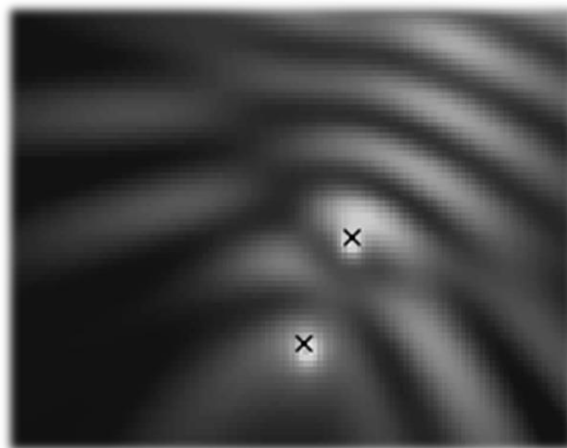


---

## Möglicher Einfluss einer Windparkerweiterung auf die seismologische Erdbebenmessstation IMS bei Imsbach

---



Institut für geothermisches Ressourcenmanagement  
Berlinstr. 107a  
55411 Bingen

[www.igem-energie.de](http://www.igem-energie.de)

**Beauftragt durch:**

Windpark Börstadt GmbH & Co. KG  
Stephanitorsbollwerk 3  
28217 Bremen

**Verfasser:**

MSc. Fabian Limberger  
Dr. Ludger Küperkoch

**Kontakt:**

Institut für geothermisches Ressourcenmanagement  
Berlinstr. 107a  
55411 Bingen  
[igem@igem-energie.de](mailto:igem@igem-energie.de)

[www.igem-energie.de](http://www.igem-energie.de)

igem im April 2023

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	1
Allgemeine Bemerkungen .....	2
Veranlassung und Zielsetzung .....	2
Arbeitspaket 1 und 2: Bestandsaufnahme und Analyse der bisherigen seismologischen Signale und des aktuellen seismischen Rauschniveaus an der seismologischen Station IMS3	
Arbeitspaket 2: Profilmessungen zwischen bestehenden WEA und IMS.....	13
Arbeitspaket 3: Modellierung der seismischen Abstrahlung .....	14
Schlussfolgerungen.....	18

## Allgemeine Bemerkungen

Beim Betrieb von Windenergieanlagen (WEA) werden Erschütterungen bzw. Schwingungen der Anlagen über das Fundament auf den geologischen Untergrund übertragen. Von dort breiten sie sich als seismische Wellen, vornehmlich Oberflächenwellen, lateral aus. Diese so erzeugten seismischen Wellen können an seismologischen Messstationen, die zur Erdbebedetektion genutzt werden, nachweislich auch noch in einigen Kilometer Entfernung aufgezeichnet werden und tragen so maßgeblich zum sogenannten „anthropogenen Rauschen (Noise)“ bei. Die Qualität der Aufzeichnungen an seismologischen Stationen, die sich in der Nähe von WEA befinden, kann gegebenenfalls durch diese Störsignale vermindert werden und beeinträchtigt somit die Detektion von Erdbeben.

*Hinweis:* Die Charakterisierung und Vorhersage von seismischen Störsignalen, welche von Windenergieanlagen ausgehen, ist Gegenstand aktueller Forschung.

## Veranlassung und Zielsetzung

Im Rahmen eines laufenden, immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahrens für ein Windparkvorhaben bei Münchweiler fordert das Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB-RP) eine Einzelfallprüfung hinsichtlich der durch die Inbetriebnahme einer weiteren Windenergieanlagen (WEA) auf dem Bocksrück möglicherweise verursachten negativen Beeinträchtigung der Signalqualität der seismologischen Station IMS, nahe Imsbach. Aktuell sind drei WEA in Betrieb. Dieser Windpark soll um eine WEA erweitert werden. Die seismologische Station IMS befindet sich in ca. 3.2 km Entfernung zum Windpark (Abb. 1). Die Signalqualität der Messstation IMS soll nicht so wesentlich beeinträchtigt werden, dass die Station ihre Funktion nicht mehr hinreichend erfüllen kann.

Das Institut für geothermisches Ressourcenmanagement (igem) wurde beauftragt, diese Einzelfallprüfung durchzuführen. Zur Bewertung einer möglichen Beeinflussung der Signalqualität an den seismologischen Stationen wurden folgende Studien durchgeführt:

- Charakterisierung von typischen Erdbebensignalen, gemessen an IMS.
- Erstellung der aktuellen seismischen Rauschprofile an IMS in Abhängigkeit der Betriebsparameter des bestehenden Windparks.
- Zusätzliche seismische Messungen (drei Stationen, über zwei Monate) zwischen Windpark und IMS, um das Dämpfungsverhalten der Signale, die von den bestehenden WEA ausgehen, zu analysieren und die numerischen Modelle anhand dieses „Ist-Zustands“ zu kalibrieren.
- Wellenfeldmodellierung und Prognose des Anstiegs der Störampplituden, welche die geplante zusätzliche WEA des Windparks verursachen könnte.

Um eine Beurteilung einer möglichen Beeinflussung der seismologischen Stationen durch die geplante WEA durchführen zu können, erfolgte zunächst eine Analyse der bislang aufgezeichneten seismologischen Daten zur Feststellung des aktuellen Rauschprofils in Abhängigkeit der Betriebsparameter der bestehenden WEA, welche vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurden.

