

Schallimmissionsmessungen in der Umgebung von Windkraftanlagen bei unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen

Investigation of Outdoor Sound Propagation in the Environment of Wind Turbines at Different Meteorological Conditions

Osten, Tjado; Klug, Helmut; DEWI

Summary

Within the planning procedure of single wind turbines or wind farms the prediction of noise immission at the nearest dwellings plays a deciding role. Actually the sound immission levels are calculated by means of the VDI guideline "Schallausbreitung im Freien" (VDI 2714).

In order to provide information concerning the validation of prediction models outdoor sound propagation around wind turbines has been investigated by simultaneous sound measurements in the near and far field of two wind energy converters. With respect to a varying sound propagation at different stratifical conditions measurements were performed at daytime as well as at night. Taking into account the sound attenuation effect of porous ground the sound immission levels were measured with microphones located at two different heights.

During the noise measurements the meteorological data (wind speed, wind direction, temperature) at different heights were obtained from a mast (130m high) which is situated near the test site.

1. Einleitung

Die Nutzung der Windenergie hat in der Bundesrepublik Deutschland besonders in den küstennahen Regionen in den letzten Jahren beträchtlich an Bedeutung gewonnen. Für die Projektplanung in diesem Bereich spielt bei der Wahl von Standorten für Windkraftanlagen (WKA) der von den Turbinen abgestrahlte Schall eine wesentliche Rolle. In der Regel ist vor der Errichtung einer oder mehrerer Anlagen im Rahmen des Genehmigungsverfahrens eine Schallimmissionsprognose für die Umgebung der Anlagenstandorte erforderlich.

Da aus wirtschaftlichen und planerischen Gründen in letzter Zeit verstärkt zur Errichtung von Anlagen in größeren Windparks übergegangen wird und zudem ein Trend zu leistungsstärkeren Anlagen zu verzeichnen ist, wächst die Bedeutung der Zuverlässigkeit von Schallimmissionsprognosen für die Windenergienutzung.

Maßgeblich für derartige Berechnungen ist die Kenntnis des Schalleistungspegels einer Windkraftanlage sowie der Ausbreitungsbedingungen des Schalls im Freien. Als Grundlage hierfür dient in der Regel die VDI-Richtlinie 2714 ("Schallausbreitung im Freien").

Im Rahmen eines Forschungsprojektes des DEWI im Bereich der Akustik ist eine Diplomarbeit [1] vergeben worden, in welcher die Schallausbreitung in der Umgebung von Windkraftanlagen bei unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen durch Messungen untersucht worden ist.

2. Grundlagen der Schallausbreitung

Die Ausbreitungsbedingungen für Schall im Freien sind stark abhängig von den jeweils vorherrschenden meteorologischen Bedingungen. Es ist bekannt, und diese Erfahrung läßt sich im Freien leicht nachempfinden, daß Schall besonders nachts und bei leichtem Mitwind auch von weiter entfernten Schallquellen oftmals noch gut hörbar ist. Dieses Phänomen ist nicht - zumindest nicht ausschließlich - auf die meist geringeren Hintergrundgeräusche (Verkehrslärm, Rauschen von Laub, usw.) bei Nacht zurückzuführen. Ähnlich wie Lichtstrahlen beim Durchlaufen von Medien mit unterschiedlichen Lichtausbreitungsgeschwindigkeiten gebrochen werden, erfahren auch „Schallstrahlen“ nach den Gesetzen der geometrischen Akustik eine Brechung aufgrund der örtlich und zeitlich variierenden Ausbreitungsgeschwindigkeiten in der Atmosphäre (s. Abb.1). Die Stärke der Strahlenablenkung von der geradlinigen Ausbreitung hängt ab von der Größe der Schallgeschwindigkeitsänderung („Schallgeschwindigkeitsgradient“). Insbesondere unter den ge-

schilderten Bedingungen (Mitwindrichtung, nachts bei Temperaturinversion in der Atmosphäre) wird der Schall in Richtung des Erdbodens gebrochen, was zu einer erhöhten Schallimmission an weiter von der Quelle entfernten Orten führt.

