

Windkraftanlagen als seismische Störquellen

R. Widmer-Schnidrig^{1,3}, Th. Forbriger^{1,2}, W. Zürn¹

¹ Black Forest Observatory (BFO), Heubach 206, D-77709 Wolfach, Germany

² Geophysikalisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie. ³ Institut für Geophysik, Universität Stuttgart.

September 2012

Diese Arbeit wurde ursprünglich als Posterbeitrag an der Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG) 2004 in Berlin präsentiert.

www.geophys.uni-stuttgart.de/~widmer/Windkraft/Windkraft_poster_DGG_2004.pdf

1 Einleitung

Windkraftanlagen werden in den letzten Jahren durch den Gesetzgeber in der Bundesrepublik massiv gefördert. Bauanträge für vier Anlagen mit einer Nabenhöhe von 100m und einer Entfernung zu den geophysikalischen Sensoren des BFO von 500 - 1000m wurden im Herbst 2003 bei den zuständigen Behörden eingereicht. Diese Pläne haben uns gezwungen, zu untersuchen, in wieweit diese Anlagen unsere hochempfindlichen Messungen von Bodenbeschleunigung, Neigung (engl.: tilt) und Extension (engl.: linear strain) negativ beeinflussen könnten. Es gilt auch einen Abstand zum BFO zu schätzen, ab dem mit keiner negativen Beeinflussung unserer Messungen durch Windkraftanlagen zu rechnen ist.

Unsere Vorgehensweise besteht aus diesen Teilen:

- (i) Seismische Langzeitmessungen im Innern einer der Windkraftanlagen bei Loßburg/24 Höfe.
- (ii) Numerische Modellierung der induzierten Deformation verursacht durch eine Windkraftanlage und Vergleich mit den unter (i) erhobenen lang-periodischen Daten.
- (iii) Kurzzeitige seismische Messungen im Umfeld der selben Windkraftanlagen.
- (iv) Schätzung des Abklingverhaltens der Erschütterungen aus (iii) und Extrapolation der Pegel zu größeren Entfernungen.
- (v) Charakterisierung des seismischen Hintergrundrauschens am BFO.
- (vi) Vergleich von (iv) und (v) mit der Frage: In welcher Entfernung erreicht das abklingende Signal der Windkraftanlage den am BFO vorhandenen Rauschpegel?
- (vii) Schlussfolgerungen.

2 Seismische Messungen

Die zwei Windkraftanlagen Loßburg/24 Höfe (Typ VESTAS V52-850kW) besitzen eine Nabenhöhe von 75m und befinden sich in einer, mit dem BFO vergleichbaren geologischen Lage. Der Abstand

zwischen den zwei Anlagen beträgt 210 m. Das Fundament sitzt auf 150 m Buntsandstein, welcher seinerseits auf dem kristallinen Grundgebirge (Granit) liegt. Im Innern der nördlicheren Windkraftanlage wurde vom 24.10.2003 bis 14.1.2004 ein 3-Komponenten STS-2 Breitband- Seismometer betrieben und die Signale wurden kontinuierlich mit 50Hz Abtastrate aufgezeichnet. Abb. 1 (oben) zeigt 30 Minuten tief-pass gefilterte und instrumentenkorierte Daten der E-W Komponente. Die Windgeschwindigkeiten in diesem Zeitfenster betragen 5-7 m/s und die Anlage produzierte 200 - 350 kW. Der zeitlich variable Frequenzgehalt des ungefilterten Signals ist in Abb. 1 (mitte) dargestellt. In Abb. 1 (unten) werden die Signalpegel zwischen Loßburg und dem STS-2 am BFO verglichen. Bei tiefen Frequenzen (10mHz) ist der Rauschpegel am BFO 90dB niedriger als in der Windkraftanlage. Bei Frequenzen oberhalb 1Hz beträgt der Abstand im vorliegenden Beispiel nur ca. 60dB. Als Verhältnis bezogen auf die *rms*-Amplitude ausgedrückt entsprechen 60dB einem Faktor 1000 und 90dB einem Faktor 30000.

