

# Erschütterungen bei Windkraftanlagen auf felsigem Untergrund

## Eine «neue» Theorie und deren Plausibilität



**Daniel Gsell** ZC Ziegler Consultants AG

**Adrian Egger** Trombik Ingenieure AG

**Martin Koller** Résonance Ingénieurs-Conseils SA

**Hervé Lissek** Conseil en acoustique

23. Symposium für Bauwerkodynamik und Erschütterungsmessung | Empa Dübendorf | 10.06.22



### Einleitung

---

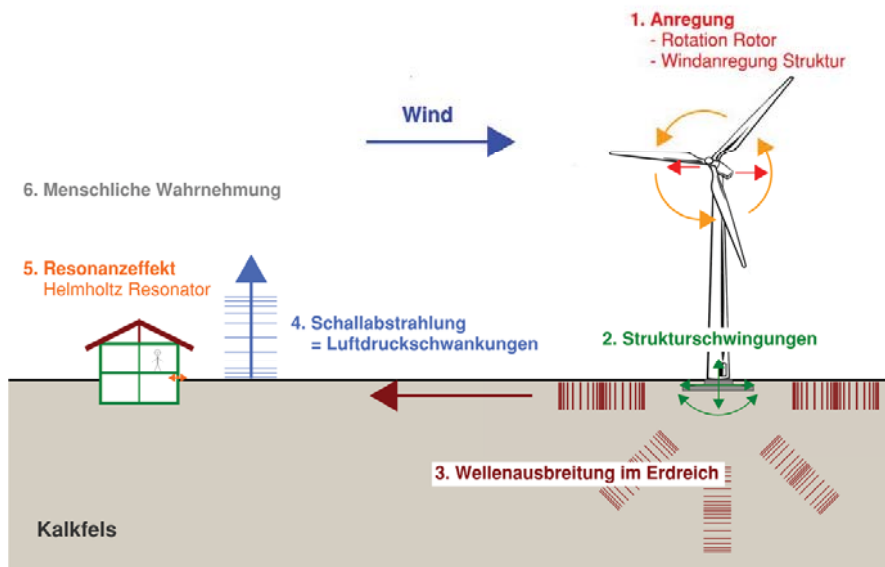
#### Interpellation 20.4049 eines Nationalrates (22.09.2020):

##### Neue Erkenntnisse bezüglich der Stärke des durch Windkraftanlagen emittierten Infraschalls!

- Ist dem Bundesrat die neue Studie des Physikers J-B. J. <sup>\*)</sup> vom September 2020 über die Stärke des durch Windkraftanlagen emittierten Infraschalls und deren Abhängigkeit vom Untergrund und von Resonanzeffekten mit benachbarten Bauwerken bekannt?
- Wird der Bundesrat die neuen Erkenntnisse dieser Studie in den rechtlichen Rahmen für den Bau von Windparks aufnehmen?

Bundesamt für Umwelt beauftragt ein kleines Team von Spezialisten (Baudynamiker und Akustiker) diese neuen Erkenntnisse zu hinterfragen und zu plausibilisieren.

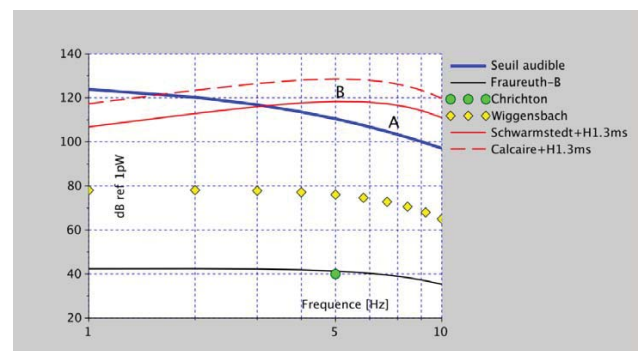
<sup>\*)</sup> Freie Landschaft Schweiz: Schweizerischer Verband für eine vernünftige Energiepolitik und Raumplanung



## Mechanismen der «neuen» Theorie

Erkenntnis aus der Studie J-B. J. zu den Immissionen in einem **Abstand von 500m** von einer **3.0 MW Anlage** gegründet **auf Kalk**:

Berücksichtigt man die genannten Mechanismen inkl. dem Helmholtz Resonator, so liegen die Infraschallpegel durchaus über der Wahrnehmungsgrenze des Menschen.



Ist diese Aussage plausibel?

