



HINTERGRUND // MAI 2019

# Technische Maßnahmen zur Minderung akzeptanzhemmender Faktoren der Windenergienutzung an Land

Für Mensch & Umwelt

Umwelt   
Bundesamt

# Impressum

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt  
Fachgebiet V 1.3  
Postfach 14 06  
06813 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
buergerservice@uba.de  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

**Autorinnen und Autoren:**

Manuel Rudolph, Marie-Luise Plappert, Carla Vollmer

**Redaktion:**

Carla Vollmer und Marie-Luise Plappert

**Satz und Layout:**

Atelier Hauer+Dörfler GmbH

**Publikationen als pdf:**

[www.umweltbundesamt.de/publikationen](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen)

**Bildquellen:**

Shutterstock

Stand: Mai 2019

ISSN 2363-829X

**HINTERGRUND // MAI 2019**

# **Technische Maßnahmen zur Minderung akzeptanzhemmender Faktoren der Windenergienutzung an Land**



# Inhalt

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>2 Technische Optionen und Auflagen zur Minderung negativer Auswirkungen</b> .....	<b>7</b>
2.1 Geräuschemissionen und -immissionen .....	7
2.2 Schattenwurf .....	11
2.3 Lichtemissionen durch Hinderniskennzeichnung .....	12
2.4 Lichtemission in Form des Stroboskopeffektes .....	14
2.5 Eiswurf .....	14
2.6 Artenschutz .....	16
<b>3 Fazit und Ausblick</b> .....	<b>20</b>
<b>4 Literatur</b> .....	<b>22</b>

## 1 Einleitung

Die Notwendigkeit des Ausbaus der erneuerbaren Energien wird von der überwiegenden Mehrheit der deutschen Bevölkerung anerkannt. Nach einer Umfrage vom Juli 2017 halten 95 % der Deutschen eine stärkere Nutzung und Ausbau regenerativer Energieträger für wichtig bis außerordentlich wichtig. Die Zustimmung zu Windenergieanlagen in der Umgebung des eigenen Wohnortes ist der gleichen Umfrage zufolge mit 57 % gegenüber dieser grundsätzlichen Zustimmung deutlich geringer. Unter den Befragten, welche bereits über Erfahrung mit Windenergieanlagen in der Nachbarschaft verfügen, sprachen sich 69 % zustimmend gegenüber der Windenergienutzung aus [31].

Da die Nutzung der Windenergie an Land jedoch aufgrund des hohen Treibhausgasminderungspotenzials, niedriger Stromgestehungskosten und geringer Flächeninanspruchnahme eine der tragenden Säulen der Energiewende darstellt, ist ein stetiger Zubau installierter Kapazität auch im Hinblick auf die zu erreichenden Klimaschutzziele dringend geboten. Gleichzeitig lehnen Teile der Bevölkerung diesen Ausbau ab. Die Steigerung der öffentlichen

Akzeptanz gegenüber Windenergieanlagen spielt daher eine entscheidende Rolle für das Gelingen der Energiewende.

Eine Option zur Akzeptanzsteigerung liegt in der Minderung negativer Auswirkungen von Windenergieanlagen auf Mensch und Umwelt. Der Fokus des vorliegenden Papiers liegt auf dem aktuellen Stand hinsichtlich technischer Möglichkeiten, rechtlicher Vorschriften und verfügbarer Optimierungspotenziale zur Minimierung solcher Auswirkungen. Dabei stehen neben technischen Maßnahmen zur Vermeidung oder Reduzierung von Auswirkungen in der Regel weitere Möglichkeiten zur Verfügung, die hier jedoch explizit nicht betrachtet werden. Das Papier soll einerseits Informationen für an der Windenergienutzung interessierte Leserinnen und Leser bereitstellen, andererseits aber auch dazu beitragen, Fehlinformationen bezüglich dieser Form der Stromerzeugung richtigzustellen. Einen Beitrag zu darüber hinausgehenden akzeptanzfördernden Maßnahmen kann es somit nicht leisten. So bleiben zahlreiche weitere für die Akzeptanz wesentliche Faktoren, wie beispielsweise die landschaftsästhetische Wahrnehmung von Windenergieanlagen, außer Betracht.



## 2 Technische Optionen und Auflagen zur Minderung negativer Auswirkungen

### 2.1 Geräuschemissionen und -immissionen

Die von Windenergieanlagen (WEA) ausgehenden Geräuschemissionen werden in Teilen der Bevölkerung als maßgeblicher Belästigungsfaktor wahrgenommen und tragen somit erheblich zu Akzeptanzproblemen gegenüber der Windenergienutzung bei [5], [9], [11]. Im Folgenden sollen daher die rechtlichen Vorgaben sowie die technischen Möglichkeiten zum Schutz der Anwohner vor erheblichen Geräuschbelästigungen dargestellt werden.

#### 2.1.1 Rechtlicher Rahmen

Windenergieanlagen sind Anlagen im Sinne von § 3 Abs. 5 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG). Damit unterliegen sie den immissionsschutzrechtlichen Anforderungen. Bei genehmigungsbedürftigen Anlagen richten sich die Anforderungen nach § 5 BImSchG (Betreiberpflichten). Sind die Windenergieanlagen höher als 50 Meter, fallen sie unter der Nr. 1.6 des Anhangs zur 4. BImSchV [39] und bedürfen einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung gemäß § 4 BImSchG.

Die Beurteilung, ob schädliche Umweltauswirkungen in Form von erheblichen Belästigungen durch Geräuschemissionen zu befürchten sind, erfolgt auf Grundlage der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) [1]. Die TA Lärm legt unter anderem Richtwerte für die Schallpegel an Immissionsorten in Abhängigkeit der Art der baulichen Nutzung sowie der Tageszeit fest (Tabelle 1). Diese Werte werden als Beurteilungspegel für den Tag und für die Nacht (Lr,Tag und Lr,Nacht) angegeben.

Die Einhaltung der Immissionsrichtwerte wird im Rahmen des Genehmigungsverfahrens nach BImSchG für den jeweiligen Einzelfall geprüft.

Tab. 1

#### Immissionsrichtwerte in dB(A) gemäß TA Lärm [1]

Gebietsart	Lr, Tag	Lr, Nacht
Industriegebiete	70	70
Gewerbegebiete	65	50
Urbane Gebiete	63	45
Kern-, Dorf- und Mischgebiete	60	45
Allgemeine Wohngebiete, Kleinsiedlungsgebiete	55	40
Reine Wohngebiete	50	35
Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten	45	35

Quelle: TA Lärm

Die Beurteilung der Lärmbelastung erfolgt unter Berücksichtigung der gegebenenfalls bereits vorhandenen Vorbelastung: Das ist die Belastung eines Ortes, auf den die Geräuschemissionen von allen Anlagen einwirken, für die die TA Lärm gilt, ohne den Immissionsbeitrag der zu beurteilenden Anlage zu berücksichtigen. Es werden also auch andere Windenergieanlagen oder andere Anlagen nach TA Lärm, wie beispielsweise Biogasanlagen, in die Vorbelastung einbezogen. Im Rahmen einer Immissionsprognose werden die zu erwartenden Beurteilungspegel für den jeweiligen Immissionsort berechnet und die Einhaltung der Richtwerte nachgewiesen. Unsicherheiten der Prognose sowie der zugrunde liegenden schalltechnischen Vermessungen des jeweiligen WEA-Typs werden dabei durch Sicherheitsaufschläge auf die Schallpegel berücksichtigt. Detaillierte Hinweise zur Durchführung der Schallimmissionsprognose bei Genehmigungsverfahren von WEA wurden durch die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI) erarbeitet und zuletzt im Juni 2016 aktualisiert (LAI-Hinweise) [32].

Die aktualisierte Fassung enthält neue Empfehlungen zum Prognoseverfahren, welche der Schallausbreitung moderner WEA besser gerecht werden.

### 2.1.2 Technische Optionen zur Reduzierung der Schallemissionen

Die von Windenergieanlagen ausgehenden Geräusche lassen sich in mechanische Geräusche und aerodynamische Geräusche unterteilen. Während erstere vor allem durch das Getriebe im Maschinenhaus erzeugt werden, entstehen letztere durch die Strömungsvorgänge der Luft an den Rotorblättern [2].

#### Minderung mechanischer Geräusche

Getriebeinduzierte Geräusche lassen sich heute bereits durch geräuschkindernde Auslegung sowie die Auskleidung des Maschinenhauses mit schalldämmenden Materialien reduzieren. Durch den Einsatz elastischer Getriebelager kann zudem eine Übertragung der Schwingungen des Getriebes auf Maschinenhaus und Turm (sogenannter Körperschall) vermieden werden. Andernfalls können Turm und Maschinenhaus vergleichbar mit großen Resonanzkörpern schallverstärkend wirken [2]. Als maßgebliche Geräuschquelle verbleiben bei modernen WEA somit die aerodynamisch erzeugten Geräusche.

#### Minderung aerodynamischer Geräusche

Aerodynamische Geräusche entstehen vor allem an der Hinterkante der Rotorblätter als auch an deren Spitzen durch Strömungsabriss, das heißt durch Verwirbelung der Luftströmung. Der Schalleistungspegel steigt mit zunehmendem Rotordurchmesser und zunehmender Blattspitzengeschwindigkeit. Mit Hilfe folgender Maßnahmen können aerodynamische Geräusche gemindert werden:

##### ► Modifikation der Blatthinterkante

Der Schalleistungspegel lässt sich durch den Einsatz so genannter Serrations deutlich reduzieren. Dabei handelt es sich um gezackte Bauteile, welche an der Blatthinterkante angebracht werden und die Wirbelbildung und somit die Schallerzeugung vermindern. Serrations werden mittlerweile von den meisten Anlagenherstellern angeboten. Der Hersteller Nordex gibt die Minderung der Geräuschemission der WEA mit 1,5 dB(A) gegenüber vergleichbaren Anlagen ohne Serrations an [3].

