

Richtungsabhängige Störwirkung einer Windenergieanlage auf C-Band Wetterradare.

Karsten Schubert, Jade University of Applied Sciences, Friedrich-Paffrath-Str. 101, 26389 Wilhelmshaven, Deutschland, karsten.schubert@jade-hs.de

Fabian Schwartau, TU-Braunschweig, Schleinitzstr. 22, 38106 Braunschweig, Deutschland, fabian.schwartau@ihf.tu-bs.de

Jens Werner, Jade University of Applied Sciences, Friedrich-Paffrath-Str. 101, 26389 Wilhelmshaven, Deutschland, jens.werner@jade-hs.de

1 Einleitung (Motivation/Problemstellung)

Die elektromagnetische Interferenzwirkung von Windenergieanlagen (WEA) ist seit geraumer Zeit im Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen [1]. Dabei ist zwischen aktiver und passiver Interferenz zu unterscheiden: Erstere ist vergleichbar mit der bekannten Störwirkung durch unerwünschte Emissionen von elektrischen Geräten (z.B. Unterhaltungselektronik, IT-Equipment) die u.a. entsprechend europäischer Standards wie EN55020 überprüft und reglementiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit hingegen wird die passive Störwirkung von WEA auf C-Band (5,6 GHz) Wetterradare untersucht. Die eigentliche Störwirkung geht dabei von den dopplerverschobenen Radarechos aus, die von den sich bewegenden Rotorblättern hervorgerufen werden. Das Wetterradar interpretiert diese Radarechos fälschlicherweise als sich bewegende Niederschlagsmassen und verfälscht somit die eigentliche Niederschlagsmessung. Um die Auswirkung der Rotorblätter messtechnisch zu untersuchen, wird im Rahmen dieser Untersuchung ein mobil einsetzbares Versuchsradar verwendet. Im Fokus steht hier die messtechnische Charakterisierung einer einzelnen WEA aus verschiedenen Richtungen.

2 Neuheitsgrad

In [2] wird ein Simulationsansatz gezeigt, mit dem es möglich ist, Szenarien zu simulieren, die bezogen auf die Wellenlänge λ sehr groß sind (Objektgrößen $> 10^4\lambda$). Ferner ermöglicht dieser Simulationsansatz die Analyse des dynamischen Verhaltens (beispielsweise der Dopplerverschiebung durch bewegte Radarziele). In [3] werden Simulationsergebnisse und messtechnische Ansätze zum Structural Health Monitoring einer WEA vorgestellt. Hierbei werden die WEA aus kurzer Distanz (< 100 m) untersucht. Die winkelabhängige (Winkel α) Störwirkung einer WEA auf ein C-Band Wetterradar wurde bislang noch nicht explizit messtechnisch untersucht. Die Ergebnisse dieser neuen Untersuchungen werden nachfolgend diskutiert.

3 Messaufbau

Für experimentelle Studien wird an der Jade Hochschule Wilhelmshaven ein experimentelles FMCW-Radar für das C-Band entwickelt. Mit diesem Versuchsradar ist es möglich, das Messsystem an das jeweilige zu untersuchende Szenario anzupassen. Für die hier vorgestellte Messung wird das Radar so konfiguriert, dass eine einzelne WEA aus

einer Entfernung von ca. 500 m untersucht werden kann. Ferner befindet sich der Versuchsaufbau auf einem Fahrzeug, so dass es möglich ist, die zu untersuchende WEA aus verschiedenen Richtungen zu vermessen. Abbildung 1 zeigt die räumliche Anordnung zwischen dem Versuchsradar und einer ausgewählten WEA.

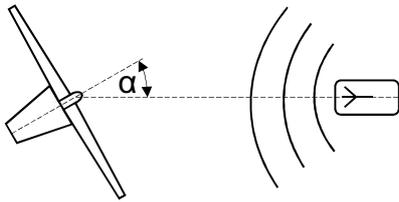


Abbildung 1: Winkel α zwischen WEA und Messfahrzeug mit mobilem Versuchsradar.

