



**Umwelt- und gesellschaftsverträgliche Transformation des
Energiesystems**

Windenergieanlagen

**Auswirkungen auf Umwelt und
Gesundheit**

D. Behrendt, S. Kleinhüchelkotten & H.-P. Neitzke



ECOLOG 
INSTITUT FÜR SOZIAL - ÖKOLOGISCHE
FORSCHUNG UND BILDUNG gGmbH

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Windenergieanlagen Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit

SMiG-Projektbericht 7/2

erstellt im Rahmen des Projekts

**Effiziente Nutzung erneuerbarer Energien durch regionale ressourcenoptimierte 'intelligente' Versorgungs- und Verbrauchsnetze (*Smart Microgrids*):
Technische und ökonomische Machbarkeit, Umwelt- und Gesellschaftsverträglichkeit**

Autoren: **Dieter Behrendt**
Dr. Silke Kleinhückelkotten
Dr. H.-Peter Neitzke

ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

ECOLOG-Institut, Hannover

Mai 2016

Inhalt

	Seite
1 Einleitung	1
2 Aufbau und Funktionsweise von Windenergieanlagen	3
3 Rechtlicher Rahmen für die Errichtung und den Betrieb von Windenergieanlagen	3
3.1 Genehmigungsverfahren nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)	4
3.2 Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)	4
4 Auswirkungen von Windenergieanlagen auf die Umwelt	4
4.1 Fläche	5
4.2 Boden	6
4.3 Grundwasser, Binnen- und Küstengewässer	6
4.4 Luft	6
4.5 Lokales Klima	7
4.6 Globales Klima	7
4.7 Lebensräume und Arten	7
4.8 Landschaft	11
5 Auswirkungen von Windenergieanlagen auf die Gesundheit	12
5.1 Schall und Infraschall	12
5.2 Optische Immissionen	22
5.3 Elektrische und magnetische Felder	24
6 Zusammenfassung und Einordnung der Befunde im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Ausweisung von Standorten für Windenergieanlagen	24
6.1 Risiken für die Umwelt	25
6.2 Risiken für die Gesundheit	25
6.3 Risikowahrnehmung und Akzeptanz von Windenergieanlagen	27
Literatur	29
Anhang: Grundlagen Hörbarer Schall und Infraschall	32

1 Einleitung

Vor allem durch die Verbrennung fossiler, kohlenstoffhaltiger Energieträger ist die Konzentration von Kohlendioxyd in der Atmosphäre von 280 ppm zu Beginn der Industrialisierung auf heute 400 ppm gestiegen (IPCC 2014: 3; ppm: Teile pro Million). Kohlendioxyd ist ein sogenanntes Treibhausgas (THG), das heißt es vermindert die Fähigkeit der Erde, von der Sonne empfangene Energie in Form von Wärme in das Weltall abzustrahlen. Dadurch erwärmt sich die untere Erdatmosphäre und die Erdoberfläche. Dazu tragen auch noch andere Treibhausgase bei, wie Methan und Lachgas, die unter anderem in der Landwirtschaft freigesetzt werden. Seit den 1950er Jahren ist die globale Mitteltemperatur um rund 0,6 °C gestiegen (IPCC 2014: 6). Wenn man dies mit den Temperaturschwankungen im Laufe eines Jahres vergleicht, scheint das wenig zu sein. Es geht jedoch um die mittlere Temperatur der Erdoberfläche und da sind 0,6 °C sehr viel. 0,6 °C haben gereicht, um den Meeresspiegel ansteigen, Gletscher sowie das Meereis am Nordpol teilweise abschmelzen und die Häufigkeit extremer Wetterlagen regional steigen zu lassen (IPCC 2014: 6ff). Ein Temperaturanstieg um mehr als 2 °C hätte dramatische Folgen für viele Regionen der Erde (IPCC 2014: 8ff).

Eine Begrenzung der globalen Temperaturerhöhung gegenüber dem vorindustriellen Niveau auf 2° Celsius wird nur möglich sein, wenn die durch menschliche Aktivitäten verursachten THG-Emissionen bis 2050 im Vergleich mit 2010 um 40 bis 70 Prozent vermindert werden und bis zum Jahr 2100 faktisch auf null sinken (IPCC 2014: 21). Da in einigen Bereichen, z. B. Landwirtschaft und Güterverkehr, große THG-Emissionsreduktionen derzeit technisch nicht möglich scheinen oder mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden wären, muss in anderen Bereichen, in denen technologische Alternativen bereits verfügbar und mit weit geringeren Kosten realisierbar sind, eine nahezu vollständige Emissionsvermeidung erreicht werden (SRU 2011: 37). Dies gilt insbesondere für die Stromerzeugung, auf deren Konto rund 40 Prozent der deutschen THG-Emissionen gehen. In der Stromversorgung sieht der Sachverständigenrat für Umweltfragen deshalb einen Schlüsselbereich der Energie- und Klimapolitik (SRU 2011: 37).

Die notwendige Emissionsverringerung im Stromsektor wird nur zu erreichen sein, wenn sowohl Anstrengungen zur Erhöhung der Effizienz des Einsatzes elektrischer Energie als auch beim Übergang zu einer Stromerzeugung unternommen werden, bei der keine oder bezogen auf die Kilowattstunde elektrischer Energie sehr viel weniger Treibhausgase emittiert werden als beim Einsatz von Kohle, Erdöl oder Erdgas. Das von der Bundesregierung beschlossene Etappenziel für das Jahr 2020 ist ein Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung von 35 Prozent. Tabelle 1.1 zeigt, welches Potenzial allein die Nutzung der Windenergie an Land in Deutschland hat.

Der Einsatz erneuerbarer Energien kann dazu beitragen, den Klimawandel zu verlangsamen und auf ein erträgliches Maß zu begrenzen. Aber der Übergang zu einer Energieversorgung, bei der nicht nur auf die fossilen Energieträger verzichtet, sondern wegen der mit ihr verbundenen Risiken auch auf die Kernenergie, erfordert zum einen erhebliche Investitionen in Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien und in die Stromnetze. Zum anderen können mit der Errichtung von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien Eingriffe in Natur und Landschaft verbunden sein und ihr Betrieb kann negative Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben. In der vorliegenden Arbeit werden die Risiken für Umwelt und Gesundheit, die möglicherweise von Windenergieanlagen an Land (Onshore) ausgehen, thematisiert.

Tabelle 1.1

Potenzial der Windenergie in Deutschland (Onshore; Daten: UBA 2013: 35f)

Region	Flächenpotenzial		Leistungs- potenzial	Ertragspo- tenzial	Mittlere Volllast- stunden
	km ²	Anteil	GW	TWh	h/a
Norden Berlin, Brandenburg, Bre- men, Hamburg, Mecklen- burg-Vorpommern, Nieder- sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein; 38,9 % der Fläche Deutsch- lands	22.851	16,4 %	526	1.378	2.621
Mitte Hessen, Nordrhein- Westfalen, Rheinland-Pfalz, Sachsen, Thüringen; 30,7 % der Fläche Deutsch- lands	11.200	10,2 %	287	728	2.540
Süden Baden-Württemberg, Bay- ern, Saarland; 30,4 % der Fläche Deutsch- lands	15.310	14,1 %	375	791	2.108
D gesamt	49.361	13,8 %	1.188	2.898	2.440

Zu diesem Thema gibt es zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen und Veröffentlichungen aber noch mehr Publikationen, deren wissenschaftlicher Wert zumindest fraglich ist (Knopper & Olsson 2011). In Schriften und Vorträgen, vor allem aber im Internet, werden Behauptungen über die Schädlichkeit oder die Unschädlichkeit von Windenergieanlagen aufgestellt, für die es keine wissenschaftlichen Belege gibt und die nur dazu dienen sollen, die Interessen von Gegnern oder von Betreibern von Windenergieanlagen zu stützen. Um den wissenschaftlichen Erkenntnisstand zu den Auswirkungen von Windenergieanlagen zu ermitteln, wurden für den vorliegenden Bericht in großem Umfang wissenschaftliche Studien und Erfahrungsberichte ausgewertet. Das Ziel war nicht, eine Technologie abschließend zu bewerten. Das ist auch nicht möglich, weil die tatsächlichen Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit von den jeweiligen konkreten Standort- und Betriebsbedingungen abhängen und in jedem Fall zu prüfen und zu bewerten sind. Das Ziel war vielmehr, erste Grundlagen für diese Prüfung und Bewertung in kompakter Form bereitzustellen. In weiteren Berichten der Reihe werden die Risiken behandelt, die im Zusammenhang mit anderen Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien diskutiert werden.

Im Kapitel 2 wird kurz auf die Funktionsweise von Windenergieanlagen eingegangen, soweit dies für das Verständnis der folgenden Ausführungen notwendig ist. Im Kapitel 3 wird der rechtliche Rahmen für die Errichtung und den Betrieb von Windenergieanlagen dargestellt. In den Kapiteln 4 und 5 geht es um die Auswirkungen von Windenergieanlagen auf Umwelt und Gesundheit. Im abschließenden Kapitel 6 werden die wesentlichen Aussagen der Kapitel 4 und 5 zusammengefasst und im Hinblick auf die Risikowahrnehmung in der Bevölkerung und damit ihre Bedeutung für die Akzeptanz von Standorten für Windenergieanlagen eingeordnet.

2 Aufbau und Funktionsweise von Windenergieanlagen

In Windenergieanlagen wird die Energie des Windes in Rotationsenergie und diese wiederum in elektrische Energie umgewandelt. Es gibt unterschiedlichste Bauformen von Windenergieanlagen. In der Praxis hat sich die Variante mit horizontaler Achse und drei Rotorblättern durchgesetzt (s. Abb. 2.1). Die Hauptbestandteile einer Windenergieanlage sind der Turm oder Mast, die Gondel, die auf dem Turm drehbar gelagert ist, und die an der Gondel



Abbildung 2.1
Windpark in Vorpommern

befestigten Rotorblätter. Die ertragsstärksten Serienanlagen haben derzeit einen Rotordurchmesser von bis zu 130 Metern, eine Turmhöhe von bis zu 160 Metern und eine Nennleistung von bis zu 8 MW (Megawatt).

Die Gondel beherbergt Getriebe und Generator. Durch das Getriebe kann die Drehzahl des Generators bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten konstant gehalten werden. Es gibt auch Windenergieanlagen ohne Getriebe. Die Rotorblätter sind ähnlich wie Flugzeugflügel aerodynamisch geformt. Dabei sind sie nicht

nur auf einen hohen Wirkungsgrad, sondern auch auf Geräuschminderung hin optimiert, denn die Rotorblätter sind für einen wesentlichen Teil der Betriebsgeräusche von Windenergieanlagen verantwortlich. Die Rotorblätter sind verstellbar, sodass die Luftanströmung aktiv beeinflusst werden kann. Der Anstellwinkel der Rotorblätter kann der jeweiligen Windgeschwindigkeit angepasst werden. Für den Betrieb einer Windenergieanlage sind neben den genannten Hauptkomponenten verschiedene Messinstrumente und eine Windrichtungsnachführung erforderlich. Letztere bzw. Horizontalachsenrotoren sorgen dafür, dass sich die Anlage immer zum Wind dreht. Ab einer Windgeschwindigkeit von 25 m/s (90 km/h) werden die meisten Windenergieanlagen abgestellt, um das Risiko von Beschädigungen zu verringern.

Windenergieanlagen produzieren elektrische Energie mit einer Spannung von 380 oder 690 Volt. Durch einen Transformator am Fuße des Turms erfolgt eine Transformation auf die Übertragungsspannung von 10 bis 30 kV (Kilovolt).

3 Rechtlicher Rahmen für die Errichtung und den Betrieb von Windenergieanlagen

Windenergieanlagen sind Bauvorhaben, die nach dem Baugesetzbuch (BauGB) im Außenbereich privilegiert sind. Sie können also außerhalb der im Zusammenhang bebauten Ortsteile überall errichtet werden, wenn dem keine öffentlichen Belange entgegenstehen. Allerdings können durch die Regionalplanung oder die Bauleitplanung von Kommunen Flächen speziell für die Windenergienutzung ausgewiesen werden, z.B. um Konflikte mit anderen Formen der Landnutzung zu vermeiden. In dem Planungsgebiet sind Windenergieanlagen dann in der Regel nur in diesen festgelegten Gebieten zulässig.

Der Umfang des Verfahrens für die Genehmigung der Errichtung von Windenergieanlagen hängt von deren Größe ab. Für kleinere Windenergieanlagen (Kleinwindanlagen) bis 50 m Gesamthöhe ist nur ein Baugenehmigungsverfahren durchzuführen, soweit sie nicht verfahrensfrei gestellt sind. Hier sind die Bestimmungen der Bauordnung des jeweiligen Bundeslandes zu beachten. Für jede Windenergieanlage mit mehr als 50 m Gesamthöhe ist ein Genehmigungsverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) erforderlich. Sollen mehrere Windenergieanlagen an einem Standort betrieben werden (Windpark), kann zusätzlich eine Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich sein.

3.1 Genehmigungsverfahren nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)

Die Errichtung und der Betrieb von Windenergieanlagen können Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesundheit des Menschen haben. Im Bundes-Immissionsschutzgesetz ist das Verfahren geregelt, mit dem geprüft wird, ob der Bau und Betrieb einer beantragten Windenergieanlage mit den Belangen der betroffenen Bürger und den öffentlichen Belangen, zu denen der Schutz von Tieren und Pflanzen, Boden, Wasser, Atmosphäre sowie von Kultur- und sonstigen Sachgütern vor schädlichen Umwelteinwirkungen gehört, vereinbar ist. Dabei wird insbesondere auch überprüft, ob die rechtlich verbindlichen Regelungen des Immissionsschutzes (Lärm und Infraschall, Schattenwurf) eingehalten werden. Die für die Erteilung der Genehmigung zuständige Behörde holt die Stellungnahmen sämtlicher Behörden ein, deren Aufgabenbereich durch das Vorhaben berührt wird (z.B. Naturschutz). Das immissionsschutzrechtliche Genehmigungsverfahren umfasst auch andere (notwendige) Genehmigungsschritte, wie z. B. die Baugenehmigung. Eine Beteiligung der Öffentlichkeit am Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen ist nicht vorgeschrieben, kann aber auf freiwilliger Basis erfolgen.

3.2 Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)

Die Umweltverträglichkeitsprüfung dient der Entscheidung über die Zulässigkeit konkreter Vorhaben. Grundlage der Umweltverträglichkeitsprüfung ist eine durch den Antragsteller zu erstellende Umweltverträglichkeitsstudie, in der vor allem die Auswirkungen der Windenergieanlage auf die Landschaft, die Tier- und Pflanzenwelt sowie der Geräuschpegel und der Schattenwurf zu untersuchen sind. Eine Umweltverträglichkeitsprüfung wird nur in Verbindung mit Genehmigungsanträgen durchgeführt. Der Untersuchungsumfang richtet sich nach der Anzahl der zu errichtenden Windenergieanlagen mit einer Gesamthöhe von mehr als 50 m.

