

# Windkraftanlagen und tieffrequente Geräusche

## Das Verbundprojekt TremAc

Dr.-Ing. Peter Kudella, Dr.-Ing. Ivo Kimmig



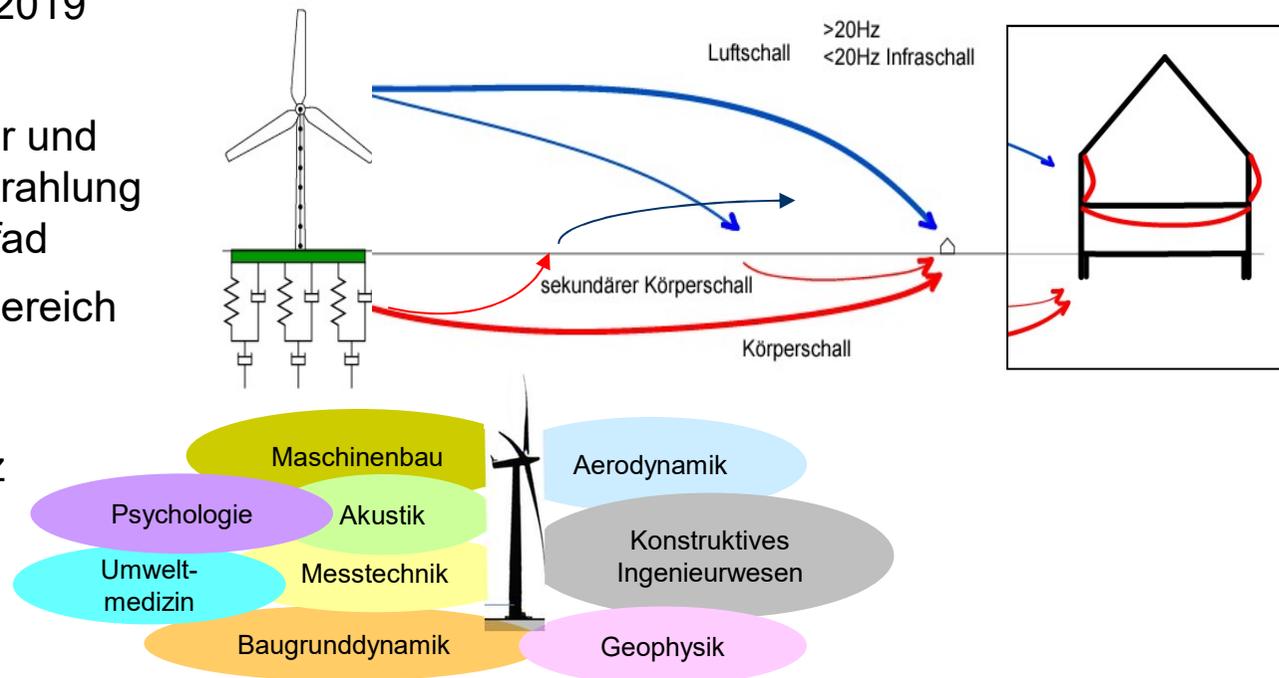
# TremAc - das Verbundprojekt

- „Objektive Kriterien zu Erschütterungs- und Schallemissionen durch Windenergieanlagen im Binnenland“ 2016 – 2019

- Motivation: Interaktion kombinierter akustischer und seismischer Wellenabstrahlung auf dem Ausbreitungspfad

- Betrachteter Frequenzbereich 1 Hz – 150 Hz

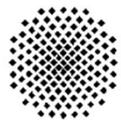
- Interdisziplinärer Ansatz



## TremAc – die Mitwirkenden



- Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF)
- Stahl- und Leichtbau - Versuchsanstalt (VAKA)
- Geophysikalisches Institut (GPI)



Universität Stuttgart

- Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE)
- Institut für Aerodynamik und Gasdynamik (IAG)

+1 WEA-  
Hersteller  
+2 Wind-  
park-  
betreiber



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN

- Lehrstuhl für Windenergie



UNIVERSITÄT  
BIELEFELD

Fakultät für  
Gesundheitswissenschaften

- Fakultät Gesundheitswissenschaften, Arbeitsgruppe  
Umwelt und Gesundheit (AG7)



MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT  
HALLE-WITTENBERG

- Institut für Psychologie, Arbeitsgruppe Gesundheits-  
und Umweltpsychologie



- MesH Engineering GmbH, Kirchheim/Teck

## TremAc – die Ziele

### ■ Identifikation der Hauptparameter und Schwellwerte

zu einer objektiven Bewertung der Schall- und Erschütterungsbelastung von WEA in Abhängigkeit von Anlagendaten, Konstruktion, Topographie und Entfernung

### ■ Entwicklung von Prognose- und Simulationsmodellen

für die Emission und Ausbreitung von (tieffrequentem) Luft- und Körperschall in Wechselwirkung mit Bauwerken in Abhängigkeit von Topografie und Untergrundsteifigkeit  
→ soweit möglich durch Messungen validiert

### ■ Suche nach Optimierungsstrategien

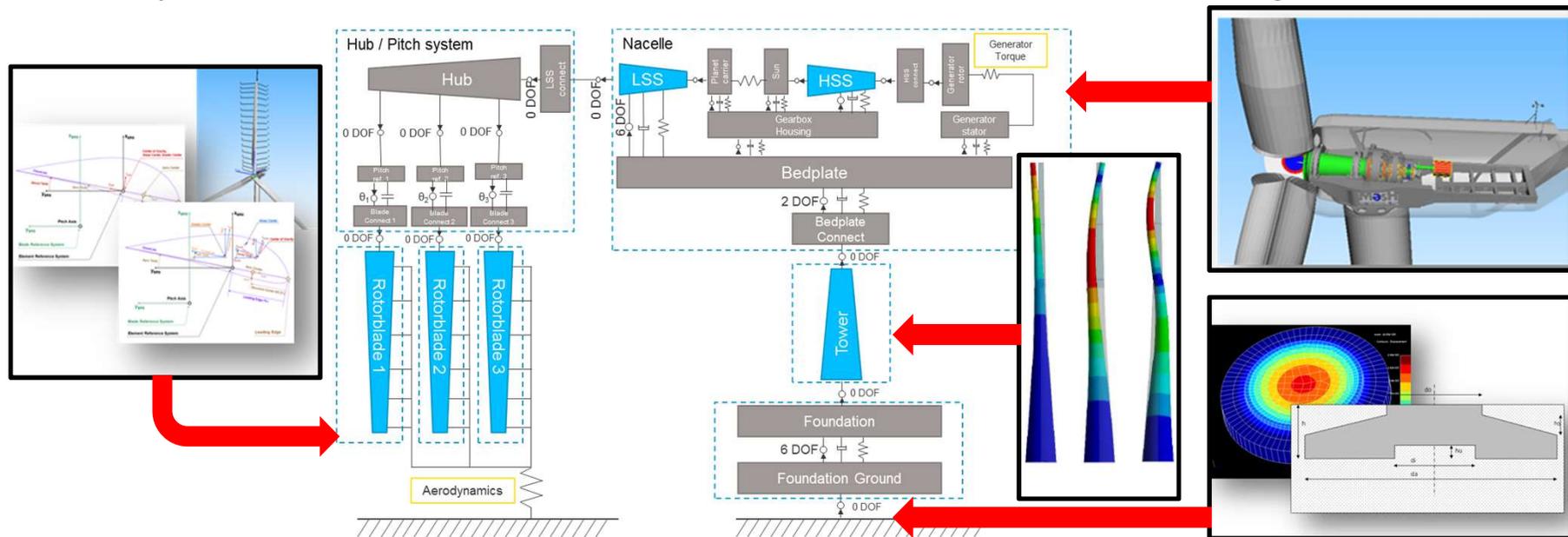
zur Minderung der Schall- und Erschütterungsemissionen durch angepasste Konstruktionen

### ■ Beitrag zur Akzeptanzerhöhung

Schaffung einer fundierten umweltmedizinischen sowie umweltpsychologischen Argumentationsgrundlage zur Versachlichung potentieller gesundheitlicher Risiken von WEA