##### ► Modifikation der Blattspitze

Durch den Einsatz so genannter Winglets können Wirbelbildungen und dadurch induzierte Geräuschemissionen an der Blattspitze vermindert werden. Das Rotorblatt wird dazu mit einer, in einem Winkel von bis zu 90° zum Rotorblatt gebogenen Spitze versehen. In der Luftfahrt werden Winglets bereits seit Jahrzehnten eingesetzt, bei Windenergieanlagen konnten sie sich aufgrund der aus dem zusätzlichen Gewicht resultierenden Nachteile bisher nicht bei allen Anlagenherstellern etablieren [8].

##### ► Modifikation des Blattprofils

Die Aerodynamik im hinteren Bereich des Rotorblattes<sup>1</sup> kann durch sogenannte Vortex-Generatoren verbessert werden. Dabei handelt es sich um kleine, dreieckige Bauteile auf der Rotorblattoberfläche in der Nähe der Blattwurzel, welche zu einer verbesserten laminaren Strömung auf der Oberseite beitragen und Strömungsabriss reduzieren sollen. Mit der so verbesserten Aerodynamik des Rotorblattes soll in erster Linie eine Steigerung des Energieertrages erzielt werden. Als positiver Nebeneffekt wird in der Literatur jedoch auch eine Reduzierung des Geräuschpegels beschrieben [33]. Vortex-Generatoren werden aufgrund ihrer ertragssteigernden Eigenschaften von einigen Herstellern beziehungsweise für einzelne Anlagenmodelle heute bereits standardmäßig eingesetzt [35], werden aber auch zur Nachrüstung an bestehenden Anlagen angeboten [30], [34].

##### ► Modifikation der Blattvorderkante

Eine weitere Schalloptimierung kann durch die Modifikation der Blattvorderkante erfolgen, so zum Beispiel durch sogenannte Tuberkel. Tuberkel sind kleine Höcker, die in der Natur beispielsweise an den Vorderflossen von Buckelwalen auftreten. Ihnen wird eine positive Beeinflussung der Umströmung der Flossen zugeschrieben. Künstliche Tuberkel an der Vorderkante von Rotorblättern erzeugen partielle Verwirbelungen der Strömung, wodurch ein abrupter Strömungsabriss vermieden werden soll. Daraus resultieren laut Hersteller sowohl eine Minderung der Schallemissionen als auch eine Reduzierung der Lasten, das heißt der auf Blatt und Antriebsstrang wirkenden Kräfte. Bestehende Anlagen können mit einem auf den jeweiligen Anlagentyp zugeschnittenen Bausatz nachgerüstet werden [29].

<sup>1</sup> Hinterer Bereich meint hier das erste Drittel des Rotorblattes, ausgehend von der Blattwurzel





Die beispielhaft genannten Modifikationsoptionen entsprechen – mit Ausnahme der Tuberkel-Technik – dem Stand der Technik und werden von den Anlagenherstellern je nach Rotorblattkonzept bereits standardmäßig eingesetzt (Vortex-Generatoren) oder mitunter als Zusatzoption (Serrations) angeboten. Eine zusätzliche Geräuschminderung wäre durch die beschriebenen Maßnahmen somit nur im Falle einer Nachrüstung von Altanlagen im Bestand erreichbar. Für Betreiber von Altanlagen dürfte der Nutzen einer solchen Nachrüstung (Serrations, Tuberkel) dem erforderlichen finanziellen Aufwand in der Regel jedoch unterliegen. Realistisch erscheint eine solche freiwillige Nachrüstung daher höchstens im Fall einer Erweiterung eines bestehenden Windparks, bei der die zusätzlichen Anlagen zu einer Überschreitung der Immissionsrichtwerte führen würden. In einem solchen Szenario könnten gegebenenfalls die Schallleistungspegel der Altanlagen durch Nachrüstungen der Rotorblätter soweit reduziert werden, dass die Immissionsrichtwerte trotz der Errichtung zusätzlicher WEA eingehalten werden können.

Zur Vermeidung unnötiger Geräusche sollten die WEA zudem regelmäßig gewartet werden und Schadensprävention (zum Beispiel Frühwarnsysteme) erfolgen.

### 2.1.3 Betriebstechnische Optionen zur Reduzierung der Geräuschemissionen

Insbesondere größere Windparks in Siedlungsnähe können potenziell zu Überschreitungen der Immissionsrichtwerte führen. Aufgrund der limitierten Flächenverfügbarkeit ist es in der Praxis mitunter nicht möglich, die sich aus den Anforderungen der TA Lärm ergebenden Abstände zur Wohnbebauung einzuhalten, ohne die Anzahl der geplanten Anlagen zu reduzieren. In diesen Fällen kann die Einhaltung der Immissionsrichtwerte (insbesondere der deutlich strengeren Richtwerte für die Nachtstunden) über geräuschreduzierte Betriebsmodi gewährleistet werden, welche von den meisten WEA-Herstellern angeboten werden. Durch Veränderung des Anstellwinkels der Rotorblätter lässt sich die Rotordrehzahl verringern, woraus eine Reduzierung der Geräuschemissionen resultiert. Infolgedessen wird die Nennleistung der WEA erst bei höheren Windgeschwindigkeiten erreicht, wodurch sich jedoch auch der Energieertrag der Anlage reduziert. Eine weitere Minderung ist durch Drosselung der maximalen Leistungsabgabe der WEA erreichbar.

Durch geräuschreduzierte Betriebsmodi lassen sich die Geräuschemissionen von WEA effektiv und deutlich mindern und damit die Anforderungen der TA Lärm einhalten. Die damit verbundenen Ertragsverluste wirken sich jedoch negativ auf die Wirtschaftlichkeit des Vorhabens aus.

### 2.1.4 Minderung der Amplitudenmodulation

Der Begriff Amplitudenmodulation bezeichnet kurzzeitig auftretende Geräuschspitzen, welche von Betroffenen unter anderem als pulsierendes Rauschen beschrieben werden [5]. Im Zusammenhang mit Windenergieanlagen wurde dieser akustische Effekt durch Tonaufzeichnungen betroffener Anwohner im Rahmen einer Studie von Pohl, Gabriel und Hübner (2014) identifiziert. Solche Geräuschspitzen können als „Aufmerksamkeitstrigger“ wirken und dadurch als störend wahrgenommen werden [5]. Dies ist scheinbar selbst dann der Fall, wenn der Immissionsrichtwert durch diesen Ausschlag nicht überschritten wird [7]. Um einer solchen Belästigung durch technologische Innovationen zu begegnen, sind zunächst weitergehende Untersuchungen zu Entstehung, Ausbreitung und Wirkung der Amplitudenmodulation erforderlich [6]. Einen Beitrag dazu lässt das UBA-Forschungsvorhaben *Geräuschwirkungen bei der Nutzung von Windenergie an Land* (2017–2020) erwarten.

**Fazit:** Hinsichtlich der Minderung der Geräuschemission durch Modifikation des Rotorblattes erscheinen derzeit Serrations als eine effektive und etablierte Option. Eine zusätzliche Geräuschminderung kann durch den Einsatz der neuartigen Tuberkel-Technik erwartet werden. Inwiefern sich diese bei den Anlagenherstellern etablieren kann, bleibt zunächst abzuwarten.

Geräuschmindernde Betriebsmodi stellen die effektivste Minderungsmaßnahme dar, sind jedoch in jedem Fall mit Ertragsverlusten und somit wirtschaftlichen Nachteilen für den Anlagenbetreiber verbunden.

### 2.1.5 Infraschallbelastung durch Windenergieanlagen

Als Infraschall werden Luftschallwellen im Frequenzbereich von 1 bis 20 Hertz (Hz) bezeichnet [41]. Tieffrequente Geräusche erstrecken sich nach der TA Lärm [1] auf den Frequenzbereich bis 90 Hz. Sie schließen also den Infraschallbereich bis 20 Hz mit ein, reichen aber noch deutlich darüber hinaus. Die Wahrnehmungsschwelle von tieffrequenten Gerä-

uschen, einschließlich Infraschall, variiert individuell sehr stark. Empfindliche Menschen können bereits eine akustische Wahrnehmung haben, wenn andere noch nichts hören. Obwohl unterhalb von 20 Hz eine Tonhöhenwahrnehmung physiologisch nicht gegeben ist, wird Infraschall mit hinreichender Intensität als Pulsation oder Druckgefühl wahrgenommen.

Bei der Interpretation von Infraschallmessergebnissen ist generell zu beachten, dass je tiefer die Frequenz ist, umso höher der Schalldruckpegel sein muss, um vom Menschen wahrgenommen zu werden. Bei den üblichen Abständen zwischen Windenergieanlagen und Wohnbebauung wird die Hör- und Wahrnehmungsschwelle nach dem Entwurf der DIN 45680 von 2013 [42] im Infraschallbereich nicht erreicht. Dies bestätigen auch umfangreiche Geräuschimmissionsmessungen an Windenergieanlagen in Baden-Württemberg [43]. Diese Messungen kamen unter anderem zu dem Ergebnis, dass die Infraschallbelastung in Entfernungen über 700 m kaum davon beeinflusst wird, ob eine Windenergieanlagen in Betrieb ist oder nicht [43]. Die Infraschallimmissionen gehen also im Hintergrundrauschen unter.

