

Windenergieanlagen und WHO-Umgebungslärm-Leitlinien

Detlef Piorr

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, 45610 Recklinghausen

E-Mail: detlef.piorr@lanuv.nrw.de

Einleitung

Die Weltgesundheitsorganisation WHO versteht unter Gesundheit einen Zustand des vollständigen körperlichen, geistigen und sozialen Wohlergehens und nicht nur das Fehlen von Krankheit oder Gebrechen. Am 10. Oktober 2018 veröffentlichte das Europäische Büro der WHO die „Leitlinien für Umgebungslärm für die Europäische Region“ [1]. Hauptziel dieser Leitlinien ist der Schutz der menschlichen Gesundheit vor Umgebungslärm folgender Quellen: Verkehrslärm (Straßenverkehrs-, Schienenverkehrs- und Fluglärm), Lärm von Windenergieanlagen sowie von Geräuschen, denen sich der Mensch in seiner Freizeit (z.B. beim Musikhören oder bei sonstigen Freizeitaktivitäten) aussetzt. Die Leitlinienentwicklungsgruppe (LEG) empfiehlt zum Schutz der Gesundheit der Bevölkerung vor den Belastungen durch Umgebungslärm quellenpezifisch die Einhaltung bestimmter Grenzwerte. Bezogen auf die Geräuschimmissionen von Windenergieanlagen enthalten die Leitlinien folgende Aussagen:

- Für die durchschnittliche Lärmbelastung empfiehlt die LEG bedingt, durch Windenergieanlagen bedingte Lärmpegel auf weniger als 45 dB L_{den} zu verringern, weil Lärm von Windenergieanlagen oberhalb dieses Wertes mit schädlichen gesundheitlichen Auswirkungen verbunden ist.
- In Bezug auf die durchschnittliche Lärmbelastung L_{night} durch Lärm von Windenergieanlagen wird keine Empfehlung abgegeben. Die Qualität der Evidenz zur nächtlichen Belastung durch Lärm von Windenergieanlagen ist zu gering, um eine Empfehlung zu gestatten.
- Zur Verringerung der gesundheitlichen Auswirkungen empfiehlt die LEG bedingt, dass die Politik geeignete Maßnahmen zur Verringerung der Lärmbelastung durch Windenergieanlagen für die Bevölkerung ergreift, deren Lärmbelastung die Leitlinienwerte für die durchschnittliche Lärmbelastung übersteigt. Es ist jedoch keine Evidenz verfügbar, um die Empfehlung einer bestimmten Art von Maßnahme gegenüber einer anderen zu erleichtern.

Die WHO-Leitlinien unterscheiden „starke“ und „bedingte“ Empfehlungen. Die Windenergieanlagen-Empfehlungen der WHO gehören zu den bedingten Empfehlungen. Starke Empfehlungen, die in Bezug auf die vom Verkehr verursachten Geräuschimmissionen von der WHO ausgesprochen werden, sind so abgesichert, dass sie in den meisten Situationen direkt als Grundlage für Verwaltungshandeln herangezogen werden können. Bedingte Empfehlungen erfordern hingegen vor einer Umsetzung einen politischen Entscheidungsprozess mit substanzieller Diskussion und Einbeziehung verschiedener Akteure.

Zur Erarbeitung der WHO-Leitlinien wurden bereits bekannte Wirkungsuntersuchungen systematisch im Hinblick auf Erkenntnisse zu folgenden gesundheitlichen Dimensionen ausgewertet und ihre Ergebnisse bewertet:

Herz- und Kreislauferkrankungen, Belästigung, Auswirkungen auf den Schlaf, kognitive Beeinträchtigungen, Hörschäden, Tinnitus, Fehlgeburten, allgemeines Wohlbefinden und psychische Gesundheit, Auswirkungen auf den Stoffwechsel.

