Schallausbreitung einer Windenergieanlage im komplexen Gelände unter Berücksichtigung verschiedener meteorologischer Bedingungen

Katharina Elsen[1], Arthur Schady[2]

[1] *DLR, Institut für Physik der Atmosphäre, Weßling, Deutschland, Email: katharina.elsen@dlr.de*

[2] *DLR, Institut für Physik der Atmosphäre, Weßling, Deutschland, Email: arthur.schady@dlr.de*

Einleitung

Im Rahmen der Energiewende leistet Windenergie als regenerativer Energieträger einen wichtigen Beitrag. Dem gegenüber stehen die teils geringe Akzeptanz aufgrund von Lärmbelastung sowie die Verknappung potentieller Standorte. Die Installation von Windenergieanlagen (WEA) im komplexen Gelände wird daher immer wichtiger und damit auch das Wissen um Effizienz und Lärmbelastung der WEA in diesem Gelände. Im Rahmen des NEWA Projektes wurden im Vale de Cobrão (Perdigão, Portugal), hochaufgelöste Langzeitdaten bezüglich atmosphärischer Bedingungen und Schallimmission gesammelt, mithilfe welcher die Schallausbreitung im komplexen Gelände untersucht werden kann [2]. Das Messgebiet mit der WEA (in der Abb. mit WT bezeichnet) und den drei hier analysierten Mikrofonen, sowie den zugehörigen Entfernungen zur WEA, ist schematisch in Abb. 1 dargestellt. Zudem sind die beiden Hauptwindrichtungen, SW und NO, skizziert. Die physikalischen Prozesse, die hierbei eine Rolle spielen (z.B. Absorption, Reflexion, Refraktion), sind komplex, frequenzabhängig und treten in Kombination auf. Der Einfluss der wechselnden atmosphärischen Bedingungen bewirkt unterschiedliche Pegeldämpfung im Ausbreitungsweg, die bei Entfernungen größer 500 m bis zu 15 dB oder mehr betragen können. Im Rahmen des Projektes Schall_KoGe soll ein verbessertes Schallimmissionsprognoseverfahren für die Anwendung in einfachem und komplexem Gelände entwickelt werden, da die bisherigen Berechnungsmethoden sowohl die Topografie als auch meteorologische Parameter nur unzureichend berücksichtigen. Im Folgenden soll dargestellt werden, wie aus Messdaten der Einfluss verschiedener meteorologischer Bedingungen in Kombination mit komplexem Gelände auf die Schallausbreitung analysiert und damit besonders extreme Situationen identifiziert werden können. Darüber hinaus kann bei genügend hoch aufgelösten Daten der Einfluss der verschiedenen meteorologischen Parameter quantifiziert werden. Die Ergebnisse dieser Auswertung können zur Validierung von Modelldaten aus Schallausbreitungssimulationen genutzt werden.

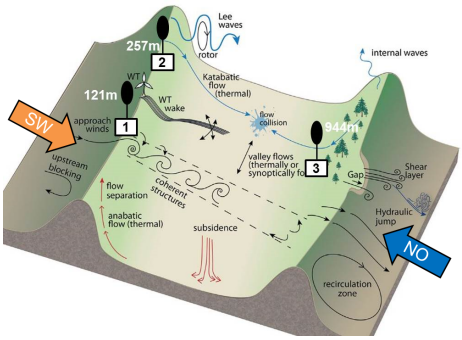

Abbildung 1: Schematische Lage der Mikrofone und der WEA im Vale Cobrão. Die Distanzen bezeichnen den Abstand der Mikrofone von der WEA.

