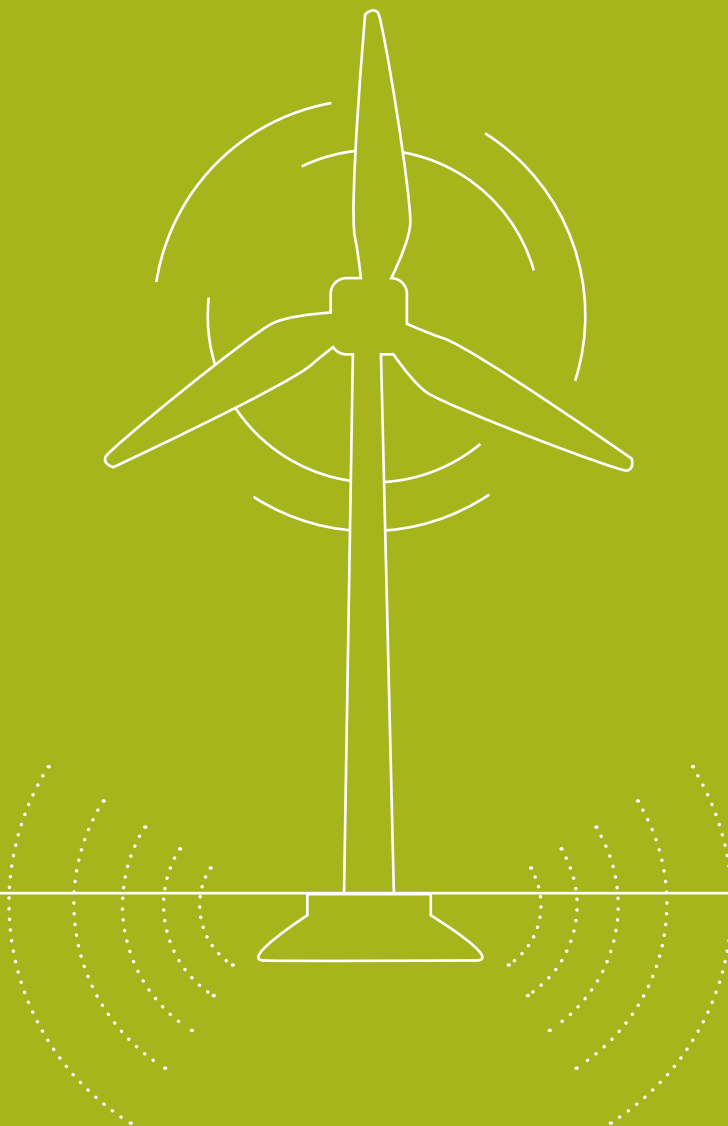




Erschütterungsleistung einer Windenergieanlage

Vorschlag zur zur messtechnischen Erfassung dieser
Kenngröße



Erschütterungsleistung einer Windenergieanlage

Vorschlag zur messtechnischen Erfassung dieser Kenngröße

Prof. Dr. Horst Rüter (HarbourDom GmbH)

Herausgegeben von der Fachagentur Windenergie an Land e.V.

Gefördert durch:



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



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Vorwort

An Erdbebenmessstationen können Schwingungen von Windenergieanlagen registriert werden. Ein ausdifferenziertes Prognosemodell, nach dem eine Bewertung der zu erwartenden Einflüsse auf die seismologischen Messungen erfolgen kann, fehlt derzeit noch. Neben der von der Geologie abhängigen Ausbreitung der Schwingungen ist hierfür die von der Windenergieanlage ausgehende Stärke der Schwingungen bedeutend.

Windenergieanlagen erzeugen je nach Anlagentyp und Bauweise unterschiedlich starke Schwingungen. Diese werden wiederum in Abhängigkeit von Fundament und geologischem Untergrund verschieden gut auf den Boden übertragen. Diese messbaren Schwingungen werden in dem vorliegenden Hintergrundpapier als Erschütterungsleistung eingeführt.

In diesem Hintergrundpapier wird nun ein Vorgehen für die Bestimmung der Erschütterungsleistung vorgeschlagen. Derzeit handelt es sich noch um eine theoretische Herleitung, die mit Hilfe einer Reihenmessung überprüft werden kann. Ziel wäre die Erschütterungsleistung für Baureihen von Windenergieanlagen zu bestimmen um mit dieser die Prognose des Einflusses auf seismologische Stationen zu verbessern. Darauf aufbauend können dann Kompensationsmaßnahmen in Betracht gezogen werden.

