

Messung der Schallimmissionen von einer Windenergieanlage mit einem Mikrofonarray

Maike Wehmeyer¹, Christoph Fritzsche², Jörn Hübelt³

¹ ITA Weimar GmbH, 99428 Weimar, Deutschland, Email: ita@ita-weimar.de

² LfULG Referat 52, 01326 Dresden-Pillnitz, Deutschland, Email: Christoph.Fritzsche@smul.sachsen.de

³ Hochschule Mittweida, 09648 Mittweida, Deutschland, Email: huebelt@hs-mittweida.de

Einleitung

In dieser Masterarbeit [1] wurde ein Messverfahren zur Bestimmung der Schallimmission von einer Windenergieanlage (WEA) entwickelt. Sie wurde an der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie durchgeführt und durch die Hochschule Mittweida betreut. Die Messung der Schallimmission ist bei WEA anspruchsvoll, da die Quelle vom Empfänger oft sehr weit entfernt ist und zahlreiche Störquellen vorliegen. Das vorgestellte Messverfahren nutzt ein Mikrofonarray, da dieses eine künstliche Richtcharakteristik erzeugt und somit ermöglicht, den Einfluss der Störquellen auf das Messergebnis zu reduzieren.

Zur Durchführung der Arbeit standen acht Mikrofone zur Verfügung und der interessierende Frequenzbereich reichte von 50 Hz bis 2000 Hz. Um diesen Bereich mit ähnlichen Arrayeigenschaften abzudecken, wurde ein Mikrofonarray bestehend aus drei Teilarrays entwickelt. Eine Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Arrays erfolgte durch zwei Messungen an einem Windpark im Abstand von etwa 500 m zur interessierenden WEA. Zur Auswertung wurden die Beamforming-Algorithmen Delay-and-Sum, Clean-SC, DAMAS sowie das orthogonale Beamforming verwendet. Die Ergebnisse der Beamforming-Algorithmen wurden dem Ergebnis eines einzelnen Mikrofons des Arrays und dem Schalldruckpegel am Emissionsmessort gegenübergestellt.

Theorie

Bei einem Mikrofonarray werden die Signale mehrerer Mikrofone einzeln gemessen und dann überlagert. Am Beispiel in Abbildung 1 wird der Delay-and-Sum-Algorithmus erläutert.

Die Welle der Punktquelle wird zuerst beim Mikrofon 1 zu einem Signal führen. Nach einer gewissen Zeit erreicht die Welle das Mikrofon 2 usw. Diese Zeitdifferenz hängt vom Mikrofonabstand d , der Schallgeschwindigkeit und dem Einfallswinkel θ_0 der Welle ab. Beim Mikrofonarray sind die Positionen der Mikrofone und somit die Mikrofonabstände bekannt. Durch eine Zeitverschiebung der einzelnen Mikrofonsignale und anschließende Überlagerung kann der Einfallswinkel der Schallquelle bestimmt werden.

Für eine Punktquelle aus Richtung $\theta_0 = 0$ ergibt sich für den Delay-and-Sum-Algorithmus das Ausgangssignal aus Abbildung 2. Charakterisierend für diesen Algorith-

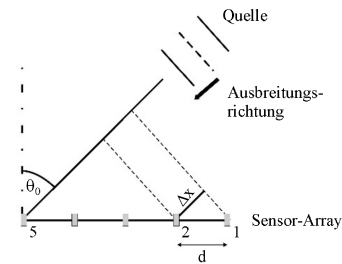


Abbildung 1: Äquidistantes Linienarray mit dem Mikrofonabstand d , einer Schallquelle aus Richtung θ_0 und der Wegdifferenz der Welle Δx zwischen den Mikrofonen [2]

mus ist die Hauptkeulenbreite, dem Abstand zwischen den ersten Minima neben dem Hauptmaximum. Diese hängt unter anderem von der Frequenz und dem Mikrofonabstand ab. Sie ist für den entsprechenden Zweck der Messung zu optimieren.