Im Rahmen dieser Messung wird das rückgestreute Radarecho im Hinblick auf die Dopplerverschiebung in Abhängigkeit vom Winkel α untersucht. Dabei werden exemplarisch u.a. bei den Winkeln $\alpha = 0^\circ$, 40° und 90° Messungen durchgeführt.

3.1 Hardwarebeschreibung

In Abbildung 2 ist das Blockschaftbild des experimentellen FMCW-Radars dargestellt. Es besteht im Wesentlichen aus einer Frequenzsyntheseeinheit, einem Sendezweig und einem Empfangszweig. Die Frequenzsyntheseeinheit besteht aus einem Rampengenerator, der eine dreieckförmige Spannung erzeugt. Diese moduliert einen VCO (voltage controlled oscillator), sodass ein in der Frequenz dreieckförmig moduliertes Signal erzeugt wird.

Das so modulierte Signal wird über den Sendezweig (TX-Zweig in Abbildung 2) zur Sendeantenne geführt und abgestrahlt. Anschließend breitet sich das Signal mit Lichtgeschwindigkeit in den Raum hinein aus und wird an den Radarzielen (d.h. an der zu untersuchenden WEA) reflektiert. Ein Teil des reflektierten Radarechos wird von der Empfangsantenne des Radars empfangen und ausgewertet.

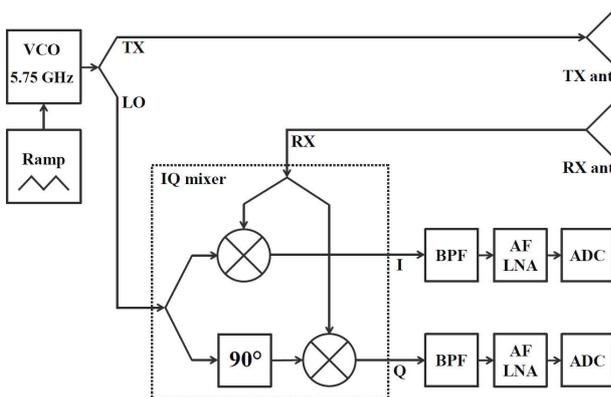


Abbildung 2: Funktionsprinzip des experimentellen FMCW-Radars.

Der Empfangszweig besteht im Wesentlichen aus einem IQ-Mischer, der das Empfangssignal ins Basisband herunter mischt. Als LO-Signal wird dabei das Sendesignal verwendet. Hinter dem IQ-Mischer befinden sich jeweils Bandpassfilter, rauscharme Vorverstärker und Analog-Digital-Wandler. Diese Komponenten sind so ausgelegt, dass die zu untersuchende WEA möglichst optimal Radar-technisch vermessen werden kann.

Wird nun das Radar auf ein Punktziel ausgerichtet, so können zwei Effekte beobachtet werden, die in Abbildung 3 verdeutlicht sind: Zum einen wird das ausgesendete Signal (TX) um ΔT verzögert bevor es zurück zum Empfänger gelangt. Die Verzögerung ΔT ergibt sich dabei aus der Signallaufzeit (das Signal breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit zum Radarziel aus, wird dort reflektiert und breitet sich von dort zurück wiederum mit Lichtgeschwindigkeit zum Empfänger aus). Sofern sich das Radarziel bewegt ergibt sich ferner eine Dopplerverschiebung f_D im Empfangssignal. Das zeitlich verzögerte und dopplerverschobene Signal ist in Abbildung 3 mit RX gekennzeichnet.

