahl des Erwachens pro Jahr
L _{night} in dB	L _{Nacht} in dB
Source: Miedema, Passchier-Vermeer and Vos, 2003	Quelle: Miedema, Passchier-Vermeer und Vos, 2003

Schlussfolgerungen

Der Betrieb von Windenergieanlagen kann Tieffrequenz- und Infraschall verursachen. Allerdings konnten weder im Zusammenhang mit Windenergieanlagen noch durch experimentelle Studien Tieffrequenz- und Infraschall mit negativen Folgen für die

Gesundheit in Verbindung gebracht werden.

Reizbarkeit, Windenergieanlagen und mögliche Auswirkungen auf die Gesundheit

Die möglichen Auswirkungen von Schall auf die Gesundheit ergeben sich durch physiologische (Schlafstörungen) und psychische Pfade. Die psychischen Faktoren berichteter Lärmbelästigung im Zusammenhang mit den Lärmemissionen von Windenergieanlagen werden überprüft und analysiert. Eine kritische Abhandlung der methodologischen Angemessenheit aktueller Forschungen zu Windenergieanlagen im Hinblick auf die psychischen Ergebnisse wird ebenfalls behandelt.

Wie bereits erwähnt, wird Reizbarkeit in Studien zum Umgebungslärm seit Jahrzehnten zur Ergebnismessung verwendet. Die Reizbarkeit wird mithilfe eines Fragebogens ermittelt. Da Reizbarkeit unter bestimmten Umständen mit dem Leben in der Nähe von Windenergieanlagen in Zusammenhang gebracht wird, untersucht dieser Abschnitt die Signifikanz der Reizbarkeit, die Risikofaktoren für die Meldung von Reizbarkeit im Zusammenhang mit Windenergieanlagen sowie die möglichen Auswirkungen auf die Gesundheit.

Seit vielen Jahren ist bekannt, dass die Exposition gegenüber hohen Schallpegeln die Gesundheit negativ beeinflussen kann^{109, 110} und dass Umgebungslärm unter Umständen die psychische und physische Gesundheit beeinträchtigen.¹¹¹ Eine wesentliche Grundlage der Bewertung von Auswirkungen auf die Gesundheit durch die Exposition von Schall – wie bei allen Gefährdungen – ist eine sorgfältige Prüfung der Schallintensität und -dauer. Sollen die Ergebnisse auf weitere Aspekte wie Reizbarkeit und Lebensqualität erweitert werden, so müssen zusätzlich auch psychische Faktoren untersucht werden.

Von Lärm verursachte Reizbarkeit ist ein psychischer Zustand, der ggf. in Verärgerung, Enttäuschung, Unzufriedenheit, Rückzugsverhalten, Hilflosigkeit, Depressionen, Angst, Verstörtheit, Unruhe oder Erschöpfung mündet.¹¹² Reizbarkeit wird in erster Linie anhand von standardisierten Selbstberichtsfragebögen festgestellt. Auch bekannte psychische Störungen wie Depressionen sind ein subjektiver Zustand, der sehr häufig durch Selbstberichtsfragebögen festgestellt wird. Trotz ihrer subjektiven Charakteristik wurde lärmbedingte Reizbarkeit von der WHO in ihrem aktuellen Bericht zu der durch Lärm verursachten Krankheitslast als eine negative Auswirkung auf die Gesundheit hinzugefügt.¹¹² Die Einstufung der lärmbedingten Reizbarkeit auf einer Ebene wie die kardiovaskulären Erkrankungen unterstreicht ihren Status als bedeutenden Gesundheitszustand, der die Forschungsstätigkeit im Bereich Umgebungslärm rechtfertigt.

In diesem Abschnitt wird die Literatur zu den Auswirkungen von Windenergieanlagen überprüft, einschließlich der lärmbedingten Reizbarkeit und ihrer Folgen für die Gesundheit, die Lebensqualität und das psychische Wohlbefinden. Der Begriff der „Lebensqualität“ ist ein mehrdimensionales Konzept, das die subjektiven Aspekte der persönlichen Erfahrungen eines Menschen hinsichtlich seiner Funktionen, seines Wohlbefindens und seiner Zufriedenheit im psychischen, geistigen und sozialen Lebensumfeld umfasst. Die WHO definiert Lebensqualität als die „subjektive Wahrnehmung einer Person über ihre Stellung im Leben in Relation zur Kultur und den Wertesystemen, in denen sie lebt, und in Bezug auf ihre Ziele, Erwartungen, Standards und Anliegen. Es handelt sich um ein breitgefächertes Konzept, das in komplexer Weise durch die physische Gesundheit eines Menschen, sein psychisches Befinden, seine persönlichen Überzeugungen, seine sozialen Bindungen und seine Beziehung zu den typischen Merkmalen seiner Umgebung beeinflusst wird.“¹¹³ (S. 1404) Es gibt derzeit zahlreiche umfassend validierte Maßsysteme für die Lebensqualität, unter anderen die am

häufigsten genutzten Fragebögen SF-12 und SF-36¹¹⁴ sowie der WHO-Fragebogen zur Lebensqualität („WHOQOL-BREF“¹¹⁵). Die Messungen zur Lebensqualität wurden weitgehend als Hauptergebnisse für klinische Studien und Kosteneffektivitätsberechnungen verwendet.

Metaanalysen sind eine quantitative Methode für die Zusammenfassung der relativen Größe eines Effekts oder einer Beziehung, wie sie für den Vergleich über unabhängige Studien hinweg verwendet werden.¹¹⁶ Die verstärkte Nutzung von Metaanalysen hat sich beträchtlich auf die Art und Weise ausgewirkt, in der Literaturüberprüfungen durchgeführt werden. Derzeit fordern über 20 verhaltenswissenschaftliche Journale, dass die Autoren von Beiträgen zusammen mit den Signifikanztests auch Maßzahlen zur Effektgröße liefern.¹¹⁷ Die Nutzung von Effektgrößenangaben verbessert die studienübergreifende Vergleichbarkeit der Ergebnisse, da die berichteten Ergebnisse mit allgemeingültigen Maßzahlen verglichen werden können. In der Verhaltensmedizin werden am häufigsten die Effektgrößen Cohen d ¹¹⁸ und r als (univariater) Nullkorrelationskoeffizient verwendet.¹¹⁷ Ein weiterer Vorteil der Ergebnismeldung als Effektgrößen ist die Tatsache, dass es für die Beurteilung der Magnitude dieser (signifikanten) Unterschiede Festpunkte gibt. Die nachfolgend überprüften Studien geben eine Reihe statistischer Analysen an (t -Test, Varianzanalyse, Wahrscheinlichkeitsverhältnisse sowie punktbiseriale und biseriale Korrelation), von denen einige nicht für die Umwandlung in die Effektgröße Cohen d geeignet sind. Den Empfehlungen von McGrath und Meyer¹¹⁸ folgend wird r als allgemeine Effektgröße für die Auswertung von Studien verwendet. Als Referenz kann gesagt werden, dass r zwischen 0,10 und 0,23 einen geringen Effekt, r zwischen 0,24 und 0,36 einen mittleren Effekt und r ab 0,37 einen starken Effekt darstellt.¹¹⁷ Diese Werte sind zwar hilfreiche Richtlinien für den Vergleich von Ergebnissen, aber man muss auch berücksichtigen, dass bei einer medizinischen Forschungsarbeit auch sehr geringen Effekte mit $r < 0,10$ eine große Bedeutung zukommen kann.¹¹⁹

Lärmempfindlichkeit

Zwar ist Lärmempfindlichkeit ein stabil und normal verteilter psychischer Wesenszug,¹²⁰ aber die Vorhersage, wer genau sich durch Geräusche gestört fühlt, folgt keinem zwingend durchschaubaren Prozess.¹²¹ Im Zusammenhang mit Umgebungslärm wurde Lärmempfindlichkeit inzwischen zu einem erheblichen Risikofaktor für die Meldung von Reizbarkeit erhoben¹⁵⁶ und ist ein psychischer Wesenszug, der bestimmt, wie eine Person auf Schall reagiert. Trotz des Fehlens einer allgemeingültigen Definition können sich Menschen mithilfe von Fragebögen zum Lärmempfinden selbst zumeist zuverlässig als wenig (lärmtolerant), mittel oder sehr geräuschanfällig einstufen. Menschen, die sich selbst hier als „sehr geräuschanfällig“ einstufen, gelten im Allgemeinen als lärmempfindlich.

