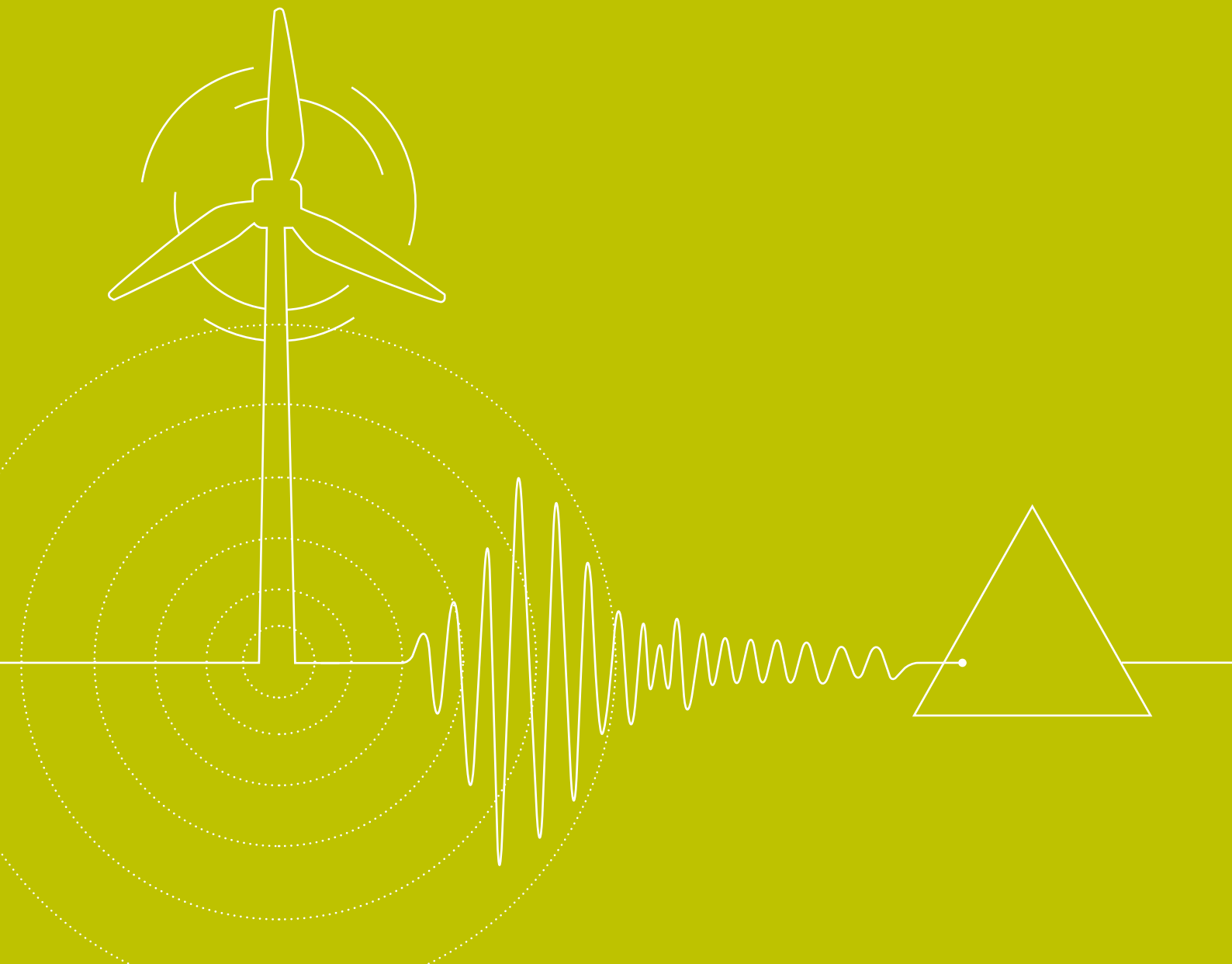
FACHAGENTUR
WINDENERGIE AN LAND

HINTERGRUNDPAPIER

Erschütterungsimmissionen von Windenergieanlagen

Prognose der Ausbreitung



Erschütterungsimmissionen von Windenergieanlagen

Prognose der Ausbreitung

Prof. Dr. Horst Rüter (HabourDom GmbH),
Dr. Tobias Neuffer, Dr. Simon Kremers (DMT GmbH & Co. KG)

Herausgegeben von der Fachagentur Windenergie an Land e. V.

Gefördert durch:

EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum und Beschäftigung

Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen

Leitmarkt Agentur.NRW

EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

Inhalt

Abbildungsverzeichnis 4

Tabellenverzeichnis 4

Zusammenfassung 5

1 Einführung 6

2 Die DIN 4150 Teil 1 - Grundsätzliches 7

3 Vorgehensweise bei der Vorermittlung von Erschütterungsimmissionen 8
- 3.1 Erschütterungsemission einer Windenergieanlage 8
- 3.2 Ausbreitung von Schwingungen von der Quelle zum Immissionsort 10
  - 3.2.1 Geometrische Amplitudenabnahme 12
  - 3.2.2 Amplitudenabnahme durch Dämpfung 13
  - 3.2.3 Gesamt-Amplitudenabnahme 13
- 3.3 Spektren 15
- 3.4 Pegel 16
- 3.5 Schwingungskomponenten 16
- 3.6 Abstrahl-Charakteristiken 16
- 3.7 Windparks 17

4 Messergebnisse 18
- 4.1 Erschütterungsleistung 18
- 4.2 Messung der Amplitudenabnahme mit der Entfernung 19

Abkürzungsverzeichnis 20

Danksagung 21

Literatur- und Quellenverzeichnis 22

Impressum 23

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Teilchenbewegung bei einer Oberflächenwelle vom Typ Rayleigh. Zu beachten ist die exponentielle Abnahme der Schwingungsgröße v mit der Tiefe. Die Teilchen bewegen sich auf retrograden Ellipsen. 10

Abbildung 2: Seismogramm einer einstündigen Rauschaufzeichnung an einer Bohrlochmessstation eines Netzwerkes zur Überwachung induzierter Seismizität. 11

Abbildung 3: Geometrische Amplitudenabnahme. 13

Abbildung 4: Lineare Abhängigkeit des Abklingkoeffizienten α von der Frequenz für verschiedene Dämpfungsgrade ..13

Abbildung 5: Amplitudenabnahme durch Dämpfung: D = 0,01, Frequenz 1 (dunkel), 2,4,8 (hell) Hz. Links: log v gegen log R, log-log-Darstellung. Rechts: log v gegen R, R in Metern, log-lin-Darstellung....14

Abbildung 6: Gesamt-Amplitudenabnahme mit der Entfernung durch Geometrie + Dämpfung. Aufgetragen ist links: log v gegen log R, rechts: log v gegen R. Frequenz: 8 Hz, D = 0.01 (dunkel), 0,1, 1, 2, 3 (hell) 14

Abbildung 7: Amplitudenabnahme mit der Entfernung durch Geometrie + Dämpfung für die Frequenzen 1 (dunkel), 2, 4 und 8 (hell) Hz 15

Abbildung 8: Geometrische Amplitudenabnahme gemäß Abbildung 3 aber mit einer dB-Skala (Pegel) gegen log R. ...16

Abbildung 9: Amplitudenabnahme durch Dämpfung für 3,2 und 7,25 Hz (Messbeispiel) 19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Charakterisierung von Windenergieanlagen nach DIN 4150, Teil 1 8

Tabelle 2: Berechnung von Erschütterungsleistungen und Erschütterungsleistungspegeln aus Messungen der Schwinggeschwindigkeiten in der näheren Umgebung von Windenergieanlagen. 18

Tabelle 3: Abklingkoeffizienten, Dämpfungsgrad und Güte in Abhängigkeit von der Frequenz (Messbeispiel) 19

Zusammenfassung

Die DIN 4150 „Erschütterungen im Bauwesen“, Teil 1: „Vorermittlung von Schwingungsgrößen“ gibt ausreichend Anleitung für die Prognose oder Vorermittlung von Erschütterungen, die von Windenergieanlagen (WEA) ausgehen (Prognosetool). Ausgehend von der Erschütterungsleistung P_E der Anlage lassen sich die Erschütterungen im weiteren Umfeld prognostizieren, wenn der Dämpfungsgrad D oder alternativ dessen Kehrwert die Güte *Q*, die die Dämpfung der Erschütterung bei der Ausbreitung im Untergrund beschreiben, ausreichend sicher abgeschätzt werden kann. Die Erschütterungsleistung P_E als Emissions-Kennwert einer WEA lässt sich aus Messungen der Schwinggeschwindigkeiten v_1 im Nahbereich der Anlage bestimmen. Hierbei wird neben dem Anlagentyp auch die Anbindung der Anlage an den Untergrund einen Einfluss haben. Langfristig könnten die Erschütterungsleistungen verschiedener Anlagetypen in Katalogen oder Datenbanken gelistet werden.