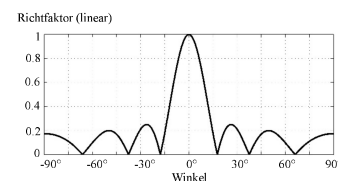


Abbildung 2: Beamforming-Map als Ausgangssignal eines äquidistanten Linienarrays mit Delay-and-Sum-Algorithmus und einer Schallquelle aus Richtung $\theta_0 = 0$ [2]

Auslegung des Arrays

Für die Messung der Schallimmission einer WEA mit einem Mikrofonarray aus acht Mikrofonen wurde ein Linienarray mit unterschiedlichen Mikrofonabständen entwickelt. Das Array wurde in drei Teilarrays unterteilt, um seine Eigenschaften an den breiten Frequenzbereich von 50 Hz bis 2000 Hz anpassen zu können. Aufgrund der geringen Mikrofonanzahl war der Einfluss der Frequenz auf die Hauptkeulenbreite zu dominant. Die Hauptkeulenbreite wurde für die Frequenzbereiche so optimiert, dass sie ungefähr dem Rotordurchmesser der WEA entsprach.

Der gewählte Aufbau ist in Abbildung 3 gezeigt. Das zentrale Mikrofon ist dabei in allen drei Teilarrays enthalten. Für den hohen Frequenzbereich werden zusätzlich die beiden angrenzenden Mikrofone verwendet. Der mittlere Frequenzbereich wird durch die äußeren Mikrofone der großen Holzplatte abgedeckt und der tiefe Frequenz-

bereich durch die Mikrofone in großem Abstand auf eigenen Holzplatten. Die Abstände der einzelnen Mikrofone zum zentralen Mikrofon sind in Tabelle 1 gelistet.

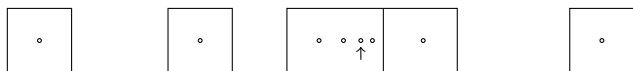


Abbildung 3: Aufbau des entwickelten Arrays bestehend aus drei Teilarrays mit acht Mikrofonen (Punkte) auf Holzplatten (Rechtecke), der Pfeil zeigt auf das zentrale Mikrofon (in allen Teilarrays enthalten)

Tabelle 1: Abstände der Mikrofone der drei Teilarrays zum zentralen Mikrofon

Mikrofon	Abstand in m
hochfrequent 1	0,18
hochfrequent 2	0,27
mittelfrequent 1	0,65
mittelfrequent 2	0,97
tieffrequent 1	2,50
tieffrequent 2	3,75
tieffrequent 3	5,00

Die minimalen Mikrofonabstände wurden in den jeweiligen Frequenzbereichen so gewählt, dass in einem Winkelbereich von $\pm 27^\circ$ zur Arraynormalen das räumliche Abtasttheorem nicht verletzt wird.

Wie in DIN EN 61400-11 [3] beschrieben, wurden auch für diese Messungen die Mikrofone auf Holzplatten auf den Boden gelegt und mit zwei Windschirmen bestückt. Als primäre Windschirme wurden Schaumstoffhalbkugeln (Abbildung 4) auf die Kapsel gesteckt und als sekundäre Windschirme Drahtgestelle mit Filtermatten (Abbildung 5 und Abbildung 6) überspannt. Es wurden vier kleine sekundäre Windschirme, die jeweils ein Mikrofon bedecken und ein großer sekundärer Windschirm, der vier Mikrofone bedeckt, verwendet. Die Einfügungsdämpfung dieser Windschirme liegt im gesamten Frequenzbereich zwischen ± 1 dB.



Abbildung 4: Primärer Windschirm, 7 cm Durchmesser

Messungen an der Windenergieanlage

Es wurden Messungen an einem Windpark (Abbildung 7) bei geringen und großen Windstärken durchgeführt. In ca. 100 m Entfernung von einer WEA wurde das Emissionsspektrum und in ca. 500 m Entfernung das Immissionsspektrum gemessen. Die Datenaufnahme erfolgte mit dem Soundbook der Firma Sinus Messtechnik GmbH und die Auswertung mit der Software Acoular [4] der Acoular Developers.