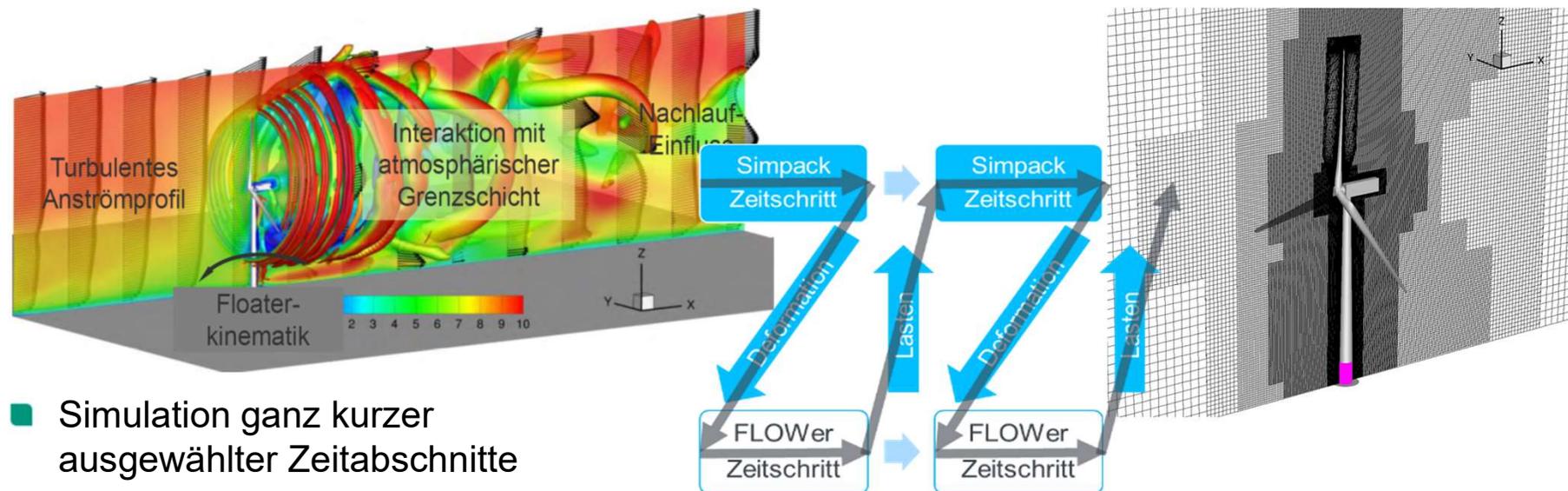
# Simulation der Emissionen

- Strukturmodell der Bauteile (Blätter, Turm, Gondel) als elastische Balken mit Integration von Detailmodellen für einzelne Systemkomponenten
- Aerodynamische Kräfte → Mechanische Schnittkräfte → Bauteilverformungen



# Simulation der Emissionen

- CFD-Modell (Computational Fluid Dynamics) der WEA gekoppelt mit dem Strukturmodell
- Anströmbedingungen → Luftdruckschwankungen ↓ → akustische Emission  
 ↑ dyn. Bauteilverformungen ← dyn. Schnittkräfte → seismische Emission



- Simulation ganz kurzer ausgewählter Zeitabschnitte



## Betrachtete Anlagenstandorte

- Messungen (Erschütterungen, Schall, Kombination) und Befragungen an 2 Standorten
- Gleicher Anlagentyp, unterschiedliche Randbedingungen, geplante 20-min.-Abschaltungen



### Wilstedt:

Flache Marschlandschaft  
9 x Multimegawattanlage  
Turmhöhe 108 m  
Moor, Sand (verbessert)



### Ingersheim:

Neckarbergland  
Multimegawattanlage  
Turmhöhe 135 m  
Polster auf Kalkstein

# Messtechnik - Messgeräte

## Infraschall- Mikrofone

PCB 378A07:	Empfindlichkeit: 5,8 mV/Pa
	Frequenzbereich ( $\pm 1$ dB): 0,25 bis 10 kHz
Brüel & Kjær 4964:	Empfindlichkeit: 50,0 mV/Pa
	Frequenzbereich ( $\pm 1$ dB): 1 Hz bis 10 kHz



## Schallpegel- messgerät

Larson Davis SoundTrack LxT:	Empfindlichkeit: 50 mV/Pa
	Frequenzbereich ( $\pm 1$ dB): 5 Hz bis 10 kHz

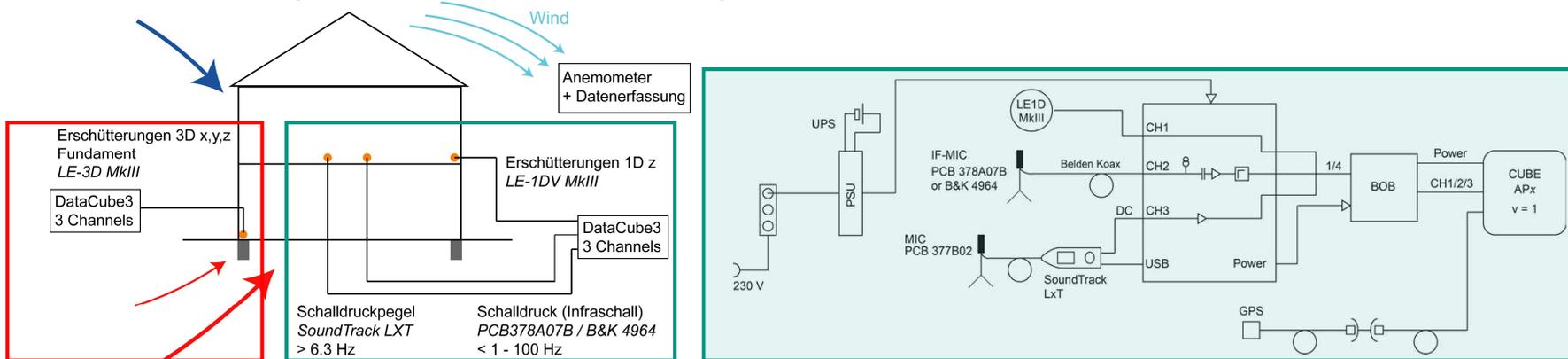
## Seismometer

Lennartz LE-1DV MkIII:	Eigenperiode: 1 s
	Obere Grenzfrequenz: 100 Hz
	Übertragungsfaktor: 800 V/(m/s)
Lennartz LE-3Dlite MkIII:	Analog LE-1DV