Der Wert v_1, also eine Schwinggeschwindigkeit im Nahbereich als Referenz, aus dem die Erschütterungsleistung P_E zu berechnen ist, kann alternativ durch einfache Messungen an einer ähnlichen WEA auf ähnlichem Untergrund erhalten werden. Diese Messungen sollten an einer Anlage durchgeführt werden, die mit Nennleistung oder nahezu Nennleistung läuft. Erschütterungsleistungen verschiedener Anlagen unterschiedlichen Typs und unterschiedlicher Leistungsklassen werden zunehmend verfügbar sein, abhängig auch davon, wie breit die anstehende Problematik wissenschaftlich und in der Praxis aufgearbeitet wird.

Der Wert für den Dämpfungsgrad D (oder die Güte *Q*) könnte durch eine zeitgleiche Messung in verschiedenen, auch größeren Abständen von einer vergleichbaren Anlage gewonnen werden. Ersatzweise können auch Literaturwerte verwendet werden. Werte für D (oder *Q*), die für gleichartige Erschütterungswellen ermittelt wurden, die von andersartigen Quellen (z. B. Sprengung, Fallgewicht, Vibrator), also nicht von Windenergieanlagen ausgehen, sind gleichwertig nutzbar, da die Ausbreitung der Erschütterungen im Wesentlichen quellunabhängig ist, solange es sich um Quellen an der Erdoberfläche handelt. Diese alternativen Quellen sollten ein den WEA ähnliches Frequenzband überdecken. Das größte Datenvolumen wird hier wohl aus Messungen der Ausbreitung von Oberflächenwellen bei seismischen Explorationsmaßnahmen zur Verfügung stehen. Diese Datenquelle wurde bisher in diesem Zusammenhang nur unzureichend genutzt. Insbesondere ist anhand umfangreicher Messdaten neben der Erarbeitung von Werten für D oder *Q* bei unterschiedlicher oberflächennaher Geologie auch zu prüfen, ob der in D enthaltene Ansatz einer linearen Frequenzabhängigkeit ausreichend gegeben ist.

Die DIN 4150 empfiehlt als ersten Ansatz D = 0,01 entsprechend für den Kehrwert 1/D die Güte *Q* = 100 (engl. quality factor, *Q*-factor). Insbesondere in trockenen, oberflächennahen Sedimenten kann D aber auch deutlich größer und *Q* entsprechend kleiner sein.

Gemessene Werte sowohl zu v_1, und damit die Bestimmung der Leistung P_E, als auch zu D oder *Q* sind allemal Literaturwerten oder Werten aus irgendwelchen Vorschriften vorzuziehen, da sowohl die technische Ausgestaltung der Quelle (Windenergieanlage) als auch die Geologie des Untergrundes entlang des Wellenwegs vielfältig und komplex sein können.

1 Einführung

Neben Schallimmissionen werden von Windenergieanlagen auch Erschütterungsimmissionen in einer weiteren Umgebung verursacht. Diese breiten sich im Gegensatz zu den Schallemissionen von der Quelle, also der Windenergieanlage ausgehend, nicht in der umgebenden Luft, sondern im Untergrund aus, wobei die Amplituden der Erschütterung mit zunehmendem Abstand von der Quelle abnehmen. Die Wellenausbreitung im Untergrund ist einerseits physikalisch wesentlich anspruchsvoller als die Wellenausbreitung (Schall) in der Luft, andererseits aber nicht zeitvariabel, da sich die zugrundeliegenden Verhältnisse im Untergrund im Gegensatz zu denen in der Luft auch in längeren Zeiträumen nicht ändern.

Die Erschütterungen erreichen selten, und wenn, dann nur in unmittelbare Quellnähe, eine Stärke, in der sie gespürt werden können. In keinem Fall können sie Schäden, z. B. an Gebäuden, verursachen. Dennoch sind sie von Interesse, da sie auf hochempfindliche Einrichtungen einwirken können. Von besonderer Bedeutung ist hier die Einwirkung auf seismologische Stationen (Erdbebenmessstationen), die vorwiegend von staatlichen Erdbebendiensten oder wissenschaftlichen Instituten zur Erdbebenüberwachung sowie aus generellem wissenschaftlichem Interesse betrieben werden. Diese Stationen sind bestimmungsgemäß so konzipiert, dass sie kleinste Erschütterungen mit Schwinggeschwindigkeiten im Bereich von Nanometern pro Sekunde aufnehmen und aufzeichnen können, dementsprechend können sie auch durch sehr kleine Erschütterungen gestört werden. Bedingt durch den technischen Fortschritt werden die Stationen immer besser bzw. empfindlicher, wodurch auch die Wahrscheinlichkeit möglicher Störeinflüsse zunimmt.

Infolgedessen sind die hier behandelten Erschütterungsimmissionen zunehmend Thema, wenn es um die Genehmigung neuer Windenergieanlagen in der Nachbarshaft solcher Stationen geht. Nachvollziehbare Prognoseverfahren zur Vorermittlung möglicher Einwirkungen sind im Zusammenhang mit den Genehmigungsverfahren für den Einzelfall wünschenswert und notwendig.

2 Die DIN 4150 Teil 1 - Grundsätzliches

Die DIN 4150 „Erschütterungen im Bauwesen Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen“ ist die in Deutschland maßgebliche Norm zur Vorermittlung (Prognose) von Erschütterungen, die von definierten, meist gewerblichen, Quellen ausgehen und sich in der Nachbarschaft als Erschütterungsimmissionen ausbreiten und auswirken.

Die Norm stellt generell fest: „*Die Diskussion* […] *der hier zu regelnden Thematik ergab, dass es zur Zeit kein schematisch anzuwendendes Verfahren zur Vorermittlung der Schwingungsgrößen gibt, das allgemein verbindlich vorgeschrieben werden kann. Aufgabe der Norm kann vielmehr nur sein, die Verlässlichkeit der Vorermittlung bestmöglich sicherzustellen. Dieses wird durch die Beschreibung der grundsätzlichen Vorgehensweise* […] *erreicht*.“[1]

Diese Aussage gilt selbstverständlich auch für den hier dargestellten Anwendungsfall auf Erschütterungsimmissionen, die durch Windenergieanlagen verursacht werden. Es wird demnach hier kein automatisiert anzuwendendes Prognosetool vorgestellt, sondern die grundsätzliche und wissenschaftlich begründete Vorgehensweise für den Einzelfall beschrieben.

[1] Aus der DIN 4150 übernommene oder zitierte Textteile werden hier im Weiteren nicht besonders gekennzeichnet.

3 Vorgehensweise bei der Vorermittlung von Erschütterungsimmissionen

3.1 Erschütterungsemission einer Windenergieanlage

In der DIN 4150, Teil 1, werden die Erschütterungsquellen nach den in Tabelle 1 dargestellten Kriterien charakterisiert. Der rechten Spalte ist zu entnehmen, wie diese Kriterien umgesetzt wurden.

Tabelle 1: Charakterisierung von Windenergieanlagen nach DIN 4150, Teil 1

Kriterium DIN 4150, Teil 1	Anwendung auf Windenergieanlagen
Quellentyp geometrisch	Punktquelle
Quellentyp zeitlich	kontinuierliche Quelle
Häufigkeit der Emission	permanent, nicht zu beeinflussen
Frequenzverteilung	0,3-10 Hz
Einwirkungsbereich (räumlich)	unbegrenzt
Vorhandensein der Quelle (vorübergehend oder dauernd)	dauernd
zeitliche Beeinflussbarkeit	nicht beeinflussbar

Eine Erschütterungsprognose besteht immer aus zwei Komponenten:

1. Der Feststellung der von einer Quelle ausgehenden Erschütterung (Erschütterungsleistung P_E - Emission) und
2. der Amplitudenabnahme der Erschütterung auf dem Weg zwischen Quelle und dem Einwirkungsort der Erschütterungsimmission.

Beide Komponenten zusammen bestimmen die Erschütterungsimmission am Einwirkungsort.

Entsprechend der Vorgehensweise beim Lärmschutz ist es auch bei der Betrachtung von Erschütterungsimmissionen hilfreich, Emissionswerte (Angaben zur Quelle) von Immissionswerten (Messwerte und deren Beurteilung an einem Einwirkungsort) zu unterscheiden. Für die Emission werden die Größen „Erschütterungsleistung" bzw. „Erschütterungsleistungspegel" verwendet. Ein Vorteil dieser Größen ist es, dass sie - genau wie die entsprechenden Größen im Lärmschutz - unabhängig von der Entfernung zwischen Quelle und einem Messort sind.