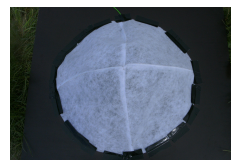


Abbildung 5: Kleiner sekundärer Windschirm



Abbildung 6: Großer sekundärer Windschirm



Abbildung 7: Mikrofonarray vor dem Windpark mit 10 WEA; die untersuchte Anlage ist die nächst gelegene auf der linken Seite

Die Emissionsspektren sind in den Abbildungen 8 und 9 gezeigt. Die Immissionsspektren sind für das zentrale Mikrofon in den Abbildungen 10 und 15 und für die Beamforming-Algorithmen in den Abbildungen 11 bis 14 und 16 bis 19 dargestellt. Sie zeigen jeweils die energetisch gemittelten Terzspektren und die Standardabweichungen. Beim Beamforming wurde mit dem Array in die Richtung der WEA fokussiert, je nach verwendetem Beamforming-Algorithmus über einen Bereich von Fokuspunkten integriert und anschließend das Spektrum gebildet.

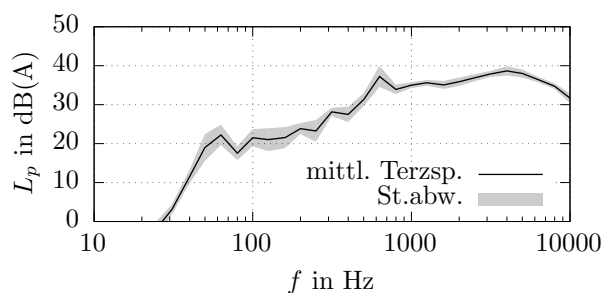


Abbildung 8: Pegel am Emissionsmessort einer WEA bei geringen Windstärken

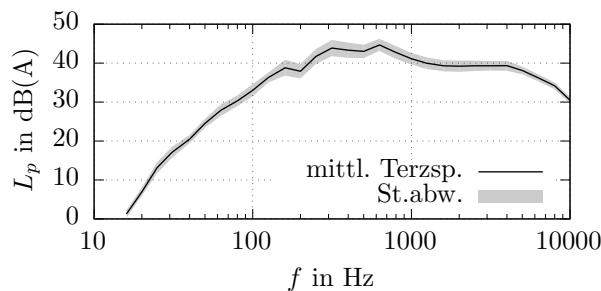


Abbildung 9: Pegel am Emissionsmessort einer WEA bei großen Windstärken

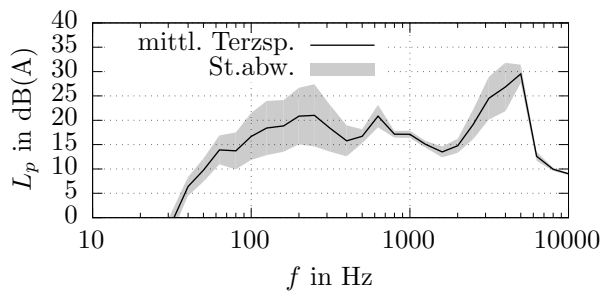


Abbildung 10: Immissionspegel einer WEA bei *einzelner Mikrofon* bei geringen Windstärken

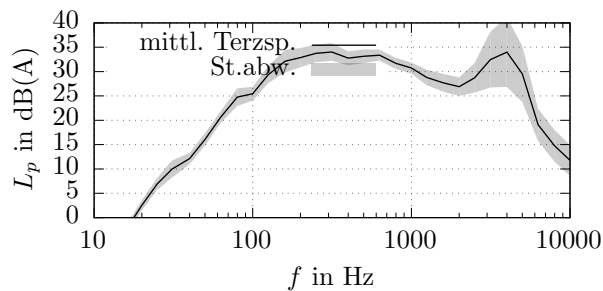


Abbildung 15: Immissionspegel einer WEA bei *einzelner Mikrofon* bei großen Windstärken