Bisher gibt es keine Evidenz dafür, dass gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Infraschallemissionen von Windenergieanlagen verursacht werden. So kommen van Kamp und van den Berg in ihrem Review von 2017 [44] zu dem Schluss, dass nach derzeitigem Stand der Wissenschaft kein eindeutiger Nachweis für gesundheitliche Effekte vorliegt, die durch Infraschall und tieffrequente Geräusche von Windenergieanlagen ausgelöst werden. Derzeit fehlen noch Langzeitstudien, die über chronische Effekte nach langjähriger niederschwelliger Infraschallbelastung Aufschluss geben könnten. Nach aktueller Studienlage liegen dem Umweltbundesamt keine Hinweise über chronische Schädigungen vor, die vor dem Hintergrund einer tragfähigen Wirkungshypothese in einen Zusammenhang mit einer Infraschallemission von Windenergieanlagen gebracht werden könnten. Im Hinblick auf akustische Effekte kann für die Infraschallbelastung durch Windenergieanlagen somit nach heutigem Stand der Forschung davon ausgegangen werden, dass diese im Vergleich mit anderen (natürlichen und anthropogenen) Quellen sehr gering sind, so dass es nach dem aktuellen Forschungsstand hierbei nicht zu negativen Auswirkungen auf die Gesundheit kommt.

## 2.2 Schattenwurf

Sofern die meteorologischen Voraussetzungen gegeben sind, können Windenergieanlagen periodischen Schattenwurf verursachen. Pohl, Faul und Mausfeld (1999) zeigen, dass Schattenwurfexposition von den betroffenen Anwohnern als belästigend wahrgenommen wird und zu beeinträchtigenden Auswirkungen auf deren Verhaltensweisen führen kann. Die Intensität der Wirkung steigt dabei mit zunehmender Beschattungsdauer [9]. Dieses Problem wurde bereits Anfang der 2000er Jahre durch Erarbeitung von Hinweisen für das Genehmigungsverfahren sowie die Entwicklung und Implementierung technischer Vermeidungsmaßnahmen gelöst, so dass Schattenwurf mittlerweile nicht mehr als relevanter akzeptanzhemmender Faktor in Erscheinung tritt.

### 2.2.1 Rechtlicher Rahmen

Zur Vermeidung einer erheblichen Belästigung durch Schattenwurf veröffentlichte der Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) im Jahr 2002 die *Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immissionen von Windenergieanlagen (WEA-Schattenwurf-Hinweise)*. Demnach soll die astronomisch

maximal mögliche Beschattungsdauer<sup>2</sup> je Immissionsort maximal 30 Minuten am Tag und maximal 30 Stunden im Jahr betragen. Die tatsächliche Beschattungsdauer darf darüber hinaus acht Stunden im Jahr nicht überschreiten [10]. Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens nach BImSchG werden daher Schattenwurfprognosen gefordert, welche die zu erwartende Beschattungsdauer je Immissionsort unter Berücksichtigung vorhandener Vorbelastung und Maßnahmen zur Einhaltung der Richtwerte darstellen.

### 2.2.2 Betriebstechnische Optionen zur Reduzierung des Schattenwurfes

Die Einhaltung dieser Richtwerte kann über die Integrierung einer Abschaltautomatik in der Windenergieanlage gewährleistet werden. In der Abschaltautomatik werden alle Immissionsorte, an denen eine Überschreitung der Richtwerte astronomisch möglich ist, hinterlegt. Sofern die tatsächlichen

<sup>2</sup> Rahmenparameter zur Berechnung der astronomisch maximal mögliche Beschattungsdauer im Sinne des LAI: wolkenloser Himmel von Sonnenaufgang bis -untergang, Rotor steht senkrecht zur Einstrahlung, Anlage ist in Betrieb



meteorologischen Verhältnisse nicht erfasst werden, erfolgt die Abschaltung sobald die Kontingente für die astronomisch maximal mögliche Beschattungsdauer für den jeweiligen Immissionsort aufgebraucht sind und Schattenwurf theoretisch möglich ist. Da das Auftreten periodischen Schattenwurfes in der Realität jedoch von meteorologische Faktoren (Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Bewölkung) abhängt, empfiehlt es sich, die Abschaltung entsprechend des tatsächlich auftretenden Schattenwurfes zu regeln. Die WEA kann dazu mit Sensoren ausgestattet werden, welche die meteorologischen Verhältnisse erfassen. Eine Abschaltung erfolgt somit nur dann, wenn tatsächlich Schattenwurf auftritt und die Kontingente (30 Minuten/Tag, 8 Stunden/Jahr) für den jeweiligen Immissionsort aufgebraucht sind.

### 2.3 Lichtemissionen durch Hinderniskennzeichnung

#### 2.3.1 Rechtlicher Rahmen

Windenergieanlagen mit einer Gesamthöhe von mehr als 100 m sind gemäß der Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrt-Hindernissen (AVV) als Hindernisse für den Luftverkehr zu kennzeichnen. Die AVV unterscheidet dabei zwischen Tages- und Nachtkennzeichnung. Die Tageskennzeichnung kann in Form farblicher Kennzeichnung (rote Streifen an Turm, Maschinenhaus und Rotorblattspitzen) oder einer Befuerung mittels weiß blitzenden Rundstrahlfeuers auf dem Maschinenhaus erfolgen. Zur Nachtkennzeichnung werden rot blinkende Feuer auf dem Maschinenhaus und zusätzlich ab einer Gesamtanlagenhöhe von 150 m konstant leuchtende Hindernisfeuer am Turm eingesetzt [12].

#### 2.3.2 Technische Optionen zur Reduzierung der Lichtemissionen

Kennzeichnungen dieser Art können von den betroffenen Anwohnern als störend empfunden werden und sich somit negativ auf die Akzeptanz der Windenergienutzung auswirken.

Folgende – gemäß AVV zulässige – technische Ansatzpunkte können die Belastung durch Hinderniskennzeichnung reduzieren und damit die Akzeptanz von WEA steigern:



- ▶ Bildung von WEA-Blöcken,
- ▶ Sichtweitenregulierte Befuerung,
- ▶ Synchronisierung der Blinkfolge,
- ▶ Einsatz von LED- statt Xenon-Lichtern bei der Tageskennzeichnung oder
- ▶ Bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung.

#### Bildung von WEA-Blöcken

Die AVV gestattet es, mehrere Windenergieanlagen innerhalb eines bestimmten Areals<sup>3</sup> zu fiktiven Blöcken zusammenzufassen. In diesen Fällen ist eine Hinderniskennzeichnung nur für die Peripherie der Blöcke, das heißt den äußeren Rand, nicht jedoch für die WEA innerhalb des Blocks erforderlich. Die Anzahl der blinkenden Befuerung kann somit insgesamt reduziert werden.

<sup>3</sup> Eine genaue Definition des Begriffs „Areal“ erfolgt in der AVV nicht

**Sichtweitenmessung**

Gemäß AVV darf die Lichtstärke von Tages- und Nachtkennzeichnung in Abhängigkeit der meteorologischen Sichtweite auf 30 % (bei Sichtweiten über 5 km) beziehungsweise auf 10 % (bei Sichtweiten über 10 km) der Nennlichtstärke reduziert werden. Die Sichtweite ist mittels eines Messgerätes zu ermitteln, welches in der Nähe des Maschinenhauses anzubringen ist. Eine Verpflichtung zum sichtweitenregulierten Betrieb der Hinderniskennzeichnung existiert derzeit nicht. An dieser Stelle besteht seitens der AVV somit regulatorisches Optimierungspotenzial. Grundsätzlich wird das Potenzial zur Akzeptanzsteigerung durch Sichtweitenregulierung (SWR) jedoch als gering betrachtet. So konnten auch Hübner und Pohl in ihren Untersuchungen zur Akzeptanz von Hinderniskennzeichnung von Windenergieanlagen (2010) keine statistisch bedeutsamen Unterschiede in Hinblick auf die Belästigung der Anwohner zwischen Windparks mit und ohne SWR identifizieren [11].

**Synchronisierung der Blinkfolge**

Besonders in Windparks mit einer Vielzahl unterschiedlicher Anlagen, die über einen längeren Zeitraum hin errichtet wurden, fehlt es häufig an einer Synchronisierung insbesondere der Nachtkennzeichnung. Das daraus resultierend zeitlich versetzte Blinken der Anlagen kann besonders belästigend wirken [11]. Die AVV (in der novellierten Fassung 2015) schreibt eine Synchronisierung der Befeuerung von WEA mittlerweile vor. In einer nachträglichen Synchronisierung älterer Bestandsparks kann ein Potenzial zur Akzeptanzsteigerung liegen. Es erscheint allerdings fraglich, inwiefern eine solche nachträgliche Maßnahme speziell in Windparks mit unterschiedlichen Betreiberstrukturen vor dem Hintergrund des damit verbundenen finanziellen und administrativen Aufwandes und des fehlenden rechtlichen Zwanges umsetzbar wäre.