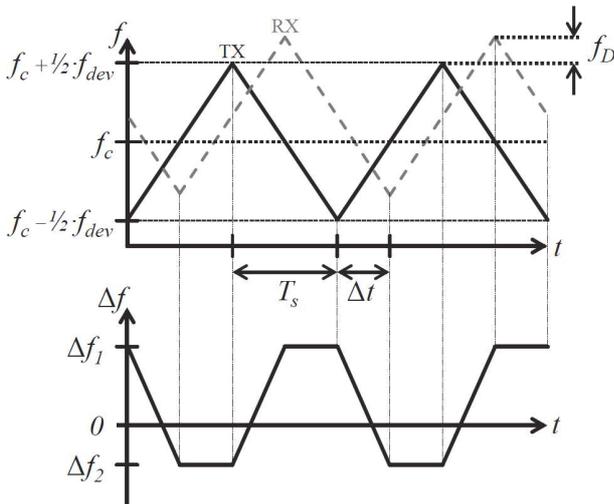


Abbildung 3: Rampenform des Sende- (TX) und Empfangssignals (RX).

Wird nun die Differenzfrequenz aus den Signalen RX und TX gebildet (dieses geschieht durch den Mischvorgang), so ergeben sich die Frequenzen Δf_1 und Δf_2 . Durch die IQ-Mischung kann dabei zwischen positiven und negativen Frequenzen unterschieden werden. Aus den Frequenzen Δf_1 und Δf_2 kann nach [4] über (1) die Entfernung R und über (2) die Geschwindigkeit v bestimmt werden.

$$R = \frac{\Delta f_1 - \Delta f_2}{2} \cdot \frac{c_0}{2} \cdot \frac{T_s}{f_{dev}} \quad (1)$$

$$v = \frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{2} \cdot \frac{c_0}{2 \cdot f_c} \quad (2)$$

3.2 Systemparameter

Die Relation zwischen der Geschwindigkeit v und den Frequenzen Δf_1 bzw. Δf_2 ergibt sich nach (2) aus dem konstanten Ausdruck $c_0/(2 \cdot f_c)$. Da die Frequenz f_c festliegt (C-Band Radar) und c_0 die Konstante für die Lichtgeschwindigkeit ist, ist das Verhältnis zwischen den Frequenzen Δf_1 bzw. Δf_2 und der Geschwindigkeit v fest vorgegeben.

Anders ist es bei der Systemkonstanten T_s/f_{dev} in (1). Die beiden Parameter T_s und f_{dev} können prinzipiell nahezu beliebig gewählt werden, sodass die Skalierung zwischen der Entfernung R und den Frequenzen Δf_1 und Δf_2 in großen Bereichen frei gewählt werden kann. Für die hier präsentierten Messergebnisse werden die in Tabelle 1 aufgelisteten Parameter verwendet.

Physikalische Größe	Wert	Beschreibung
f_c	5,75 GHz	Mittenfrequenz
f_{dev}	200 MHz	Frequenzhub
T_s	133 ms	Sweep Dauer
d_{Rot}	70 m	WEA Rotor Durchmesser
v_{Rot}	45,7 m/s	WEA Rotor Umfangsgeschwindigkeit

Tabelle 1 Verwendete Systemparameter

Die Parameter in Tabelle 1 sind dabei so gewählt, dass für stehende Radarziele eine Frequenz von $\Delta f_1 = -\Delta f_2 = 1$ kHz gerade einer Entfernung von $R = 100$ m entspricht. Wird mit diesen Parametern eine WEA mit einem Durchmesser von $d_{Rot} = 70$ m (35 m Radius) untersucht, so ergibt sich aufgrund der räumlichen Änderung eine maximale Frequenzänderung in Δf_1 und Δf_2 von **± 350 Hz** (± 35 m \triangleq ± 350 Hz). Aufgrund der Umfangsgeschwindigkeit von $v_{Rot} = 45$ m/s ergibt sich hingegen in Δf_1 und Δf_2 eine maximale Frequenzänderung von **± 1750 Hz** (+ bei Annäherung, - bei Wegbewegung), für den Fall, dass die WEA seitlich betrachtet wird ($\alpha = 90^\circ$). Somit bewirkt die Dopplerverschiebung eine ca. 5-mal größere Frequenzänderung in Δf_1 und Δf_2 als die räumliche Entfernungsänderung der rotierenden Rotorblätter. Diese Eigenschaft ist ganz entscheidend für die weitere Auswertung.