Lärmempfindliche Personen reagieren leichter auf Umgebungslärm, bewerten ihn schlechter und reagieren darauf emotional stärker als lärmtolerante Menschen.^{122–124, 146, 153–156, 159–161} Lärmempfindlichkeit ist nicht an objektiv messbare Hörgrenzen,¹²⁵ an einen Intensitätsunterschied, die Hörreaktionszeit oder die Exponenten der Potenzfunktion für Loudness¹²⁰ gebunden. Sie ist vielmehr ein psychophysiologischer Prozess mit neurokognitiven und psychischen Merkmalen. Lärmempfindliche Personen weisen um ca. 10 dB niedrigere durch Lärm verursachte Reizbarkeitsgrenzen auf als lärmtolerante Personen.¹²³ Dabei wird Lärmempfindlichkeit beschrieben als der Anstieg des Reizbarkeitsrisikos einer Person bei der Exposition gegenüber niedrigen und mittleren Schallpegeln.^{4, 157}

Durch Lärm verursachte Reizbarkeit

Es besteht eine mittlere Korrelation ($r = 0,32$),¹²⁰ wenngleich kein isomorpher Zusammenhang zwischen Lärmempfindlichkeit und durch Lärm verursachte Reizbarkeit. Die WHO¹¹² definiert durch Lärm verursachte Reizbarkeit als eine subjektive Erfahrung, die ggf. in Verärgerung, Enttäuschung, Unzufriedenheit, Rückzugsverhalten, Hilflosigkeit, Depressionen, Angst, Verstörtheit, Unruhe oder Erschöpfung mündet. Einer Untersuchung einer Gruppe internationaler Lärmforscher zufolge ist von Lärm verursachte Reizbarkeit vielschichtig und weist sowohl verhaltensbezogene als auch emotionale Muster auf.¹²⁶ Diese Ergebnisse decken sich mit der Definition von Job¹²² zur Lärmbelastigung als ein mit einer Reihe von Reaktionen einhergehender Zustand, zu denen Frustration, Verärgerung, Dysphorie, Erschöpfung, Rückzugsverhalten und Hilflosigkeit zählen.

Geräusche von Windenergieanlagen und Reizbarkeit

Wie an anderer Stelle in dieser Arbeit bereits festgehalten, haben Pedersen und Kollegen^{58, 61, 62, 65} die weltweit umfangreichsten epidemiologischen Studien mit in der Nähe von Windenergieanlagen lebenden Personen durchgeführt. Diese Studien wurden im Abschnitt „Epidemiologische Studien zu Windenergieanlagen“ weiter oben in dieser Arbeit bereits detailliert diskutiert. Auch andere Autoren haben sich mit Reizbarkeit im Zusammenhang mit dem Leben in der Nähe von Windenergieanlagen befasst.^{57, 61, 125, 127, 128} Pedersen⁶³ verglich später die Daten von drei epidemiologischen Querschnittstudien, um gemeinsame Ergebnisse zu ermitteln. Bei allen drei Studien waren die Schalldruckpegel mit der Lärmbelastigung außerhalb (r zwischen 0,05 und 0,09) und innerhalb der Wohnungen (r zwischen 0,04 und 0,05) dieser Personen verbunden. Diese Effektgrößen lagen alle unter der unteren Effektgrenze von 0,10, was bedeutete, dass die Schallpegel bei der Lärmbelastigung eine untergeordnete Rolle spielten. Der Prozentsatz der Personen, die sich von den Lärmemissionen von Windenergieanlagen gestört fühlten, lag zwischen 7 % und 14 % bei der Exposition in Innenräumen und bei 18 % bis 33 % im Freien.^{58, 61} Diese Werte entsprachen in etwa denen, die auch für andere Formen von Umgebungslärm gemeldet wurden.¹²⁹

Nach Pedersen et al.⁵⁸ ist es die Dynamik der von Windenergieanlagen verursachten Geräuschemissionen, die diese so störend macht. Sie verglichen die selbstberichtete Reizbarkeit aus Studien anderer Formen von Umgebungslärm (Flug-, Straßen-, Eisenbahn-, Industrie- und Rangierlärm) mit der Belästigung durch die Geräusche von Windenergieanlagen. Abgesehen von den Emissionen durch Rangierbahnhöfe, fühlten sich bei Schallpegeln unter 50 dB proportional mehr Teilnehmer von den Geräuschen von Windenergieanlagen gestört als von anderen Formen des Umgebungslärms. Pedersen und Wayne^{107, 128} berichteten, dass die Schallcharakteristiken „Rauschen“ ($r = 0,70$) und „Pfeifen“ ($r = 0,62$) stark mit der Reizbarkeit durch die Geräusche von Windenergieanlagen korrelierten. Andere Autoren kamen zu ähnlichen Ergebnissen. Ein Autor vermutete, dass die Geräusche von Windenergieanlagen akustische Eigenschaften aufwiesen, die sie bei bestimmten Schallpegeln unter Umständen störender machen.⁸⁰ Auch andere Theorien zu beschriebenen Symptomen wurden im Zusammenhang mit dem Leben in der Nähe von Windenergieanlagen vorgeschlagen.¹³⁹

Die mit den Geräuschen von Windenergieanlagen einhergehende Reizbarkeit zeigt im Allgemeinen eine lineare Verbindung. Allerdings lassen sich die Abweichungen bei der Reizbarkeitsrate nur zu 9 % ($r = 0,31$) bis 13 % ($r = 0,36$) mit den Schallpegeln erklären.^{57, 61} Aus diesem Grund spielen die Schalldruckpegel bei der

mit den Geräuschen von Windenergieanlagen einhergehenden Reizbarkeit offenbar zwar eine signifikante wenn auch eingeschränkte Rolle. Zu einer ähnlichen Schlussfolgerung fanden auch Knoppen und Ollson.⁴

Andere zur Reizbarkeit beitragende Faktoren

Schallpegel und Lärmempfindlichkeit tragen zwar zum Reizbarkeitsrisiko einer Person bei, aber auch nicht akustische Faktoren spielen hier eine Rolle. Hierzu zählen der optische Eindruck der Windenergieanlagen, die Frage, ob die betreffende Person einen wirtschaftlichen Nutzen aus den Windenergieanlagen zieht oder die Art des umgebenden Geländes am Wohnort dieser Person.⁴ Pedersen und Waye⁶¹ beurteilten den Effekt der optischen Einflüsse bzw. der Wahrnehmung auf die mit Windenergieanlagen im Zusammenhang stehende Reizbarkeit: Alle oben beschriebenen Variablen standen nach der Überprüfung der Schalldruckpegel signifikant mit selbstberichteter Reizbarkeit in Verbindung. Als diese Variablen gleichzeitig ausgewertet wurden, verblieb neben der Schallexposition nur noch die Reaktion auf den optischen Effekt der Windenergieanlagen als signifikant mit Reizbarkeit im Zusammenhang stehender Aspekt ($r = 0,41$ – dies kann als wesentlicher Effekt angesehen werden). Pedersen und Waye¹²⁸ fanden auch heraus, dass neben der Schallexposition durch die von Windenergieanlagen verursachten Geräusche der optische Eindruck ein signifikanter Faktor für die selbstberichtete Reizbarkeit darstellte. Pedersen et al.⁵⁸ erforschten die Auswirkungen des optischen Eindrucks auf die vom Lärm der Windenergieanlagen verursachte Reizbarkeit. Die logistische Regression zeigt, dass sowohl Schallpegel als auch Lärmempfindlichkeit, die Einstellung gegenüber Windenergieanlagen und der optische Eindruck alles signifikante, eigenständige Anzeiger für Reizbarkeit sind. Dennoch wurde für den optischen Eindruck eine Effektgröße von $r = 0,27$ (mittlerer Effekt) festgestellt, während die Lärmempfindlichkeit einen Wert $r = 0,09$ zeigte. Auch andere Autoren stellten fest, dass der optische Effekt von Windenergieanlagen mit der Bewertung der Reizbarkeit im Zusammenhang steht.¹³⁰ Die Ergebnisse mehrerer Studien stützen die Schlussfolgerung, dass der optische Effekt zur Reizbarkeit durch Windenergieanlagen beiträgt.⁴ In dieser Arbeit wurde festgestellt, dass der optische Effekt eine Effektgröße im mittleren bis hohen Bereich aufweist. Da die Lärmempfindlichkeit und der optische Eindruck konsistent verbunden sind ($r = 0,19$ bzw. $r = 0,26$),^{58, 61} wird angenommen, dass der optische Effekt die Reizbarkeit durch eine multisensorische Aktivierung des Wesenszugs Lärmempfindlichkeit verstärkt.