Die vorliegende Publikation entstand im Rahmen des Forschungsprojekts „MISS - Minderung der Störwirkung von Windenergieanlagen auf seismologische Stationen“, das von der Energieagentur.NRW initiiert wurde. Gefördert wurde das Projekt durch die Europäische Union - Investitionen in unsere Zukunft -Europäischer Fond für Regionale Entwicklung und durch EFRE.NRW - Investition in Wachstum und Beschäftigung.

Ich danke dem Autor ganz herzlich für diese Ausarbeitung und wünsche Ihnen eine anregende Lektüre!

Ihre

Antje Wagenknecht



Dr. Antje Wagenknecht ist Geschäftsführerin der Fachagentur Windenergie an Land.

Inhalt

Vorwort.....3

Abbildungsverzeichnis5

Tabellenverzeichnis5

Zusammenfassung.....6

1 Einführung7

2 Grundsätzliches.....7

3 Kenngrößen der WEA8

4 Messgeometrie.....9

5 Messablauf10

6 Messgeräte12

7 Auswertung der Messungen13

8 Messdaten und Protokolle15

9 Messbeispiel16

Abkürzungsverzeichnis17

Danksagung.....18

Literatur- und Quellenverzeichnis.....19

Impressum.....20

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typische Schwingungsform der von einer WEA emittierten Erschütterungen in 3 Komponenten mit 100 Abtastungen pro Sekunde.....	11
Abbildung 2: Messgerät, bestehend aus dem Sensor (links) und dem Datenlogger (rechts).....	12
Abbildung 3: Seismogramm einer 1-stündigen Rauschtaufzeichnung an einer Bohrlochmessstation eines Netzwerkes zur Überwachung induzierter Seismizität.....	14
Abbildung 4: Anwendung eines 1 Hz-Simulationsfilters.....	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kenngrößen einer WEA im Zusammenhang mit der Ermittlung ihrer Erschütterungsleistung.....	8
Tabelle 2: Messgeometrie der Ringmessungen.....	9
Tabelle 3: Messablauf.....	10
Tabelle 4: Messgeräte.....	12
Tabelle 5: Auswertung der Ringmessungen zur Ermittlung der Erschütterungsleistung.....	13
Tabelle 6: Messergebnisse für eine WEA des Typs Enercon E-115 mit 3 MW Nennleistung auf quartärem geologischem Untergrund.....	16

Zusammenfassung

Hiermit wird ein Vorschlag zur Ermittlung von Erschütterungsleistungen für Windenergieanlagen vorgelegt. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, werden eine Messanordnung und ein Messvorgang beschrieben, geeignete Messgeräte werden spezifiziert, der Umgang mit den erhaltenen Messwerten wird festgelegt, sowohl bezüglich der Auswertung als auch bezüglich der Archivierung (open access) in vorgegebenen Formaten.

Bei der Anwendung des Vorschlags wird nach und nach ein Datenpool oder eine Art Katalog der verschiedenen Anlagentypen und Bauausführungen entstehen. Dazu sind die untersuchten Windenergieanlagen in Bezug auf erschütterungsrelevante Parameter zu beschreiben (Charakterisierung). Auch hierzu werden Vorschläge gemacht. Wegen der Vielzahl von Anlagen, die sich in diesen Details unterscheiden, ist damit zu rechnen, dass eine größere Anzahl (50 bis 100) von Bestimmungen der Erschütterungsleistung notwendig sein wird, um die angestrebten Wirkungen bei der Anwendung als Prognosewerkzeug zu erzielen.

1 Einführung

Windenergieanlagen können Erschütterungen verursachen, die sich im Untergrund über große Entfernungen ausbreiten können. Diese haben allerdings so geringe Stärken, dass sie auch in unmittelbarer Nähe der Anlagen nicht oder allenfalls nur in Ausnahmefällen gespürt werden können. Keinesfalls können sie Schäden an Gebäuden verursachen. Sie sind also weder in Bezug auf Bauwerke und ähnliches (Schäden) noch in Bezug auf den Menschen (Belästigung) ein Umweltthema.¹

Besonders erschütterungsempfindliche Anlagen können dennoch durch diese Erschütterungen in ihrer Funktion beeinträchtigt werden. Hier stehen besonders Erdbebenmessstationen (seismologische Stationen) im Zentrum der Diskussion, da diese ihrer Bestimmung gemäß so gebaut sind, dass sie kleinste Erschütterungen erkennen und aufzeichnen können.

Um Erschütterungseinwirkungen von Windenergieanlagen schon in der Planungs- und Genehmigungsphase abschätzen zu können ist es wünschenswert, die Erschütterungsimmissionen an einem Einwirkungsort, also z.B. am Standort einer Erbebenstation, abschätzen können. Eine derartige Abschätzung besteht aus zwei Komponenten:

1. Einer Angabe der Erschütterungsemission der Quelle (der Windenergieanlage),
2. einer Abschätzung des Abklingens der Erschütterung auf dem Weg von der Quelle zum Einwirkungsort.

