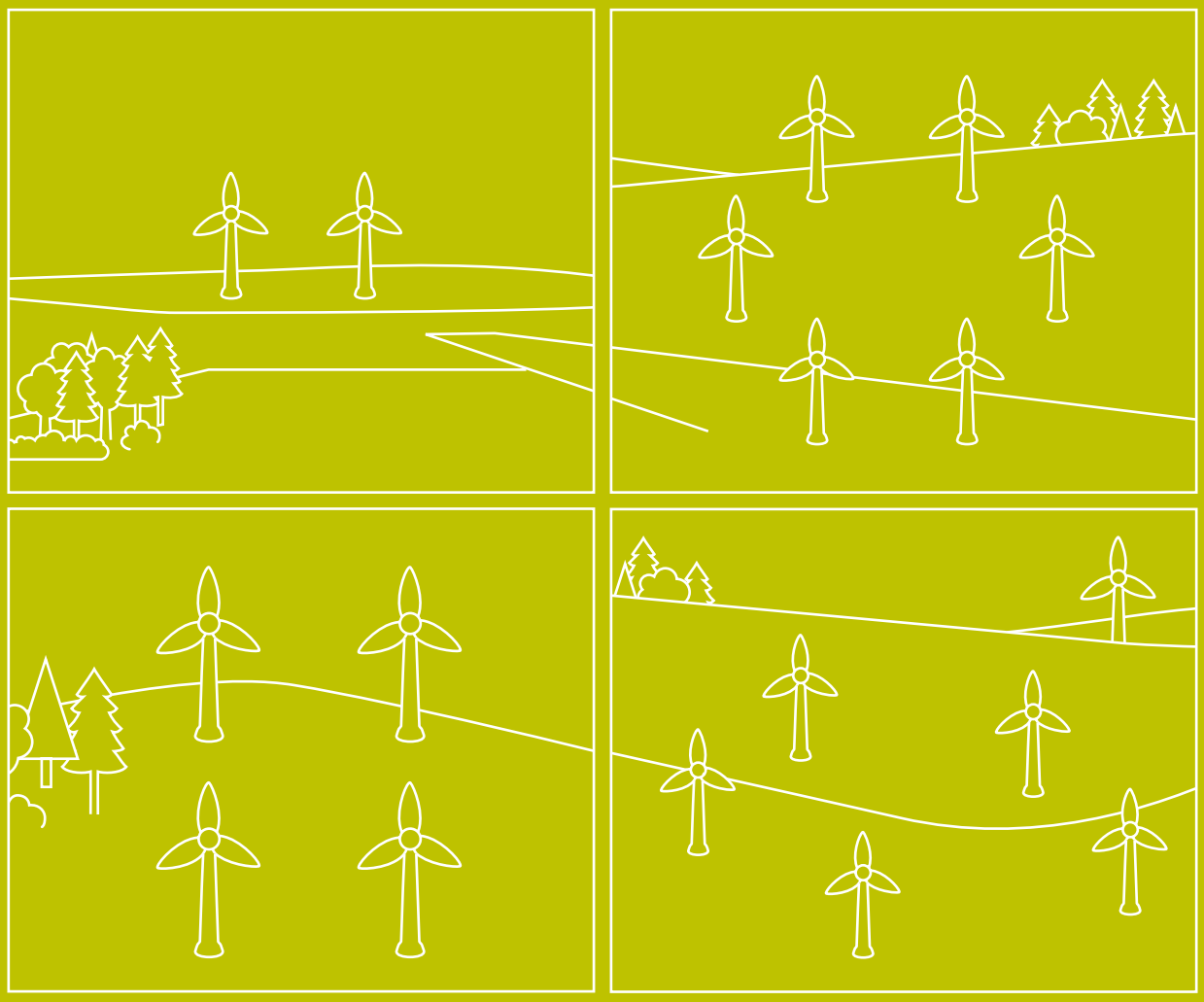
FACHAGENTUR
WINDENERGIE AN LAND

HINTERGRUNDPAPIER

Einfluss von Windparks auf Bodenschwingungen

Kann das Design seismisches Rauschen reduzieren?



Einfluss von Windparks auf Bodenschwingungen

Kann das Design seismisches Rauschen reduzieren?

Rafael Abreu und Prof. Dr. Christine Thomas (Universität Münster)

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

1 Einführung 5

2 Numerische Methode 6

3 Tests mit unterschiedlichen Quellen 8
3.1 Verwendung einer sinusförmigen Quellfunktion 8
3.2 Verwendung seismologischer Messungen 9
3.3 Einfluss der Turmschwingungen von WEA auf seismisches Rauschen 11

4 Diskussion 13

Impressum 16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: a) bis f) betrachtete Windpark-Szenarien, g) Modellabmessungen und Gitter h) angenommenes Geschwindigkeitsmodell für Vp und Vs 7

Abbildung 2: Numerische Simulation einer auf 5 Hz zentrierten Sinusquellenzeitfunktion für die in Abbildung 1 vorgeschlagenen numerischen Szenarien. 9

Abbildung 3: a) Kreisförmige Windpark-Konfigurationen in unterschiedlichen radialen Abständen b) Kreisförmige Windpark-Konfigurationen bei unterschiedlichen radialen Abständen mit einer durch eine zufällige Störung verschobenen Zeitfunktion der Quelle 10

Zusammenfassung

Von Windenergieanlagen (WEA) erzeugte seismische Energie ist eine Quelle für unerwünschtes Rauschen, das an seismologischen Stationen in einer Entfernung von bis zu mehreren Kilometern aufgezeichnet werden kann. Die Stärke des aufgezeichneten seismischen Rauschens hängt von der Anzahl und dem Standort der WEA ab, die es erzeugen, sowie von den lokalen geologischen Strukturen.