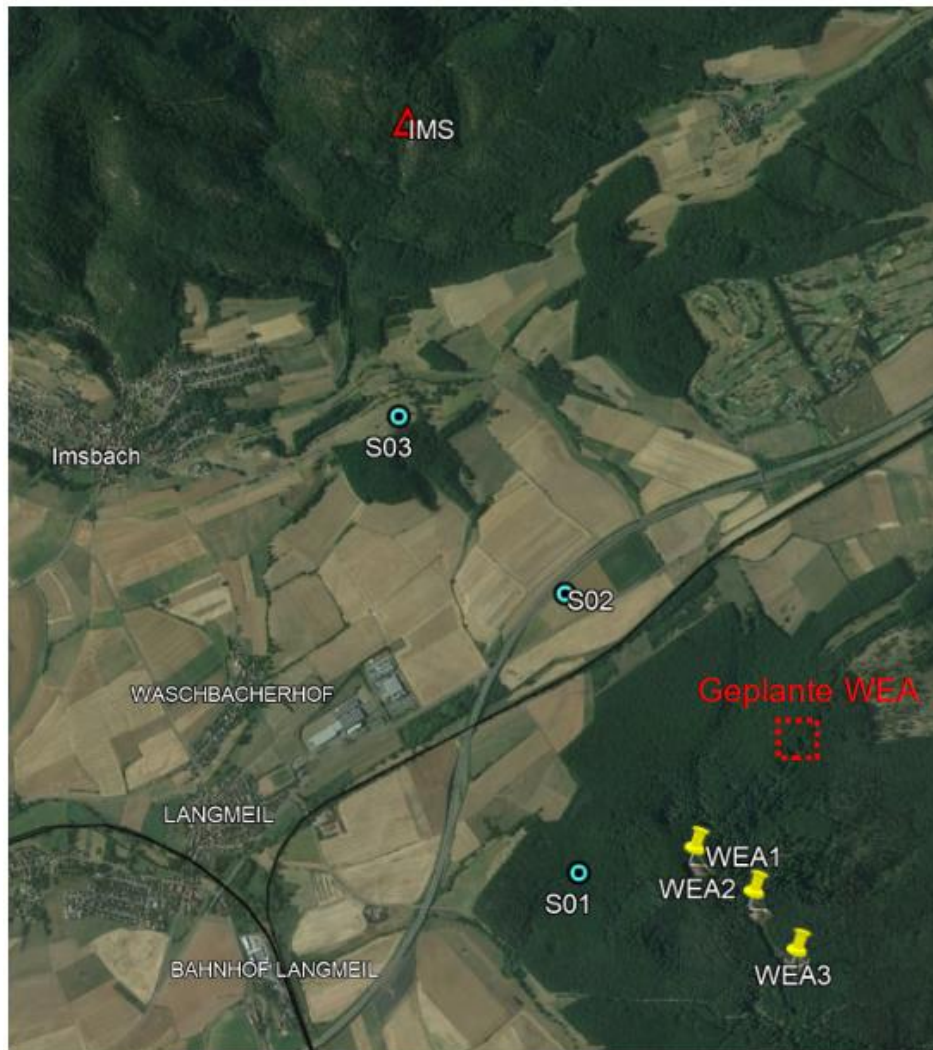


Abbildung 1 Übersichtskarte der Seismometer S01, S02, S03 und IMS und der bestehenden sowie der geplanten WEA (Quelle: google earth).

## Arbeitspaket 1 und 2: Bestandsaufnahme und Analyse der bisherigen seismologischen Signale und des aktuellen seismischen Rauschniveaus an der seismologischen Station IMS

### Bestehendes Rauschniveau an IMS

Im Folgenden werden Leistungsdichtespektren (Power Spektral Density, PSD) der Station IMS gezeigt, die nach der Methode von Welch (1967) (Mittlung von überlappenden Spektrogrammen) berechnet wurden. Die für die Berechnung der PSD's benötigten seismologischen Zeitreihen wurden restituiert (Berechnung der wahren Bodengeschwindigkeit). Aus den kontinuierlichen Aufzeichnungen wurden dann sogenannte Leistungsdichtespektren in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit erstellt. Dazu wurden die

seismologischen Zeitreihen in 10 Minuten Zeitfenster geschnitten und die mittlere Rotationsrate von WEA1 (siehe Abb. 1) diesen 10 Minuten zugeordnet. Diese Daten wurden vom Betreiber zur Verfügung gestellt. Jedes 10-minütige Zeitfenster wurde dann spektral analysiert und einer entsprechenden Rotation-Gruppe (z.B. 8-9 rpm) zugeordnet. Alle PSDs einer Gruppe wurden anschließend gemittelt, um statistisch zuverlässige mittlere Spektren zu erhalten. Zur Berechnung der PSD's wurden lange Zeitreihen vom 21.09.2022 bis 13.12.2022 benutzt. Die berechneten PSD's (Abbildung unten) zeigen diskrete Frequenzpeaks bei 1.2 Hz, 1.7 Hz, 3.5 Hz und 3.8 Hz die klar mit der Rotationsrate korrelieren (Abb. 2). Diese Frequenzen sind typisch für die von WEA emittierten Signale. aufgrund der Korrelation mit der Rotationsgeschwindigkeit des Rotors, ist dieser Anstieg des Rauschens mit hoher Wahrscheinlichkeit den drei bestehenden WEA zuzuordnen. Im Folgenden werden diese Frequenzen als Störsignalfrequenzen bezeichnet.

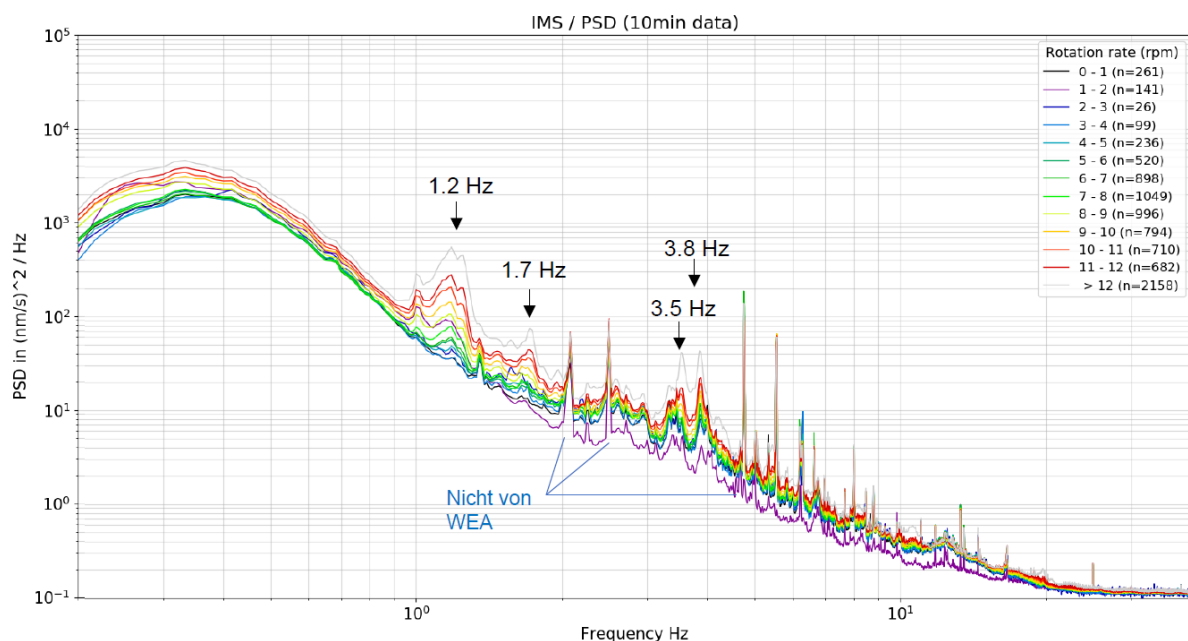


Abbildung 2 Leistungsdichtespektren in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit an WEA1, gemessen an der Station IMS.

## Analyse von Erdbeben anhand von Aufzeichnungen an der Station IMS

Die seismologische Überwachungsstation IMS bei Imsbach ist Eigentum des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) und seit 2015 in Betrieb, um natürliche lokale und regionale Erdbeben zu erfassen. Ausgerüstet ist diese Station mit einem kurzperiodischen Geschwindigkeitsaufnehmer (Eigenfrequenz 1Hz) vom Typ Lennartz LE-3Dlite. Abbildung 2 stellt die Übertragungsfunktion dar.

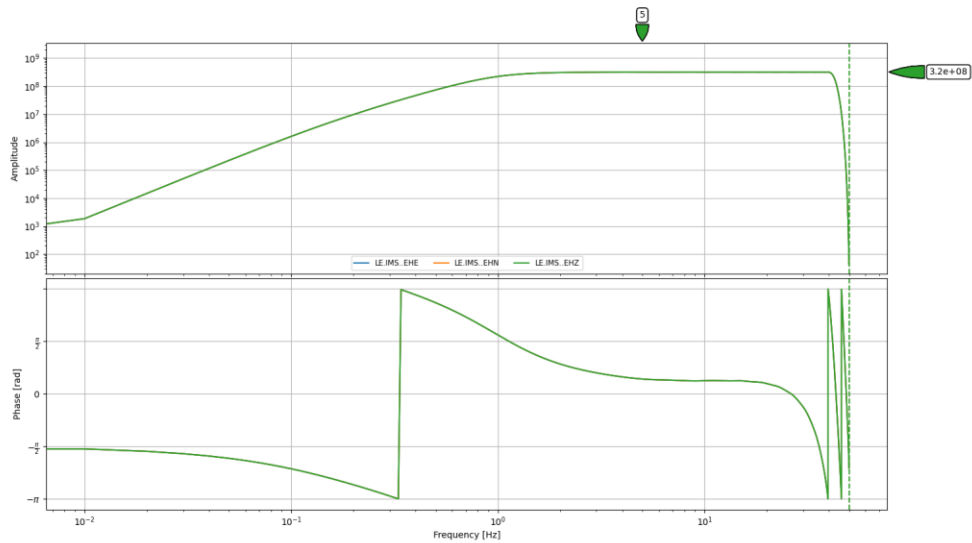


Abbildung3: Übertragungsfunktion (oben: Amplitudenantwort, unten: Phasenantwort) des kurzperiodischen Geschwindigkeitsaufnehmers LE-3Dlite von Lennartz, Vertikalkomponente. Die beiden Horizontalkomponenten haben die gleiche Übertragungsfunktion.