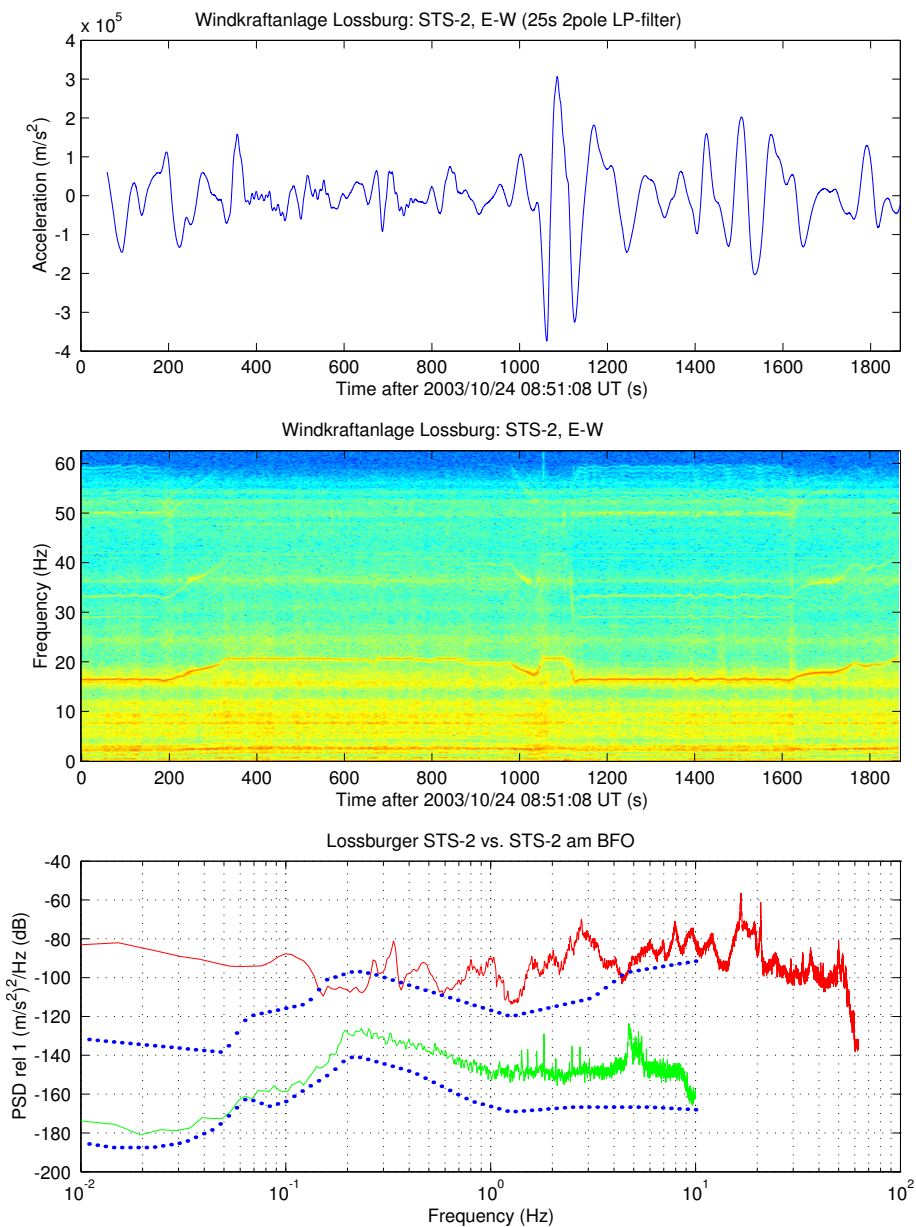


Abbildung 1: Erschütterungen im Fundament einer Windkraftanlage. Das Bild oben zeigt ein 30 Minuten langes Zeitfenster der horizontalen Beschleunigung in Ost-West Richtung aufgezeichnet mit einem STS-2 Seismometer. Der zeitlich variable Frequenzgehalt des ungefilterten Signals ist im mittleren Teilbild dargestellt. In unteren Teilbild werden die Signalpegel (power spectral densities, PSD) von Loßburg (rot) und dem BFO (grün) verglichen. Die punktierten Linien stellen Modellkurven für niedriges und hohes Rauschen dar, die in der Seismologie häufig verwendet werden (Peterson, 1993)

