

Einfluss eines durch Windenergieanlagen amplitudenmodulierten Übertragungskanals auf die Amplitudenmodulation des VOR

Dr.-Ing. Georg Zimmer, Dr.-Ing. Robert Geise, Björn Neubauer,
Technische Universität Braunschweig, Institut für EMV,
{g.zimmer, r.geise, b.neubauer}@tu-braunschweig.de

1. Einleitung

Gegenstand aktueller Forschung ist die Bestimmung des Einflusses von Windenergieanlagen (WEA) auf das Drehfunkfeuer (VOR), wenn sich erstere innerhalb eines Radius von 15 km um das VOR befinden. Das Drehfunkfeuer ist ein Navigationssystem für die Luftfahrt und ermöglicht die Bestimmung des Winkels zwischen den Verbindungslinien $VOR \leftrightarrow$ magnetisch Nord und $VOR \leftrightarrow$ Flugzeug. Die Trägerfrequenzen des VOR liegen um 115 MHz, welche mit jeweils 30 Hz amplituden- (AM) bzw. frequenzmoduliert (FM) ist. Beim Doppler-VOR stellt die AM die omnidirektional gesendete Referenz dar, bei der konventionellen Ausführung wird diese Aufgabe der FM zugeschrieben. Die Phase der jeweils anderen Komponente ist vom Abstrahlungswinkel abhängig. Die Navigationsinformation, d. h. die Himmelsrichtung, in der sich der Beobachter befindet, ergibt sich aus dem Phasenunterschied der beiden 30 Hz-Signale [1].

Bisherige Ansätze konzentrieren sich auf eine Nachbildung des Streuverhaltens statischer Windenergieanlagen, vernachlässigen allerdings die Dynamik des Szenarios und betrachten insbesondere nur die Beeinflussung der FM-Komponente. Dabei ist insbesondere der Effekt zu nennen, dass durch die Drehung des Rotors der Übertragungskanal eine Amplitudenmodulation erfährt. Zwar ist die Drehzahl einer Windenergieanlage mit $\max. 20 \text{ min}^{-1}$ wesentlich kleiner als 30 Hz, dennoch sind aufgrund der transienten Natur der Stör-AM höhere Frequenzen prinzipiell möglich. In [2] wird gezeigt, dass die 30-Hz-AM des VOR insbesondere durch 30 Hz-Komponenten der Stör-AM beeinflusst werden kann. D. h. grundsätzlich muss ein dynamischer Übertragungskanal charakterisiert werden.

In diesem Beitrag werden zusätzlich zum dynamischen Verhalten der WEA erstmalig auch weitere wichtige Parameter berücksichtigt. Diese sind im Folgenden aufgelistet.

- Drehzahl der WEA
- Ausrichtung des Rotors
- Einfall-/Ausfallwinkel des Signals
- Höhe des VOR über dem Boden
- Flügelbreite
- Flügelprofil
- Anstellwinkel der Flügel (pitch)
- WEA und Geländetopologie

2. Messaufbau

Die Messungen des Übertragungsverhaltens werden in einer skalierten Umgebung im Maßstab 1:144 durchgeführt [3]. Daher beträgt die benutzte Frequenz 15,9 GHz. Die Bestimmung des Winkelfehlers des VOR erfolgt rechnerisch aus der Einhüllenden des Empfangssignals wie in [2] beschrieben. Es werden zwei Ausbreitungsszenarien betrachtet, siehe Bild 1. Die eine ist die Line-of-Sight (LOS)-Konstellation. Bei dieser steht die WEA zwischen Sender und Empfänger. Durch die Windenergieanlage wird zeitvari-

ant das Signal teilweise abgeschattet. Die andere ist ein Dreiecksszenario mit Mehrwegeausbreitung. In letzterer werden bis zu 3 WEA auf einem leitfähigen Berg [4] platziert, um insbesondere Ausleuchtungseffekte durch Geländetopologien zu untersuchen. Die Messungen erfolgen bei Rotationsfrequenzen der Blätter von 20 min^{-1} , 22 min^{-1} und 71 min^{-1} . Die Winkelfehler der anderen Drehzahlen können rechnerisch durch Umskalierung der Zeitachse bestimmt werden [2]. Es wird der 95%-Winkelfehler angegeben, d. h. gemäß [5] werden die größten 5% der Winkelfehler nicht berücksichtigt, und von den Verbleibenden wird der maximale Wert angegeben.