4 Auswirkungen von Windenergieanlagen auf die Umwelt

Im Folgenden wird dargestellt, welche Erkenntnisse es hinsichtlich der Umweltauswirkungen von Windenergieanlagen gibt. Welche Umweltschutzgüter betroffen sein können und wie hoch die Risiken im Normalbetrieb sind, zeigt die Übersicht in Tabelle 4.1. Dort ist auch angegeben, in welchen Unterkapiteln dieses Berichts die genannten möglichen Auswirkungen jeweils behandelt werden. Unter Umweltgesichtspunkten führt eine Anlage zu einer Beeinträchtigung eines Schutzguts, wenn dieses so in Anspruch genommen oder belastet wird, dass es seine Beiträge zu höheren ökologischen Funktionen (Lebensräume für Tiere und

Pflanzen bieten, Ökosystemleistungen bereitstellen) nicht mehr oder nur stark eingeschränkt leisten kann.

Tabelle 4.1
Auswirkungen von Windenergieanlagen auf Umweltschutzgüter

Umweltschutzgüter	Beeinträchtigung	Kapitel
Fläche	gering	4.1
Boden	gering	4.2
Grundwasser	gering	4.3
Binnen- und Küstengewässer	gering	4.3
Luft	keine	4.4
Lokales Klima	gering	4.5
Globales Klima	keine	4.6
Biologische Vielfalt: Lebensräume, Arten	u.U. hoch für einige Vogel- und Fledermausarten	4.7
Landschaft	hoch	4.8

Die von Windenergieanlagen verursachten Immissionen von Schall und elektromagnetischen Feldern werden im Kapitel 5 behandelt, da diese vor allem im Hinblick auf mögliche gesundheitliche Auswirkungen diskutiert werden. Schall könnte sich allerdings auch störend auf die Fauna auswirken und zu einer Vergrämung vor allem von Säugetieren führen. Dies scheint jedoch nicht so zu sein, wie die Ergebnisse einer Wildtierstudie zeigen, die im Abschnitt 4.7.2 vorgestellt werden. Es gibt eine Reihe von Untersuchungen, die belegen, dass künstliche magnetische Felder das Orientierungsvermögen von Tieren beeinträchtigen können (s. z.B. Neitzke et al. 1994). Die von Windenergieanlagen erzeugten elektrischen Ströme sind jedoch, verglichen mit denen, die von Hochspannungstrassen übertragen werden, gering und zudem räumlich viel begrenzter, sodass solche Effekte wahrscheinlich ausgeschlossen werden können.

4.1 Fläche

Bei Windenergieanlagen werden Flächen für Fundamente und Zuwegung 'verbraucht'. Diese unmittelbare Flächeninanspruchnahme ist relativ gering. In der Literatur werden als Durchschnittswert 1.000 m² für eine Anlage angegeben (Schmitt et al. 2006: 51). Deutlich weniger, aber immer noch stark, beeinträchtigt ist die gesamte Fläche die durch die Rotorblätter bei gleichzeitiger Drehung der Gondel überstrichen wird. Für eine große Windenergieanlage mit einer Rotorblattlänge von 65 m ergeben sich 13.267 m². Bei Windparks müssen nicht nur die Kreisflächen um die einzelnen Windenergieanlagen, sondern auch die Bereiche dazwischen als ökologisch entwertet gelten. Wie groß diese Fläche ist, hängt von der Zahl und der Anordnung der Anlagen ab. Sie kann (in Anlehnung an Schmitt et al. 2006: 17), wie in Abbildung 4.1 skizziert, abgeschätzt werden.

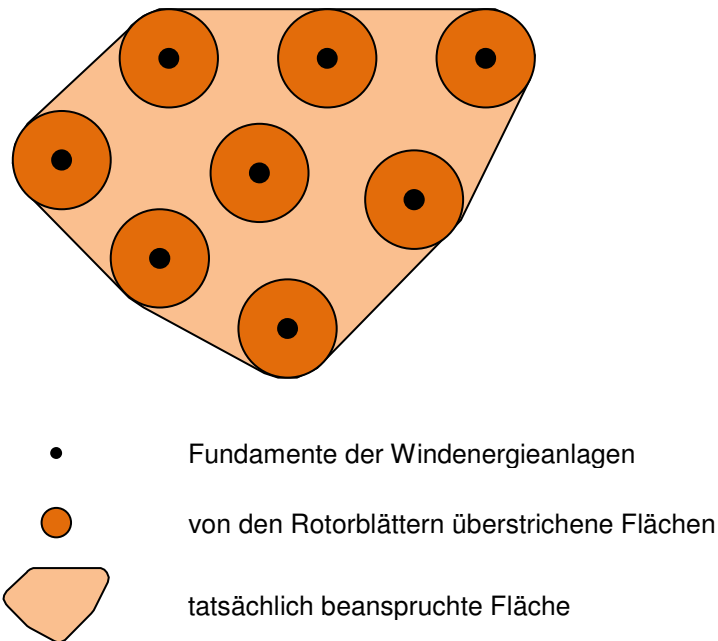


Abbildung 4.1
Durch einen Windpark beanspruchte Fläche

Die möglichen Auswirkungen der Flächeninanspruchnahme durch Windenergieanlagen auf Tiere, insbesondere Vögel und Fledermäuse, wird in Abschnitt 4.7 und dass der visuellen Beeinträchtigung des Landschaftsbildes in Abschnitt 4.8 behandelt.

4.2 Boden

Bei der Errichtung von Windenergieanlagen erfolgen im Zusammenhang mit dem Bau der Fundamente und der Wege Eingriffe in den Boden durch Bodenaushub und Verdichtung. Diese sind von Art und Umfang mit anderen Hochbaumaßnahmen vergleichbar. Ob und in welchem Umfang es während des Baus, z.B. über die eingesetzten Maschinen, zu Schadstoffeinträgen in den Boden kommt, oder ob aus dem Anstrich der Anlagen problematische Stoffe in den Boden gelangen, ist nicht bekannt bzw. vom Betrieb der Maschinen und vom verwendeten Anstrich abhängig. Insgesamt ist davon auszugehen, dass die Risiken für das Schutzgut 'Boden' gering sind.

4.3 Grundwasser, Binnen-/Küstengewässer

Schadstoffeinträge in den Boden (s. 4.2) und über diesen in das Grundwasser sind zwar nicht völlig auszuschließen, dürften aber eher gering sein. Mit gravierenden negativen Auswirkungen von Windenergieanlagen auf das Grundwasser sowie auf Binnen- und Küstengewässer ist nicht zu rechnen.

4.4 Luft

Windenergieanlagen haben keine Auswirkungen auf die Luftqualität.

4.5 Lokales Klima

Windenergieanlagen führen zu geänderten Luftströmungen und einer Verwirbelung der Luft. Davon ist aber nur der unmittelbare Nahbereich betroffen.

4.6 Globales Klima

Die Bilanz der Auswirkungen von Windenergieanlagen auf das globale Klima ist, auch unter Berücksichtigung der im Zusammenhang durch Herstellung und Errichtung verursachten THG-Emissionen, positiv. Je nach Standort und Technik verursacht die Erzeugung von einer Kilowattstunde (kWh) Windstrom 10 bis 25 g Kohlendioxid. Um den gleichen Strom zu erzeugen, werden in einem Kohlekraftwerk etwa 1000 g Kohlendioxid freigesetzt (AEE 2012).

4.7 Lebensräume und Arten

Im Zusammenhang mit Windenergieanlagen an Land werden zum einen Kollisionen von Vögeln und Fledermäusen mit Windenergieanlagen bzw. andere tödliche Auswirkungen auf einzelne Tiere sowie zum anderen Störungen natürlicher Lebensräume von Tieren, die zur Meidung betroffener Gebiete führen, und Barrierewirkungen vor allem für ziehende Vogelschwärme diskutiert.

4.7.1 Tödliche Auswirkungen auf einzelne Tiere

Vögel

Vögel können durch Kollisionen mit den Anlagen selbst zu Schaden kommen oder dadurch, dass es in der Umgebung der Rotorblätter zu Verwirbelungen der Luft kommt, die zum Absturz des betroffenen Vogels führen. Wenn in der Umgebung von Windenergieanlagen Vögel tot aufgefunden werden, lässt sich die genaue Todesursache in der Regel nicht feststellen. Von der Staatlichen Vogelschutzwarte im brandenburgischen Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz werden Meldungen und Untersuchungen zur Tötung von Vögeln und Fledermäusen durch Windenergieanlagen zusammengetragen und ausgewertet (LUGV BB 2014a). In Tabelle 4.2 sind für einige ausgewählte Arten die Zahlen der bis November 2014 in Deutschland dokumentierten Schlagopfer zusammengestellt. Diese Zahlen sind allerdings nur begrenzt aussagekräftig, da es für viele Arten bisher kaum systematische Totfundsuchen an problematischen Standorten gibt.

Vogelarten, die eine geringe Scheu vor Windenergieanlagen haben, wie Greifvögel, Möwen und Stare, werden häufiger zu Opfern als Arten, die Windenergieanlagen weiträumig meiden bzw. umfliegen, wie Gänse und Watvögel (Hötter et al. 2005: 41). Krähenvögel scheinen kaum Scheu vor Windenergieanlagen zu haben, verunglücken aber trotzdem nur selten. Dass vom Vogelschlag vergleichsweise viele Greifvögel betroffen sind, könnte damit zu tun haben, dass diese durch die Umgebung von Windkraftanlagen angelockt werden. Der Grund könnte eine im Zuge der Einrichtung der Anlagen gestiegene Beutedichte sein, zum Beispiel weil Brachflächen oder andere Strukturen entstehen, die für Kleinsäuger, die Hauptnahrung vieler Greifvögel, besonders vorteilhaft sind (Hötter et al. 2005: 57).

Tabelle 4.2

Zahl der dokumentierten Totfunde für ausgewählte Vogelarten in der Umgebung von Windenergieanlagen in Deutschland (Stand November 2014, nach LUGV BB 2014a)

Art	Zahl der Totfunde	Anmerkung
Weißstorch	42	Fundabstände von 420 und 1.875 m zum nächsten Horst
Schwarzstorch	1	ob Schwarzstörche Windparks meiden, ist umstritten
Seeadler	99	hoher Anteil anthropogener Verlustursachen (Bleivergiftung, Bahnkollision, Stromschlag) keine Meidung von Windenergieanlagen im Nahrungsrevier
Schreiadler	4	
Fischadler	13	
Rotmilan	255	hoher Anteil anthropogener Verlustursachen Totfunde an z. T. recht hohen Windenergieanlagen hohes Schlagrisiko vor allem für Alt- und Brutvögel
Schwarmilan	27	keine Hinweise auf Meidung von Windenergieanlagen während der Jagd.
Wiesenweihe	2	
Rohrweihe	17	Jagdflüge meist bodennah und unterhalb des Gefahrenbereichs der Rotoren
Uhu	16	hoher Anteil anthropogener Verlustursachen
Kranich	10	Kollisionsgefährdung bei Mindestabstand von 500 m zum Nistplatz trotz auch nächtlicher Flugaktivität sehr gering

Die vorliegenden Berichte zeigen, dass die Opferzahlen zwischen verschiedenen Windparks stark variieren. Die Größe der einzelnen Windenergieanlagen spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle (Hötter et al. 2005: 40). Einen wesentlich stärkeren Einfluss hat die Lage des Windparks. Untersuchungen aus Spanien und den USA zeigen, dass Standorte auf kahlen Gebirgrücken oder an Geländekanten zu hohen Opferzahlen, besonders unter Greifvögeln, führen (Hötter et al. 2005: 40). In Mitteleuropa wurden an Windenergieanlagen in der Nähe von Feuchtgebieten besonders viele tote Vögel, vor allem Möwen, festgestellt (Hötter et al. 2005: 40). Nächtliche Massenkollisionen, wie an Leuchttürmen oder freistehenden Hochhäusern immer wieder beobachtet, wurden an Windenergieanlagen bisher nicht festgestellt (Hötter et al. 2005: 40).

In einer Studie im Auftrag des Bundes-Umweltministeriums (AG DLR/IFEU/WI 2004: 119) wird der Vogelschlag für Windenergieanlagen mit Verweis auf Empfehlungen des Bundesamtes für Naturschutz zu naturschutzverträglichen Windkraftanlagen aus dem Jahr 2000 ähnlich eingeschätzt wie beispielsweise für Stromfreileitungen oder Funkmasten. In der bereits mehrfach zitierten vom Naturschutzbund Deutschland (Nabu) erstellten Meta-Studie, für die 127 Studien aus dem In- und Ausland ausgewertet wurden, kommt das Autorenteam zu dem Schluss, dass bei Vögeln nicht mit wesentlichen Erhöhungen der Mortalitätsraten durch Windenergieanlagen zu rechnen ist (Hötter et al. 2005: 45). Eine Ausnahme, so die Autoren, könnten Möwen sein.

Besondere Beachtung verdienen natürlich bedrohte und besonders schützenswerte Arten. Zu ihrem Schutz und um einheitliche Bewertungsmaßstäbe für Stellungnahmen der Naturschutzbehörden landesweit sicherzustellen, wurden auf Landesebene tierökologische Abstandskriterien festgelegt, das heißt, artenschutzfachlich begründete Abstände zu den Fort-

pflanzungs- und Ruhestätten bedrohter und störungssensibler Vogelarten, zu Brutkolonien störungssensibler Vogelarten, zu Schwerpunktgebieten gemäß des Landesartenschutzprogramms sowie zu bedeutenden Rast- und Überwinterungsgewässern störungssensibler Zugvögel (s. z.B. MUGV BB 2012). Es wird zwischen Schutz- und Restriktionsbereichen unterschieden. Innerhalb ersterer stehen die tierökologischen Belange der Errichtung von Windenergieanlagen grundsätzlich entgegen. Restriktionsbereiche sind Bereiche, in denen tierökologische Belange des Naturschutzes zu Einschränkungen oder Modifikationen im Planungsprozess, wie etwa Verkleinerungen oder Verlagerungen von Anlagestandorten führen können. Von der Länderarbeitsgemeinschaft der Vogelschutzwarten werden im sogenannten 'Helgoländer Positionspapier' Abstände zwischen sensiblen Gebieten und Windenergieanlagenstandorten empfohlen, die für einzelne Arten deutlich größer sind als die zur Zeit rechtlich verbindlichen Werte.