In der vorliegenden Untersuchung wurden numerische Modellierungen verwendet, um die Auswirkungen von mehreren WEA in Windparks mit unterschiedlichen Anordnungen der Anlagen zu betrachten. Ziel war es herauszufinden, ob spezielle Anordnungen der WEA in einem Windpark das seismische Rauschen abmildern können. Es zeigt sich, dass bei unterschiedlichen Konstellationen das Rauschen entweder verstärkt oder abgemildert werden kann. Allerdings kann eine eindeutige Anordnung als beste Aufstellung der WEA innerhalb eines Windparks nicht gefunden werden.

Mit Hilfe der Simulationen wurde auch die publizierte Beziehung zwischen dem Geräuschpegel an einer bestimmten seismischen Station und der Anzahl N der in Betrieb befindlichen WEA, welche als proportional zu $\sqrt{N}$ angegeben wird,[1] überprüft. Es zeigt sich, dass bei den untersuchten Anordnungen das Rauschen für verschiedene Frequenzen nicht dem $\sqrt{N}$ Gesetz folgt.

Der Einfluss der kleinräumigen Geologie kann mit unseren Methoden nicht untersucht werden, sollte in der Zukunft jedoch berücksichtigt werden.

[1] Neuffer (2020); Neuffer, Kremers (2017); Schofield (2001); DIN 4150-1: 2001-06 (2001).

1 Einführung

Windenergieanlagen (WEA) injizieren durch ihre Eigenschwingungen über das Fundament Bodenbewegungen in den Untergrund. Diese Bodenbewegungen laufen als seismische Wellen durch die Erdkruste und werden von den Seismometern an Erdbebenmessstationen registriert. Dieses durch WEA verursachte seismische Rauschen wird hauptsächlich im Frequenzbereich von 1-10 Hz beobachtet[2], einem Frequenzbereich, in dem auch Erdbeben und andere seismische Registrierungen liegen. Gemessen wird dieser Einfluss bis zu Entfernungen von 18 km.[3] Die Rauschamplitude hängt stark von der Windgeschwindigkeit sowie der Höhe, Anzahl und Art der WEA ab.[4]

Obwohl mehrere Versuche unternommen wurden, die Natur des seismischen Rauschens von WEA zu verstehen, ist nicht viel über die Dynamik der Wellenausbreitung und den Einfluss verschiedener Windpark-Szenarien bekannt. Die Studie von Gortsas et al.[5] bestätigt, dass (1) die meisten von WEA erzeugten seismischen Wellen als Rayleigh-Wellen abgestrahlt werden, (2) höhere Störungen in einem Frequenzbereich von 5-10 Hz erzeugt werden, im Vergleich zu niedrigeren und höheren Frequenzbändern. Für Windparks wurde weiterhin gezeigt, dass sich der Geräuschpegel an einer bestimmten seismischen Station proportional zu $\sqrt{N}$ verhält, wobei N die Anzahl der in Betrieb befindlichen WEA ist.[6] Der Norm DIN 4150-1: 2001-06[7] folgend, bezieht sich der Maximalwert der Schwingungsgeschwindigkeit v_N wie folgt auf die Anzahl der WEA

$$v_N = \chi v_B \sqrt{N} \qquad (1)$$

wobei χ ein Korrekturfaktor in Abhängigkeit von N und N_B ist, v_B der gemessene Maximalwert der Schwingungsgeschwindigkeit am Beobachtungspunkt beim Betrieb von N_B WEA und N die Gesamtzahl der (operativen und nicht operativen) WEA.

Im Rahmen des Forschungsprojektes MISS (Minderung der Störwirkung von Windenergieanlagen auf seismologische Stationen) wurde eine numerische Analyse durchgeführt, um zu untersuchen, ob bestimmte Anordnungen von WEA in einem Windpark zu einer Reduktion der seismischen Energie an den Seismometern führen können.

[2] Zieger, Ritter (2018); Stammler, Ceranna (2016); Neuffer, Kremers (2017); Neuffer et al. (2019).

[3] Schofield (2001).

[4] Neuffer, Kremers (2017).

[5] Gortsas et al. (2017).

[6] Neuffer (2020); Neuffer, Kremers (2017); Schofield (2001); DIN 4150-1: 2001-06 (2001).

[7] DIN 4150-1: 2001-06 (2001).

2 Numerische Methode

Um das von mehreren WEA auf seismischen Stationen erzeugte Rauschen zu modellieren, wurden vollständige numerische 3D-Simulationen mit dem frei verfügbaren Code specfem3d-cartesian[8] durchgeführt. Dieser beruht auf der Spektralelementmethode, um die elastodynamischen 3D-Bewegungsgleichungen im Zeitbereich zu lösen. Es wurde numerisch ein Frequenzbereich des seismischen Rauschens zwischen 1-10 Hz modelliert. Das numerische Modell mit den Abmessungen 4 × 3 × 2 km (Länge / Breite / Tiefe) ist mit ca. 72 Millionen Punkten abgebildet (siehe Abbildung 1g). An den Rändern und am unteren Rand des Modells wurden absorbierende Ränder[9] implementiert, um Reflexionen von der Seite zu vermeiden, am oberen Rand wurden die Randbedingungen einer freien Oberfläche eingestellt. Es wird angenommen, dass die seismische Geschwindigkeit im Modell mit der Tiefe zunimmt (Primärwellengeschwindigkeit v_p = 1200 – 3200 m/s; Scherwellengeschwindigkeit v_s = 900 - 2400 m/s; konstante Dichte ρ = 2300 kg/m^3) wie in Abbildung 1h gezeigt.