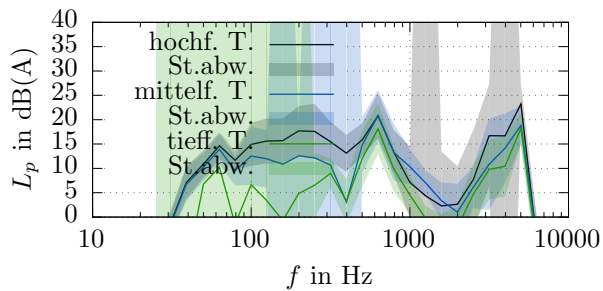


Abbildung 11: Immissionspegel einer WEA bei Arraymessung mit *Delay-and-Sum-Alg.* bei geringen Windstärken

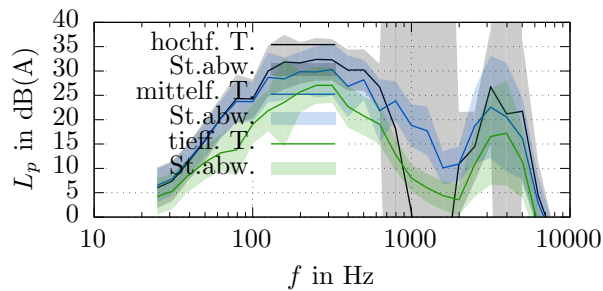


Abbildung 16: Immissionspegel einer WEA bei Arraymessung mit *Delay-and-Sum-Alg.* bei großen Windstärken

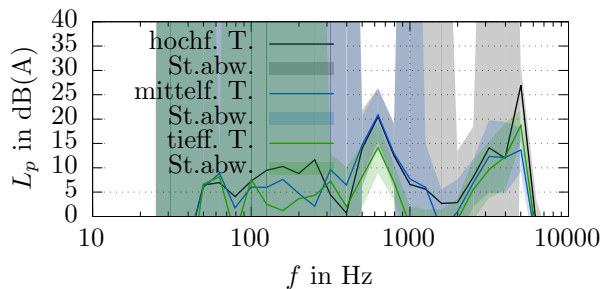


Abbildung 12: Immissionspegel einer WEA bei Arraymessung mit *Clean-SC-Alg.* bei geringen Windstärken

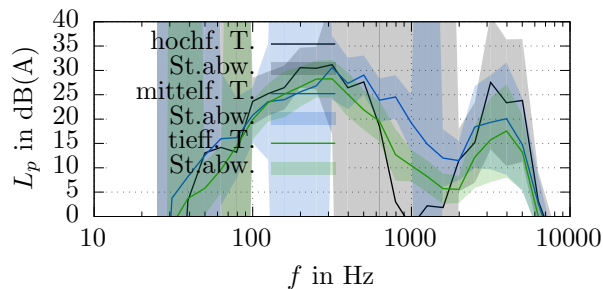


Abbildung 17: Immissionspegel einer WEA bei Arraymessung mit *Clean-SC-Alg.* bei großen Windstärken

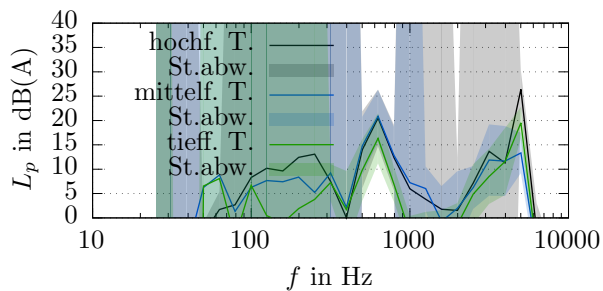


Abbildung 13: Immissionspegel einer WEA bei Arraymessung mit *DAMAS-Alg.* bei geringen Windstärken