Erschütterungsimmissionen, die von Windenergieanlagen ausgehen, sind in der Literatur vielfach beschrieben, unter anderem von Lerbs² und von Neuffer³.

Zur quantitativen Erfassung der Erschütterungsemission der Quelle wird hier die Angabe der Erschütterungsleistung der Quelle (in Watt) vorgeschlagen. Diese Größen sind in ihrer Anlage so zu verstehen wie Schalleistungen, die im Lärmschutz in der Routineanwendung sind.

Um die gefundenen Erschütterungsleistungen untereinander vergleichbar zu machen ist es notwendig, die Ermittlung dieser Größen möglichst präzise zu regeln und so einheitlich zu gestalten.

1.1 Grundsätzliches

Die Ermittlung von Erschütterungsleistungen erfolgt durch Messungen und deren Auswertung. Um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu erhalten, ist es notwendig, die Methode der Messungen und deren Auswertung genauer vorzugeben. Zum Erreichen des vorgegebenen Ziels, in einer absehbaren Zeit und mit einem absehbaren Aufwand zu einer für Prognosen anwendbaren Anzahl von Messungen zu kommen, ist es notwendig, dass die Messungen einerseits ausreichend sorgfältig sind, andererseits aber einen vorgegebenen Rahmen an Aufwand nicht überschreiten.

Wichtig ist eine Archivierung (open access) der Originalmessdaten, was dann auch eine spätere ergänzende oder neue Auswertung gestattet, wenn sich ergeben sollte, dass geänderte oder aufwändigere Auswertungsverfahren notwendig werden, als hier zunächst vorgesehen. Insofern kann auch der hiermit unterbreitete Vorschlag ein ‚lebendes Dokument‘ sein.

Messungen zur Ermittlung von Erschütterungsleistungen sollten nur von nach Immissionsschutzgesetz⁴ anerkannten Messstellen oder von qualifizierten Forschungs- oder Universitätsinstituten durchgeführt werden.

¹ Kudella et al. (2020); Limberger et al. (2021).

² Lerbs et al. 2020.

³ Neuffer et al, 2017 und 2029.

⁴ Akkreditiert von der DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005, Rechtsgrundlage: § 26 in Verbindung mit § 29b Bundesimmissionsschutzgesetz

2 Kenngrößen der WEA

Die Windenergieanlage, deren Erschütterungsleistung ermittelt werden soll, ist ausführlich zu beschreiben. Nur so kann ein Katalog entstehen, der es erlaubt, zukünftige Anlagen aufgrund ihrer Vergleichbarkeit mit vermessenen Anlagen so einzuordnen, dass deren voraussichtliche Erschütterungsleistung mit ausreichender Genauigkeit abgeschätzt werden kann.

Die formalisierte Erfassung dieser Angaben und ihre Hinterlegung in einer Datenbank soll ein automatisiertes Finden vergleichbarer vermessener Anlagen bei der Planung einer Neuanlage erleichtern.

Neben den Pflichtangaben zu Kenngrößen der Anlage können zu Einzelpunkten ausführlichere nicht formatierte Texte hinterlegt werden. Ein Beispiel hierzu ist die Beschreibung des Baugrunds.

Tabelle 1: Kenngrößen einer WEA im Zusammenhang mit der Ermittlung ihrer Erschütterungsleistung

		Erläuterungen, Begründungen
Hersteller		
Typ		
Nennleistung	Nennleistung [MW]	Vom Hersteller angegebene Nennleistung mit Angabe der Windgeschwindigkeit ab der diese erreicht wird.
Nenndrehzahl	Nenndrehzahl [1/Min]	Drehzahl bei Nennleistung
Technik der Anlage	Nabenhöhe [m]	
	Rotordurchmesser [m]	
	Gondelmasse [kg]	Hier ist oft entscheidend, ob es sich um eine Anlage mit oder ohne Getriebe handelt.
Art des Turms	Beton	Über die Kategorisierung hinaus können im Begleittext der Aufbau und die Maße des Turms beschrieben werden.
	Stahl	
	Hybrid	
Art des Fundaments	Flachfundament	Das Fundament kann eine große Rolle spielen, es kann über die Kategorisierung hinaus im Begleittext ausführlicher beschrieben werden.
	Tieffundament, Gründungstiefe [m]	
	Durchmesser des Fundaments [m]	
	Masse des Fundament [kg]	
Untergrund	Flurabstand [m]	Das Grundwasser kann die Untergrundeigenschaften maßgeblich bestimmen. Interessant ist dr Bereich bis zu 100 m Tiefe.
	Baugrund	Hier kann der Untergrund als Auszug aus dem Baugrundgutachten im Begleittext ausführlich beschrieben werden. Gegebenenfalls Angabe der Bodenklassen*.