Es wurden sechs verschiedene Windpark-Szenarien betrachtet, die in Abbildung 1 dargestellt werden. Als Quellen wurden in einem ersten Szenario als Anregung Sinusschwingungen verwendet, in einem weiteren Szenario die seismischen Rauschmessungen von Neuffer[10], die an jeder WEA als Punktquellen auf die drei Raumkoordinaten injiziertet wurden, wobei einerseits die Quellen in Phase (gleiche Phase an allen WEA) als auch an den einzelnen WEA phasenverschoben betrachtet wurden. In einem dritten Szenario wurden dieselben Quellen benutzt, dabei aber zusätzlich die Neigung des Fundaments berücksichtigt. Die seismischen Messungen für die Bestimmung der Charakteristik der Wellen der Quelle[11] (die Windenergieanlage) wurden im Windpark „Bürgerwindpark A31 Hohe Mark“ in Heiden (NRW) durchgeführt. Er besteht aus zwei Windkonzentrationszonen mit jeweils drei WEA vom Typ Enercon E-115. Die WEA haben jeweils 3 MW Nennleistung, 149 m Nabenhöhe und einen Rotordurchmesser von 115,7 m. Innerhalb der Konzentrationszonen stehen die WEA im Abstand von etwa 500 Meter zueinander und in gleicher Entfernung zur nahe gelegenen Autobahn. Die WEA mit dem größten Abstand zur Autobahn und zu den anderen WEA wurde als Untersuchungsobjekt ausgewählt. Durch Messungen wurden die Bewegungen des Turms, des Fundaments und des unmittelbar angrenzenden Untergrunds ermittelt. Um die Schwingungen am Fundament und in der direkten Umgebung im Untergrund zu analysieren, wurden kontinuierliche Messungen mit einer Dauer von einem Monat mit insgesamt 17 mobilen seismischen Stationen durchgeführt.[12] Verwendeten wurden die seismischen Aufzeichnungen einer seismischen Station, die in einer Entfernung von 8 m von der WEA installiert war.

[8] Komatitsch, Tromp (1999).

[9] Komatitsch, Tromp (2003).

[10] Neuffer (2020).

[11] Neuffer (2020).

[12] Neuffer (2020).

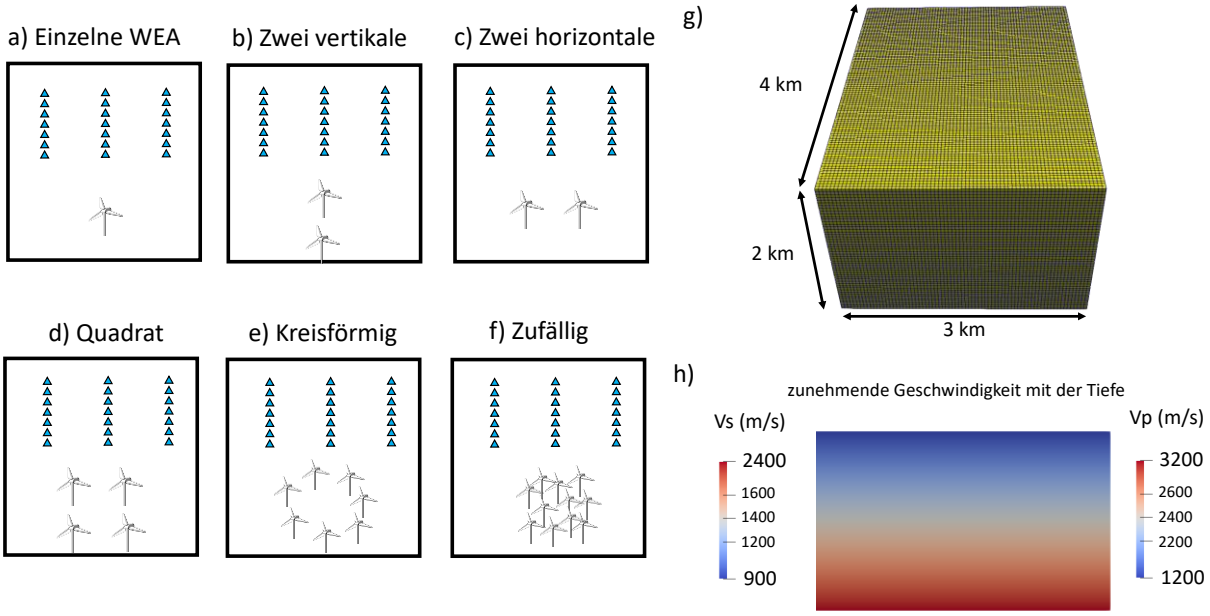


Abbildung 1: a) bis f) betrachtete Windpark-Szenarien, g) Modellabmessungen und Gitter h) angenommenes Geschwindigkeitsmodell für Vp und Vs