**Verzicht auf Xenon-Licht bei der Tageskennzeichnung**

Der Einsatz von Xenonlicht als Tageskennzeichnung wirkt gegenüber LED-Lichtern oder einer rein farblichen Kennzeichnung deutlich belästigender [11]. Insofern kann die Akzeptanz gegenüber Windenergieanlagen durch den Verzicht auf Xenonlicht theoretisch verbessert werden. Da die Tageskennzeichnung im Vergleich zur Nachtkennzeichnung und anderen Faktoren (Landschaftsbild, Geräuschemission) grundsätzlich jedoch als deutlich

weniger lästig empfunden wird, erscheint das Akzeptanzsteigerungspotenzial an dieser Stelle als eher gering [11].

**Bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung**

Das größte Potenzial zur Emissionsminderung mit Blick auf die Hinderniskennzeichnung liegt im Einsatz einer bedarfsgerechten Nachtkennzeichnung (BNK). Dabei erfolgt die Befeuerung der Anlage nur dann, wenn sich ein Luftfahrzeug im Wirkungsraum der Windenergieanlage befindet. Während der restlichen Zeit wird die Kennzeichnung deaktiviert. Mit der Novellierung der AVV im Jahr 2015 wurde bereits der rechtliche Rahmen für eine solche bedarfsgerechte Befeuerung geschaffen.

Die Untersuchungen von Hübner und Pohl zeigten, dass sich mehr als ein Viertel der befragten Anwohner durch die Nachtkennzeichnung besonders stark belästigt fühlen [11].

Der Einsatz einer BNK kann somit einen bedeutenden Beitrag zur Akzeptanzsteigerung gegenüber der Windenergienutzung leisten.

Zentrale Komponente eines BNK-Systems ist eine Radarantenne, welche den Wirkungsraum<sup>4</sup> um die WEA überwacht. Bei Eintritt eines Flugobjektes in den Wirkungsraum wird dieses erfasst, woraufhin ein Signal zur Aktivierung der Hinderniskennzeichnung generiert werden kann. Bezüglich der Radartechnik kann grundsätzlich zwischen Primär- oder Sekundärradar unterschieden werden. Während die Primärradartechnik auf vom Boden ausgesendeten und am Flugobjekt reflektierten Signalen basiert, empfangen Sekundärradare Signale, die von Transpondern an Bord eines Flugzeuges ausgesendet werden. Da die BNK gemäß AVV „grundsätzlich von der technischen Ausstattung der Luftfahrzeuge unabhängig sein“ muss, kommen für BNK-Systeme in Deutschland nach derzeitiger Rechtslage bisher ausschließlich Primärradarantennen infrage [12]. Primärradare können als Aktiv- oder Passivradar ausgelegt werden. Aktive Systeme empfangen die Echos vorher selbst ausgestrahlter Signale, wohingegen Passivradare am Flugobjekt reflektierte Strahlen bereits vorhandener Sender (zum Beispiel LTE oder DVB-T) empfangen. Von der Deutschen Flugsicherung wurden mittlerweile sowohl Aktiv- als auch Passivradarsysteme anerkannt.

<sup>4</sup> Luftraum um ein Hindernis in einem Radius von 4.000 m und einer Höhe von mindestens 600 m [12]

Maßgebliches Hemmnis eines flächendeckenden Einsatzes von BNK sind die hohen Investitionskosten im oberen sechsstelligen Bereich [13]. Eine bundesweit einheitliche Verpflichtung zur BNK war bisher nicht gegeben. Einzig in Mecklenburg-Vorpommern wird mit der novellierten Landesbauordnung 2015 eine BNK für Windparks verpflichtend vorgeschrieben [40]. Mit dem am 14.12.2018 beschlossenen Energiesammelgesetz sieht der Gesetzgeber hinsichtlich der bedarfsgerechten Nachtkennzeichnung nun zwei wesentliche Neuerungen vor. Zum einen soll der Einsatz der BNK verpflichtend für alle Windparks werden. Zum anderen soll die Beschränkung auf Primärradarsysteme entfallen, so dass die auf Transpondersignalen basierende, deutlich kostengünstigere Sekundärradartechnik künftig eingesetzt werden kann [45].

### 2.4 Lichtemission in Form des Stroboskop-effektes

Der Stroboskop- oder Disco-Effekt beschreibt das Phänomen periodischer Reflexionen des Sonnenlichtes an einem drehenden Rotor. Die so erzeugten Lichtblitze treten jedoch nur bei WEA der frühen Generationen auf. Durch einen geeigneten Farbanstrich mit matten Farben und geringem Glanzgrad (zum Beispiel RAL 7035 Lichtgrau) werden solche Reflexionen heute standardmäßig schon im Produktionsprozess vermieden. Da die Verwendung solcher Farben bereits mit den LAI-Hinweisen aus dem Jahr 2002 eingefordert wird, ist davon auszugehen, dass die weit überwiegende Mehrheit des heutigen Anlagenbestandes keine nennenswerten Lichtreflexionen verursacht [10]. Altanlagen aus den 1990er und frühen 2000er Jahre, welche gegebenenfalls noch mit reflektierenden Farbanstrichen versehen sind, werden innerhalb der nächsten Jahre das Ende ihrer Entwurfslebensdauer<sup>5</sup> erreichen und sehr wahrscheinlich nach Ende des zwanzigjährigen Förderzeitraumes nach EEG stillgelegt werden, sofern ein Weiterbetrieb auch ohne finanzielle Förderung nicht wirtschaftlich darstellbar ist. Die Anzahl noch vorhandener reflektierender WEA wird somit sukzessive zurückgehen.

### 2.5 Eiswurf

Die Gefahr des Eiswurfes und die damit verbundene Ablehnung von Windenergieanlagen lassen sich heute durch verschiedene technische Ansätze

vermeiden. Oftmals werden Windenergieanlagen bei tatsächlicher oder drohender Vereisung abgeschaltet, so dass ein Eiswurf infolge der Fliehkräfte des Rotors verhindert wird. Dies liegt auch im Eigeninteresse des Betreibers, da durch Eisansatz am Rotorblatt verursachte Unwuchten zu einer stärkeren Belastung der Komponenten und folglich zu frühzeitigem Verschleiß führen können.

Generell tritt Vereisung tendenziell eher in Mittelgebirgen auf, wohingegen im Norddeutschen Tiefland sowie in Küstennähe seltener Vereisung begünstigende Bedingungen herrschen [2].

#### 2.5.1 Rechtlicher Rahmen

##### Mindestabstände zu Verkehrswegen und Gebäuden

Die Musterliste Technische Baubestimmungen<sup>6</sup> (Stand 2015) enthält in Anlage 2.7/12 unter anderem auch Anforderungen an den Schutz vor Eiswurf durch Windenergieanlagen.

Demnach ist, sofern eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit nicht auszuschließen ist, ein Mindestabstand zwischen Windenergieanlage und Verkehrswegen sowie Gebäuden in Höhe des anderthalbfachen der Summe aus Nabenhöhe und Rotordurchmesser einzuhalten. Bei einer modernen Windenergieanlage mit einer Nabenhöhe von ca. 130 m und einem Rotordurchmesser von ca. 140 m ergibt sich demnach ein Mindestabstand von 405 m. Eine Unterschreitung des Mindestabstandes ist zulässig, sofern die Funktionsfähigkeit des Systems zur Eiserkennung und Anlagenabschaltung durch gutachterliche Stellungnahme eines Sachverständigen nachgewiesen wird [17].

##### Weitergehende Vorschriften

Ein generelles Betriebsverbot für Windenergieanlagen bei Eisansatz ist nicht bekannt. Auf Landesebene existieren beispielsweise in Rheinland-Pfalz Vorgaben, wonach der Betrieb von WEA mit Eisansatz im Regelfall nicht zulässig ist. Der Nachweis, dass die WEA über ein System zum Schutz vor Eiswurf verfügt und dieses dem Stand der Technik entspricht, ist als Teil des Genehmigungsantrages durch Sachverständigengutachten zu führen [28].

<sup>5</sup> Lebensdauer, welche bei der Berechnung der Statik und Standsicherheit der Anlage zugrunde gelegt wurde, diese beträgt für ältere WEA in der Regel 20 Jahre.

<sup>6</sup> Die Musterliste wird als Vorlage von den Ländern übernommen und im jeweiligen Landesbaurecht verankert; technische Baubestimmungen sind verbindlich einzuhalten.



### 2.5.2 Technologien zur Eiserkennung und Eiswurfvermeidung

Die Verhinderung von Eiswurf setzt zunächst eine zuverlässige Erkennung tatsächlichen oder theoretisch möglichen Eisansatzes am Rotorblatt voraus. Dazu existieren unter anderem folgende Lösungen:

- ▶ Leistungskurvenverfahren,
- ▶ Schwingungssensorik im Rotorblatt,
- ▶ Sensorik am Maschinenhaus.

#### Leistungskurvenverfahren

Das Leistungskurvenverfahren nutzt den Zusammenhang zwischen Vereisung und verminderter Leistungsabgabe der WEA. Vereisung führt zu einer Veränderung der aerodynamischen Eigenschaften der Rotorblätter, woraus eine verminderte Leistungsabgabe der Anlage gegenüber einem Zustand ohne Vereisung resultiert. Durch einen Vergleich der aktuellen Betriebsdaten (Leistung) mit Langzeit-Mittelwerten für die jeweilige Windgeschwindigkeit werden abnorme Betriebszustände erfasst, die als Indiz für Vereisung gewertet werden. Sofern gleichzeitig eine definierte Lufttemperatur unterschritten wird und somit Vereisung begünstigende Bedingungen vorliegen, wird die Anlage gestoppt. Das Wiederanfahren erfolgt automatisch, sobald die Lufttemperatur über einen hinreichend langen Zeitraum oberhalb der definierten Grenztemperatur liegt [15].