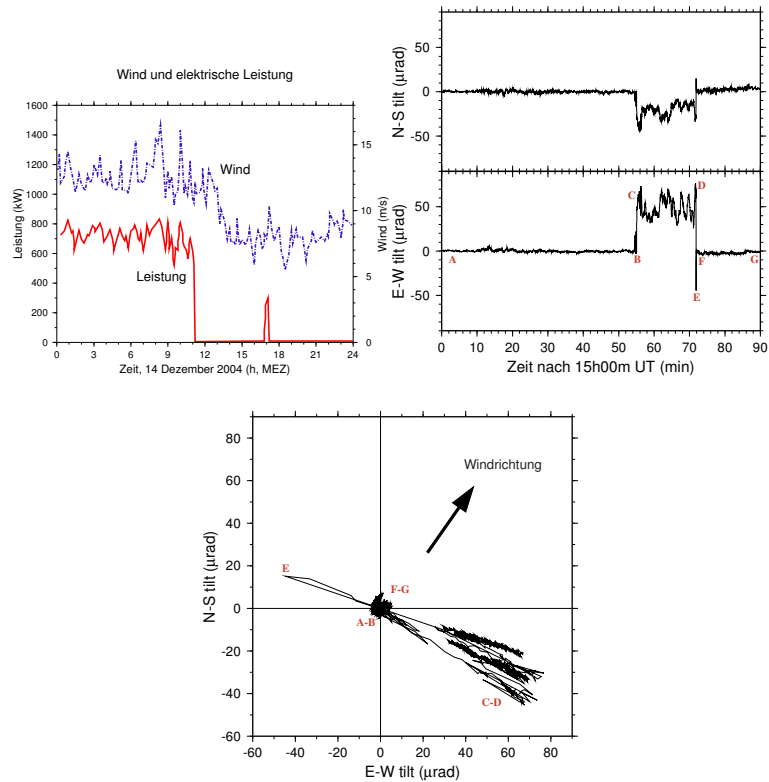


Abbildung 2: Neigungen des Fundaments als Folge von Ein- und Ausschaltvorgängen.

2.1 Neigungen durch Laständerung

Am 14.12 2003 hat sich die Anlage wegen zu hohen Windgeschwindigkeiten selbst abgeschaltet (ca. 11h00). Am Nachmittag hat die Anlage kurzzeitig (16h54 - 17h12 MEZ) wieder die Stromerzeugung aufgenommen (Abb. 2 oben links). Die Neigung des Fundaments für diese kurze Ein- und Ausschaltsequenz sind gegenüber der Zeit in Abb. 2, oben rechts und als Hodographen in Abb. 2 unten dargestellt. Bei gleichem Wind ist die induzierte seismische Bodenbewegung unter Last um ein Vielfaches größer als im ausgekoppelten Zustand. Unter Last muß das Drehmoment vom Rotor auf das Fundament übertragen werden: das Fundament neigt sich senkrecht zur Windrichtung. Ohne Last kippt das Fundament in Windrichtung.

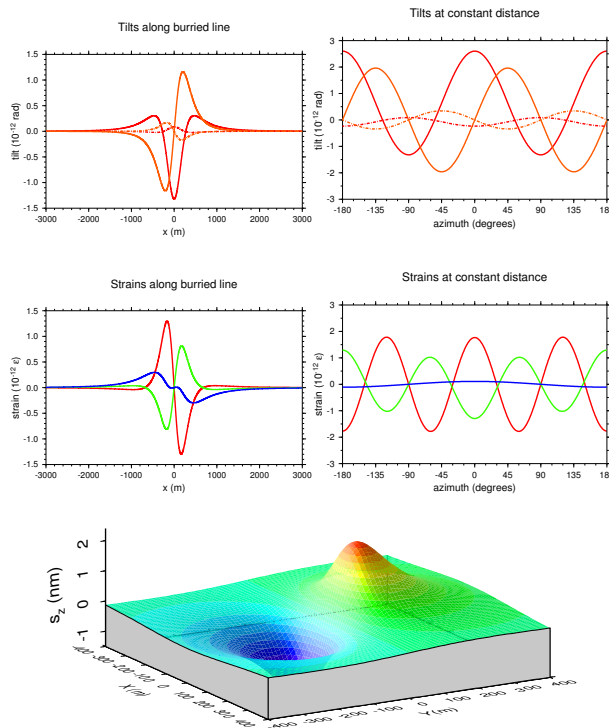


Abbildung 3: Quasistatische Deformationen im Umfeld einer Windkraftanlage. Im Ursprung eines kartesischen Koordinatensystems wirkt ein Drehmoment von 15000kNm. Für diese Quelle wurden die induzierten Neigungen (t_{ij}) und Extensionen (ϵ_{ij}) in einer Tiefe von 150m gerechnet. Tilt und strain sind dargestellt entlang einer Linie in 400m Abstand vom Kräftepaar (Teilbilder links) und entlang eines Kreises mit 400m Radius (Teilbilder rechts). Die vertikale Verschiebung auf einer 150m tiefen Fläche zeigt das untere Teilbild. Elastische Moduln wurden für Granit gewählt. ($\lambda = \mu = 320GPa$).