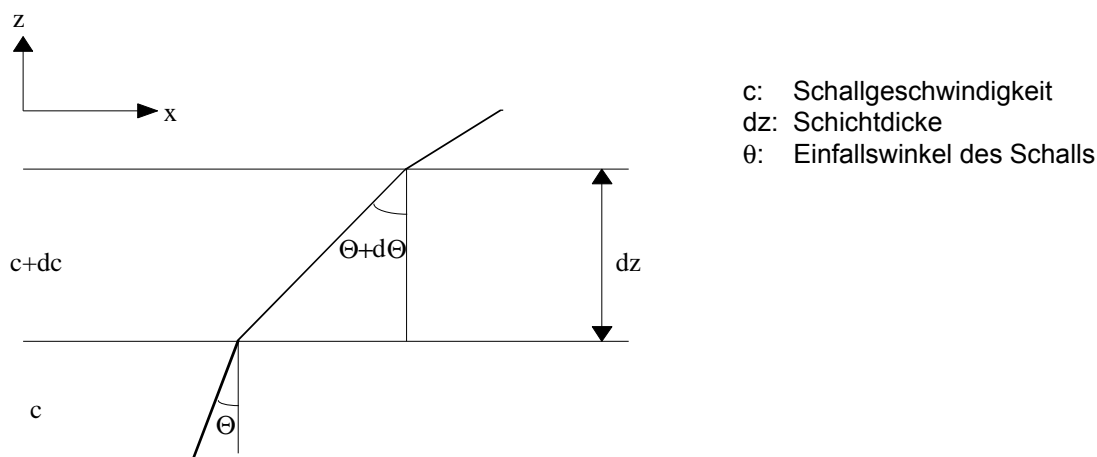


Abb.1: Krümmung eines Schallstrahles in einem geschichteten Medium.

Fig.1: Refraction of a sound ray in layers of a medium.

Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit c in der Atmosphäre ist im wesentlichen abhängig von der Temperatur T und der Windgeschwindigkeit u . Da sich Temperatur- sowie Windgeschwindigkeitsänderungen in der bodennahen Grenzschicht der Atmosphäre in den für die Schallausbreitung von Windkraftanlagen interessanten Entfernungen nur in der vertikalen Richtung ergeben, ist für die Schallausbreitung im Freien die Änderung der Schallgeschwindigkeit mit der Höhe z maßgeblich. Sie kann im relevanten Temperaturbereich angegeben werden als

$$\frac{dc}{dz} = 0,6 \times \frac{dT}{dz} + \cos j \times \frac{du}{dz} , \quad (1)$$

wobei φ der Winkel zwischen Schallausbreitungs- und Windrichtung ist.

Nimmt die Schallgeschwindigkeit mit der Höhe zu ($dc/dz > 0$), hat dies eine Ablenkung des Schalls zum Erdboden zur Folge; eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit mit der Höhe ($dc/dz < 0$) bewirkt eine vom Boden weggerichtete Krümmung der Schallstrahlen.