3.3 Darstellung der Messergebnisse

Wird das Radarecho an mehreren Radarzielen mit verschiedenen Entfernungen und Geschwindigkeiten reflektiert, so wird anstatt der diskreten Frequenzen Δf_1 und Δf_2 eine Überlagerung vieler Frequenzen erzeugt. Die einzelnen Frequenzanteile lassen sich jeweils für einen einzelnen Frequenzsweep über eine diskrete Fourier-Transformation (DFT) berechnen, wobei sich die Auflösungsbandbreite aus der Sweepdauer T_s ergibt [4]. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 4 ein 1,33 sekündiges Spektrogramm (jeweils fünf Up- und Down-sweeps).

Bei den Frequenzen ± 5 kHz und ± 8 kHz (jeweils eine WEA in 500 m bzw. 800 m Entfernung) ist ein zeitlich moduliertes Spektrum zu erkennen. Die Modulation des Spektrums wird dabei im Wesentlichen durch die momentan betrachtete Radialgeschwindigkeit, die wiederum eine Dopplerverschiebung im Radarecho erzeugt, verursacht. Da die Radialgeschwindigkeit entlang des WEA Rotordurchmesser variiert (Null in der Nabenmitte, Maximum an den Flügelspitzen), wird ein kontinuierliches Spektrum zwischen Null und maximaler Dopplerverschiebung gemessen. Tatsächlich erzeugt auch die räumliche Änderung bedingt durch die Rotation des Rotors eine Modulation des Spektrums, diese fällt jedoch wie in 0 beschrieben um den Faktor fünf schwächer aus und wird im Folgenden vernachlässigt.

Nachfolgend wird jeweils das modulierte Dopplerspektrum einer einzigen WEA betrachtet. Um die Messdaten besser interpretieren zu können, werden hierzu jeweils die Spektren auf 0 Hz normiert. Wird beispielsweise eine WEA in 500 m betrachtet, so wird das Signal während des Up-sweeps um 5 kHz hoch und während des Down-sweeps um 5 kHz herunter gemischt (d.h. im Spektrum jeweils um 5 kHz verschoben).

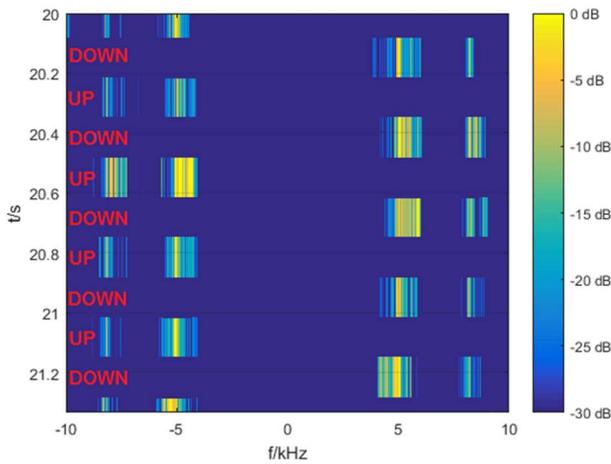


Abbildung 4 Beispiel eines Spektrogrammes (nachbearbeitet).

4 Messergebnisse

Im Folgenden werden drei Szenarien betrachtet. Es wird eine WEA von der Seite ($\alpha = 90^\circ$), frontal ($\alpha = 0^\circ$) und schräg seitlich ($\alpha = 40^\circ$) untersucht. Die maximale Radialgeschwindigkeit $v_{Rad,max}$ hängt nach (3) vom Winkel α und der Umfangsgeschwindigkeit v_{Rot} des Rotors ab. Die maximale Dopplerverschiebung hängt wiederum nach (4) von der Radialgeschwindigkeit $v_{Rad,max}$ ab. Somit ist zu erwarten, dass das gemessene Dopplerspektrum für $\alpha = 90^\circ$ maximal ist (die Rotorblätter bewegen sich direkt auf das Radar zu bzw. davon weg). Bei einem Winkel von $\alpha = 0^\circ$ wird hingegen gar keine Dopplerverschiebung erwartet, da die Rotorebene und die Betrachtungsrichtung aus Sicht des Radars orthogonal zueinander sind. Für den Fall $\alpha = 40^\circ$ sollte das Dopplerspektrum gegenüber $\alpha = 90^\circ$ 64,3% ($\sin(40^\circ) = 0,643$) schmaler sein.