Fledermäuse

Zu der Frage des Risikos von Fledermäusen, durch Windenergieanlagen getötet zu werden, liegen im Vergleich zu den Risiken von Vögeln deutlich weniger Untersuchungen vor. Für Fledermäuse bestehen die Gefahren möglicherweise weniger in direkten Kollisionen mit Windenergieanlagen oder von Abstürzen infolge von Luftverwirbelungen an den drehenden Rotoren, sondern sie sterben einer kanadischen Studie zufolge wohl überwiegend durch Schädigungen von Blutgefäßen im Umfeld der Lunge (Baerwald et al. 2008). Die Drehung der Rotorblätter von Windenergieanlagen führt zu starken Luftdruckschwankungen. Ein plötzlicher Unterdruck kann dazu führen, dass sich die sackartigen Lungen von Fledermäusen extrem ausdehnen. Dadurch können angrenzende Adern und Venen reißen. Bei Vögeln ist die Lunge anders aufgebaut, ihnen können starke Druckunterschiede nicht gefährlich werden.

Bei Untersuchungen der Herkunft von in der Umgebung von Windenergieanlagen im südlichen Teil Ostdeutschlands tot aufgefundenen Fledermäusen, wurde festgestellt, dass diese zu 72 Prozent aus lokalen Populationen stammten, bei 28 Prozent handelte es sich um Tiere aus weiter entfernten Gebieten Nordosteuropas (Lehnert et al. 2014). In Tabelle 4.3 sind die Zahlen der bis Ende Oktober 2014 dokumentierten und aufsummierten Totfunde in der Nähe von Windenergieanlagen in Deutschland für alle Fledermausarten aufgeführt, für die diese jeweils 50 übersteigen.

Tabelle 4.3

Zahl der dokumentierten Totfunde für ausgewählte Fledermausarten in der Umgebung von Windenergieanlagen in Deutschland (Stand Oktober 2014, nach LUGV BB 2014b)

Art	Zahl der Totfunde
Großer Abendsegler	742
Kleiner Abendsegler	112
Rauhautfledermaus	590
Zweifarbtfledermaus	95
Zwergfledermaus	446

Wie für die Zahlen in Tabelle 4.2 gilt, dass die Fundmeldungen nur Anhaltspunkte für die tatsächlichen Opferzahlen liefern, da sie auch von der Erfassungsintensität und der Meldebereitschaft abhängen. Bei Untersuchungen an insgesamt 30 Windenergieanlagen mit Ro-

tordurchmessern von 66 bis 70 m in 15 Windparks vom norddeutschen Flachland bis zum Mittelgebirge wurden in den Sommermonaten des Jahres 2007 im Mittel 7,4 und in denen des Jahres 2008 im Mittel 4,3 tote Fledermäuse pro Windenergieanlage ermittelt (Korner-Nievergelt 2013). Diese Zahlen stimmen nach Aussage der Autoren mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen in Mittel- und Nordeuropa überein, bei denen die Zahl der toten Fledermäuse von 0 bis 26 pro Anlage und Jahr reichte. In derselben Untersuchung wurde eine deutliche Abhängigkeit der Zahl der Opfer von der Windgeschwindigkeit festgestellt. Bei Windgeschwindigkeiten unter 2 m/s und über 6 m/s wurden keine oder nur sehr wenige tote Fledermäuse gefunden, was zum einen daran liegt, dass die Rotorblätter bei Windgeschwindigkeiten unter 2 m/s normalerweise still stehen, und zum anderen, dass die Aktivität von Fledermäusen bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 6 m/s sehr gering ist. Wenn Windenergieanlagen erst bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 6 m/s in Gang gesetzt würden, ließe sich das Risiko für Fledermäuse also stark reduzieren.

4.7.2 Störungen natürlicher Lebensräume von Tieren

In der bereits zitierten Metastudie des Naturschutzbundes für das Bundesamt für Naturschutz wird festgestellt, dass es keinen statistisch signifikanten Nachweis erheblicher negativer Auswirkungen von Windenergieanlagen auf Brutvogelbestände gibt (Hötter et al 2005: 7). Nur für einige Watvogelarten der offenen Landschaft (Kiebitz, Uferschnepfe und Rotschenkel) deuten sich tendenziell negative Wirkungen an. Auf bestimmte brütende Singvogelarten üben Windenergieanlagen sogar positive Wirkungen aus (Hötter et al. 2005: 7). Ursache für die positiven Wirkungen dürften sekundäre Effekte wie Habitatveränderungen bzw. landwirtschaftliche Nutzungsaufgaben in der unmittelbaren Umgebung von Windenergieanlagen sein. Die meisten Arten, Ausnahmen sind Kiebitz, Uferschnepfe und Rotschenkel, halten sich auch zur Brutzeit in unmittelbarer Umgebung von Windkraftanlagen auf (Hötter et al. 2005: 8). Bei einigen Singvogelarten wurde die Tendenz beobachtet, sich näher an größeren als an kleineren Windenergieanlagen anzusiedeln.

Außerhalb der Brutzeit halten viele Vogelarten der offenen Landschaft größere Abstände, meist mehrere hundert Meter, zu Windenergieanlagen ein (Hötter et al. 2005: 8). Besonders sensibel scheinen Gänse und Watvögel zu sein. Bei Gänsen reicht die Störwirkung bis zu einem Abstand von 500 m zu einer Windenergieanlage. Die Abstände, die rastende Vögel zu Windenergieanlagen einhalten, nehmen tendenziell mit der Größe der Anlage zu, ein statistisch signifikanter Zusammenhang wurde aber nur für den Kiebitz nachgewiesen (Hötter et al. 2005: 8). Die Frage, ob sich Vogelarten an Windenergieanlagen gewöhnen, ist ungeklärt, die hierzu bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse sind widersprüchlich (Hötter et al. 2005: 7).

Zu den Auswirkungen von Windenergieanlagen auf andere Säugetiere als Fledermäuse liegt nur eine ältere Untersuchung des Instituts für Wildtierforschung an der Tierärztlichen Hochschule Hannover vor (Menzel 2001). Die Ergebnisse für die untersuchten Tierarten, Feldhasen, Rehwild und Rotfuchs, sind eindeutig: Es waren keine gravierenden Störwirkungen festzustellen. Im Vergleich 'Gebiet mit Windenergieanlagen' und 'Anlagenfreies Gebiet' konnten keine signifikanten Unterschiede bei den Aktivitäten der Tiere festgestellt werden. In den vier Gebieten mit Windenergieanlagen wurden allerdings mehr Hasen als auf den Vergleichsflächen beobachtet. Dass Windenergieanlagen nicht zur Vergrämung der untersuchten Tierarten führen, wird damit erklärt, dass die Anlagen standortfixiert seien und außerhalb der Wartungszeit eine zwar in der Drehgeschwindigkeit unterschiedliche, jedoch kontinuierli-

che Rotorbewegung aufwiesen. Somit würden die Anlagen als eine für das Wild im Raum-Zeit-Rhythmus kalkulierbare Störquelle angesehen, die zu keiner Meidung der Flächen im Nahbereich der Anlagen führe. In der Studie wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass aus den Befunden für die untersuchten Tierarten keine Rückschlüsse auf andere gezogen werden können.

4.7.3 Barrierewirkungen für ziehende Vogelschwärme

Zur Barrierewirkung von Windparks, also zum Ausweichen von Vögeln beim Anflug auf Windenergieanlagen während des Zuges oder bei sonstigen regelmäßig auftretenden Flugbewegungen, gibt es nur wenige Untersuchungen. Bei 81 Vogelarten wurde eine solche Barrierewirkung beobachtet. Besonders deutlich sind die Befunde für Arten, die offene Flächen benötigen, wie Gänse, Kraniche und Watvögel, aber auch für kleine Singvögel (Hötter et al. 2005: 8). Ob dies negative Auswirkungen auf die Populationen der betroffenen Arten hat, ist nicht bekannt.

4.8 Landschaft

In § 1 des Gesetzes über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG) ist festgelegt, dass die Vielfalt, Eigenart und Schönheit sowie der Erholungswert von Natur und Landschaft zu schützen und auf Dauer zu sichern sind. Windenergieanlagen führen eindeutig zu Veränderungen des Landschaftsbildes. Wie stark diese sind, hängt vor allem von der Struktur der Landschaft und dem Standort sowie von der Anzahl und der Größe der Anlage ab (s. z.B. BfN 2000). Für eine Bewertung ist immer ein einzelfallbezogenes Vorgehen notwendig, bei dem die regionstypischen Ausprägungen des Landschaftsbildes mit einbezogen werden müssen. Im norddeutschen Flachland ohne höhere strukturierende Landschaftselemente, wie in großen Teilen Brandenburgs, Mecklenburg-Vorpommerns und Sachsen-Anhalts, in Schleswig-Holstein und im nordwestlichen Niedersachsen sind die Anlagen weiter sichtbar als im Mittelgebirgsraum – wenn sie dort nicht gerade auf Kuppen oder Bergrücken stehen. Ob dadurch die Vielfalt, Eigenart und Schönheit sowie der Erholungswert der Landschaft beeinträchtigt wird, hängt natürlich auch von den subjektiven Einstellungen der Betrachter ab. In einer bundesdeutschen Repräsentativbefragung im Rahmen der im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz im Jahr 2011 durchgeführten Naturbewusstseinsstudie wurden die Teilnehmer auch gefragt, wie sie zu möglichen Veränderungen der Landschaft in Folge des Ausbaus der Nutzung der erneuerbaren Energien stehen (BMU & BfN 2012: 18ff). 79 Prozent der Befragten gaben an, Landschaftsveränderungen durch Windenergieanlagen zu akzeptieren (s. Abb. 4.4). Bei Hochspannungsleitungen ist die Akzeptanz deutlich niedriger.

Zum Thema 'Akzeptanz von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien' gibt es mittlerweile zahlreiche Untersuchungen (s. a. Kap. 6). Die zitierte Umfrage ist im Hinblick auf die Bewertung von Landschaftsveränderungen besonders interessant, weil bei ihr nicht die Energiewende und die erneuerbaren Energien im Mittelpunkt standen, sondern der Natur- und Landschaftsschutz, und es bekannt ist, dass das thematische Umfeld einer Befragung Einfluss auf das Antwortverhalten hat. Bei dieser wie bei anderen Repräsentativbefragungen ist allerdings zu bedenken, dass mehrheitlich Personen befragt werden, die selbst nicht in der Nähe von Windenergie- oder anderen Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien leben.

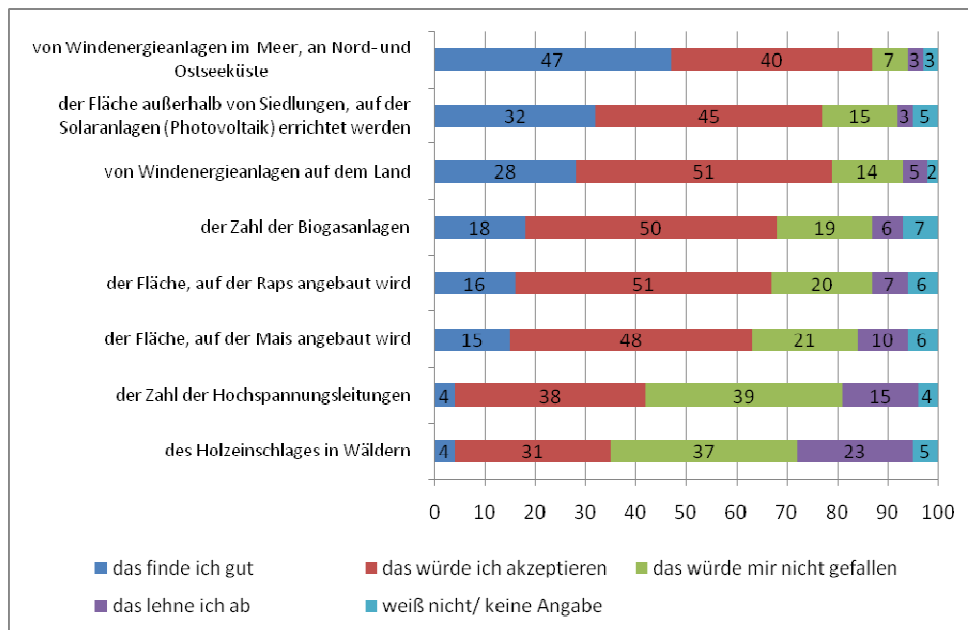


Abbildung 4.4

Akzeptanz von Landschaftsveränderungen durch Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien und andere Aktivitäten im Zusammenhang mit der Energiewende (Frage: Wenn wir künftig mehr erneuerbare Energien nutzen wollen, wird das zu Veränderungen unserer Landschaft führen. Wie bewerten Sie die mögliche Zunahme ...?; BMU & BfN 2012: 19)

5 Auswirkungen von Windenergieanlagen auf die Gesundheit

Im Zusammenhang mit dem Betrieb von Windenergieanlagen werden als mögliche Gesundheitsrisiken und Beeinträchtigungen des Wohlbefindens der Anwohner vor allem die von den Anlagen verursachten Emissionen von Schall, einschließlich Infraschall, der Schattenwurf, Lichtblitze und die nächtliche Beleuchtung diskutiert. Auch die von den Anschlussleitungen von Windenergieanlagen verursachten elektrischen und magnetischen Felder werden gelegentlich als mögliche Ursache von gesundheitlichen Beeinträchtigungen genannt. Diese Themen werden im Folgenden behandelt. Auf die Veränderungen des Landschaftsbildes, die ebenfalls als störend empfunden werden können, wurde bereits im Abschnitt 4.8 eingegangen. Nicht eingegangen wird auf das Problem des Eiswurfes, da dieses nur den Nahbereich der Anlagen betrifft und zudem für die Risikoeinschätzung kein wissenschaftliches Hintergrundwissen erforderlich ist.

5.1 Schall und Infraschall

Windenergieanlagen verursachen sowohl Emissionen im Bereich des hörbaren Schalls als auch solche mit Frequenzen unter 20 Hz, die in den nicht-hörbaren Bereich des akustischen Frequenzspektrums fallen (Infraschall). Infraschall ist nicht im eigentlichen Sinne hörbar, da bei Frequenzen unterhalb von 50 Hz die Tonhöhe kaum und bei ganz niedrigen Frequenzen überhaupt nicht mehr unterschieden werden kann. Für den Menschen ist jedoch auch im Infraschallbereich das Gehör das sensibelste Sinnesorgan. Um Infraschall zu 'hören', also ein tieffrequentes Geräusch wahrzunehmen, sind jedoch deutlich höhere Schallpegel erforderlich als im Bereich des hörbaren Schalls. Erst wenn der Schallpegel deutlich über der

'Hör'schwelle liegt, kann tieffrequenter Schall auch mit dem Tast- und dem Gleichgewichtssinn wahrgenommen werden.