Windenergieanlagen, wirtschaftliche Vorteile und Reizbarkeit

Einige Studien legen die Vermutung nahe, dass Menschen, die einen wirtschaftlichen Vorteil durch Windenergieanlagen erhalten, weniger wahrscheinlich eine Belästigung angeben. Pedersen et al.⁵⁸ stellten fest, dass Teilnehmer mit wirtschaftlichen Vorteilen durch Windenergieanlagen ($n = 103$) signifikant weniger Reizbarkeit angaben, obwohl sie relativ hohen Pegeln der Lärmmissionen von Windenergieanlagen ausgesetzt waren. Auch Bakker et al.⁵⁷ stellten eine Abschwächung der Reizbarkeit durch wirtschaftliche Vorteile fest. Dieser Effekt der Abschwächung stellte aber nur eine geringe Größe dar ($r = 0,15$).⁵⁷ Über diese Angabe hinaus erfordert die Berücksichtigung von entsprechenden Auswahlkriterien (also Lärmtoleranz) weitere Studienarbeit, da der Erhalt von wirtschaftlichen Vorteilen die persönliche Überlegung voraussetzt, Windenergieanlagen gegen Entgelt auf dem eigenen Grund und Boden zu errichten.

Reizbarkeit, Lebensqualität, Wohlbefinden und

psychischer Stress

Die umfassendste epidemiologische Querschnittstudie zu Lärmmissionen von Windenergieanlagen und deren Auswirkungen auf die Lebensqualität wurde im Norden von Polen durchgeführt.⁶⁷ Die Befragungen wurden bei 1.277 Erwachsenen (703 Frauen und 574 Männer) im Alter von 18 bis 94 Jahren durchgeführt. Diese Gruppe machte eine 10%ige Zweistufen-Stichprobe der ausgewählten Bevölkerungsgruppen aus. Auch wenn es keine Angaben zur Antwortquote gab, wurden die Teilnehmer sequenziell aufgenommen, bis eine 10%ige Stichprobe erreicht war. Der Anteil der eingeladenen Personen, die nicht teilnehmen konnten oder wollten, wurde auf 30% geschätzt (B. Mroczek, persönliche Kommunikation). Die Expositionsvariable war die Nähe (einer Windenergieanlage) zum Wohnort: Dabei wohnten 220 Befragte (17,2%) bis zu 700 m von der nächstgelegenen Windenergieanlage entfernt, 279 (21,9%) zwischen 700 m und 1.000 m, 221 (17,3%) zwischen 1.000 m und 1.500 m sowie 424 (33,2%) weiter als 1.500 m. Verschiedene mithilfe des SF-36 gemessene Anzeiger der Lebensqualität wurden anhand der Nähe zu Windenergieanlagen analysiert. Der SF-36 umfasst 36 Fragen, die in die folgenden Unterskalen gegliedert sind: physische Funktionen, physisches Rollenverhalten, physische Schmerzen, Allgemeingesundheit, Vitalität, Bewertung der sozialen und emotionalen Rolle sowie geistige Gesundheit. Hinzu kamen eine weitere Frage zu gesundheitlichen Veränderungen sowie die visuelle Analogskala zur Beurteilung der Gesundheit. Es ist nicht geklärt, ob Alter, Geschlecht, Bildung und Beruf berücksichtigt wurden. Die Autoren berichten, dass in allen Unterskalen die Befragten, die am nächsten an Windparks lebten, die höchste Lebensqualität angaben. Die Befragten, die weiter als 1.500 m von Windenergieanlagen entfernt lebten, gaben die niedrigsten Werte an. Sie schlossen, dass die geringere Entfernung zu den Windparks keine Verschlechterung der Lebensqualität darstellte.⁶⁷ Die Autoren empfahlen, anhand von nachfolgenden Forschungen die Gründe dafür zu ermitteln, warum hier eine höhere Lebensqualität und bestimmte Gesundheitsanzeiger mit der räumlichen Nähe zu Windparks in Zusammenhang gebracht wurden. Sie vermuteten, dass hier wirtschaftliche Faktoren mit hineinspielen, wie die Möglichkeit, eine Arbeit zu finden oder den Betreiberunternehmen Land verpachten zu können.

Personen, die näher an den Windparks wohnten gaben bessere psychische Gesundheit ($r = 0,11$), physisches Rollenverhalten ($r = 0,07$) und Vitalität ($r = 0,10$) an, als Personen, die weiter entfernt lebten.⁶⁷ Dennoch blieben die Auswirkungen der Studie⁶⁷ unklar, da die Autoren keine Schätzung der Schallpegelexposition vornahmen oder von den Teilnehmern Angaben zur Lärmbelastigung einholten. Allgemein zeigte die durch Lärm verursachte Reizbarkeit – abgesehen von der Studie von Mroczek et al.⁶⁷ – konsistente, geringe Auswirkungen auf die Lebensqualität und das physische Wohlbefinden.

Eine ein Jahr zuvor in Neuseeland durchgeführte Studie mit 39 Teilnehmern kam zu anderen Schlussfolgerungen als die polnische Studie.¹³¹ Dabei wurden die Befragungsergebnisse von 39 Anwohnern innerhalb von 2 km von einer Windenergieanlage im South Makara Valley in Neuseeland mit 139 geografisch und sozioökonomisch gleichen Einzelpersonen verglichen, die mindestens 8 km von einem Windpark entfernt lebten. Die Antwortquoten lag bei beiden Gruppen – in der Nähe bzw. entfernter lebende Anwohner – niedrig, und zwar bei 34% bzw. 32%, auch wenn versucht wurde, die Befragten gegen die Studienhypothese zu verblinden. Neben der Auswahl der Einzelpersonen innerhalb von 2 km oder außerhalb von 8 km um eine Windenergieanlage, wurden keine weiteren Expositionsanzeiger ausgewählt, so dass auch keine tatsächlichen oder berechneten Lärmmissionen von Windenergieanlagen zur Verfügung standen. Das selbstberichtete

physische, psychische und soziale Wohlbefinden beider Gruppen wurde mithilfe subjektiver HRQOL-Skalen beschrieben und verglichen. Gesundheitsbezogene Messdaten der Lebensqualität werden als Alternative zur direkten Gesundheitsbewertung angesehen, insofern als Abstriche beim Wohlbefinden auf mögliche, zugrundeliegende gesundheitliche Einschränkungen zurückgeführt werden können. Die Autoren gaben an, dass es bei einigen HRQOL-Bewertungsbereichen statistisch signifikante Unterschiede zwischen beiden Gruppen gäbe. Die Anwohner im 2-km-Umkreis um eine Windenergieanlage berichteten geringere physische HRQOL-Bewertungen (einschließlich niedrigerer Einzelbewertungen für Schlafqualität und selbstberichtete Energieniveaus) sowie eine geringere umweltbezogene Lebensqualität (einschließlich niedrigerer Einzelbewertungen bei Fragen zur Gesundheitsförderlichkeit der Umwelt und zur Zufriedenheit mit dem Lebensraum). Die nahe beim Windpark lebende Gruppe urteilte bei der physischen HRQOL-Bewertung ($r = 0,21$), der umweltbezogenen Lebensqualität ($r = 0,19$) und der allgemeinen HRQOL ($r = 0,10$) signifikant schlechter als die Vergleichsgruppe. Die Bewertungen der psychischen Lebensqualität unterschieden sich zwar nicht wesentlich ($P = 0,06$), aber die Windparkgruppe hatte bei dieser Maßzahl ebenfalls niedrigere Werte ($r = 0,16$). Bei der Windparkgruppe korrelierte die Lärmempfindlichkeit stark mit der lärmbedingten Reizbarkeit ($r = 0,44$), der psychischen HRQOL ($r = 0,40$) und der sozialen HRQOL ($r = 0,35$). Diese Korrelationen kommen nahe an den von Cohen vorgeschlagenen Grenzwert von $r > 0,37$ heran bzw. übersteigen diesen Wert.

Es wurden keine Unterschiede bei den sozialen oder psychischen HRQOL-Bewertungsbereichen angegeben. Die Windparkgruppe verzeichnete darüber hinaus auch niedrigere Attraktivitätsbewertungen, die auf den Antworten auf zwei allgemeine Fragen beruhen: „Ich bin mit meiner Nachbarschaft bzw. Wohnumgebung zufrieden.“ und „Es fällt mir aufgrund meiner Nachbarschaft bzw. Wohnumgebung schwer, mich zuhause auszuruhen.“ Bei den Gruppen gab es keine Unterschiede hinsichtlich der Lärmbelastung durch den Verkehrs- oder Umgebungslärm in der Nachbarschaft. Das Fehlen konkreter Messdaten zu den Windenergieanlagen oder zu anderen Quellen (beide Punkte wurden von den Autoren als Einschränkungen anerkannt) schränkt allerdings, zusammen mit der niedrigen Antwortquote, die Aussagekraft dieser Studie ein, da sie nur unter Umständen die Emissionen der Windenergieanlagen betrifft.