$$v_{Rad,max} = \sin(\alpha) \cdot v_{Rot} \quad (3)$$

$$f_{D,max} = \frac{2v_{Rad,max}}{c_0} \cdot f_c = \sin(\alpha) \cdot \frac{2v_{Rot}}{c_0} \cdot f_c \quad (4)$$

Die Skalierung der folgenden Diagramme ist jeweils so gewählt, dass der statische Anteil des Echos (durch die Gondel) auf 0 dB skaliert ist. Der gewählte Zeitabschnitt ist jeweils ein 20 sekündiger Ausschnitt aus einer 2 minütigen Aufnahme, in dem der Wind möglichst gleichmäßig ist (keine Windböen).

4.1 Messung für $\alpha = 90^\circ$

Das sich für den Fall $\alpha = 90^\circ$ ergebende Spektrogramm zeigt Abbildung 5a. Dabei ist das Spektrum wie in 3.3 beschrieben auf 0 Hz normiert. Durch die Normierung erscheint das statische Radarecho der Gondel der WEA bei 0 Hz. Bei der Messung in Abbildung 5a wurden die Radarantennen so ausgerichtet, dass der Radarbeam hauptsächlich den oberen Teil (Gondel und oberen Teil des Rotors) der WEA ausleuchtet. Somit ist in Abbildung 5a ein signifikanter Anteil bei 0 Hz (Gondelecho) und bei positiven Frequenzen (der obere Rotorteil rotiert Richtung Radar) zu beobachten.

Interessant ist, dass sich kurze nadelförmige Peaks ergeben. Diese Peaks entsteht genau dann, wenn ein Flügel senkrecht zum Radar steht und sich auf das Radar zu bewegt. In

diesem Moment ist für das Radar ein Geschwindigkeitsprofil von Null bis v_{Rot} sichtbar, was zu einer Dopplerverschiebung von Null bis $f_{D,max}$ führt. Ferner ist erkennbar, dass die Nadelspitzen bei 1,75 kHz enden. Betrachtet man die Umfangsgeschwindigkeit nach Tabelle 1 und die sich daraus ergebende maximale Dopplerfrequenz nach (4) so ergibt sich $f_{D,max,90^\circ} = 1,75$ kHz. Messung und Theorie stimmen somit überein.

Wird nun das Spektrogramm zeitlich gemittelt, so erhält man Abbildung 5b. Diese Darstellung entspricht einem Effektivwert des dopplerverschobenen Radarechos. Es ist ersichtlich, dass das Radarecho beginnend bei 0 Hz (Echo der Gondel) nach ca. 150 Hz um 20 dB abfällt. Danach fällt es um weitere 20 dB ab, ehe es bei $f_{D,max,90^\circ} = 1,75$ kHz (durch gestichelte Linie kenntlich gemacht) im Rauschen verschwindet. Die mittlere Intensität fällt somit zu höheren Frequenzen tendenziell ab.

4.2 Messung für $\alpha = 40^\circ$

Auch in dem Spektrogramm in Abbildung 6a ist eine Modulation, die durch das dopplerverschobene Radarecho erzeugt wird erkennbar. Es ist ferner erkennbar, dass die Peaks zeitlich deutlich breiter (ca. 3 bis 4 mal) sind als bei $\alpha = 90^\circ$. Ferner ist erkennbar, dass die maximale Verschiebung ca. 1 kHz beträgt. Rechnerisch ergibt sich nach (4) $f_{D,max,40^\circ} = 1,08$ kHz (bei dieser Messung betrug $v_{Rot,40^\circ} = 44$ m/s). Betrachtet man auch hier das zeitlich gemittelte Dopplerspektrum so erhält man Abbildung 6b. Hier ist erkennbar, dass das Dopplerspektrum nach 100 Hz lediglich um 10 dB abfällt. Bis zu einer Frequenz von 900 Hz fällt es um weitere 10 dB ab, ehe es bei der Maximalfrequenz von 1,08 kHz (durch gestichelte Linie kenntlich gemacht) im Rauschen verschwindet. Verglichen zu Abbildung 5b ergibt sich ein um knapp 10 dB stärkeres Radarecho zwischen 150 Hz und 900 Hz. Dafür ist das Spektrum bereits 670 Hz früher auf Null abgefallen.