Methodik der Datenfilterung

Die Hypothese, welche dem hier angewandten Verfahren zugrunde liegt, ist die, dass vergleichbare meteorologische Situationen zu vergleichbaren Schalldruckpegeln führen. Da im Rahmen des NEWA-Projektes eine große Menge an Daten gesammelt wurde und im Messzeitraum verschiedene meteorologische Situationen abgedeckt wurden, können die Daten nach diesen Situationen klassiert und anschließend die einzelnen Situationen analysiert und verglichen werden. Dazu müssen zunächst die wichtigsten meteorologischen Einflussparameter identifiziert und in Klassen diskretisiert werden. In Abb. 2 sind die Wertebereiche ausgewählter Parameter, jeweils für 10-Minuten-Mittel der Daten, im Sinne von Dichtefunktionen dargestellt. Dabei werden jeweils die beiden Fälle *LLJ* bzw. *no LLJ* die das vorhanden sein, bzw. nicht vorhanden sein eines Low-Level-Jets (LLJ) innerhalb des entsprechenden 10-Minuten-Mittels bezeichnen. Unter einem LLJ versteht man dabei ein sich bei stabilen atmosphärischen Bedingungen ausbildendes, in der unteren bis mittleren Troposphäre auftretendes, Starkwindfeld. In Pedigao wurde dieser häufiger in den Nachtstunden in Höhen zwischen 300 m und 600 m ü.G. beobachtet. In praktisch allen Fällen ist eine klare Abhängigkeit des Wertebereichs vom Auftreten eines LLJ erkennbar, lediglich im Fall der Turbulenzintensität ist diese Abhängigkeit weniger stark ausgeprägt. Eine Filterung nach den entsprechenden Parametern impliziert daher auch eine Filterung nach LLJs. Bei der Schallausbreitung an WEA beeinflussen die vorherrschenden meteorologischen Bedingungen nicht nur die Schallausbreitung selbst, sondern auch die Schallentstehung. Dabei hängt der emittierte Schalldruckpegel insbesondere von der Rotationsgeschwindigkeit der WEA ab, aber auch die Anströmung der Rotorblätter spielt hierbei eine Rolle. Abb. 3 zeigt die WEA in Perdigão (Portugal) bei Südwest-Anströmung mit skizzierter Drehrichtung. Darüber hinaus hat der Nachlauf der Turbine direkten Einfluss auf die Schallausbreitung. Weitestgehend unabhängig von der WEA spielen Windrichtung und Temperaturschichtung eine wichtige Rolle in