#### Schwingungssensorik im Rotorblatt

Eisansatz erhöht die Masse der Rotorblätter, wodurch sich deren Schwingungsverhalten ändert. Mittels spezieller, in das Rotorblatt integrierter Sensoren kann das Schwingungsverhalten der Blätter kontinuierlich überwacht und ausgewertet werden. Ein durch Eisansatz verändertes Schwingungsverhalten wird durch die Sensorik erkannt, eine im Maschinenhaus integrierte Recheneinheit generiert daraufhin ein Signal zum Stopp der Anlage. Das System ermöglicht auch ein automatisches Wiederanfahren der Anlage bei Eisfreiheit [15].

#### Sensorik am Maschinenhaus

Im Gegensatz zu den vorgenannten Methoden ermitteln am Maschinenhaus angebrachte Sensoren nicht die tatsächliche Vereisung der Rotorblätter. Beispielfhaft genannt seien folgende Konzepte:

Die Eiserkennung mittels Anemometer erfolgt durch einen Vergleich der gemessenen Windgeschwindigkeiten eines beheizten und eines nicht beheizten Anemometers. Im Falle von Eisbildung an dem nicht beheizten Gerät ermittelt dieses eine niedrigere Windgeschwindigkeit als das beheizte und somit nicht vereiste Anemometer. Eine Differenz zwischen beiden Messwerten wird als Indiz für Eisbildung gewertet, die Anlage wird gestoppt [16].

Andere Detektoren arbeiten mit vibrierenden Sonden oder Drähten. Tritt an diesen Eisansatz auf, verringert sich die Frequenz deren Schwingungen. Diese Frequenzänderung wird vom Detektor erfasst und ein entsprechendes Steuersignal zum Stopp der Anlage generiert [16].

Sensoren am Maschinenhaus weisen generell den Nachteil auf, dass sie keine Aussagen über die tatsächliche Eisbildung am Rotorblatt liefern können. Daraus kann eine tendenzielle Überschätzung der Eisbildung am Rotorblatt resultieren.

### Eisabfall

Neben dem technisch beherrschbaren Risiko des Eiswurfes besteht bei stillstehenden Rotoren – wie an allen anderen hohen Bauwerken – ein Risiko durch herabfallendes Eis. Der Gefahrenbereich beschränkt sich dabei auf das unmittelbare Umfeld unterhalb des Rotors. In diesen Fällen können Passanten durch Warnschilder für die Gefahr sensibilisiert werden.

Sofern Wege unmittelbar an der WEA vorbeiführen, lässt sich das Risiko durch eine Positionierung des Rotors parallel zum Weg weiter verringern [4].

### Enteisung der Rotorblätter

Systeme zur Enteisung der Rotorblätter sind energieaufwendig und werden daher nur in Regionen mit hohem Vereisungsrisiko eingesetzt, um wirtschaftlichen Verlusten infolge langer vereisungsbedingter Stillstandszeiten entgegenzuwirken. Die von den Herstellern angebotenen Systeme unterscheiden sich in der technischen Umsetzung. So setzt ein deutscher Hersteller Heizelemente in der Vorderkante der Rotorblätter ein. Über einen Eissensor werden die Witterungsverhältnisse kontinuierlich erfasst, bei Eintritt vereisungsbegünstigender Umgebungsbedingungen nehmen die Heizelemente den Betrieb auf [26]. Ein anderer Hersteller bietet ein Heißluftsystem zur Beheizung und Enteisung der Rotorblätter an. Ein zentrales Heizelement mit vorgeschaltetem Ventilator in der Blattwurzel erzeugt warme Luft, welche bis in die Blattspitze strömt und das Blatt somit von innen erwärmt [27].

### Optimierungspotenzial: Eisabweisende Oberflächen

Im Rahmen des Vorhabens *Aktive eisabweisende Oberflächen auf Rotorblättern-EISAB* (01.09.2014 – 31.08.2018) forschen Wissenschaftler der TU Dresden an einer speziellen Oberflächenbehandlung, welche Eisansatz unter anderem an Rotorblättern verhindern soll. Das zugrundeliegende Prinzip basiert auf einer Kombination von Herabsetzung des Gefrierpunktes und Reduzierung der Eisadhäsion [18].

## 2.6 Artenschutz

Die Nutzung der Windenergie wird nicht nur wegen ihrer Auswirkungen auf den Menschen kritisiert. Häufig drehen sich Akzeptanzdebatten auch um die Aspekte des Artenschutzes. Im Fokus stehen dabei in der Regel bestimmte Vogel- sowie Fledermausarten, deren Vertreter durch Kollision am Turm oder Rotor Schlag verletzt oder getötet werden können. Dieser Abschnitt soll genehmigungsrechtliche Auflagen und technische Optionen zum Schutz von Vögeln und Fledermäusen im Kontext der Windenergienutzung beleuchten.

### 2.6.1 Rechtlicher Rahmen

#### Bundesrecht

Den rechtlichen Rahmen zum Schutz von Vögeln und Fledermäusen bildet das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG). Für alle Fledermaus- sowie die europäischen Vogelarten gelten demnach die unter § 44 Abs. 1 für besonders geschützte und streng geschützte Arten aufgeführten Zugriffsverbote<sup>7</sup>. Diese beinhalten unter anderem ein Verletzungs- und Tötungsverbot<sup>8</sup>, sowie ein Störungsverbot, sofern sich die Störung negativ auf den Erhaltungszustand der lokalen Population auswirkt [19].

Da gemäß § 6 Abs. 1 Nr. 2 BImSchG eine Genehmigung für den Betrieb einer WEA nur erteilt werden, sofern andere öffentlich-rechtliche Vorschriften dem nicht entgegenstehen, erfolgt im Rahmen des Genehmigungsverfahrens immer auch eine artenschutzrechtliche Prüfung zum Nachweis der Einhaltung der

<sup>7</sup> Besonders geschützte Arten: gemäß § 7 Abs. 2 Nr. 13 BNatSchG unter anderem alle europäischen Vogelarten sowie alle Arten nach Anhang IV der Richtlinie 92/43/EWG (FFH-Richtlinie) und somit unter anderem alle Fledermausarten. Streng geschützte Arten: gemäß § 7 Abs. 2 Nr. 14 BNatSchG unter anderem ebenfalls alle Arten nach Anhang IV der Richtlinie 92/43/EWG (alle Fledermausarten)

<sup>8</sup> Damit sich aus dem individuenbezogenen Tötungsverbot keine unverhältnismäßigen Planungshindernisse, nicht nur für Windenergieprojekte sondern Baumaßnahmen jeglicher Art, ergeben, sieht die Rechtsprechung den Tatbestand des Tötungsverbotes nur in Fällen erfüllt, in denen sich das Tötungsrisiko für das einzelne Individuum durch die jeweilige Maßnahme signifikant erhöht [22]. Vergleiche auch § 44 Abs. 5 Satz 2 Nr. 1 BNatSchG, danach liegt ein Verstoß gegen das Tötungs- und Verletzungsverbot nicht vor, wenn das Tötungs- und Verletzungsrisiko für die betroffene Art nicht signifikant erhöht ist und die Beeinträchtigung bei Anwendung der gebotenen, fachlich anerkannten Schutzmaßnahmen nicht vermieden werden kann.



artenschutzrechtlichen Vorschriften gemäß BNatSchG. Der Vorhabenträger hat die für eine solche Prüfung erforderlichen Gutachten (zum Beispiel Fledermausgutachten, avifaunistische Gutachten) vorzulegen.

### Weiterführende Empfehlungen und Hinweise

Die Bewertungsmaßstäbe zum Schutz von Vögeln und Fledermäusen im Rahmen von Windenergievorhaben unterscheiden sich auf Ebene der Länder. Die Entscheidung über die artenschutzrechtliche Zulässigkeit eines Windenergievorhabens und gegebenenfalls erforderliche Maßnahmen fällt in der Regel die zuständige Genehmigungsbehörde unter Beteiligung der zuständigen Naturschutzbehörde. Hinsichtlich des Vogelschutzes werden häufig die *Abstandsempfehlungen für Windenergieanlagen zu bedeutsamen Vogellebensräumen sowie Brutplätzen ausgewählter Vogelarten* der Länderarbeitsgemeinschaft der Vogelschutzwarten (LAG VSW, sogenanntes Helgoländer Papier [48]) als Richtwerte in Genehmigungsverfahren herangezogen. Die Länder können von diesen Abstandsempfehlungen abweichen und diese in entsprechenden artenschutzrechtlichen Arbeits- und Beurteilungshilfen, Windenergieerlassen, Handlungsempfehlungen etc. modifizieren oder ergänzen. Diese landesspezifischen Festlegungen stellen die Bewertungsgrundlage für die Naturschutzbehörde dar und können für die in den jeweiligen Ländern als windenergiesensibel eingestufte Arten unter anderem Anforderungen zu folgenden Aspekten enthalten [20], [21]:

- ▶ Schutzbereiche um Brutstätten, innerhalb derer keine WEA errichtet werden sollen,
- ▶ Prüfbereiche um Brutstätten, innerhalb derer eine Prüfung gegebenenfalls vorhandener artenschutzrechtlicher Konflikte infolge der Errichtung von WEA erfolgen sollte (zum Beispiel Konflikt durch Vorhandensein potenzieller Nahrungshabitate oder Flugkorridore innerhalb des Prüfbereiches),
- ▶ Methodik und Umfang der Bestandserfassung relevanter Arten,
- ▶ Hinweise zu artspezifischen Vermeidungs- und vorgezogener Ausgleichsmaßnahmen.