3 Modellrechnungen

Für eine vertikale Punktkraft auf einen homogenen elastischen Halbraum kann die induzierte statische Deformation analytisch angegeben werden (Boussinesq Lösung, u.a. Farrel, 1972). Die Wirkung einer Windkraftanlage beschreiben wir mit einem Kräftepaar das ein Drehmoment von 15000 kNm ausübt (= Baustatische Maximallast). Für diese Quelle haben wir induzierte Neigungen und Extensionen in einer Tiefe von 150m gerechnet, passend für die beim BFO projektierten Anlagen (Abb. 3). Die zu erwartenden statischen Signale betragen 1 pico rad bzw. 1 pico ϵ , also nur eine Größenordnung unter der Detektionsschwelle der Sensoren am BFO.

4 Abklingverhalten mit zunehmender Entfernung

Um das Abklingen der induzierten Bodenerschütterungen mit zunehmender Entfernung von der Windkraftanlage zu quantifizieren haben wir am 14. Januar 2004 mit einem mobilen 5s Lennartz Le3-D Seismometer auf einem in Windrichtung verlaufenden Profil Rauschmessungen vorgenommen. Die Entfernungen vom Turm betragen 1m, 9m, 16m, 50m, 100m und 1km und die Aufzeichnungsdauer betrug jeweils 10 min. Die Windgeschwindigkeit für die Dauer der Messungen betrug 8-10 m/s und die Leistung der Anlage ca. 350kW. Abb. 4, oben zeigt die Rauschspektren des STS-2 (schwarz, gestrichelt) und des Le3-D (gelb-rot-braun). Die paarweisen Kohärenzen zwischen dem STS-2 und dem Le3-D Seismometer (Abb. 4 unten) sind bis 50m Entfernung hoch (> 0.8). Darüber hinaus vermuten wir, dass die Interferenz mit den Signalen der zweiten Windkraftanlage (Abstand 210m) die Kohärenz beeinträchtigt. Das Abklingen der Signale ergibt sich aus dem Abstand zwischen gestrichelten und orange-rot-braunen Kurven. Für ausgewählte Frequenzbänder mit hoher Kohärenz zeigt Abb. 5 unten das Abklingen. Im selben Zeitraum liegt der Rauschpegel am BFO 60 - 90 dB unter der gestrichelten Kurve (Abb. 7). Bezogen auf die *rms* Rauschamplitude entsprechen 60dB einem Faktor 1'000 und 90dB einem Faktor 30'000.