3 Messgeometrie

Als Grundgeometrie wird eine Ringmessung mit Messpunkten rund um die WEA im Nahbereich der Anlage vorgesehen (siehe Tabelle 2). In diesem Kapitel wird die Geometrie einer Ringmessung genauer festgelegt. Auch hier wird darauf geachtet, dass die Festlegungen nur so weit gehen, wie es eine Einheitlichkeit der Messung erfordert. Unnötig starre Angaben erschweren die Messdurchführung und verteuern letztlich die Messung, ohne zu besseren Ergebnissen zu führen.

Tabelle 2: Messgeometrie der Ringmessungen

		Erläuterungen, Begründungen
Messanordnung	Ringmessung	Die von der WEA ausgehenden Erschütterungen können richtungsabhängig sein, daher reicht eine Einzelmessung nicht aus.
Anzahl der Messpunkte	Mindestens 7, besser mehr	Auf dem Ring sollten mindestens 7 Messpunkte angeordnet werden, um eine Azimutabhängigkeit durch Mittelung auszugleichen.
Abstand der Messpunkte von der Quelle	100 m bis 200 m	Um aus dem Nahfeld der Quelle herauszukommen, sollte der Abstand von der Mitte der WEA zum Messpunkt mindestens 100 m betragen. Um ausreichend große Messwerte zu erhalten, ohne Störung durch Fremdquellen, sollte der Messpunktabstand möglichst höchstens 200 m sein. Die Abstände der einzelnen Messpunkte zum Mittelpunkt der Anlage können unterschiedlich sein. Die Messpunkte sind einzumessen, wobei die Genauigkeit besser als 0,5 m sein sollte.
Azimutale Verteilung der Messpunkte	Möglichst gleichförmig	Die azimutale Verteilung der Messpunkte auf dem Ring sollte möglichst gleichförmig sein, um nicht bestimmte Richtungen statistisch zu bevorzugen.
Ankopplung der Messgeräte	kraftschlüssige Ankopplung	Die Messgeräte sollten an den Untergrund kraftschlüssig angekoppelt sein, beispielsweise durch Erdspeißer. Weiterführende Maßnahmen sind bei den relativ großen Messwerten nicht nötig.

4 Messablauf

In diesem Kapitel wird der Ablauf einer Ringmessung genauer definiert. Die Messungen an den einzelnen Messpunkten können dabei nacheinander durchgeführt werden, was den Geräteaufwand drastisch reduziert. Voraussetzung ist die sorgfältige Auswahl der Messzeit anhand einer Wettervorhersage. Hier ist nicht nur auf ausreichenden Wind zu achten, sondern auch darauf, dass dieser im Zeitraum der Messungen nach Betrag und Richtung ausreichend konstant, also nicht böig sein wird.

Tabelle 3: Messablauf

		Erläuterungen, Begründungen
Messzeit	Die Messzeit ist so zu wählen, dass die Anlage mindestens 95% ihrer Nennleistung erreicht	Es ist damit zu rechnen, dass die maximale Erschütterungsleistung der Anlage mit dem Erreichen der Nennleistung erreicht wird, so dass hier die Vorgabe 95% der Nennleistung angebracht ist. Bei höheren Windgeschwindigkeiten scheinen zwar zunächst die Windangriffskräfte an den Rotorblättern größer was jedoch wahrscheinlich durch die Winkelverstellung der Rotorblätter weitgehend ausgeglichen wird.
Messdauer	mindestens 15 Minuten pro Messpunkt	Da unter den vorgegebenen Bedingungen die Erschütterungsemissionen sehr konstant sind, ist eine Messzeit von 15 Minuten pro Messpunkt ausreichend. Sollte sich in diesem Messintervall zeigen, dass die Messwerte zu stark schwanken, ist die Messdauer ausreichend zu vergrößern. Notfalls kann auch eine Messwiederholung bei geeigneteren Windbedingungen notwendig werden.
Messablauf	konsekutiv	Natürlich können alle Messpunkte mit Geräten besetzt und so an allen Punkten gleichzeitig gemessen werden. Bei den vorgegebenen Bedingungen ist dies aber nicht nötig und soll nicht vorgeschrieben werden. Es ist ausreichend, die einzelnen Punkte nacheinander (konsekutiv) zu vermessen, wozu dann nur 1 Messgerät notwendig ist. Es ist darauf zu achten, dass sich die Windbedingungen in der gesamten Messzeit nicht gravierend ändern.
Betriebsdaten	Leistung, Rotordrehzahl, Windrichtung, Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe	Es muss beim Betreiber der Anlage sichergestellt werden, dass die erforderlichen Betriebsdaten für die gesamte Messdauer zugänglich sind bzw. zur Verfügung gestellt werden. Es sollten zumindest Momentanleistung, Rotordrehzahl, Windgeschwindigkeit und Windrichtung in Nabenhöhe sowie die Gondelausrichtung zur Verfügung stehen (10 Minuten-Ablesungen).
sonstige Angaben	Messbedingungen	Die Messbedingungen wie Wetter, Temperatur, Umgebungsnoise, der von anderen Quelle stammt sollten ausführlich beschrieben werden.