4.3 Messung für $\alpha = 0^\circ$

Bei der Messung für $\alpha = 0^\circ$ sollte keine Dopplerverschiebung messbar sein. Betrachtet man jedoch das Spektrogramm in Abbildung 7a so ist eine signifikante Modulation von ca. ± 300 Hz erkennbar. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass zum einen die WEA einen Erhebungswinkel in der Rotationsachse (die Rotationsachse ist nicht parallel zum Erdboden) hat und zum anderen das Radar (betrieben 3 m über Grund in 500 m Entfernung) ebenfalls einen Erhebungswinkel hat. Der Winkel zwischen Rotorachse und Radarbeam beträgt ca. 10° , sodass tatsächlich ein effektives $\alpha_{Eff} = 10^\circ$ vorhanden ist. Nach (4) ergibt sich somit ein $f_{D,max,10^\circ} = 300$ Hz. Ferner sind schwache spitze Nadelpulse bis ca. 1,2 kHz sichtbar. Es wird davon ausgegangen, dass diese aufgrund von Mehrfachreflexionen zwischen Turm und Rotor verursacht werden. Um diese Vermutung zu verifizieren sind jedoch noch weitere Messungen erforderlich.

Auch hier wird das gemittelte Dopplerspektrum in Abbildung 7b dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Dopplerspektrum von Null bis 300 Hz nur um ca. 5 dB abfällt.