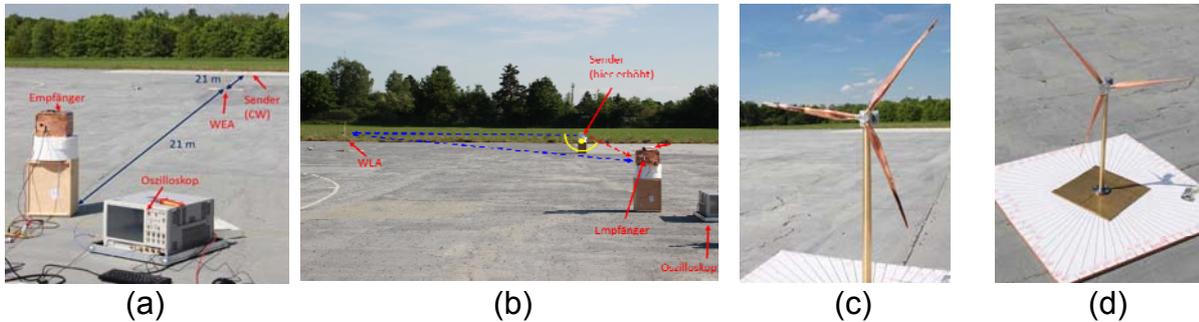
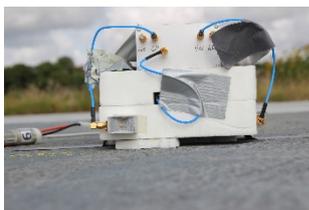


Bild 1: (a) Line-of-Sight-Szenario (b) Dreiecksszenario (c) Skalierte Senvion-WEA (MM92) (d) Skalierte Siemens-WEA (SWT-3.3-130).



Sender unten (u)
3 cm \triangleq 4,3 m



Sender niedrig (n)
12 cm \triangleq 17 m



Sender erhöht (h)
70 cm \triangleq 100 m

Bild 2: Höhe des Senders.

3. Ergebnisse LOS

In Tabelle 1 werden die untersuchten Konfigurationen des LOS-Szenarios dargestellt. Mit u, n und h ist die Höhe des Senders bezeichnet, wie in Bild 2 dargestellt. Ein \triangle bedeutet ein Winkelfehler $>1^\circ$ im Betriebsbereich einer WEA, also für Drehzahlen bis 20 min^{-1} . Dieser kritische Fall ist nur für eine generische Flügelgeometrie mit planaren und breiten Flügeln festzustellen. In Bild 3-8 sind die entsprechenden Vergleiche graphisch dargestellt. Es wird jeweils der Störeinfluss von 1 min^{-1} bis 200 min^{-1} berechnet. Die dicken Linien resultieren aus der Berechnung der gemessenen Drehzahl von 20 min^{-1} , die dünnen, etwas helleren werden aus 22 min^{-1} berechnet und die, dünnen sehr hellen aus 71 min^{-1} . Auf der linken Seite wird jeweils das betrachtete Szenario schematisch aus der Vogelperspektive gezeigt.

In Bild 3 ist die Untersuchung bzgl. des Anstellwinkels der Flügel gezeigt. Das Ergebnis ist weitgehend unabhängig vom Anstellwinkel und stört nur bei unrealistisch hohen Drehzahlen über 100 min^{-1} . Im Bereich zwischen 40 min^{-1} und 60 min^{-1} gibt es Unterschiede. Hier ist der Störeinfluss bei hohen Anstellwinkeln kleiner, da dann der wirksame Querschnitt abnimmt.

Tabelle 1: Untersuchte Konfigurationen des LOS-Szenarios. Mit u (unten, $3\text{ cm} \pm 4,3\text{ m}$), n (niedrig, $12\text{ cm} \pm 17\text{ m}$), h (erhöht, $70\text{ cm} \pm 100\text{ m}$) ist die Position des Senders bezeichnet, gemäß Bild 2.

WEA-Typ	Entfernung Sender- Empfänger /Abstand WEA zur dir. Verb.	Anstellwinkel der Flügel (Pitch)	Ausrichtung der WEA									
			0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°		
Senvion	42 m/0 m	15°	n									
Senvion	42 m/0 m	0°, 15°, 30°, 70°, 90°	n									
Siemens	42 m/0 m	15°	u,n	u,n	u,n	u,n	u,n	u,n	u,n	u,n	u,n	u,n
Siemens	42 m/0 m	0°, 15°, 30°, 70°	n									
Siemens	42 m/0,5 m	15°	n									
Siemens	42 m/1,5 m	15°	n									
Siemens 2D	42 m/0 m	0°	u	u	u	u	u	u	u	u	u	u
Siemens 2D , 1 Flügel	42 m/0 m	0°	n	n	n							n
Dünne Stangen	42 m/0 m	nicht anwendbar	n									
Dicke Stangen	42 m/0 m	nicht anwendbar	n									
2D Rechteck 0/3	42 m/0 m	0°	u									
2D Rechteck 1/3	42 m/0 m	0°	△ u									
2D Rechteck 2/3	42 m/0 m	0°	△ u									
2D Rechteck 3/3	42 m/0 m	0°	△ u									
Nur Nabe	42 m/0 m	nicht anwendbar	u									