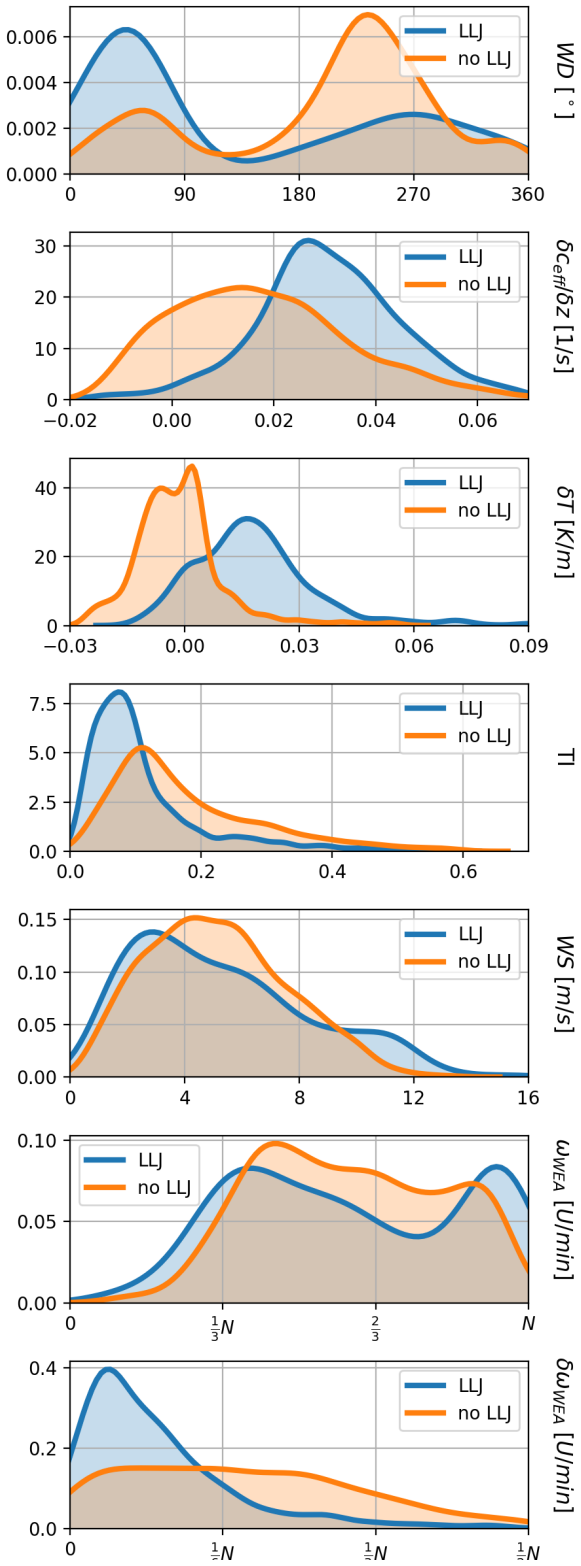

Abbildung 2: Dichtefunktionen ausgewählter Parameter (10-Minuten-Mittel) für die Wahl der Filterparameter. Der Einfluss von LLJ auf die Verteilungen der Parameter ist klar erkennbar. Die folgenden Parameter sind dargestellt: WD (Windrichtung), $\delta c_{eff}/\delta z$ (vertikaler Gradient der effektiven Schallgeschwindigkeit in $[1/s]$), δT (Temperaturgradient in $[K/m]$), TI (Turbulenzintensität), WS (Windgeschwindigkeit), ω_{WEA} (Rotationsgeschwindigkeit der WEA), $\delta\omega_{WEA}$ (Differenz zwischen maximaler und minimaler Rotationsgeschwindigkeit der WEA)

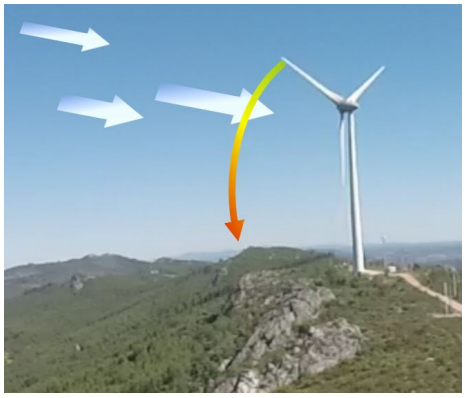

Abbildung 3: WEA in Perdigão (Portugal) bei Südwest-Anströmung, die Drehrichtung ist skizziert.

der Schallausbreitung. Bei der Analyse des Schalldruckpegels im Nah- und Fernfeld der WEA müssen die jeweils relevanten meteorologischen Bedingungen angemessen berücksichtigt werden. Während der Schalldruckpegel im Nahfeld relativ einfach der WEA zugeordnet werden kann, ist dies im Fernfeld nicht trivial wie auch aus Abb. 4 und 5 ersichtlich wird. Hier wird die Korrelationen zwischen den gemessenen Schalldruckpegeln (Berg und Tal) bei ein- und ausgeschalteter WEA, jeweils für 2 Anströmrichtungen, dargestellt. Alle Schalldruckpegel sind als Differenzschallpegel bezüglich eines Referenzwertes, L_{ref}, angegeben. Um den Hintergrundpegel zu dokumentieren, wurde die WEA täglich eine Stunde (nachts) ausgeschaltet (WEA aus). In Abb. 4a) und b) werden die Pegel der beiden auf dem Bergrücken aufgestellten Mikrofone (1 und 2), bei aus- und eingeschalteter WEA, miteinander verglichen. Abb. 5a) und b) vergleicht den "virtuellen Emissionspegel", das Maximum von Mikrofon 1 und Mikrofon 2, mit dem Pegel des im Tal positionierten Mikrofons 3. Bei eingeschalteter WEA besteht zwischen den beiden am Bergrücken positionierten Mikrofonen eine starke Korrelation. Des weiteren fällt in Abb. 4b) eine deutliche Abhängigkeit des Schalldruckpegels von der Windgeschwindigkeit auf. In Abb. 4a), d.h. bei ausgeschalteter WEA ist dies nicht der Fall, obwohl sowohl hohe, wie auch niedrige Windgeschwindigkeiten gemessen werden. Dies ist ein klarer Indikator dafür, dass hier tatsächlich das Geräusch der WEA gemessen wird. In Abb. 5b) ist die Korrelation zwischen den Bergmikrofonen und dem Talmikrofon deutlich geringer ausgeprägt, allerdings fällt auch hier eine Zunahme des Schalldruckpegels bei zunehmender Windgeschwindigkeit auf, was bei ausgeschalteter WEA (Abb. 5a) nicht der Fall ist. Dies ist ein gutes Indiz dafür, dass durch die WEA auch die Schalldruckpegel im Tal erhöht werden. Um die Abhängigkeit zwischen vorherrschender Meteorologie und Schalldruckpegel beurteilen zu können, ist allerdings eine detailliertere Analyse notwendig. Dazu wird nun die oben bereits beschriebene Filterung genutzt.