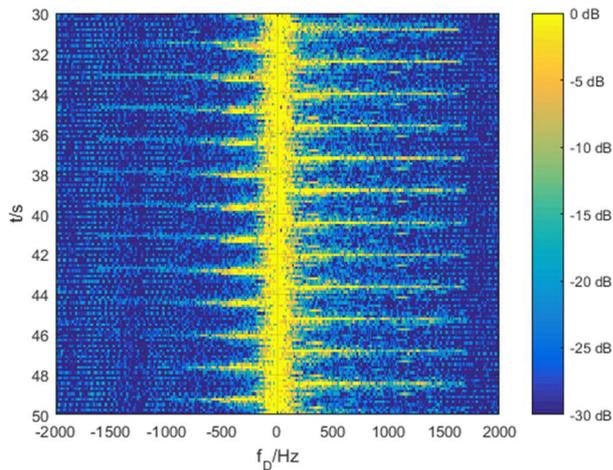


Abbildung 5a Spektrogramm für $\alpha = 90^\circ$

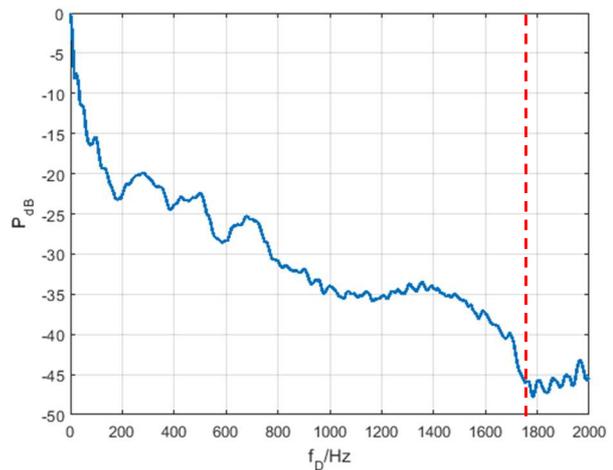


Abbildung 5b Gemittelttes Spektrum für $\alpha = 90^\circ$

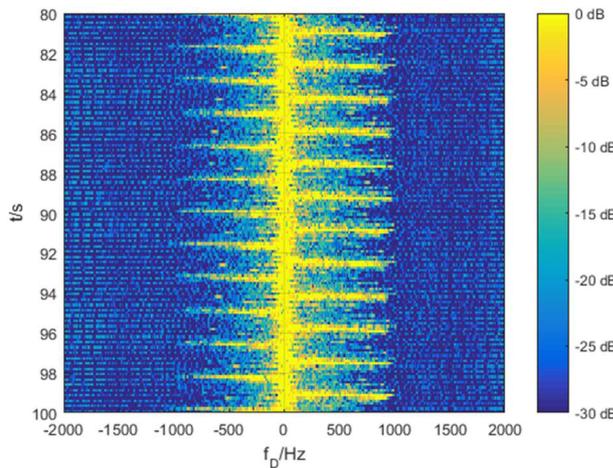


Abbildung 6a Spektrogramm für $\alpha = 40^\circ$

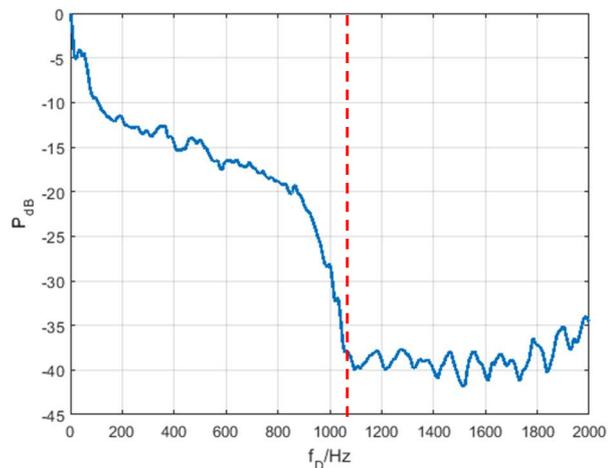


Abbildung 6b Gemittelttes Spektrum für $\alpha = 40^\circ$

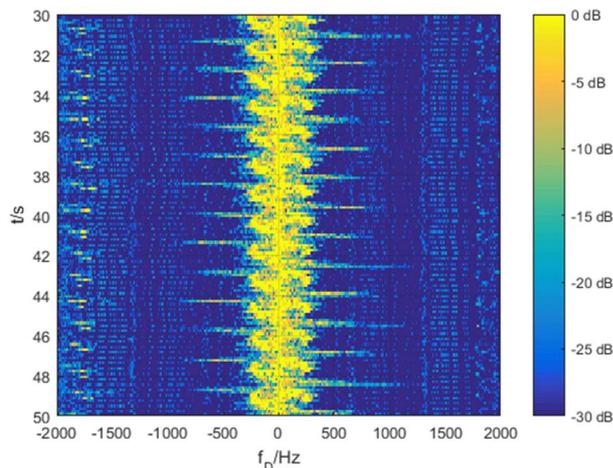


Abbildung 7a Spektrogramm für $\alpha = 0^\circ$

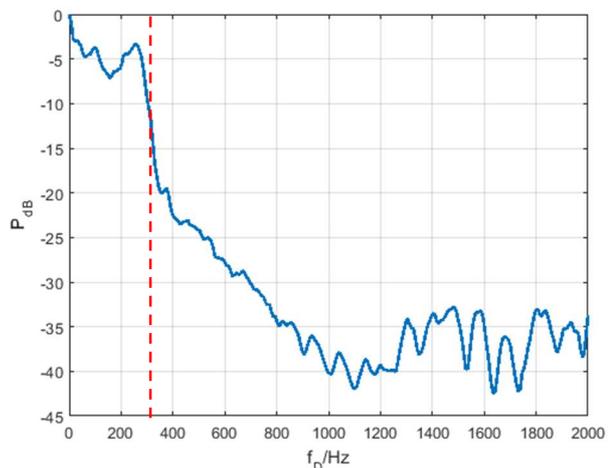


Abbildung 7b Gemittelttes Spektrum für $\alpha = 0^\circ$

Verglichen zu den vorangegangenen Messungen ist somit die Dopplerverschiebung um den Faktor 3,5 bzw. 5,8 schmäler, jedoch ist die Intensität des Radarechos innerhalb dieser Bandbreite um 5 bis 15 dB stärker. Wenn man davon ausgeht, dass das Gesamt-

Radarecho gleich bleibt, jedoch über einen schmalen Frequenzbereich dopplerverschoben wird, ist diese Eigenschaft plausibel.