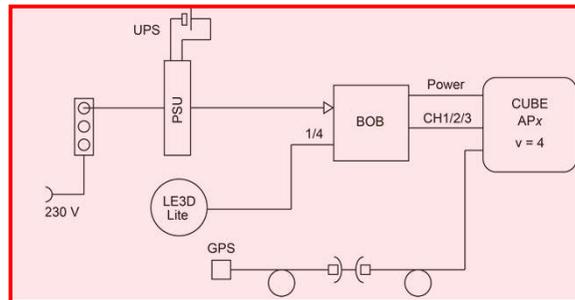
# Messtechnik - Aufbau

## Prinzipanordnung für kombinierte Messung an Gebäuden

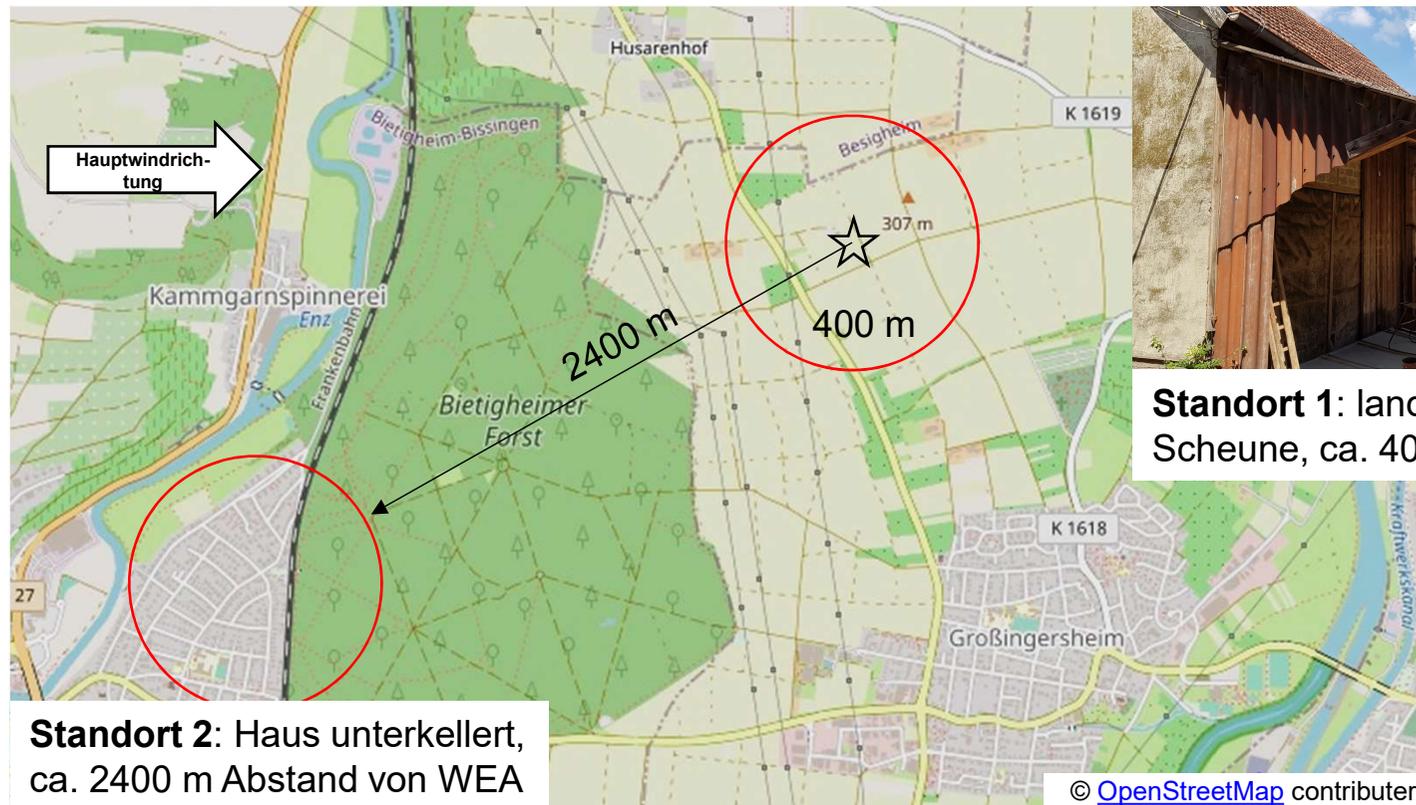


■ Reine Erschütterungsmesskette

■ Akustische und seismische Messkette



# Messstandorte Ingersheim



**Standort 1:** landwirtschaftlich genutzte Scheune, ca. 400 m Abstand von WEA

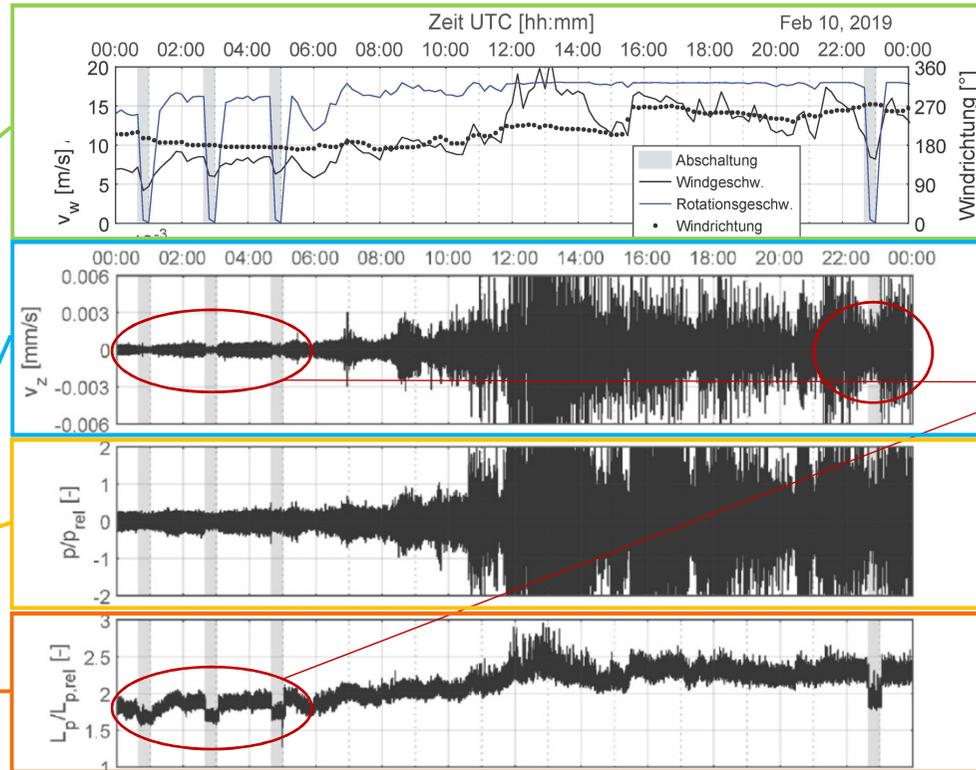


**Standort 2:** Haus unterkellert, ca. 2400 m Abstand von WEA

# Messung Ingersheim Standort 1

## Zeitverlauf 10.02.2019 von:

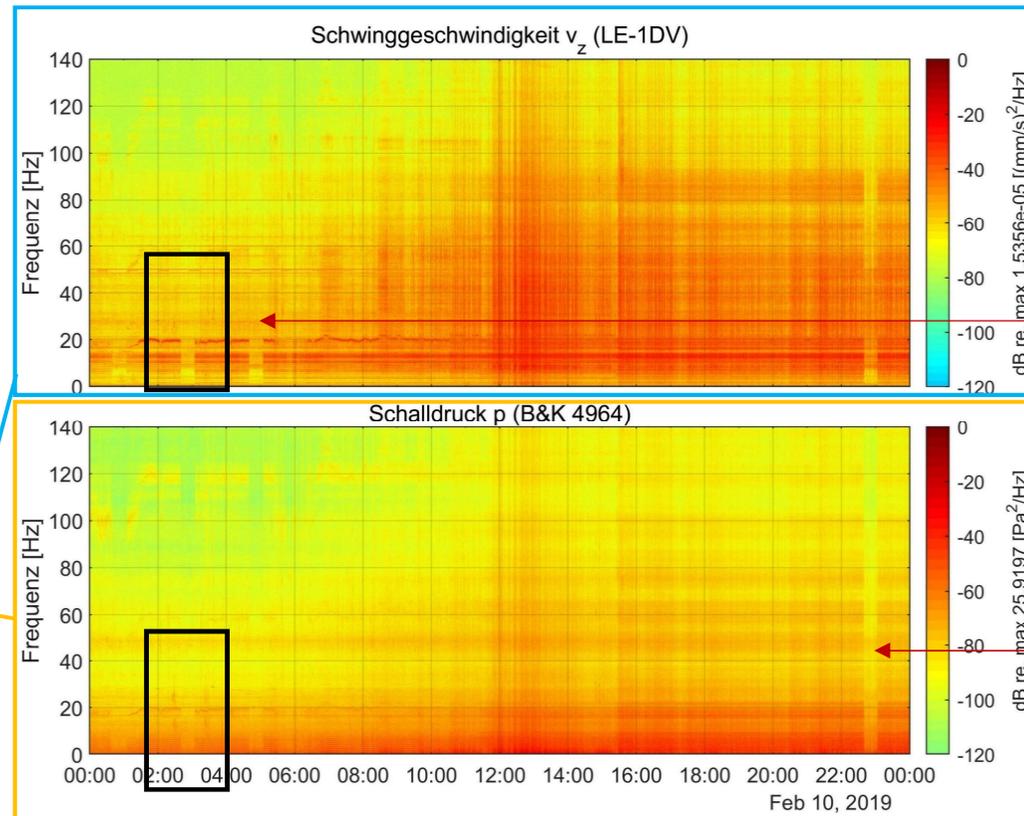
- Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Drehzahl
- Schwinggeschwindigkeit (vertikal)
- Schalldruck
- Schalldruck-(summen-)pegel



- Abschaltungen sind nur in Schwinggeschwindigkeit und Schalldruck gut erkennbar
- Bei starkem Wind nehmen Umgebungsgeräusche stark zu, WEA-Zuordnung schwieriger