## 1. Schwingungsanregung der Tragstruktur

---

### Anregung durch den Rotor:

- Rotordrehzahlen: 5 – 20 U/min → Frequenzen 0.08 – 0.33 Hz
- 3 Rotorblätter: → Frequenzen 0.24 – 1.00 Hz und ganzzahlige Vielfache davon
- Anregung Strukturschwingungen: Massen-Exzentrizität (v.a. quer zur Windrichtung)
- Impulsanregung wenn ein Rotorblatt am Mast vorbei läuft (in Windrichtung)

### Anregung durch den Wind:

- In Windrichtung: **Turbulente Strömung** (Böen)
- Quer zur Windrichtung: **Gleichmässige Strömung** (Vortex-Shedding)
- **Resonanzfrequenzen** der Struktur massgebend

## 1. Schwingungsanregung der Tragstruktur

---

### Windkraftanlage St. Brais:

Foundation: direkt auf **Kalkfels**, flach fundiert.

Nabenhöhe: 78 m

Turm: Stahlbau

### Resonanzfrequenzen:

#### Mode 1:

$f_1 = 0.38$  Hz (Kalk)  
 $f_1 = 0.34$  Hz (Lockergestein)

#### Mode 2:

$f_2 = 2.35$  Hz (Kalk)  
 $f_2 = 2.23$  Hz (Lockergestein)



**Steifigkeit der Tragstruktur dominiert das Verhalten**

## 2. Strukturschwingungen und 3. Wellenausbreitung im Untergrund

### Studie J-B. J.: Schalldruckpegel = abgestrahlter Schall durch Bewegungen der Erdoberfläche

#### Schalldruck-Daten aus Literatur: Messungen bei der Anlage Schwarmstedt

Pilger C. et L. Ceranna, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover Germany  
The influence of periodic windturbine noise on infrasound array measurements,  
Journal of Sound and Vibration 388 (2017) 188–200

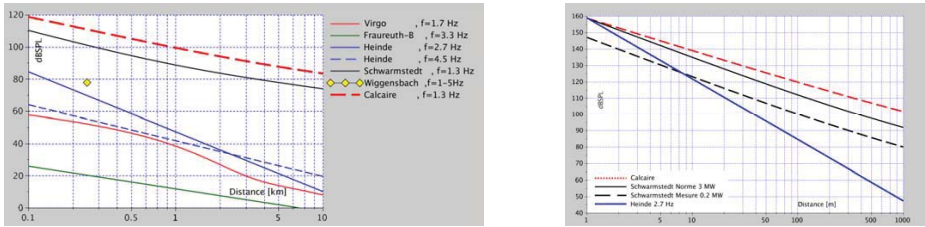


Figure 2 Rapport J-B. J.

In Schwarmstedt steht die Windkraftanlage auf Lockergestein (flach fundiert).

**Kalkstein hat eine kleinere Materialdämpfung, die Amplituden der Wellen nehmen im Kalk mit der Distanz weniger schnell ab als im Lockergestein!**

→ auf Kalkfels ist mit höheren Immissionen zu rechnen

## 2. Strukturschwingungen und 3. Wellenausbreitung im Untergrund

**Plausibilität:** Die äussere Energie, welche eine Windkraftanlage zu Schwingungen anregt ist in erster Näherung unabhängig vom Untergrund (dynamische Kräfte sind gleich).

Die in den Boden geleiteten Deformationen sind bei den tiefen Frequenzen in guter Näherung umgekehrt proportional zur Steifigkeit der Bettung der Fundation.  
(keine Bodenresonanzen bei 0.08 – 2.0 Hz)

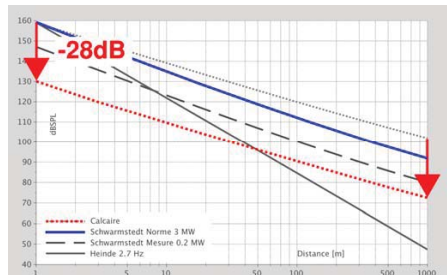
Schubwellengeschwindigkeit: Kalk  $c_s = 2000 \text{ m/s}$   
Lockergestein  $c_s = 400 \text{ m/s}$

$$\text{Steifigkeiten proportional zu } c^2 \rightarrow \frac{G_{\text{Kalk}}}{G_{\text{Locker}}} \sim \frac{c_{\text{Kalk}}^2}{c_{\text{Locker}}^2} \approx \frac{2000^2}{400^2} = 25!$$

## 2. Strukturschwingungen und 3. Wellenausbreitung im Untergrund

### Plausibilität:

**Die Amplituden der in den Boden eingeleiteten Wellen bei der Foundation der Windkraftanlage sind bei Kalkstein einen Faktor 25 KLEINER als bei Lockergestein!**



### Hinweis:

Schwarmstedt ist eine alte 0.2 MW Anlage. Für die Studie wurden die Schalldruckpegel linear mit der Leistung auf 3.0 MW extrapoliert!