Hilfreich ist es, die Erschütterungsleistung der Quelle, also hier einer Windenergieanlage eines bestimmten Typs, sozusagen auf dem Typenschild als Kennwert der Anlage anzugeben. Diese sollte aus Messungen außerhalb des Fundaments, aber im Nahbereich der Anlage ermittelt werden.[2] Konsequent ist eine Angabe dieser Erschütterungsleistung P_E in Watt ($kg\ m^2\ s^{-3}$). In diese Angabe gehen neben den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten auch die mittlere Dichte des Untergrundes (ρ) und die Wellengeschwindigkeit (c_R) (Airy-Phasen der Rayleighwellen) ein, multipliziert mit der zugehörigen Zylindermantelfläche (M). Diese ergibt sich zu 2π R H, wobei H die Zylinderhöhe und R der Zylinderradius sind. Die Zylinderhöhe ist so zu wählen, dass die Energie der Oberflächenwelle größtenteils in diesem Tiefenbereich transportiert wird. Die Amplituden der Oberflächenwellen nehmen mit der Tiefe frequenzabhängig schnell (exponentiell) ab (siehe Abbildung 1), sodass der Energietransport praktisch auf die Tiefe einer Wellenlänge konzentriert ist. Für die Airy-Phasen der Rayleighwellen und die hier betrachteten Frequenzen von 0,5 - 8 Hz ergeben sich Wellenlängen, die einen pauschalen Ansatz von 100 m für H gestatten. Es wird also unterstellt, dass die Erschütterungsenergie meist in einem Bereich bis zu 100 m Tiefe stattfindet. Für diesen Tiefenbereich werden die Schwingungsgrößen als konstant und gleich zu den Werten an der Oberfläche angesehen.

[2] FA Wind (2021a).

Die Erschütterungsintensität, also der Energiedurchfluss durch einen Quadratmeter der Mantelfläche M pro Sekunde, ergibt sich zu:

$I_E = v^2 \rho c_R$ mit

I_E = Erschütterungsintensität [kg s^{-3}] oder [W m^{-2}]

v = Schwinggeschwindigkeit (Maximum) [mm s^{-1}]

ρ = Dichte des Untergrundes [kg m^{-3}]

c_R = Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen (Airy-Phase der Rayleighwellen) [m s^{-1}]

Das Produkt ρc_R ist die Impedanz Z:

$Z = \rho c_R$ [kg m^2 s^{-1}]

Es gilt also für die Intensität:

$I_E = v^2 Z$ [kg s^{-3}]

Daraus ergibt sich die Erschütterungsleistung der Quelle (in Watt) zu:

$P_E = I_E M$ [kg m^2 s^{-3}] oder [W]

Entsprechend:

$P_E = v^2 Z M$ [kg m^2 s^{-3}] oder [W]

Mit:

M = Mantelfläche der zylinderförmigen Wellenfront, $2\pi R H$ [m^2] und dabei

H = Höhe des Zylinders der Wellenfront [m]

Der Erschütterungsleistungspegel ist dann:

P_E (dB) = 10 log P_E (dB)

Rechenbeispiel: Für einen Messwert für die maximale Schwinggeschwindigkeit von 0,00001 m/s in 100 m Entfernung würde sich dann als „Erschütterungsleistung" ergeben:

v = 10 µm s^{-1} = 0,00001 m s^{-1}

ρ = 1,5 g cm^{-3} = 1,5 kg m^{-3}

C_R = 700 m s^{-1}

R = 100 m

H = 100 m

Hieraus ergeben sich:

Z = 1.050.000 kg m^{-2} s^{-1}

I_E = 0,105 kg s^{-3}

$P_E = v^2 \rho c_R M = 10^{-6}$ m^2 s^{-2} 1,5 10^3 kg m^{-3} 700 m s^{-1} 6,28 100 m 100 m = 6,6 W.

Oder für den Erschütterungsleistungspegel:

10 log P_E = 10 log I_E + 10 log M = -39,8 + 48 = 8,2 dB

Bei den Pegelberechnungen ist dabei der Bezugswert immer der Einheitswert der jeweiligen SI-Einheit (1 Watt bzw. 1 Watt/m^2 bzw. 1 m^2).

Anzumerken ist, dass im Vergleich zu den Schalleistungspegeln im Lärmschutz die hier angegebenen Erschütterungsleistungspegel klein erscheinen. Dies liegt daran, dass im Lärmschutz vereinbarungsgemäß nicht die Bezugsschallintensität von 1 W m^{-2}, sondern die Bezugsschallintensität von I_0 = 1 pWm^{-2} = 10^{-12} W m^{-2} gewählt wird, die sich auf die Hörschwelle des menschlichen Ohres bezieht. Die Pegelangaben werden dadurch um 120 dB größer. Auch bei Erschütterungspegeln wären ähnliche Vereinbarungen denkbar.

Die Erschütterungsleistung bzw. der Erschütterungsleistungspegel sind geeignete Größen, um die Erschütterungsemissionen einer Anlage zu beschreiben. Sie sind geeignet, um verschiedene Anlagentypen, Leistungsklassen, Turm- oder Fundamentkonstruktionen einschließlich der Anbindung an den Untergrund einzuordnen. Diese Größen definieren dann den Ausgangspunkt für Berechnungen der Erschütterungsausbreitung und damit der Erschütterungsimmissionen an vorgegebenen Einwirkungspunkten wie z. B. seismologischen Stationen.

Vorschläge zur Ermittlung von Erschütterungsleistungen sind im Hintergrundpapier der FA Wind „Erschütterungsleistung einer Windenergieanlage“[3] im Detail beschrieben. Bei den Ermittlungen der Erschütterungsleistung wurde ausschließlich eine geometrisch bedingte Abnahme der Amplituden mit der Entfernung unterstellt, da eine zusätzliche Dämpfung bei diesen kleinen Entfernungen noch keine oder nur eine vernachlässigbare Rolle spielt (vgl. Kap. 3.2).

Aus den Erschütterungsleistungen lassen sich die Schwinggeschwindigkeiten v_1 in einer quellnahen Referenzentfernung R_1 berechnen. In dieser Arbeit wird durchgehend die Referenzentfernung 100 m gewählt, was aber nicht zwingend ist. Aus dem Wert v_1 lassen sich dann die Erschütterungsimmissionen in jeder anderen Entfernung berechnen, wie im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

3.2 Ausbreitung der Schwingungen von der Quelle zum Immissionsort

Die von der Windenergieanlage in den Untergrund eingeleiteten Schwingungsenergien können sich in Form verschiedener Wellenarten im Boden ausbreiten.[4] Es können Raumwellen (Kompressions- (P) und Scherwellen (S)) sowie Oberflächenwellenauftreten, die je nach Art der Quelle und Energieeinleitung in den Boden unterschiedlich stark angeregt werden. Innerhalb der Gruppe der Oberflächenwellen sind besonders die langsam laufenden Airy-Phasen[5] der Oberflächenwellen von Bedeutung, da sie die in den Erschütterungen transportierte Energie auf sich konzentrieren.

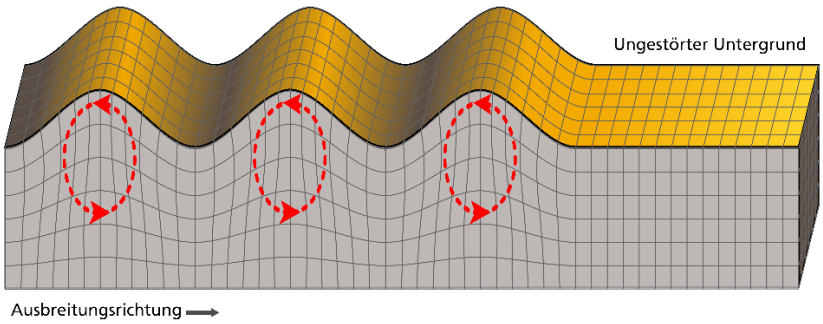


Abbildung 1: Teilchenbewegung bei einer Oberflächenwelle vom Typ Rayleigh. Zu beachten ist die exponentielle Abnahme der Schwingungsgröße v mit der Tiefe. Die Teilchen bewegen sich auf retrograden Ellipsen. Quelle: nach D. Ilien, CCO, verändert

Während sich Raumwellen kugelförmig ausbreiten, breiten sich Oberflächenwellen zylinderförmig aus, die Wellenfront stellt also die Mantelfläche eines Zylinders mit senkrecht stehender Achse, in der die Quelle liegt, dar. Infolgedessen ist der Flächenzuwachs an der Oberfläche des Zylinders (Mantelfläche, M) resp. der Kugel in Abhängigkeit vom Radius unterschiedlich. Bei dem Zylinder wächst diese Fläche mit der Entfernung zur Quelle R, bei der Kugel mit R^2. Ist die sich ausbreitende Energie konstant, wird die Energie pro Flächeneinheit (Intensität, Leistungsdichte) beim Zylinder mit 1/R,

[3] FA Wind (2021a).