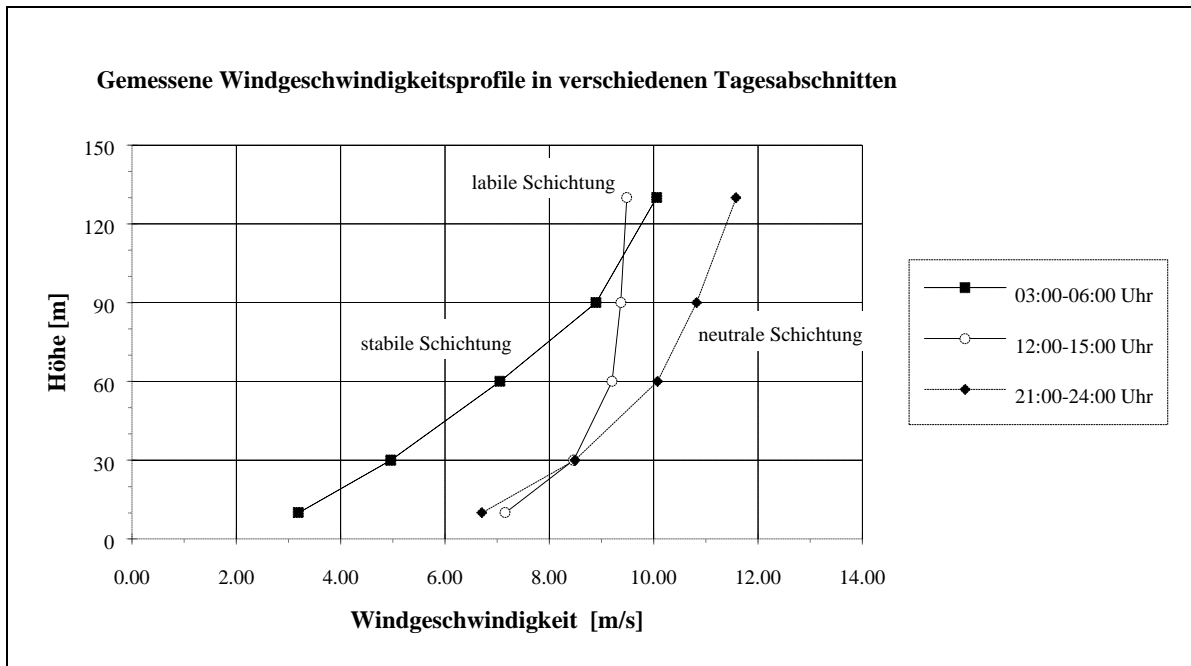
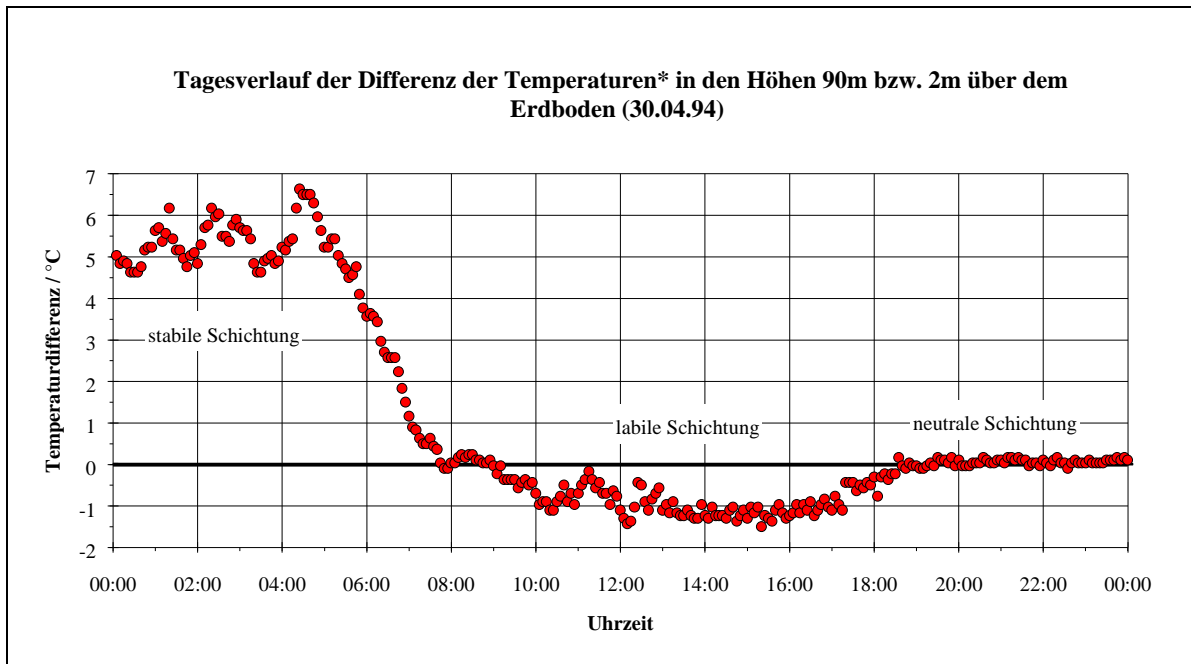
Aus (1) geht hervor, daß sowohl die vorherrschenden Temperatur- als auch die Windgeschwindigkeitsprofile den Schallgeschwindigkeitsgradienten und damit den Verlauf der Schallwege bestimmen. Der stärkere Einfluß rührt in der Regel vom Windgradienten her. In der untersten Schicht der Atmosphäre nimmt der Erdboden durch Reibungseffekte Einfluß auf die Luftströmung. Die Windgeschwindigkeit steigt somit in der Regel mit der Höhe an und ist unmittelbar am Boden Null. Der Temperaturgradient vermag die Schallausbreitung auf indirekte Weise zu beeinflussen, da die Form der Windprofile von ihm abhängen:

Besonders an sonnigen Tagen liegt über dem erwärmten Erdboden eine *labile* atmosphärische Schichtung vor. Die Temperatur nimmt mit zunehmender Höhe ab (der Temperaturgradient ist negativ), und es entsteht Konvektion: Durch das Aufsteigen der Luft wird die Turbulenz angefacht, was einen erhöhten Luftaustausch zwischen den verschiedenen Niveaus zur Folge hat. Durch den verstärkten Impulstransport zwischen den relativ schwachwindigen Schichten am Boden und höheren Ebenen ergeben sich verhältnismäßig „schlanke“ Windgeschwindigkeitsprofile. Die Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit verschwindet in höheren Regionen fast vollständig.

Bei einer *stabilen* Schichtung, wie sie besonders in klaren Nächten bei starker Bodenabkühlung vorherrscht, wird die Konvektion unterbunden. So sind auch in größeren Höhen in der Regel noch nennenswerte Windgeschwindigkeitsgradienten in der Vertikalen zu verzeichnen.

Ist die Lufttemperatur unabhängig von der Höhe, spricht man von einer *neutralen* oder auch *indifferenten* atmosphärischen Schichtung. Dieser Fall tritt in der Regel bei bedecktem Himmel und bei stärkerem Wind auf.

In Abb. 2 ist der Einfluß der vorherrschenden Schichtung auf die Höhenabhängigkeit des Windes verdeutlicht. Beispielhaft sind hier die Meßdaten von dem 130m hohen DEWI-Meteorologiemast



* Die gemessenen Temperaturen sind bzgl. des trockenadiabatischen Temperaturgradienten Γ entsprechend der Meßhöhe mit $0,01^\circ\text{C}/\text{m}$ korrigiert. Für die dargestellte Temperaturdifferenz gilt: $\Delta T = T(90\text{m}) - T(2\text{m}) + \Gamma \cdot (90\text{m} - 2\text{m})$.