STS-2Z vs LE3D-Z

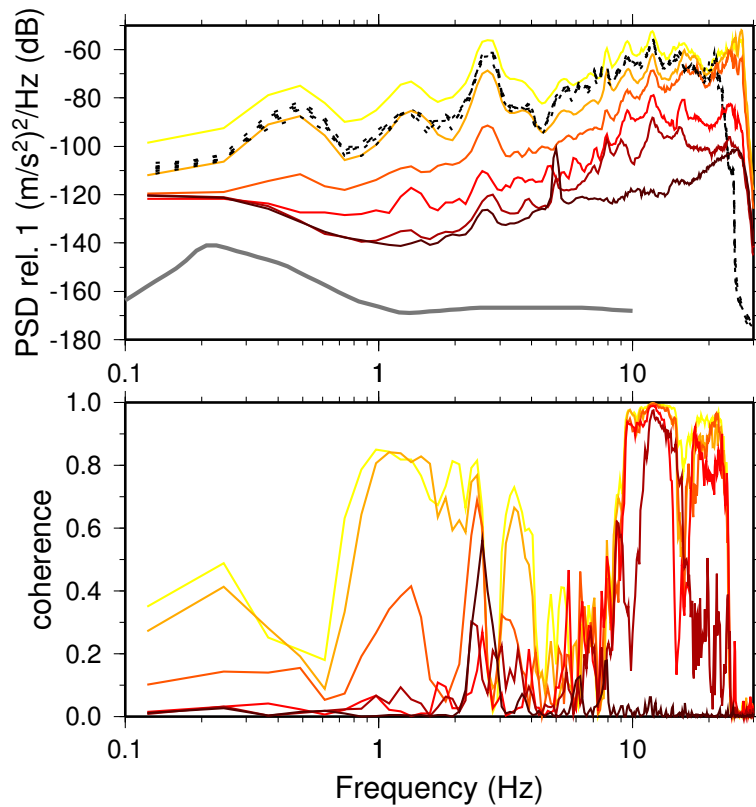


Abbildung 4: Rauschspektren aufgezeichnet an Messpunkten mit zunehmender Entfernung zur Windkraftanlage (oben). Die Messung vom STS-2 aus dem Innern der Windkraftanlage ist gestrichelt dargestellt. Die glatte unterste Kurve (grau) ist die globale Referenzkurve des New Low Noise Model (Peterson , 1993) Von unten nach oben nimmt der Abstand zur WKA ab: 1km (schwarz), 100m (braun), 50m (rot), 16m (dunkel orange), 9m (hell orange) und 1m (gelb). Unteres Teilbild: Kohärenzen zwischen dem STS-2Z und dem Le-3DZ für zunehmende Entfernung zwischen den zwei Seismometern.

5 Extrapolation der gemessenen Rauschpegel

Abbildung 5 zeigt einzelne, aus den 10 minütigen Messungen geschätzte, Rauschpegel für verschiedene Komponenten und Komponenten der Bodenbewegung. Zum Vergleich sind verschiedene Potenzgesetze eingetragen (gestrichelt). Solche Potenzgesetze werden für die Beschreibung des Abklingverhaltens seismischer Wellen ausgehend von einer Punktquelle benutzt. Abbildung 6 zeigt, wie die vertikale Bodenunruhe mit zunehmender Entfernung zur Windkraftanlage Loßburg/24 Höfe abnimmt. Die Messungen in 9, 16, 50, 100 und 1000 m Entfernung zur Anlage wurden verwendet (blaue vertikale Linien). Im Frequenzband 8-14 Hz ist die paarweise Kohärenz der Signale größer als 0.8, sodaß davon ausgegangen werden kann, daß sie von ein und derselben Quelle herrühren (Abbildung 4). Werden nur diese kohärenten Messwerte ausgewählt, durch ein Potenzgesetz angepasst (schwarze Linienschar) und zu größeren Entfernungen extrapoliert, so wird zwischen 4 und 17 km der Pegel von -140 dB und zwischen 10 und 70 km Entfernung ein Pegel von -150 dB erreicht. Die Variationsbreite des Rauschpegels am BFO am Tag der Messungen und für das gesamte Jahr 2004 ist in der nachfolgenden Abbildung (7) gezeigt und liegt zwischen -150 und -140 dB (blau schraffiert in Abb. 6). Die Linienschar kommt dadurch zustande, dass an insgesamt 46 diskreten Frequenzen der Amplitudenabfall geschätzt und extrapoliert werden konnte. Im Mittel werden die Pegel von -140 dB bei 9.5 km Entfernung und -150 dB bei 25km Entfernung von der Windkraftanlage erreicht. 50 Prozent der Extrapolationen erreichen den Pegel von -150 dB im Entfernungsbereich $16 < r < 35$ km und der Pegel von -140 dB wird schon in $7.5 < r < 15$ km erreicht. Die Signale fallen mit r^{-n} ab wobei der Median der 46 geschätzten Exponenten $n=1.19$ beträgt und 50 Prozent der Exponenten im Intervall $1.1 < n < 1.25$ liegen. Die in 75 m Höhe gemessene Windgeschwindigkeit betrug während den seismischen Messungen (also am 14. Januar 2004) 8-10 m/s.