Zum Verständnis der zu erfassenden Daten dient Abbildung 1, wo eine typische Registrierung der 3 Schwinggeschwindigkeitskomponenten zeigt, wie diese Daten durch harmonische (tonale) Anteile dominiert sind. Die Aufzeichnungsdauer im dargestellten Beispiel beträgt 20 Sekunden. Es wird eine Messdauer von mindestens 15 Minuten, also dem 35-fachen der dargestellten Zeit, empfohlen. Meistens erfolgt eine Messung mit 3 Raumkomponenten (vertikal, Nord,

Ost). Benötigt und weiter bearbeitet wird hier nur die Vertikalkomponente. Es würde also grundsätzlich auch ausreichen, wenn nur diese gemessen wird.

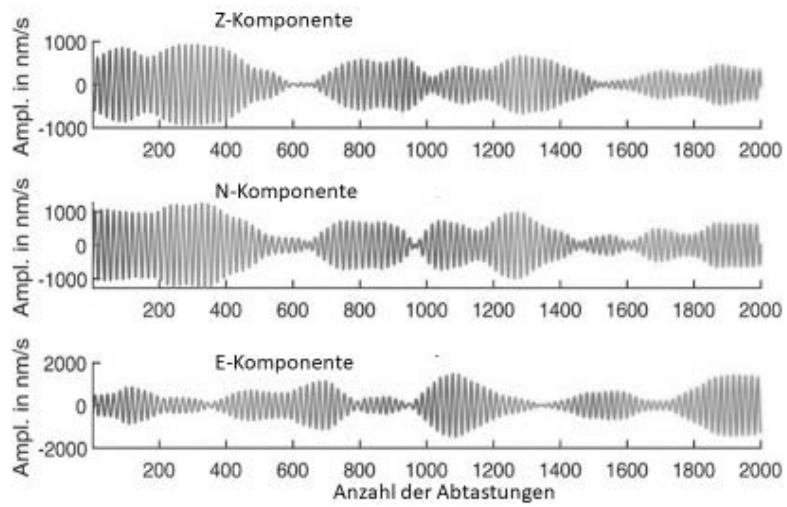


Abbildung 1: Typische Schwingungsform der von einer WEA emittierten Erschütterungen in 3 Komponenten mit 100 Abtastungen pro Sekunde. Deutlich zu sehen ist die Dominanz der tonalen Anteile. Quelle: Lerbs et al. (2020)

5 Messgeräte

An die Messgeräte werden keine besonderen Ansprüche gestellt, da die Erschütterungen im Nahbereich der Anlagen relativ groß sind. Die Messgeräte sollten allerdings den Anforderungen der DIN 45669 entsprechen.

Tabelle 4: Messgeräte

		Erläuterungen, Begründungen
Sensor	Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer	Es ist die DIN 45669 zu beachten. Wegen rel. großer Messwerte ist die Sensorwahl nicht kritisch. Die Eigenfrequenz des Sensors sollte nicht höher als 4,5 Hz sein, um eine Umrechnung auf einen 1 Hz -Sensor zu ermöglichen. Die Vertikalkomponente v_z ist ausreichend, es wird jedoch empfohlen, 3 Komponenten (vertikal, nord, ost) zu registrieren, um weiterführende Auswertungen zu ermöglichen.
Ankopplung	Erdspeiß	Ein Erdspeiß wird die bevorzugte Ankopplungsmethode sein. Andere Methoden sind zulässig, wenn sie einen ausreichenden Kraftschluss mit dem Untergrund gewährleisten. Ein Windschutz ist angebracht.
Datenlogger	<ul style="list-style-type: none"> - Abtastrate mindestens 100 Hz - Dynamik mindestens 120 dB - Anti-Alias Filter (30 Hz) - Zeitbasis GPS 	Kleinere Abtastraten als 100 Hz wären möglich, dennoch sind mindestens 100 Hz angebracht, um weiterführende Auswertungen zu ermöglichen.
Formate	<ul style="list-style-type: none"> - SEED - miniSEED inkl. dataless SEED - GSE2 plus Metadaten.* 	<p>Ziel ist eine Open-Access-Archivierung um einen freien Datenaustausch zu ermöglichen. Dazu ist eine Festlegung der Formate nötig.</p> <p>Es wird auf die Möglichkeit von Seedlink und Arlink zur standardisierten Datenübertragung hingewiesen. Sollten andere Formate verwendet werden, sind diese vor der Archivierung umzuformatieren.</p>