Statistisch abgesicherte, signifikante Wirkungen der Geräuscheinwirkungen von Windenergieanlagen, auf denen Grenzwerte abgestützt werden können, wurden hierbei nur hinsichtlich der Belästigungswirkung festgestellt. Die Qualität dieser Nachweise wurde von der WHO-Arbeitsgruppe als „gering“ (low quality) bewertet.

Im Folgenden wird dargestellt, auf Basis welcher akustischer Daten die Empfehlung der WHO in Bezug auf die Geräuschimmissionen von Windenergieanlagen beruht und welches Schutzniveau aus der WHO-Empfehlung im Vergleich mit dem in Deutschland durch die TA Lärm [2] vorgegebenen Schutzniveau folgt.

Datenbasis der Wirkungsuntersuchungen

Als akustische Kenngrößen zur Beschreibung der Geräuschbelastungen werden in den „Leitlinien für Umgebungslärm“ der WHO die Lärmindizes L_{den} und L_{night} verwendet. Diese sind z.B. auf der europäischen Ebene durch die Richtlinie 2002/49/EG [3] in Rechts- und Verwaltungsvorschriften eingeführt worden.

Die Kenngröße L_{den} ist als energetischer Mittelungspegel über die (A-bewerteten) Geräuscheinwirkungen eines Jahres definiert, wobei die nachts auftretenden Geräusche mit einem Zuschlag von 10 dB und die am Abend auftretenden Geräusche mit einem Zuschlag von 5 dB in die Mittelung eingehen. Die Nachtzeit umfasst hierbei die Zeit von 23.00 Uhr bis 7.00 Uhr oder von 22.00 Uhr bis 6.00 Uhr. Da die TA Lärm in der Regel die Zeit von 22.00 Uhr bis 6.00 Uhr als Nachtzeit betrachtet, wird diese TA Lärm-Definition der Nachtzeit im Folgenden angewandt. Als Abend wird in der WHO-Empfehlung die Zeit von 19.00 Uhr bis 23.00 Uhr oder von 18.00 Uhr bis 22.00 Uhr definiert. Im Rahmen dieses DAGA-Beitrags wird als Abend der Zeitraum von 18.00 Uhr bis 22.00 Uhr bezeichnet.

Die L_{den} - und L_{night} -Werte können nach Anhang 3 der EG-Vorschrift [3] entweder durch Berechnung oder durch Messung bestimmt werden. Bei der Festlegung eines Richtwertes ist das Verfahren, wie der mit dem Richtwert zu vergleichende Mess- oder Prognosewert zu ermitteln ist, untrennbarer Bestandteil des Beurteilungsverfahrens [4]. Da die WHO-Leitlinien keine eigenen Festlegungen zur Bestimmung von L_{den} enthalten, kann nur aus den in den Leitlinien zitierten Wirkungsstudien auf das angewandte bzw. das anzuwendende Verfahren geschlossen werden. Nach den aus den Jahren 2004 bis 2016 stammenden Veröffentlichungen wurden die Immissionsbelastungen jeweils berechnet. (Das ist sinnvoll, denn immissionsseitige Messungen des von den Windenergieanlagen verursachten L_{den} sind aufgrund der windverursachten Fremdgeräusche

und sonstiger Umgebungsgeräusche erfahrungsgemäß mit dem notwendigen Fremdgeräuschabstand vielfach nicht möglich, selbst dann, wenn der Betrieb der Anlagen vom Menschen zweifelsfrei gehört werden kann.)

Emissionskennzeichnung

In den meisten der der WHO-Empfehlung zugrundeliegenden Studien wurden als Eingangsgrößen der Ausbreitungsrechnungen die Geräuschemissionen der Windenergieanlagen bei der standardisierten (unter Ansatz einer neutralen meteorologischen Schichtung für eine Höhe von 10 m über dem Boden angegebene) Windgeschwindigkeit von 8 m/s benutzt. Es wurde nicht unterschieden, ob die Anlagen pitch- oder stallgesteuert sind und damit ein grundsätzlich unterschiedliches Emissionsverhalten in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit aufzeigen. (Moderne, hohe pitch-gesteuerte Windenergieanlagen weisen in dem betrachteten Betriebspunkt etwa ihre maximale Schallemission auf, die Emissionen von stall-gesteuerten Anlagen steigen mit zunehmender Windgeschwindigkeit weiter an.)