Anhand von drei Studien konnte Pedersen⁶³ ermitteln, dass die Lärmbelastung durch Windenergieanlagen im Freien mit Anspannung und Stress ($r = 0,05$ bis $0,06$) sowie Reizbarkeit ($r = 0,05$ bis $0,08$) – also psychischen Stressfaktoren – im Zusammenhang stand. Bakker et al.⁵⁷ fanden ebenfalls heraus, dass psychischer Stress signifikant mit den Lärmemissionen von Windenergieanlagen ($r = 0,16$), berichteter Reizbarkeit im Freien ($r = 0,18$) sowie in geschlossenen Räumen ($r = 0,24$) in Verbindung stand. Taylor et al.⁶⁹ stellten fest, dass Personen, die in Gegenden lebten, in denen die Wahrscheinlichkeit gering war Lärmemissionen von Windenergieanlagen zu hören, signifikant höhere Werte positiver Empfindungen angaben als Personen, die in Gegenden mit mittlerer oder hoher Lärmbelastung ($r = 0,24$) lebten. Sie gaben für die Gruppe mit geringerer Lärmbelastung ein größeres Wohlbefinden an.

Persönlichkeitsfaktoren und Lärmemissionen von Windenergieanlagen

Persönlichkeitspsychologen nutzen fünf bipolare Faktoren (Neurotizismus, Extraversion-Introversion, Offenheit, Verträglichkeit und Gewissenhaftigkeit), um die Wesenszüge einer Person zu charakterisieren.¹³² Zwei dieser Faktoren, nämlich

Neurotizismus und Extraversion-Introversion, wurden im Zusammenhang mit Lärmempfindlichkeit und Reizbarkeit untersucht. Neurotizismus wird charakterisiert durch negative emotionale Reaktionen, Empfindlichkeit gegenüber schädlichen Anzeichen in der Umgebung und eine Tendenz zur Bewertung von Situationen als bedrohlich.¹³³ Introversion (das Gegenteil von Extraversion) gekennzeichnet von sozialer Zurückhaltung, Ängstlichkeit und Hemmungen.¹³³ Es wurde eine starke negative Korrelation gezeigt zwischen Lärmempfindlichkeit (in der Selbstbeurteilung) und selbstbewerteter Extraversion,¹²⁵ in dem Sinn, dass introvertierte Menschen lärmempfindlicher sind. Introvertierte Menschen, die leisen Geräuschen ausgesetzt sind, zeigen eine größere Neigung zu Unaufmerksamkeit als extrovertierte.¹³⁴ Extrovertierte und introvertierte Menschen unterscheiden sich auch in ihren Reizschwellen und zwar insofern, als introvertierte Menschen leichter überreizt werden als extrovertierte.¹³⁵ Trotz dieser Studien ist die potenzielle Verbindung zwischen breiten Persönlichkeitsdomänen und lärmbedingter Reizbarkeit weiterhin unklar.

Taylor et al.⁶⁹ erforschten den Zusammenhang zwischen Neurotizismus, der Einstellung gegenüber Windenergieanlagen, negativ orientierten Persönlichkeitsmerkmalen (NOP – negative Affektivität, Frustrationsintoleranz) und selbstberichteten nichtspezifischen somatischen Symptomen (NSS) in Reaktion auf die Lärmemissionen von Windenergieanlagen. Obwohl es sich um eine der wenigen wissenschaftlich überprüften Studien zur Persönlichkeit und Lärmempfindlichkeit handelte, erzielte sie nur eine Antwortquote von 10 %, was Fragen zur Repräsentativität der Ergebnisse offen lässt. Dessen ungeachtet gaben die Teilnehmer eine moderat positive Einstellung gegenüber Windenergieanlagen im Allgemeinen an und schienen eine repräsentative Zielgruppe des örtlichen Gemeinwesens zu sein. In der Studie von Taylor et al.⁶⁹ zeigten die Nullkorrelationen, dass die geschätzten Schallpegel signifikant mit den wahrgenommenen Lärmemissionen der Windenergieanlagen ($r = 0,33$) und verringerten positiven Affekten ($r = -0,32$) im Zusammenhang standen, nicht dagegen mit nichtspezifischen Symptomen ($r = 0,002$), während Neurotizismus und NOP-Merkmale signifikant mit NSS verbunden waren ($r = 0,44$ bzw. $r = 0,34$). Eine multivariate Statistik legte die Vermutung nahe, dass hohe Werte bei den NOP-Merkmalen die Beziehung zwischen wahrgenommenem Lärm und berichteten NSS begünstigten, dass also Teilnehmer mit höheren NOP-Werten über den gesamten Bereich der wahrgenommenen Lärmloudness signifikant mehr NSS angaben als Teilnehmer mit niedrigeren Werten bei NOP.

Nocebo-Reaktion

Der Begriff Nocebo-Reaktion bezieht sich auf die Angabe neuer oder sich verstärkender Symptome aufgrund von negativen Erwartungen.^{98, 136} Als einer Gruppe von Patienten mit Rückenschmerzen vor der Behandlung negativ ausgedrückte Informationen erhielt („...könnte zu einer leichten Verstärkung des Schmerzes führen...“), gab diese Gruppe signifikant größere Schmerzen an ($r = 0,38$) und zeigte eine schlechtere physische Leistung ($r = 0,36$).⁹⁸ Diese Effektgrößen lagen innerhalb der mittleren bis hohen Bereiche und zeigten einen bedeutenden negativen Effekt für den Beitrag der negativen Information zur Nocebo-Reaktion. Der Effekt der Bereitstellung negativer Informationen zu Windenergieanlagen vor der Exposition gegenüber Infraschall wurde experimentell erforscht. Crichton et al.¹³⁷ setzten Studenten mit hoher Erwartungshaltung (hinsichtlich negativer Auswirkungen auf die Gesundheit durch Windenergieanlagen) und geringer Erwartungshaltung (keine negativen Auswirkungen auf die Gesundheit) echtem und vorgetäuschten Infraschall aus. Die Gruppe mit der hohen Erwartungshaltung erhielt ungünstige Informationen

über das Fernsehen und das Internet zu Symptomen, die mit den Lärmemissionen von Windenergieanlagen im Zusammenhang stünden. Der Gruppe mit der geringen Erwartungshaltung wurden Berichte gezeigt, in denen Experten angaben, dass Windenergieanlagen keine Symptome verursachen. Die Symptome wurden vor und nach der Exposition mit echtem bzw. vorgetäuschten Infraschall beurteilt. Die Gruppe mit der hohen Erwartungshaltung gab nach der Exposition mit echtem bzw. vorgetäuschten Infraschall ($r = 0,65$ bzw. $r = 0,48$) signifikant mehr Symptome ($r = 0,37$) und auch eine höhere Intensität an ($r = 0,37$). Die Effektgrößen waren denen aus medizinischen Forschungsarbeiten zur Nocebo-Reaktion ähnlich. Die Ergebnisse zeigten, dass die Bereitstellung von negativen Informationen bei Personen zur Angabe stärkerer Symptome unmittelbar nach einer Exposition führen kann. Die Einbeziehung von Informationen aus dem Fernsehen und dem Internet legt die Vermutung nahe, dass ähnliche Reaktionen unter Umständen auch in einer realen Situation wahrscheinlich sind.

Eine Studie von Deignan et al.¹³⁸ analysierte Zeitungsartikel über Windenergieanlagen in Kanada und stellte fest, dass Publikationen in den Medien ggf. zu Nocebo-Reaktionen beitragen können. Die Artikel enthielten Begriffe mit einem bestimmten Angstfaktor, wie „Furcht“, „wissenschaftlich kaum erforscht“, „einseitig“ und „unausweichliche Exposition“. Der Gebrauch der Begriffe „Furcht“ und „wissenschaftlich kaum erforscht“ hatte von 2007 bis 2011 zugenommen. Diese Ergebnisse dokumentierten die Verwendung von mit einem Angstfaktor behafteten Begriffen in der allgemeinen Medienpräsentation zu den Debatten über Windenergieanlagen. Die Exposition gegenüber solchen Pressebeiträgen und den enthaltenen Begriffen kann bei einigen Menschen ebenfalls zu einer Nocebo-Reaktion führen.