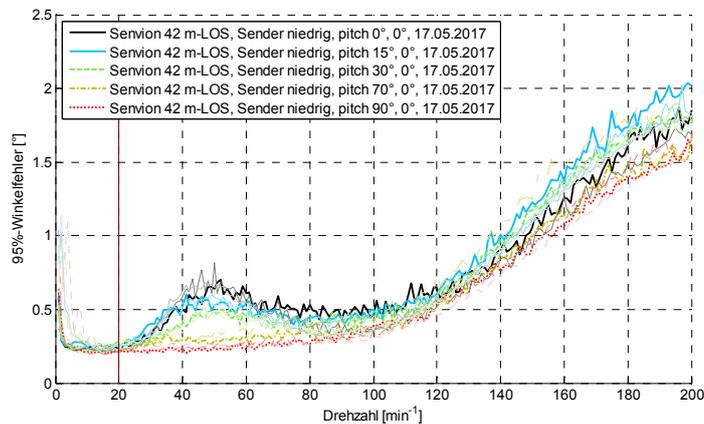
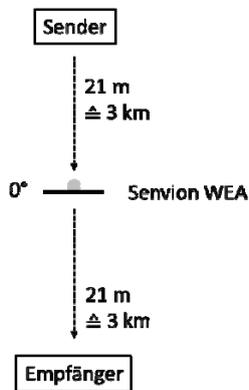


Bild 3: Untersuchung des Anstellwinkels der Flügel im Dreiecksszenario.

Bild 4 zeigt das Ergebnis für verschiedene Ausrichtungen der Rotationsebene. Es lässt sich schließen, dass je größer der Querschnitt in Ausbreitungsrichtung ist, desto größer ist auch der Störeinfluss, allerdings erst bei unrealistisch hohen Drehzahlen. Im Fall von 90° ist die Rotationsebene parallel zu der LOS und es gibt praktisch keinen Störeinfluss.

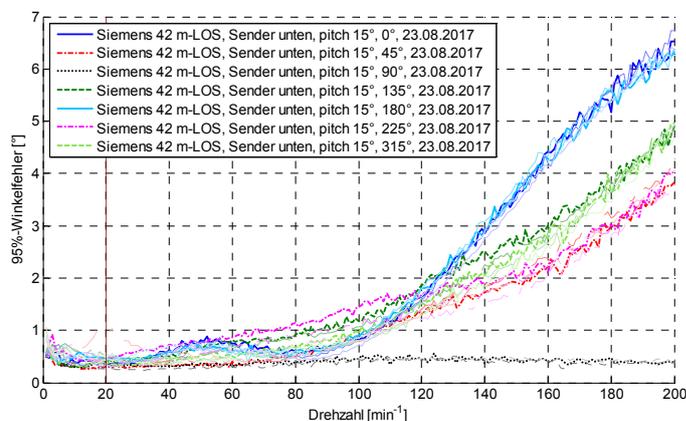
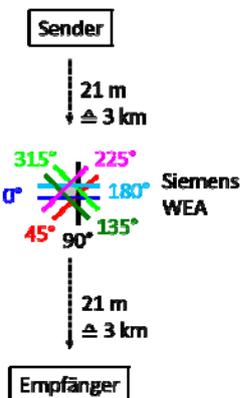


Bild 4: Untersuchung der WEA-Ausrichtung im LOS-Szenario.