Im Folgenden wird der Frequenzgehalt an der Station IMS aufgezeichneter Erdbebensignale untersucht, um festzustellen, ob die dominierenden Frequenzen des Nutzsignals (Erdbebenwellen) mit den dominierenden Frequenzen des Störsignals (Wellenfeld der WEA) überlappen. Aufzeichnungen folgender lokaler und regionaler Erdbeben wurden dazu herangezogen:

Tabelle 1: Parameter der gewählten Erdbeben

Erdbeben-ID	Herdzeit (UTC)	Magnitude MI	Bemerkungen
e0001.030.22	30-01-2022 20:07	1.3	regional ( $\Delta \approx 100\text{km}$ )
e0001.058.22	27-02-2022 16:52	0.9	lokal ( $\Delta \approx 25\text{km}$ )
e0001.102.22	12-04-2022 16:47	2.3	lokal ( $\Delta \approx 60\text{km}$ )
e0002.102.22	12-04-2022 21:01	1.5	lokal ( $\Delta \approx 60\text{km}$ )
e0003.102.22	12-04-2022 21:02	1.0	lokal ( $\Delta \approx 60\text{km}$ )



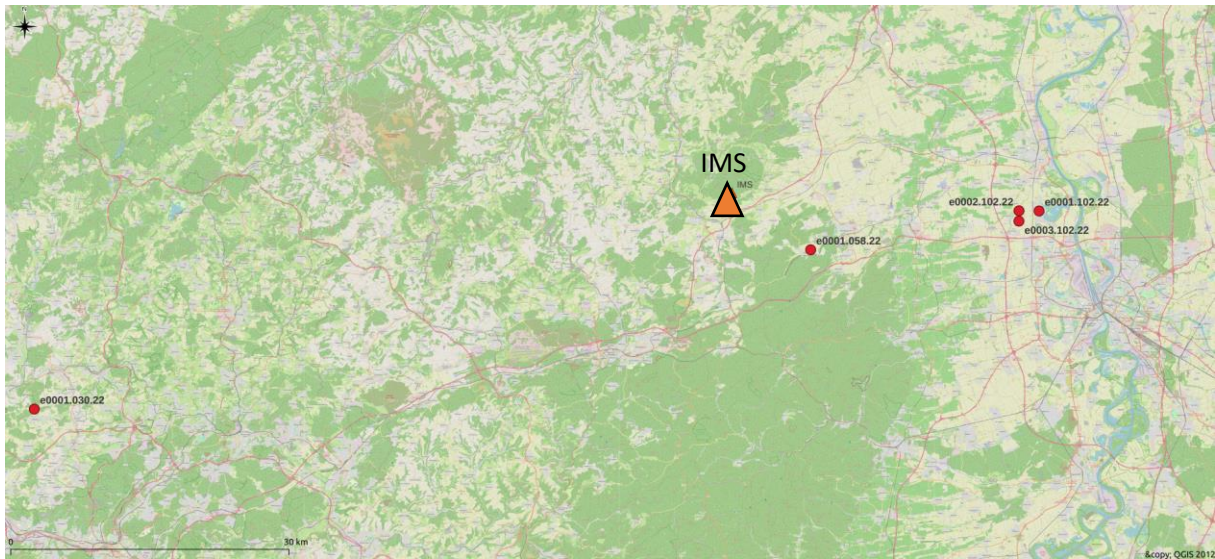
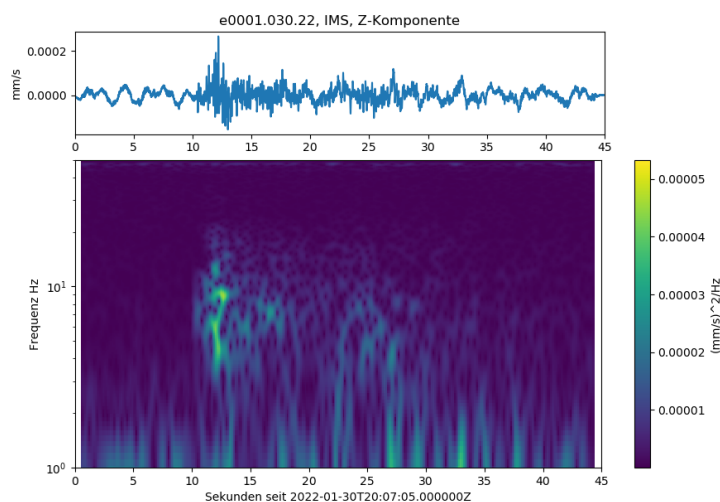


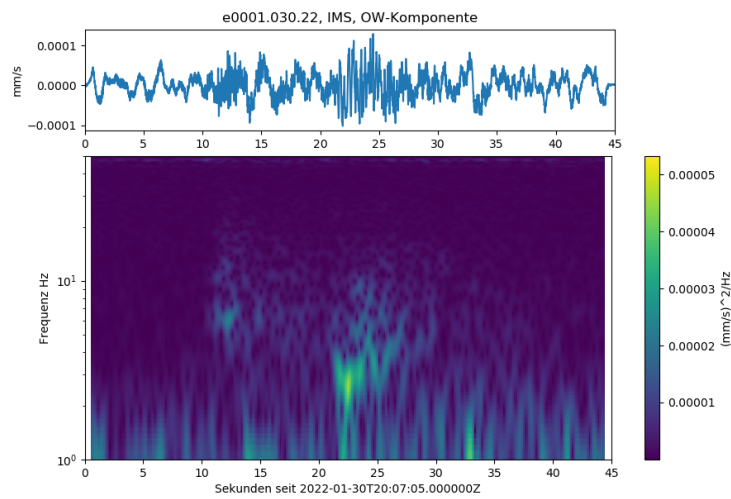
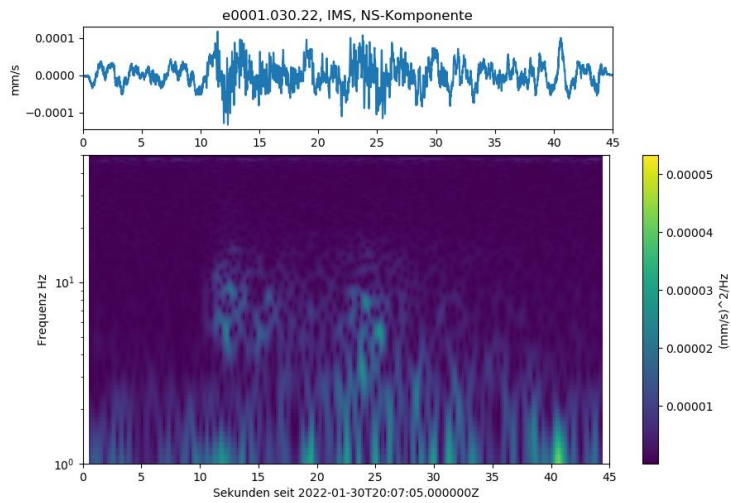
Abbildung 4: Seismologische Überwachungsstation IMS (beiges Dreieck) und ausgewählte Erdbeben, die zur Untersuchung herangezogen wurden.