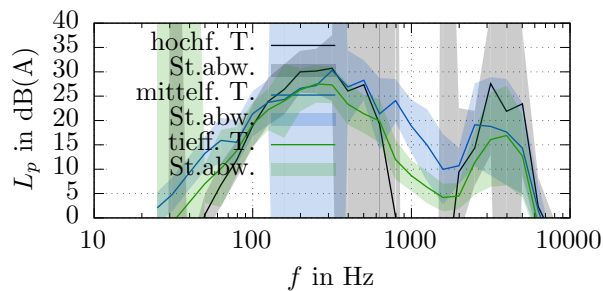


Abbildung 18: Immissionspegel einer WEA bei Arraymessung mit *DAMAS-Alg.* bei großen Windstärken

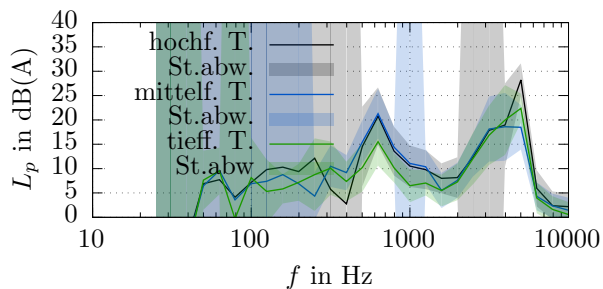


Abbildung 14: Immissionspegel einer WEA bei Arraymessung mit *orth. Beamforming* bei geringen Windstärken

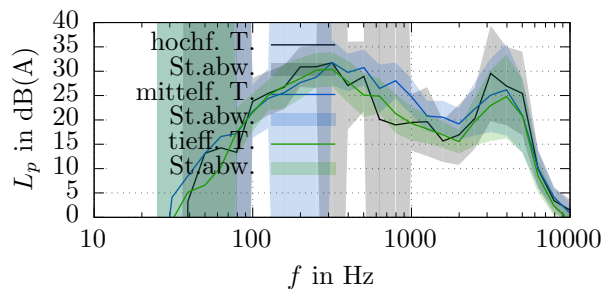


Abbildung 19: Immissionspegel einer WEA bei Arraymessung mit *orth. Beamforming* bei großen Windstärken

Bei geringen Windstärken spielten hauptsächlich die mechanischen Geräusche durch die Veränderung des Azimutwinkels der WEA eine Rolle, weswegen diese hier gemessen wurden. Für größere Windgeschwindigkeiten wurden zunehmend die aerodynamischen Geräusche dominant. Gestört wurden die Messungen hauptsächlich durch Vögel und Grillen.

Die Messergebnisse zeigen, dass in der Nähe der Anlage dauerhaft höhere Pegel gemessen wurden als am Immissionsmessort. Bei großen Windstärken entsteht der Pegelunterschied hauptsächlich durch die Abstandsänderung zur Anlage. Bei geringen Windstärken ist der Unterschied jedoch größer. Dies ist dadurch zu erklären, dass die mechanischen Geräusche nicht nur aus der Gondel emittiert werden, sondern auch aus dem Turm über die Lüftungsöffnungen an der Tür. Die aus dem Turm emittierten Geräusche werden auf dem Weg zum Immissionsort jedoch stärker gedämpft, sodass sie keinen Einfluss mehr auf das Messergebnis haben.

Die mechanischen Geräusche der Azimutwinkel-Verstellung liegen hauptsächlich in der 630-Hz-Terz. Bei sämtlichen Spektren geringer Windstärke zeigt sich in diesem Bereich ein Maximum. Besonders deutlich ist dies bei den Beamforming-Spektren. Es ist der einzige Frequenzbereich, bei dem bei allen Algorithmen die Standardabweichungen gering sind. Bei allen anderen Frequenzen wird durch die Algorithmen der Pegel deutlich reduziert. Es ist davon auszugehen, dass bei diesen Frequenzen der Schalldruckpegel durch Störquellen dominiert wird. Das zweite, breite Maximum im Bereich hoher Frequenzen entsteht durch die Vögel und Grillen.