* nach Baisch et al. 2012.

Abbildung 2 zeigt eine typische einfache Messanlage bestehend aus dem Sensor (gelb) mit Erdspeiß und einem Datenlogger (rechts). Es ist eine Vielzahl derartiger, hierfür nutzbarer Anlagen von verschiedenen Herstellern verfügbar.



Abbildung 2: Messgerät, bestehend aus dem Sensor (links) und dem Datenlogger (rechts). Die Ankopplung erfolgt über einen Erdspeiß. Quelle: Lerbs et al. (2020)

6 Auswertung der Messungen

Hier wird der Bearbeitungsweg beschrieben, der zur Ermittlung der anlagenbezogenen Erschütterungsleistung führt. Die erhaltenen Daten lassen natürlich noch eine Vielzahl anderer Auswertungen, beispielsweise auch im Frequenzbereich, zu. Die Daten stellen also über die hier vorgegebene Erstauswertung hinaus einen wertvollen Datenschatz dar.

Tabelle 5: Auswertung der Ringmessungen zur Ermittlung der Erschütterungsleistung

		Erläuterungen, Begründungen
Datenvorbereitung (preprocessing)	- Simulationsfilter, - Bandpassfilter	Wenn Sensoren mit Eigenfrequenzen größer 1 Hz eingesetzt werden, sind die Daten durch ein 1 Hz-Simulationsfilter umzurechnen, damit eine homogene Empfindlichkeit ab 1 Hz erreicht wird. Da hier nur der Frequenzbereich 0,5 -10 Hz interessiert, sind die Daten entsprechend vor der weiteren Auswertung mit einem Bandpassfilter auf diesen Frequenzbereich einzuschränken.
Kennwert I95	Zusammenfassung der Messwerte zu einem I95 Wert [ms^{-1}]	Aus der aufgezeichneten Zeitreihe der Vertikalkomponente ist der I95-Wert der Schwinggeschwindigkeiten zu ermitteln. Es ist dabei ein Zeitfenster von mindestens 15 Minuten zu bearbeiten.
Impedanz	Die Impedanz I wird als ρv_R fest vorgegeben [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]	Mit der Annahme der Dichte von 1.500 kg m^{-3} und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwellen von 700 m s^{-1} wird die Impedanz fest vorgegeben. Dies geschieht, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen. Sollte sich im Laufe der Messungen herausstellen, dass dies nicht zulässig ist, muss nachgeschärft werden und die Daten müssen dann u. U. nachbearbeitet werden.
Wellenfront	Mantelfläche $M = 2\pi R H$ der zylinderförmigen Ausbreitung der Oberflächenwellen [m^2]	Die Größe der Mantelfläche der zylinderförmigen Wellenausbreitung ist $M = 2\pi R H$. Dabei ist R die Entfernung des Messpunkts zum Mittelpunkt der Quelle und H die Zylinderhöhe. Für H wurde $H = 100 \text{ m}$ fest gewählt. Auf diesen Tiefenbereich ist die Energie der Oberflächenwellen konzentriert. Während in der Realität die Schwinggeschwindigkeiten exponentiell mit der Tiefe abnehmen und also auch tiefer als 100 m reichen, wird hier ersatzweise davon ausgegangen, dass die Schwinggeschwindigkeiten bis 100 m Tiefe konstant und gleich zur Schwinggeschwindigkeit an der Oberfläche sind und darunter Null mm s^{-1} betragen.
Erschütterungsintensität	Die Erschütterungsintensität I_E ist das Produkt aus dem Quadrat der Schwinggeschwindigkeit v^2 und der Impedanz I [kg s^{-3}] oder [W m^{-2}]	Die Intensität gibt an, wie viel Energie in der Sekunde durch einen Quadratmeter der Wellenfront (Mantelfläche) hindurchfließt. Für längere Zeitfenster ist der I95- Wert zu nehmen.
Erschütterungsleistung	Die Erschütterungsleistung P_E ist das Produkt aus der Intensität und der Mantelfläche [$\text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$] oder [W]	Die Erschütterungsleistung ist das Endergebnis der Auswertungen. Es ist der für die Anlage einschließlich Fundament und den jeweiligen Baugrund charakteristische Emissionswert, der dann für die Abschätzung von Immissionen als Ausgangswert genutzt werden kann.