In einer Studie [5] wurden die als Eingangskenngrößen zur Ausbreitungsrechnung benötigten Emissionen der Windenergieanlagen stichprobenartig in 5 Nächten an einigen Anlagen messtechnisch ermittelt. Als akustische Kenngröße wurde hieraus ein mittlerer 8-Nachtstunden-Mittelungspegel gebildet.

Mittlerer Jahresgang der Schallemissionen

Soweit erkennbar, wurden die der WHO-Empfehlung zugrundeliegenden Wirkungsuntersuchungen im Umfeld von Windparks durchgeführt, deren Anlagen am Tage und in der Nacht in der gleichen Weise (ertragsoptimiert) betrieben wurden.

Der L_{den} ist als Mittelungspegel eines Jahres definiert. Grundsätzlich sind die Schallemissionen von Windenergieanlagen abhängig von der Windgeschwindigkeit der die Rotoren anströmenden Luft. Zur exakten Berechnung des L_{den} ist somit die Kenntnis des Zeitverlaufs der Windgeschwindigkeit in der jeweiligen Höhe der Rotoren für den Zeitraum eines ganzen Jahres und die Kenntnis des windgeschwindigkeitsabhängigen Emissionsverhaltens des jeweiligen Anlagentyps in der jeweiligen Betriebsweise notwendig. Da diese Daten für die Wirkungsforscher zumeist nicht zugänglich waren, wurden zur Berechnung der L_{den} -Werte Vereinfachungen angewandt.

Einige Studien, z.B. [6] gehen (mit Verweis auf eine Veröffentlichung von van den Berg) davon aus, dass der L_{den} um 4,7 dB höher ist als derjenige Immissionspegel, der für die standardisierte Windgeschwindigkeit von 8 m/s berechnet wurde. Sie weisen darauf hin, dass im Rahmen der niederländischen Studie die Verwendung der tatsächlichen Windgeschwindigkeitshäufigkeitsverteilungen zu keiner besseren Korrelation führte als der konstant für alle Immissionsorte angesetzte Wert von 4,7 dB. In einer kanadischen Studie [7] wird berichtet, dass der L_{den} nur um 1,9 dB höher ist als der für die standardisierte Windgeschwindigkeit von 8 m/s berechnete Wert. Andere Studien kennzeichnen die Geräuschimmission durch einen immissionsseitigen Mittelungspegel L_{Aeq} , der für eine definierte Betriebsbedingung der Windenergieanlage (zumeist für die standardisierte

Windgeschwindigkeit von 8 m/s) angegeben wird und verzichten auf die Berechnung des L_{den} .

Akustische Prognosemodelle

Es wurde in den verschiedenen Wirkungsuntersuchungen nicht ein einheitliches Schallausbreitungsmodell zur Berechnung der Schallimmissionen auf Basis der Schallemissionen benutzt. Die meisten Wirkungsuntersuchungen [7], [10], [11] setzten das allgemeine, frequenzselektive Ausbreitungsmodell der ISO 9613-2 ein. In [6] wird mit Bezug auf mehrere Veröffentlichungen darauf hingewiesen, dass das Prognosemodell der ISO 9613-2 die Schallimmissionen von hohen Windenergieanlagen um bis zu 5 dB unterschätzt. Gleichwohl wird es zur Berechnung der Immissionen in dieser Studie [6] benutzt. Ein Team [8], [9] setzte ein schwedisches Ausbreitungsmodell ein. Außerdem erfolgten in einigen Studien zusätzlich zu Berechnungen nach der ISO 9613-2 Berechnungen nach einem niederländischen sowie einem neuseeländischen Ausbreitungsmodell [10], [11].