# Messung Ingersheim Standort 1

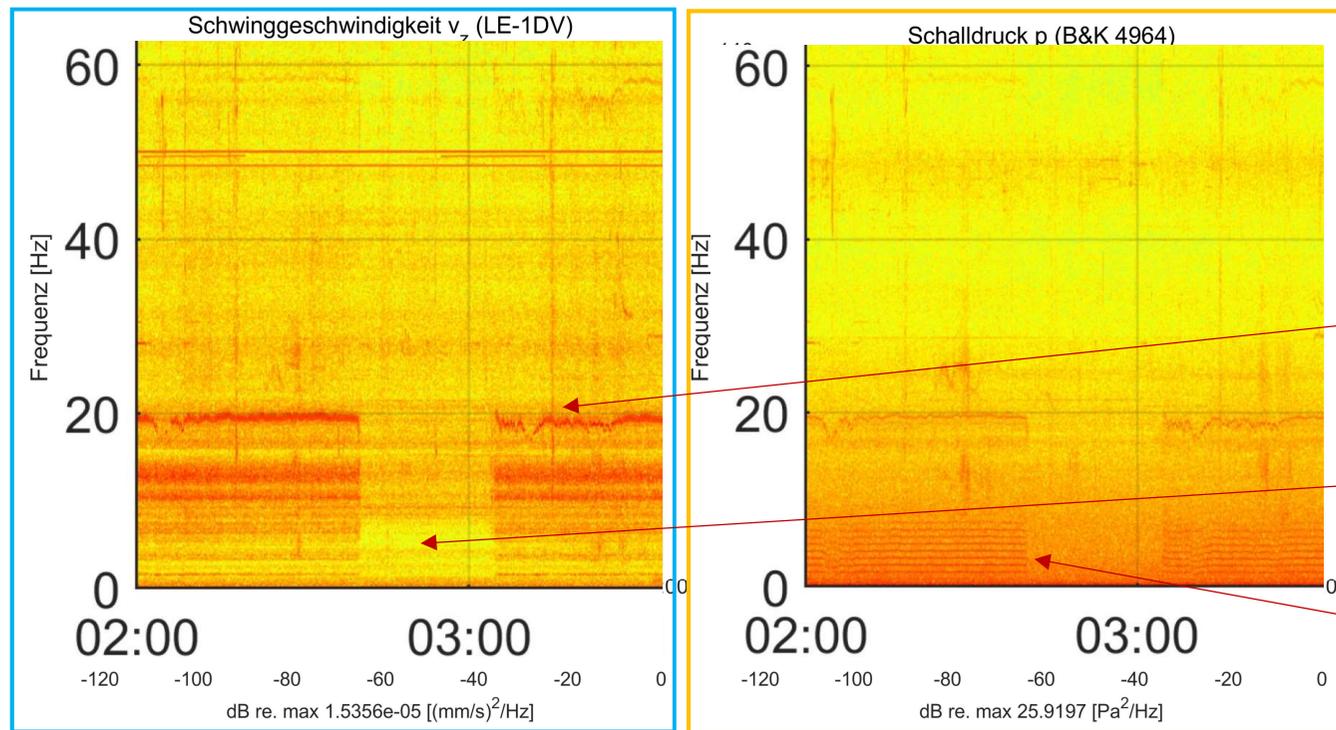
- Zeitvariante Leistungsdichte-spektren (PSD) 10.02.2019 über 10 s als log. Intensität relativ zum 24-h-Maximum der
  - seismischen und
  - akustischen Signale



- Abschaltzeiten als Intensitäts-rückgang über den gesamten Frequenzbereich sichtbar
- Bestimmte Signalanteile bleiben auch in Abschaltzeiten vorhanden

# Messung Ingersheim Standort 1

## ■ Detailausschnitt 10.02.2019

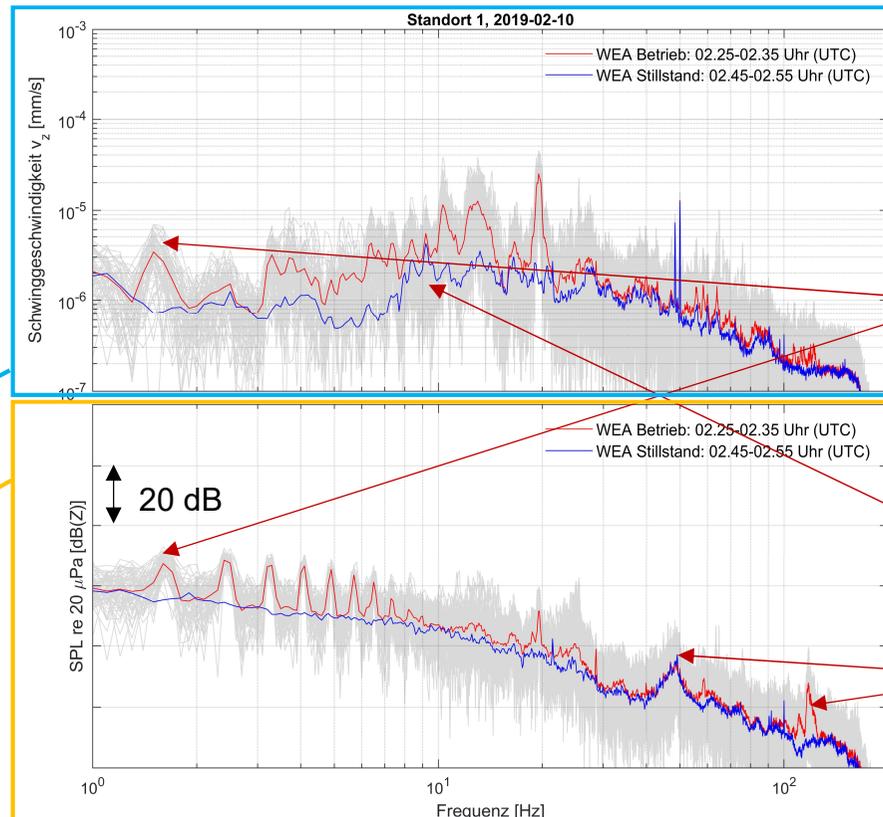


- Drehzahl-  
schwankung der  
WEA ist sichtbar
- Schwingungen  
treten auch im  
Stillstand auf
- Niederfrequente  
Signale eindeutig  
von der WEA

# Messung Ingersheim Standort 1

- Amplitudenspektrum am 10.02.2019 gemittelt über 10 min im Frequenzbereich

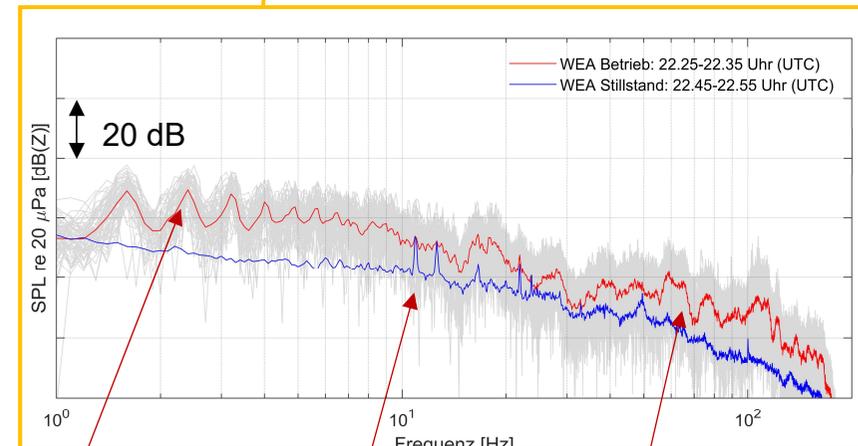
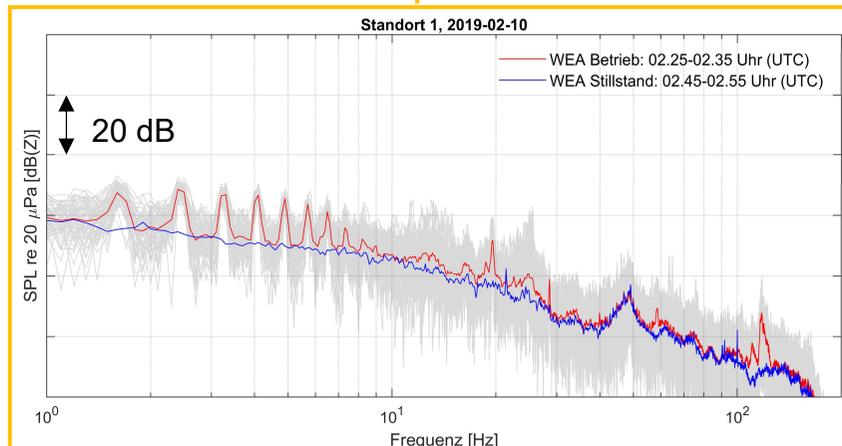
- Seismische und
- akustische Signale



- Vielfache der Blattdurchgangsfrequenz (BPF) sind dominant, sowohl seismisch als auch akustisch
- Signale aus Turmschwingung treten auch im Stillstand auf
- höherfrequente Anteile treten durch die WEA und unabhängig von ihr auf

# Messung Ingersheim Standort 1 vergleichend

- Akustische Signale als Amplitudenspektrum gemittelt über 10 min im Frequenzbereich
- vergleichend für 10.02.2019 (mittlerer Wind, links) und 01.03.2019 (starker Wind, rechts)