Abb.2: oben: Tagesgang der Temperaturdifferenz zwischen den Höhen 90m und 2m; unten: Windgeschwindigkeitsprofile bei unterschiedlichen Schichtungen in der Atmosphäre.

Fig. 2: Measured temperature difference (above) and wind profiles at different meteorological conditions (below).

für den Meßzeitraum eines Tages, an dem die drei beschriebenen Fälle der atmosphärischen Schichtung aufgetreten sind, ausgewertet worden. Das obere Diagramm gibt Aufschluß über das Temperaturgefälle zwischen den beiden Meßhöhen 90m und 2m, während die untere Darstellung die Form der entsprechenden Windgeschwindigkeitsprofile (3-Std.-Mittelwerte) bei den unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen wiedergibt.

Unabhängig von den meteorologischen Verhältnissen nimmt auch die Rauigkeit der Erdoberfläche Einfluß auf die Windgeschwindigkeitsprofile.

Für den neutralen Fall der atmosphärischen Schichtung findet sich in der Literatur häufig ein logarithmischer Ansatz für die Form des Windprofils. Die Beziehung zwischen zwei Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen z_1 und z_2 liefert dann die Gleichung

$$\frac{v(z_1)}{v(z_2)} = \frac{\ln \frac{z_1}{z_0}}{\ln \frac{z_2}{z_0}} \quad (z_0: \text{Parameter für die Bodenrauigkeit}). \quad (2)$$

3. Meßprinzip

Für die Untersuchung der Schallausbreitung im Freien sind Messungen sowohl tagsüber als auch nachts jeweils zeitsynchron im Nah- und im Fernbereich von zwei Windkraftanlagen des Typs MONOPTEROS 50 (Nabenhöhe: 60m, Rotordurchmesser: 56m) durchgeführt worden. Während der Meßzeiträume waren die meteorologischen Daten (Windrichtung, Temperaturen und Windgeschwindigkeiten in mehreren Höhen) eines 130m hohen Meßmastes verfügbar.

Die Schallmessungen im Nahbereich erfolgten in Anlehnung an die IEA* -Richtlinie zur akustischen Vermessung von Windkraftanlagen [2]. Die Mikrofone wurden auf schallharten Platten (\varnothing 1m) angebracht, welche sich jeweils in der Mitwindrichtung im Abstand von 88m vom Turmmittelpunkt der Anlagen auf dem Boden befanden. Diese Meßmethode zeichnet sich gegenüber einer Messung mit einem Mikrophonstativ durch einen deutlich verbesserten Störabstand aus, da am Boden kaum Windgeräusche auftreten. Desweiteren wird der Einfluß des Erdbodens auf die Meßergebnisse minimiert. Die auf diese Weise gemessenen Schalldruckpegel müssen aufgrund der an der schallharten Grenzfläche auftretenden Schalldruckverdopplung durch Subtraktion von 6 dB korrigiert werden.

Zeitgleich zu den Emissionsmessungen im Nahbereich wurden in größerer Entfernung (ca. 580m) zu den Anlagen Schallimmissionsmessungen in der Mitwindrichtung in 5m und 0,9m Höhe durchgeführt. Bei den Messungen in 0,9m Höhe war das Mikrophon mittig auf einer 1,8m x 1,8m großen schallharten Platte angebracht, welche vertikal auf dem Boden aufgestellt wurde. Dieses Verfahren zur Verbesserung des Störabstandes ist in einer Reihe von Voruntersuchungen (Messungen im reflexionsfreien Raum, Vergleichsmessungen mit Stativmikrofonen im Freien) getestet worden. Die erforderliche Korrektur der auf der Platte gemessenen Schalldruckpegel gegenüber der ungestörten Ausbreitung des Schalls ergab sich für das breitbandige aerodynamische Geräusch einer Windkraftanlage zu $6 \pm 0,5$ dB. Sowohl bei den Messungen in 5 m Höhe (Stativ) als auch in 0,9 m Höhe (Platte) wurden durch den Wind verursachte Strömungsabrißgeräusche an den Mikrofonen durch spezielle Abschirmungen, welche ebenfalls auf mögliche Meßverfälschungen geprüft worden sind, vermieden. Die Meßgeometrie ist in Abb.3 wiedergegeben.