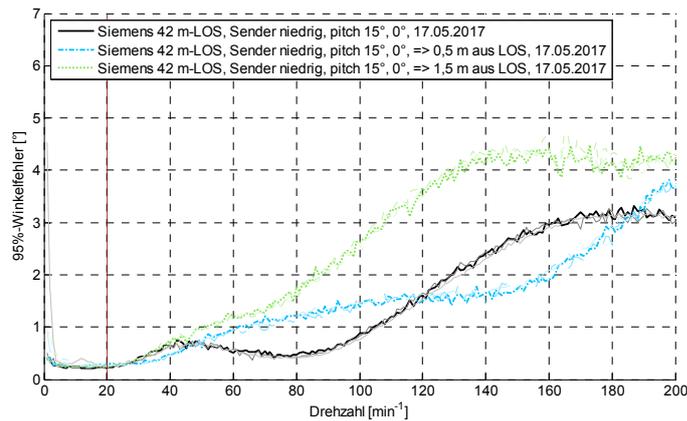
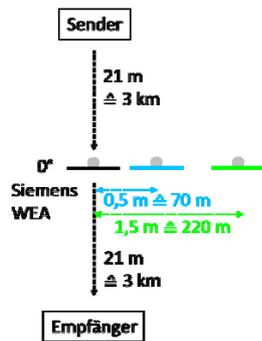


Bild 5: Messergebnisse für Variationen des LOS-Szenarios.

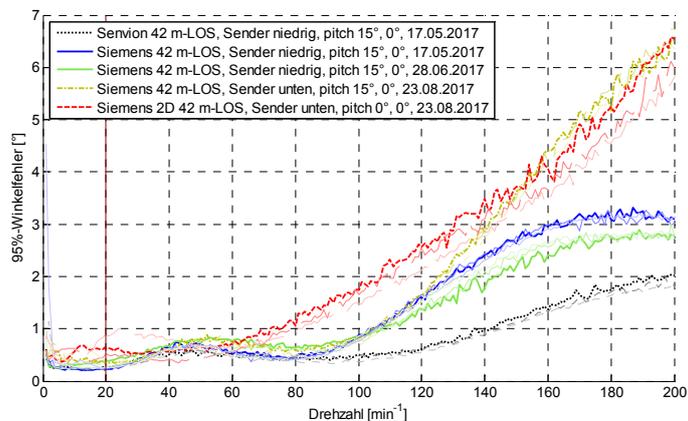
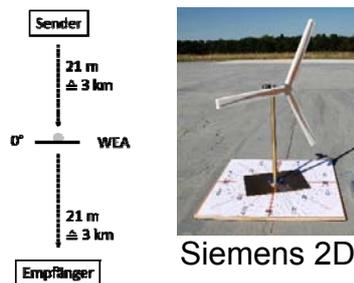


Bild 6: Variationen des WEA-Typs im LOS-Szenario.

In Bild 5 wird die Messung gezeigt, bei der die WEA teilweise aus der LOS positioniert ist. Die Kurve des Störeinflusses im oberen Bereich verändert ihre Form, bei so geringen Verschiebungen aus der LOS wird der Störeinfluss nicht zwangsläufig kleiner, sondern kann sogar größer werden. Der hohe Winkelfehler bei 1 min^{-1} im Genau-LOS-Szenario, berechnet aus der 71 min^{-1} -Messung beim direkten LOS-Szenario, ist nicht auf das Streuverhalten zurückzuführen, sondern auf ein externes Störsignal. Durch den Umrechnungsfaktor $1 \text{ min}^{-1}/71 \text{ min}^{-1}$ befindet sich das Signal dann nahe bei 30 Hz. Diese Störsignale lassen sich im Frequenzbereich erkennen, da sie nicht symmetrisch um die Zwischenfrequenz liegen (im Gegensatz zu einer Stör-AM) und, da sich der Störeinfluss nicht in allen drei Messungen feststellen lässt. Hier liefern die Messungen bei niedrigeren Drehzahlen keine Störung. Da es unwahrscheinlich ist, dass so ein Störsignal dicht beim ZF-Peak liegt (z. B. in einem Abstand von etwa 30 Hz), ergibt sich nach der Berechnung tendenziell ein Störeinfluss bei niedrigen Umdrehungszahlen.

In Bild 6 erfolgt eine Gegenüberstellung der beiden WEA-Typen und einer 2D-Variante der Siemens-WEA. Der Einfluss der Senvion-Anlage, welche einen kleineren Rotor besitzt, ist etwas geringer. Auch ergeben sich abhängig von der genauen Positionierung des Senders (unten / niedrig, siehe Bild 2) leicht unterschiedliche Ergebnisse. Die Siemens-WEA mit Sender unten wurde an zwei unterschiedlichen Tagen vermessen. Es ergibt sich eine gute Reproduzierbarkeit, z. B. bis 120 min^{-1} sind es $0,2^\circ$.