3 Tests mit unterschiedlichen Quellen

3.1 Verwendung einer sinusförmigen Quellfunktion

Um einen Einblick in die Wellenausbreitung der verschiedenen Windpark-Szenarien zu erhalten, wurde zunächst eine bei 5 Hz zentrierte Sinuswelle als Quellzeitfunktion[13] betrachtet, die an jedem Ort der WEA innerhalb des Windparks in den drei Koordinaten (x, y, z) injiziert wurde. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der vertikalen Komponente im Frequenzbereich (nach Fourier Transformation). Die farbig gestrichelten Linien in Abbildung 2 geben die verschiedenen Anordnungen an, die mit dem Fall einer einzelnen WEA (dicke blaue Linie, Abbildung 2) verglichen werden. Zunächst konnte beobachtet werden, dass alle aufgezeichneten Signale erwartungsgemäß eine zentrierte Hauptfrequenz bei 5 Hz, jedoch unterschiedliche Energie haben. Es fällt auf, dass die Signale mit der kleinsten Energie nicht bei einer einzelnen WEA gemessen werden, sondern dass die Anordnung von zwei vertikal angeordneten WEA die Energie des aufgezeichneten Signals reduziert. Dies kann durch einfache direkte Interferenz der beiden Rauschquellen erklärt werden. Bei den anderen WEA-Anordnungen überlagern sich die Wellen jedoch positiv, was eine Energiezunahme zur Folge hat. Für einige Entfernungen und Richtungen variiert die Energie auch bei den anderen Anordnungen, aber im Allgemeinen zeigen alle Modelle höhere Amplituden im Vergleich zur einzelnen WEA. Die zufälligen und die kreisförmigen Anordnungen zeigen im Vergleich zur einzelnen WEA immer höhere Amplituden in alle Richtungen und für alle Distanzen der Seismometer.

[13] Energie, die über die Zeit in unterschiedlicher Stärke an der Quelle (Standorte der WEA) eingebracht wird.

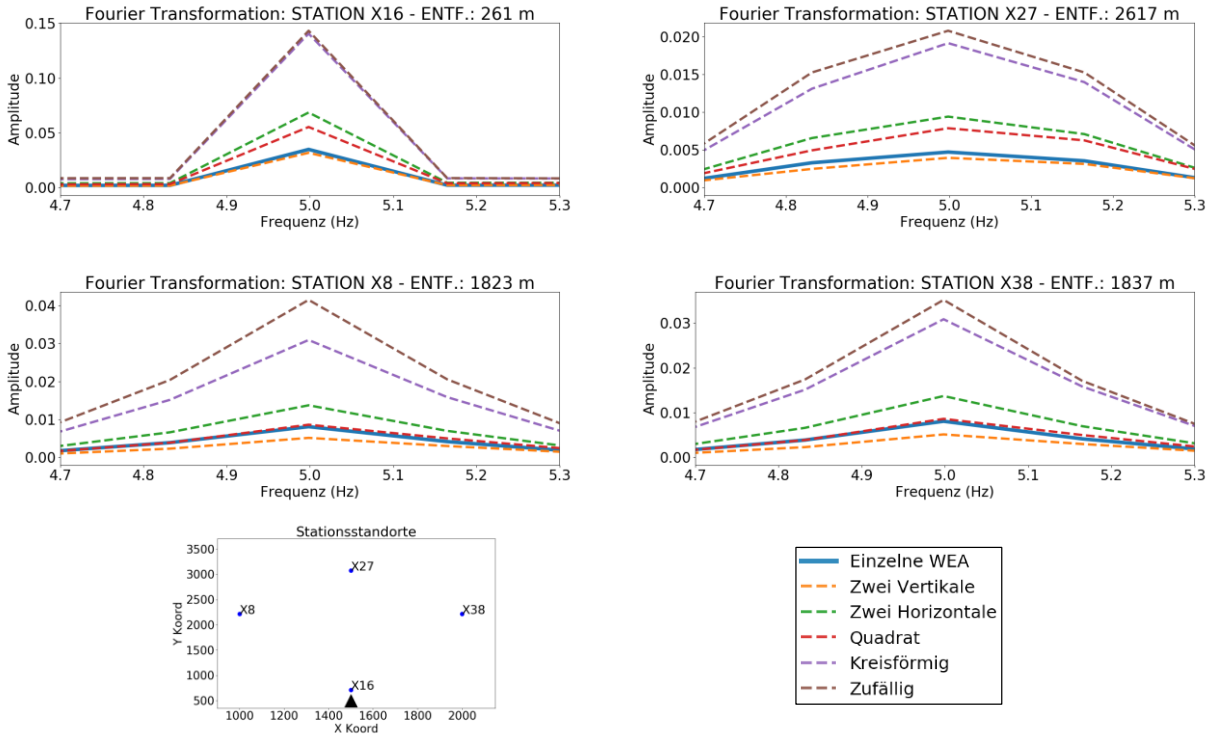


Abbildung 2: Numerische Simulation einer auf 5 Hz zentrierten Sinusquellenzeitfunktion für die in Abbildung 1 vorgeschlagenen numerischen Szenarien. Die Lage der seismologischen Stationen relativ zum Windpark ist unten links gezeigt.