## 3. Wellenausbreitung im Untergrund und 4. Abstrahlung von Schalldrücken von der Erdoberfläche

### Studie J-B. J.:

**Schalldruckpegel = abgestrahlter Schall der Bewegungen Erdoberfläche**

**Schalldruck-Daten aus Literatur:** Messungen bei der Anlage **Schwarmstedt**

Pilger C. et L. Ceranna, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover Germany

The influence of periodic windturbine noise on infrasound array measurements,

Journal of Sound and Vibration 388 (2017) 188–200

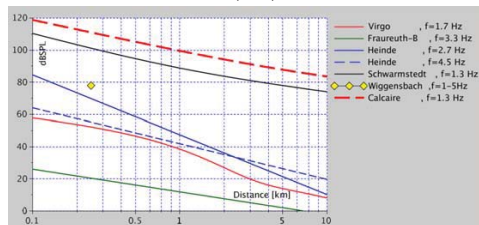


Figure 2 Rapport J-B. J.

In **100 m** von der Windkraftanlage **110 dB** Schalldruckpegel bei 1.3 Hz

In **1'000 m** von der Windkraftanlage **90 dB** Schalldruckpegel bei 1.3 Hz

In **10'000 m** von der Windkraftanlage **70 dB** Schalldruckpegel bei 1.3 Hz

**Sind diese Werte plausibel?** (Voraussetzung: der Mechanismus von J-B.J. stimmt)

### 3. Wellenausbreitung im Untergrund und 4. Abstrahlung von Schalldrücken von der Erdoberfläche

**Plausibilität:** **Abstrahlung von Luftdruckschwankungen durch schwingende Oberflächen**  
(Fluid-Struktur-Interaktion ... analog Lautsprecher)

Wellenlängen bei 1.3 Hz im Lockergestein  $\lambda \approx 300$  m  
→ lokal: ebene Wellenausbreitung

Steifigkeit Luft  $\ll$  Steifigkeit Erdreich → starre Oberfläche

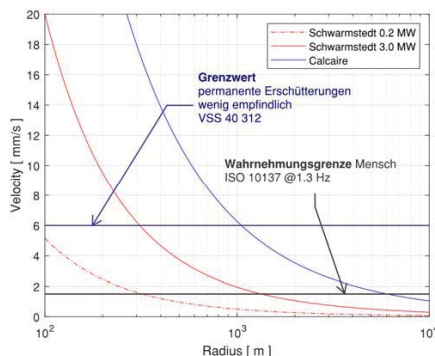
Von der Oberfläche abgestrahlter Luftdruck  $p$  ist proportional (Impedanz  $I$ ) zur senkrechten Geschwindigkeitskomponenten  $v$  der Erdoberfläche

$$p[\text{Pa}] = I \cdot v = \rho_{\text{Luft}} \cdot c_{\text{Luft}} \cdot v = 0.4 \left[ \text{Pa} / \left( \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) \right] \cdot v \left[ \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$$

**Welche Schwinggeschwindigkeiten der Erdoberfläche sind erforderlich um die verwendeten Schalldrücke zu erzeugen?**

### 3. Wellenausbreitung im Untergrund und 4. Abstrahlung von Schalldrücken von der Erdoberfläche

**Plausibilität:** Zu erwartende Schwinggeschwindigkeiten basierend auf Daten Schwarmstedt



**Auf Kalkstein:** auch in 1000 m Entfernung von der Anlage muss mit Gebäudeschäden gerechnet werden (was passiert mit der Anlage selber?)

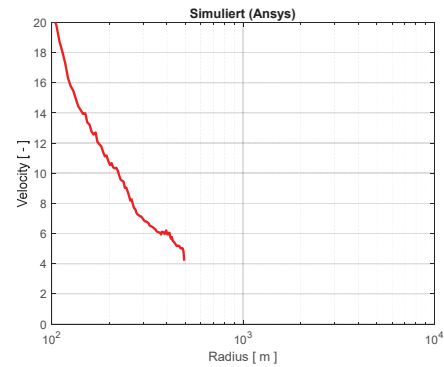
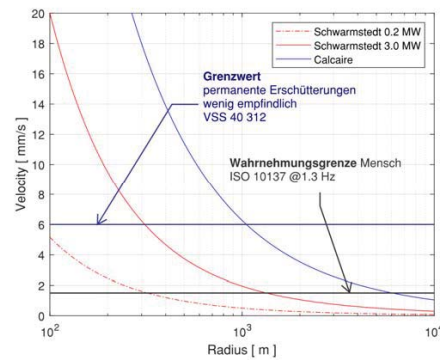
**Schwarmstedt 3.0 MW:** in 1500 m Entfernung von der Anlage sind die Erschütterungen spürbar. In 100 m Entfernung flüchtet jeder Mensch (und jedes Tier).