[4] https://www.geo.uni-hamburg.de/geophysik/studium/bsc-geophysik-ozeanographie/module/vertiefung-geophysik/vgsw/seismischewellen-mueller.pdf.

[5] Die Airy-Phase ist ein Minimum in der Dispersionskurve der Gruppengeschwindigkeit einer Oberflächenwelle. Hier ist die Gruppengeschwindigkeit für ein breiteres Frequenzband gleich, was zu großen Amplituden im Zeitbereich führt. Sehr oft stellen die der Airy-Phase zuzuordnenden Schwingungen die größten Schwingungsamplituden.

bei der Kugel mit $1/R^2$ abnehmen, lineare Schwingungsgrößen wie Schwinggeschwindigkeiten, die ja proportional zur Wurzel aus der Energie sind, demensprechend mit $1/R^{0,5}$ für die zylinderförmige Ausbreitung und 1/R für die kugelförmige Ausbreitung.

Bei Erschütterungsquellen in Oberflächennähe erfolgt die Ausbreitung der Schwingungen vorwiegend an der Erdoberfläche als Oberflächenwellen (Rayleighwelle, Lovewelle). Da es sich bei den Windenergieanlagen um Quellen an der Oberfläche handelt, ist es hier ausreichend, nur Oberflächenwellen zu betrachten, da diese durchweg an den Einwirkungsorten die größten Amplituden haben und zudem mit zunehmender Quellentfernung, wie oben beschrieben, langsamer abnehmen als Raumwellen (Kugelwellen).

Um den Bereich der freien Wellenausbreitung (Fernfeld) von den komplexen Vorgängen in unmittelbarer Nähe der Erschütterungsquellen (Nahfeld) zu trennen, wird ein Bezugsabstand R_1 zur Quellenmitte festgelegt, der den kontinuierlichen Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld eingrenzt. Für alle Erschütterungsquellen, die wie Windenergieanlagen als Punktquellen idealisiert werden können, ist der Bezugsabstand zum Fernfeld definiert durch die Größe der Quelle und durch die vorherrschende Wellenlänge der Erschütterungen. Bei Windenergieanlagen, deren Fundamente ja räumlich relativ klein sind, ist ein Abstand von 100 m ausreichend und angebracht, um ausreichend vorwiegend Fernfeldbedingungen aufzuweisen.

Als Maß für die Größe einer Erschütterung wird in der DIN 4150, Teil 1, als Wellenfeldgröße meist die Schwinggeschwindigkeit v gewählt. Verglichen mit den möglichen Alternativen „Schwingweg" und „Schwingbeschleunigung" ist die Schwinggeschwindigkeit zur Beurteilung möglicher Gebäudeschäden am besten geeignet (DIN 4150, Teil 3). Die drei Größen unterscheiden sich durch die Frequenzbewertung, sie können leicht - durch Integration bzw. Differentiation der Zeitreihen - ineinander umgerechnet werden. Benutzt wird in der Regel die maximale in einem Zeitfenster aufgetretene Schwinggeschwindigkeit v_{max}, die dann üblicherweise PGV (engl. *peak ground velocity*) genannt wird. Geht es um einen Kennwert für einen längeren Zeitraum, hat es sich eingebürgert, sogenannte I_{95}-Werte zu nennen, die angeben, welcher Wert (z. B. von v) zu 95 Prozent der Zeit nicht überschritten wurde (Ritter/FKPE 2012, GTV 1101[6]). Der Wert I_{95} wurde gewählt, weil er ziemlich genau der doppelten Standardabweichung einer Gaußverteilung entspricht (95,45%).

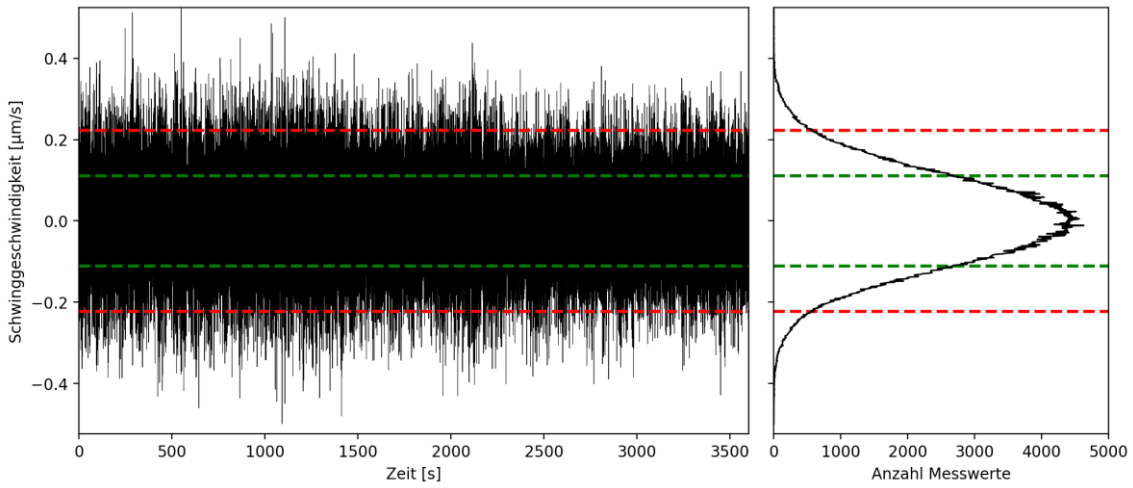


Abbildung 2: Seismogramm einer einstündigen Rauschaufzeichnung an einer Bohrlochmessstation eines Netzwerkes zur Überwachung induzierter Seismizität. Die Histogramme zu der Zeitreihe zeigen eine Gaußverteilung, wobei die grünen Linien den RMS (root mean square, Standardabweichung) und die roten Linien den I_{95} (doppelte Standardabweichung) beschreiben. I_{95} liegt hier deutlich unterhalb der lokal geforderten ±2 µm/s. Quelle: Neuffer, Kremers (2017) nach Groos, Ritter (2009)

Im Fernfeld (ab ca. 100 m) wird die Abnahme der Amplitude der Schwinggeschwindigkeit v gemäß DIN 4150, Teil 1, näherungsweise beschrieben durch

$$v = v_1 \, (R/R_1)^{-n} \, e^{-\alpha (R-R_1)}$$

[6] GtV (2011).

Diese Formel beschreibt die Amplituden-Entfernungs-Beziehung bzw. die Amplituden-Entfernungs-Kurve. In der Explorationsseismik ist hierfür der Ausdruck AVO (*amplitude versus offset*) üblich.

Dabei ist

v	die Amplitude der Schwinggeschwindigkeit in der Entfernung R [m s^{-1}]
v_1	die Amplitude der Schwinggeschwindigkeit in der Entfernung R_1 [m s^{-1}]
R_1	der Bezugsabstand z. B. 100 m [m]
R	die Entfernung von der Quelle [m]
n	der Exponent, der von Wellenart, Quellengeometrie und Art der Schwingung abhängt (hier -0,5) [-]
α	der Abklingkoeffizient, in $\alpha = 2\pi D/\lambda$ [m^{-1}] (engl. *attenuation coeffizient*)
D	der Dämpfungsgrad [-] (engl. *dissipation factor,* in der engl. Lit. oft Q^{-1})
Q	Güte [-] (engl. *quality factor*)
λ	die maßgebende Wellenlänge, $\lambda = c_R/f$ [m]
c_R	die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle [m s^{-1}]
f	die Frequenz, in Hz [s^{-1}]
e	die Euler'sche Zahl [-][7]

Die Amplitudenabnahme mit der Entfernung setzt sich also multiplikativ aus zwei grundsätzlich verschiedenen Termen zusammen:

$v_1 (R/R_1)^{-n}$	Geometrieterm, Potenzialterm (*geometrical spreading*)
$e^{-\alpha (R-R_1)}$	Dämpfungsterm, Exponentialterm

Wird, wie häufig üblich, nicht die Größe v, sondern deren Logarithmus log v betrachtet, so liest sich die Amplitudenabnahme als

$$\log v = \log v_1 - n \log (R/R_1) - \alpha (R-R_1).$$

Hier sind die beiden Terme nun natürlich additiv miteinander verknüpft. Der erste Term (Geometrieterm) ist in einer log-log-Darstellung eine Gerade der Steigung n, der zweite Term (Dämpfungsterm) in einer log-lin-Darstellung eine Gerade mit der Steigung α.