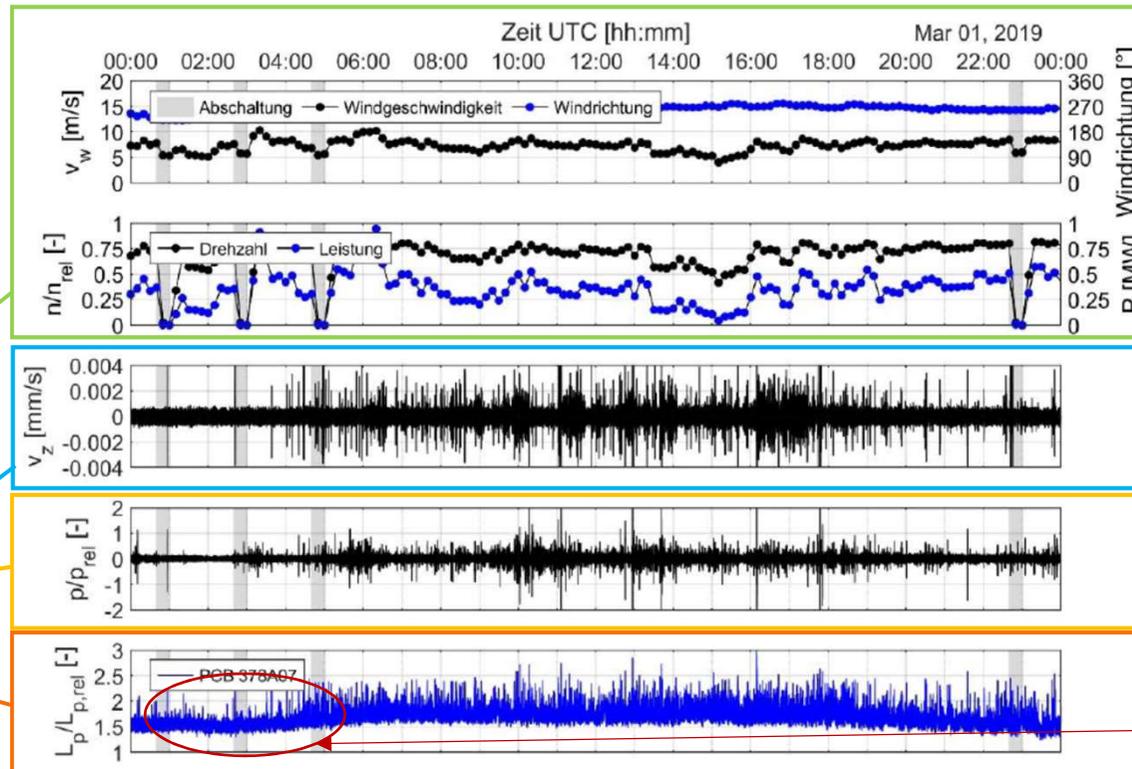


- Bei mehr Wind geringeres Herausstechen der BPF und höherer Signalanteil über 20 Hz
- Prominente niederfrequente Signale treten auch ohne WEA-Betrieb auf

# Messung Ingersheim Standort 2

## ■ Zeitverlauf 01.03.2019 von

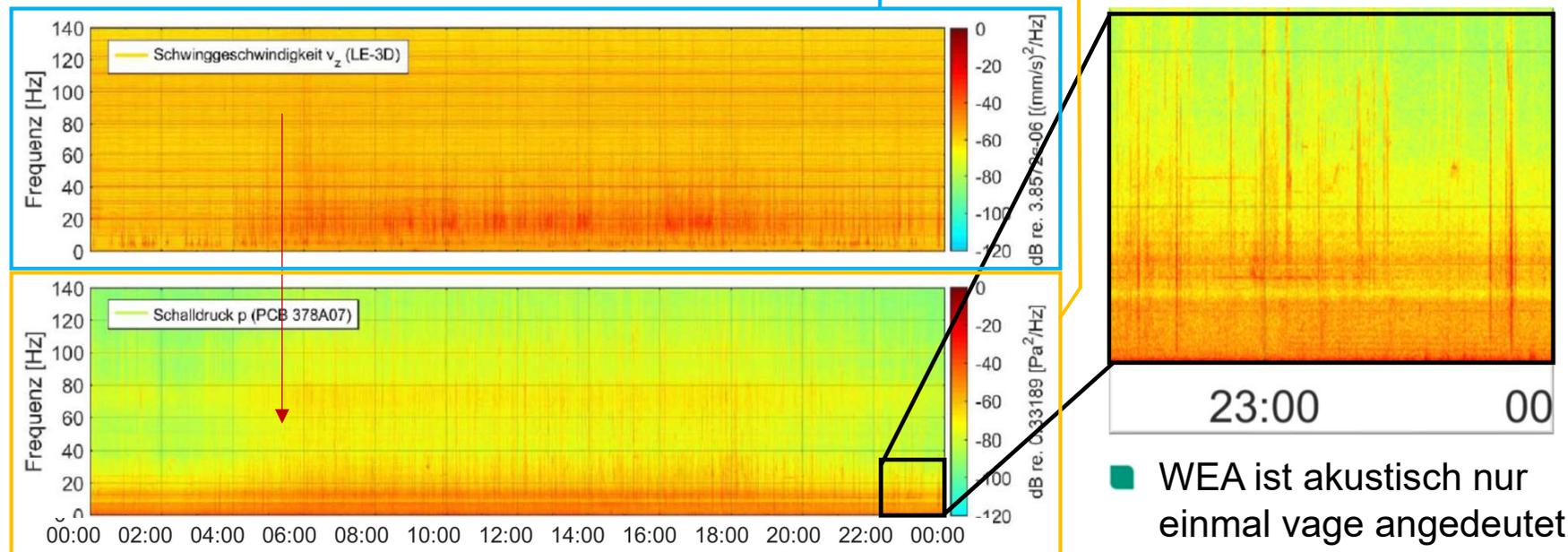
- Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Drehzahl, Leistung
- Schwinggeschwindigkeit (vertikal)
- Schalldruck
- Schalldruckpegel



■ In 2,4 km Abstand sind Abschaltzeiten nicht mehr sichtbar

## Messung Ingersheim Standort 2

- Zeitvariante Leistungsdichtespektren (PSD) der seismischen und akustischen Signale am 01.03.2019 über 10 s als log. Intensität relativ zum 24-h-Maximum