Ähnlich wie zahlreiche andere technische Einrichtungen, wie beispielsweise Starkstromleitungen, Mobilfunktürme und WLAN-Signale, werden auch Windenergieanlagen seit langem mit einer Reihe von unerklärten Symptomen in Zusammenhang gebracht. Forscher vermuten, dass sich die Menschen verstärkt Sorgen machen wegen der Auswirkungen des modernen Lebens (insbesondere im Hinblick auf die neuen Technologien) auf ihre Gesundheit (sogenannte moderne Gesundheitssorgen [MHW – modern health worries]).¹⁴⁰ Moderne Gesundheitssorgen korrelieren moderat mit negativen Affekten ($r = 0,23$) und gelten – wie die Nocebo-Reaktion auch – als psychogen veranlasst. Die Ausdehnung der Windkraft geht mit einem beträchtlichen Maß an positiver und negativer Öffentlichkeitsarbeit einher, die bei einigen Menschen, die diese Informationen erhalten, moderne Gesundheitssorgen und Nocebo-Reaktionen auslösen können. Gesundheitssorgen wurden ebenfalls wegen möglicher elektromagnetischer Felder laut, die mit dem Betrieb von Windenergieanlagen in Verbindung gebracht wurden. Allerdings zeigten jüngste Studien, dass die Magnetfelder in der Nähe von Windenergieanlagen schwächer waren als die normaler Haushaltsgeräte.¹⁴⁰

Chapman et al.⁵² erforschten die Muster formaler Beschwerden (über Lärm und gesundheitsschädliche Auswirkungen), die bei insgesamt 51 Windparks in Australien von 1993 bis 2012 eingingen. Die Autoren gaben an, dass ihre Studie eine Überprüfung der psychogenen Hypothese darstellte (Nocebo-Reaktion oder moderne Gesundheitssorgen). Die Ergebnisse zeigten, dass nur sehr wenige Beschwerden formal protokolliert wurden. Während die Studie lief, beklagten sich in Australien lediglich 129 Personen formal oder öffentlich, und die Mehrzahl der Windparks hatte nie eine Beschwerde erhalten. Die Autoren stellten fest, dass sich die Beschwerden im Jahr 2009 häuften, als erstmals vom Windenergieanlagen-Syndrom gesprochen wurde. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse schlossen die Autoren, dass bei den an Windparkbetreiber gerichteten Beschwerden über negative

gesundheitliche Auswirkungen wahrscheinlich Nocebo-Effekte eine Rolle gespielt hatten. Allerdings berichten die Autoren ebenfalls, dass die überwiegende Mehrheit der Beschwerden (16 von 18) von Personen eingereicht wurde, die in der Nähe großer Windparks lebte ($r = 0,32$). Es beschwerten sich also zwar nur wenige Personen, aber die, die sich beschwerten, leben fast ausnahmslos in der Nähe großer Windparks. Dennoch muss unbedingt festgehalten werden, dass die Einreichung einer formalen oder öffentlichen Beschwerde ein komplexer soziopolitischer Vorgang ist und keine gesundheitsbezogene Reaktion. Außerdem zeigt eine Analyse der in Tabelle 2 der Chapman⁵⁴-Studie dargestellten Daten, dass das stärkste hinreichende Anzeichen für eine formale Beschwerde das Vorhandensein einer Aktionsgruppe in der Gegend war, die sich gegen Windenergieanlagen gewandt hatte. Eine Überprüfung der Daten in Tabelle 2 macht deutlich, dass bei 15 von 18 Standorten mit Beschwerdeeingängen Oppositionsgruppen vorhanden waren, es in den 33 Bereichen ohne Beschwerde nur eine Oppositionsgruppe gab ($r = 0,82$). Aus diesem Grund ist die Bedeutung dieser Studie für das Verständnis über die Auswirkungen von Windenergieanlagen auf die Gesundheit eingeschränkt. Chapman befasste sich außerdem mit der Vielzahl von Gründen, aus denen einige australische Hausbesitzer ihre Häuser verließen und führte diese Entscheidung auf das Vorhandensein von Windenergieanlagen zurück.⁵⁴ Gross¹⁴⁰ stellte ein Modell für kommunale Gerechtigkeit auf, mit dem dem Potenzial für Nocebo- oder psychogene Reaktionen auf die Entwicklung von Windparks entgegengewirkt werden soll. Für dieses Verfahren gab es einen ersten Test in einer Gemeinschaft, der zeigte, dass es bei einigen Mitgliedern der Gemeinschaft ein Potenzial für einen ausgeprägteren Sinn für Fairness gebe. Da während der Pilotstudie keine empirischen Daten zusammengestellt wurden, können die Auswirkungen dieses Verfahrens nicht formal bewertet werden.

Schlussfolgerungen

Reizbarkeit ist eine anerkannte Maßzahl für Ergebnisse bei Gesundheitsstudien, die bei Untersuchungen von Umgebungslärm seit vielen Jahrzehnten angewendet wird. Im Zusammenhang mit Windenergieanlagen machten Schallpegel als Ursache nur einen bescheidenen Anteil an selbstberichteter Reizbarkeit aus ($r = 0,35$).⁴ Die Lärmempfindlichkeit, eine zuverlässige psychische Eigenheit, trägt in gleichem Maß wie die Exposition zur Erklärung von Reizbarkeitsstufen bei ($r = 0,37$). Mit den Lärmemissionen von Windenergieanlagen einhergehende Reizbarkeit zeigt konsistent geringe bis mittlere negative Auswirkungen auf die selbstbewertete Lebensqualität und das psychische Wohlbefinden. Wegen der Grobkörnigkeit der bei zahlreichen Studien verwendeten Messverfahren wird der Wert dieser Ergebnisse wahrscheinlich eingeschränkt und die Auswirkungen von Reizbarkeit auf die Lebensqualität werden unterschätzt. Neben der Schallexposition und der Lärmempfindlichkeit verstärkt der optische Eindruck die Reizbarkeit. Derzeit liegen aber nur unzureichende Studien vor, um rückzuschließen, dass der optische Eindruck auch getrennt von der Lärmempfindlichkeit eine eigene Wirkung aufweist, da die beiden Variablen korrelieren. Die Entwicklung von Windenergieanlagen unterliegt den gleichen weltweiten psychogenen Gesundheitssorgen und Nocebo-Reaktionen wie alle anderen modernen Technologien auch.¹³⁹

Wirtschaftliche Vorteile schwächen die Auswirkungen der Lärmemissionen von Windenergieanlagen ab. Allerdings muss noch weiter geforscht werden, um zu klären, ob hier nicht eine Stichprobenverzerrung eine irreführende Rolle gespielt hat. Das stärkste überprüfte multivariate Modell konnte ca. 50 % ($r = 0,69$) der Abweichungen bei berichteter Reizbarkeit erklären. Die anderen 50 % blieben unerklärt. Es ist eindeutig, dass andere relevante Faktoren wohl unerkannt blieben. Trotzdem ist es nicht

ungewöhnlich, dass bei biomedizinischen oder sozialen Forschungsarbeiten ein signifikanter Prozentsatz von unerklärten Abweichungen verbleibt. So stellte eine Metaanalyse von 48 Studien mit 23.037 Teilnehmern zu postoperativen Schmerzen (eine subjektive Erfahrung) fest, dass nur 54 % ($r = 0,73$) der Abweichungen bei der Schmerzbewertung mit den in den Studien enthaltenen Variablen erklärt werden konnten.¹⁴⁴ Die Entwicklung von Windenergieanlagen unterliegt den gleichen weltweiten psychogenen Gesundheitsrisiken und Nocebo-Reaktionen wie alle anderen modernen Technologien auch. Aus diesem Grund sind Kommunen, Regierungsstellen und Unternehmen wohl beraten, bei der Diskussion um mögliche Auswirkungen an Standorten mit Windenergieanlagen einen offenen, transparenten und engagierten Prozess einzuleiten. Die meisten der in diesem Abschnitt bearbeiteten Ergebnisse waren korrelierte Daten und beinhalteten daher keine Kausalität. Außerdem können auch andere bislang nicht erkannte (und nicht gemessene) Faktoren mit diesen Ergebnissen in Zusammenhang stehen oder für sie verantwortlich sein.

DISKUSSION

Trotz der Einschränkungen der verfügbaren Forschungsdaten zu den Auswirkungen von Windenergieanlagen auf die Gesundheit können aus diesen Daten Rückschlüsse gezogen werden, sofern sie zusammen mit den wissenschaftlichen Nachweisen anderer Studien zum Umgebungslärm verwendet werden, von denen ein großer Teil im Rahmen der Erarbeitung der Richtlinien zum nächtlichen Lärm (Nighttime Noise Guidelines) durch die WHO überprüft und bewertet wurde.¹⁰⁴ Daneben wurde eine umfassende Datenbank zum Umgebungslärm durch den Transport-, Flug- und Schienenverkehr veröffentlicht.¹⁴⁷ Viele dieser Studien wurden bei der Entwicklung weltweiter Richtlinien zu Lärmemissionen verwendet, wie beispielsweise durch die WHO,¹⁰⁴ die nächtliche Schallpegel hauptsächlich zur Vermeidung von Schlafstörungen vorschlug.