Im Anhang 1 sind grundlegende Informationen zu Schall, zu seiner Ausbreitung und Wahrnehmung zusammengestellt und es werden die hier verwendeten Begriffe und Einheiten erklärt.

5.1.1 Schall- und Infraschallemissionen und -immissionen

Ursachen von Schall- und Infraschallemissionen

Hauptursache der Schallemissionen von Windenergieanlagen sind die drehenden Rotorblätter, aber auch der Antriebsstrang mit Welle, Lager, Getriebe, Kupplung und Generator, die Nachführsysteme für Gondel und Rotorblatt sowie das Kühlgebläse verursachen Geräusche. Die Infraschallemissionen von Windenergieanlagen sind vor allem auf aerodynamische Vorgänge zurückzuführen

Der von der Betriebstechnik erzeugte Schall kann auf den hohlen Stahlrohrturm übertragen werden. Da dieser als Resonanzkörper wirken kann, sind Resonanzverstärkungen möglich.

Die von den Rotorblättern einer Windenergieanlage ausgehenden Schall- und Infraschallemissionen hängen stark vom Betriebszustand der Anlage ab, der hauptsächlich durch die Windgeschwindigkeit in der Höhe des Rotors bestimmt wird. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit steigt nicht nur die elektrische Leistung, sondern auch die Schallemissionen nehmen zu. Pro Zunahme der Windgeschwindigkeit um 1 m/s steigt der Schallleistungspegel bis zum Erreichen der Nennleistung um 1 bis 2,5 dB (LUA-NRW o.J.). Bei Erreichen der Nennleistung wird die Rotordrehzahl begrenzt, um eine Überlastung der Anlage zu verhindern. Hierfür gibt es zwei Verfahren:

1. konstruktionsbedingter Strömungsabriss ('Stall'-gesteuerte Anlagen): Bei älteren Anlagen erfolgt die Leistungsbegrenzung dadurch, dass das Rotorblattprofil so konstruiert ist, dass die aerodynamische Strömung am Rotorblatt nach Erreichen der Nennleistung mit zunehmender Windgeschwindigkeit abreißt.
2. dynamische Verstellung des Rotorblatteinstellwinkels ('Pitch'-gesteuerte Anlagen): Bei den meisten neueren Anlagen werden bei Erreichen der Nennleistung die Rotorblätter so verdreht, dass sie dem Wind eine geringere Angriffsfläche bieten.

Das zweite Verfahren hat den Vorteil, dass der Schallpegel nach Erreichen der Nennleistung praktisch konstant bleibt.

Von Windenergieanlagen verursachte Schall- und Infraschallimmissionen

Die von Windenergieanlagen zu erwartenden Schallimmissionen werden im Genehmigungsverfahren geprüft. Vom Betreiber ist eine Schallimmissionsprognose vorzulegen. Nach Errichtung der Anlage können die tatsächlichen Immissionen durch Messung überprüft werden. Das Verfahren zur Messung der von Windenergieanlagen verursachten Schallimmissionen ist in der Norm DIN EN 61400-11 (Windenergieanlagen, Teil 11: Schallmessverfahren) festgelegt. In Abbildung 5.1 ist am Beispiel einer 2 MW-Anlage dargestellt, wie sich der Schalldruckpegel mit dem Abstand ändert. Die Abbildung zeigt, dass eine Entfernungsverdopplung zu einer Abnahme des Schalldruckpegels um etwa 6 dB führt, das heißt, dass der Schall-

druck auf die Hälfte absinkt (zur Erklärung der schalltechnischen Größen s. Anhang 1). Eine Abnahme um 6 dB pro Entfernungsverdopplung ist nur für einzelne (punktförmige) Schallquellen die Regel, bei mehreren Quellen, die in einer Linie aufgereiht oder auf einer Fläche verteilt sind, kann bei Verdoppelung des Abstandes nur von einer Verminderung des Schalldruckpegels um 3 dB ausgegangen werden.

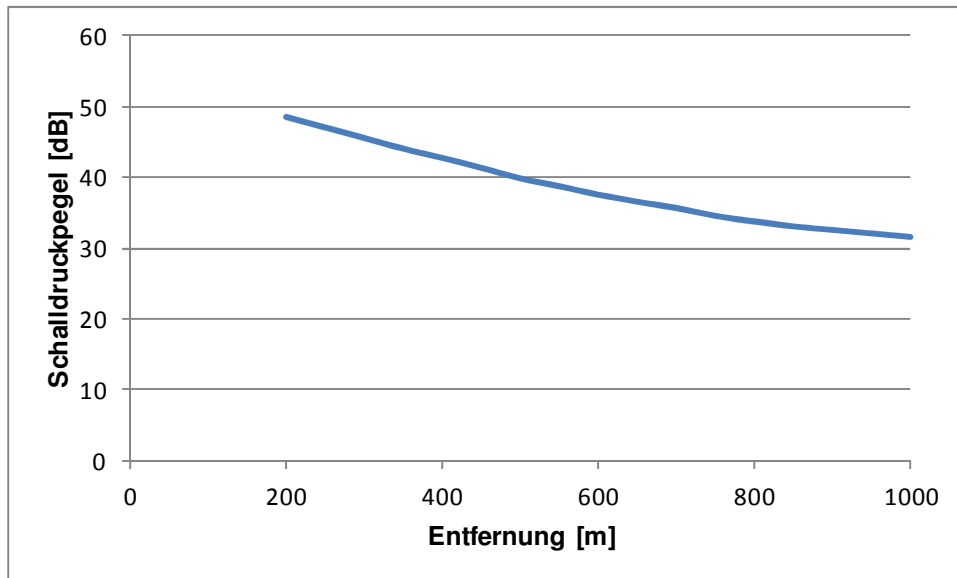


Abbildung 5.1

Abnahme des Schalldruckpegels mit dem Abstand von der Windenergieanlage (Daten: Neddermann 2009)

In Abbildung 5.2 sind die von einer Windenergieanlage verursachten Schallimmissionen für den Bereich tiefer Frequenzen dargestellt. Diese sind deutlich niedriger als die im Innern eines Pkw und liegen für den Infraschallbereich zwischen 15 und 45 dB unter der Hörschwelle.

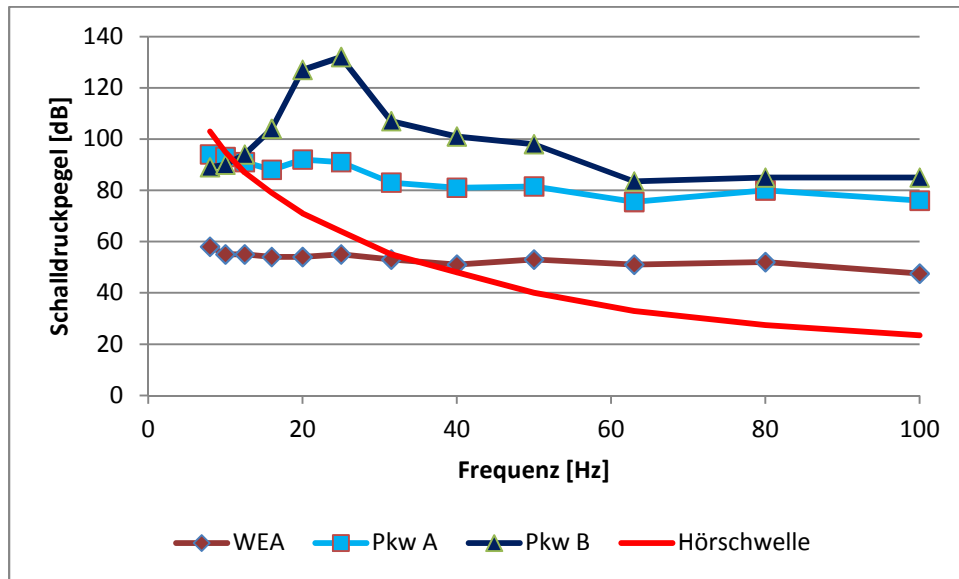


Abbildung 5.2

Tieffrequente Schallimmissionen einer 2 MW-Windenergieanlage bei einer Windgeschwindigkeit von 6,8 m/s in 150 m Abstand im Vergleich mit den Werten in einem Pkw und der Schwelle für die Wahrnehmbarkeit (Datenquelle: LUBW 2013)

WEA: Windenergieanlage

Pkw A: im Innern eines Pkw bei geschlossenen Fenstern

Pkw B: im Innern eines Pkw bei geöffneten hinteren Fenstern

Hörschwelle: Wahrnehmbarkeitsschwelle nach DIN 45680

In Dänemark wurden Messungen an Windenergieanlagen mit Nennleistungen von 2,3 bis 3,6 MW durchgeführt und rechnerisch jeweils die Abstände ermittelt, ab denen die Schallimmissionen jeweils unter 35 dB lagen (Møller & Pedersen 2011). 35 dB entspricht dem Immissionsrichtwert für die Nacht in reinen Wohn- und in Kurgebieten sowie für Krankenhäuser und Pflegeanstalten (s. 5.1.3). Die Abstände, ab denen dieser Wert bei den untersuchten Anlagen unterschritten wurde, lagen zwischen 629 und 1.227 Metern vom Rotor der jeweiligen Windenergieanlage (die Abstände zum Fußpunkt des Turmes waren natürlich kleiner). Bei diesen Abständen ergaben sich für den tieffrequenten Schall, also Schall mit Frequenzen unter 100 Hz aber über 20 Hz, Werte für den Schalldruckpegel von 26,7 bis 29,1 dB(G) und für Infraschall von 54 bis 59 dB(G). Das zeigt, dass die Anteile der niedrigen Frequenzen an den Immissionen vergleichsweise hoch waren. Die hier aufgeführten Messdaten für den Infraschallbereich stimmen im Großen und Ganzen mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen überein (s. z.B. Jacobsen 2005). In Tabelle 5.1 sind die Ergebnisse weiterer Infraschallmessungen sowohl an einzelnen Windenergieanlagen als auch an Windparks zusammengestellt. Angegeben ist hier auch in der letzten Spalte der aus den Messergebnissen extrapolierte Schalldruckpegel für einen Abstand von 1000 m.

Tabelle 5.1

Ergebnisse von Infraschallmessungen an Windenergieanlagen (Luv/Lee: Rotorblätter auf der dem Wind zu-/abgewandten Seite des Turms)

Zahl WEA	Typ WEA	Leistung WEA [kW]	Wind-geschwind. [m/sek]	Mess-abstand [m]	gemess. Infraschall-pegel [dB(G)]	Lit.	extrapol. Infraschall-pegel [dB(G)] 1.000 m
1	Monopteros 50 (1 Flügel, Lee)	640	11	200	84	Betke et al. 1996	70
1	Enercon E-40 (3 Flügel, Luv)	500	8	200	56-64	Betke et al. 1996, Betke & Remmers 1998	46
1	Vestas V66 (3 Flügel, Luv)	1.650		100	70	Klug 2002, Betke 2005	50
1	NN (3 Flügel, Luv)	2.000	6	200	59	Betke 2005	45
			12	200	65		51
4	Bonus (3 Flügel, Luv)	450	9	80	65	Snow 1997	43
1			8	100	71		51
1			10	200	63		49
4			9	100-200	70		50
1	MOD-1 (2 Flügel, Lee)	2.000		105	107	Shepherd & Hubbard 1991	87
				1.000	73-75		
1	WTS 4 (2 Flügel, Lee)	4.200		150	92		76
				250	83-85		72
1	MOD-5B (2 Flügel, Luv)	3.200		68	71		48
14	USWP-50 (3 Flügel, Lee)	50		500	67-79		61-73
1	WTS 3 (2 Flügel, Lee)	3.000		750	68		66
				2.100	60		66
25	24 Suzlon S88, 1 Suzlon S97 (3 Flügel, Luv)	2.100	5-15	1.500	56 (53-58)	Evans et al. 2013	60
27	Suzlon S88 (3 Flügel, Luv)	2.100	5-15	1.400	60 (57-63)		63

In Tabelle 5.2 sind Ergebnisse eines im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg durchgeführten Messprogramms für tieffrequente und Infraschall-Immissionen zusammengestellt (LUBW 2016). Erfasst wurden sowohl die von Windenergieanlagen als auch von anderen technischen sowie natürlichen Quellen verursachten Immissionen.

Tabelle 5.2
Ergebnisse von Infraschallmessungen (LUBW 2016)

Quelle / Situation	Entfernung Messort	Schallpegel [dB(G)]		Infraschall- Terz- pegel ≤ 20 Hz [dB ₁]		Tieffrequente Terzpegel 25-80 Hz [dB]	
Windenergieanlagen		WEA an	WEA aus	WEA an		WEA an	
WEA 1: 2,0 MW	700 m	55-75	50-75				
	150 m	65-75	50-70	55-70		50-55	
WEA 2: 1,8 MW	240 m	60-75	60-75				
	120 m	60-80	60-75	60-75		50-55	
WEA 3: 2,0 MW	300 m	55-80	50-75				
	180 m	55-75	50-75	50-70		45-50	
WEA 4: 3,2 MW	650 m	50-65	50-65				
	180 m	55-65	50-65	45-55		40-45	
WEA 5: 2,4 MW	650 m	60-70	55-65				
	185 m	60-70	55-65	50-65		45-50	
WEA 6: 3,05 MW	705 m	55-65	55-60				
	192 m	60-75	55-65	55-65		45-50	
Straßenverkehr							
Würzburg	innerorts, Balkon	50-75		35-65		55-75	
	innerorts, Wohnraum	40-65		20-55		35-55	
Karlsruhe	Verkehrs- lärm-mess- station	65-75		45-65		55-70	
Reutlingen	Verkehrs- lärm-mess- station	70-80		50-70		55-75	
BAB A5 bei Malsch	80 m	75		55-60		60-70	
	260 m	70		55-60		55-60	
Pkw, 130 km/h	Innenraum	105		90-95		75-95	
Kleinbus, 130 km/h	Innenraum	100		85-90		80-90	
Städtischer Hintergrund							
Karlsruhe	Dach Na- turkudemu seum	50-65		35-55		bis 60	
	Friedrichs- platz	50-65		35-50		bis 60	
	Innenraum	45-60		20-45		bis 55	
Geräuschquellen in Wohngebäuden							
Waschmaschine (alle Betriebsarten)		50-85		25-75		10-75	
Heizung (Öl und Gas, Vollast)		60-70		40-70		25-60	
Kühlschrank (Voll- last)		60		30-50		15-35	
Ländliche Umgebung		Wind					
		6 m/s	10 m/s	6 m/s	10 m/s	6 m/s	10 m/s
Wiese,	130 m vom Wald	50-65	55-65	40-70	45-75	35-40	40-45
Waldrand		50-60	50-60	35-50	45-75	35-40	40-45
Wald		50-60	50-60	35-40	40-45	35-50	35-40
Meeresbrandung							
Strand	25 m	75		55-70		keine Angabe	
Felsenkliff	250 m	70		55-65		keine Angabe	

Die für einen Abstand von 1.000 m extrapolierten Werte für von Windenergieanlagen und –parks verursachten Infraschallimmissionen (s. Tab. 5.1) liegen für Anlagen, bei denen sich die Rotorblätter auf der dem Wind zugewandten Seite des Turms befinden, unter den Schwellen für Wirkungen von Infraschall (s. Tab. 5.3). Bei Windenergieanlagen mit den Rotorblättern auf der vom Wind angewandten Seite sind die Immissionen zum Teil deutlich höher. Dieser Anlagentyp spielt in Deutschland aber keine Rolle. Bei den im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg vermessenen Windenergieanlagen (s. Tab. 5.2) wurden die Belästigungs- oder gar die Schmerzschwellen nie und die Wahrnehmungsschwelle allenfalls im Nahbereich der Anlagen erreicht.