Für die Untersuchungen der Frequenzinhalte wurden für alle drei Seismometerkomponenten (Vertikal, Nord-Süd, Ost-West) sogenannte Spektrogramm bzw. Sonogramme berechnet nach der Methode von Welch (1967). Spektrogramme oder Sonogramme zeigen die Leistungsdichten (in  $(\text{mm/s})^2/\text{Hz}$ ) der aufgezeichneten Bodenschwinggeschwindigkeiten in Abhängigkeit zur Zeit. Die nachstehenden Abbildungen zeigen die gerechneten Spektrogramme aufgeteilt nach Seismometerkomponenten und die jeweils dazugehörige Wellenform. Die zeitabhängigen Leistungsdichten sind farblich kodiert dargestellt.

**e0001.030.22:**

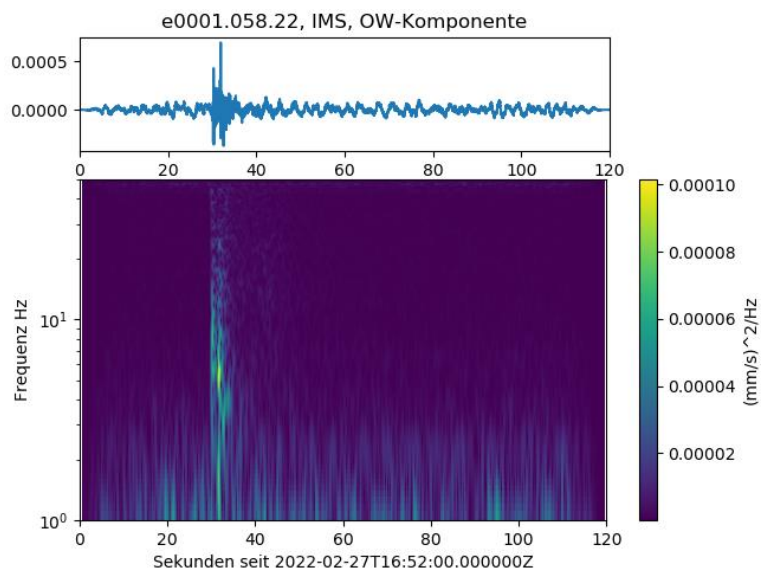
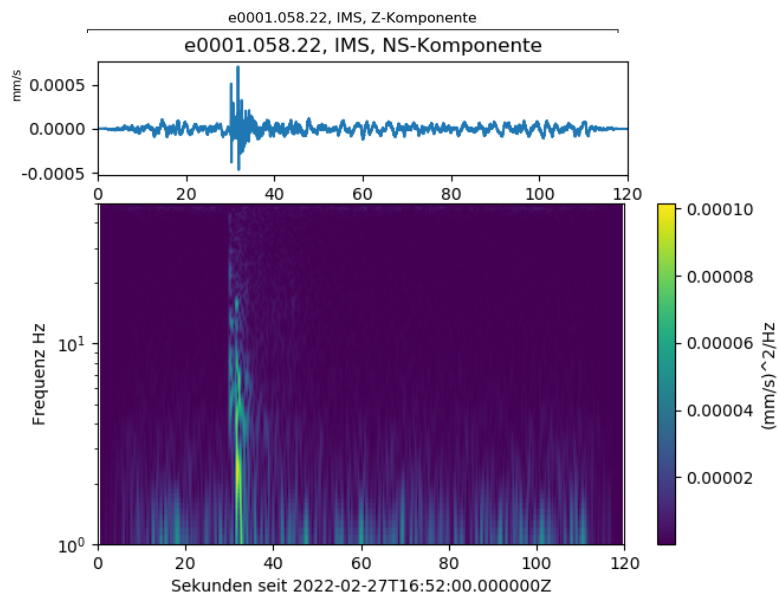






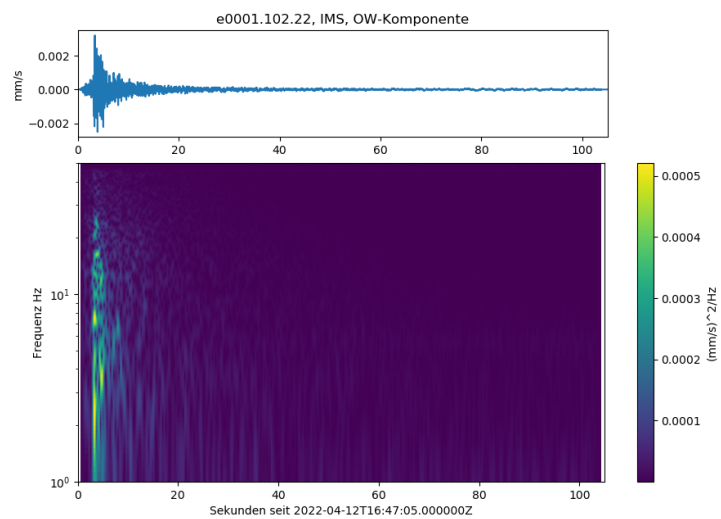
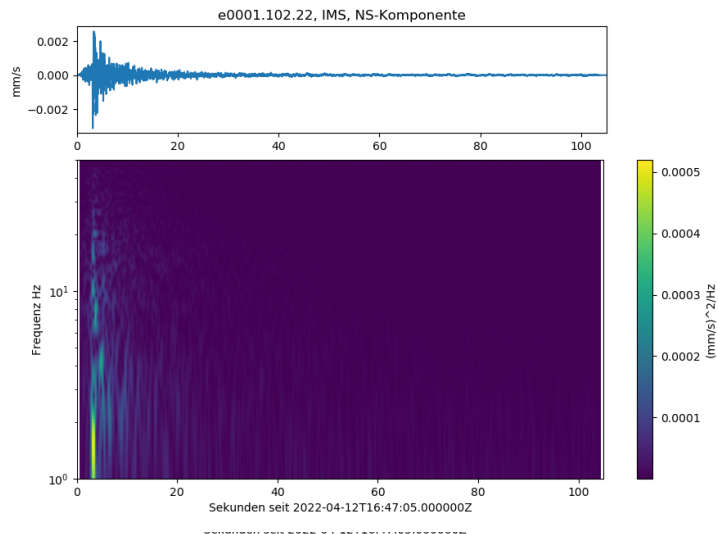
Dieses schwache Beben der Stärke 1.3 konnte trotz der fast regionalen Entfernung sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich gut erfasst werden. Die P- und S-Welleneinsätze sind selbst ohne digitaler Filterung gut zu identifizieren, obwohl die dominierenden Frequenzen im Frequenzband der WEA-Störsignale liegen.