3.2 Verwendung seismologischer Messungen

Die Modellierungen wurden mit den seismischen Rauschmessungen von Neuffer[14] als Quellzeitfunktionen wiederholt. Es wurde das gleiche Strukturmodell wie zuvor verwendet und die Simulationen mit und ohne Dämpfung in einem Frequenzbereich von 1-10 Hz durchgeführt. Das angenommene Dämpfungsmodell ist gegeben durch Olsen et al.[15] Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse für die Simulationen der sechs verschiedenen Windparks entsprechend der Konfiguration wie in Abbildung 1 dargestellt. Ein komplexeres Verhalten wird sichtbar: Einige Anordnungen von WEA erhöhen die Energie für einige Frequenzen und verringern sie für andere Frequenzen. Die kreisförmigen und die zufälligen Konfigurationen zeigen nicht für alle Frequenzen die höchsten Rauschamplituden. Vielmehr scheinen die zufälligen und kreisförmigen Anordnungen von WEA die seismische Energie für einen bestimmten Frequenzbereich im Vergleich zum einzelnen WEA-Szenario abzuschwächen. Betrachtet wurden jeweils 10 WEA sowohl in kreisförmigen als auch in zufälligen Szenarien mit der Erwartung, $\sqrt{10}$ mal mehr Energie als von einer einzelnen WEA zu erhalten. Dies bestätigte sich jedoch nicht. Insbesondere konnte beobachtet werden, dass das Szenario der zufällig verteilten WEA die niedrigeren Frequenzen deutlich verstärkt und die höheren Frequenzen in Bezug auf die übrigen verschiedenen Szenarien reduziert (siehe Abbildung 3). Die weiteren Szenarien tendieren zum entgegengesetzten Verhalten, d. h. niedrige Frequenzen werden gedämpft und hohe Frequenzen verstärkt.

[14] Neuffer (2020).

[15] Olsen et al. (2003).

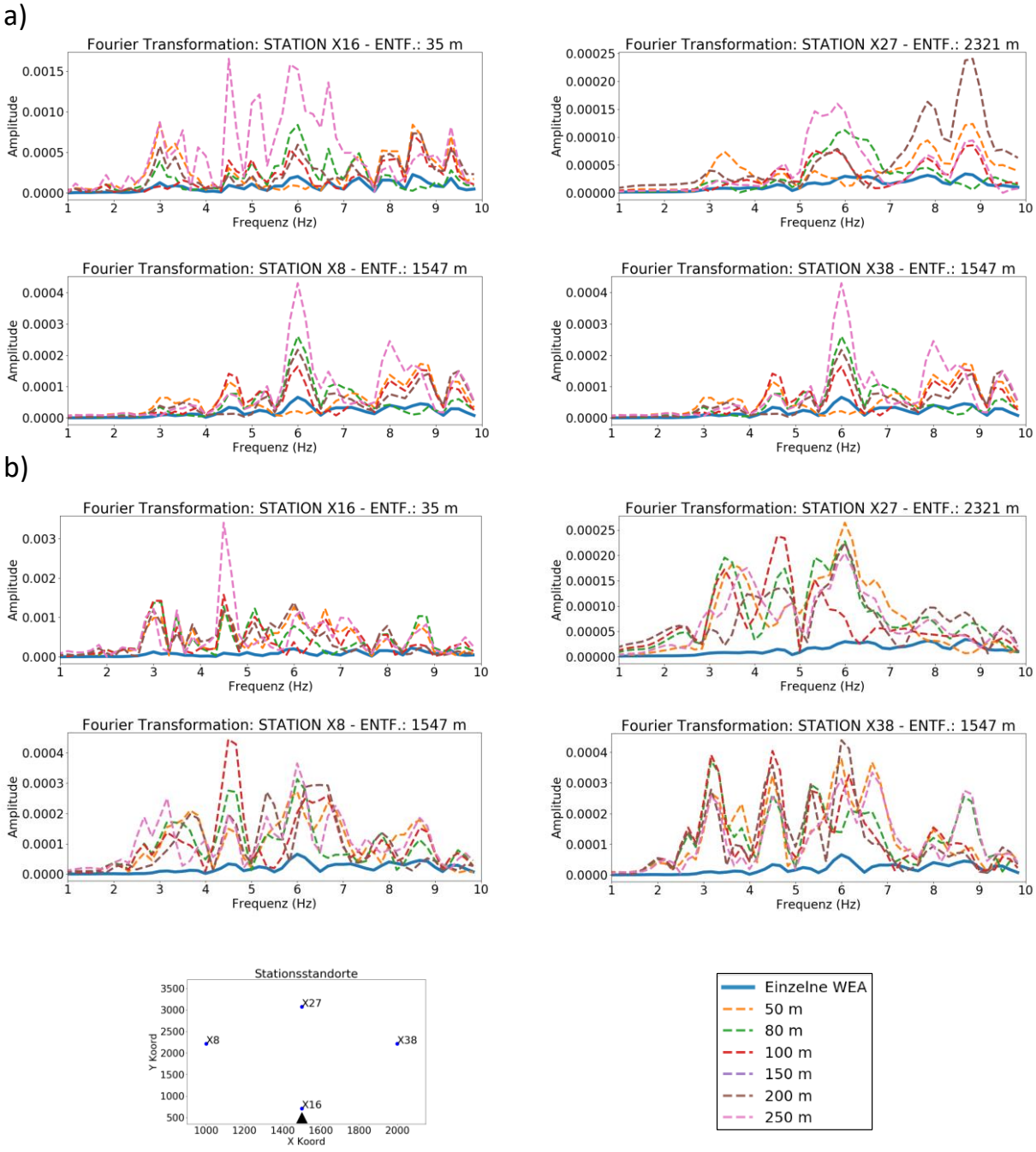


Abbildung 3: a) Kreisförmige Windpark-Konfigurationen in unterschiedlichen radialen Abständen (siehe Legende). Die Lokation der Seismometer relativ zum Windpark wird unten links gezeigt. b) Kreisförmige Windpark-Konfigurationen bei unterschiedlichen radialen Abständen mit einer durch eine zufällige Störung verschobenen Zeitfunktion der Quelle