* Internationale Energie-Agentur

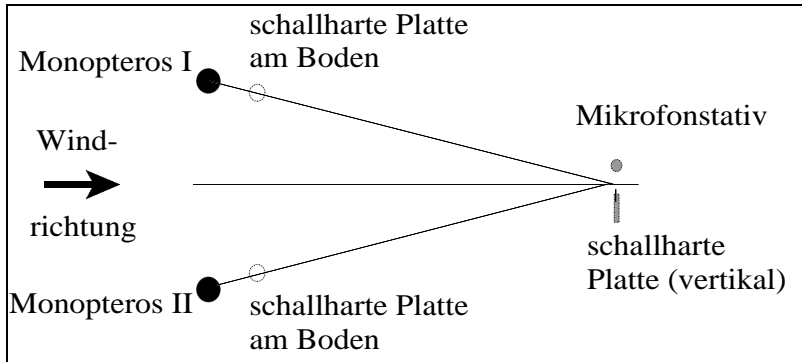


Abb.3: Darstellung der Meßgeometrie (Draufsicht).
Fig.3: Measurement situation (top view).

4. Meßergebnisse

Die bereits beschriebenen begünstigten Schallausbreitungsbedingungen zur Nachtzeit konnten in den Messungen nachgewiesen werden. In den Abb. 4 und 5 sind die in 580 m Entfernung gemessenen Schalldruckpegel (Minutenmittelwerte) über diejenigen, welche im Nahbereich ermittelt wurden, aufgetragen.

Bei einer Mikrofonhöhe von 0,9m zeigt sich zur Nachtzeit eine gegenüber den Tagmessungen erhöhte Schallimmission von fast 2dB. Der Effekt ist etwas schwächer für die Mikrofonhöhe von 5,0m. Hier liegt die nächtliche Pegelerhöhung bei nur ca. 1dB im Vergleich zu den am Tage gemessenen Werten.

Die begünstigte Schallausbreitung während der klaren Nächte, in denen Schallmessungen stattfanden, ist auf die verstärkte Schallbrechung in Richtung des Bodens zurückzuführen.

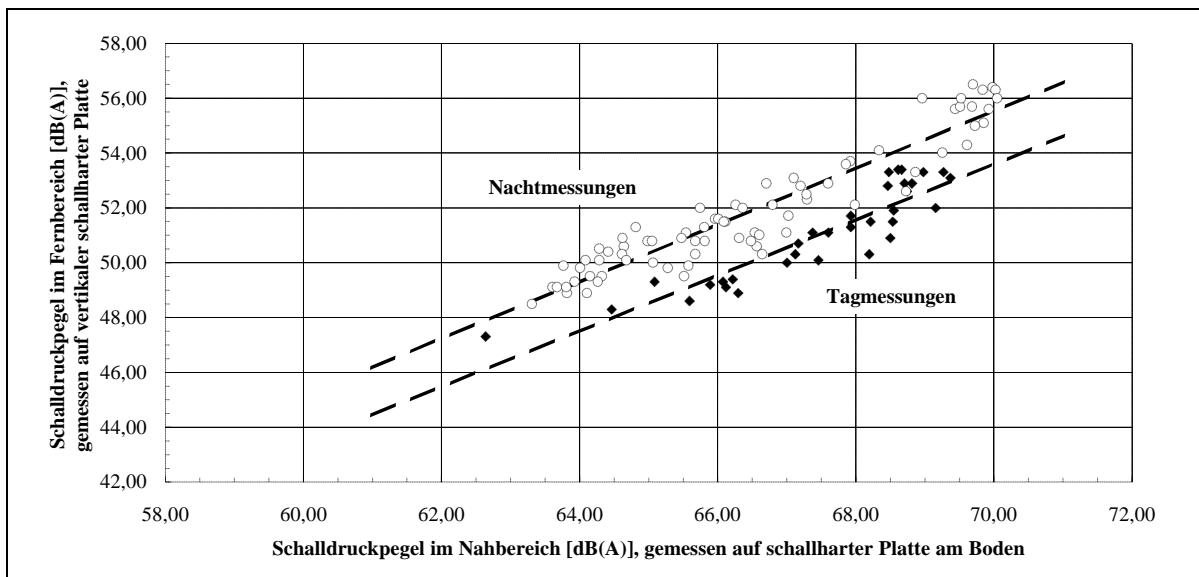


Abb.4: Vergleich der Tag- und Nachtmessungen (Immissionsmessung auf vertikaler schallharter Platte, Mikrofonhöhe: 0,9m).

Fig.4: Comparison of sound measurements at daytime and at night (height of immission point: 0.9m).