Tabelle 5.3
Schwellen für Wirkungen von Infraschall (nach Thorne 2014)

Frequenz [Hz]	Schwellenwert [dB]		
	Wahrnehmung	Belästigung	Schmerz (Physiolog. Effekt)
1	130	120	133
5	100	118	130
10	88	110	116
20	70	95	102

Der Vergleich mit den von anderen Quellen verursachten Immissionen (s. Tab. 5.2) zeigt, dass bereits im Abstand von wenigen 100 m die von Windenergieanlagen verursachten Infraschallimmissionen deutlich unter denen liegen, die auf andere technische Quellen oder natürliche Phänomene zurückzuführen sind.

5.1.2 Gesundheitliche Auswirkungen von Lärm und Infraschall

Hörbarer Schall

Lärm, das heißt negativ bewerteter hörbarer Schall, kann zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen. In Tabelle 5.4 sind auf der Grundlage eines Berichts der Weltgesundheitsorganisation (WHO 2009: XIII) die Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen zu den Wirkungen von Lärm zusammenfassend dargestellt. Wenn ein Schwellenwert für einen Effekt mit hinreichender Sicherheit angegeben werden kann, ist dieser aufgeführt. Bei Zahlenwerten in Klammern ist die wissenschaftliche Erkenntnislage unsicher. Ein '?' oder ein '(?)', letzteres steht für weniger eindeutige wissenschaftliche Belege, zeigt an, dass ein Zusammenhang zwischen Lärm und dem jeweiligen Effekt festgestellt wurde, dass es aber nicht möglich war, einen Schwellenwert abzuleiten. Die Übersicht zeigt, dass Lärm mit zahlreichen Beeinträchtigungen der Gesundheit in Zusammenhang gebracht wird. Es ist bisher aber nicht möglich, eine genaue Schallpegelgrenze der Gesundheitsverträglichkeit festzulegen.

Die WHO empfiehlt als Richtwert für den vorbeugenden Gesundheitsschutz in Wohngebieten im Freien einen Mittelungspegel von höchstens 55 dB tags und 45 dB nachts. Die Empfehlung für den Nachtwert hat die WHO Europe auf 40 dB gesenkt (WHO 2009). Für Wohn- und Schlafräume empfiehlt die WHO höchstens 35 dB am Tag und 30 dB in der Nacht.

Tabelle 5.4

Effekte durch Lärm und ihre Schwellenwerte (nach: WHO 2009: XIII; zur Erläuterung der verwendeten Symbole s. Text)

Effekte		Schwellenwert [dB]
Biologische Effekte	Veränderung der Aktivität des Herzkreislaufsystems	?
	Veränderungen des EEG	35
	Einsetzen von Bewegung im Schlaf	32
	Veränderung der Dauer verschiedener Schlafzustände, der Schlafstruktur und der Schlafunterbrechung	35
	Veränderungen des Stresshormonniveaus	(?)
Schlafqualität	Erwachen in der Nacht und/oder zu früh am Morgen	42
	Verlängerung der Dauer von Schlafunterbrechungen, Einschlafschwierigkeiten	?
	Schlafunterbrechungen, verminderte Schlafzeit	?
	Erhöhte Bewegungsaktivität während des Schlafes	42
Wohlbefinden	Selbstberichtete Schlafstörungen	42
	Benutzung von Schlafmitteln	40
	Schläfrigkeit/Müdigkeit während des Tages und am Abend	(?)
	Erhöhte Reizbarkeit während des Tages	(?)
	Gestörte soziale Kontakte	(?)
	Beschwerden	(35)
	Gestörte kognitive Leistungsfähigkeit	(?)
Medizinische Gegebenheiten	Umweltbedingte Schlaflosigkeit	42
	Schlaflosigkeit	(?)
	Bluthochdruck	(50)
	Adipositas	(?)
	Depressionen (Frauen)	(?)
	Herzinfarkt	(50)
	Verringerung der Lebenserwartung	(?)
	Psychische Störungen	(60)
	(Berufliche) Unfälle	(?)

Allerdings ist die Lautstärke (Schallpegel) allein kein ausreichendes Kriterium für die Bewertung von Lärm. Ob Schall von einer Person als störendes Geräusch oder Lärm wahrgenommen wird, hängt stark von ihrer Einstellung zu der Schallquelle und der Art des Schalls ab (s. z.B. Knopper & Ollson 2011, Miedema & Vos 1999, SRU 1999: 162ff, Twardella 2013). Zum Beispiel reagieren die meisten Menschen auf Verkehrslärm deutlich intensiver als auf gleich lautes Meeresrauschen. Bei einer Begrenzung des Schallpegels im Außenraum auf 35 dB sollten aber zumindest Schlafstörungen und daraus folgende Gesundheitsstörungen weitgehend ausgeschlossen sein.

Infraschall

Infraschall kann sich grundsätzlich auf den menschlichen Organismus auswirken. Zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Infraschall gibt es aber im Vergleich zu denen von höherfrequentem Schall bisher nur wenige Untersuchungen (Schmidt & Klokke 2014). Wie beim hörbaren Schall hängt die Wirkung von der Höhe des Schalldruckpegels ab. Für die Bewertung ist es wichtig, ob die Immissionen die Hör- beziehungsweise die Wahrnehmungs-

schwelle erreichen. Die Wahrnehmungsschwelle ist der Schalldruckpegel, unter dem 90 Prozent der Bevölkerung Infraschall nicht mehr wahrnehmen.

Wissenschaftlich gesichert ist, dass sehr starker Infraschall (ab 140 dB) beim Menschen zu Gehörschäden führen kann. Ab diesem Wert können Tinnitus und Gleichgewichtsstörungen ausgelöst werden (Seidel 1997). Bei Schallpegeln von 185 dB und mehr kommt es zu Beschädigungen des Trommelfells.

Bei Infraschall mit hohen Schallpegeln, deutlich über der Hörschwelle, wurden sowohl in Experimenten an Tieren als auch an Menschen Auswirkungen auf das Herz-Kreislaufsystem beobachtet. Auch zu Ermüdung, Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit, Benommenheit, Schwingungsgefühl und Abnahme der Atemfrequenz sowie Beeinträchtigungen des Schlafes und erhöhte Morgenmüdigkeit liegen aus wissenschaftlichen Studien Befunde bei Infraschallexpositionen oberhalb der Hörschwelle vor (Malsch & Hornberg 2007, Schmidt & Klokke 2014, Siegmann & Nigmann 2007).

Niederfrequente Schallexpositionen werden bereits bei Schalldruckpegeln unmittelbar über der Hörschwelle als Störung oder Belästigung empfunden. Es ist davon auszugehen, dass die Belästigungswirkung von Infraschall stärker ist als die von Hörschall (Twardella 2013).

Zu gesundheitsbeeinträchtigenden Wirkungen von Infraschallexpositionen unterhalb der Hörschwelle liegen bisher keine wissenschaftlich gesicherten Erkenntnisse vor (Krahé et al. 2014: 13, Schmidt & Klokke 2014). Es gibt aber Hinweise darauf, dass es eine kleine Bevölkerungsgruppe gibt, die für tieffrequenten Schall sehr viel sensibler ist als die Mehrheit der Bevölkerung (Malsch & Hornberg 2007). Bei diesen Personen kann die Wahrnehmungsschwelle 10 bis 12 dB niedriger liegen. Viele leiden an einer Zwangsaufmerksamkeit: Sie müssen sich ständig auf den tieffrequenten Ton konzentrieren, sobald dieser die Hörschwelle erreicht und nicht durch höherfrequente Geräusche überdeckt wird. Allerdings liegen zu dieser Hypersensibilität, wie zu den Wirkungen von Infraschall mit Pegeln unter oder im Bereich der Hörschwelle überhaupt, bisher nur wenige aussagekräftige wissenschaftliche Studien vor.

5.1.2 Vorschriften und Grenzwerte zum Schutz vor Lärm und Infraschall

Die Aufgaben im Bereich Lärmschutz sind zwischen dem Bund, den Ländern und den Kommunen aufgeteilt. Der Bund und zum Teil auch die Länder legen über Rechtsvorschriften, in denen Kriterien und Grenzwerte definiert sind, die Ziele des Lärmschutzes fest. Der Vollzug der Vorschriften im konkreten Fall erfolgt durch Länder und Kommunen.

In der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) sind Immissionsrichtwerte für allgemeine Wohngebiete und Kleinsiedlungsgebiete vorgegebenen (s. Tab. 5.4). Für reine Wohngebiete sind die deutschen Vorschriften strenger als die WHO-Empfehlungen (s. 5.1.2). Allerdings sind nach der TA Lärm einzelne kurzzeitige Schallspitzen zulässig, wenn diese die Immissionsrichtwerte am Tage (6:00 bis 22:00 Uhr) um nicht mehr als 30 dB und in der Nacht (22:00 bis 6:00 Uhr) um nicht mehr als 20 dB überschreiten. Bei seltenen Ereignissen (zehn Tage oder Nächte eines Kalenderjahres an nicht mehr als jeweils zwei aufeinanderfolgenden Wochenenden) sind Werte von tagsüber 70 dB und nachts 55 dB zulässig.

Tabelle 5.4

Schall-Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden (TA Lärm)

Art des Gebietes	Immissionsrichtwert [dB(A)]	
	Tag	Nacht
Industriegebiet	70	70
Gewerbegebiet	65	50
Kerngebiete, Dorfgebiete, Mischgebiete	60	45
Allgemeine Wohngebiete, Kleinsiedlungsgebiete	55	40
Wohngebiete	50	35
Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten	45	35

Die Messung und die Beurteilung von tieffrequentem Schall sind in der TA Lärm (Kapitel 7.3 und Anhang A.1.5) geregelt. Für den Bereich des niederfrequenten und damit auch des Infraschalls sind ausdrücklich besondere Mess- und Beurteilungsverfahren vorgesehen, die in der DIN-Norm 45 680 sowie im dazugehörigen Beiblatt 1 'Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft – Hinweise zur Beurteilung bei gewerblichen Anlagen' festgelegt sind. Diese Norm ist derzeit in der Überarbeitung. Gegenüber der früheren Fassung sind deutliche Verbesserungen im Sinne des Schutzes der Anwohner von Infraschall-emittierenden Anlagen vorgesehen.

5.1.3 Schall- und Infraschallimmissionen und gesundheitliche Risiken durch Windenergieanlagen

Schall

In Abbildung 5.3 ist noch einmal am Beispiel einer 2 MW-Anlage die Veränderung des Schalldruckpegels mit dem Abstand dargestellt. Dieses Mal sind aber zum Vergleich auch ausgewählte Immissionsrichtwerte außerhalb von Gebäuden für die Nacht nach TA Lärm (vgl. Tab. 5.2) und von einigen anderen Quellen verursachte Schalldruckpegel angegeben. Die Abbildung zeigt, dass die Schallimmissionen im Abstand von 750 m von der Windenergieanlage unter dem Wert liegen, der in reinen Wohn- und in Kurgebieten für die Nacht zulässig ist. Ab diesem Abstand kann davon ausgegangen werden, dass es keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen durch die von der Windenergieanlage verursachten Schallimmissionen gibt. Bei anderen Messungen (s. 5.1.1) ergaben sich bei diesem Abstand höhere Werte, aber es ist davon auszugehen, dass durch verbesserte Anlagentechnik und ggf. einen auf Schallimmissionsminimierung ausgerichteten Anlagenbetrieb, der genannte Immissionswert mindestens ab einem Abstand von 1.000 m eingehalten werden kann.

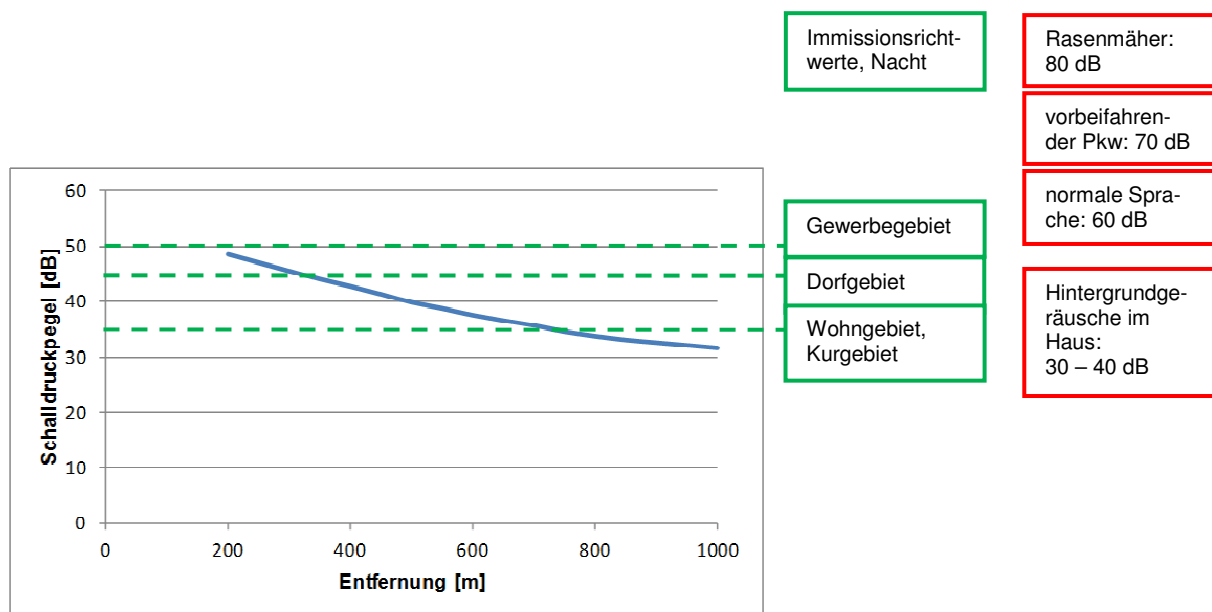


Abbildung 5.3

Abnahme des Schalldruckpegels mit dem Abstand von der Windenergieanlage (Datenquelle: Neddermann 2009), Immissionsrichtwerte nach TA Lärm und Schallemissionen anderer Quellen

Infraschall

Die Infraschallimmissionen moderner Windenergieanlagen liegen bereits bei geringen Abständen deutlich unterhalb der durchschnittlichen Hör- und Wahrnehmungsschwelle (s. 5.1.1). Daher ist davon auszugehen, dass die von Windenergieanlagen verursachten Infraschallimmissionen keine allgemeine Gefährdung der menschlichen Gesundheit darstellen.