Modellierung des Bodens

In manchen Veröffentlichungen ist nicht erkennbar, ob und wie die eingesetzten Ausbreitungsmodelle die akustischen Einflüsse der Bodenbeschaffenheit auf die Schallausbreitung berücksichtigen. In [10], [11] wird im Rahmen der Berechnung nach dem Modell der ISO 9613-2 der Bodenfaktor $G = 1$ angesetzt. In [7] werden die Berechnungen aufgrund der örtlichen Verhältnisse mit $G = 0,7$ durchgeführt.

Besondere Auffälligkeit der Geräuschimmissionen

Es ist bekannt, dass tonale Geräusche oder Geräusche mit einer auffälligen Zeitstruktur (Stichwort: „Amplitudenmodulation“) belästigender sind als gleichmäßige, nicht-tonale Geräusche. Die Geräusche von Windenergieanlagen können sowohl einzeltonhaltig sein als auch (aufgrund einer starken Modulation) eine auffällige Zeitstruktur aufweisen. Es ist nicht erkennbar, dass Anlagenstandorte mit „auffälligen“ Anlagen in den Untersuchungen ausgeschlossen wurden, bzw. dass entsprechende Geräuscheigenschaften in den Untersuchungen berücksichtigt oder abgefragt wurden.

„Transformation“ der verschiedenen Ausbreitungsmodelle zur Verbesserung der Vergleichbarkeit

Um die Untersuchungsergebnisse der Studien zur Belästigungswirkung miteinander vergleichbar zu machen, wäre es sinnvoll gewesen, die berechneten Immissionsbelastungen im Sinne eines einheitlichen Ausbreitungsmodells zu „transformieren“. Ob und wie eine solche „Transformation“ erfolgte, ist in den WHO-Leitlinien nicht dargestellt. Unterhalb von Abbildung 18 wird in diesem Zusammenhang in den WHO-Leitlinien zwar auf eine Veröffentlichung von Guski et al [13] verwiesen. Die Frage der „Transformation“ der unterschiedlichen akustischen Kenngrößen wird in dieser Veröffentlichung jedoch nicht beschrieben, nur die „Transformation“ der Lästigkeitsskalen.

Prognosevorschrift der WHO-WEA-Leitlinien-Empfehlung

Wie bereits erwähnt, gehört im Bereich des behördlichen Immissionsschutzes zu einem Grenzwert unverzichtbar eine eindeutige Vorschrift, wie die Belastungskenngröße zu ermitteln ist, die mit dem Grenzwert zu vergleichen ist. Auf Basis der in den WHO-Leitlinien zitierten Wirkungsstudien

hält das LANUV NRW es für wahrscheinlich, dass der WHO-Empfehlung von $L_{den} < 45$ dB folgendes Berechnungsverfahren zur Ermittlung des L_{den} zugrunde zu legen ist:

- betrachteter Betriebszustand: Schallleistungspegel bei der standardisierten Windgeschwindigkeit von 8 m/s
- Schallausbreitungsmodell: Allgemeines (frequenzselektives) Verfahren der DIN ISO 9613-2
- Vernachlässigung der Richtcharakteristik der Schallabstrahlung
- Zusammenhang zwischen dem L_{den} und dem L_{Aeq} bei 8 m/s: $L_{den} = L_{Aeq} + 4,7$ dB

Schutzniveau der WHO-Empfehlung im Vergleich mit demjenigen der TA Lärm

Nachdem mehrere Untersuchungsvorhaben unabhängig voneinander gezeigt haben, dass die Geräuscheinwirkungen hoher Windenergieanlagen an Immissionsorten, deren Abstände zu den Anlagen bestimmte Entfernungen überschreiten, sowohl durch das Allgemeine als auch durch das Alternative Prognoseverfahren der DIN ISO 9613-2 unterschätzt werden, erfolgt in Deutschland die Prognose der Geräuschimmissionen von Windenergieanlagen in der Regel entsprechend dem Beschluss der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) vom 5./6.9.2017 [13] nach dem „Interimsverfahren“ [14].