Einfluss meteorologischer Bedingungen

Da, wie in Abb. 2 gezeigt, die meisten meteorologischen Parameter stark vom Vorhandensein eines LLJ

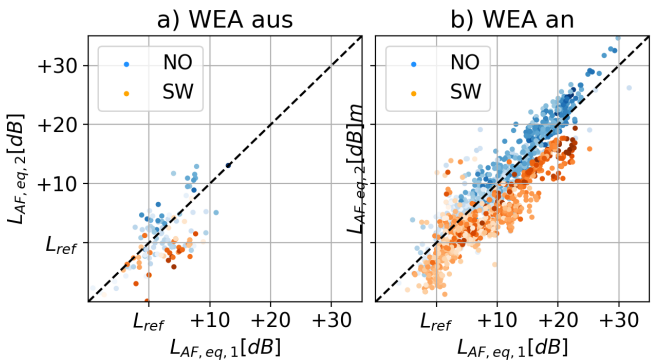

Abbildung 4: Korrelationen zwischen gemessenen Schalldruckpegeln am Berg bei aus- und eingeschalteter WEA, für 2 verschiedene Anströmrichtungen. Helle Farbtöne bedeuten geringe, dunkle Farbtöne hohe Windgeschwindigkeiten. Indizes 1 und 2 bedeuten Mikrofone 1 und 2.

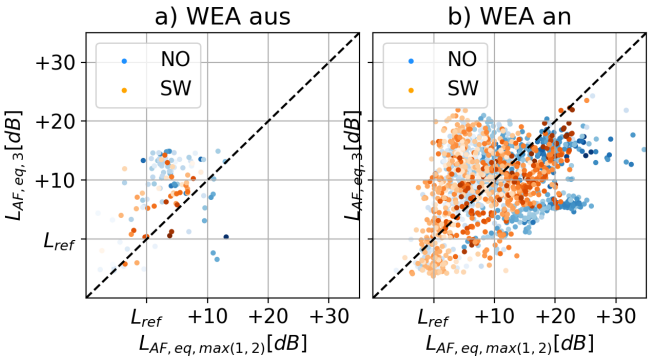

Abbildung 5: Korrelationen zwischen am Berg und im Tal gemessenen Schalldruckpegeln bei aus- und eingeschalteter WEA, für 2 verschiedene Anströmrichtungen. Helle Farbtöne bedeuten geringe, dunkle Farbtöne hohe Windgeschwindigkeiten. max(1,2) bedeutet Maximum der Pegel von Mikrofon 1 und 2.