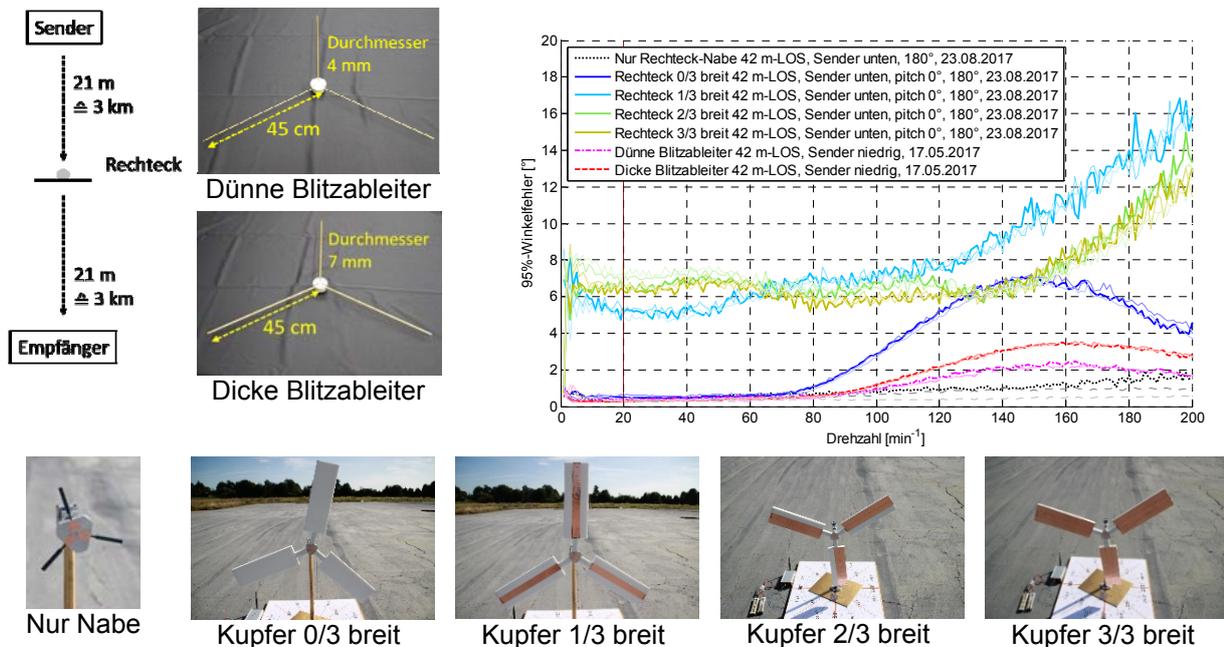


Bild 7: Untersuchung generischer Flügelprofile variabler Breite im LOS-Szenario.

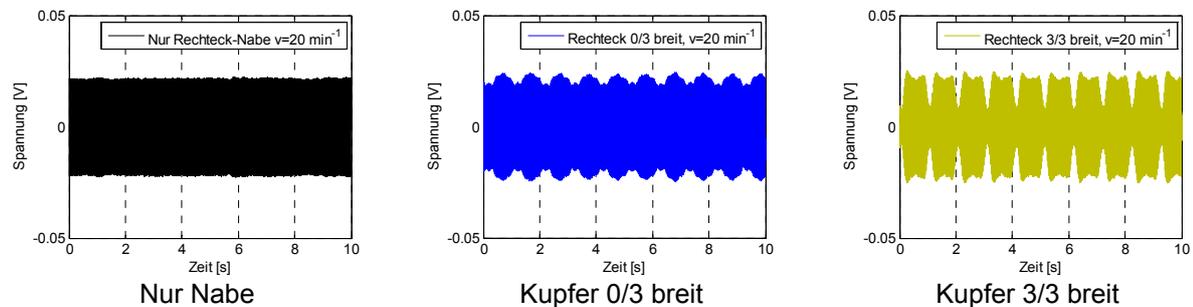


Bild 8: Zeitverlauf des Empfangssignals bzgl. der Untersuchung generischer Flügelprofile variabler Breite im LOS-Szenario

In Bild 7 werden die Ergebnisse generischer WEA dargestellt. Für einen Streifen von 4 cm...12 cm Breite und 38 cm Länge aus Kupferfolie ergibt sich ein Störeinfluss von mindestens 6° bei allen Drehzahlen. Das würde einer realen Flügelbreite von mindestens 5,8 m und vollkommen planaren Flügeln entsprechen und ist damit unrealistisch. In Bild 8 ist das zugehörige Zeitsignal gezeigt. Der Träger aus Rohacell (0/3 Breit) stört nur bei hohen Drehzahlen. Für Stangen, die Blitzschutzdrähte darstellen, gibt es Störungen ebenfalls nur bei hohen Drehzahlen.