**Die Ursache der gemessenen Luftschallpegel sind NIEMALS die Oberflächenverschiebungen**

### 3. Wellenausbreitung im Untergrund und 4. Abstrahlung von Schalldrücken von der Erdoberfläche

#### Plausibilität:

#### Betrachtung des zu erwartenden Abklingverhalten mit der Distanz



#### Simulation mit Ansys:

- . aufgezogene Kippschwingung des Fundamentes
- . 2.0 Hz
- . Kalkfels homogen
- . Gebiet 1.2 x 1.2 x 0.4 km

### 3. Wellenausbreitung im Untergrund und 4. Abstrahlung von Schalldrücken von der Erdoberfläche

#### Plausibilität:

#### Es gibt ein Problem mit der Kurve Schwarmstedt!

**BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

**Pressemitteilung**

Hannover, 27.04.2021

**Erklärung zum Infraschall von Windenergieanlagen:**

Zur Kritik an den veröffentlichten Daten zu Schalldruckpegeln bei Infraschall-Emissionen, die im Rahmen von Untersuchungen zum Störereinfluss von Windenergieanlagen auf Infraschall-Messstationen berechnet wurden, sowie der anschließend vorgenommenen Korrektur erklärt die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR):

1. Als Ressortforschungsanstalt im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) nimmt die BGR Kritik im Rahmen des wissenschaftlichen Diskurses sehr ernst. Entsprechend der Regeln der guten wissenschaftlichen Praxis hat die BGR jetzt Hinweise sowie neuere wissenschaftliche Untersuchungen u.a. der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) zum Anlass genommen, ihre bisherigen Arbeiten zum Einfluss von Windenergieanlagen (WEA) auf Infraschall-Messstationen zu überprüfen.
2. Ausgangspunkt der Diskussion bildete eine Untersuchung der BGR aus dem Jahr 2004, die im Zusammenhang mit dem Auftrag der BGR zur Überwachung des Internationalen Kernwaffenverstopplungsvertrages (CTBT) durchgeführt wurde. Darin ging es um den Störereinfluss von WEA auf hochempfindliche Infraschall-Stationen, die von der BGR zur Erfüllung ihrer Aufgaben im Rahmen des CTBT betrieben werden.
3. Es ging bei diesen Untersuchungen nicht um Auswirkungen von Infraschall-Emissionen auf Menschen. Darauf hat die BGR auch bei entsprechenden Anfragen aus der Öffentlichkeit hingewiesen.
4. Die interne Überprüfung der BGR hat die wissenschaftlich vorgebrachte Kritik an den veröffentlichten Daten zu Schalldruckpegeln bei Infraschall-Emissionen bestätigt. Bei der Berechnung der Schalldruckpegel ist die BGR ein systematischer Fehler unterlaufen. Dieser passierte bei der Umwandlung der ursprünglich berechneten Ergebnisse **Rechenfehler von 36 Dezibel** sowohl auf die durch WEA hervorgerufenen Störereinflüsse als auch auf die zu überwachenden Signale (Kernwaffenexplosionen) übertragen. **Die Differenz der beiden Werte, die sich durch den Rechenfehler nicht verändert, daher bleibt die gültige Abstandsempfehlung für WEA zum ungestörten Betrieb der BGR-Infraschall-Station (BGR) im Bayerschen Wald unverändert bestehen.**
5. Anfang April veröffentlichte die BGR auf ihrer Website eine ausführliche Darstellung der Prüfung und räumte den Fehler ein.
6. Ein Kongress der bisherigen BGR-Publikation und eine Überarbeitung des zugehörigen Berichts sind auf den Weg gebracht.
7. Ab Mai wird die BGR gemeinsam mit der PTB in einer Messkampagne aktuelle Felduntersuchungen zu Störereinflüssen von WEA vornehmen, um den Einfluss von Infraschall auf die BGR-Messstationen prüfen zu können. Die Ergebnisse sollen auf Fachtagungen vorgestellt und diskutiert sowie in einem Peer-Review-Fachjournal mit Open Access veröffentlicht werden. Zudem werden die Messdaten für alle Interessierten frei verfügbar sein.

**Weiterführende Informationen:**  
BGR - Projekte - Der Infraschall von Windenergieanlagen (bund.de)

**Pressekontakt:**  
Andreas Siegel, Tel.: 0511-643-2679  
E-Mail: info@bgr.de, Internet: <https://www.bgr.bund.de>

Durch eine fehlerhafte Umrechnungsformel wurde ein **Rechenfehler von 36 Dezibel** sowohl auf die durch WEA hervorgerufenen Störereinflüsse als auch auf die zu überwachenden Signale (Kernwaffenexplosionen) übertragen.