abhängen, wurde für die Filterung das Auftreten eines LLJ als erster Parameter gewählt. Als zweiter Parameter wurde die Windrichtung gewählt um den Einfluss von Mit-, Gegenwind auf die Schallausbreitung beurteilen zu können. Für eine feinere Filterung mit Hilfe weiterer Parameter ist $\delta\omega_{WEA}$ (Schwankungsbreite der Rotationsgeschwindigkeit) zu groß, da die Pegelunterschiede aufgrund der schwankenden Rotationsgeschwindigkeit größer sind, als die zu erwartenden Effekte beispielsweise durch eine Änderung der Turbulenzintensität. In den folgenden Abb. wird jeweils die Abhängigkeit des Schalldruckpegels von der Rotationsgeschwindigkeit für 10-Minuten-Mittelwerte analysiert. In den Abb. 6 und 7 sind jeweils für die Nachtstunden die A-bewerteten Schalldruckpegel sowie die des 125 Hz Terzbandes dargestellt. Dabei bezeichnet ROT_{avg} die mittlere Rotationsgeschwindigkeit relativ zur Nennleistung N. Die Schalldruckpegel sind wieder als Differenzschalldruckpegel bzgl. des Referenzwerts dargestellt. Zusätzlich wurde noch die Detektierbarkeit der WEA farblich kodiert, wobei das Signal als detektierbar bezeichnet wird, falls die Differenz zwischen der mittels Fourier Transformation (FFT) ([1]) hergeleiteten Rotationsgeschwindigkeit und der tatsächlichen Rotationsgeschwindigkeit kleiner als 2 ist. Die Windrichtung *SO* wurde hier nicht dargestellt, da dieser Fall in den Nachtstunden praktisch nicht auftritt. Es zeigt sich, sowohl im A-bewerteten Pegel, als auch im 125 Hz-Terzband, bei NW-Anströmung ohne LLJ eine eindeutige Zunahme des Schalldruckpegels mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit, insbesondere bezüglich der als detektierbar bezeichneten Signale. Dabei liegt der bei Nennleistung aufgezeichnete Schalldruckpegel auch klar oberhalb des mittleren Hintergrundgeräusches (d.h. bei $ROT_{avg} = 0$ U/min). Des Weiteren fällt auf, dass bei SW-Anströmung, d.h. bei Mitwindbedingungen, und ohne LLJ, die WEA in den Nachtzeiten des betrachteten Zeitraumes im Mittel deutlich unterhalb ihre Nennleistung läuft. Während hier bei Betrachtung des Terzbandes der Zusammenhang zwischen Schalldruckpegel und Rotationsgeschwindigkeit gut erkennbar ist, ist dies für den A-bewerteten Pegel nicht der Fall. Eine konkrete Beurteilung dieses Falles ist jedoch aufgrund der fehlenden Maximalpegel bei Nennleistung nicht möglich. Schließlich kam es bei NO-Anströmung häufig zu LLJ mit entsprechend hohen Windgeschwindigkeiten, so dass die WEA regelmäßig mit Nennleistung gelaufen ist. Sowohl im A-bewerteten Pegel, als auch im Terzband ist eine Zunahme des Schalldruckpegels mit der Rotationsgeschwindigkeit gut erkennbar. Bei Nennleistung liegt der Schalldruckpegel klar oberhalb des mittleren Hintergrundpegels.

Fazit

Insgesamt erlaubt diese Art der Datenfilterung eine situationsspezifische und damit gegenüber einer einfachen Korrelationsanalyse eine deutlich differenziertere Beurteilung des Schalldruckpegels. Darüber hinaus können die Schalldruckpegel für verschiedene meteorologische Situationen gegenübergestellt werden. Es zeigt sich aber auch, dass für eine abschließende Analyse weniger stark gemittelte Daten benötigt werden. Dies soll im nächsten Schritt erfolgen.

Danksagung

Die Auswertungen für dieses Projekt werden unterstützt durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des Projektes Schall_KoGe mit dem Förderkennzeichen: 0324337B. Ferner danken wir den Projektpartnern von der WRD GmbH für Informationen zum Betrieb der WEA.