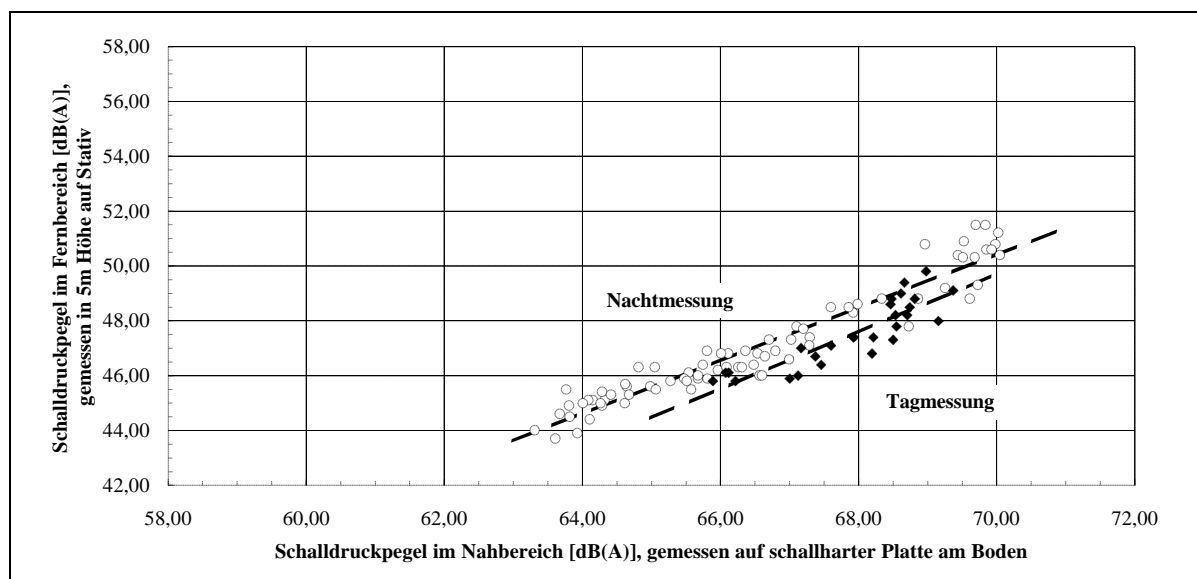


Abb.5: Vergleich der Tag- und Nachtmessungen (Immissionsmessung auf Mikrofonstativ, Mikrofonhöhe: 5,0m).

Fig.5: Comparison of sound measurements at daytime and at night (height of immission point: 5.0m).

Für die unterschiedlichen Meßergebnisse in verschiedenen Immissionshöhen ist ein weiterer Effekt verantwortlich. Der in der Regel nicht ideal schallharte Erdboden besitzt für sehr flach einfallenden Schall einen dämpfenden Einfluß, das heißt, der direkt einfallende und der am Boden mit Phasendrehung reflektierte Schall löschen sich speziell in diesem Fall in einem bestimmten Frequenzbereich aus. Dieser Effekt tritt im Frequenzbereich um 500 Hz auf und ist stark abhängig von der Bodenbeschaffenheit und der Meßgeometrie. Die Lage der Frequenz, bei welcher der Auslöschungseffekt erscheint, hängt unter anderem von dem Wegunterschied ab, den der direkte und der reflektierte Schall zurückgelegt haben. Der Wegunterschied ändert sich sowohl durch die Variation der Immissionshöhe (Mikrofonhöhe) als auch tagsüber bzw. nachts bei unterschiedlich stark gekrümmten Schallwegen. Je kleiner der Wegunterschied ist, z.B. bei niedrigen Mikrofonhöhen am Immissionsort oder tagsüber bei schwächerer Strahlenkrümmung, desto ausgeprägter ist dieser Effekt und desto höher liegt die Frequenz, bei welcher die Auslöschung auftritt.

Das beschriebene Phänomen wurde bei den Messungen nachgewiesen und soll für die gegebene Meßgeometrie anhand von gemessenen Übertragungsfunktionen veranschaulicht werden (Abb.6 und 7). Die Übertragungsfunktion ist in diesem Falle die Darstellung des auf die ungestörte Kugelwellenausbreitung bezogenen, in größerer Entfernung zur Schallquelle empfangenen Schallintensitätsspektrums.

Im Vergleich der Tag- und Nachtmessungen (Abb.6) zeigt sich ein größerer Dämpfungseffekt am Tage, da die Frequenz, bei welcher die Auslöschung (Minimum in der Übertragungsfunktion) auftritt, sich zu höheren Frequenzen in den Bereich der stärksten Schallabstrahlung der Windkraftanlage (ca. 500 - 2000 Hz) verschiebt. Dagegen ist bei einer Mikrofonhöhe von 5m (s. Abb.7) bei der gegebenen Meßgeometrie keine Dämpfung erkennbar.