3.2.1 Geometrische Amplitudenabnahme

Die geometrische Amplitudenabnahme entsprechend $(R/R_1)^{-n}$ (engl. *geometrical spreading*) wird durch die Verminderung der Energiedichte mit wachsender Entfernung von der Erschütterungsquelle hervorgerufen (Vergrößerung der Wellenfront) und durch den Exponent n vorgegeben. Dieser ist für die hier betrachteten Oberflächenwellen, die von einer kontinuierlichen Punktquelle an der Erdoberfläche ausgehen, entsprechend der Vergrößerung der Mantelfläche des Zylinders, in dem sich die Welle ausbreitet, -0,5. Dieser Wert ist unabhängig von der Frequenz der Schwingungen und auch unabhängig von der lokalen Untergrundbeschaffenheit

Die geometrische Ausbreitung ist nicht mit einer Minderung der in den Erschütterungen mitgeführten kinetischen Energie verbunden, sondern diese wird nur auf eine immer größere Fläche (Wellenfront, Mantelfläche) verteilt.

[7] https://de.wikipedia.org/wiki/Leonhard_Euler.

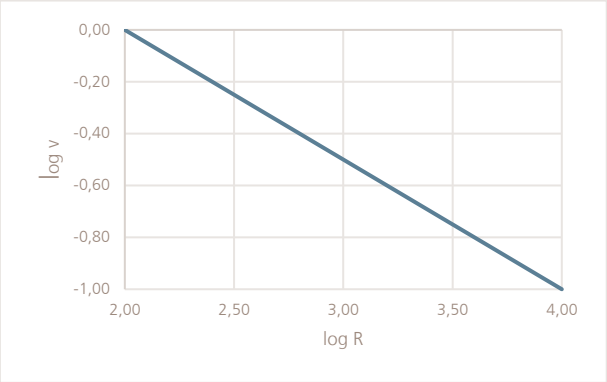


Abbildung 3: Geometrische Amplitudenabnahme. Aufgetragen ist log v gegen log R. Die Steigung entspricht $R^{-1/2}$, R in Metern.

3.2.2 Amplitudenabnahme durch Dämpfung

Der Exponentialterm entspricht der Dämpfung und ist frequenzabhängig. Durch die Dämpfung wird die kinetische Energie der Wellen in Wärme umgewandelt und so gemindert. Der Grad dieser Umwandlung ist direkt von der noch vorhandenen kinetischen Energie abhängig, woraus sich physikalisch zwingend der exponentielle Ansatz (R im Exponenten) ergibt. Neben der Dämpfung könnte auch Streuung zu einer Amplitudenabnahme mit der Entfernung führen. Da hier die physikalischen Gegebenheiten ähnlich sind wie bei der Dämpfung (exponentielle Abnahme), werden diese beiden Einflüsse in der Regel, und so auch in dieser Arbeit, zusammengefasst. D und demensprechend *Q* beschreiben also die Summe dieser beiden physikalisch unterschiedlichen Einflüsse.

Auch in der DIN 4510, Teil 1, wird für die Dämpfung eine lineare Abhängigkeit von der Frequenz unterstellt ($\alpha = 2\pi D/\lambda$), sodass D oder dessen Kehrwert *Q*[8] konstant sind. Dieses sogenannte *„constant Q material"* wird in den Geowissenschaften häufig angetroffen oder angenommen.[9]

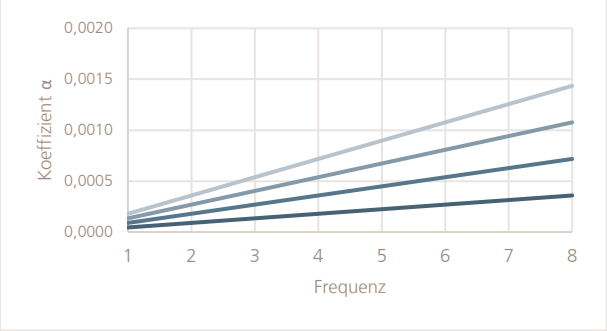


Abbildung 4: Lineare Abhängigkeit des Abklingkoeffizienten α von der Frequenz für verschiedene Dämpfungsgrade D = 0,005 (dunkel) bis 0,02 (hell)

Entsprechend der mathematischen Eigenschaften eines Potenz- resp. Exponentialterms bezieht sich die Entfernungsabhängigkeit auf R/R_1 resp. $R - R_1$.

3.2.3 Gesamt-Amplitudenabnahme

In einer log-log-Darstellung ist der Geometrieterm eine Gerade (Abbildung 3Abbildung 5), der Dämpfungsterm nach unten rechts gekrümmt. Beides ist in der DIN 4150, Teil 1, grafisch dargestellt (Abbildungen 1 und 2 der DIN 4150, Teil 1). Für die Darstellung der Dämpfung empfiehlt sich im Gegensatz hierzu eine lineare Entfernungsskala (log-lin-Darstellung), da dann die durch die Dämpfung bedingte Abklingkurve eine Gerade ist (Abbildung 5, rechts).

[8] In dieser Arbeit wird oft D und *Q* nebeneinander benutzt. Da *Q* der Kehrwert von D, also 1/D, ist, wäre das Nutzen eines dieser beiden Werte ausreichend. In der DIN 4150-1 wird D benutzt in der Fachliteratur aber fast ausschließlich *Q*. *Q* hat zudem einen anschaulicheren Wertebereich (etwa 20 – 200). Aus diesem Grunde werden in dieser Arbeit beide Werte parallel verwendet.

[9] Gao, L., Pan, Y., Tian, G. *et al.* (2018).

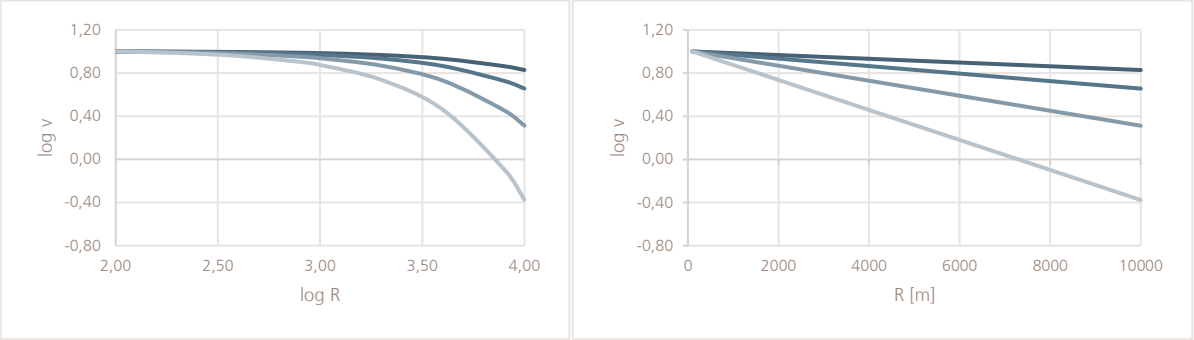


Abbildung 5: Amplitudenabnahme durch Dämpfung: D = 0,01, Frequenz 1 (dunkel), 2,4,8 (hell) Hz. Links: log v gegen log R, log-log-Darstellung. Rechts: log v gegen R, R in Metern, log-lin-Darstellung

Durch die Beobachtung der Frequenzabhängigkeit lässt sich erkennen, wie diese beiden Faktoren im Einzelfall zusammenwirken. Da die geometrische Amplitudenabnahme fest vorgegeben ist, kann sie von den Messdaten abgezogen werden (Geometriekorrektur), sodass nur die (frequenzabhängige) Dämpfung übrig bleibt, die dann z. B. durch eine Ausgleichsgerade ermittelt werden kann (vgl. Abbildung 5, rechts). Dies ist die in der Explorationsseismik übliche Vorgehensweise. Die DIN 4150 legt fest: Für Voruntersuchungen und Abschätzungen darf D für Lockergestein pauschal mit maximal 0,01 angesetzt werden (Güte Q = 100). Höhere Werte sind nachzuweisen. Werte für Festgestein werden in der DIN nicht angegeben.

Die hier vorgeschlagene Vorgehensweise, zunächst eine Geometriekorrektur anzubringen und dann die Dämpfung zu ermitteln, begründet sich aus den Verhältnissen für einfache geologische Bedingungen wie horizontale Schichtung und Transversalisotropie. Diese Vorgehensweise ist aber auch für komplexere Verhältnisse angebracht, da durch die Geometriekorrektur ein einfach zu übersehender Hauptfaktor aus der Betrachtung herausgehalten wird und sich dann, nach der Korrektur, Einflüsse komplexerer Gegebenheiten besser isoliert betrachten lassen. Hier wird dann nicht immer der hier vorrangig dargestellte Fall einer Dämpfung durch einen orts- und richtungsunabhängigen Einzelwert D oder Q gegeben sein, was deutlich sichtbar wird, wenn zunächst ein festes D bzw. Q betrachtet wird.