Eine Übersicht über die Empfehlungen der einzelnen Bundesländer zum Umgang mit artenschutzrechtlichen Belangen im Kontext der Windenergienutzung wurde von der Fachagentur Windenergie an Land veröffentlicht [46].

## 2.6.2 Technische Ansätze zum Schutz WEA-sensibler Vogelarten

### Anlagengestaltung

In der Literatur werden spezielle Farbanstriche des unteren Turmbereiches als auch der Rotorblätter diskutiert, um somit die Wahrnehmbarkeit der Anlagen für Vögel zu erhöhen. Für einzelne Arten deuten empirische Daten demnach auf ein geringeres Kollisionsrisiko an Türmen mit grüner Farbgebung im unteren Bereich hin. Grundsätzlich sei Kollision an WEA-Türmen im Vergleich zum Rotorschlag jedoch eine deutlich seltenere Todesursache an WEA tot aufgefundener Vögel [24]. Der charakteristische grüne Farbanstrich des unteren Turmbereiches ist zudem Markenzeichen eines einzelnen deutschen WEA-Herstellers. Insofern erscheint es aus rechtlicher Sicht fraglich, ob eine grüne Farbgebung an WEA anderer Hersteller umsetzbar wäre. In diesem Fall könnte nach Dürr (2011) eine verbesserte Wahrnehmung auch durch eine bräunliche Einfärbung erzielt werden [24]. Praxisbeispiele einer solchen Farbgebung sind nicht bekannt.

Auch eine gezielte Einfärbung der Rotorblätter wird diskutiert. Bulling et al. (2015) verweisen auf unterschiedliche Aussagen in der Literatur, wonach eine schwarze Einfärbung einzelner Rotorblätter, schwarz-weiße Streifenmuster oder spezielle UV-reflektierende Anstriche die Wahrnehmung verbessern könnten. Gleichzeitig seien die Ergebnisse mitunter jedoch statistisch nicht signifikant, so dass eine wahrnehmbarkeits-verstärkende Wirkung nicht nachgewiesen werden konnte [23].

Grundsätzlich birgt eine auffällige Gestaltung von WEA zur Verstärkung der Wahrnehmbarkeit jedoch einen erheblichen Zielkonflikt gegenüber einer möglichst geringen Beeinflussung des Landschaftsbildes in sich. Die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes wird von Befragten in unterschiedlichen Studien zur Akzeptanz von WEA meist als der größte Belästigungsfaktor angegeben [5], [9], [11]. Insofern liegt die Vermutung nahe, dass eine besonders auffallende Farbgebung der WEA und die damit gesteigerte Wahrnehmbarkeit die ablehnende Haltung in Teilen der Bevölkerung verstärken könnte. Somit erscheinen wahrnehmbarkeitsverstärkende Maßnahmen – ungeachtet der Frage ihrer nicht geklärten Wirksamkeit – als ungeeignetes Instrument, um sowohl dem Artenschutz als auch der Steigerung der Akzeptanz von WEA gerecht zu werden.

### Technische Abschaltungs- und Vermeidungsmaßnahmen

Eine mögliche Maßnahme zur Reduzierung des Kollisionsrisikos ist die Abschaltung von Windenergieanlagen zu bestimmten Bewirtschaftungsereignissen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass Greifvögel bearbeitete Flächen (durch Ernte, Mahd, Pflügen oder Grubbern) überdurchschnittlich stark zur Nahrungssuche aufsuchen, da Beutetiere aufgescheucht und leicht sichtbar werden [49].

Die LAG VSW empfiehlt daher, bei Bewirtschaftung von Ackerflächen im Radius von 300 m um eine WEA in den Monaten April bis Oktober die WEA am Tag der Bewirtschaftung sowie den drei Folgetagen jeweils von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang abzuschalten [50]. Dieser Ansatz findet sich auch in Leitfäden der Länder wieder, so schlägt zum Beispiel der Leitfaden von Niedersachsen eine temporäre Betriebseinschränkung von drei Tagen ab der Bearbeitung im Umkreis von 100 m zum Mastfuß während der Brutzeit als mögliche Vermeidungsmaßnahme vor [51]. Die Wirksamkeit derartiger Maßnahmen ist für kollisionsgefährdete Vogelarten unzweifelhaft. In Bezug auf die konkrete Ausgestaltung des Maßnahmenkonzeptes besteht jedoch weiterer Untersu-

chungsbedarf. Grundlegend ist zu untersuchen, wie sich das Raumnutzungsverhalten windkraftsensibler Vogelarten in Abhängigkeit von Bewirtschaftungsverhältnissen ändert [49].

Ein anderer Ansatz zielt auf bedarfsgerechte Maßnahmen ab, mit welchen im jeweiligen Einzelfall eine Kollision eines anfliegenden Vogels verhindert werden soll. Entsprechende Systeme setzen entweder auf Vergrämung der heranfliegenden Tiere oder auf temporäre Abschaltung der betroffenen WEA. Beide Maßnahmen setzen eine rechtzeitige und artspezifische Erfassung des sich nähernden Tieres voraus. Hierzu werden derzeit unterschiedliche Techniken erprobt und teils international eingesetzt. In Deutschland ist bisher kein System im Zuge einer Genehmigung festgelegt worden.

Eine aktuelle Veröffentlichung des Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (KNE) stellt die aktuellen technischen Entwicklungen und verfügbaren Systeme zur Vermeidung negativer Auswirkungen von WEA auf Fledermäuse und Vögel zusammen und gibt einen Überblick über die jeweiligen technischen Möglichkeiten und Grenzen [37]. Für die Erkennung heranfliegender Individuen in Verbindung mit ent-



sprechenden Abschalt- oder Vergrämungsmaßnahmen kommen demnach derzeit grundsätzlich Kamera-, Radar-, oder GPS-gestützte Systeme in Betracht. GPS-gestützte Systeme erfassen prinzipiell nur Individuen, welche im Vorfeld mit einem Sender ausgestattet wurden [37]. Radarsysteme besitzen demgegenüber den Vorteil einer großräumigen Erfassung, sind jedoch mit hohen Kosten im sechs- bis siebenstelligen Bereich verbunden. Bei den beschriebenen Kamerasystemen stehen mitunter die Nachweise einer zuverlässigen Erfassung noch aus, teilweise wurde eine hohe Anzahl falsch-positiver Meldungen beobachtet [37].

Die Wirksamkeit der Systeme ist bislang nicht anerkannt, daher werden diese im Zuge der Genehmigung bisher nicht als Möglichkeit anerkannt, das Tötungsrisiko mit hinreichender Sicherheit zu vermeiden. So ist zum einen der Nachweis ausstehend, in welcher Form die technische Erfassung mit hoher Zuverlässigkeit erfolgen kann, zum anderen sind Belege für die Wirksamkeit sowie Untersuchungen zu möglichen Gewöhnungseffekten zu erbringen. Hierbei gilt es auch, die sehr verschiedenen naturräumlichen und genehmigungsseitigen Fallkonstellationen zu berücksichtigen. Zu klären ist weiterhin die Frage, ob flächendeckende Signale zur Vergrämung, gerade in der Nähe zur Wohnbebauung, nicht zu einem weiteren akzeptanzhemmenden Faktor werden könnten.

### 2.6.3 Technische Ansätze zum Schutz von Fledermäusen

Eine wirkungsvolle Maßnahme zum Schutz von Fledermäusen liegt in der Programmierung spezieller Abschaltalgorithmen (sogenannte fledermausfreundliche Betriebszeiten). Diese können sowohl pauschal als auch standortspezifisch umgesetzt werden und orientieren sich in der Regel an den Faktoren Monat, Nachtzeit, Windgeschwindigkeit, Temperatur und gegebenenfalls Niederschlag.

So sind beispielsweise in Thüringen fledermausfreundliche Betriebszeiten (das heißt Abschaltung) zu folgenden Zeiten umzusetzen [25]:

- ▶ Im Zeitraum vom 15. März bis zum 31. Oktober,
- ▶ ab einer Stunde vor Sonnenuntergang- bis eine Stunde nach Sonnenaufgang,
- ▶ bei Temperaturen größer gleich 10°C und
- ▶ Windgeschwindigkeiten kleiner gleich 6 m/s.

Je nach Lage des WEA-Standortes (beispielsweise in der Nähe zu Waldrändern) kann die Betriebseinschränkung weiter verschärft werden.

Fledermausfreundliche Betriebszeiten können durch eine Erfassung der tatsächlichen Fledermausaktivitäten (zum Beispiel durch Gondelmonitoring) flankiert werden, auf Basis deren Ergebnisse der Abschaltalgorithmus optimiert (das heißt verschärft oder reduziert) werden kann.