**e0001.058.22:**



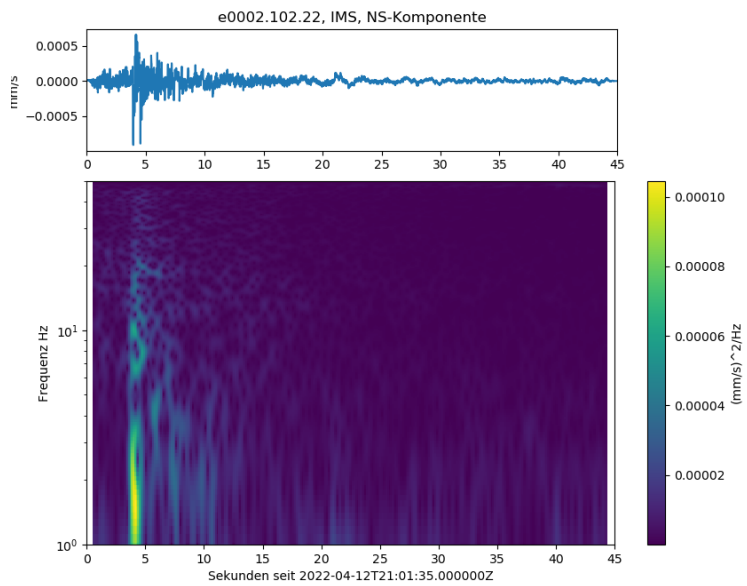
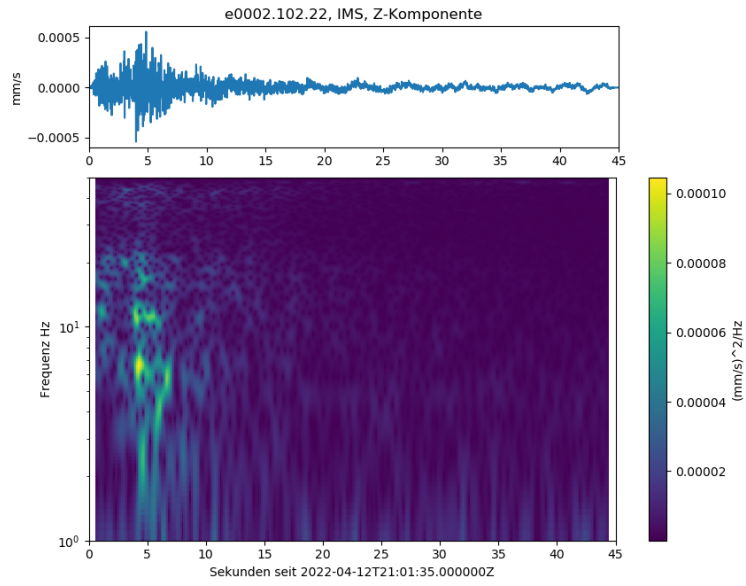
Dieses Mikrobeben (nur instrumentell erfassbar) wurde ebenfalls sehr gut erfasst, Die Phaseneinsätze sind gut zu identifizieren, obwohl auch hier die dominierenden Frequenzen im Störsignalfrequenzband liegen.

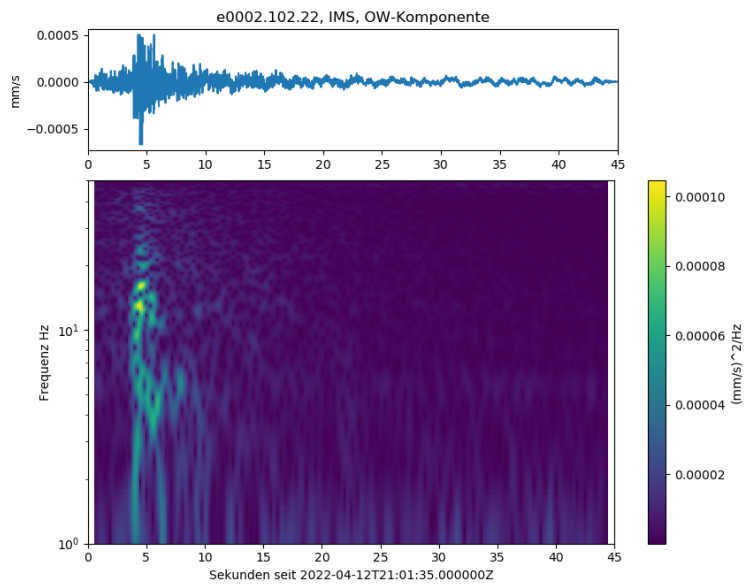
**e0001.102.22:**



Dieses stärkste der untersuchten Erdbeben (MI=2.3) wurde sehr gut erfasst. Obwohl die dominierenden Frequenzen sich besonders im unteren Frequenzbereich mit den dominierenden Störsignalfrequenzen überlappen, sind alle Phaseneinsätze sehr gut zu identifizieren.

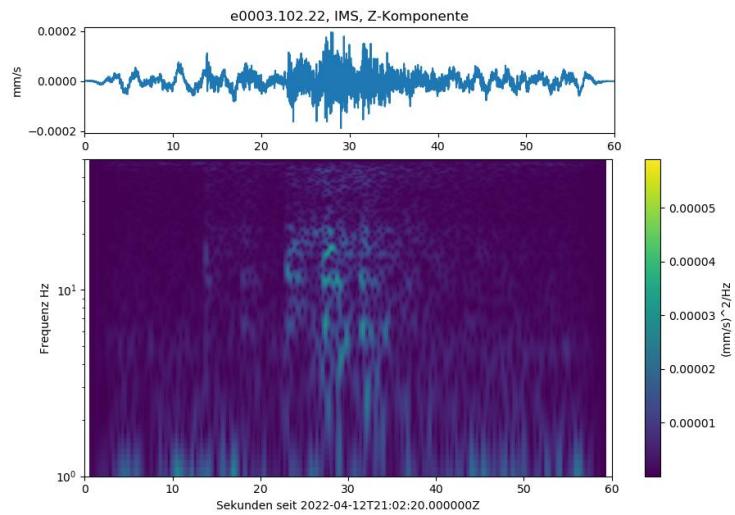
e0002.102.22:

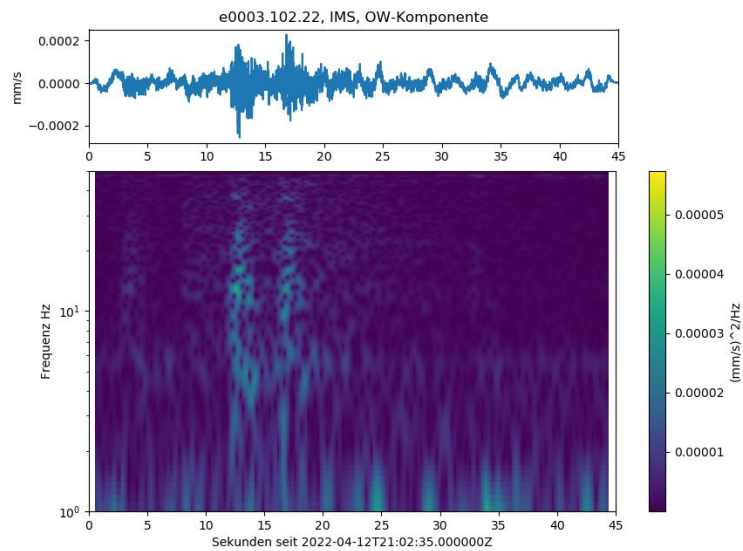
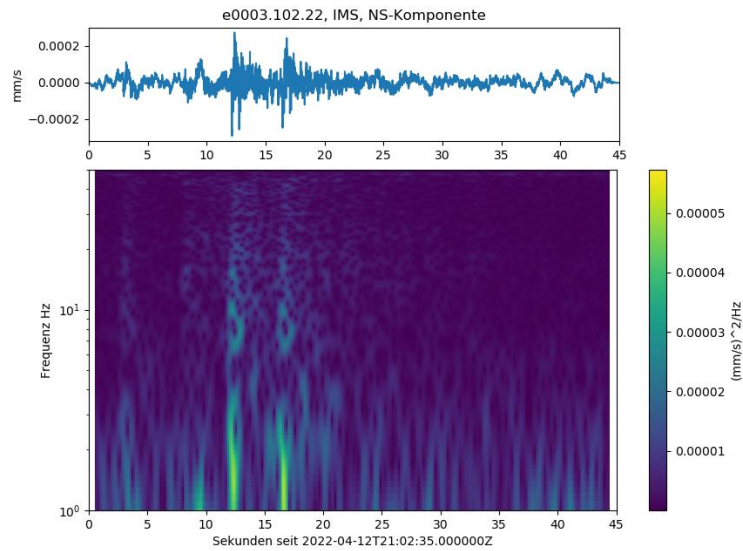




Die Phaseneinsätze dieses Erdbebens können gut erfasst werden, obwohl die dominierenden Frequenzen mit den Störsignalfrequenzen überlappen.