Für eine Windenergieanlage mit einer Nabenhöhe von 120 m, die ein Spektrum entsprechend dem Referenzspektrum der LAI-WEA-Empfehlung aufweist, sind die nach dem Interimsverfahren für Immissionsorte (mit Abständen zwischen 400 m bis 2 km zwischen Immissionsort und Windenergieanlage und Schallausbreitung über zum Pflanzenbewuchs geeigneten Böden, d.h. $G = 1$) berechneten Schalldruckpegel L_{Aeq} um 3,3 dB bis 3,6 dB höher als diejenigen Pegel, die nach dem Allgemeinen, frequenzselektiven Verfahren der ISO 9613-2 (unter Ansatz von $G = 1$ und $C_{met} = 0$ dB) berechnet werden. Dieser Unterschied muss bei dem Vergleich des Schutzniveaus der WHO-Empfehlung und der TA Lärm beachtet werden.

Den Berechnungen, die zu der Empfehlung des L_{den} -Wertes der WHO-Leitlinien für Geräuschimmissionen von Windenergieanlagen führten, wurden die Geräuschemissionen der Anlagen bei der standardisierten Windgeschwindigkeit von 8 m/s zugrunde gelegt. In Deutschland wird im Genehmigungsverfahren die Geräuschimmission für denjenigen bestimmungsgemäßen Betriebszustand betrachtet, der zu den höchsten Immissionspegeln führt. Bei modernen pitch-gesteuerten Windenergieanlagen stimmt die maximale Schallimmission näherungsweise mit derjenigen überein, die bei der standardisierten Windgeschwindigkeit von 8 m/s auftritt. Die WHO-Empfehlung und die Prognose nach der TA Lärm beruhen also quasi auf identisch ermittelten Schallleistungspegeln. Die Werte der Schallleistungspegel erfordern somit (näherungsweise) keine „Transformation“.

Die Berechnung des von der WHO empfohlenen L_{den} -Wertes erfolgt mit großer Wahrscheinlichkeit auf Basis folgenden Zusammenhangs zwischen dem immissionsseitigen Schallpegel L_{Aeq} , der für die standardisierte Windgeschwindigkeit von 8 m/s bestimmt wird, und dem Langzeit-Mittelungspegel L_{den} der WHO: $L_{den} = L_{Aeq} + 4,7$ dB. Dieser Zusam-

menhang muss beim Vergleich des Schutzniveaus der WHO-Empfehlung und der TA Lärm beachtet werden.

(Anmerkung: Der obige Zusammenhang zwischen dem L_{Aeq} und dem L_{den} wurde nach [6] für niederländische Windverhältnisse ermittelt. Eigene Berechnungen des LANUVs NRW bestätigen diesen Zusammenhang für küstennahe Standorte von Windenergieanlagen. Für Binnenlandstandorte ist der L_{den} nur um 2 dB bis 4 dB größer als der zugehörige L_{Aeq} -Wert. Wenn für Standorte in NRW ein „Korrekturwert“ von 4,7 dB zwischen dem L_{Aeq} und dem L_{den} angenommen wird, führt dieses tendenziell zu einer Überschätzung des tatsächlichen L_{den} -Wertes, da die tatsächlich anzusetzenden Werte für Binnenland-Standorte niedriger sind als für Küstenstandorte.)

Die TA Lärm gibt (für Gebiete, in denen Menschen wohnen sollen) getrennte Richtwerte für den Tag und für die Nacht an. Der Nachtrichtwert ist in derartigen Gebieten 15 dB niedriger als der Tagesrichtwert. Da Windenergieanlagen (zumeist) in der Nacht und am Tag in gleicher Weise betrieben werden, beschränkt die Forderung nach Einhaltung des Nachtrichtwertes in der Regel die zulässige maximale Schallemission der Anlagen. In der TA Lärm werden gebietsabhängig u.a. folgende Nachtrichtwerte angeben:

Dorf- und Mischgebiete:	45 dB(A)
Allgemeine Wohngebiete:	40 dB(A)
Reine Wohngebiete:	35 dB(A)

Für bewohnte Häuser im Außenbereich (z.B. einzelliegende Bauernhöfe) besteht regelmäßig der gleiche Schutzanspruch wie für Häuser in Dorf- und Mischgebieten.