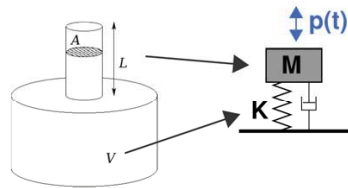
**Plausibilisiere IMMER die Daten, auch von Peer-Reviewed Journals!**

## 5. Resonanzeffekt

### Studie J-B. J.:

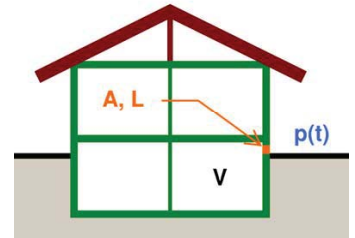
#### Durch kleine Öffnungen im Keller können Resonanzeffekte entstehen

Stichwort: Helmholtz Resonator



Keller:  $V = 4\text{m} \times 5\text{m} \times 2.5\text{m} = 50\text{m}^3$   
Öffnung:  $A = 0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ ,  $L = 0.2\text{m}$

$$\text{Eigenfrequenz: } f = \frac{c_{\text{Luft}}}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V \cdot L}} = 1.7 \text{ Hz}$$

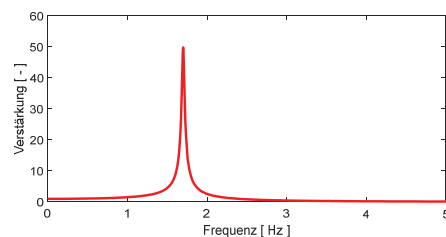


→ 20 bis 30 dB Verstärkung wären durchaus möglich

## 5. Resonanzeffekt

### Relevanz:

Das ist ein äusserst schwach gedämpftes System (< 1% Dämpfung).



Damit der Effekt eintritt, muss die Anregungsfrequenz sehr gut mit der Eigenfrequenz des Systems übereinstimmen.

Falls der Effekt vorhanden wäre:

**sehr einfach zu beheben** (Verkleinerung der Öffnung = Blumentopf in Fensteröffnung).



**Studie J-B. J.:** Studie J-B. J. anerkennt die in der ISO 226:2003 und der Metastudie von H. Møller und C. S. Pedersen (Hearing at Low and Infrasonic Frequencies) angegebenen Pegel als Wahrnehmungsgrenze.

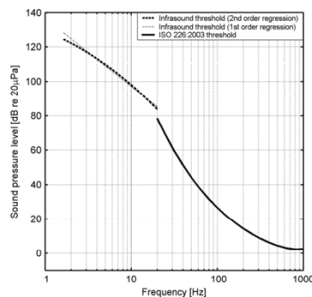


Figure 10. Standardized hearing threshold above 20 Hz (ISO 226:2003) and proposed normal hearing thresholds for frequencies below 20 Hz.

**Das ersparte viele «esoterische» Diskussionen**  
(dieses kann aber von Person zu Person sehr stark variieren).

Erkenntnisse Studie J-B. J.

**Folgende Aspekte der Studie sind nicht plausibel** (liegen um Größenordnungen von der Realität entfernt)

- Auf Kalkstein sind die Amplituden der in den Boden eingeleiteten Wellen viel kleiner als im Lockergestein (- 28dB).
- Die Studie basiert auf den Messungen aus Schwarmstedt. Die von Schwarmstedt publizierten Daten sind falsch (- 36dB).
- Falls die von der Erde abgestrahlten Infrasschallpegel so hoch wären wie in der Studie beschrieben, würde die Windkraftanlage so stark schwingen, dass sie beschädigt würde.
- Der Resonanzeffekt ist zwar plausibel, die Wahrscheinlichkeit dass er auftritt ist klein und wenn er auftritt, kann er einfach behoben werden.