Untersucht wurde der Einfluss des Radius der kreisförmig angeordneten WEA in einem Windpark auf die Rauschenergie. Gewählt wurde die kreisförmige Anordnung der WEA, da dies die Energie bei bestimmten hohen Frequenzen zu dämpfen scheint (siehe Abbildung 3a). Betrachtet wurden sieben verschiedene kreisförmige Modelle, bei denen der radiale Abstand zwischen 50 und 300 m variiert. An jedem WEA-Standort wurde eine Amplitude von 78.202 MNm[16] geteilt durch die Gesamtzahl der WEA (jeweils 10) injiziert und diese mit einer einzelnen WEA verglichen, bei der die gleiche Gesamtenergie injiziert wurde. Die in Abbildung 3b dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die kreisförmige An-

[16] Gortsas et al. (2017).

ordnung von WEA die Energie des Rauschens bei bestimmten Frequenzen erhöht. Die kreisförmigen Modelle mit Radien von 50 m, 80 m und 200 m dämpfen jedoch die Frequenzen von 4,5 Hz, 6 Hz bzw. 8,5 Hz gegenüber der einzelnen WEA. Da in jede WEA die gleiche Energiemenge injiziert wurde, sollte bei der kreisförmigen Anordnung der 10 WEA $\sim \sqrt{N}$ mal mehr Energie ermittelt werden als bei einer einzelnen WEA. Dass dies nicht der Fall ist, deutet darauf hin, dass die Quellzeitfunktion, die in jede WEA der kreisförmigen Anordnung injiziert werden, sich gegenseitig beeinflussen, was zur Dämpfung bestimmter Frequenzen führt.

Um die vorherigen Ergebnisse besser zu verstehen, wurden dieselben sieben kreisförmigen Anordnungen wie oben betrachteten, jedoch die Quellzeitfunktion mit einer zufälligen Verzögerung von einigen Millisekunden injiziert, d. h. die WEA laufen nicht in Phase. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt und zeigen Veränderungen zu Abbildung 3b. Die Amplitudenreduktion bei 6 Hz konnte beim kreisförmigen Modell mit 50 m Radius nicht beobachtet werden. Stattdessen scheint das Modell mit 100 m diese Frequenz besonders zu dämpfen. Dies liegt vermutlich daran, dass sich beim Einfügen bestimmter Zeitverschiebungen in die eingespeisten Zeitreihen der äquivalente Ort der WEA ändert, d. h., dass durch den Zeitversatz der Ort der WEA scheinbar geändert wird. Diese Ergebnisse stimmen mit Limberger et al.[17] überein, die betonen, dass Phasenverschiebungen in die Zeitreihen einbezogen werden müssen, um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten.

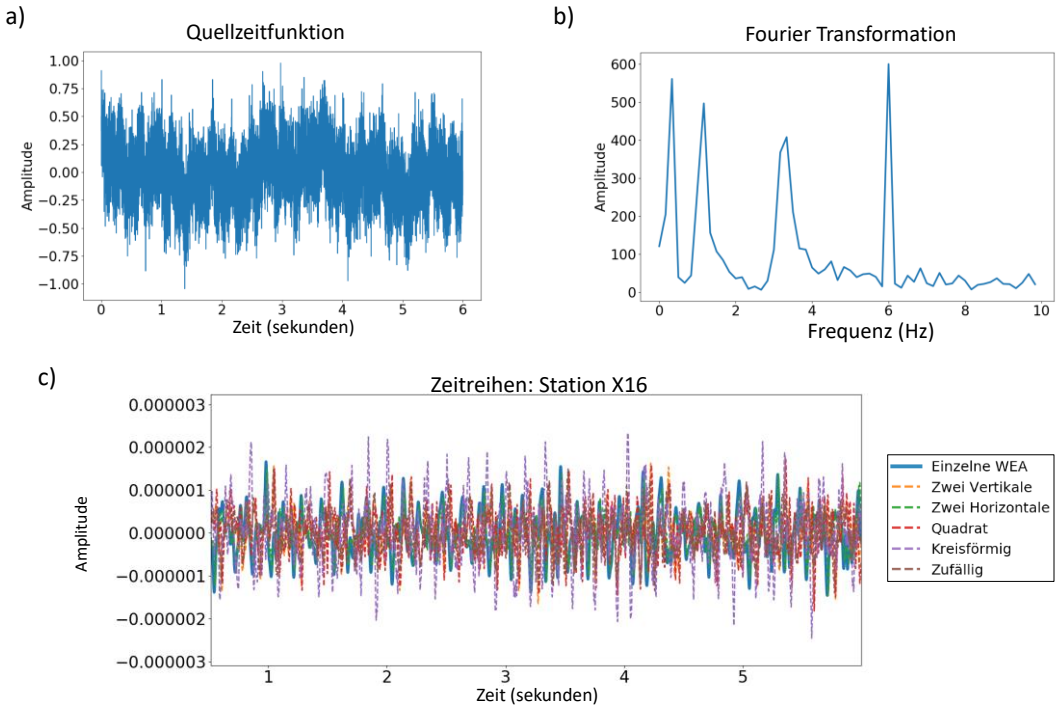


Abbildung 4: a) Quellzeitfunktion berechnet mit Gleichung (3), b) Fourier-Transformation der Quellzeitfunktion nach Gleichung (3), c) Stichprobe der an der vertikalen Komponente aufgezeichneten Zeitreihen unter Berücksichtigung einer Neigungsquelle und der in Abbildung 1 vorgeschlagenen numerischen Szenarien