Da Schall und seine Komponenten potenzielle Gesundheitsbedrohungen darstellen, die mit dem Leben in der Nähe von Windenergieanlagen in Verbindung gebracht werden, bieten andere Studien zum Umgebungslärm unter Umständen wertvolle Erkenntnisse für die Beurteilung der Gesundheitsrisiken für Personen, die in der Nähe von Windenergieanlagen wohnen. So würde man beispielsweise bei niedrigeren Schallpegeln keine negativen Auswirkungen auf die Gesundheit erwarten, wenn solche Auswirkungen auch bei höheren Schallpegeln nicht auftreten. In den Studien zu anderen Quellen von Umgebungslärm lagen die Schallpegel deutlich höher als bei Windenergieanlagen. Unterschiedlicher Umgebungslärm mit einer Spanne von 15 dBA (z. B. 55 dBA bei Autobahnen gegenüber 40 dBA von Windenergieanlagen) werden regelmäßig gemeldet.¹⁴⁷ Dort, wo von Menschenhand verursachte Änderungen wahrgenommen werden, werden auch indirekte Auswirkungen, wie Reizbarkeit, angegeben. Auch diese müssen bei der Beurteilung der Auswirkungen auf die Gesundheit berücksichtigt werden.

Wir versuchen nun, uns mit drei grundlegenden Fragen zu befassen, die wir zu Beginn dieser Arbeit gestellt haben und mit den potenziellen Auswirkungen von Windenergieanlagen auf die Gesundheit in Zusammenhang stehen:

Liegen ausreichende wissenschaftliche Nachweise für den Rückschluss vor, dass der Betrieb von Windenergieanlagen die Gesundheit der Bevölkerung negativ beeinflusst? Sofern dem so ist, wodurch könnte diese Beeinflussung entstehen und wie ließe sie sich verhindern?

Die epidemiologische und experimentelle Literatur enthält keine überzeugenden oder konsistenten Nachweise, dass die Lärmemissionen von Windenergieanlagen mit irgendwelchen

eindeutig definierten Erkrankungsdaten in Zusammenhang stehen. Diese Literatur gibt allerdings an, dass unterschiedliche Anteile der Bevölkerung, die in der Nähe von Standorten mit Windenergieanlagen leben, sich von den Windenergieanlagen oder den davon ausgehenden Geräuschen gestört fühlen. Einige Autoren dieser Studien nehmen an, dass diese Störungen unter Umständen zu Schlafstörungen bzw. Stress führen und damit auch andere Folgen für die Gesundheit mit sich bringen. Allerdings war die Angabe dieser selbstberichteten Störung nicht konsistent und wenn sie festgestellt wurde, entstammte sie Querschnittstudien, die aufgrund ihres Studiendesigns nicht unterscheiden konnten, ob die Lärmemissionen der Windenergieanlagen eine unmittelbare kausale Rolle spielten oder nicht. Über diese methodologischen Beschränkungen hinaus standen derlei Ergebnisse auch im Zusammenhang mit anderen beitragenden Faktoren (einschließlich Persönlichkeitsprofilen und persönlichen Einstellungen), Umkehrkausalitäten (dass also Schlafstörungen oder Kopfschmerzen die Wahrnehmung von und den Zusammenhang mit den Lärmemissionen der Windenergieanlagen verstärken) sowie persönlichen Anreizen (ob sich aus der Nähe zu den Windenergieanlagen ggf. ein wirtschaftlicher Vorteil ergibt).

Es liegen keine Kohorten- oder Längsstudien vor, die die Frage der kausalen Verknüpfung zwischen dem Betrieb von Windenergieanlagen und negativen Auswirkungen auf die Gesundheit definitiver erfassen können. Nichtsdestotrotz bieten die Ergebnisse der experimentellen und Querschnittstudien sowie auch der Studien zu anderen Quellen von Umgebungslärm wertvolle Daten für die Beurteilung des Risikos. Auf der Grundlage veröffentlichter epidemiologischer Querschnittstudien ist „Reizbarkeit“ das wichtigste messbare Ergebnis, das im Zusammenhang mit dem Leben in der Nähe von Windenergieanlagen erlangt werden konnte. Es ist allerdings strittig, ob Reizbarkeit eine negative Auswirkung auf die Gesundheit darstellt. „Reizbarkeit“ ist nicht in der 10. Ausgabe der International Classification of Diseases aufgeführt, wengleich vorgeschlagen wurde, dass Reizbarkeit zu Stress und zu anderen Folgen für die Gesundheit führen kann, wie beispielsweise Schlafstörungen. Dieser vorgeschlagene Zusammenhang konnte aber bisher in Studien, mit denen solche Pfade aufgeklärt werden könnten, nicht dargestellt werden.

Die Autoren dieser Arbeit sind sich der Internetseiten und der nicht wissenschaftlich überprüften Berichte bewusst, in denen Symptome beschrieben wurden, die mit dem Leben in der Nähe von Windenergieanlagen in Verbindung gebracht wurden. Die Qualität dieser Daten ist allerdings soweit eingeschränkt, dass eine sinnvolle Beurteilung des unmittelbaren kausalen Zusammenhangs zwischen Windenergieanlagen und den berichteten Symptomen nicht hergestellt werden kann. Wenn beispielsweise die Personen zur Teilnahme an einer Studie eingeladen werden, die glauben, dass sie aufgrund der Nähe zu Windenergieanlagen Symptome aufweisen, oder die Teilnehmer dazu aufgefordert werden, sich im Zusammenhang mit aktuellen Fragen an frühere Ereignisse zu erinnern (z. B. nach der Installation der Windenergieanlagen) zu Stichproben- bzw. Erinnerungsverzerrungen. Solche Verzerrungen schränken die Zuverlässigkeit der Daten bei deren Nutzung in strengen kausalen Beurteilungen ein. Dennoch gaben einige Personen, die in der Nähe von Windenergieanlagen lebten, konsistent Verbindungen zwischen Reizbarkeit, Schlafstörungen und Änderungen der Lebensqualität an. Es ist aber nicht möglich, die kausalen Verbindungen dieser Behauptungen ohne gründliche medizinische Untersuchungen, angemessene Lärmstudien und einen gültigen Studienansatz ordnungsgemäß zu bewerten. Denn die angegebenen Symptome sind möglicherweise unspezifisch und stehen mit anderen Erkrankungen in Zusammenhang.

Persönlichkeitsfaktoren, einschließlich selbstbeurteilter Lärmempfindlichkeit, die Einstellung gegenüber Windenergieanlagen sowie Nocebo-ähnliche Reaktionen spielen bei der Angabe dieser Symptome unter Umständen eine Rolle. Ohne eine gründliche medizinische Bewertung, die eine Charakterisierung der Lärmexposition und eine diagnostische Beurteilung einschließt, entbehrt die Bestätigung, dass die Symptome auf die Nähe zu Windenergieanlagen zurückzuführen sind, jeder Zuverlässigkeit. Vielmehr kann die Verwendung einer vorgeschlagenen Falldefinition, die in einem nicht von PubMed indizierten Journal veröffentlicht wurde, zu irreführenden und fehlerhaften Beurteilungen der Gesundheit von Menschen führen, wenn diese ohne eine gründliche diagnostische Bewertung herbeigeführt wird.¹⁴³ Es wird also empfohlen, dass Personen, die annehmen, dass sie aufgrund ihrer räumlichen Nähe zu Windenergieanlagen an bestimmten Symptomen leiden, sich einer gründlichen medizinischen Beurteilung unterziehen, damit alle möglichen Ursachen abgeklärt werden, die ggf. zu den Symptomen geführt haben. Die Symptome ohne eine umfassende medizinische Beurteilung der Nähe zu Windenergieanlagen zuzuschreiben, ist aus medizinischer Sicht nicht vertretbar. Eine ordnungsgemäße Anamnese liegt im besten Interesse der betreffenden Personen, damit sichergestellt ist, dass anerkannte und behandelbare Erkrankungen erkannt werden.