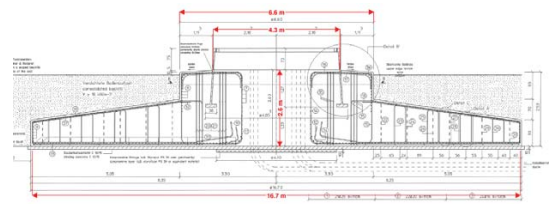
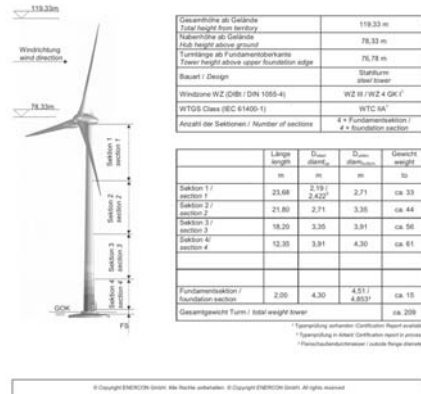
**Fazit zur Studie J-B. J.:**

**Die beschriebenen Mechanismen treten nicht oder um Größenordnungen zu schwach auf und können somit bei weitem nicht Immissionen erzeugen, die bei Anwohner von Windparks zu gesundheitlichen Auswirkungen führen.**

## Windkraftanlagen in St. Brais (Jura)

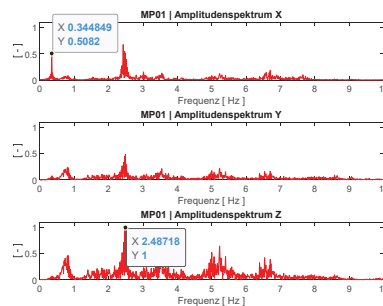
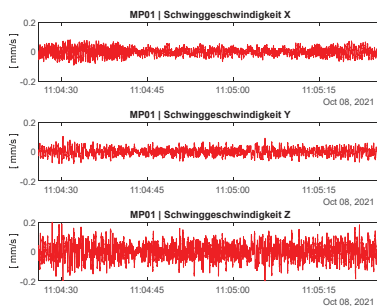
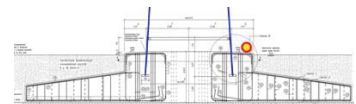
2 Anlagen mit je 2 MW | Nabenhöhe 78m | Rotordurchmesser 82m | Turm Durchmesser 4m → 2m (Stahl)

Anlage flachfundiert (Durchmesser 16.7m)



## Begehung und erste Messung auf Beton direkt neben Turm.

Windkraftwerk arbeitete bei voller Leistung.



→ ich spüre nichts: Plausibilisierung bestätigt ... wir können wieder gehen!

Messgeräte:

Auf der Erdoberfläche:

Frequenzen von 0.2 – 10 Hz massgebend  
Kleine Amplituden im tiefen Frequenzbereich → Geophone

Auf der Turmspitze:

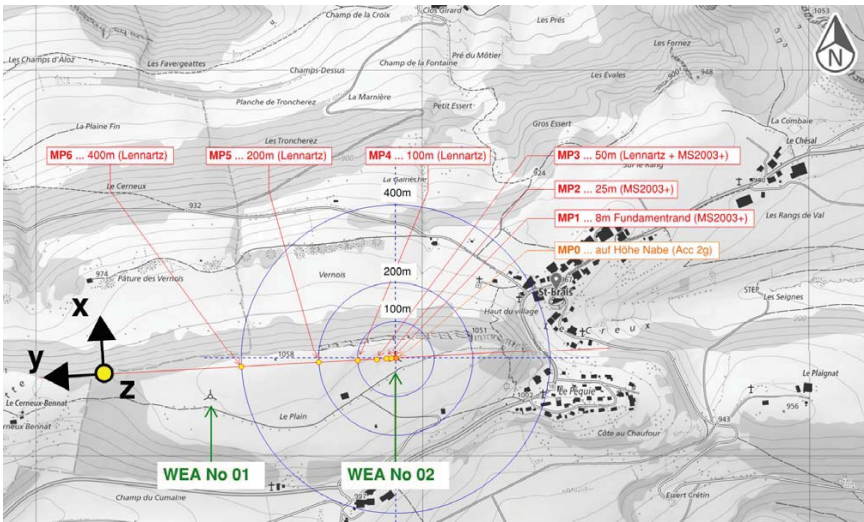
Grosse Amplituden im tiefen Frequenzbereich → Beschleunigungssensor

|                | Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer<br>LE-3D / 5s | Beschleunigungsaufnehmer<br>MS2004*          |
|----------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Abtastfrequenz | 100 Messwerte pro Sekunde                      | 100 Messwerte pro Sekunde                    |
| Frequenz       | 0.2 - 40 Hz                                    | 0 – 40 Hz                                    |
| Amplitude      | 0.2 · 10 <sup>-6</sup> bis 1 mm/s              | 2 · 10 <sup>-6</sup> bis 20 m/s <sup>2</sup> |