4. Ergebnisse Dreiecksszenarien

In Tabelle 2 sind die vermessenen Dreiecksszenarien dargestellt. Wie in den LOS-Szenarien steht u , n , und h für die Senderhöhe. In der Tabelle kennzeichnen die Begriffe Par, ProD und NoD, die Konfigurationen jeweils mit einfacher Dopplerverschiebung, doppelter, also maximaler Dopplerverschiebung, und keiner Dopplerverschiebung. Diese Konfigurationen ergeben sich aufgrund der Relativbewegung der Rotorblätter jeweils zu Sender und Empfänger wie in [6] beschrieben. Bei der hier erfolgten Analyse von AM-Störungen werden Dopplerverschiebungen allerdings nicht berücksichtigt.

Tabelle 2: Untersuchte Konfigurationen im LOS-Szenario.

Anzahl, Typ/ggf. WEA-Aufstellungsort	Entfernung Sender↔ WEA/ Sender↔ Empfänger	Anstellwinkel der Flügel (Pitch)	Ausrichtung der WEA										
			Par 0°	5°, 10°, 20°, 45°	ProD 67,5°	335°	Krit0 NoD 337,5°	340°	345°	350°, 351°, 352°	Krit15 352,5°	353°, 354°, 355°	
1 Senvion	21 m/21 m	15°	unh	u	u			un	u		u	u	u
1 Senvion	21 m/21 m	0°, 15°, 30°, 70°, 90°	n										
1 Siemens	21 m/21 m	15°	unh	u	u			u	u		u	u	u
3 Siemens	21 m/21 m	15°	nh										
1 Siemens	21 m/21 m	0°, 15°, 30°, 70°, 90°	n										
1 Siemens 2D	21 m/21 m	0°	u		u	u	u	u	u	u		u	
1 Siemens/T-Berg	21 m/21 m	15°	nh										
3 Siemens/T-Berg	21 m/21 m	15°	nh										
1 Siemens/L-Berg	21 m/21 m	15°	nh										
3 Siemens/L-Berg	21 m/21 m	15°	nh										
3 Siemens/hinter L-Berg	21 m/21 m	15°	h										
1 Siemens	3,4 m/1,65 m	15°	Δ h										
1 Siemens	6,8 m/3,3 m	15°	Δ h										
1 Siemens	17 m/8,25 m	15°	h										

In Bild 9 sind verschiedene Ausrichtungen der WEA gezeigt. Bei keinem Fall gibt es kritische Winkelfehler im Betriebsbereich. Bei 352,5° gilt Einfallswinkel=Ausfallswinkel (Krit15) bzgl. der Flügelfläche. Diese Umgebung ist in Bild 10 genauer gezeigt. Die Variation des Winkels führt zu untereinander ähnlichen Verläufen; es sind also keine Sprunghaften Änderungen festzustellen.

In Bild 11 werden Messergebnisse mit Variation der Senderhöhe dargestellt. Für größere Senderhöhen wird die WEA aufgrund von Bodenreflexion nicht gleichmäßig ausgeleuchtet.

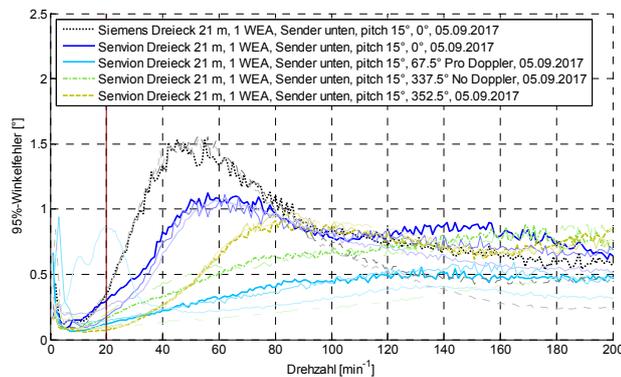
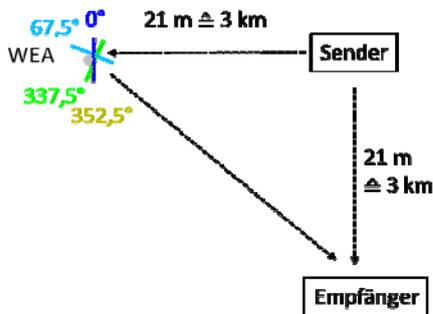


Bild 9: Untersuchung der WEA-Ausrichtung im Dreiecksszenario.