Verfügbare wissenschaftliche Nachweise unterstützen keine in noch so gutem Glauben angenommene Erkrankung, die allein auf die Nähe zu Windenergieanlagen zurückzuführen ist. Dennoch scheint es, als trügen eine Reihe von Faktoren bei einem bestimmten Anteil der Personen, die in der Nähe von Windenergieanlagen leben, zur Angabe eines gewissen Grads an Reizbarkeit bei. Dieser Effekt der anhaltenden Reizbarkeit kann, unabhängig von seinen Quellen oder Ursachen, andere Folgen für die Gesundheit nach sich ziehen, wie vermehrter Stress. Allerdings lässt sich dies anhand der verfügbaren wissenschaftlichen Literatur zur Reizbarkeit aufgrund von Lärmmissionen oder vom Anblick von Windenergieanlagen nicht darstellen.

Liegen ausreichende wissenschaftliche Nachweise für den Rückschluss vor, dass der Betrieb von Windenergieanlagen bei der in der Nähe wohnenden Bevölkerung unter Umständen zu psychischem Stress, zu Reizbarkeit und zu Schlafstörungen führt? Und führen diese Auswirkungen zu einer nachteiligen Beeinflussung der Gesundheit? Sofern dem so ist, wodurch könnte diese Beeinflussung entstehen und wie ließe sie sich verhindern?

Anhand der derzeit verfügbaren Forschungsergebnisse ist es nicht möglich, eine Kausalität zu beurteilen, da die bedeutenden bisher durchgeführten epidemiologischen Studien Querschnittstudien waren, deren Daten keine Auswertung der zeitabhängigen Beziehung zwischen den beobachteten korrelierten Faktoren zulassen. Allerdings haben Querschnittstudien, ungeachtet ihrer designbedingten Einschränkungen bei der Beurteilung von kausalen Verknüpfungen, konsistent gezeigt, dass einige Personen, die in der Nähe von Windenergieanlagen leben, eher eine Reizbarkeit angeben, als Personen, die weiter entfernt wohnen. Die gleichen Studien haben ebenfalls gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit, mit der sich eine bestimmte Person über Reizbarkeit beschwert, stark von ihrer grundsätzlichen Einstellung Windenergieanlagen gegenüber, dem optischen Eindruck der Anlagen in der Landschaft und der Frage abhängt, ob diese Person durch die Windenergieanlagen einen wirtschaftlichen Vorteil erhält. Diese Arbeit legt die Vermutung nahe, dass diese anderen Risikofaktoren bei der Frage, ob sich bestimmte Personen über Reizbarkeit beschweren, eine signifikantere Rolle spielen als die Lärmmissionen der Windenergieanlagen.

Die Auswirkungen von Reizbarkeit auf die Gesundheit einer Person variiert aufgrund verschiedener Faktoren mit hoher Wahrscheinlichkeit beträchtlich. Um diese Reaktionen zu minimieren, könnte dazu übergegangen werden, vor der Entwicklung der Pläne für einen Windpark die Menschen, die in der Gegend wohnen, zu informieren und offen über die Pläne zu sprechen. Gleichzeitig müsste vertrauenswürdig auf Anfragen und lärmbezogene Beschwerden reagiert werden.

Liegen Nachweise dafür vor, dass bestimmte durch den Betrieb von Windenergieanlagen verursachte Geräusche, wie Infraschall- oder Tieffrequenzgeräusche für sich genommen potenzielle Auswirkungen auf die Gesundheit zeitigen, die nicht mit anderen Quellen von Umgebungslärm im Zusammenhang stehen?

Sowohl Tieffrequenz- als auch Infraschall wurden im Zusammenhang mit dem Betrieb von Windenergieanlagen als mögliche zentrale Gesundheitsgefährdungen bezeichnet. Es liegen allerdings keine wissenschaftlichen Nachweise vor, die diese Hypothese stützen, wenngleich auch Messungen der von Windenergieanlagen verursachten Schallpegel vor Ort und experimentelle Studien durchgeführt wurden, in denen die Teilnehmer absichtlich Infraschall ausgesetzt wurden. Die Messungen des Tieffrequenz- und Infraschalls sowie der tonalen Schallemissionen und der Amplitudenmodulationen zeigen, dass Windenergieanlagen Infraschall emittieren, die Werte in der Nähe von Häusern der Umgebung allerdings normalerweise auch an den Stellen weit unterhalb der Hörgrenzen liegen, an denen sich Anwohner über Symptome beklagt haben, die sie mit den Windenergieanlagen in Zusammenhang gebracht haben. Diese Infraschallpegel sind in einer Entfernung von den Windenergieanlagen von nur 300 m bereits nicht mehr hörbar. Außerdem wurden Menschen in experimentellen Studien auch viel höheren Infraschallpegeln ausgesetzt, als in der Nähe von Windenergieanlagen auftreten, und diese gaben keine negativen Auswirkungen auf die Gesundheit an. Da Infraschall allerdings eher mit Schwingungseffekten einhergeht als höherfrequenter Schall, wird vermutet, dass die Schwingungen des Infraschalls bei Menschen, die in der Nähe von Windenergieanlagen leben, zu bestimmten physischen Empfindungen beitragen. Vor dem Hintergrund der Feldstudien, mit denen nachgewiesen wurde, dass Infraschall in einer Entfernung von der Windenergieanlage von über 300 m die internationalen Normen zur Vermeidung von Klappern oder anderen möglichen Schwingungseffekten erfüllt.¹⁴

Bereiche für weitere Forschung

Vor dem Hintergrund der Einschränkungen derzeit zur Verfügung stehender Studien im Hinblick auf endgültige Rückschlüsse sowie der Notwendigkeit, von einigen Anwohnern von Windparks gestellte gesundheitsbezogene Fragen im Zusammenhang mit Windenergieanlagen beantworten zu müssen, haben sich die einzelnen Autoren mit Feldern für weitere Nachforschungen befasst, um die bestehenden Informationsdefizite ausgleichen zu können. Bei diesen Empfehlungen geht es in erster Linie um die Merkmale der Exposition, um die gesundheitsbezogenen Endpunkte sowie um die Art der epidemiologischen Studien, die mit der höchsten Wahrscheinlichkeit informative Ergebnisse im Hinblick auf die mit dem Leben in der Nähe von Windenergieanlagen im Zusammenhang stehenden Auswirkungen auf die Gesundheit liefern können.

Lärmmissionen von Windenergieanlagen

Wie bei allen potenziellen Berufs- oder Umweltrisiken, sind

weitere Maßnahmen zur Charakterisierung der Exposition wertvoll, also zu den Lärmemissionen und deren Komponenten, wie Tieffrequenz- und Infraschall. Idealerweise sollten einheitliche Geräte und genormte Verfahren verwendet werden, sodass eine Vergleichsmöglichkeit der Ergebnisse veröffentlichter Studien besteht und beurteilt werden kann, ob allgemeingültige Richtlinien eingehalten werden.

Darüber hinaus sollten, über die gemessenen, tatsächlichen Schallpegel hinaus, Anstrengungen unternommen werden, um Modelle für die Vorhersage der Lärmemissionen von Windenergieanlagen zu entwickeln. Dies wäre für die Information und Beruhigung von Anwohnern wertvoll und hilfreich, die sich an den öffentlich geführten Debatten zur Entwicklung von Windkraftprojekten beteiligen. Bemühungen um die Feinabstimmung von mit den tatsächlichen Gegebenheiten besser übereinstimmenden Lärmmodellen sind unter Umständen auch für Mitarbeiter im öffentlichen Gesundheitswesen von Bedeutung, die mit der Bewertung möglicher Auswirkungen von Lärmemissionen auf die allgemeine Gesundheit befasst sind. Die Entwicklung und der Einsatz von zuverlässigen und tragbaren Schallmessgeräten zur Ermittlung der Schallkomponenten in der Nähe von Wohnhäusern, zur Auswertung von Symptomen und zur Überprüfung der Einhaltung von Lärmschutzrichtlinien wären ebenfalls von großem Wert.