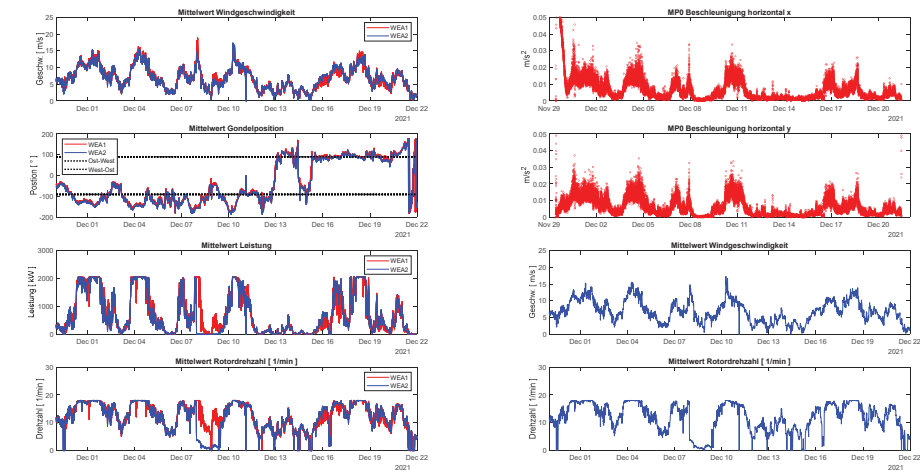


Erschütterungsmessung in St. Braise (ADEV Windkraft AG)