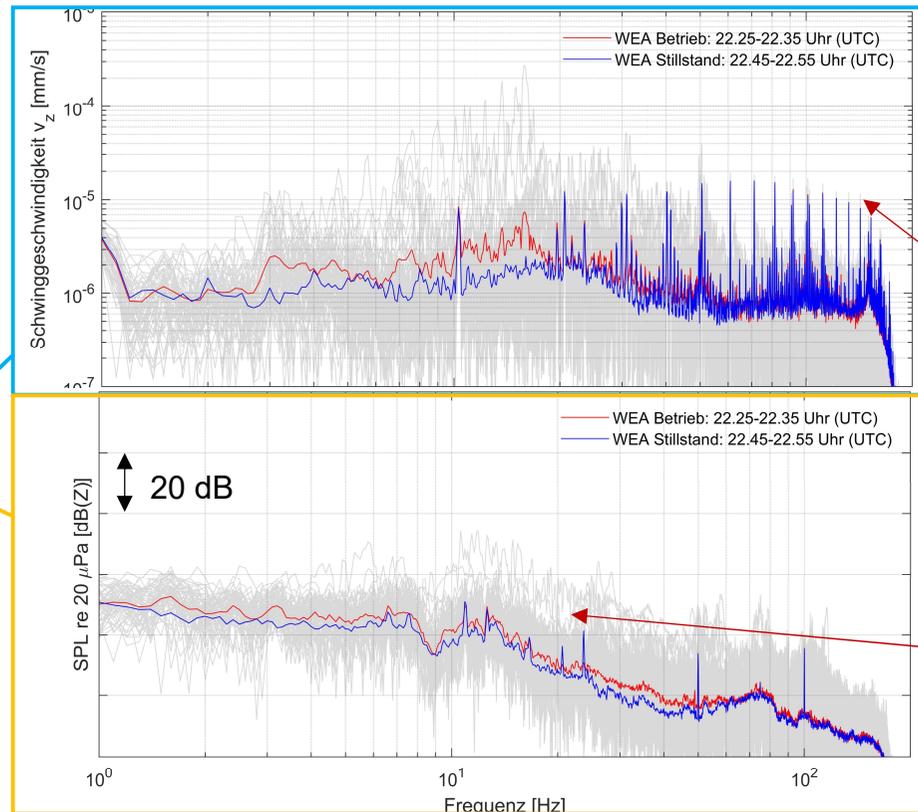


- WEA ist akustisch nur einmal vage angedeutet

## Messung Ingersheim Standort 2

- Amplitudenspektrum am 01.03.2019 gemittelt über 10 min im Frequenzbereich

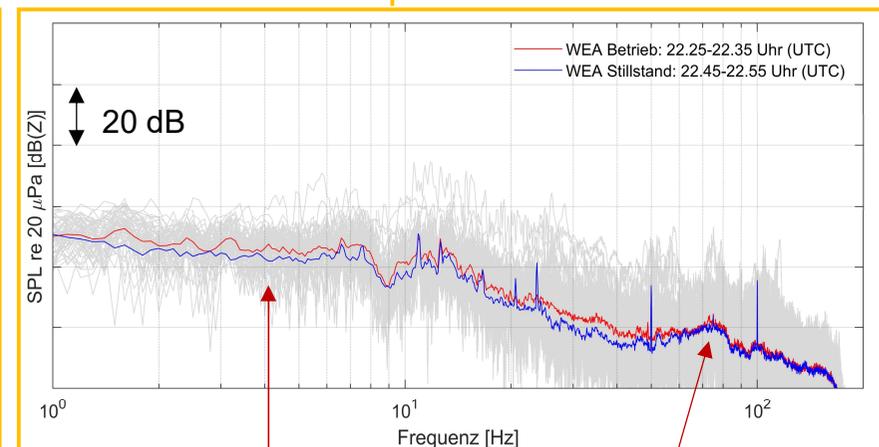
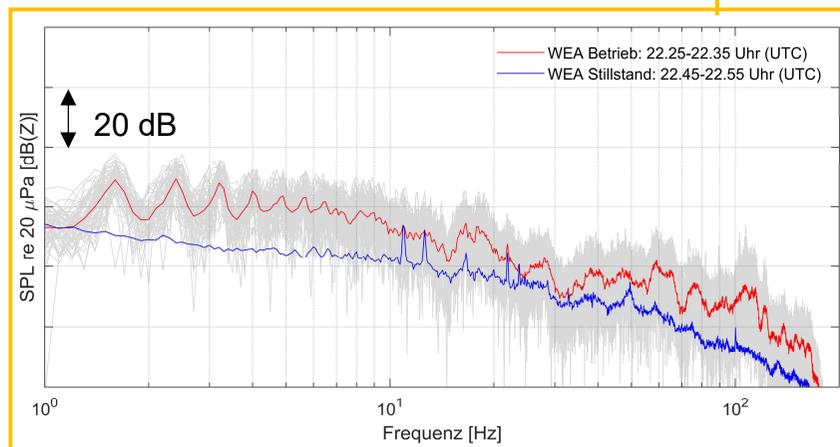
- Seismische und
- akustische Signale



- Dominierende höherfrequente Störsignale ohne WEA-Bezug
- Vielfache der Blatt-durchgangsfrequenz (BPF) sind kaum noch erkennbar
- WEA-Betrieb zeigt sich im akustischen Signal praktisch nicht

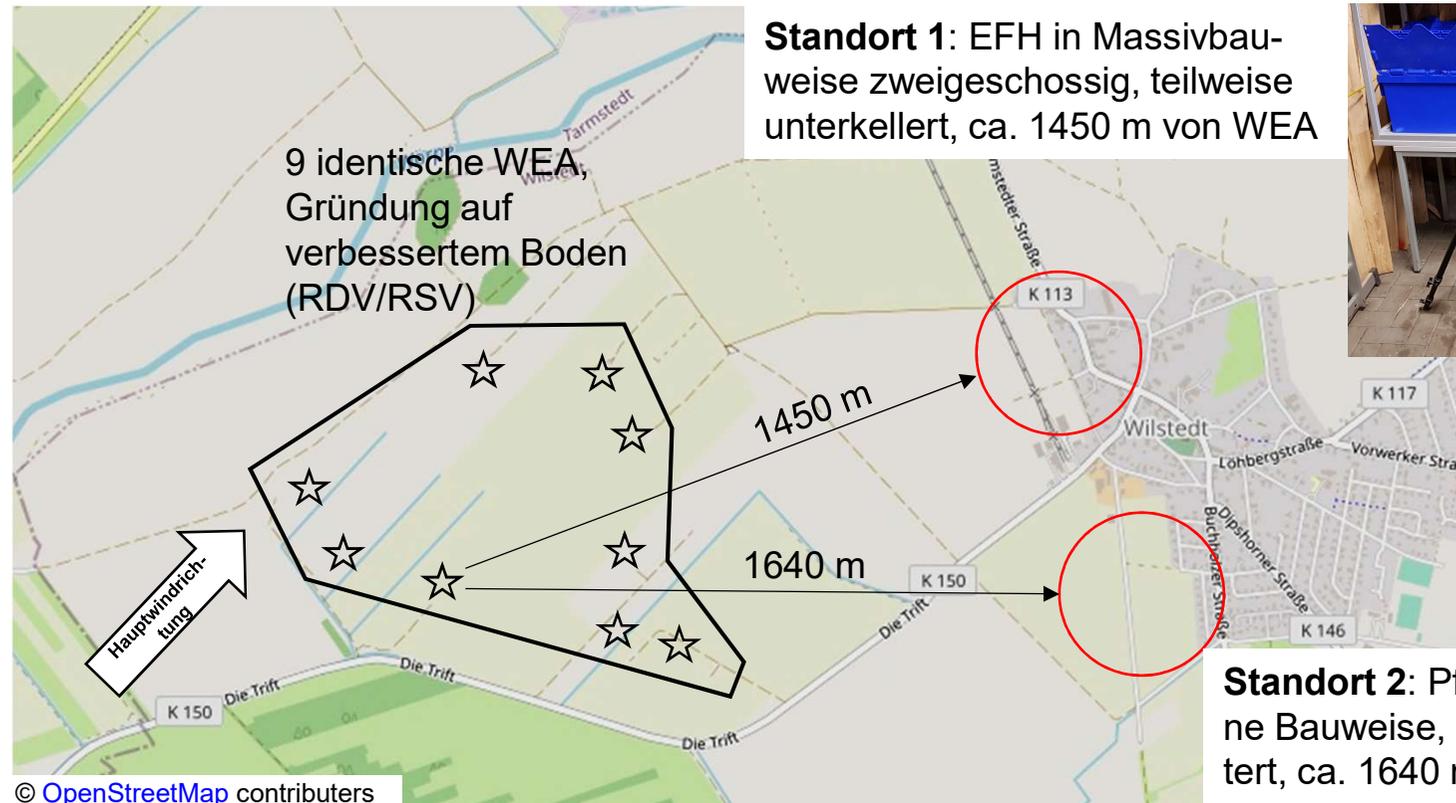
# Messung Ingersheim standortvergleichend

- Akustische Signale als Amplitudenspektrum gemittelt über 10 min im Frequenzbereich
- Für 01.03.2019 vergleichend für Standort 1 (400 m, links) und Standort 2 (2400 m, rechts)



- Niederfrequente Anteile durch WEA verschwinden fast völlig
- Im hörbaren Bereich ähnlich hoher Schwankungsbereich der Amplituden (grau)

# Messstandorte Wilstedt



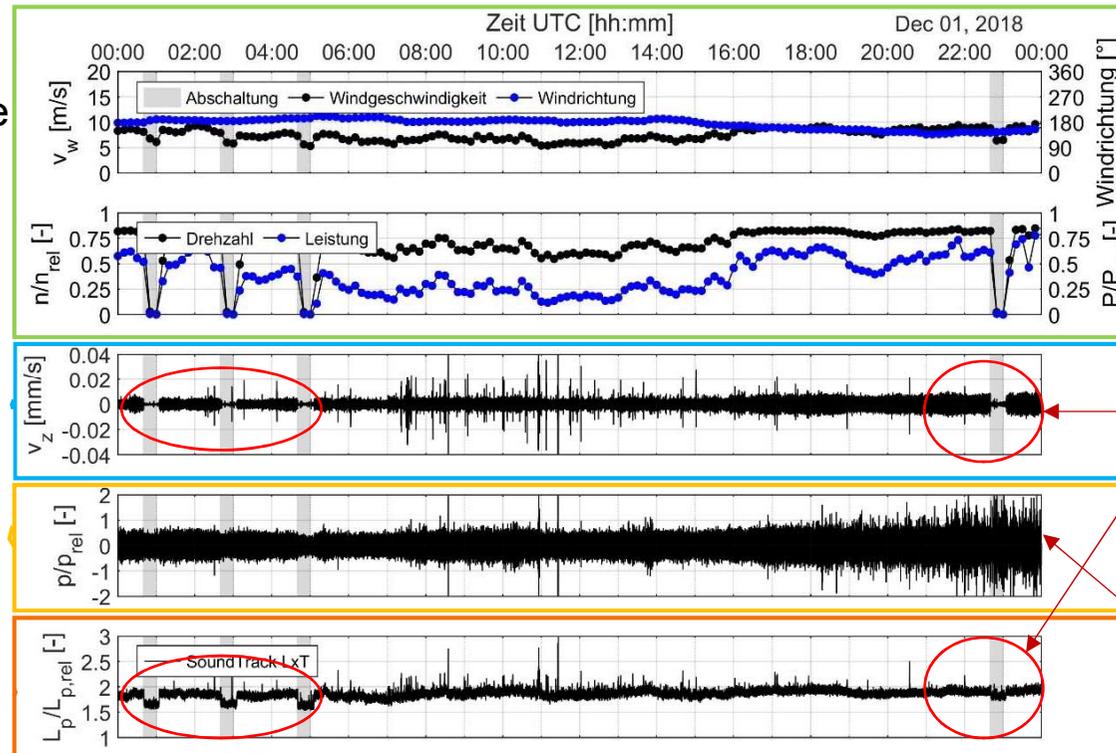
**Standort 1:** EFH in Massivbauweise zweigeschossig, teilweise unterkellert, ca. 1450 m von WEA