		Erläuterungen, Begründungen
Mittelung	Median	Es wird zunächst für jeden Messpunkt eine Erschütterungsleistung ermittelt. Um zu einem Wert für die Anlage zu kommen, muss über die Messwerte der Einzelmessungen gemittelt werden. Hierzu ist ein Medianwert zu bestimmen. Dieser wird anderen Mittelwerten vorgezogen, da er den Einfluss von ‚Ausreißern‘ minimiert.
weiterführende Auswertungen		Weiterführende Auswertungen wie z.B. Leistungspegelspektren sind möglich und wünschenswert, werden hier aber nicht behandelt. Die Open-Access-Daten stehen für jedwede weiterführende Auswertung zur Verfügung.

Abbildung 3 zeigt die Ermittlung des I95-Wertes aus einer Erschütterungsaufzeichnung. I95 ist durch die beiden horizontalen roten Linien definiert.

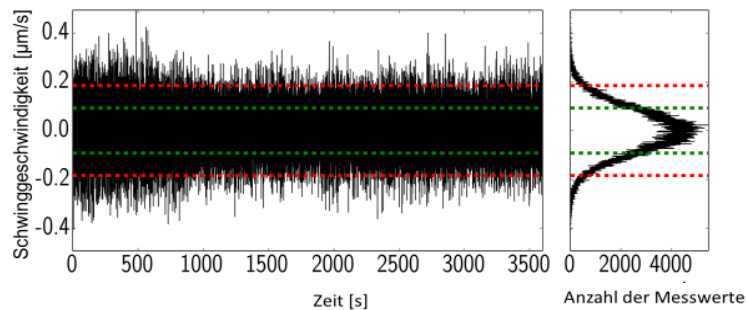


Abbildung 3: Seismogramm einer 1-stündigen Rauschaufzeichnung an einer Bohrlochmessstation eines Netzwerkes zur Überwachung induzierter Seismizität. Die Histogramme zu der Zeitreihe zeigen eine Gaußverteilung, wobei die grünen Linien den RMS (root mean square, eine Standardabweichung) und die roten Linien den I95 (doppelte Standardabweichung) beschreiben. I95 liegt hier deutlich unterhalb der lokal geforderten $\pm 2 \mu\text{m/s}$. Quelle: Neuffer, Kremers (2017) nach Groos, Ritter (2009)

Abbildung 4 zeigt in blau das Spektrum einer Erschütterungsaufzeichnung mit einem 4,5 Hz-Sensor. Orange sind dieselben Daten nach Anwendung eines 1 Hz-Simulationsfilters. Der Nutzfrequenzbereich ist zu tiefen Frequenzen hin verschoben.

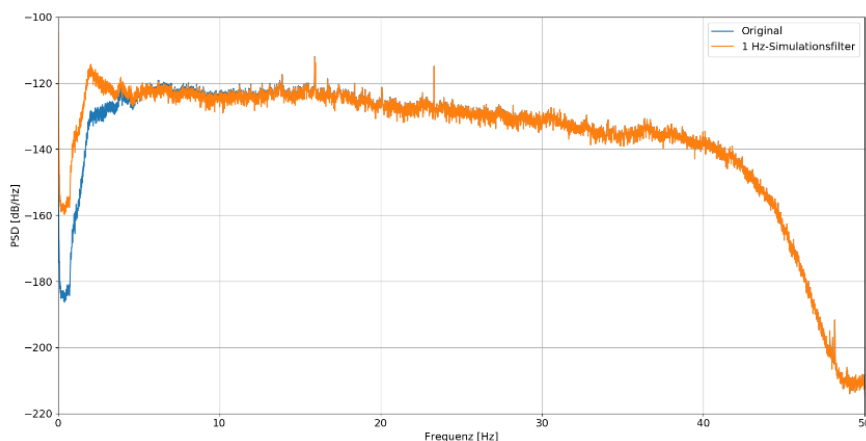


Abbildung 4: Anwendung eines 1 Hz-Simulationsfilters; Quelle: Lerbs et al. (2020)

7 Messdaten und Protokolle

Sämtliche Messdaten und Messprotokolle sollen open-access an einem vertrauenswürdigen Ort archiviert werden. Hierzu sind Formate nicht nur für die Daten (siehe Tabelle 5), sondern auch für die Protokolle und insbesondere für die Angaben zu den WEA einheitlich zu fassen. Nur so kann eine spätere automatisierte Auswertung sichergestellt werden. Vom Forschungskollegium Physik des Erdkörpers (FKPE) werden hier die Formate - SEED, - miniSEED inkl. dataless SEED und -GSE2 plus Metadaten für seismologische Daten vorgeschlagen⁵.