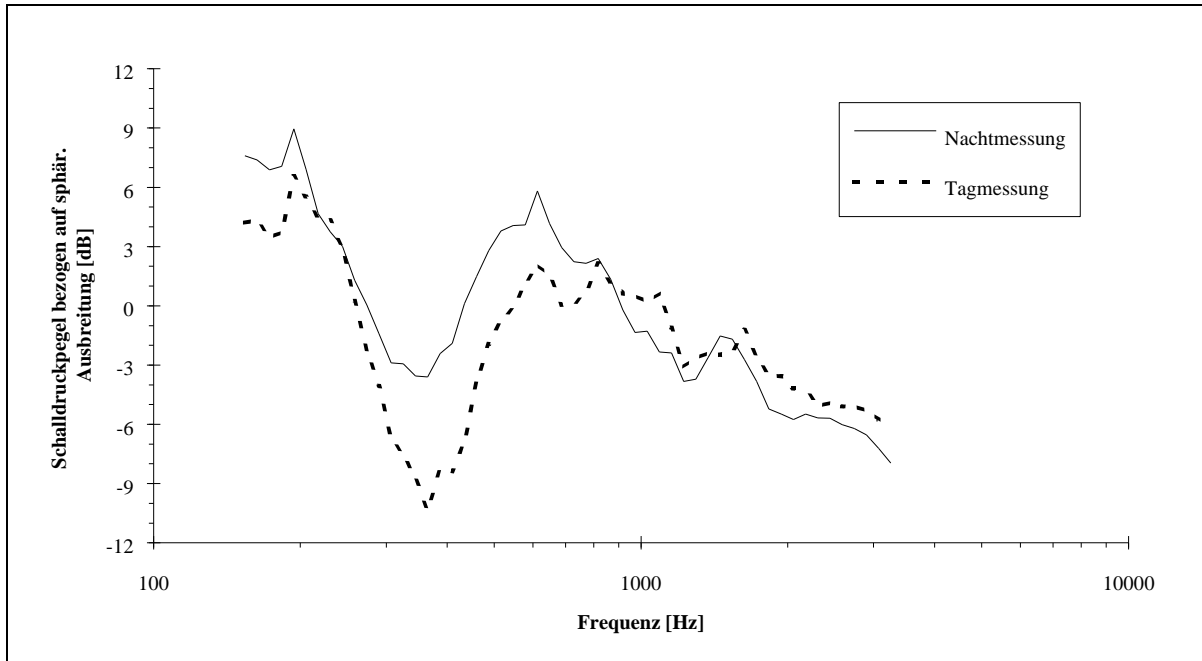


Abb.6: Vergleich der am Tage und bei Nacht gemessenen Übertragungsfunktionen bei einer Immissionshöhe von 0,9m.

Fig.6: Measured excess attenuation (SPL re free field) at daytime and at night (receiver height: 0.9m).

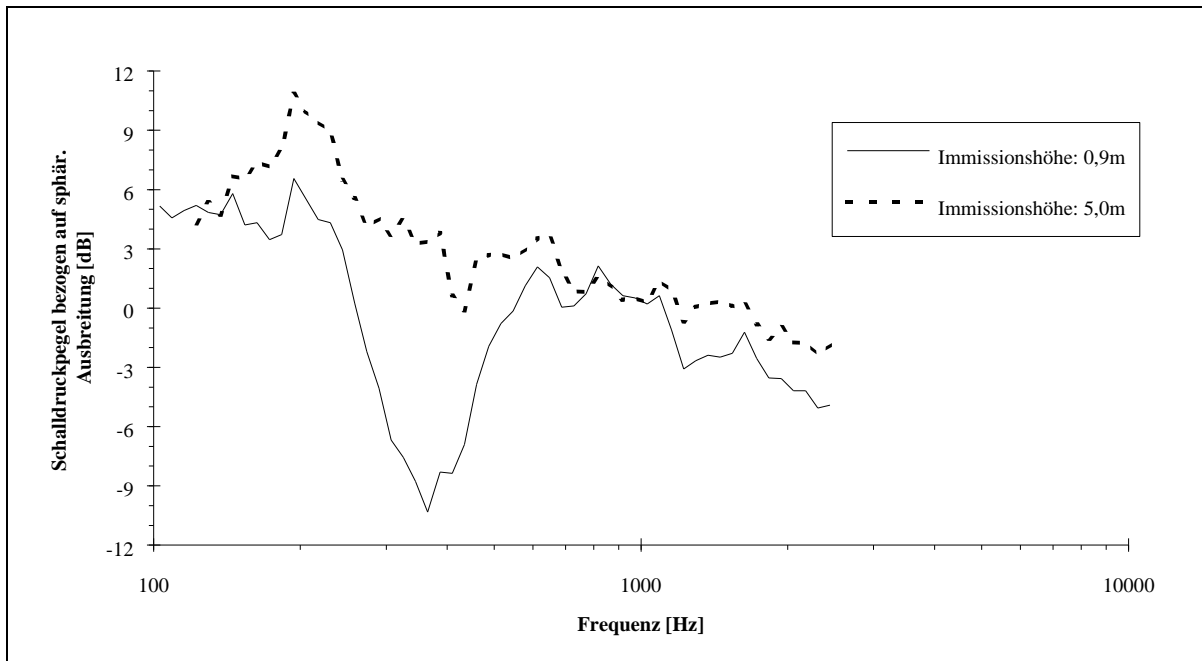


Abb.7: Gemessene Übertragungsfunktionen bei verschiedenen Immissionshöhen.