5.2 Optische Immissionen

Windenergieanlagen verursachen optische Immissionen in Form eines periodischen Schattenwurfs, von Lichtreflexen und dem von Nachtkennzeichnung ausgehenden Licht. Die Eigenart der Rotorbewegung, die ein zwanghaftes Anziehen der Aufmerksamkeit mit entsprechenden Irritationen bewirken kann, wird nicht als Immission im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes angesehen.

5.2.1 Schattenwurf

Die sich drehenden Rotoren erzeugen bei Sonnenschein und klarem Himmel einen bewegten Schatten, der zu periodischen Helligkeitsschwankungen führt. Kurz nach Sonnenaufgang trifft der Schatten wegen des niedrigen Sonnenstandes in westlicher Richtung in sehr weiter Entfernung von der Windenergieanlage auf den Boden. Mit der steigenden Sonne rückt der Schatten bis zum Mittag immer näher an die Windenergieanlage. Nachmittags wandert er in östlicher Richtung wieder von ihr weg. Im Winter ist der vom Schatten betroffene Bereich den größten Teil des Tages wegen des niedrigeren Sonnenstandes weiter von der Anlage entfernt als im Sommer. In größerer Entfernung von der Anlage kann der Schattenwurf vernachlässigt werden, da das Rotorblatt von dort aus gesehen nur einen kleinen Bereich der Sonne verdeckt und die resultierende Helligkeitsschwankung nicht mehr wahrnehmbar ist. Vom

menschlichen Auge werden Helligkeitsunterschiede wahrgenommen, wenn sie mehr als 2,5 Prozent betragen.

In einer an der Universität Kiel durchgeführten Studie wurde festgestellt, dass bereits eine einmalige Einwirkung eines periodischen Schattenwurfs einer Windenergieanlage von 60 Minuten zu Stressreaktionen führen kann (Pohl et al. 1999). Diese Form optischer Immissionen kann also zu einer erheblichen Belästigung führen. Daher wird der Schattenwurf bereits im Genehmigungsverfahren berücksichtigt. Von den Anlagenbetreibern ist eine Schattenwurfprognose vorzulegen. Mit Hilfe einer vom Bayerischen Landesamt für Umwelt bereitgestellten Computersimulation können auch Laien eine qualitative Einschätzung des Schattenverlaufes in der Umgebung einer Windenergieanlage vornehmen (BayLfU 2013). Bestimmt werden können:

- die Länge der Schatten einer Windenergieanlage in Abhängigkeit vom Tages- und Jahreslauf der Sonne;
- der Abstand und die Größe der Bereiche im Umfeld einer Windenergieanlage, die vom Schattenwurf betroffen sind;
- der Zeitpunkt und die Dauer der Beschattung von Orten in der Umgebung einer Windenergieanlage.

Um die Belästigung durch den Schlagschatten von Windenergieanlagen zu begrenzen, hat die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz empfohlen, dass dieser auf (bestehende) Wohnhäuser an nicht mehr als 30 Stunden pro Jahr und 30 Minuten pro Tag fallen sollte (LAI 2002). Bei dem Jahreswert handelt es sich um eine theoretische Größe, für deren Festlegung angenommen wurde, dass der Wind stetig weht und die Anlage in Betrieb ist, die Sonne immer scheint und die Schattenprojektion maximal ist. Die tatsächlichen Belastungen sind bei diesen Vorgaben deutlich niedriger. Sie können noch weiter gesenkt werden, wenn die Anlagen technisch so ausgerüstet werden, dass eine von Sonnenstand und Wetter abhängige Betriebssteuerung möglich ist.

5.2.2 Lichtreflexe

Durch Reflektion des Sonnenlichts an den drehenden Rotorblättern können periodische Lichtblitze auftreten. Sie sind abhängig vom Sonnenstand, von der Ausrichtung des Rotors relativ zum Sonnenstand, vom Reflexionsvermögen der gewählten Farbe und vom Glanzgrad der Rotorblattoberfläche. Die Frequenz der Lichtblitze ist durch die Umlaufzeit des Rotors gegeben. Bei fotosensiblen Personen mit Epilepsie können Lichtblitze mit Frequenzen im Bereich von 15 bis 20 Hz Anfälle auslösen. Aufgrund der geringen Umlaufgeschwindigkeit liegen die Frequenzen bei großen Windenergieanlagen im Bereich von 0,5 bis 3 Hz, die kritischen Frequenzen werden also nicht erreicht. Durch die Verwendung mittelreflektierender Farben und matter Glanzgrade bei der Beschichtung der Rotorblätter ist es möglich, die Intensität möglicher Lichtreflexe und damit die Belästigung durch Lichtblitze zu minimieren (LAI 2002).

5.2.3 Nächtliche Beleuchtung

Große Windenergieanlagen stellen aufgrund ihrer Höhe ein Luftfahrthindernis dar und müssen deshalb mit einer Tag- und einer Nachtkennzeichnung versehen werden. Näheres ist in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen gere-

gelt. Die nächtliche Beleuchtung wird von Anwohnern oft als störend empfunden. Da Licht als Immission im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes anzusehen ist, können immissionsschutzrechtliche Auflagen zur Verringerung der Lichtemission festgelegt werden. So können z.B. die Gefahrenfeuer nach unten abgeschirmt oder bei guter Sicht gedimmt werden. Grundsätzlich möglich wäre eine bedarfsgerechte Befeuerung das heißt, dass die Befeuerung abgeschaltet bleibt, wenn sich kein Flugobjekt im umgebenden Luftraum befindet. Untersuchungen haben gezeigt, dass die heute üblichen zeitlich synchronisierten Gefahrenfeuer an mehreren Anlagen eines Windparks als weniger störend empfunden werden als nichtsynchronisierte Beleuchtungen.

5.3 Elektrische und magnetische Felder

Für Anwohner von Windenergieanlagen, die Strom in das öffentliche Netz einspeisen, können die Anschlussleitungen zu erhöhten Expositionen gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern – und, wenn diese als Freileitung und nicht als Erdkabel ausgeführt sind, zusätzlich gegenüber elektrischen Feldern – führen, wenn die Trassen dicht an Wohngebieten verlaufen.

Nach der 26. BImSchV gelten für ortsfeste Anlagen zur Umspannung und Fortleitung von Elektrizität mit einer Nennspannung von 1.000 V oder mehr und einer Betriebsfrequenz von 50 Hz die folgenden Grenzwerte:

Magnetisches Feld: 100 μ T (Mikrotesla)

Elektrisches Feld: 5,0 kV/m (Kilovolt pro Meter)

In epidemiologischen Untersuchungen wurde eine Zunahme des Leukämierisikos für Kinder ab Magnetfeldstärken von etwa 0,2 μ T festgestellt. Niederfrequente Magnetfelder wurden deshalb von der Internationalen Agentur für Krebsforschung, einer Unterorganisation der Weltgesundheitsorganisation, als 'möglicherweise krebserregend' eingeordnet (Neitzke 2010, Neitzke & Voigt 2012). Vor diesem Hintergrund wird von Vorsorge-orientierten Wissenschaftlern empfohlen, die Expositionen gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern auf 0,1 μ T zu begrenzen (Neitzke 2010, Neitzke & Voigt 2012). Ob dieser Wert bei einer geplanten Trassenführung eingehalten wird, kann in der Planungsphase mit Hilfe von Feldberechnungen oder nach Inbetriebnahme der Leitung durch Messung überprüft werden.

6 Zusammenfassung und Einordnung der Befunde im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Ausweisung von Standorten für Windenergieanlagen

Die Nutzung der Windenergie kann dazu beitragen, den Einsatz fossiler Energieträger und damit die Emissionen klimawirksamer Gase zu vermindern. Wegen ihres großen Potenzials ist die Nutzung der Windenergie von zentraler Bedeutung für die Energiewende. Die dazu erforderlichen Windenergieanlagen können jedoch erhebliche Auswirkungen auf **Umwelt** und **Gesundheit** haben, wenn sie in der Nähe ökologisch sensibler oder bewohnter Orte errichtet werden. In den folgenden Abschnitten werden zunächst in kompakter Form die möglichen Auswirkungen dargestellt. Bei den Umweltauswirkungen wird auf mögliche Risiken für Boden, Grundwasser, Oberflächen- und Küstengewässer, Luft, Klima, Lebensräume, Arten und Landschaft eingegangen. Unter gesundheitlichen Gesichtspunkten werden Immis-

sionen von Schall-, einschließlich Infraschall-, und Licht bzw. Schatten sowie elektromagnetischen Feldern behandelt.

6.1 Risiken für die Umwelt

Die für Fundamente und Zuwegung von Windenergieanlagen unmittelbar in Anspruch genommene **Fläche** ist gering im Vergleich zu der, die für viele andere Infrastrukturanlagen 'verbraucht' wird. Bei Windparks müssen allerdings nicht nur die Standflächen der einzelnen Anlagen, sondern auch die Bereiche dazwischen als ökologisch entwertet gelten.

Der bei der Errichtung von Windenergieanlagen erfolgende Bodenaushub und die Verdichtung des Bodens sind von Art und Umfang mit anderen Hochbaumaßnahmen zu vergleichen. Sie stellen keine wesentlichen Beeinträchtigungen des Schutzguts '**Boden**' dar. Auch die Schutzgüter **Grundwasser**, **Binnen-/Küstengewässer** sowie **Luft** und **lokales Klima** werden nur gering oder gar nicht geschädigt.

Die Bilanz der Auswirkungen von Windenergieanlagen auf das **globale Klima** ist, auch unter Berücksichtigung der im Zusammenhang mit ihrer Herstellung und Errichtung entstehenden Treibhausgasemissionen, positiv.

Windenergieanlagen können sich unter Umständen negativ auf **Arten und Lebensräume** auswirken, wenn deren Schutzbedürftigkeit nicht durch hinreichende Abstände Rechnung getragen wird. Durch Kollisionen mit den Anlagen, durch Verwirbelungen der Luft in der Umgebung der Rotorblätter bzw. durch die starken Luftdruckschwankungen, die durch die Drehung der Rotorblätter verursacht werden, können Vögel und Fledermäuse zu Schaden kommen. Bei Vögeln, eventuell mit Ausnahme von Möwen ist jedoch nicht mit wesentlichen Erhöhungen der Mortalitätsraten durch Windenergieanlagen zu rechnen. Das Risiko für Fledermäuse ließe sich deutlich verringern, wenn Windenergieanlagen in sensiblen Gebieten erst bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 6 m/s in Gang gesetzt würden. Gravierende Auswirkungen auf Lebensräume konnten bisher nicht festgestellt werden. So gibt es keinen statistisch signifikanten Nachweis für erhebliche negative Auswirkungen von Windenergieanlagen auf Brutvogelbestände. Auch für die einzigen neben Fledermäusen bisher untersuchten Säugetierarten, Feldhase, Rehwild und Rotfuchs, konnten keine negativen Auswirkungen auf ihr Verhalten, insbesondere keine Meidung von Gebieten mit Windenergieanlagen, festgestellt werden. Große Windparks wirken allerdings als Barriere für viele ziehende Vogelarten. Ob dies negative Auswirkungen auf die Populationen der betroffenen Arten hat, ist nicht bekannt.

Windenergieanlagen führen zu objektiven Veränderungen der **Landschaft**. Ob dadurch die ihre Vielfalt, Eigenart und Schönheit sowie ihr Erholungswert beeinträchtigt wird, hängt stark von den subjektiven Einstellungen der Betrachter ab.

6.2 Risiken für die Gesundheit

Windenergieanlagen verursachen sowohl Emissionen im Bereich des hörbaren Schalls als auch des Infraschalls. Eine Verdopplung des Abstands von der Quelle zum Immissionsort zu führt zu einer Abnahme des Schalldruckpegels bei einzelnen Anlagen um etwa 6 dB, das heißt, dass der Schalldruck auf ein Viertel absinkt. Bei Windparks sind es nur 3 dB.

Bei vielen bestehenden Anlagen wird ab Abständen von ca. 1.000 m der in reinen Wohn- und in Kurgebieten für die Nacht zulässige Immissionswert von 35 dB für **hörbaren Schall** unterschritten. Ab diesem Abstand kann davon ausgegangen werden, dass es keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen durch die von der Windenergieanlage verursachten Schallimmissionen gibt. Bei neuen größeren Anlagen ist durch verbesserte Anlagentechnik und ggf. einen auf Schallimmissionsminimierung ausgerichteten Anlagenbetrieb ebenfalls zu erreichen, dass schallbedingte Gesundheitsrisiken praktisch ausgeschlossen werden. Allerdings hängt der Grad der wahrgenommenen Störung durch ein Geräusch nicht allein von der Lautstärke ab, sondern auch stark von der Einstellung zu der Schallquelle und der Art des Schalls ab.

Expositionen gegenüber **Infraschall** werden bereits bei Schalldruckpegeln unmittelbar über der Hörschwelle als Störung oder Belästigung empfunden. Die Belästigungswirkung von Infraschall ist höher als die von Hörschall. Die von modernen Windenergieanlagen verursachten Infraschallimmissionen liegen allerdings bereits bei geringen Abständen deutlich unterhalb der durchschnittlichen Hör- und Wahrnehmungsschwelle und sind deutlich geringer als die Immissionen, die auf andere technische oder natürliche Quellen zurückzuführen sind. Daher ist davon auszugehen, dass die von Windenergieanlagen verursachten Infraschallimmissionen keine allgemeine Gefährdung der menschlichen Gesundheit darstellen. Es gibt eine kleine Bevölkerungsgruppe, die für tieffrequenten Schall sehr viel sensibler ist als die Mehrheit der Bevölkerung.

Der von den drehenden Rotoren verursachte periodische **Schattenwurf** kann zu Stressreaktionen führen, weshalb er auf 30 Stunden pro Jahr und 30 Minuten pro Tag begrenzt wird. Ob und ggf. wie stark bewohnte Gebiete betroffen sind, wird im Rahmen des Genehmigungsverfahrens im Rahmen einer Schattenwurfprognose ermittelt, die vom Anlagenbetreiber vorzulegen ist.