**e0003.102.22:**





Die Phaseneinsätze dieses Mikrobeben können gut erfasst werden, auch wenn sich die dominierenden Frequenzen zumindest teilweise mit den Störsignalfrequenzen überlappen.

**Fazit:** Alle untersuchten Erdbeben wurden in den Aufzeichnungen der Station IMS sehr gut erfasst, obwohl sich die dominierenden Frequenzen der Erdbebensignale mit den Störsignalfrequenzen überlappen. Der Einsatz digitaler Filtermethoden, mit deren Hilfe erfahrungsgemäß eine wesentliche Verbesserung des sogenannten Signal-Rausch-Verhältnisses erreicht werden kann, wird in dieser Studie nicht weiter untersucht.

## Arbeitspaket 2: Profilmessungen zwischen bestehenden WEA und IMS

Die in Arbeitspaket 1 durchgeführte Rauschanalyse wurde ebenfalls für die temporären Seismometer S01, S02 und S03 angewandt (Abb. 5). Diese Stationen sind ca. 500m, 1300m und 2350m von WEA1 entfernt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Rauschniveau mit abnehmender Entfernung zum Windpark zunimmt. Im Nahfeld sind außerdem höherfrequente Signalanteile vorhanden (> 4 Hz), die jedoch mit der Distanz stark gedämpft werden und dadurch nicht mehr an IMS nachzuweisen sind. Signale zwischen 3 Hz und 4 Hz sind ebenfalls sehr deutlich zu identifizieren. Diese Signale verlieren mit der Distanz an Energie, sind aber an IMS weiterhin nachweisbar. Signale zwischen 1 Hz und 2 Hz klingen nur wenig ab, weshalb 1.2 Hz am deutlichsten an IMS zu erkennen ist. Signale mit 1.7 Hz sind im Vergleich zu 1.2 Hz von sekundärer Bedeutung, da die Amplitude geringer ausfällt. Da Signale mit 1.2 Hz, 1.7 Hz, 3.5 Hz und 3.8 Hz an allen Seismometern messbar sind, mit der Distanz zum Windpark grundsätzlich abnehmen und mit der Rotationsgeschwindigkeit korrelieren, sind diese Frequenzen den bestehenden WEA zuzuordnen und werden für die Prognose herangezogen.

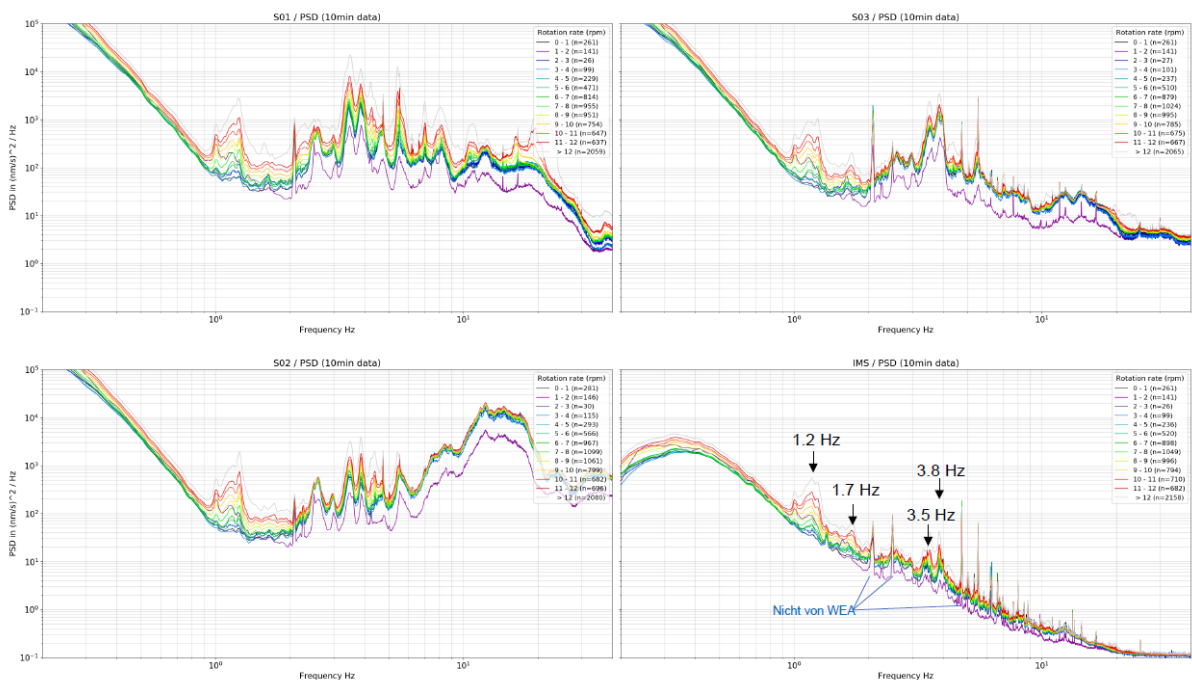


Abbildung 2 Leistungsdichtespektren in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit an WEA1, gemessen an der Station IMS, S01, S02 und S03.