**Standort 2:** Pferdestall, offene Bauweise, Boden gepflastert, ca. 1640 m von WEA

# Messung Wilstedt Standort 1

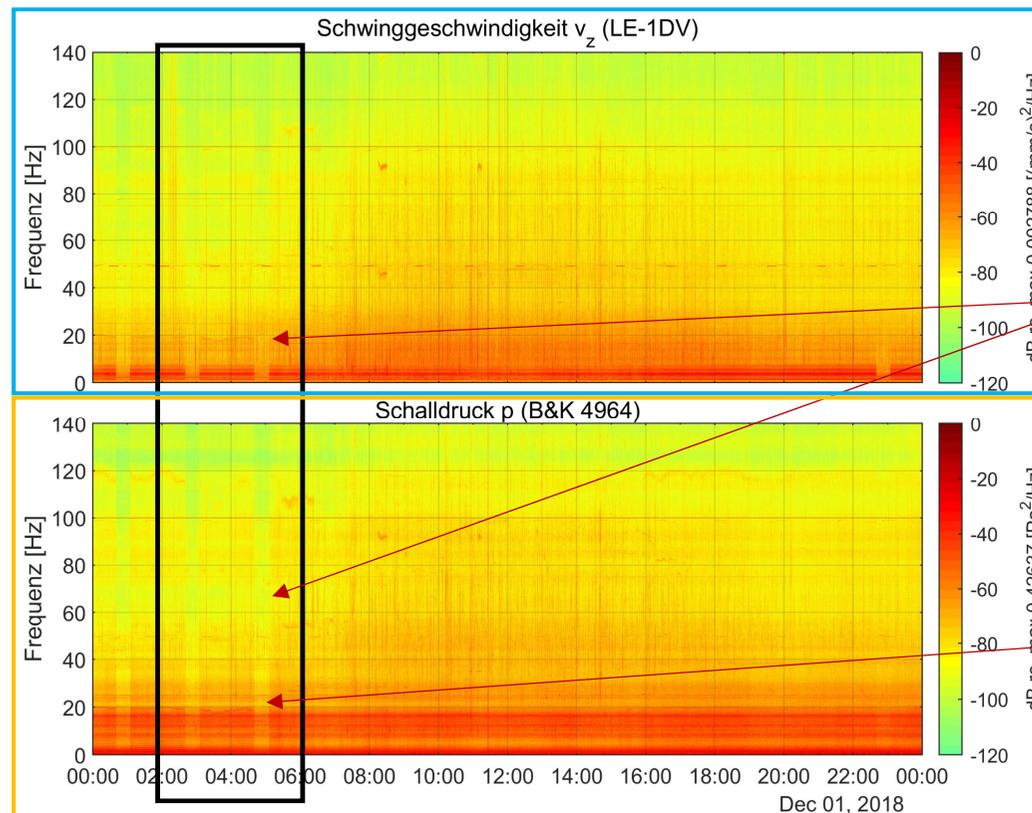
- Zeitverlauf  
01.12.2018  
im Gebäude  
(1450 m)



- Abschaltzeitraum nur in Schwinggeschwindigkeit und Schallpegel gut erkennbar
- Bei starkem Wind klare Zuordnung zum WEA-Betrieb nicht mehr immer möglich

# Messung Wilstedt Standort 1

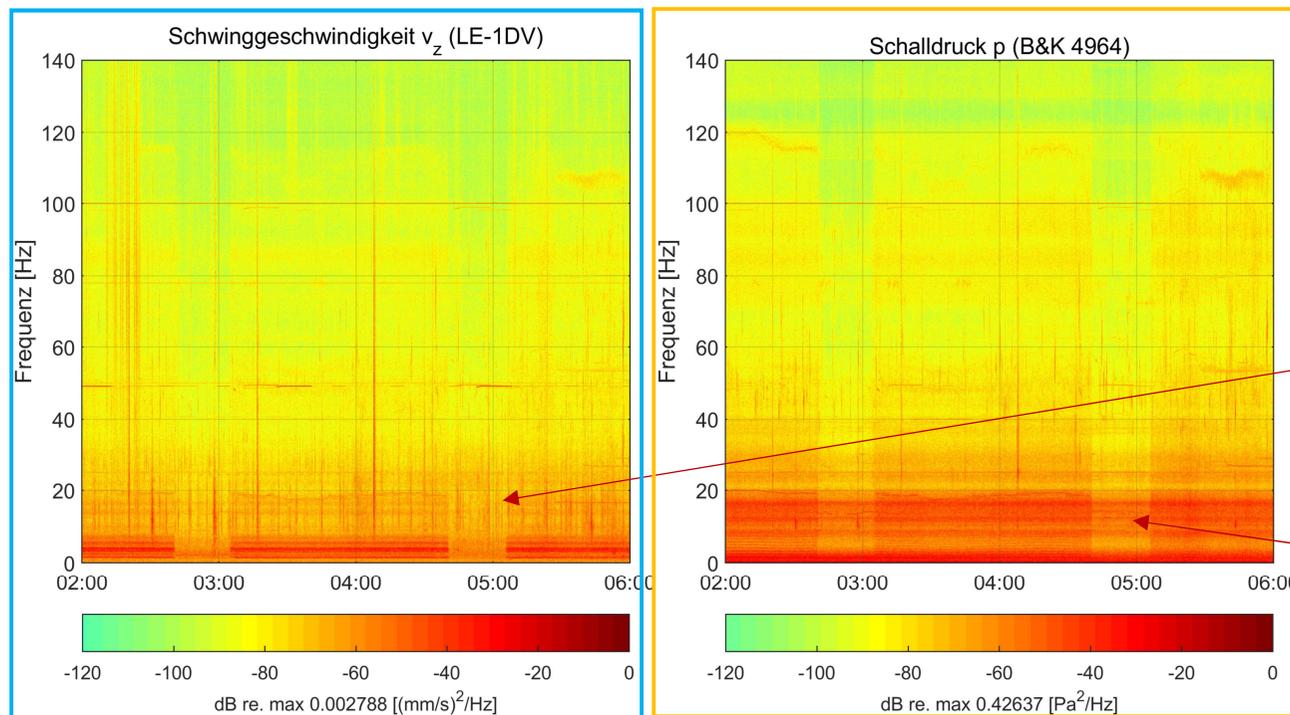
- Signale  
01.12.2018  
im Gebäude  
(1450 m)



- Abschaltzeiten als Intensitätsrückgang über den gesamten Frequenzbereich sichtbar
- Niederfrequente Signalanteile sind nicht leicht den WEA zuzuordnen
- Bestimmte Signalanteile bleiben auch in Abschaltzeiten vorhanden