Im Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen ist bei Immissionsorten, die in Dorf- oder Mischgebieten liegen (und für einzelne bewohnte Häuser im Außenbereich), der Nachweis zu führen, dass der Nachtrichtwert von 45 dB(A) sicher eingehalten wird. Im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens nach der TA Lärm wird daher entsprechend der LAI-WEA-Empfehlung [13] der Obere Vertrauensbereich des Immissionspegels prognostiziert. Die Unsicherheit der nach dem Interimsverfahren berechneten Immissionspegel wird entsprechend der LAI-WEA-Empfehlung auf Basis von $\sigma_{prog} = 1,0$ dB berechnet, was zu einer erweiterten Unsicherheit (also einem „Sicherheitszuschlag“) von (wenigstens) 1,3 dB führt. Hingegen erfolgten die Berechnungen der Geräuschbelastungen in den Studien, welche der Festlegung der WHO-Empfehlung $L_{den} < 45$ dB(A) zugrunde liegen, ohne Berücksichtigung der Unsicherheiten der angewandten Prognosemodelle. Um die WHO-Werte in TA Lärm-Werte zu überführen, ist daher eine Korrektur hinsichtlich des Zuschlags für den Oberen Vertrauensbereich erforderlich.

Es sind somit insgesamt folgende „Transformationen“ des WHO- L_{den} -Wertes von 45 dB(A) vorzunehmen, um dessen Schutzniveau mit demjenigen der TA Lärm zu vergleichen:

- Transformation „ L_{den} “ in Immissionspegel bei 8 m/s (Im weiteren wird vorausgesetzt, dass bei der standardisierten Geschwindigkeit von 8 m/s die maximale Immission des bestimmungsgemäßen Betriebs auftritt.):
 $L_{Aeq(8\text{ m/s})} = L_{den} - 4,7$ dB

Aus der WHO-Forderung „ $L_{den} < 45 \text{ dB(A)}$ “ folgt somit die TA-Lärm Forderung:

$$L_{Aeq(8m/s)} < 45 \text{ dB} - 4,7 \text{ dB} = 40,3 \text{ dB}$$

- Transformation „ISO 9613-2-Werte“ nach „Interimsverfahren“-Werte: + 3,3 dB
(Zur Abschätzung wurde das Referenzspektrum aus [14] angesetzt; es wurde eine Schallausbreitung über Ackerboden angesetzt. ($G = 1$).

Für die betrachtete hochliegende Schallquelle, die nach ISO 9613-2 in 400 m Abstand einen Pegel von 40,3 dB(A) erzeugt, beträgt der nach dem Interimsverfahren berechnete Immissionspegel $40,3 \text{ dB} + 3,3 \text{ dB} = 43,6 \text{ dB}$.

[Falls die betrachtete hochliegende Schallquelle in 2000 m Abstand nach ISO 9613-2 einen Pegel von 40,3 dB(A) verursachen würde, würde Immissionsbelastung nach dem Prognosemodell „Interimsverfahren“ zu $40,3 \text{ dB} + 3,6 \text{ dB} = 43,9 \text{ dB}$ berechnet.]

- „Unsicherheitsbetrachtung“: + 1, 3 dB
(Bei der Berechnung wurde der Wert der Serienstreuung mit $\sigma_p = 0 \text{ dB}$ angesetzt.)

Im Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen ist die Unsicherheit des prognostizierten Immissionspegels durch die Abschätzung des Oberen Vertrauensbereichs zu Lasten des Antragstellers zu berücksichtigen.