## Arbeitspaket 3: Modellierung der seismischen Abstrahlung

### Kalibrierung des Modells anhand der gemessenen Abklingkurven (Modellierung mit drei WEA)

Aus den in Arbeitspaket 2 ermittelten PSD-Amplituden wurden relative Signalamplituden berechnet, welche das Abklingverhalten der Signale mit der Entfernung zum Windpark darstellen. Diese Amplituden wurden aus den Daten für hohe Rotationsraten berechnet, um sicherzustellen, dass die Anlagen während der entsprechenden Messung in Betrieb waren. Das Abklingverhalten der Signale mit der Entfernung zum Windpark lässt sich in der Regel analytisch beschreiben, unter Einbeziehung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen und Dämpfungswerten des Untergrundes. Solch ein analytisches Modell setzt einen näherungsweise homogenen Untergrund voraus (Limberger et al., 2021). Im Fall der Geologie bei Imsbach, konnte das gemessene Abklingverhalten jedoch nicht durch den homogenen Fall synthetisch reproduziert werden, weshalb aufwändigere numerische 3D Simulationen notwendig waren. Diese Modelle basieren auf der Simulation von vollständigen Wellenfelder (Raumwellen und Oberflächenwelle) und der Mittelung von vielen zufällig gewählten Interferenzen der Wellenfelder, um ein mittleres repräsentatives Abstrahlmuster zu erhalten (Limberger et al., 2021, 2022). Quell- und Empfängerpositionen waren dabei die drei (bzw. vier) WEA und die installierten Seismometer (Tab.2, Abb. 6). Da ein homogenes Modell nicht ausreicht, musste ein Zweischichtenmodell angenommen werden, um die frequenzabhängigen Amplituden numerisch nachbilden zu können (Tab. 2). Das Zweischichtenmodell ergibt sich aus der Annahme, dass die oberflächennahe Schicht durch vorwiegend Lockermaterial charakterisiert ist, sodass sich geringe Geschwindigkeiten und eine höhere Dämpfung der Wellen ergeben. Die darunterliegenden Schicht (homogener Halbraum) ist dann durch höhere Geschwindigkeiten und einer relativ geringen Dämpfung charakterisiert. Insgesamt wurden mehr als 50 Modelle untersucht, wobei die Mächtigkeit, seismische Geschwindigkeit und Dämpfungsparameter der oberflächennahen Schicht variierten wurden. Das Modell, welches die vier gemessenen Abklingkurven (für 1.2, 1.7, 3.5 und 3.8 Hz) zufriedenstellend simultan reproduzieren konnte (Abb. 8), diente schließlich als kalibriertes Modell zur weiteren Prognose mit vier WEA. Lokale Effekte auf die Signalausbreitung (wie z.B. die Amplitudenverstärkung an Station S03) sind im Modell nicht berücksichtigt. Um diese Effekte mit diesem Modell erfassen und simulieren zu können, würden wesentlich genauere Informationen über den lokalen Untergrund benötigt. Dies würde insbesondere lokal spezifische Q-Werte und seismische Geschwindigkeiten erfordern. Hierzu wären zusätzliche geophysikalische Messungen im Gelände unumgänglich. Aus der simulierten Wellenfeldausbreitung durch das Modell wurden die an der Oberfläche maximalen Amplituden ermittelt und eine „Erschütterungskarte“ erstellt, welche schließlich die räumliche Verteilung der emittierten Signalamplituden wiedergibt. Die frequenzabhängigen seismischen Abstrahlmuster sind bzgl. der Amplitude an S01 normalisiert, d.h. die Amplitude an S01 ist 1 (Abb. 7).

Tabelle 1 Parameter des Zweischichtenmodells (links) sowie Koordinaten der WEA und Seismometer (rechts).

Tiefe (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	Qp	Qs
0-25	680	400	2000	100	50
25-2000	2000	1200	2600	300	150

	Lon (UTM 32N)	Lat (UTM 32N)
WEA1	421417.613	5490720.302
WEA2	421650.266	5490507.899
WEA3	421794.574	5490231.837
WEA4 (geplant)	421810.000	5491191.000
S01	420933.721	5490738.207
S02	421035.199	5491974.462
S03	420371.614	5492804.545
IMS	420565.088	5494071.587

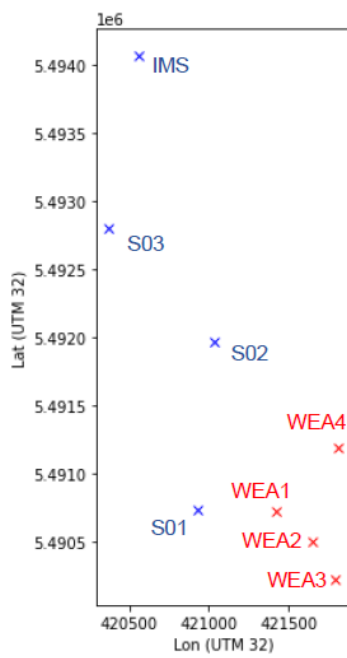


Abbildung 3: Position und Anordnung der geplanten WEA (Quellen) und der seismologischen Stationen (Empfänger) in der Nähe der WEA für die Modellierung.

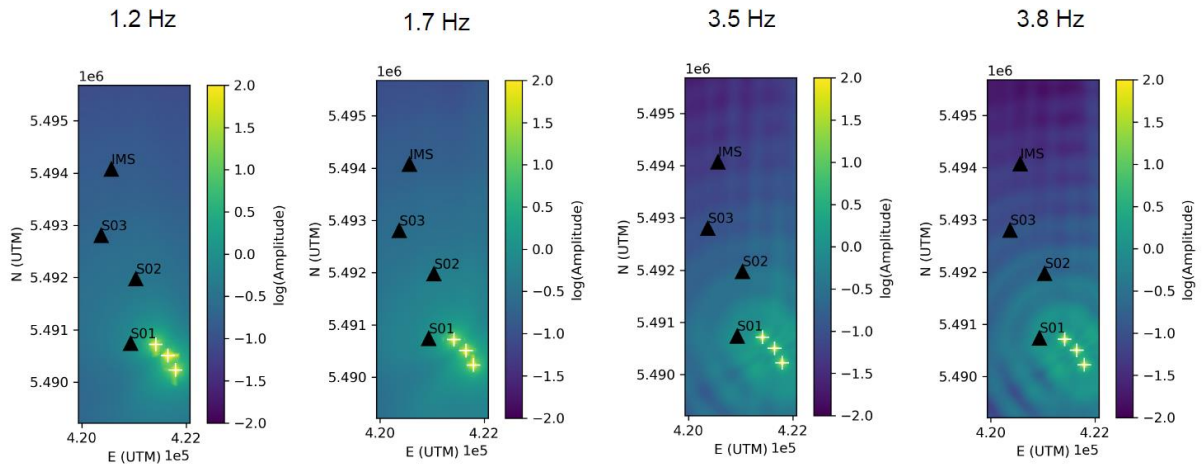


Abbildung 4: Seismische Abstrahlungsmuster in Abhängigkeit der Frequenz; Simulation mit 3 WEA.