Die (Mess-)Protokolle sind so zu gestalten, dass sie maschinell gelesen werden können und ein automatisches Einspeisen in eine Datenbank ermöglicht wird. Eine Datenbank kann erst dann entworfen und aufgebaut werden, wenn entschieden ist, welche Institution die Daten zukünftig treuhänderisch besitzen und verwalten wird. Aus der Datenbankstruktur werden sich dann die Anforderungen an die digitalen Protokolle ableiten. Sämtliche Daten sollten dabei in einer frei zugänglichen Form (open access) zur weiteren wissenschaftlichen Bearbeitung und die Erstellung von Gutachten zugänglich sein.

⁵ Baisch et al.2012.

8 Messbeispiel

Als Beispiel wird hier eine Messung an einer WEA im Münsterland angeführt, die von der DMT GmbH & Co. KG durchgeführt wurde. Die Messungen erfolgten bei Windgeschwindigkeiten von 11,5 m/s in Abständen zwischen 21 Metern bis 217 Metern zum Mittelpunkt der Anlage. Als Ergebnis ergibt sich:

- **Erschütterungsleistung P_E : 6,37W**

Tabelle 6: Messergebnisse für eine WEA des Typs Enercon E-115 mit 3 MW Nennleistung auf quartärem geologischem Untergrund, gemessen bei einer Windgeschwindigkeit von 11 m s⁻¹ und 96% Nennleistung der Anlage

Messab-stand	PGV I95	Intensität I_E	Erschütterungs-leistung P_E
m	$\mu\text{m s}^{-1}$	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
			6,37

Abkürzungsverzeichnis

NRW	Bundesland Nordrhein-Westfalen
WEA	Windenergieanlage
DIN	Deutsches Institut für Normung
PGV	Peak ground velocity
R	Abstand eines Messpunktes zum Mittelpunkt der WEA
M	Mantelfläche der zylinderförmigen Wellenfront
H	Höhe der zylinderförmigen Wellenfront
dB	Dezibel
I95	Grenzwert innerhalb dem 95% der Messwerte eines Zeitintervalls liegen
v	Schwinggeschwindigkeit
v_z	Vertikalkomponente der Schwinggeschwindigkeit
v_R	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwelle
I	Impedanz
I_E	Erschütterungsintensität
P_E	Erschütterungsleistung
ρ	Dichte

Danksagung

Es wird vorwiegend über Ergebnisse berichtet, die im Projekt „MISS - 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.



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



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Literatur- und Quellenverzeichnis

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

Groos, J. C., Ritter J. R. R. (2009), Time domain classification and quantification of seismic noise in an urban environment. *Geophysical Journal International* 179(2), S. 1213-1231, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04343.x>.

Kudella, P. (2020): Verbundprojekt: Objektive Kriterien zu Erschütterungs- und Schallemissionen durch Windenergieanlagen im Binnenland (TremAc) – Zusammenfassender Schlussbericht zum Gesamtvorhaben.

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

Lerbs, N., Zieger, T., Ritter, J., Korn, M. (2020), Wind turbine induced seismic signals: the large-scale SMARTIE1 experiment and a concept to define protection radii for recording stations. *Near Surface Geophysics* 18, S. 467-482, [doi: 10.1002/nsg.12109](https://doi.org/10.1002/nsg.12109).

Limberger, F., Lindenfeld, M., Deckert, H., Rumpker, G. (2021), Seismic radiation from wind turbines: observations and analytical modeling of frequency-dependent amplitude decays, *Solid Earth Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/se-2021-21>, in review.

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

Neuffer, T., Kremers, S. (2017), How Wind Turbines Affect the Performance of Seismic Monitoring Stations and Networks. 77. Tagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 27. – 30. März 2017 in Potsdam.

Neuffer, T., Kremers, S., Fritschen, R. (2019), Characterization of seismic signals induced by the operation of wind turbines in North Rhine-Westphalia (NRW), Germany. *Journal of Seismology* 23(5), S. 1161-1177.

Impressum

© FA Wind, Juli 2021

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, HarbourDom GmbH

Redaktion

Dr. Dirk Sudhaus

Zitiervorschlag

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

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 | 12435 Berlin

T +49 30 64 494 60-60

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