Epidemiologie

Prospektive Kohortenstudien hätten den höchsten Informationsgehalt für die Identifikation möglicher Gesundheitsfolgen nach der Exposition gegenüber Lärmemissionen von Windenergieanlagen vor und nach dem Aufbau und der Inbetriebnahme der Anlagen. Im besten Fall würden große Teile der betroffenen Bevölkerung auf ihren gesundheitlichen Ausgangsstatus untersucht und anschließend in zwei Gruppen aufgeteilt. Eine Gruppe würde dem Betrieb von Windenergieanlagen ausgesetzt, die andere nicht, wie dies in einem Bereich der Fall ist, in dem große Windparks vorgesehen bzw. geplant werden. Der Wert solcher Studien besteht in der Vermeidung von bestimmten Formen der Verzerrung, wie beispielsweise der Erinnerungsverzerrung, bei der sich die Teilnehmer rein auf ihr Erinnerungsvermögen verlassen und frühere Risikofaktoren oder Erkrankungen unter- oder überbewertet angeben. Wie von mehreren Autoren bereits festgestellt, macht es die Berichterstattung in den Medien und im Internet über Windenergieanlagen und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit sowie die Aufmerksamkeit, die diese Berichterstattung erhält, schwierig, eine Teilnehmergruppe wirklich gegen die zu untersuchende Hypothese zu verblinden. Der wesentliche Vorteil einer prospektiven Kohortenstudie mit zwei Komponenten – vor der Installation und Inbetriebnahme der Windenergieanlagen und danach – ist die unmittelbare Vergleichbarkeit der Unterschiede bei Erkrankungen und Gesundheitszustand der später von den Lärmemissionen der Windenergieanlagen betroffenen Personen mit der nicht exponierten Vergleichsgruppe. Diese Bedingungen werden nicht ohne Weiteres von anderen Studienansätzen angenähert. Ein ähnlicher aber komplexerer Ansatz besteht ggf. in der Studienaufnahme von Personengruppen, die kurz vor der Exposition gegenüber anderen von Menschenhand geschaffenen Auswirkungen stehen, wie den Lärmemissionen von Autobahnen, Schienenverkehr, Gewerbeparks oder andersartigen energieerzeugenden Anlagen.

Es wird davon ausgegangen, dass weitere Querschnittstudien nicht geeignet sind, um sinnvolle und nutzbare Daten beizusteuern. Vielmehr würden diese die bereits in vielen Querschnittstudien und Befragungen festgestellten Verzerrungen verstärken.

Schall und seine Komponenten

Gleich mehrere Anstrengungen können unternommen werden, um die Hypothesen über nicht hörbaren Schall und dessen Risiko für negative Auswirkungen auf die Gesundheit zu überprüfen. Es wäre, zumindest von der Konzeption her, einfach, verblindete Studienteilnehmer nicht hörbarem Schall – insbesondere Infraschall – auszusetzen, um zu bestimmen, ob sie den Schall wahrnehmen können oder unangenehme Symptome auftreten. Idealerweise würden bei diesen Studien Infraschallpegel verwendet, die nahe an den Hörgrenzen liegen und sich mit den Schallpegeln tatsächlicher Windenergieanlagen in der Entfernung von Wohnhäusern vergleichen lassen. Crichton et al.^{137, 149} haben mit der Durchführung solcher Studien begonnen und ermittelt, dass die Studienteilnehmer keinen Unterschied zwischen einer tatsächlichen und einer vorgetäuschten Exposition gegenüber Infraschall feststellen konnten. Allerdings lag der Infraschallreiz bei nur 40 dB bei 5 Hz, also 60 dB unter der Hörgrenze und niedriger als die bei Wohnhäusern in der Nähe von Windenergieanlagen gemessenen Werte.

Die Möglichkeit negativer Auswirkungen von nicht hörbarem Schall auf die Gesundheit von Menschen oder Tieren könnte auch mithilfe von Langzeitstudien überprüft werden. Bislang liegen zu Menschen, die den Lärmemissionen von Windenergieanlagen ausgesetzt waren, diese aber nicht hören konnten (solche Berichte würden sorgfältige Kontrollen erfordern), keine Berichte zu negativen Auswirkungen vor. Es gibt nach Kenntnis der Autoren dieser Arbeit auch keine relevanten Tierstudien zu diesem Thema.

Anhand kontrollierter Expositionsstudien mit Menschen wurde versucht, Einsicht in die Auswirkungen der Exposition gegenüber tieffrequentem Schall von Windenergieanlagen zu erhalten. Freiwillige wurden unter bestimmten Umständen und manchmal nach verschiedenen Formen der Konditionierung für kurze Zeit tieffrequentem Schall ausgesetzt. Dabei wurden verschiedene Reaktionskennzahlen ausgewertet. Bei den meisten dieser Studien ging es um die Störung durch die Lärmemissionen von Windenergieanlagen, aber nicht um unmittelbare Gesundheitsindikatoren. Allerdings bewertete eine Studie anhand von Bildern die Reaktionen auf die Farbe der Windenergieanlagen,⁷³ und in einer anderen Studie wurden die physischen Symptome nach der Exposition gegenüber den Lärmemissionen von Windenergieanlagen bewertet.^{137, 149}

Bemühungen, eine mögliche Auswirkung von Infraschall auf die Gesundheit zu dokumentieren, blieben erfolglos. Hierzu zählte auch die Suche nach Reaktionen der afferenten Neuronen vom Typ II der Cochlea oder des vestibulären Systems auf nicht hörbaren Luftschall. In anderen Fällen wurden bislang offenbar noch keine relevanten Experimente durchgeführt (z. B. zu der Frage, ob nicht hörbarer Schall endolymphatische Hydrops auslöst). Diese scheinbar unwahrscheinliche Hypothese konnte allerdings bei Meerschweinchen überprüft werden, die als Reaktion auf andere experimentelle Eingriffe zuverlässig endolymphatische Hydrops entwickelten.

Psychische Faktoren

Diese Arbeit hat gezeigt, dass eine komplexe Kombination aus Schall und persönlichen Faktoren im Zusammenhang mit dem Leben in der Nähe von Windenergieanlagen bei manchen Menschen zur Angabe von Reizbarkeit beiträgt. Weitere Anstrengungen zur Charakterisierung und zum Verständnis dieser Fragen können in Richtung verbesserter Messungen der Schallwahrnehmung, Datenanalysen und Konzeptionierung unternommen werden.

Gleichzeitig schlagen die Autoren eine Verbesserung der Qualität und der Normung der Messverfahren wichtiger Maßzahlen vor, wie Lärmempfindlichkeit und durch Lärmemissionen verursachte Reizbarkeit. Darüber hinaus sollte überlegt werden, die Messung einzelner Punkte nicht mehr für die primären Ergebnisse

zuzulassen.

Die Datenanalysen sollten bei allen Studien idealerweise auch die Effektgrößen berücksichtigen, um die Signifikanzprüfung zu ergänzen (einige signifikante Unterschiede sind gering, wenn die Teilnehmerzahl hoch ist). Auf diese Weise werden die Ergebnisse mehrerer Studien vergleichbar.

Zudem müssen die Lärmempfindlichkeit, die durch Lärmemissionen verursachte Reizbarkeit und die Lebensqualität in eine breitere und umfassendere Persönlichkeitstheorie oder die psychische Funktionsfähigkeit eingebunden werden. Das Fünf-Faktoren-Persönlichkeitsmodell ist ein weit verbreitetes Beispiel hierfür.

ZUSAMMENFASSUNG

1. Die Messungen des Tieffrequenz- und Infraschalls sowie der tonalen Schallemissionen und der Amplitudenmodulationen zeigen, dass Windenergieanlagen Infraschall emittieren, die Werte in der Nähe von Wohngebieten allerdings normalerweise unterhalb der Hörgrenze liegen.
2. In dieser aktualisierten Überprüfung wissenschaftlicher Fachpublikationen gab es keine Kohorten- oder Fallkontrollstudien. Dennoch wurde bei den qualitativ hochwertigeren Querschnittstudien kein eindeutiger oder konsistenter Zusammenhang zwischen den Lärmemissionen von Windenergieanlagen und berichteten Erkrankungen oder anderen Anzeichen für eine Gefährdung der Gesundheit von Menschen beobachtet.
3. Es konnte nicht gezeigt werden, dass die Komponenten des von Windenergieanlagen emittierten Schalls, einschließlich Tieffrequenz- und Infraschall, ein eigenständiges Gesundheitsrisiko für Menschen darstellen, die in der Nähe von Windenergieanlagen leben.
4. Die Reizbarkeit aufgrund des Lebens in der Nähe von Windenergieanlagen ist ein komplexes Phänomen, das mit persönlichen Faktoren im Zusammenhang steht. Die Lärmemissionen von Windenergieanlagen spielen eine untergeordnete Rolle im Vergleich mit anderen Faktoren, aufgrund deren sich Menschen veranlasst sehen, sich im Zusammenhang mit dem Betrieb von Windenergieanlagen über Reizbarkeit zu beschweren.

DANKSAGUNG

Die Autoren sind Professor William Thilly vom Department of Biological Engineering des MIT für seine beratende Rolle sehr verbunden. Er war maßgeblich an der Entwicklung der Struktur und an der Überprüfung dieser Arbeit sowie an der Auswahl der Beitragenden beteiligt. Darüber hinaus hat Professor Thilly eine umfassende Überarbeitung des Manuskripts sowie der Kommentare aller Koautoren durchgeführt.