Zahlenbeispiel:

Nehmen wir an, dass die oberflächennahe Scherwellengeschwindigkeit c = 800 m s^{-1} ist, dann ist die Geschwindigkeit der Grundmode der Rayleighwelle etwa das 0,9-fache davon, also etwa c_R = 700 m s^{-1}. Bei 8 Hz würde sich eine Wellenlänge von 87,5 m und damit bei D = 0,01 ein Abklingkoeffizient α von 0,00032 m^{-1} oder 0,32 km^{-1} ergeben. Bei 1, 2, 4 und 8 Hz sind die Koeffizienten entsprechend kleiner (vgl. Abbildung 4).

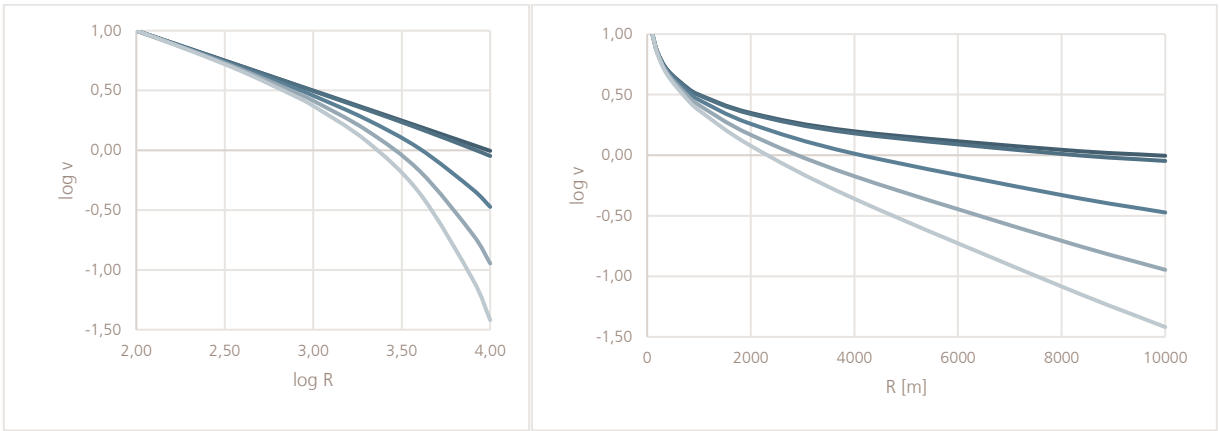


Abbildung 6: Gesamt-Amplitudenabnahme mit der Entfernung durch Geometrie + Dämpfung. Aufgetragen ist links: log v gegen log R, rechts: log v gegen R. Frequenz: 8 Hz, D = 0.01 (dunkel), 0,1, 1, 2, 3 (hell)

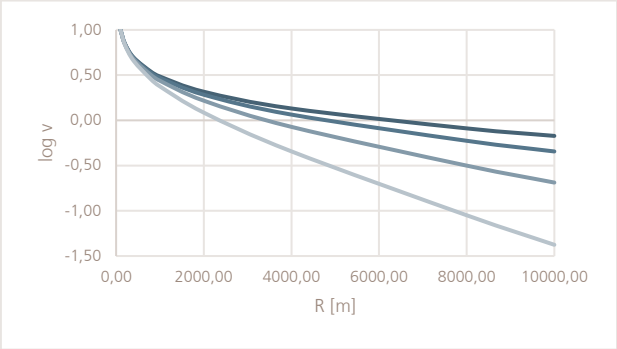


Abbildung 7: Amplitudenabnahme mit der Entfernung durch Geometrie + Dämpfung für die Frequenzen 1 (dunkel), 2, 4 und 8 (hell) Hz

Die Abbildung 6 und Abbildung 7zeigen die Amplitudenabnahme durch Geometrie und Dämpfung zusammengenommen und zwar für verschiedene D-Werte resp. für verschiedene Frequenzen

Bisher wurde die Amplitudenabnahme für eine lineare Schwingungsgröße, nämlich die Schwinggeschwindigkeit v beschrieben. Für quadratische Größen, z. B. die Erschütterungsleistung bzw. Leistungsdichten, die proportional zu v^2 sind, ist der geometrische Teil der Amplitudenabnahme dementsprechend anders, nämlich das Quadrat der Abnahme bei einer linearen Größe wie etwa v. So ist z. B. der Exponent bei der geometrischen Amplitudenabnahme nicht -0,5 sondern -1. Ähnliches gilt für die Dämpfung. Auf quadratische Größen wird hier nur eingegangen, weil sie besonders bei der Diskussion um seismologische Stationen oft eine Rolle spielen (*power spectral density*), wobei die Parallelbetrachtung linearer und quadratischer Größen verwirrend sein kann, wenn nicht genau angegeben wird, was betrachtet wurde.

3.3 Spektren

In der DIN 4150, Teil 1, spielen Spektren eine untergeordnete Rolle. Sie kommen explizit nur bei den erläuternden Beispielen im Anhang vor. Da jedoch im Gegensatz zur geometrischen Amplitudenabnahme die Amplitudenabnahme durch Dämpfung frequenzabhängig ist, kann es durchaus lohnend sein, die Spektren der Erschütterungen bzw. die entfernungsabhängige Amplitudenabnahme einzelner Spektralkomponenten mit zu betrachten. In dieser Darstellung betrachten wir meist die Frequenzen 1, 2, 4 und 8 Hz, also sozusagen ein Oktavspektrum.

Spektren spielen, genau wie beim Schall, insbesondere dann eine Rolle, wenn es um eine Beschreibung der Erschütterungsquellen geht (Emission). Sie können in Sonderfällen auch eine Bedeutung bei der Behandlung der Erschütterungseinwirkungen (Immission) haben, insbesondere, wenn die Erschütterungen Resonanzen, z. B. in Gebäuden, anregen können. Im Zusammenhang mit der Vorermittlung der Immissionen spielen Spektren eine Rolle, da die Dämpfung D oder *Q* frequenzabhängig ist.

Grundsätzlich geht es darum, ob eine Betrachtung im Zeitbereich (Zeitreihen) oder im Frequenzbereich (Spektren) für eine bestimmte Aufgabenstellung zielführender ist. Da häufig über die Einwirkung auf seismologische Stationen diskutiert wird, soll hier angemerkt werden, dass die üblichen Seismogrammauswertungen (Bebenlokalisierung, Magnitudenbestimmung, Herdmechanismen) im Zeitbereich durchgeführt werden. Für Sonderfälle, z. B. Bestimmung der Herdgrößen, wird jedoch auch der Frequenzbereich gebraucht. Zu beachten ist hierbei auch, dass bei den Spektren meist nur die Beträge und nicht die Phasen beachtet werden, sodass der Informationsinhalt nur noch halb so groß ist wie bei den Daten im Zeitbereich.

Auch Spektren können für lineare und quadratische Größen dargestellt werden. Die DIN 4510, Teil 1, selbst zeigt in den Beispielen im Anhang ausschließlich lineare Spektren (SAD - Spektrale Amplitudendichte in mm/s/Hz oder mm). Gerade in der Seismologie sind aber auch quadratische Spektren (SLD - Spektrale Leistungsdichte oder englisch: *PSD - power spectral density* in $(mm/s)^2/Hz$ oder mm^2/s) üblich. Bei der Anwendung von PSD wurden jedoch Probleme beschrieben,

wenn die Daten dominant harmonische (tonale) Anteile enthalten, da dann die PSD-Werte in erheblichem Maß von den benutzten Fensterlängen im Zeitbereich abhängen können.[10] In dieser Arbeit werden keine PSD-Werte verwendet.

3.4 Pegel

Ähnlich wie beim Lärmschutz hat es sich auch bei den Erschütterungen verbreitet, sowohl lineare Größen als auch quadratische Größen als Pegel darzustellen. Diese sind mit

$$\text{Pegel } A = 20 \log A/A_0 \text{ bzw.}$$

$$\text{Pegel } A^2 = 10 \log (A/A_0)^2$$

so definiert, dass die zahlenmäßigen Ergebnisse (infolge der unterschiedlichen Faktoren 10 oder 20) gleich sind. Der Zahlenzusatz dB (also z. B. -150 dB) weist dann darauf hin, dass der Wert auf die beschriebene Art gewonnen wurde; dB ist also keine Dimension, sondern mehr ein Hinweis auf die Berechnungsmethode. Pegel müssen sich auf einen Wert A_0 beziehen (Bezugswert). Dies können die Einheitswerte der jeweiligen SI-Einheit sein, beispielsweise bei Schwinggeschwindigkeiten 1 m s^{-1}, bei SLD (PSD) 1 $(m/s)^2$/Hz bzw. 1 m^2 s^{-1}, bei einer Fläche wie M dementsprechend 1 m^2.