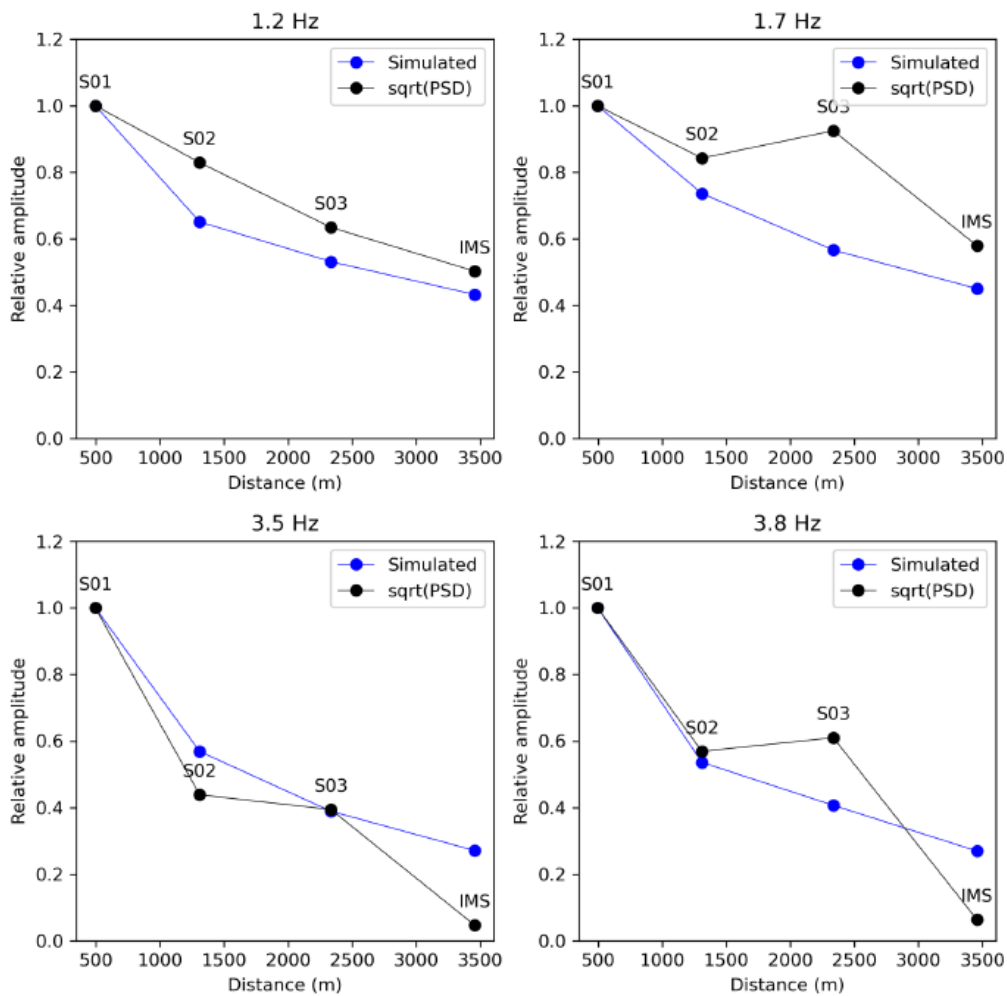


Abbildung 5 Vergleich der gemessenen und simulierten Amplituden in Abhängigkeit der Distanz zum Windpark.

## Prognose des Anstiegs der Rauschamplituden (Modellierung mit 4 WEA)

Die Modellierung wurde nun mit dem kalibrierten Modell und unter Einbeziehung der geplanten WEA (WEA4) wiederholt (Abb. 9). Auch hier wurden seismische Abstrahlmuster berechnet und analog zur Simulation mit drei WEA normalisiert, um den Faktor des Amplitudenanstiegs durch einen „vorher-nachher“ Vergleich zu ermöglichen. Durch die vierte WEA heben sich die Amplituden an IMS an. Der Quotient der abgeschätzten Störampplituden bei 4 WEA und 3 WEA ergibt sich der Faktor, welcher wiederum den zu erwartenden frequenzabhängigen Anstieg der Störampplituden an der Station IMS angibt (Tab. 3). **Im Mittel ergibt sich damit für den Frequenzbereich von 1 Hz bis 4 Hz ein Anstieg von ca. 19%.** Eine einfache  $\sqrt{N}$  – Abschätzung (Neufer et al., 2019), wobei N die Anzahl der WEA in einem Windpark ist, würde einen Anstieg von ca. 15% ergeben. Dies deckt sich näherungsweise mit dem in dieser Studie ermittelten Wert. Es ist jedoch zu beachten, dass die  $\sqrt{N}$  – Abschätzung keine Wellenfeldmodellierung, Effekte des Untergrundes, oder Interferenzen von mehreren WEA berücksichtigt.

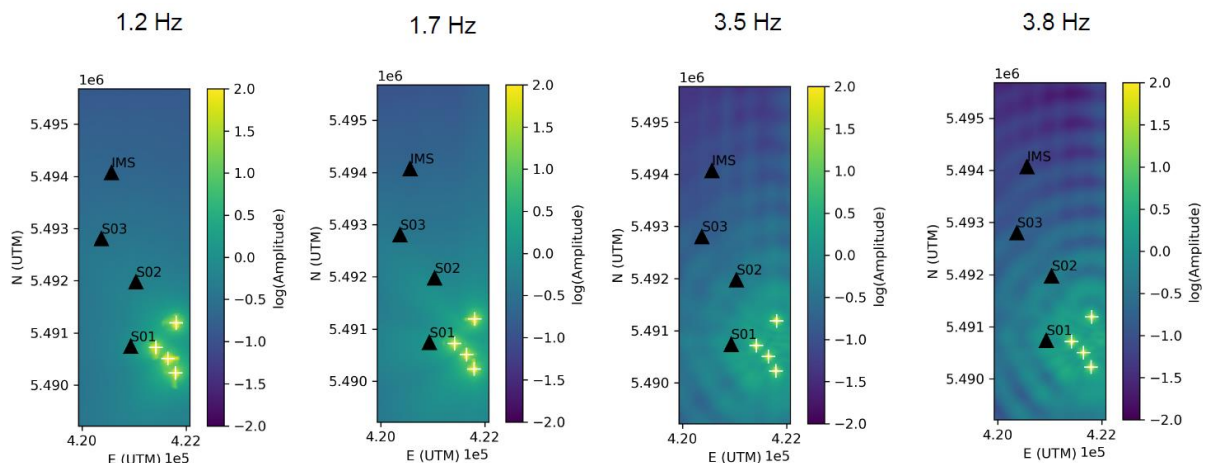


Abbildung 6 Seismische Abstrahlmuster in Abhängigkeit der Frequenz; Simulation mit 4 WEA.

Tabelle 2 Abgeschätzte Faktoren des Amplitudenanstiegs durch den Zubau einer WEA.

f (Hz)	Amplitude an IMS (relativ zu S01 bei 3 WEA)		Faktor des Anstiegs	in %
	3 WEA	4 WEA		
1.2	0.433	0.508	1.173	17
1.7	0.450	0.497	1.103	10
3.5	0.271	0.369	1.360	36
3.8	0.270	0.303	1.124	12
			<b>Mittelwert</b>	<b>19</b>
		$\sqrt{N}$ – Abschätzung	$\sqrt{4/3}$	15

## Schlussfolgerungen

Auf Basis der oben durchgeführten Analysen lassen sich folgende Schlussfolgerungen aufstellen:

1. Die Auswertung von Erdbeben gemessen an der Station IMS zeigt, dass die Welleneinsätze der analysierten Beben meist deutlich in den Wellenformen und im zeitabhängigen Leistungsdichtespektrum (Spektrogramm) zu identifizieren sind.
2. Aus der Rauschanalyse der Station IMS geht hervor, dass bereits Störsignale zwischen 1 Hz und 4 Hz messbar sind, welche den bestehenden WEA zugeordnet werden können.
3. An der Erdbebenstation IMS liegen große Frequenzanteile der Nutzsignale (Erdbebenwellen) in der Regel oberhalb des von den bestehenden WEA induzierten Störsignalen. Dieser Umstand würde den Einsatz von digitalen Filtern als eine Methode zur weiteren Signalverbesserung ermöglichen.
4. Ein Anstieg des Rauschens von ca. 19% (im Mittel für 1 Hz - 4 Hz), welcher aus der Prognose hervorgeht, schlägt sich zwar in den seismologischen Messungen allgemein nieder, aufgrund der Punkte 1) - 3) ist aber kein signifikanter Einfluss auf das resultierende Signal/Rausch-Verhältnis zu erwarten.

## Literatur

Neuffer, Tobias, Simon Kremers, and Ralf Fritschen. 2019. "Characterization of Seismic Signals Induced by the Operation of Wind Turbines in North Rhine-Westphalia (NRW), Germany." *Journal of Seismology* 23 (5). Springer Science; Business Media LLC: 1161–77. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09866-7>.

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

Limberger, F., Rümpker, G., Lindenfeld, M., and Deckert, H.: Development of a numerical modelling method to predict the seismic signals generated by wind farms. *Scientific Reports*, 12, doi:10.21203/rs.3.rs-1621492/v1, 2022

Welch, P., 1967. "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms." *IEEE Trans Audio Electroacoustics*, 15 (2), 70-73.

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