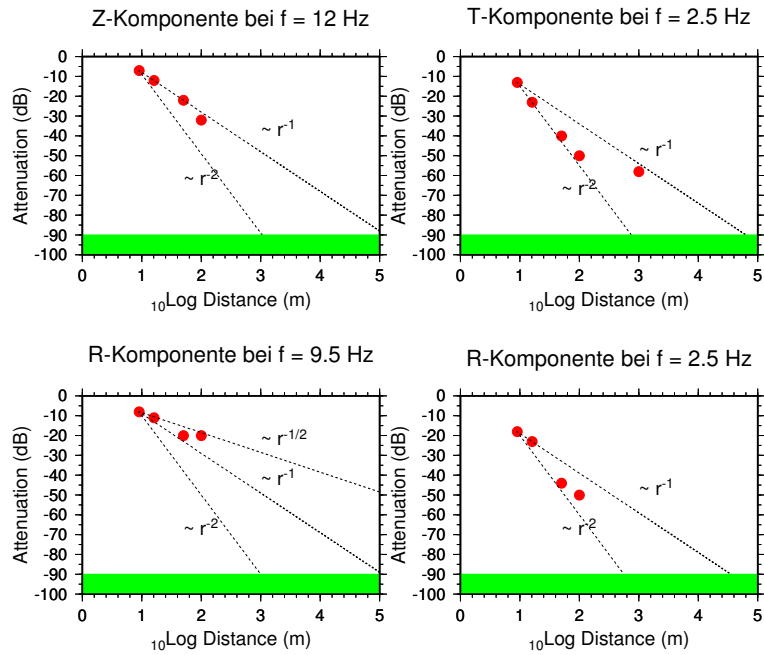


Abbildung 5: Abklingen der Vertikalkomponente bei 12Hz (oben links) und der Transversalkomponente (T) bei 2.5 Hz (oben rechts). Untere Teilbilder zeigen das Abklingen der Signale auf der Radialkomponente bei 2.5 und 9.5 Hz. T und R beziehen sich auf die Profilrichtung.

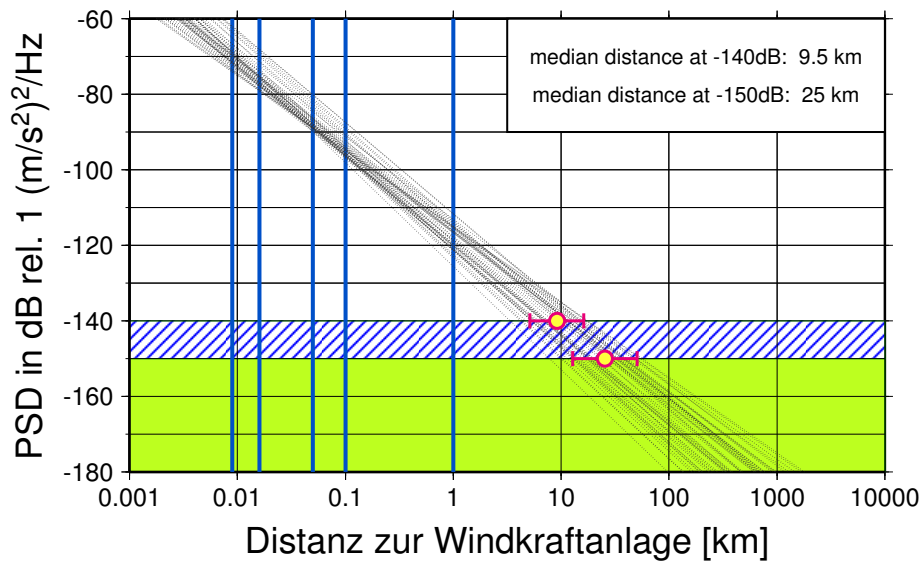


Abbildung 6: Extrapolation der Störsignale einer einzelnen Windkraftanlage.