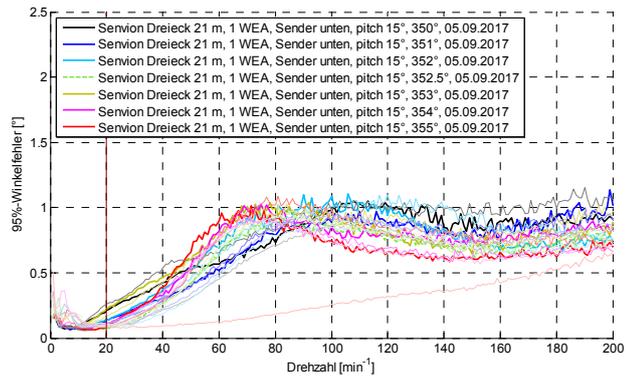
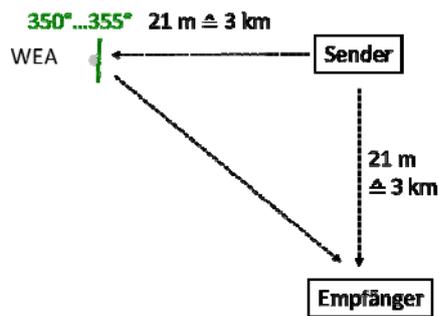


Bild 10: Untersuchung der WEA-Feinausrichtung im Dreiecksszenario.

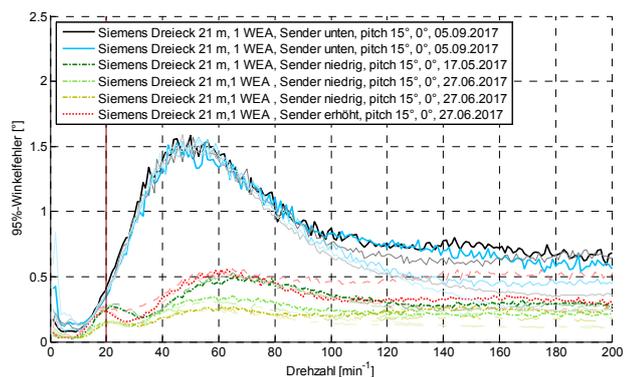
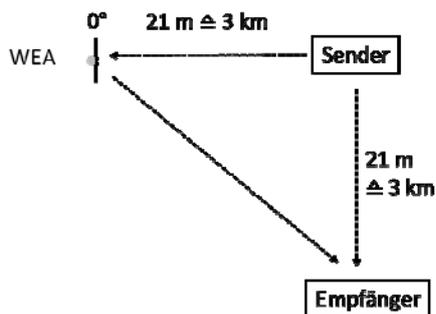
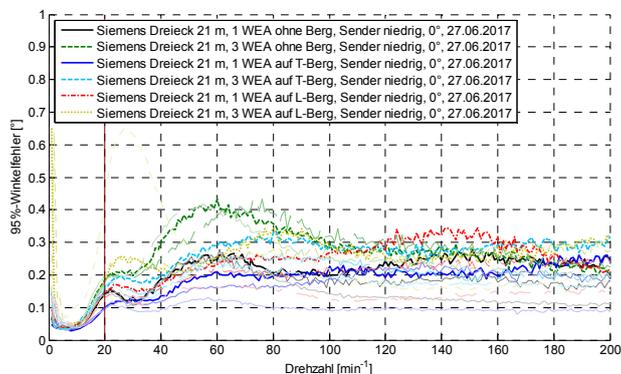
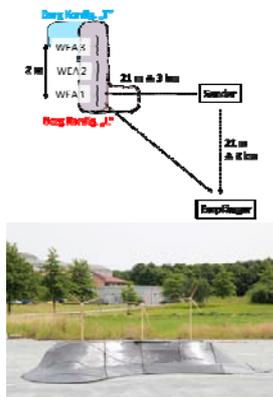


Bild 11: Untersuchung der Empfängerhöhe im Dreiecksszenario.



3 WEA auf L-Berg

Bild 12: Untersuchung der Abhängigkeit der Aufstellungsumgebung, d. h. mit/ohne Berg, und der WEA-Zahl im Dreiecksszenario.