Fig.7: Measured excess attenuation (SPL re free field) for different receiver heights.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Schallimmission an weiter von der Quelle entfernten Orten stark von den vorherrschenden Windgeschwindigkeits- und Temperaturgradienten in der

Atmosphäre abhängt. In klaren Nächten bei Temperaturinversion herrschen in der Mitwindrichtung die günstigsten Schallausbreitungsbedingungen. Gegenüber dieser Verstärkung der Schallimmission bewirkt der in der Regel nicht schallharte Erdboden bei flachem Schalleinfall über einen bestimmten Frequenzbereich eine Schalldämpfung am Immissionsort, die von der Meßgeometrie und der Bodenbeschaffenheit abhängt.

Beide Effekte können nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. In der VDI-Richtlinie 2714 („Schallausbreitung im Freien“) werden diese Einflüsse im „Boden- und Meteorologiedämpfungsmaß“ D_{BM} zusammengefaßt.

5. Vergleich der Meßergebnisse mit Berechnungen (nach VDI-Richtlinie 2714)

Mit den im Nah- und im Fernbereich der Windkraftanlagen gemessenen Schalldruckpegel kann ein Vergleich mit Schallausbreitungsberechnungen nach der VDI-Richtlinie 2714 angestellt werden. Hierfür wurde bei der Auswertung der Messungen ein Luftabsorptionskoeffizient von 0,004 dB/m zugrunde gelegt. Dieser Wert ist frequenzabhängig (für 70% relative Luftfeuchtigkeit, 10°C Lufttemperatur) für ein typisches Geräuschspektrum einer Windkraftanlage bestimmt worden. Das Luftabsorptionsmaß D_L ist somit doppelt so groß wie der nach VDI 2714 ermittelte Wert für eine Frequenz von 500 Hz. Das Raumwinkelmaß K_0 wurde mit 3 dB angesetzt.

Aus den Messungen in der Mitwindrichtung ergaben sich auf diese Weise Werte für das Boden- und Meteorologiedämpfungsmaß D_{BM} , die bei den untersuchten Meßgeometrien stets niedriger waren als die nach der Richtlinie berechneten. In klaren Nächten, in denen Messungen stattfanden, wurden bei diesen besonders günstigen Schallausbreitungsbedingungen bei einer Immissionshöhe von 5m Werte für D_{BM} ermittelt, die 3-4 dB unter den nach VDI 2714 berechneten Werten lagen. Eine mögliche Überschreitung der prognostizierten Schallimmission in dieser Größenordnung bei günstigen Ausbreitungsbedingungen wird auch in der Richtlinie angegeben.

Es zeigt sich jedoch auch bei den Tagmessungen bei erwärmten Boden, daß der Dämpfungseffekt geringer ausfällt als berechnet. Die größten Meßwerte für die Dämpfung durch Boden- und Meteorologieeinflüsse ergaben sich bei den Messungen am Tage in der relativ niedrigen Immissionshöhe von 0,9m. In diesem Fall liegen die gemessenen Werte noch ca. 1 dB unter den berechneten. Die Abweichung von gemessenen und berechneten Dämpfungen wird auf die verhältnismäßig hohe Schallquellenhöhe bei Windkraftanlagen zurückgeführt. Ähnliche Erfahrungen bei Schallausbreitungsuntersuchungen mit höheren Quellen sind in [3] wiedergegeben.

6. Danksagung

Die durchgeführten Untersuchungen im Jade-Windpark wären nicht möglich gewesen ohne die Einwilligung der Gas- und Elektrizitätswerke Wilhelmshaven (GEW), die die akustischen Messungen an den MONOPTEROS-Windkraftanlagen genehmigten. Ein herzliches Dankeschön auch an die Landwirte aus der Umgebung des Windparks, die für die Schallmessungen stets den Zugang zu ihren Weideflächen gewährten. Die durchgeführten Untersuchungen wurden teilweise finanziell unterstützt durch die Europäische Union (Projekt JOU2-CT92-0124).

7. Literatur

- [1] Osten, Tjado: Schallimmissionsmessungen in der Umgebung von Windkraftanlagen bei unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen und Erprobung einer neuartigen Meßmethode, Diplomarbeit, FH Ostfriesland / Deutsches Windenergie-Institut, 1994
- [2] IEA-Empfehlung „Recommended Practices for Wind Turbine Testing, 4. Acoustics. Measurement of Noise Emission from Wind Turbines“, IEA- Expert Group Study, 3. Edition, 1994
- [3] Klug, H.; Mellert, V.; Radek, U.: Zuverlässigkeit von Geräuschimmissionsprognosen bei gewerblichen Anlagen Forschungsbericht Nr. 89-105 02 702 des Umweltbundesamtes, 1989