5 Zusammenfassung

In dieser Veröffentlichung konnte gezeigt werden, dass das dopplerverschobene Radarecho einer WEA stark von der Ausrichtung zwischen WEA und Radar (Winkel α) abhängig ist. Die maximale Dopplerverschiebung wird dabei bei einem Winkel von $\alpha = 90^\circ$ gemessen. Ein Minimum wird hingegen bei einem Winkel von $\alpha = 0^\circ$ gemessen. Anders als zunächst erwartet verschwindet das dopplerverschobene Echo jedoch nicht vollständig. Selbst wenn das Radar auf WEA Nabenhöhe betrieben wird, ist eine Dopplerverschiebung zu erwarten, da die WEA je nach Anlagentypen einen Erhebungswinkel von ca. 5° aufweisen (die Rotationsachse ist nicht parallel zum Erdboden). Auch die Art des Radarechos ist stark winkelabhängig. So treten bei $\alpha = 90^\circ$ kurze Nadelpulse im Spektrum auf, die für kleinere Winkel immer mehr zu einem kontinuierlichen Spektrum werden. Betrachtet man die zeitlich gemittelten Spektren, so ist erkennbar, dass mit zunehmendem Winkel α (zwischen 0 und 90°) die spektrale Leistungsdichte zwar abnimmt, sich jedoch das mittlere Dopplerspektrum verbreitert.

6 Ausblick

In dieser Veröffentlichung konnte nur eine qualitative und keine quantitative Aussage über das dopplerverschobene Radarecho getroffen werden. Eine absolute Aussage über den dynamischen Radar-Rückstreuquerschnitt (RCS, radar cross section) kann somit nicht getroffen werden. Für diese absolute Aussage über den dynamischen RCS ist eine Kalibrierung des Gesamtsystems erforderlich. Hierzu muss ein Objekt mit bekanntem RCS in bekannter Entfernung als Referenz vermessen werden. Hauptproblem dabei ist, dass dieses Objekt in einigen 10 Metern Höhe an einem reflexionsarmen Halter aufgehängt werden muss. Ferner hat sich gezeigt, dass die gewählte Sweeprate von $T_s = 133$ ms zu lang ist, da kurze Ereignisse (wie beispielsweise kurze Nadelpulse) nicht zeitlich aufgelöst werden können. Hierzu muss das experimentelle FMCW-Radar dahingehend erweitert werden, dass mit kürzeren Sweepratzen gemessen werden kann.

Literaturangaben

- [1] T. Schrader, J. Bredemeyer, M. Mihalachi, J. Rohde and T. Kleine-Ostmann, "Measuring the interaction of wind turbines with terrestrial navigation and radar systems deploying UAS," *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Paris, 2017, pp. 3751-3752
- [2] R. Maréchal, N. Douchin, P. Pitot, G. Bobillot, H.-J. Mametsa, "Assessing the impact of wind farms on radar in a realistic environment using ray-tracing techniques: the DEMPERE software", aus Korrespondenz mit Oktal-SE, Dez. 2016
- [3] J. M. Muñoz-Ferreras, Z. Peng, Y. Tang, R. Gómez-García, D. Liang and C. Li, "Short-Range Doppler-Radar Signatures from Industrial Wind Turbines: Theory, Simulations, and Measurements," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 9, pp. 2108-2119, Sept. 2016.
- [4] M. Jankiraman, "Design of Multi-Frequency CW Radars", SciTech Publishing; 1st edition (December 2, 2007)