Durch Reflektion des Sonnenlichts an den drehenden Rotorblättern können periodische **Lichtblitze** auftreten. Dieser Effekt kann durch die Verwendung mittelreflektierender Farben und matter Glanzgrade bei der Beschichtung der Rotorblätter weitgehend vermieden werden.

Große Windenergieanlagen stellen aufgrund ihrer Höhe ein Luftfahrthindernis dar und müssen deshalb mit Gefahrfeuern versehen werden. Die störende Wirkung der **nächtlichen Beleuchtung** kann durch technische Maßnahmen, wie eine Abschirmung der Gefahrfeuer nach unten oder ihre Dimmung bei guter Sicht, verringert werden.

Für Anwohner von Windenergieanlagen, die Strom in das öffentliche Netz einspeisen, können die Anschlussleitungen zu erhöhten Expositionen gegenüber **niederfrequenten Magnetfeldern** und ggf. auch **elektrischen Feldern** führen, wenn die Trassen dicht an Wohngebieten verlaufen. Aus Vorsorgegründen wird empfohlen, die Expositionen gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern auf 0,1 μT zu begrenzen. Ob dieser Wert bei einer geplanten Trassenführung eingehalten wird, kann in der Planungsphase mit Hilfe von Feldberechnungen oder nach Inbetriebnahme der Leitung durch Messung überprüft werden.

6.3 Risikowahrnehmung und Akzeptanz von Windenergieanlagen

Hinsichtlich der Akzeptanz von Windenergieanlagen lauten zwei zentrale Fragen:

- Wie werden die oben diskutierten möglichen Auswirkungen von Windenergieanlagen, insbesondere solche auf die Gesundheit, von der Bevölkerung allgemein und vor allem von Anwohnern von Windenergieanlagen bewertet?
- Lassen sich daraus Empfehlungen im Hinblick auf die erforderlichen Abstände zwischen Windenergieanlagen und sensiblen Orten ableiten?

Anfang des Jahres 2015 wurde eine Metastudie veröffentlicht, in der auf diese Fragen eingegangen wird (Hübner & Pohl 2015). Im Mittelpunkt der Auswertung standen vier Studien zur Akzeptanz und zu den Stresswirkungen von Windenergieanlagen, die von den Autoren an mehr als 20 Standorten im Flachland sowie in Hügel- und Gebirgslandschaften im Zeitraum 2010 bis 2014 durchgeführt wurden. In allen Studien wurden für alle Befragten die Wohnabstände zu den nächsten Windenergieanlagen sowie verschiedene Akzeptanz- und Stressindikatoren vergleichbar erfasst.

In allen vier Studien war die durchschnittliche Bewertung durch die befragten Anwohner sowohl für die Windenergie allgemein als auch die lokalen Anlagen positiv. Es gibt zwar Unterschiede in den Ausprägungen zwischen den Studien, die von gering bis mittelstark positiv reichen und die lokalen Windenergieanlagen werden etwas weniger positiv bewertet als Windenergieanlagen im Allgemeinen, aber in keinem Fall liegen die durchschnittlichen Einstellungen im negativen Bereich. Eine weitere Analyse der Daten zeigt einen engen Zusammenhang zwischen den Einstellungen zur Windenergie allgemein und den lokalen Windenergieanlagen: Wer zur Windenergie allgemein positiv eingestellt ist, ist dies auch eher gegenüber den Anlagen vor Ort. Der immer wieder zu hörende Vorwurf, Anwohner würden nur die Windenergie allgemein befürworten, aber nicht in ihrem Ort ist damit widerlegt - zumindest im Fall bereits installierter Anlagen.

Eine starke Übereinstimmung in den Ergebnissen der vier Studien gibt es auch in Bezug auf die Fragen nach gesundheitlichen Beeinträchtigungen und Belästigungen durch Windenergieanlagen in der Nachbarschaft. Diese wurden von den Befragten in allen Studien als nicht vorhanden bis gering bewertet. In keiner Studie konnte ein Zusammenhang zwischen dem Abstand und der generellen Beeinträchtigung durch Windenergieanlagen festgestellt werden. Die Autoren verweisen darauf, dass dieses Ergebnis durch eine aktuelle Studie aus den USA (Magari et al. 2014) bestätigt würde.

Die Bewertungen konkret benannter Belästigungen, die von Windenergieanlagen ausgehen können, durch die Anwohner ergibt in drei der vier Studien, die direkt vergleichbar sind, die in Tabelle 6.1 aufgeführten Werte. Nach der durchschnittlichen Einschätzung der Anwohner gehen von Windenergieanlagen keine starken Belästigungen aus. Relativ am stärksten fühlten sich die Anwohner durch die von Windenergieanlagen verursachten Geräusche und die Veränderungen des Landschaftsbildes belästigt. Aber auch hier liegen die Mittelwerte im Bereich zwischen 'gering' und 'mittel'.

Bei einer differenzierten Analyse für die verschiedenen Belästigungen fand sich kein statistisch bedeutsamer Zusammenhang zwischen dem Abstand und der Wirkung. In keiner der

vier Studien zeigte sich ein Abstandswert, ab dem mindestens eine Belästigung deutlich und stabil niedriger bewertet wurde als bei kleineren Abständen.

Tabelle 6.1

Bewertung der Belästigungen durch Windenergieanlagen bzw. beeinträchtigte Schutzgüter (nach Hübner & Pohl 2015, Skala von 0: 'gar nicht' bis 4: 'sehr')

Belästigungen bzw. Beeinträchtigungen von Schutzgütern	Bewertungen
Geräusche	1,3 bis 1,8
Drehbewegung	0,6 bis 1,2
Rotorschatten	0,3 bis 1,3
Rotor-Lichtreflektionen	0,2 bis 1,0
Hinderniskennzeichnung Tag	0,3 bis 1,0
Hinderniskennzeichnung Nacht	1,0 bis 1,3
Landschaftsbild	0,7 bis 2,0

Es war schon aus früheren Studien bekannt, dass Personen, die Sicht auf eine oder mehrere Windenergieanlagen haben, sich stärker durch deren Geräusche belästigt fühlen als Personen, die die Anlagen nicht sehen. Dies zeigte sich auch in den der Metastudie zugrundeliegenden Untersuchungen. Auch dieser Effekt ist unabhängig vom Abstand. Je mehr Anlagen gesehen werden konnten, desto stärker wurde die Geräuschbelästigung wahrgenommen.

Die zitierten Befunde zeigen, dass Windenergieanlagen von den Anwohnern mehrheitlich als keine starke Belästigung empfunden werden. In den Studien wurde aber auch deutlich, dass es Anwohner gibt, die sich durch Windenergieanlagen in ihrer Nachbarschaft stark belästigt fühlen, vor allem durch die von ihnen ausgehenden Geräusche. Ihr Anteil variiert in den vier Studien zwischen 6 und 18 Prozent. Der Anteil derer, die sich stark belästigt fühlen, ist aber ebenfalls unabhängig vom Abstand. Die Belästigung nimmt nicht, wie man erwarten würde, mit dem Abstand ab. Das heißt, dass es auch nicht möglich ist, einen Abstand zu Windenergieanlagen anzugeben, ab dem in jedem Fall ausgeschlossen werden kann, dass sich Anwohner belästigt fühlen.

Ob sich Personen durch Windenergieanlagen oder Windparks belästigt fühlen, hängt den Studien zufolge stark von anderen Faktoren ab: Personen, die sich stark belästigt fühlten, hatten häufiger Sicht auf die Anlagen oder hatten sich in der Planungsphase häufiger gegen die Windenergieanlagen engagiert und dabei negative Erfahrungen gemacht. Wer dagegen den Planungs- und Bauprozess positiv erlebte, akzeptierte die Windenergieanlage(n) eher und fühlte sich durch deren Immissionen weniger oder gar nicht belästigt. Die Autoren schließen aus ihren Befunden, dass es nicht ausreicht, Anwohner durch Information überzeugen zu wollen, sondern dass eine frühzeitige Beteiligung mit realem Gestaltungsspielraum notwendig ist, um Akzeptanz zu schaffen.

Literatur

- AEE (Agentur für Erneuerbare Energien) 2012: Vermiedene Treibhausgasemissionen durch Erneuerbare Energien 2012 [<http://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/vermiedene-treibhausgasemissionen-durch-erneuerbare-energien-2012>; letzter Zugriff: 25.04.2015]
- AG DLR/IFEU/WI /Arbeitsgemeinschaft Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Wuppertal-Institut) 2004: Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal
- Baerwald E.F., D'Amours G.H., Klug B.J. & Barclay R.M.R. 2008: Barotrauma is a significant cause of bat fatalities at wind turbines. *Current Biology* 18 (16): R695-696
- Bay LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) 2013: Schattenwurf von Windkraftanlagen: Erläuterung zur Simulation. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg
- Betke 2005: Persönliche Mitteilung von Prof. Klaus Betke, Institut für Technische und Angewandte Physik, Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg (ITAP) an J. Jakobsen (Jakobsen 2005)
- Betke K., Schults von Glahn M. & Goos O. 1996: Messung der Infraschallabstrahlung von Windkraftanlagen. *Proc. DEWEK* 1996 p. 207-210
- Betke K. & Remmers H. 1998: Messung und Bewertung von tieffrequentem Schall. *Proc. DAGA* 1998
- BfN (Bundesamt für Naturschutz, Hrsg.) 2000: Empfehlungen des Bundesamtes für Naturschutz zu naturschutzverträglichen Windkraftanlagen. Landwirtschaftsverlag, Münster
- BMU & BfN (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit & Bundesamt für Naturschutz; Hrsg.) 2012: Naturbewusstsein 2011. Bevölkerungsumfrage zu Natur und biologischer Vielfalt. BMU, Berlin
- Evans T., Cooper J. & Lenchine V. 2013. Infrasound levels near windfarms and in other environments. Report. Environment Protection Authority South Australia
- Hötter H., Thomsen K.-M. & Köster H. 2005: Auswirkungen regenerativer Energiegewinnung auf die biologische Vielfalt am Beispiel der Vögel und der Fledermäuse. BfN-Skripten 142
- Hübner G. & Pohl J. 2015: Mehr Abstand – mehr Akzeptanz? Ein umweltpsychologischer Studienvergleich. Fachagentur Wind an Land (Hrsg.), Berlin
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2014: Climate Change 2014. Synthesis Report. Summary for Policymakers
- Jakobsen J. 2005: Infrasound emission from wind turbines. *J. Low Freq. Noise, Vibration and Active Control* 24 (3): 145-155
- Klug H. 2002: ,Infraschall von Windkraftanlagen: Realität oder Mythos? *DEWI Magazin* 20, February 2002
- Knopper L.D. & Olsson C.A. 2011: Health effects and wind turbines: A review of the literature. *Environmental Health* 10: 78
- Korner-Nievergelt F., Brinkmann R., Niermann I. & Behr O. 2013: Estimating bat and bird mortality occurring at wind energy turbines from covariates and carcass searches using mixture models. *Plos One* 8: e67997
- Krahé D., Schreckenberger D., Ebner F., Eulitz C. & Möhler U. 2014: Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. UBA Texte 20/2014. UBA, Dessau-Roßlau

- LAI (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz) 2002: Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immissionen von Windenergieanlagen (WEA-Schattenwurf-Hinweise). Verabschiedet auf der 103. Sitzung des LAI, 06.08.2002
- Lehnert L.S., Kramer-Schadt S., Schönborn S., Lindecke O., Niermann I. & Voigt C.C. 2014: Wind farm facilities in Germany kill noctule bats from near and far. *PLoS One* 9 (8): e103106
- LUA-NRW (Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen o.J.: Sachinformationen zu Geräuschemissionen und -immissionen von Windenergieanlagen
- LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg) 2013: Windenergie und Infraschall. Tieffrequente Geräusche durch Windenergieanlagen. LUBW, Karlsruhe
- LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg) 2016: Tieffrequente Geräusche inkl. Infraschall von Windkraftanlagen und anderen Quellen. LUBW, Karlsruhe
- LUGV BB (Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg) 2014a: Informationen über Einflüsse der Windenergienutzung auf Vögel. (Stand 19.11.2014)
- LUGV BB (Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg) 2014b: Auswirkungen von Windenergieanlagen auf Fledermäuse [<http://www.lugv.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.312579.de>; letzter Zugriff: 25.04.2015]
- Magari S.R., Smith C.E., Schiff R. & Rohr A.C. 2014: Evaluation of community response to wind turbine-related noise in western New York State. *Noise & Health* 16: 228-239
- Malsch A.K.F. & Hornberg C. 2007: Infraschall und tieffrequenter Schall – ein Thema für den umweltbezogenen Gesundheitsschutz in Deutschland? Mitteilung der Kommission 'Methoden und Qualitätssicherung in der Umweltmedizin'. Bundesgesundheitsbl. Gesundheitsforsch. Gesundheitsschutz 50: 1582–1589
- Menzel C. 2001: Mehr Hasen gezählt. Wildtiere lassen sich durch Windturbinen nicht stören. *Neue Energie* 4/2001: 24-25
- Miedema H.M.E. & Vos H. 1999: Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transportation noise. *J. Acoust. Soc. Amer.* 105 (6): 3336–3344.
- Møller H. & Pedersen C.S. 2011: Low-frequency noise from large wind turbines. *J. Acoust. Soc. Am.* 129: 3727
- MUGV BB (Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg) 2012: Tierökologische Abstandskriterien für die Errichtung von Windenergieanlagen in Brandenburg (TAK), Stand 15.10.2012. Anlage 1 zum Erlass des Ministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz vom 01. Januar 2011: Beachtung naturschutzfachlicher Belange bei der Ausweisung von Windeignungsgebieten und bei der Genehmigung von Windenergieanlagen
- Neddermann B. 2009: Immissionsschutz und wirtschaftliche Aspekte. Fachkonferenz 'Repowering von Windenergieanlagen'. Bremen, 11.-12.06. 2009
- Neitzke H.-P., Capelle J.v., Depner K., Edeler K. & Hanisch T. 1994: Risiko Elektromog. Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf Gesundheit und Umwelt. Birkhäuser, Basel
- Neitzke H.-P. 2010: Elektrische und magnetische Felder an Hochspannungstrassen: Gesundheitliche Risiken. *EMF-Monitor* 16 (3): 2-7
- Neitzke H.-P. & Voigt H. 2012: Übertragung elektrischer Energie: Technische Möglichkeiten und Risiken für Mensch und Umwelt. *EMF-Monitor* 18 (1+2): 1-16