3.3 Einfluss der Turmschwingungen von WEA auf seismisches Rauschen

In diesem Abschnitt werden die Schwingungen des WEA-Turms als Quelle des Rauschens betrachtet. Wurde in den vorherigen Abschnitten eine gleichmäßig in alle Richtungen ausstrahlende Quellzeitfunktion injiziert, berücksichtigen diese Betrachtungen gerichtete horizontale Anregungen. Es wird erwartet, dass sich das Verhalten unterscheidet, da sich die

[17] Limberger et al. (2021).

erzeugten seismischen Wellen aufgrund der Turmschwingung als Dipol in der freien Oberfläche des Bodens ausbreiten[18]. Um das Biegen der Wellen einzuschließen, betrachten wir eine seismische Momententensorquelle[19], die durch

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} 78.202 \cdot 10^{12} [dyne\ cm] \qquad (2)$$

gegeben ist. Um eine Neigung zu erzeugen, ohne den Zustand der freien Oberfläche zu beeinträchtigen, wurde die Bewegungsquelle 1 m unter der Oberfläche platziert. Als Quellzeitfunktion wurde die folgende Funktion betrachtet

$$s(t) = \sum_{i=0}^{4} \cos(2\pi f_i t) \quad mit\ f_i \in [0.3,1.1,3,25,6]\ Hz \qquad (3)$$

Abbildung 4 zeigt das berechnete Signal, in dem die durch fi gegebenen Hauptfrequenz-Peaks bei 6 Hz zu beobachten sind. Ein Beispiel der an der Station X16 gemessenen komplexen Wellenformen ist in Abbildung 4c dargestellt. Die Spektren (Abbildung) zeigen Unterschiede zu den vorangegangenen Ergebnissen. Die Frequenz von 6 Hz weist im Vergleich zu den anderen Frequenzen eine höhere Energie auf und die Energieabstrahlung ist in verschiedene Richtungen unterschiedlich stark. Im Gegensatz zu Vorhersagen nach Gleichung (1) scheint auch hier die Amplitude der Verschiebung nicht mit der Anzahl der WEA (N) zu korrelieren.

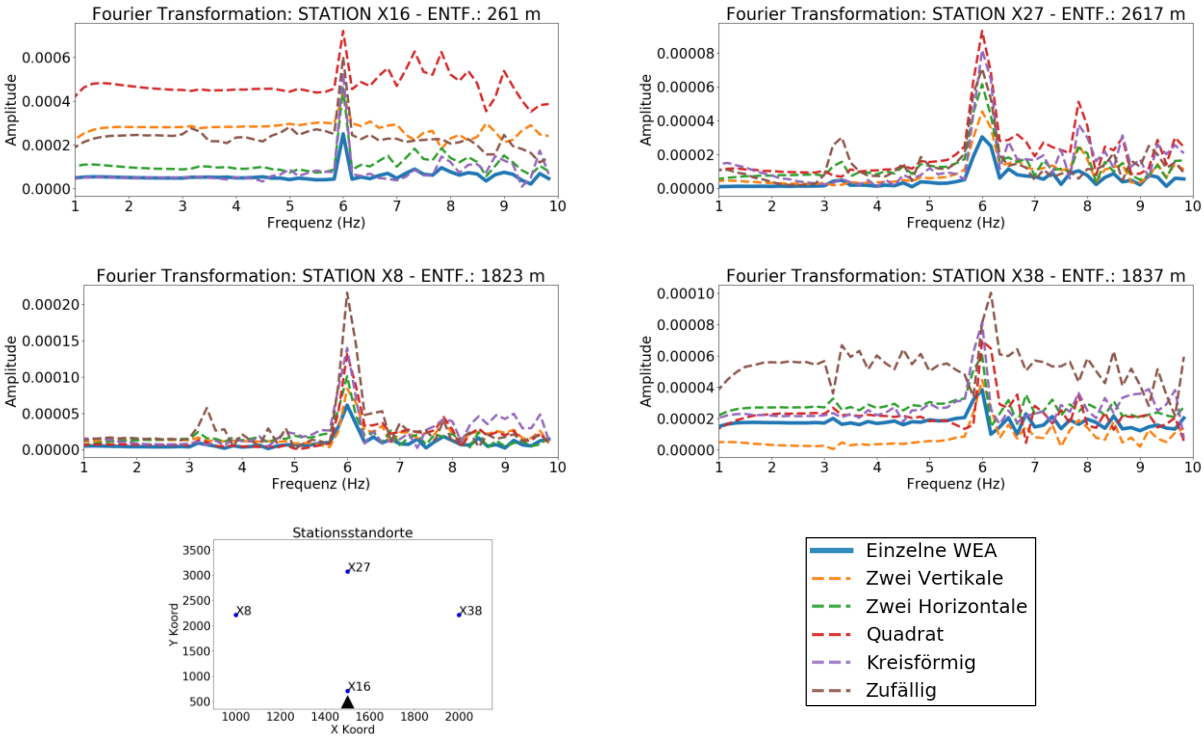


Abbildung 5: Numerische Simulationen von WEA-Rauschen mit Quellzeitfunktion in Gleichung (4), Momententensor gegeben durch Gleichung (3) und die in Abbildung 1 vorgeschlagenen numerischen Szenarien

[18] Gortsas et al. (2017).