# Messung Wilstedt Standort 1

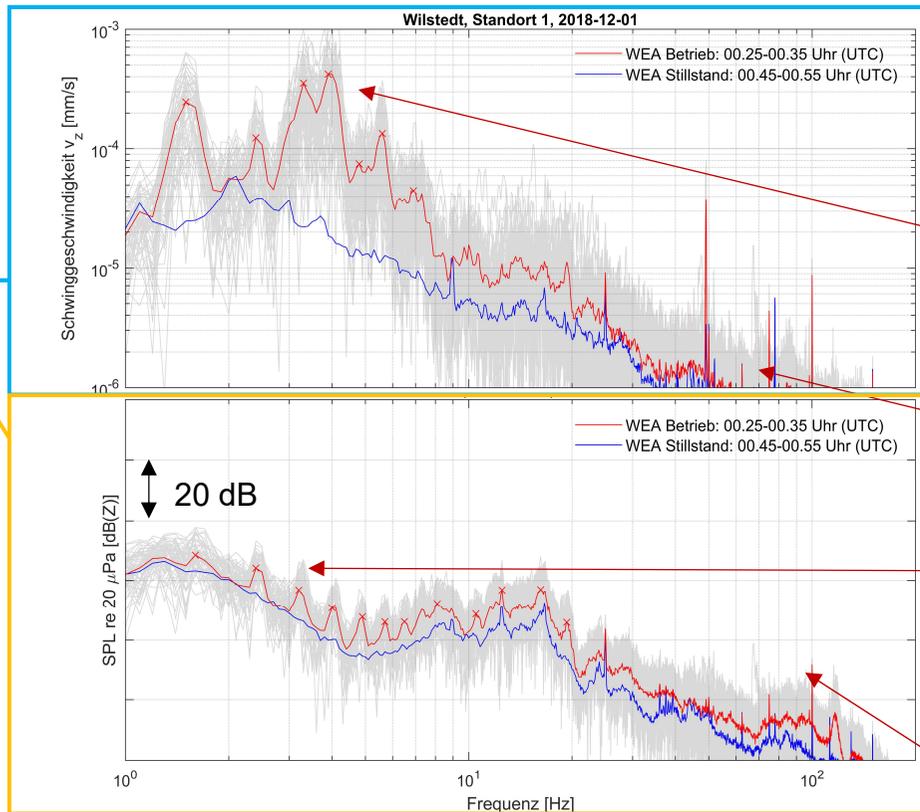
## ■ Detailausschnitte 01.12.2018



- Niederfrequente seismische Signalanteile von WEA eindeutig, akustische nicht
- Signalanteile (z.B. 13 Hz, 17 Hz) bleiben bei Abschaltung

# Messung Wilstedt Standort 1

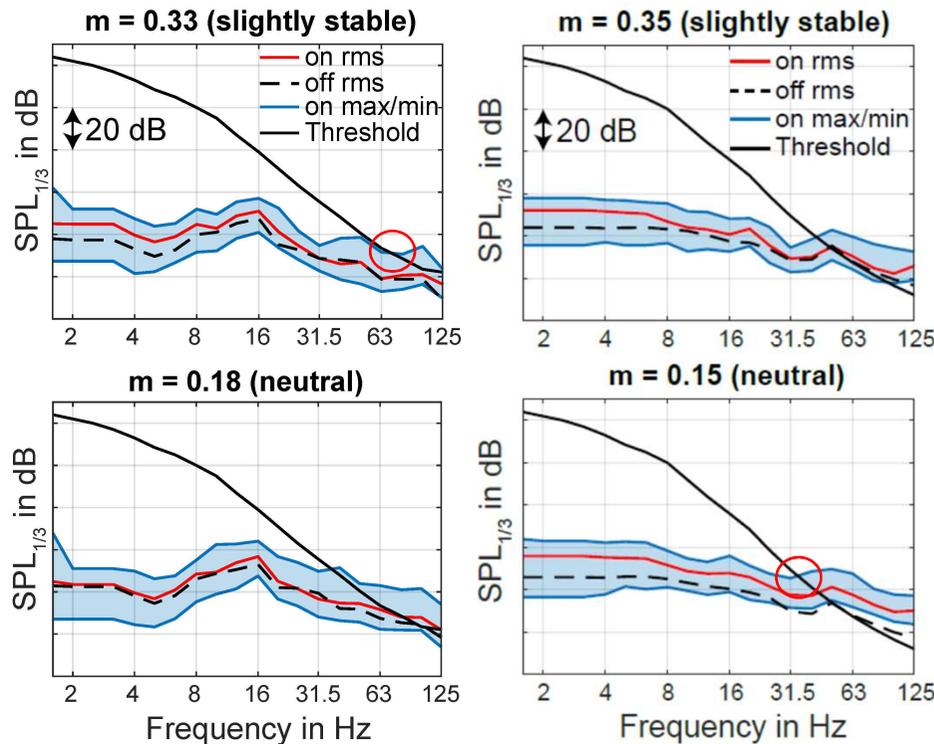
- Amplitudenspektrum 01.12.2018
- Seismische und akustische Signale



- Vielfache der BPF sind dominant
- Seismische Amplituden sind 10x höher als in Ingersheim
- Seismische Frequenzen > 20 Hz sind stark gedämpft
- Akustische Amplituden wie in Ingersheim (9 WEA, aber 3x größerer Abstand)
- Zahlreiche Fremdsignale

# Akustische Wahrnehmbarkeit

- Einordnung gemessener Schalldruckpegel (links Wilstedt 1, 30.11.2018, rechts Ingersheim 1, 10.02.2019)
- Minimum, Maximum und Mittelwert des Terzpegels ( $SPL_{1/3}$ ) bei Betrieb und Stillstand für unterschiedliche Luftschichtung



- Schalldruckpegel Infraschall unterhalb Hörschwelle
- ab 30-60 Hz ggf. auch darüber

Quelle: E. Blumendeller et al., Acoustics 2020, Hörschwelle nach H. Møller & C.S. Pedersen, Noise Health 2004, sowie DIN 45680:2013-09 (Entwurf)

## Fazit aus den Messungen

- Niederfrequente Erschütterungen infolge WEA-Betrieb
  - Abschaltungen sind bis 1500 m erkennbar, Frequenzen  $< 20$  Hz dem WEA-Betrieb klar zuordenbar (Höherharmonische der BPF).
  - Weicher Baugrund erhöht niederfrequente Amplituden, aber dämpft höhere Frequenzen.
  - sind für Menschen nicht spürbar.
- Niedrigerfrequenter Schall infolge WEA-Betrieb
  - Abschaltungen sind bis 400 m immer, bis 1500 m teilweise erkennbar, Frequenzen  $< 20$  Hz dem WEA-Betrieb meist zuordenbar (Höherharmonische der BPF).
  - Schalldruckpegel durch WEA liegen bei Infraschall weit unter bekannten Wahrnehmungsschwellen, im niederfrequenten hörbaren Bereich ggf. knapp darüber.
  - Bei 1500 m heben sich WEA nur noch unter speziellen Bedingungen von Hintergrundgeräuschen ab.
  - Starker Wind maskiert WEA-Geräusche bereits bei deutlich kleinerem Abstand.

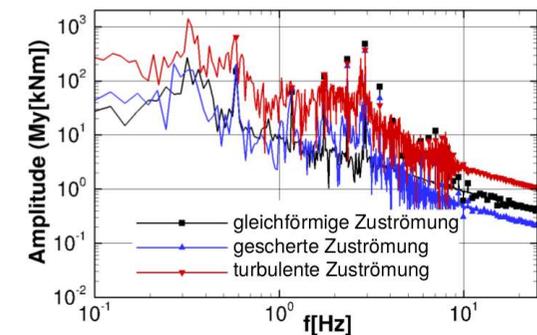
# Gesamtfazit im Blick auf niederfrequenten Schall

## ■ Modellierung

- Emissionen entstehen i.W. durch Blattpassage am Turm und sind ungerichtet
- Entscheidend sind Luftschichtung, Anströmturbulenz, Bauteilelastizitäten, Triebstrang
- Sekundärschall durch Bodenvibrationen ist vernachlässigbar
- Ausbreitungsberechnung  $> 20$  Hz noch schwierig
- Berechnete und gemessene Schalldrücke (Abstandsgesetz) stimmen nur größenordnungsmäßig überein
- Reduzierungspotenzial allenfalls bei der Emission

## ■ Befragungen (2 x 130 Pers.)

- Nur ein kleiner Prozentsatz (4 - 6%) fühlt sich stark belästigt
- Auf die WEA zurückgeführte Gesundheitsbeschwerden sind unspezifisch
- Es gibt keinen Zusammenhang von gefühlter Belästigung und Abstand zu WEA
- Stressbelastung korreliert mit Voreinstellung, Nichtbeteiligung und Landschaftsbild



Quelle: L. Klein et al.,  
Wind Energy Sci. 2018

# Danksagung



- Zahlreichen Kollegen für die Zusammenarbeit ...

E. Blumendeller, F. Borisade, P. Bortolotti, C. Botasso, F. Calarco, H. Canet, P.W. Cheng, St. Chrisopoulos, Th. Gortsas, J. Gude, St. Hauptmann, C. Hornberg, G. Huber, G. Hübner, I. Kimmig, L. Klein, P. Knödel, U. Krause, M. Liebig-Gonglach, B. Luhmann, Th. Lutz, S. Nagel, J. Pohl, Ph. Rettler, J. Ritter, J. Schreiber, T. Stüttchen, C. Sucameli, Th. Triantafyllidis, Th. Ummenhofer, F. Wenz, I. Würth, T. Zieger

- WEA-Hersteller, Kommunen und Windparkbetreibern ...

- Anwohnern und Grundstückseignern ...

- dem Zuwendungsgeber ...

- ... und Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit !

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

- Alle Berichte unter <https://www.tib.eu/de/researchieren-entdecken> (Eingabe „tremac“)