Aerodynamische Geräusche sind breitbandig. Für WEA liegt das Maximum im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 630 Hz. Dieses Maximum zeigt sich in allen Spektren. Neben dem Maximum fällt bei den Beamforming-Spektren der Pegel deutlich stärker ab als beim einzelnen Mikrofon. Bei hohen Frequenzen gibt es auch hier ein Maximum durch Vogelzweitschern. Wie bei den Messungen geringer Windstärke wird es durch die Beamforming-Algorithmen aber deutlich abgeschwächt.

In den Tabellen 2 und 3 sind die Summenpegel ohne Hintergrundgeräuschkorrektur und mit Erhöhung durch die Holzplatten zwischen 50 Hz und 2500 Hz am Immissionsmessort für das einzelne Mikrofon denen der verwendeten Algorithmen gegenübergestellt. Dabei wird deutlich, dass die Beamforming-Algorithmen den Summenpegel stark reduzieren. Das orthogonale Beamforming schwächt den Pegel am geringsten ab, der DAMAS-Algorithmus am stärksten.

Zusammenfassung

Durch die Verwendung eines Mikrofonarrays ist die direkte Messung des Immissionsspektrums möglich. Durch Verwendung von Beamforming-Algorithmen kann der Fremdgeräuschabstand deutlich vergrößert werden.

Bei diesem Verfahren werden nur wenige Mikrofone verwendet, was z.B. die Eignung des orthogonalen

Tabelle 2: Summenpegel zwischen 50 Hz und 2500 Hz inklusive Erhöhung durch die Platte bei geringen Windstärken

Algorithmus	Summenpegel in dB(A)
einzelnes Mikrofon	30,2
Delay-and-Sum	24,2
Clean-SC	23,6
DAMAS	23,5
Orthogonal	24,8

Tabelle 3: Summenpegel zwischen 50 Hz und 2500 Hz inklusive Erhöhung durch die Platte bei großen Windstärken

Algorithmus	Summenpegel in dB(A)
einzelnes Mikrofon	43,3
Delay-and-Sum	36,9
Clean-SC	36,3
DAMAS	35,9
Orthogonal	38,4

Beamformings als Algorithmus einschränkt. Dieser ist für Messungen mit größerer Mikrofonanzahl geeignet. Trotz der geringen Mikrofonanzahl liefern der Clean-SC- und der DAMAS-Algorithmus gute Ergebnisse. Auch der Delay-and-Sum-Algorithmus erzielt gute Ergebnisse, hier sind jedoch verfahrensbedingt die Beamforming-Maps undeutlich. Dementsprechend liefert der DAMAS-Algorithmus die besten Ergebnisse.

Eine weitere Verbesserung der Ergebnisse kann unter anderem durch Erhöhung der Mikrofonanzahl erreicht werden. Um die Messung bei tiefen Frequenzen durchführen zu können, wird eine große Gesamtabmessung benötigt. Für die Messung hoher Frequenzen ist jedoch ein kleiner Mikrofonabstand nötig. Aus diesem Grund ist es zu empfehlen, die Methode der unterteilten Arrays weiter zu verwenden.

Die Masterarbeit kann über die Hochschulbibliothek Mittweida als pdf bezogen werden.

Literatur

- [1] Wehmeyer, M.: Untersuchungen zur Machbarkeit von Schallimmissionsmessungen an Windenergieanlagen mithilfe einer Mikrofonanordnung. Hochschule Mittweida, 2016
- [2] Lerch, R., Sessler, G., Wolf, D.: Technische Akustik. Springer-Verlag, 2009
- [3] DIN EN 61400-11: Windenergieanlagen, Teil 11: Schallmessverfahren. Beuth Verlag GmbH, 2013
- [4] Acoular, Acoular-Developers, URL: <http://www.acoular.org>