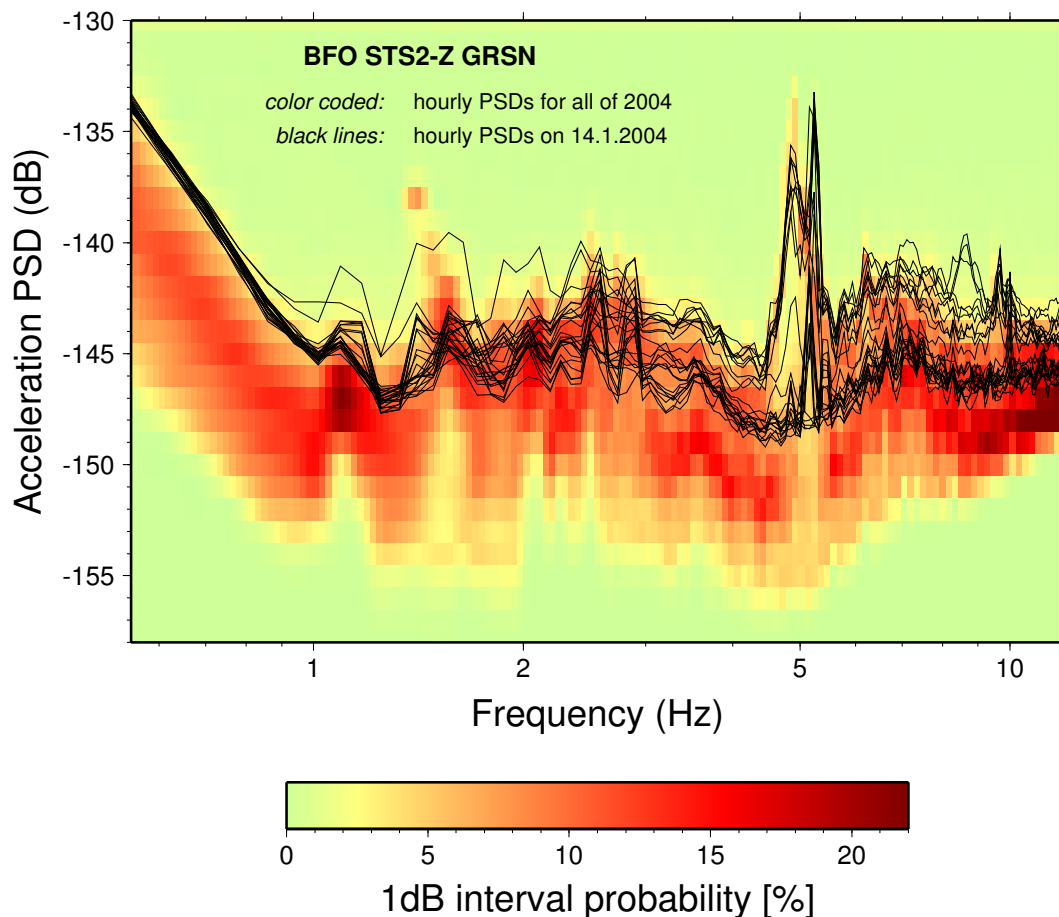


Abbildung 7: Kurzperiodisches seismisches Rauschen am BFO

6 Kurzperiodisches seismisches Hintergrundrauschen am BFO

Abbildung 7 zeigt die Variationsbreite des vertikalen seismischen Rauschen am BFO. Der Abbildung liegen die Daten der Vertikalkomponente des STS-2 Stationsseismometers zugrunde. Farbkodiert ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein bestimmter Rauschpegel innerhalb eines 1 dB breiten Intervalls bei einer gegebenen Frequenz auftritt. Diese Angaben basieren auf 8260 Rauschspektren welche für nichtüberlappende, einstündige Zeitfenster für das ganze Jahr 2004 berechnet wurden. Im Band 1-12Hz liegt der Rauschpegel am BFO 95% der Zeit unterhalb von -140dB, an wenigen besonders ruhigen Tagen sogar unterhalb -150dB. Die 24 schwarzen Kurven sind die stündlichen Leistungsdichtespektren für den 14. Januar 2004, der Tag an dem die Feldmessungen im Außenbereich der Loßburger Windkraftanlagen durchgeführt worden sind. Wegen der starken Winde war dies ein vergleichsweise unruhiger Tag am BFO. Die schwarzen Kurven fallen in zwei Gruppen: eine mit geringem Rauschpegel in den Nachtstunden und eine zweite mit erhöhtem Rauschpegel am Tag. Besonders deutlich ist diese Zweiteilung beim Peak um 5Hz. Dieses 5Hz Signal ist auch in der nachfolgenden Abb. 8 klar erkennbar. Da für Abbildung 7 lückenlos alle Daten von 2004 prozessiert worden sind, enthält sie auch Erdbebensignale. In einer solchen zusammenfassenden Darstellung ist aber ihr Beitrag-zum Glück-verschwindend klein.