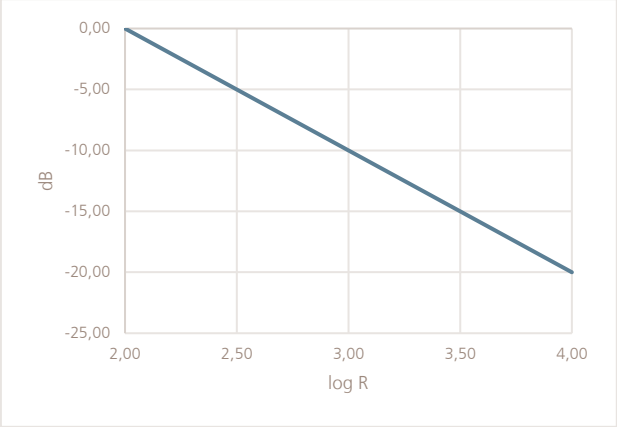


Abbildung 8: Geometrische Amplitudenabnahme gemäß Abbildung 3 aber mit einer dB-Skala (Pegel) gegen log R.

3.5 Schwingungskomponenten

In der Regel werden Erschütterungen (Schwingungen) in drei räumlichen Komponenten (X, Y, Z) gemessen. Bei den von Windenergieanlagen ausgehenden Erschütterungen spielen jedoch Oberflächenwellen vom Typ Rayleigh die Hauptrolle. Bei diesen bewegen sich die Bodenteilchen auf retrograden Ellipsen (siehe Abbildung 1) in der P-SV-Ebene, wobei die Vertikalkomponente größer ist als die Horizontalkomponente. Es erscheint daher zulässig, bei der Betrachtung der Erschütterungsimmissionen vorrangig auf die Vertikalkomponente (Z) einzugehen. Da in dieser Arbeit ein vergleichsweise einfaches Verfahren zur Erschütterungsprognose beschrieben wird, ist eine Beschränkung auf die Z-Komponente gerechtfertigt.

3.6 Abstrahl-Charakteristiken

Die komplexen Bewegungen, die die Fundamente der Windenergieanlagen machen, führen dazu, dass Erschütterungswellen aller Art von der Anlage nicht radialsymmetrisch in den Untergrund eingeleitet werden, sondern in komplexen

[10] Baumgart (2017).

Figuren.[11] Die Einleitung von Schwingungen in den Untergrund und damit auch die Ausbreitung bis in große Entfernungen ist also richtungsabhängig. Diese Abstrahlfiguren sind nicht nur von der jeweiligen Schwingungsform der Anlage abhängig, also vorwiegend von der Frequenz, sondern auch von der Windstärke und insbesondere von der Windrichtung.

Als Ergebnis der Untersuchungen zu den Abstrahlcharakteristiken kann festgehalten werden, dass diese aufgrund der genannten Abhängigkeiten von Windstärke und -richtung äußert komplex und zeitlich variabel sind. Aus diesem Grund werden sie generell bei pauschalisierten Überlegungen zu den Erschütterungsimmissionen nicht berücksichtigt. Es wird von einer radialsymmetrischen Energieabgabe in den Untergrund ausgegangen, dies aber nicht, weil es wirklich so wäre, sondern nur, weil eine angemessene Berücksichtigung komplexer Abstrahlcharakteristiken im Stadium der Vorermittlung noch nicht möglich zu sein scheint.

Abstrahl-Charakteristiken können auch der Grund dafür sein, dass in bestimmten Richtungen Amplitudenabnahmen beobachtet wurden, die kleiner sind, als es der geometrischen Amplitudenabnahme entspricht. Die führt dann zu einer (physikalisch und geologisch) abwegigen scheinbaren Amplitudenzunahme durch Dämpfung.[12]

3.7 Windparks

Die DIN 4150, Teil 1, behandelt durchaus auch den Fall, dass eine Erschütterungsquelle aus mehreren Einzelquellen besteht, wie es bei Windparks[13] der Fall ist. In der DIN wird hierzu der Fall ‚Maschinensaal' angeführt, wobei von gleichartigen Maschinen der Anzahl N ausgegangen wird. Die DIN 4150, Teil 1, geht dann grundsätzlich von einem Zusammenhang

$$v_N = v_1 \, N^{0,5}$$

aus.

Hier merkt die DIN 4150, Teil 1, aber zusätzlich an, dass sich die Teilschwingungen der Einzelquellen überlagern, wobei sie sich verstärken aber auch mindern können.[14]

[11] Neuffer (2021).

[12] Limberger (2021).

[13] FA Wind (2021b).

[14] FA Wind (2021c).

4 Messergebnisse

4.1 Erschütterungsleistung

Zur Beschreibung der Erschütterungsemissionen an der Quelle, also an der WEA, wählen wir die Erschütterungsleistung P_E in Watt (W)[15] und berechnen aus dieser den I_{95} Wert der Schwinggeschwindigkeit in 100 m Quellentfernung als Ausgangspunkt für die Berechnung der Ausbreitung der Erschütterungsimmissionen im Fernfeld und somit an den Einwirkungsorten. Eingangsgröße ist dabei die Messung und Bestimmung der I_{95}-Werte der PGV-Wert in der näheren Umgebung der Anlage in einem beliebigen Abstand. Dies kann auch das Ergebnis von mehreren Messungen mit durchaus unterschiedlichen Abständen sein, beispielsweise das Ergebnis einer ‚Ringmessung' im Nahbereich der Anlage.

Tabelle 2 zeigt die Ermittlung der Erschütterungsleistung für eine Windenergieanlage, in deren näherer Umgebung eine Vielzahl von Erschütterungsmessungen (PVG I_{95}) durchgeführt wurden. Die relevanten Werte für die Anlage an diesem Standort wurden dann letztendlich als Medianwerte erhalten.

Tabelle 2: Berechnung von Erschütterungsleistungen und Erschütterungsleistungspegeln aus Messungen der Schwinggeschwindigkeiten in der näheren Umgebung von Windenergieanlagen.

Messabstand	PGV I95	Intensität IE	Erschütterungsleistung PE
m	µm s-1	mW m-2	W
21	40	1,680	22,17
106	7	0,051	3,43
112	8	0,067	4,73
92	10	0,105	6,07
86	10	0,105	5,67
85	10	0,105	5,61
201	8	0,067	8,49
194	8	0,067	8,19
206	6	0,038	4,89
211	5	0,026	3,48
198	8	0,067	8,36
205	7	0,051	6,63
196	7	0,051	6,34
217	9	0,085	11,60
198	7	0,051	6,40
188	9	0,085	10,05
		Median	6,37

Fest halten wir (zunächst) die Größen:

$\rho = 1.500$ kg m^{-3}

VR = 700 m s^{-1}

Zylinderhöhe der Wellenfront = 100 m

Als Median und somit als für diese Anlage maßgeblicher Wert für die Erschütterungsleistung hat sich 6,37 W ergeben.

[15] FA Wind (2021a).

4.2 Messung der Amplitudenabnahme mit der Entfernung

Die eigentliche Variable bei der Erarbeitung der Amplitudenabnahmen mit der Entfernung (Abklingkurve) ist der Dämpfungsgrad D oder die Güte *Q*. Diese sind in hohem Grad von den örtlichen geologischen Gegebenheiten abhängig, die sich zudem, insbesondere bei größeren Entfernungen, längs des Wellenweges ändern können. Für allgemeine Betrachtungen ist es demnach wünschenswert, Sammlungen von Messergebnissen anzulegen, die eine möglichst breite Vielfalt geologischer Gegebenheiten abdecken. Hierzu sind nicht nur Messungen an Windenergieanlagen hilfreich, sondern generell Messungen der Amplitudenabnahme von Erschütterungsimmissionen mit der Entfernung für Erschütterungen, die von beliebigen oberflächennahen Quellen ausgehen können.

Wünschenswert ist, dass diese Quellen einen ähnlichen Frequenzbereich abdecken wie die Windenergieanlage. Dies ist jedoch nicht unbedingt notwendig, da durch die Definition von D eine lineare Frequenzabhängigkeit der Abklingkoeffizienten α unterstellt wird, sodass D letztlich frequenzunabhängig ist. Eine lineare Frequenzabhängigkeit ließ sich anhand vieler Daten in der Praxis bestätigen.[16]

Die vorgeschlagene Vorgehensweise beinhaltet also nach der Ermittlung von l_{95}-Werten der Schwinggeschwindigkeiten durch zeitgleiche Messungen in verschiedenen Entfernungen R, eine Geometriekorrektur. Das Auftragen der korrigierten Messwerte in einer log-lin-Darstellung führt zur Ermittlung von α als Ausgleichsgerade. Aus α sind dann die Werte für D und *Q* abzuleiten. Auf diese Art werden Werte für den gesamten betrachteten Frequenzbereich erhalten.