Literatur

[1] Schady, A.; Elsen, K.: Zur Detektierbarkeit der Geräusche einer WEA unter verschiedenen meteorologischen Bedingungen. DAGA Vortrag (2020)

[2] Fernando H.F. et al. (2018): "The Perdigão: Peering into Microscale Details of Mountain Winds" subm. to Bulletin of the American Meteorological Society

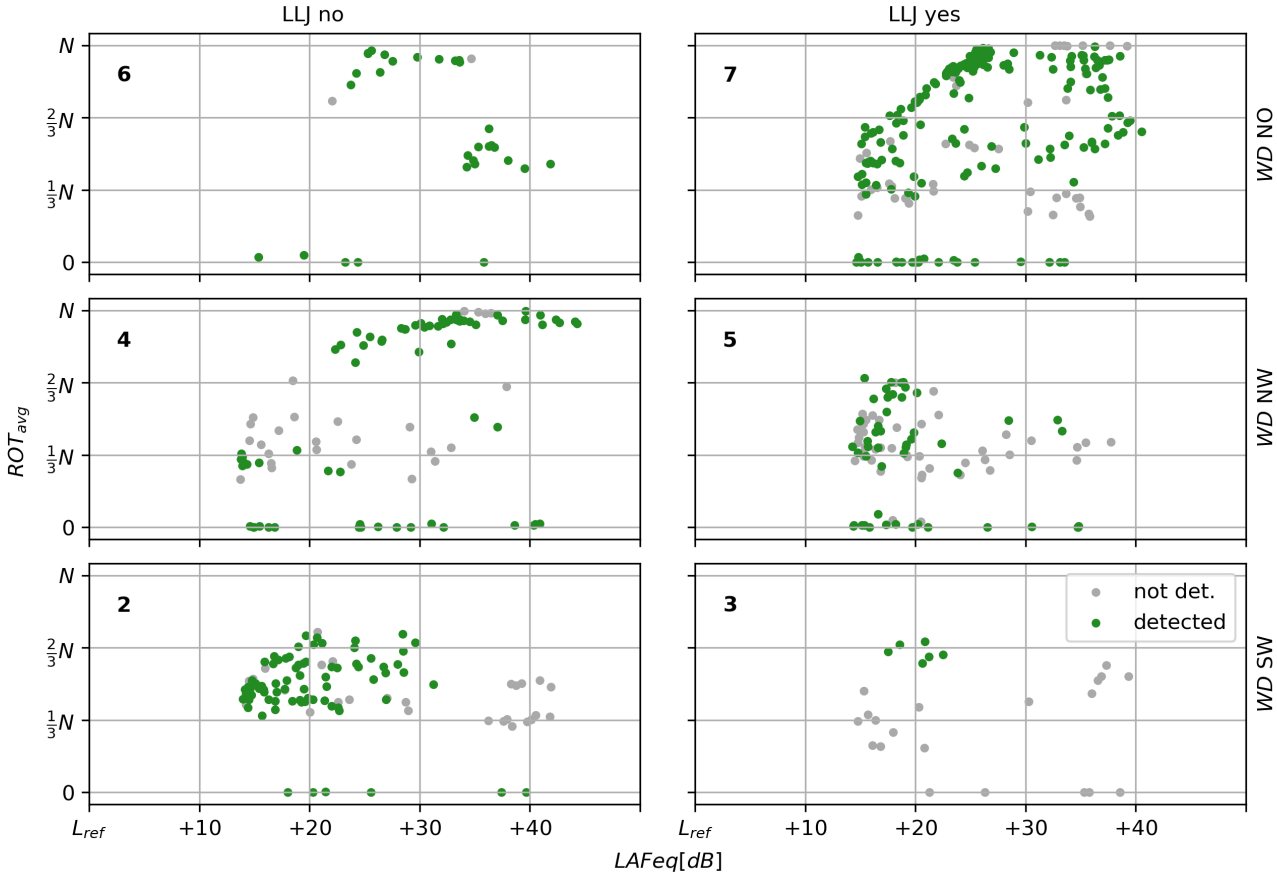

Abbildung 6: A-bewerteter Schalldruckpegel des im Tal positionierten Mikrofones in der Nacht (22:00-6:00). Grüne Punkte bezeichnen mittels FFT detektierbare Rotationsgeschwindigkeit der WEA, grau bedeutet nicht detektierbar.