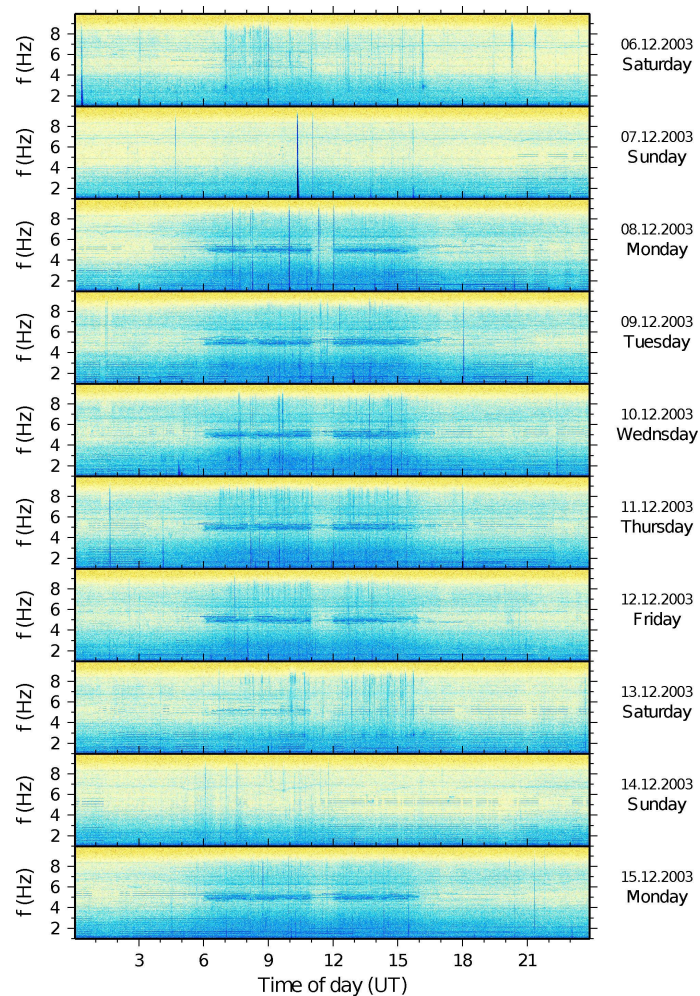


Abbildung 8: Industrielle Störsignale am BFO.

7 Industrielle Störsignale am BFO

Abbildung 8 zeigt die zeitliche Variation der vertikalen seismischen Bodenunruhe im Frequenzband 1-10 Hz an zehn aufeinanderfolgenden Tagen. Hoher (niedriger) Rauschpegel ist mit blauen (gelben) Farbtönen gekennzeichnet. Durch Industrie verursachtes Rauschen ist an der Konzentration auf die Zeitfenster werktags von 7-12h und 13-17h Lokalzeit (6-11h und 12-16h Weltzeit) klar erkennbar. Es zeichnet sich durch seine Schmalbandigkeit und die Konstanz in den auftretenden Frequenzen und Amplituden aus und erscheint als horizontale Linien. Vertikale Linien bedeuten impulshafte Signale. Zum Beispiel ist ein Erdbeben in Norditalien mit Magnitude 4.7 am Sonntag, 7.12. um 10:21 UT als dicke vertikale Linie zu erkennen. Bei ca. 7 Hz ist samstags und sonntags ein modulierte Signal bislang unbekanntes Ursprungs als dünne blaue Linie erkennbar. Diese kann nur in ausgewählten Zeitfenstern außerhalb industrieller Störungen untersucht werden.

8 Ergebnis

Das BFO gehört sowohl im lang-periodischen (Periode $T > 30s$) als auch im hoch-frequenten Bereich zu den seismisch ruhigsten Observatorien weltweit. Dass die hochfrequenten seismischen Registrierungen massiv gestört würden durch die in 500m vom BFO projektierten Windkraftanlagen auf dem Teisenkopf geht klar aus den Messungen in Loßburg hervor (Abb. 4, 5). Die statischen Ergebnisse können für die Abschätzung des minimalen lang-periodischen Störpotentials herangezogen werden: Aus der Überlagerung von vier Anlagen würde die Detektionsgrenze der Strain- und Tiltmeter am BFO bereits erreicht (Abb. 3).

Für Windkraftanlagen in größerer Entfernung stellt die Anregung von Oberflächenwellen (OFW) das größte Störpotential dar. Da ihre Ausbreitung stark von der Struktur im Untergrund und der Topographie abhängt, ist eine Übertragung der Loßburger Ergebnisse auf BFO mit großer Unsicherheit behaftet. Solange wir über keine besseren Daten verfügen, gehen wir aufgrund unserer Loßburger Messungen davon aus, dass Windkraftanlagen näher als 10km vom BFO von unseren Sensoren detektiert und diese also durch erstere gestört würden. Diese Einschätzung ist auch im Einklang mit der Beobachtung von schmalbandigem, industriellem Rauschen von Quellen die 5km (oder mehr) vom BFO entfernt sind. (Abb. 1 unten, grünes Spektrum, Abb. 7 und Abb. 8).

8.1 Literaturverzeichnis

- Peterson, J. Observations and modeling of seismic background noise oscillations. *U. S. Geol. Surv., Open-file Rep.*, Vol. 93-322, p. 1–45, 1993.
- Farrell, B. Deformation of the Earth by surface loads. *Rev. of Geophysics and Space Physics*, Vol. 10, p. 761–797, 1972.