Messstandorte

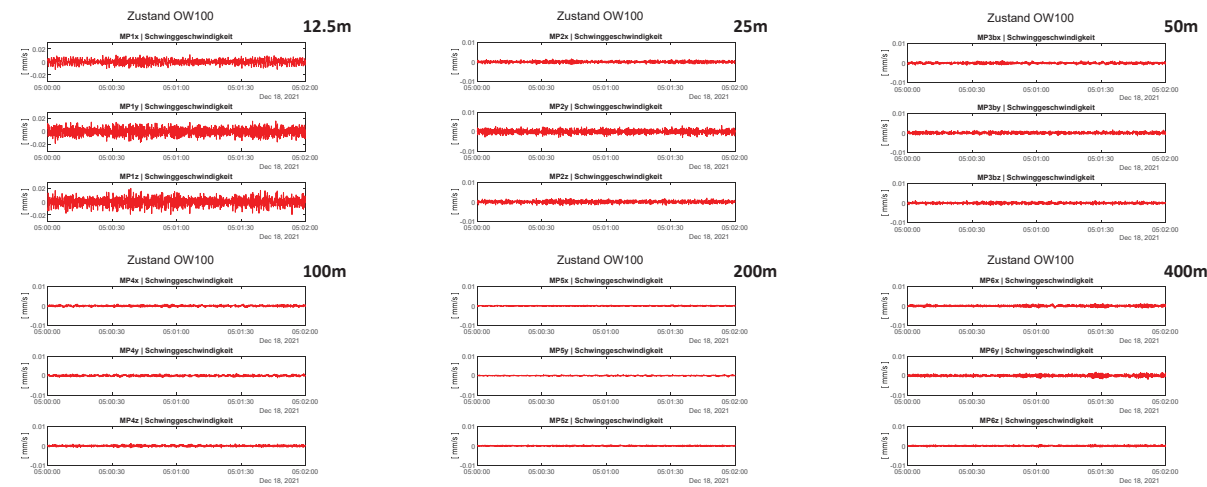


Messung vom und an der Windkraftanlage

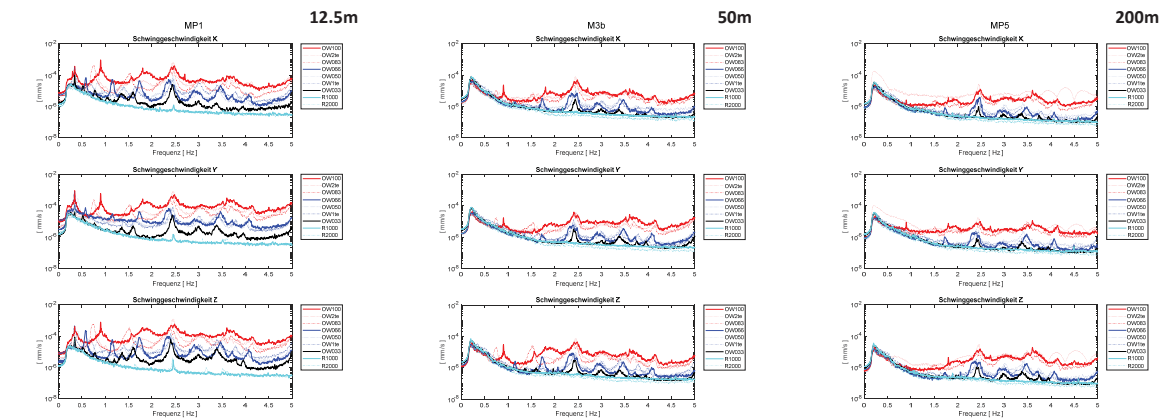


keine ausgeprägte Richtung  
in der Gondelschwingung

**Zeitsignale:** 100% Leistung | Drehzahl 18 U/min  
(05:00 Uhr) Windgeschwindigkeit 15 m/s | Windrichtung West



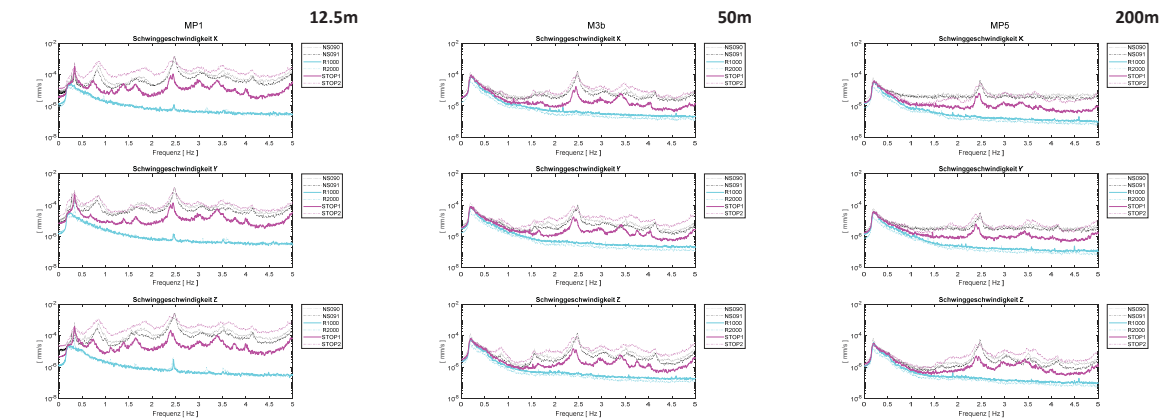
Spektren: Unterschiedliche Leistungen | West-Wind



Eigenfrequenzen v.a. 2te Biegeschwingung bei 2.4 Hz gut sichtbar.

Ganzzahlige der Drehzahl nur klar bei 100% Leistung (18 U/min = 0.3 Hz), auch in 200m Entfernung

Spektren: Unterschiedliche Leistungen | Nord-Wind



Eigenfrequenzen v.a. 2te Biegeschwingung bei 2.4 Hz gut sichtbar.

Ganzzahlige der Drehzahl kaum sichtbar (Sensoren liegen senkrecht zur Windrichtung)

- Die auf der Erdoberfläche gemessenen Schwinggeschwindigkeiten sind auch direkt am Fundamentrand für den Menschen nicht spürbar (auf Kalkstein = Fels).
- In 100m Entfernung zur Windkraftanlage, bei 100% Leistung, kann ein super sensibles TEM (Transmission Elektronen Mikroskop) betrieben werden. VC-E wird eingehalten.
- Werden in 100m Entfernung zur Windkraftanlage aus den gemessenen Erschütterungen die abgestrahlten Schalldrücke ermittelt, so sind dies ca. 20dB ... also viel tiefer als die in den Studien direkt gemessenen Schalldrücke.
- In den auf der Erdoberfläche gemessenen Erschütterungen können die Resonanzfrequenzen des Turmes in alle Richtungen gesehen werden. Die Amplituden klingen mit der Distanz schnell ab.
- Die Rotationsfrequenzen und deren Vielfache (insbesondere die 3 und 6-fache) können in Windrichtung in den Spektren der Erschütterungsmessungen an der Erdoberfläche als sehr schmale Spitzen gut erkannt werden.

- Die Erschütterungsmessungen bestätigen die Erkenntnisse aus der Plausibilitätsbetrachtung.
- Die gemessenen Erschütterungsamplituden durch den Betrieb einer auf Kalkstein (=Fels) fundierten 2 MW Windkraftanlage sind ca. 3 Größenordnungen (Faktor 1000) tiefer als die Erschütterungen, die notwendig wären um mit den in der Studie J-B.J. postulierten Mechanismen störenden Infraschall zu erzeugen.
- **Fazit:**  
**Die in der Studie beschriebenen Mechanismen treten nicht oder um Größenordnungen zu schwach auf und können somit bei weitem nicht Immissionen erzeugen, die bei Anwohner von Windparks zu gesundheitlichen Auswirkungen führen.**

Danke für ihre Aufmerksamkeit!

---

**Grosser Dank an:**

**Bundesamt für Umwelt**

**ADEV Windkraft AG**

**Enercon**