Für den in 400 m Abstand zu den Anlagen liegenden Immissionsort würde die Prüfbedingung im deutschen Genehmigungsverfahren lauten:

$$L_{Aeq} = 43,6 \text{ dB} + 1,3 \text{ dB} = 44,9 \text{ dB(A)} \leq IRW = 45 \text{ dB}$$

Für den in 2km Abstand zu den Anlagen liegenden Immissionsort würde die Prüfbedingung im deutschen Genehmigungsverfahren heißen:

$$L_{Aeq} = 43,9 \text{ dB} + 1,3 \text{ dB} = 45,2 \text{ dB(A)} \leq IRW = 45 \text{ dB}$$

Das Schutzniveau der WHO-Empfehlung „ $L_{den} < 45 \text{ dB(A)}$ “ entspricht somit quasi dem gleichen Schutzniveau, welches im Rahmen des Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen durch den Nachweis der Einhaltung des nächtlichen TA-Lärm-Richtwertes von 45 dB(A) sichergestellt wird. Dieses gilt nach ersten Berechnungen des Autors - sofern bei der Berechnung von L_{den} statt des standortunabhängigen Wertes von 4,7 dB die örtlichen Windverhältnisse berücksichtigt werden - (zumindest im Binnenland) häufig auch für den Fall, dass die Windenergieanlagen nachts schallreduziert betrieben werden.

Literatur

- [1] WHO Regional Büro für Europa (2018): „Environmental noise guidelines for the European Region“, www.euro.who.int/de/env-noise-guidelines
- [2] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwbund_26081998_IG19980826.htm
- [3] Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0049&from=EN>

- [4] Feldhaus, G., Tegeder, K.: „Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm), Sonderdruck aus Feldhaus Bundesimmissionsschutzrecht – Kommentar“, Verlag C.F. Müller (2014), Seite 226, Rd.-Nr. 71
- [5] Kuwano, S., Yano, T., Kageyama, T., Sueoka, S., Tachibana, H.: „Social survey on wind turbine noise in Japan“, Noise Control Eng. J. 62(6) 2014, S. 503-520
- [6] Janssen, S.A., Vos, H., Eisses, A.R., Pedersen, E.: „A comparison between exposure-response relationship for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources“, J. Acoust. Soc. Am. 130(6), 2011, S. 3746-3753
- [7] Keith, S.E., Feder, K., Voicescu, S.A., Soukhovtsev, V., Denning, A., Tsang, J., Broner, N., Leroux, T., Richarz, W., van den Berg, F.: „Wind turbine sound pressure level calculations at dwellings“, J. Acoust. Soc. Am 139(3), 2016, S. 1436-1442
- [8] Pedersen, E., Perrson Waye, K.: „Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose-response relationship“, J. Acoust. Soc. Am. 116(6), (2004), S. 3460-3470
- [9] Pedersen, E., Persson Waye, K.: „Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments“, Occup. Environ. Med. 64(7), 2007, S. 480-486
- [10] van den Berg, F., Pedersen, E., Bourma, J., Bakker, R.: „Project WINDFARMperception. Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents. Groningen: University of Groningen, 2008
- [11] Pedersen, E., van den Berg, F., Bakker, R., Bouma, J.: „Response to noise from modern wind farms in The Netherlands“, J. Acoust. Soc. Am. 126(2), 2009, S. 634-643
- [12] Guski, R., Schreckenber, D., Schuemer, R.: „WHO environmental noise guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and annoyance“, Int. J. Environ Res. Public Health 2017
- [13] „Hinweise zum Schallimmissionsschutz bei Windkraftanlagen (WKA), Überarbeiteter Entwurf vom 17.03.2016 mit Änderungen PhysE vom 23.06.2016, Stand 30.06.2016“
- [14] Dokumentation zur Schallausbreitung: Interimsverfahren zur Prognose der Geräuschimmissionen von Windkraftanlagen, Fassung 2015-05.1 www.din.de/blob/187138/eb8abdf16f058490895cc3105f700533/interimsverfahren-data.pdf