Ist die lineare Frequenzabhängigkeit der Dämpfung fraglich, ist alternativ auch ein frequenzsequenzielles Vorgehen möglich. Hierzu sind die Spektren der Schwinggeschwindigkeits-Amplituden aus den zeitgleichen Messungen zu ermitteln und daraus die wesentlichen Spitzen zu entnehmen bei Frequenzen, die möglichst den betrachteten Frequenzbereich abdecken. Diese Vorgehensweise ist zulässig, da die Störschwingungen der WEA deutlich durch tonale Anteile bestimmt sind. Aus α ergeben sich dann die Dämpfungsgröße D bzw. *Q* und Aussagen darüber, ob die Annahme einer linearen Frequenzabhängigkeit der Dämpfung gerechtfertigt ist.

Ein Beispiel hierzu zeigt Abbildung 9 mit Messwerten nach Neuffer et al. (2021).

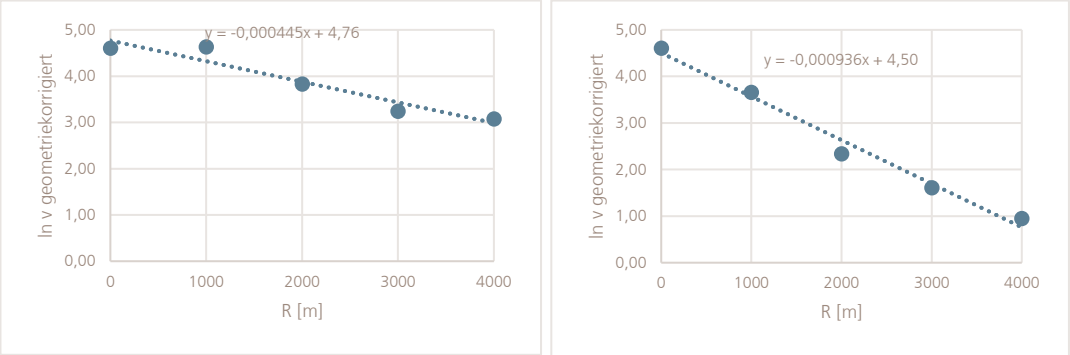


Abbildung 9: Amplitudenabnahme durch Dämpfung für 3,2 und 7,25 Hz (Messbeispiel)

Für die beiden Messbeispiele ergeben sich folgende Werte:

Tabelle 3: Abklingkoeffizienten, Dämpfungsgrad und Güte in Abhängigkeit von der Frequenz (Messbeispiel)

Frequenz	3,2 Hz	7,25 Hz
α	0,000445	0,000936
D	0,0157	0,0144
Q	64	69

Das Beispiel (Tabelle 3) zeigt, dass für die beiden unterschiedlichen Frequenzen (3,2 und 7,25 Hz) die Abklingkoeffizienten α sehr unterschiedlich sind, der Dämpfungsgrad D und damit die Güte *Q* aber nahezu identisch, was bedeutet, dass die Annahme einer linearen Frequenzabhängigkeit der Dämpfung bei diesem Messbeispiel gegeben ist.

[16] Gao (2018).

Abkürzungsverzeichnis

c_R	Ausbreitungsgeschwindigkeit von Rayleighwellen (Airy Phase) [m s^{-1}] hier mit 700 m s^{-1} angenommen
D	Dämpfungsgrad [-]
DIN	Deutsches Institut für Normung
EXP	Exponentialfunktion
I95	I95 Wert der Schwinggeschwindigkeit [m s^{-1}]
I_E	Erschütterungsintensität [W m^{-2}] oder [kg s^{-}]
n	Exponent, der von Wellenart, Quellengeometrie und Art der Schwingung abhängt (für Oberflächenwellen 0,5) [-]
P_E	Erschütterungsleistung [W]
PGV	peak ground velocity [m s^{-1}]
Q	Güte [-]
R	Entfernung von der WEA (Radius) [m]
R_1	Bezugsabstand, z. B. 100 m [m]
v	Schwinggeschwindigkeit in der Entfernung R [m s^{-1}]
v_1	Schwinggeschwindigkeit in der Bezugsentfernung R_1 [m s^{-1}]
v_{max}	maximale Schwinggeschwindigkeit [m s^{-1}]
WEA	Windenergieanlage
A	Abklingkoeffizient, $\alpha = 2\pi D/\lambda$ [m^{-1}]
λ	Wellenlänge, $\lambda = c_R/f$ [m]

Danksagung

Es wird vorwiegen über Ergebnisse berichtet, die im Projekt MISS - Minderung der Minderung der Störwirkung von Windenergieanlagen auf seismologische Stationen - erarbeitet wurden. Dieses Projekt wurde gefördert durch die Europäische Union - Investitionen in unsere Zukunft - Europäischer Fond für Regionale Entwicklung und durch EFRE.NRW - Investition in Wachstum und Beschäftigung. Es wurde initiiert durch die EnergieAgentur.NRW.

Literatur- und Quellenverzeichnis

Barth, A. (2017), Brückenkurs Geophysik: Oberflächenwellen. https://www.youtube.com/watch?v=9jKAMqanLiA.

Baumgart, J., Fritsche, C., Marburg, S. (2021), Infrasound of a wind turbine as power spectrum and power spectral density, comment on Pilger and Ceranna. JSV 388, S. 188-200, 2017, DOI: 10.1016/j.jsv2021.116310.

DIN 4150-1:2001-06 (2001). Erschütterungen im Bauwesen. Beuth-Verlag.

FA Wind (2021a), Vorschlag zur Ermittlung der Erschütterungsleistung einer Windenergieanlage.

FA Wind (2021b), Einfluss von Windparks auf Bodenschwingungen.

Gao, L., Pan, Y., Tian, G. *et al.* (2018), Estimating *Q* Factor from Multi-mode Shallow-Seismic Surface Waves. Pure Appl. Geophys 175, S. 2609–2622, https://doi.org/10.1007/s00024-018-1828-7.

GtV (2011): GTV- Richtlinie: Seismizität bei Geothermieprojekten – Blatt 1: Seismische Überwachung.

Lerbs, N., Korn, M. (2020), Definition von Schutzradien um seismologische Messeinrichtungen bei der Errichtung von Windkraftanlagen. Schriftenreihe des LfULG, Heft 13/2020|2.

Limberger, F., Lindenfeld, M., Deckert, H., Rümpker, G. (2021), Seismic radiation from wind turbines: observations and analytical modeling of frequency-dependent amplitude decays. Solid Earth 12, S. 1851-1864, https://doi.org/10.5194/se-12-1851-2021.

Neuffer, T, Kremers, S (2017), How wind turbines affect the performance of seismic monitoring stations and networks. Geophys. J. Int. 211(3), S 1319-1327, https://doi.org/10.1093/gji/ggx370.

Neuffer T., Kremers, S., Meckbach, P., Mistler, M. (2021), Characterization of the seismic wave field radiated by a wind turbine, J. Seismol. 25, S. 825-84, https://doi.org/10.1007/s10950-021-10003-6.

Neuffer, T. (2020), Microseismic Noise Induced by Wind Turbines. PhD thesis, Ruhr-Universität Bochum.

Ritter, J., Baisch, S., Fritschen, R., Groos, J., Kraft, T., Plenefisch, T., Plenkers, K., Wassermann, J. (2012), Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität – Positionspapier des FKPE. Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft e.V. 2012/3, S. 17-31.

Impressum

© FA Wind, Februar 2022

Herausgegeben von
Fachagentur Windenergie an Land
Fanny-Zobel-Straße 11 | 12435 Berlin

www.fachagentur-windenergie.de
post@fa-wind.de

V. i. S. d. P.: Dr. Antje Wagenknecht

Die Fachagentur zur Förderung eines natur- und umweltverträglichen Ausbaus der Windenergie an Land e. V. ist ein gemeinnütziger Verein. Er ist eingetragen beim Amtsgericht Charlottenburg, VR 32573 B

Autorenschaft
Prof. Dr. Horst Rüter, HabourDom GmbH,
Dr. Tobias Neuffer, DMT GmbH & Co. KG,
Dr. Simon Kremer, DMT GmbH & Co. KG

Redaktion
Dr. Dirk Sudhaus

Zitiervorschlag
FA Wind (2022), Erschütterungsimmissionen von Windenergieanlagen, Prognose der Ausbreitung.

Haftungsausschluss
Die in dieser Broschüre enthaltenen Angaben und Informationen sind nach bestem Wissen erhoben, geprüft und zusammengestellt.

Eine Haftung für unvollständige oder unrichtige Angaben, Informationen und Empfehlungen ist ausgeschlossen, sofern diese nicht grob fahrlässig oder vorsätzlich verbreitet wurden.

Fachagentur Windenergie an Land e.V.

Fanny-Zobel-Straße 11 I 12435 Berlin
T +49 30 64 494 60-60
post@fa-wind.de I www.fachagentur-windenergie.de