- Pohl J., Faul F. & Mausfeld R. 1999: Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergieanlagen. Studie im Auftrag der Länder Schleswig Kolstein, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Bayern
- Schmidt J.H. & Klokke M 2014: Health effects related to wind turbine noise exposure: A systematic review. PLoS ONE 9(12): e114183. doi:10.1371/journal.pone.0114183
- Schmitt M., Beckmann G., Bergmann E. & Dosch F. 2006: Flächeninanspruchnahme privilegiert zulässiger Vorhaben im Außenbereich. BBSR, Bonn
[http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumentwicklung/EnergieKlimaschutzpolitik/Projekte/Archiv/Flaecheninanspruchnahme/Bericht.pdf;jsessionid=6E2B3557E9F88791786E5D9FFC429B7D.live1041?__blob=publicationFile&v=1; letzter Zugriff: 25.04.2015]
- Seidel H.-J. & Bittinghofer P.M. 1997: Checkliste Arbeits- und Betriebsmedizin. Thieme, Stuttgart, New York: 306
- Shepherd K.P. & Hubbard H.H. 1991: Physical characteristics and perception of low frequency noise from wind turbines. Noise Control Engin. J. 36(1): 5-5
- Siegmann S. & Nigmann U. 2007: Biologische Wirkungen von tieffrequentem Schall/ Infraschall. Prakt. Arb.med. 9: 20-22
- Snow D.J. 1997: Low frequency noise and vibrations measurement at a modern Wind Farm. Report prepared for ETSU, Dept. of Trade and Industry, Report no. ETSU W/13/00392/REP
- SRU (Rat von Sachverständigen für Umweltfragen) 1999: Umwelt und Gesundheit. Risiken richtig einschätzen. Sondergutachten. Deutscher Bundestag, Drucksache 14/2300
- SRU (Rat von Sachverständigen für Umweltfragen) 2011: Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung. Sondergutachten
- Thorne B. 2014: Propagation thresholds and measurement of infrasound to establish separation distances from wind farm turbines to residences. Inter.noise, Melbourne 16.-19. November 2014
- Twardella D. 2013: Bedeutung des Ausbaus der Windenergie für die menschliche Gesundheit. UMID 3: 14-19
- UBA (Umweltbundesamt; Hrsg.) 2013: Potenzial der Windenergie an Land. Studie zur Ermittlung des bundesweiten Flächen- und Leistungspotenzials der Windenergienutzung an Land. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- WHO (World Health Organization) 2009: Night noise guidelines for Europe. WHO Regional Office for Europe

Anhang

Schall: Eigenschaften, technische Größen und Einheiten

Hörbarer Schall und Infraschall

Rotierende oder schwingende Bauteile erzeugen Vibrationen, die wiederum zu Luftdruckschwankungen führen. Das heißt, dass der Luftdruck im Takt mit den Vibrationen zwischen hohen und niedrigen Werten variiert. Luftdruckschwankungen, die sich im Raum ausbreiten, werden als Schallwellen bezeichnet. Diese werden durch zwei Größen charakterisiert: die Frequenz (oder Wellenlänge) und die Schalldruck (oder Schalldruckpegel).

Frequenzen von Schallwellen

Die **Frequenz** gibt an, wie oft pro Sekunde der Luftdruck zwischen Maximal- und Minimalwert schwankt. Die Frequenz wird in der Einheit Hertz (Hz) gemessen. In einer Schallwelle mit der Frequenz 1000 Hz wechselt der Druck 1000 mal pro Sekunde vom Maximal zum Minimalwert. Schallwellen mit Frequenzen zwischen etwa 20 und 20.000 Hz können vom Menschen mit dem Gehörsinn wahrgenommen werden. Schallwellen mit hohen Frequenzen werden als hohe Töne, solche mit niedrigen Frequenzen als tiefe Töne ('Brummen') empfunden. Schall mit Frequenz über 20.000 Hz wird als **Ultraschall**, solcher mit Frequenzen unter 20 Hz wird als **Infraschall** bezeichnet. Manchmal werden Schallwellen auch erst ab einer Grenze von 16 Hz als Infraschall bezeichnet. Von tieffrequentem Schall wird gesprochen, wenn die vorherrschenden Schallenergieanteile Frequenzen unter 90 Hz haben.

Direkt mit der Frequenz hängt die **Wellenlänge** zusammen. Schallwellen mit einer hohen Frequenz haben eine kleine Wellenlänge, das heißt, wenn man den Luftdruck entlang der Ausbreitungsrichtung des Schalls misst, ist der Abstand zwischen einem Ort, an dem der Luftdruck maximal ist, und dem nächsten, an dem er minimal ist, klein. Bei Schallwellen mit niedriger Frequenz ist die Wellenlänge groß.

Stärke von Schallwellen und -quellen

Der **Schalldruck** ist ein Maß für die Stärke einer Schallwelle. Er gibt an, wie stark der Luftdruck in der Schallwelle schwankt. Statt den Schalldruck direkt in der Druckeinheit Pascal (Pa) anzugeben, wird zur Angabe der Stärke von Schallwellen üblicherweise der **Schalldruckpegel** in der Hilfseinheit Dezibel (dB) verwendet. Der zu einem Schalldruck p gehörende Schalldruckpegel L_p wird berechnet, indem p (genaugenommen der Effektivwert des Schalldrucks) zuerst zu einem Bezugswert p_0 ins Verhältnis gesetzt wird. Für p_0 wurde Anfang des 20. Jahrhunderts der Wert 20 Millionstel Pascal (20 μ Pa) festgesetzt, weil man seinerzeit davon ausging, dass dieser Schalldruck der Hörschwelle des menschlichen Gehörs bei der Frequenz 1000 Hz entspricht. Auch als sich später zeigte, dass der tatsächliche Wert etwas höher liegt, wurde der Bezugswert beibehalten. Um den Schalldruckpegel zu berechnen, nimmt man dann den Logarithmus zur Basis 10 des Verhältnisses p/p_0 und multipliziert das Ergebnis mit der Zahl 20:

$$L_p = 20 \cdot \log_{10}(p/p_0)$$

Weil Dezibel eine logarithmische Einheit ist, können Schalldruckpegel verschiedener Quellen nicht einfach addiert werden. Zwei Schallquellen mit jeweils einem Schalldruckpegel von 45 dB ergeben zusammen nicht einen Gesamtschalldruckpegel von 90 dB sondern nur von 48 dB. Eine Verdopplung gleicher Schallquellen führt zu einer Erhöhung des Gesamtschalldruckpegels um 3 dB.

In Tabelle A.1 sind für einige Schallquellen die jeweiligen Schalldruckpegel angegeben.

Tabelle A.1

Beispiele für Schallquellen und von ihnen verursachte Schalldruckpegel

Schallquelle / -ursache	Schalldruckpegel [dB]
leises Blätterrauschen	25
Flüstern	30
üblicher Hintergrundschall im Haus	30-50
Brummen Kühlschranks, leise Radiomusik	40
Ventilatoren von Kopierern und Computern	40-50
normale Sprachlautstärke	60
vorbeifahrender Pkw in 15 m Abstand	60-70
Rasenmäher	70-80
Pkw mit 50 km/h in 1 m Abstand	80
mittlerer Straßenverkehr	85
Lkw-Motor in 5 m Abstand, Pkw mit 100 km/h in 1 m Abstand	90
Schwerlastverkehr	95
Diskotheek, Presslufthammer, Kreissäge	110-115
Propellerflugzeug in 7 m Abstand	110
startender Düsenjet	125-130
Düsenjäger in 7 m Abstand, Walkman Maximalbelastung	130
Schmerzgrenze (Gehörschädigung auch bei kurzzeitiger Einwirkung möglich)	über 130

Die von einer Schallquelle abgestrahlte **Schalleistung** wird durch den **Schalleistungspegel** angegeben. Diese Größe charakterisiert die Schallquelle und ist ortsunabhängig. Sie wird ebenfalls in der Hilfseinheit Dezibel angegeben. Der Schalleistungspegel wird nicht direkt gemessen, sondern aus dem gemessenen Schalldruckpegel L_p und der Größe der Hüllfläche S , die zu der Bezugsfläche $S_0 = 1 \text{ m}^2$ ins Verhältnis gesetzt wird, nach der folgenden Formel berechnet:

$$L_w = L_p + 10 \cdot \log_{10}(S/S_0)$$

Die Bezugsfläche entspricht der Fläche einer Kugel mit einem Radius von 28,2 cm um die als punktförmig angenommene Schallquelle. In diesem Abstand ist der Schalleistungspegel genauso groß wie der Schalldruckpegel

Ausbreitung von Schall

Schall breitet sich in Luft bei 20 °C mit einer Geschwindigkeit von 343 m/s bzw. 1235 km/Std aus. Wenn die Schallquelle im Vergleich zur Wellenlänge des Schalls klein ist und sich der Schall nach allen Seiten ungestört ausbreiten kann, so tut er das in Form einer Kugelwelle.

Mit zunehmender Entfernung muss sich die von der Schallquelle abgestrahlte Schallleistung auf immer größer werdende Kugelflächen verteilen. Die Oberfläche einer Kugel nimmt mit dem Abstand zum Zentrum quadratisch zu, entsprechend nimmt die Schallleistung ab. Das heißt, dass die Leistung bei einer Verdopplung des Abstandes von einer Schallquelle nur noch ein Viertel ihres Ausgangswertes erreicht. Dieser rein geometrische Effekt führt dazu, dass der Schalldruckpegel pro Entfernungsverdopplung um 6 dB abnimmt. Allgemein kann der Schalldruckpegel L_2 in einem Abstand r_2 von einer Schallquelle aus dem Schalldruckpegel L_1 beim Abstand r_1 nach der folgenden Formel berechnet werden:

$$L_2 = L_1 - 20 \cdot \log_{10} (r_2 / r_1)$$

Die Ausbreitung des Schalls wird zusätzlich durch das Medium beeinflusst, in dem er sich ausbreitet. Außerdem können sich die Oberfläche, über der sich eine Schallwelle ausbreitet, und Objekte, auf die eine Schallwelle trifft, auf deren Intensität auswirken. Reflektionen und Beugung von Schallwellen an Objekte können auch dazu führen, dass Bereiche 'beschallt' werden, die nicht in direkter Linie zu den Schallquellen liegen.

Bei Infraschall sind die Wellenlängen sehr groß (bei 20 Hz 17 m, bei 2 Hz 170 m). Aufgrund der großen Wellenlängen hat Infraschall andere Ausbreitungseigenschaften als hörbarer Schall. Der Schalldruckpegel nimmt zwar entsprechend der oben beschriebenen geometrischen Gesetzmäßigkeiten mit dem Abstand ab (6 dB pro Entfernungsverdopplung), aber anders als hörbarer Schall, der bei seiner Ausbreitung durch die Luft gedämpft wird, spielt die Ausbreitungsdämpfung bei Infraschall praktisch keine Rolle. Auch natürliche und künstliche Hindernisse, wie Bodenwellen, Vegetation oder Schutzwälle, und Bauteile tragen kaum zur Dämpfung von Infraschall bei.

Wahrnehmung von Schall

Wie laut ein Ton empfunden wird, hängt nicht nur von der Intensität der Schallwelle, sondern auch von den in ihr vorkommenden Frequenzen ab, weil das menschliche Ohr nicht für alle Frequenzen gleich empfindlich ist. Am größten ist die Empfindlichkeit im Bereich von 1000 bis 5000 Hz (s. Abb. A.1). Der Frequenzbereich, in dem Schall gehört werden kann, und die Empfindlichkeit sind allerdings nicht bei allen Menschen gleich. So nimmt das Vermögen, hohe Frequenzen zu hören, mit dem Alter ab.

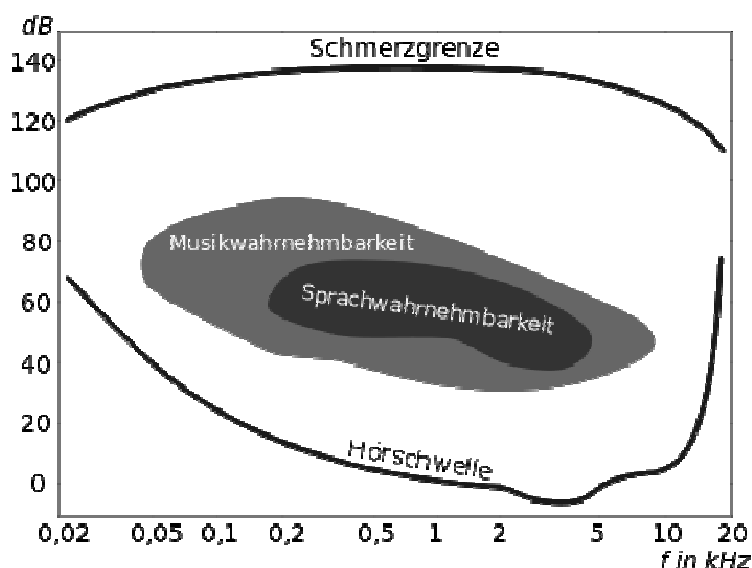


Abbildung A.1

Hörfläche des Menschen (Quelle: Tehdog via Wikimedia Commons)

Die unterschiedliche Empfindlichkeit des menschlichen Ohres für Schall verschiedener Frequenzen wird bei Schallmessungen berücksichtigt, indem mit Frequenzfiltern eine gehöranaloge Gewichtung vorgenommen wird. Im normalen Hörbereich wird in der Regel ein A-Filter benutzt. Der so ermittelte Geräuschpegel, der A-bewertete Schalldruckpegel, wird in der Einheit dB(A) angegeben. Bei Messungen tiefer Frequenzen kommt ein C-Filter zum Einsatz, der Geräuschpegel wird in der Einheit dB(C) angegeben. Ein G-Filter wird eingesetzt, wenn es vor allem darum geht, niederfrequente Geräusche im Bereich 0 bis 120 Hz zu erfassen und zu bewerten. Der Bereich unter 16 Hz wird dabei deutlich gedämpft erfasst.

Infraschall, also Schallwellen mit Frequenzen unter 20 Hz, kann vom menschlichen Ohr nicht im eigentlichen Sinne gehört werden. Luftdruckschwankungen bei solch niedrigen Frequenzen werden mit dem ganzen Körper als Pulsationen und Vibrationen wahrgenommen, in den Ohren verursachen sie ein Druckgefühl. Luftdruckschwankungen können vom Menschen bis hinunter zu einer Frequenz von etwa 1 Hz 'gefühlt' werden, aber je niedriger die Frequenz ist, desto höher muss der Schalldruckpegel sein, damit die Luftdruckschwankung wahrgenommen werden kann. Während bei einer Frequenz von 100 Hz die Hörschwelle bei gut 20 dB liegt (s. Abb. A.1), ist Infraschall mit einer Frequenz von 16 Hz erst ab einem Schalldruckpegel von knapp 80 dB wahrnehmbar. Bei einer Frequenz von 3 Hz ist sogar ein Schalldruckpegel von 120 dB erforderlich.