## 3 Fazit und Ausblick

Bedingt durch die technischen und genehmigungsrechtlichen Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte können negative Auswirkungen der Windenergienutzung auf Mensch und Umwelt heute in vielen Bereichen bereits vermieden oder auf ein Minimum reduziert werden (siehe auch Zusammenfassung in Tabelle 2). So tritt der Stroboskopeffekt bei modernen WEA durch spezielle Farbgebung in matten Grautönen nicht mehr in Erscheinung. Eine mögliche Beeinträchtigung durch periodischen Schattenwurf wird durch automatisierte Abschaltung der WEA bei Überschreitung der Immissionsrichtwerte auf ein erträgliches Maß reduziert. Eine Gefährdung durch Eiswurf lässt sich durch Einhaltung der erforderlichen Mindestabstände zu Straßen und Gebäuden beziehungsweise den Einsatz von Eiserkennungssystemen in Verbindung mit einer automatisierten Anlagenabschaltung bei Eisansatz vermeiden. In der Entwicklung eisabweisender Oberflächenbeschichtungen liegt zudem das Potenzial, WEA künftig auch bei vereisungsbegünstigenden Umgebungsverhältnissen sicher zu betreiben.

Optische Belästigungen insbesondere durch die nächtliche Hinderniskennzeichnung können durch Synchronisierung der Parkbefeuern, vor allem aber durch den Einsatz einer bedarfsgerechten Nachtkennzeichnung (BNK) reduziert beziehungsweise gänzlich vermieden werden. Ein flächendeckender Einsatz der BNK, insbesondere auch im Anlagenbestand, scheiterte bisher an hohen Investitionskosten und begrenzten technischen Optionen. Diesbezüglich sieht der Gesetzgeber Änderungen vor, die künftig auch den Einsatz der kostengünstigeren Transpondertechnik ermöglichen, wodurch eine hohe Marktdurchdringung der BNK erreicht werden soll.

Die Geräuschemissionen von WEA lassen sich durch aerodynamische Optimierung der Rotorblätter mindern. Zur Nachrüstung von Rotorblättern an Altanlagen sind verschiedene geräuschmindernde Bausätze verfügbar. Für besonders lärmbelastete Gebiete wäre die Schaffung entsprechender Anreize zur Nachrüstung denkbar. Geräuschmindernde Betriebsmodi stellen ein effektives Mittel zur Minderung dar, wirken sich jedoch unmittelbar negativ auf den Energieertrag und somit die Wirtschaftlichkeit der WEA aus. Forschungsbedarf liegt insbesondere im Bereich der Entstehung und Auswirkung von Amplitudenmodulationen. Ein entsprechendes Forschungsvorhaben wird bereits durch UBA betreut.

Dem Artenschutz wird im Rahmen der Genehmigungsverfahren nach BImSchG heute ein sehr hoher Stellenwert beigemessen. Die meisten Bundesländer verfügen mittlerweile über detaillierte Leitfäden, in welchen der Umfang der erforderlichen Untersuchungen sowie die möglichen Vermeidungsmaßnahmen zum Schutz der Tiere dargestellt werden. Systeme zur bedarfsgerechten Abschaltung der WEA durch Echtzeiterfassung heranfliegender Vögel konnten sich noch nicht etablieren, sondern befinden sich noch in der Versuchsphase. Zum Schutz der Fledermäuse haben sich Abschaltalgorithmen etabliert, welche die WEA bei Eintritt festgelegter, fledermausgefährdender Umgebungsverhältnisse (in Abhängigkeit der Jahres- und Nachtzeit, Windgeschwindigkeit, Temperatur und Niederschlag) außer Betrieb setzen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass negative Auswirkungen von Windenergieanlagen auf Mensch, Natur und Umwelt unter Beachtung einer guten Standortwahl im Rahmen der Flächenausweisung, geltender Vorschriften und in Verbindung mit aktuellen technischen Entwicklungen vermieden oder deutlich gemindert werden können. Allein mit Hilfe technischer Optimierung können Akzeptanzprobleme gegenüber der Windenergienutzung jedoch nicht gelöst werden.

Vor allem gilt es, die gesamtgesellschaftlichen Vorteile der Energiewende und insbesondere der Windenergie in den öffentlichen Debatten präsenter darzustellen: Die Windenergiebranche zählt deutschlandweit über 160.000 direkt und indirekt Beschäftigte und trägt somit unmittelbar zu unserer wirtschaftlichen Entwicklung bei [47]. Die Stromgestehungskosten moderner WEA liegen heute bereits auf dem gleichen Niveau wie jene neuer Braunkohlekraftwerke, an guten Standorten sogar darunter. Unter Berücksichtigung der hohen Umweltkosten der Braunkohleverstromung verstärkt sich dieser Effekt um ein Vielfaches. Zudem steigert der inländische Ausbau der Windenergienutzung die Unabhängigkeit von ausländischen Energieimporten sowie von endlichen fossilen Rohstoffen. Das wichtigste Argument für einen entschiedenen Ausbau der Windenergie bleibt jedoch der Klimawandel, der eine reale Bedrohung unserer Lebensgrundlagen darstellt. Vor diesem Hintergrund ist eine Umstellung der Energiewirtschaft auf treibhausgasarme, regenerative Energieträger unumgänglich. Die Windenergie kann und muss hier einen noch stärkeren Beitrag leisten.

Tab. 2

### Darstellung potenziell akzeptanzhemmender Faktoren sowie regulatorische und technische Ansätze zu deren Minderung

Akzeptanzhemmende Faktoren	Regulatorische Ansätze	Technische Ansätze	Kommentar
<b>Geräuschemissionen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Errichtung von WEA erfordern Genehmigungsverfahren nach BImSchG,</li> <li>▶ Immissionsrichtwerte gemäß TA Lärm müssen eingehalten werden,</li> <li>▶ Nachweis der Einhaltung erfolgt durch Immissionsprognosen gemäß den LAI-Hinweise 2016</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Rotorblattoptimierung, zum Beispiel durch Serrations,</li> <li>▶ Schallreduzierte Betriebsmodi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Forschungsbedarf besteht noch im Bereich Amplitudenmodulation</li> </ul>
<b>Schattenwurf</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Einhaltung der Immissionsrichtwerte gemäß LAI WEA-Schattenwurf-Hinweise (Schattenwurf maximal 30 Minuten/Tag, 8 Stunden/Jahr),</li> <li>▶ Schattenwurfprognose im Rahmen des Genehmigungsverfahrens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Abschaltautomatiken zur Verhinderung der Richtwertüberschreitung sind etabliert</li> </ul>	
<b>Lichtemissionen der Hinderniskennzeichnung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ AVV zur Kennzeichnung von Luftfahrt-Hindernissen (AVV) gestattet Einsatz einer bedarfsgerechten Nachtkennzeichnung (BNK), das heißt Hinderniskennzeichnung darf deaktiviert werden, so lange kein Flugobjekt in Wirkungsraum der WEA eintritt</li> <li>▶ Entwurf zum Energiesammelgesetz sieht Verpflichtung zum Einsatz der BNK vor und ermöglicht den Einsatz der Transpondertechnik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ BNK auf Basis von Primärradarsystemen verfügbar und zugelassen</li> <li>▶ Kostengünstigere Sekundärradartechnik (Transpondertechnik) wird künftig ermöglicht</li> </ul>	
<b>Disco-/Stroboskop-effekt durch Sonnenlichtreflexion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ LAI WEA-Schattenwurf-Hinweise fordern Einsatz mittelreflektierender Farben mit mattem Glanzgrad, wodurch Reflexionen minimiert werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Werkseitige Beschichtung der Rotorblätter entsprechend LAI ist Standard</li> </ul>	
<b>Eiswurf</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Schutzabstände zu Verkehrswegen und Gebäuden mindestens in Höhe des 1,5-fachen der Summe aus Nabenhöhe und Rotordurchmesser verankert im Landesbaurecht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Verschiedene Systeme zur Erkennung von Eisansatz sind vorhanden und werden eingesetzt</li> <li>▶ Automatisierte Abschaltung der WEA bei Eisansatz möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Derzeit Grundlagenforschung zu eisabweisenden Oberflächen, Techniktransfer steht aus</li> </ul>
<b>Artenschutz (Vögel und Fledermäuse)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Für Vögel und Fledermäuse gelten die in § 44 Abs. 1 BNatSchG definierten Zugriffsverbote (Verletzungs-, Tötungs-, Störungsverbot)</li> <li>▶ Prüfung der Einhaltung dieser Vorschriften erfolgt im Rahmen der artenschutzrechtlichen Prüfung als Teil des Genehmigungsverfahrens</li> <li>▶ Landesspezifische Anpassungen durch Windenergieerlasse und Empfehlungen und Vorgaben zum Artenschutz (Abstände etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Technische Systeme zur Vermeidung von Kollisionen von Vögeln an WEA befinden sich in der Entwicklung und Erprobung</li> <li>▶ Zum Schutz von Fledermäusen haben sich sogenannte fledermausfreundliche Betriebszeiten etabliert, dabei erfolgt eine Abschaltung der WEA innerhalb festgelegter Zeiträume, in denen mit Fledermausaktivität zu rechnen ist</li> </ul>	