In Bild 12 werden auf einem leitfähigen Berg [4] platzierte 1 bis 3 WEA gezeigt. Dabei werden insbesondere Ausleuchtungseffekte durch Geländetopologien untersucht. Der Störeinfluss ist bei allen untersuchten Geländetopologien vergleichbar. Für 3 WEA ist der Störeinfluss ca. doppelt so groß wie bei 1 WEA. Es gibt also eine größere Störung bei einem Windpark. Diese sind jedoch nicht proportional, vielmehr unterstützen die Messergebnisse die These, dass Störungen sich proportional zur Wurzel der WEA-Anzahl verhalten.

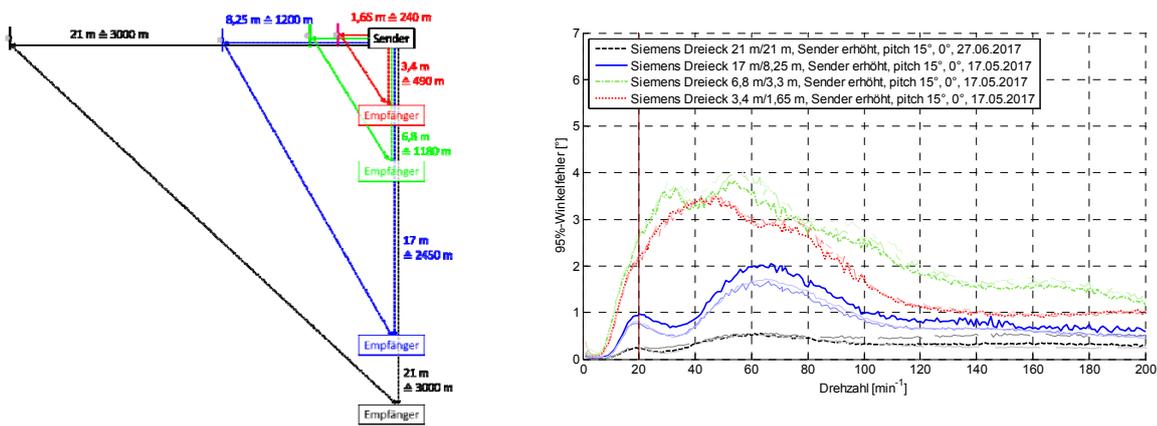


Bild 13: Untersuchung der Abstandsabhängigkeit im Dreiecksszenario.

Bild 13 zeigt Messergebnisse unter Variation des Abstandes zwischen WEA und VOR. Für sehr kleine Abstände, unter 2 km, erfolgt eine signifikante Beeinflussung des VOR auch im Betriebsbereich der WEA.

5. Zusammenfassung

Gemäß den durchgeführten Untersuchungen wird keine signifikante Beeinflussung erwartet bzgl. der Amplitudenmodulation des VOR im durch Windenergieanlagen AM-modulierten Übertragungskanal.

Störungen sind im Rahmen dieser Stichprobe nur zu erwarten, wenn mindestens eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

- Drehzahl unrealistisch hoch, also mehr als 30 min⁻¹
- Abstand der WEA zum VOR wesentlich kleiner als 3 km
- Flügel der WEA unrealistisch breit und zudem planar sind

Eine Vielzahl von Parameterkonstellationen von WEA und VOR ist in der skalierten Messumgebung reproduzierbar gemessen worden. Die Ergebnisse können als Grundlage zur Validierung von Simulationswerkzeugen dienen.

Literaturangaben

- [1] *Funkortungs- und Funknavigationsanlagen*, Werner Mansfeld, ISBN 3778522027, Hüthig (1994).
- [2] *Ein simples MISO-Channel-Sounder-System für die Analyse von störenden Streuszenarien bei Avionik-Navigationsanlagen*, Georg Zimmer, ISBN 978-3-7369-9561-1, Cuvillier Verlag Göttingen 2017.
- [3] *Skalierte Messungen zu bistatischen Radarquerschnitten und Landekursverfälschungen des ILS*, Robert Geise, ISBN 978-3-86955-570-6, Cuvillier Verlag Göttingen 2010.
- [4] *Modular terrain modeling with flexible conductive materials in a scaled measurement environment* Neubauer, Björn; Geise, Robert; Zimmer, Georg; Andree, Angela; Ueffing, Norbert, In: 2017 European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Paris, France, S. 1–5.
- [5] *International Standards and Recommended Practices, Aeronautical Telecommunications, Annex 10, Vol. 1, Radio Navigation Aids. Sixth Edition. ICAO (2006).*
- [6] B. Neubauer, R. Geise, G. Zimmer, *A Benchmark Study on Measurement and Simulation Techniques for Navigation Systems and Multipath Propagation*, International Flight Inspection Symposium, pp. 1-9, 13-17 June, Belgrad, Serbien.