[19] Seismische Punktquelle, mit der die allgemeine Abstrahlcharakteristik einer seismischen Quelle beschrieben wird.

4 Diskussion

Zur Untersuchung der Auswirkungen der Anordnung und Ausdehnung von Windparks wurde die Spektralelementmethode verwendet, um die vollständige 3D-Wellenausbreitung von seismischem Rauschen zu simulieren, welche von WEA im Frequenzbereich 1-10 Hz abgestrahlt wird. Die Ergebnisse zeigen, dass das seismische Rauschen von der Anordnung, der Anregungsquelle und der Phase der Quelle, die an den unterschiedlichen Orten eingespeist wird, abhängt. Weiterhin werden die unterschiedlichen Frequenzen im Spektrum unterschiedlich angeregt und gedämpft. Zum Beispiel können 2 WEA hintereinander (in Richtung der seismischen Station) durch negative Überlagerung das Rauschen verringern, wenn beide WEA in Phase schwingen. Bei kreisförmiger Anordnungen der WEA kann das seismische Rauschen in bestimmte Richtungen verringert werden, wenn die Quellen in Phase schwingen (kein Zeitversatz in den injizierten Quellen). Sind die WEA jedoch nicht in Phase, ist dieses Resultat nicht mehr vorhanden. Die Berücksichtigung von Zeitverschiebungen in den Eingangssignalen hat starke Auswirkungen auf das an seismologischen Stationen aufgezeichnete Rauschen, was auch von Limberger et al.[20] beschrieben wurde.

Die Vermutung, dass der ausgestrahlte Rauschpegel von der Wurzel der Anzahl der WEA abhängt[21], konnte in den Simulationen nicht bestätigt werden. Vielmehr werden unterschiedliche Frequenzen in unterschiedlicher Weise beeinflusst und teilweise abgeschwächt oder verstärkt. Zusätzlich beeinflusst die Art der Quelle, die zur Erzeugung des WEA-Rauschens verwendet wurden, die Unterdrückung oder Verstärkung des Rauschens bei unterschiedlichen Frequenzen. Im vorliegenden numerischen Experiment konnte für alle Frequenzen keine eindeutige Beziehung zwischen dem Standort der WEA in einem Windpark, der Ausdehnung des Windparks und einer Abschwächung des an seismischen Stationen aufgezeichneten Rauschens gefunden werden.

[20] Limberger et al. (2021).

[21] DIN 4150-1: 2001-06 (2001).

.

Danksagung

Es wird vorwiegend 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.

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

Literatur- und Quellenverzeichnis

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

Gortsas, T. V., Triantafyllidis, T., Chrisopoulos, S., Polyzos, D. (2017), Numerical modelling of microseismic and infrasound noise radiated by a wind turbine. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 99, S108-123. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.05.001.

Komatitsch, D.,Tromp, J. (1999), Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation. Geophysical Journal International 139(3), S 806–822. https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00967.x.

Komatitsch, D., Tromp, J. (2003), A perfectly matched layer absorbing boundary condition for the second order seismic wave equation. Geophysical Journal International 154(1), S. 146-153. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01950.x.

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 Discussions, S1-26, [preprint], https://doi.org/10.5194/se-2021-21, in review, 2021.

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

Neuffer, T., Kremers, S. (2017), How wind turbines affect the performance of seismic monitoring stations and networks. Geophysical Journal International 211(3), S1319-1327. https://doi.org/10.1093/gji/ggx370.

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), 1161-1177. https://doi.org/10.1007/s10950-019-09866-7.

Olsen, K., Day, S., Bradley, C. (2003), Estimation of Q for long-period (> 2 sec) waves in the Los Angeles basin. Bulletin of the Seismological Society of America 93(2), S. 627-638. https://doi.org/10.1785/0120020135.

Schofield, R. (2001), Seismic measurements at the stateline wind project. Rept No LIGO T020104-00-/, Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory available at https://dccbackup.ligo.org/public/0027/T020104/000/T020104-00.pdf.

Stammler, K., Ceranna, L. (2016), Influence of wind turbines on seismic records of the Gräfenberg array. Seismological Research Letters 87(5), S. 1075-1081. https://doi.org/10.1785/0220160049.

Zieger, T., Ritter, J. R. (2018), Influence of wind turbines on seismic stations in the upper rhine graben, SW Germany. Journal of Seismology 22(1), S.105–122. https://doi.org/10.1007/s10950-017-9694-9.

Impressum

© FA Wind, Dezember 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
Rafael Abreu, Prof. Dr. Christine Thomas, Universität Münster

Redaktion
Dr. Dirk Sudhaus

Zitiervorschlag
FA Wind (2021), Einfluss von Windparks auf Bodenschwingungen. Kann das Design seismisches Rauschen reduzieren?

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