## 4 Literatur

- [1] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm), vom 26. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503), geändert durch Verwaltungsvorschrift vom 01.06.2017 (BAnz AT 08.06.2017 B5)
- [2] Hau, E. (2016): Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 6. Auflage. Berlin.
- [3] Nordex SE (2016): Stark und leise. Die zwei neuen Turbinen der Generation Delta. 360° Die Nordex/AWP-Rundschau Ausgabe 2016 (2), S.13–17
- [4] Agatz, M. (2016): Windenergie-Handbuch. 13. Ausgabe. Gelsenkirchen.
- [5] Pohl, J.; Gabriel, J.; Hübner, G. (2014): Untersuchung der Beeinträchtigung von Anwohnern durch Geräuschemissionen von Windenergieanlagen und Ableitung übertragbarer Interventionsstrategien zur Verminderung dieser. Halle (Saale).
- [6] Gabriel, J.; Vogl, S. (2015): Messungen und Datenanalysen im Forschungsvorhaben „Untersuchung der Beeinträchtigung von Anwohnern durch Geräuschemissionen von Windenergieanlagen“.
- [7] Erneuerbare Energien (2014): Der Stressfaktor im Schall. <https://www.erneuerbareenergien.de/der-stressfaktor-im-schall/150/474/77893>. Stand: 09.08.2017.
- [8] Windindustrie in Deutschland (2015): Frank Weise: „Das Signal geht an alle Hersteller“ <https://www.windindustrie-in-deutschland.de/interviews/frank-weise-das-signal-geht-an-alle-hersteller/>. Stand: 11.08.2017.
- [9] Pohl, J.; Faul, F.; Mausfeld, R. (1999): Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergieanlagen. Kiel.
- [10] Länderausschuss für Immissionsschutz (2002): Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immissionen von Windenergieanlagen (WEA-Schattenwurf-Hinweise).
- [11] Hübner, G.; Pohl, J. (2010): Akzeptanz und Umweltverträglichkeit der Hinderniskennzeichnung von Windenergieanlagen. Halle.
- [12] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen. Zuletzt geändert durch die Verwaltungsvorschrift vom 26. August 2015 (BAnz AT 01.09.2015 B4).
- [13] Fachagentur Windenergie an Land (2016): Bedarfsgerechte Nacht Kennzeichnung von Windenergieanlagen. Berlin.
- [15] Enercon GmbH (Hrsg.) (2014): Technische Beschreibung. ENERCON Eiserkennung Leistungskurvenverfahren. Aurich
- [16] Heikkilä, U; Bourgeois, S; Cattin, R (2016): Evaluation of ice detection systems for wind turbines. VGB Powertech. International Journal of Electricity and heat generation. 2016 (7), S. 68–73
- [17] Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen in der Fassung vom Juni 2015
- [18] Technische Universität Dresden: Sicherheit und Energieeffizienz durch eisfreie Oberflächen für Rotorblätter. Download unter: <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/cimtt/forschung/forschungsprojekte/transfer> Stand: 09.08.2017
- [19] BNatSchG – Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), zuletzt geändert durch Artikel 4 Absatz 100 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154)
- [20] LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.) (2015): Hinweise zur Bewertung und Vermeidung von Beeinträchtigungen von Vogelarten bei Bauleitplanung und Genehmigung für Windenergieanlagen. Karlsruhe
- [21] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV) (Hrsg.) (2013): Leitfaden Umsetzung des Arten- und Habitatschutzes bei der Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen in Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf
- [22] BVerwG, Urteil vom 12.3.2008 – 9 A 3.06
- [23] Bulling, L; Sudhaus, D; Schnittker, D; Schuster, E; Biehl, J; Tucci, F (2015): Vermeidungsmaßnahmen bei der Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen. Bundesweiter Katalog von Maßnahmen zur Verhinderung des Eintritts von artenschutzrechtlichen Verbotstatbeständen nach § 44 BNatSchG. Berlin
- [24] Dürr, T (2011): Dunkler Anstrich könnte Kollisionen verhindern: Vogelunfälle an Windradmasten. Der Falke – Journal für Vogelbeobachter 58 (12), S. 499501
- [25] Dietz, M; Krannich, E; Weitzel, M (2015): Arbeitshilfe zur Berücksichtigung des Fledermausschutzes bei der Genehmigung von Windenergieanlagen (WEA) in Thüringen. Gonterskirchen
- [26] Nordex (2012): Anti-Icing. Mehr Ertrag in kalten Regionen.
- [27] Enercon (2014): Validierung der ENERCON Rotorblattenteisung abgeschlossen. Technologie-Spitzenreiter beim Rotorblattenteisungssystem. Windblatt. Enercon-Magazin für Windenergie 2010 (4), S. 8–9
- [28] Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord Rheinland-Pfalz (2016): Merkblatt für Vorhaben zur Errichtung von Windenergieanlagen hinsichtlich immissionsschutzrechtlicher und arbeitsschutzrechtlicher Anforderungen an die Antragsunterlagen in Genehmigungsverfahren nach dem BImSchG.
- [29] TEG Tubercle Engineering Group GmbH (2016): Windenergie-Innovation nach dem Vorbild der Natur. Die nächste Stufe der Rotorblattelevolution.
- [30] 3M Renewable Energy Division (2014): 3M™ Wind Vortex Generatoren. Aerodynamische Leistungsoptimierung. Neuss
- [31] Agentur für Erneuerbare Energien (2017): Grafik-Dossier: Akzeptanzumfrage 2017. Download unter: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/grafik-dossier-akzeptanzumfrage-2017>. Stand: 08.09.2017
- [32] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) (2016): Hinweise zum Schallimmissionsschutz bei Windkraftanlagen (WKA).

- [33] Souza Heinzlmann, B. (2011): Strömungsbeeinflussung bei Rotorblättern von Windenergieanlagen mit Schwerpunkt auf Grenzschnittabsaugung. Dissertation. Berlin
- [34] Senvion S.A. (2018): Retrofits. <https://www.senvion.com/global/de/produkte-services/service/retrofits/> Stand: 23.01.2018
- [35] Nordex SE (2017): Neue Modernisierungsoptionen für Bestandsanlagen – das Blatt im Blick. 360° Die Nordex/AWP-Rundschau 2017 (1), S. 14
- [37] KNE (2018): Synopse der technischen Ansätze zur Vermeidung von potenziellen Auswirkungen auf Vögel und Fledermäuse durch die Windenergienutzung. Berlin
- [39] 4. BImSchV – Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973, 3756), zuletzt geändert durch Artikel 3 der Verordnung vom 28. April 2015 (BGBl. I S. 670)
- [40] Landesbauordnung Mecklenburg-Vorpommern (LBauO M-V) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Oktober 2015, letzte berücksichtigte Änderung: §§ 6, 46, 85 geändert durch Gesetz vom 13. Dezember 2017 (GVOBl. MV S. 331)
- [41] ISO 7196:1995, Acoustics – Frequency-weighting characteristics for infrasound measurements. ISO, Genf, 1995.
- [42] E DIN 45680:2013-09, Entwurf – Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschmissionen, Beuth-Verlag, Berlin, 2013
- [43] Ratzel, U.; Bayer O.; Brachat, P.; et al. (2016): *Tieffrequente Geräusche und Infraschall von Windkraftanlagen und anderen Quellen. Bericht über Ergebnisse des Messprojektes 2013–2015*, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW)
- [44] Van Kamp, I. and F. Van den Berg, *Health Effects Related to Wind Turbine Sound, Including Low-Frequency Sound and Infrasound*. Acoustics Australia, 2017, S. 1–27.
- [45] Gesetz zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes, des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes, des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften in der Fassung vom 30. November 2018 (Drucksache 614/18).
- [46] Fachagentur Windenergie an Land (2018): Empfehlungen/Hinweise der Länder zum Umgang mit artenschutzrechtlichen Aspekten bei der Windenergieplanung. Download unter: [https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Naturschutz/FA\\_Wind\\_Uebersicht\\_Umgang\\_mit\\_Artenschutz\\_Bundeslaender.pdf](https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Naturschutz/FA_Wind_Uebersicht_Umgang_mit_Artenschutz_Bundeslaender.pdf). Stand: 11.12.2018.
- [47] Ulrich, P.; Lehr, U. (2018): Erneuerbar beschäftigt in den Bundesländern Bericht zur aktualisierten Abschätzung der Bruttobeschäftigung 2016 in den Bundesländern.
- [48] Länderarbeitsgemeinschaft der Vogelschutzwarten (LAG VSW) (2015): Abstandsempfehlungen für Windenergieanlagen zu bedeutsamen Vogel Lebensräumen sowie Brutplätzen ausgewählter Vogelarten (Stand April 2015).
- [49] Blew, J. et al. (2018): Wirksamkeit von Maßnahmen gegen Vogelkollisionen an Windenergieanlagen, BfN-Skripten 2018. Download unter: <https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/service/Dokumente/skripten/Skript518.pdf>, Stand: 17.04.2019
- [50] Länderarbeitsgemeinschaft der Vogelschutzwarten (LAG VSW) (Hrsg.) (2017): Abschaltung von Windenergieanlagen (WEA) zum Schutz von Greifvögeln und Störchen bei bestimmten landwirtschaftlichen Arbeiten, Beschluss 2017-1-1. Download unter: <http://www.vogelschutzwarten.de/downloads/2017lagvsw1-1.pdf>, Stand: 17.04.2019
- [51] Leitfaden – Umsetzung des Artenschutzes bei der Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen in Niedersachsen (Ministerialblatt vom 24.02.2016). Download unter: <http://www.umwelt.niedersachsen.de/windenergieerlass/windenergieerlass-133444.html>, Stand: 17.04.2019



► **Unsere Broschüren als Download**  
Kurzlink: [bit.ly/2dowYYI](https://bit.ly/2dowYYI)

 [www.facebook.com/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)  
 [www.twitter.com/umweltbundesamt](https://www.twitter.com/umweltbundesamt)  
 [www.youtube.com/user/umweltbundesamt](https://www.youtube.com/user/umweltbundesamt)  
 [www.instagram.com/umweltbundesamt/](https://www.instagram.com/umweltbundesamt/)