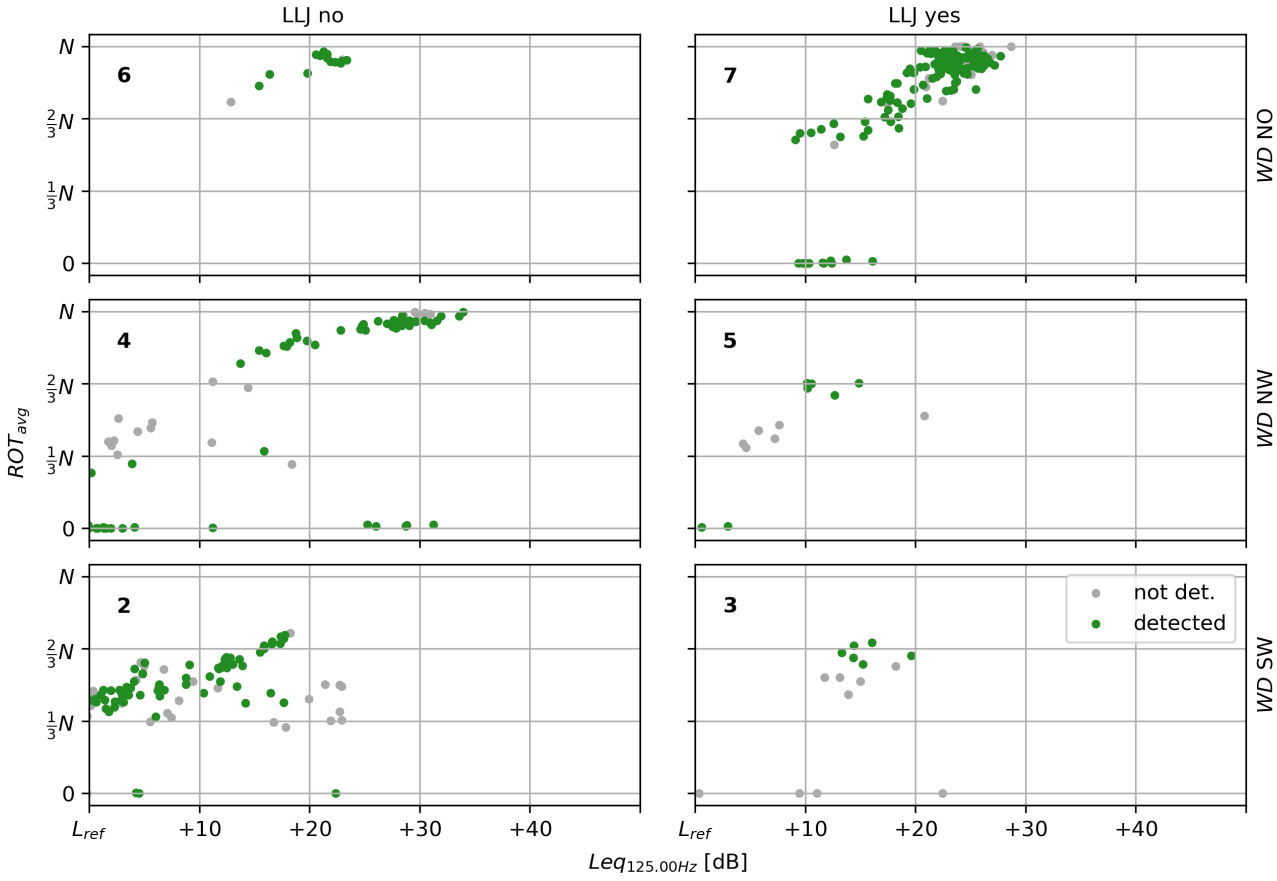

Abbildung 7: Schalldruckpegel des 125 Hz Terzbandes des im Tal positionierten Mikrofones in der Nacht (22:00-6:00). Grüne Punkte bezeichnen mittels FFT detektierbare Rotationsgeschwindigkeit der WEA, grau bedeutet nicht detektierbar.