

Einfluss der unerwünschten Polarisationsanteile auf die empfangene Zielgröße einer DVOR-Antenne

Dipl.-Ing. Sergei Sandmann, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Appelstraße 9a, 30167 Hannover, Deutschland, sandmann@geml.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Appelstraße 9a, 30167 Hannover, Deutschland, garbe@geml.uni-hannover.de

1 Einleitung

Die Funktionsweise eines Doppler-Drehfunkfeuers (engl. Doppler Very High Frequency Omnidirectional Radio Range (DVOR)) beruht darauf, dem Luftfahrzeug (LFZ) den azimutalen Winkel ϕ zur Verfügung zu stellen, der sich aus der Perspektive der DVOR zwischen magnetisch Nord und der Standlinie zum LFZ ergibt (vgl. Abb. 1).

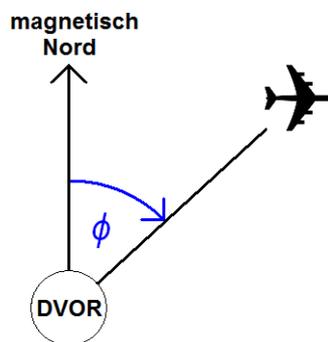


Abbildung 1: Bearing-Winkel ϕ zwischen magnetisch Nord und Standlinie zum LFZ.

Wie in Kap. 2 genauer erläutert, ist die DVOR-Anlage dabei auf eine möglichst ungestörte Feldausbreitung im Raum angewiesen, um eine hohe Genauigkeit der Zielgröße zu erreichen. Neben einer gestörten Feldausbreitung im Raum existieren jedoch weitere Störmechanismen, die bei der Untersuchung der Zielgrößengenauigkeit berücksichtigt werden müssen.

So ist der Gegenstand der vorliegenden Arbeit die Untersuchung des Einflusses der unerwünschten Polarisationsanteile auf die empfangene Zielgröße ϕ . Während die DVOR-Anlage ihre Zielgröße in der orbitalen Polarisation abstrahlt [1], empfängt die Antenne des LFZ auch Anteile aus der radialen und vertikalen Polarisation. Das Verhältnis dieser Polarisationsanteile variiert dabei in Abhängigkeit von der Lage des LFZ im Raum.

Um die entsprechenden Einflüsse zu untersuchen, wurde auf einer zylindrischen, repräsentativ angeordneten Analysefläche im Raum die Zielgröße ϕ eines im Ursprung befindlichen DVOR für ein LFZ berechnet, während dessen Schräglage in allen drei Achsen variiert wurde. Zusätzlich wurden Windenergieanlagen (WEA) zwischen DVOR und Analysefläche eingefügt, sodass die Störeinflüsse auch in Gegenwart von Streukörpern untersucht werden konnten.

Nach der Auswertung der Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf die Abweichung der Zielgröße ϕ können so in Kap. 3 qualitative Aussagen zum Störpotential der Empfangscharakteristik eines LFZ im direkten Vergleich zum Störpotential von Streukörpern gemacht werden.

2 Funktionsweise und Störmechanismen der DVOR-Anlage

Die in Kap. 1 erläuterte Aussendung der Navigationsinformation des DVOR an das LFZ wird realisiert, indem die Anlage ein orbital polarisiertes und azimuthal abhängiges Raumsignal (Signal in Space) generiert, in dem die entsprechende Information als Zielgröße enthalten ist. Abhängig davon, auf welchem Radial des DVOR das LFZ sich befindet, empfängt es den entsprechenden Azimutwinkel (definiert nach Abb. 1).

Hierbei wird der Betrag des Winkels durch die Differenz eines amplitudenmodulierten (AM) und eines frequenzmodulierten (FM) Signalanteils übertragen. Während das AM-Signal omnidirektional ausgesendet wird, geschieht die Aussendung des FM-Signals durch einen Hilfsträger von 9960 Hz und in seiner Phase linear azimuthal abhängig. Realisiert wird die Aussendung eines solchen, in seiner Phase raumwinkelabhängigen FM-Signals unter Ausnutzung des Doppler-Effektes dadurch, dass eine mechanische Rotation zweier gegenüberliegenden Antennen auf einem Kreis mit ca. 13,5 m Durchmesser und einer Rotationsfrequenz von 30 Hz imitiert wird. Dabei senden die fiktiven Antennen jeweils ein Seitenband des FM-Hilfsträgers aus, während eine im Zentrum befindliche Antenne das Trägersignal und die AM-Seitenbänder aussendet. Die Imitation der Rotation wird hierbei dadurch vollzogen, dass 50 raumfeste, elektrisch kommutierte Alford-Loop-Antennen (AL) in dem entsprechenden Kreis betrieben werden (vgl. Abb. 2).

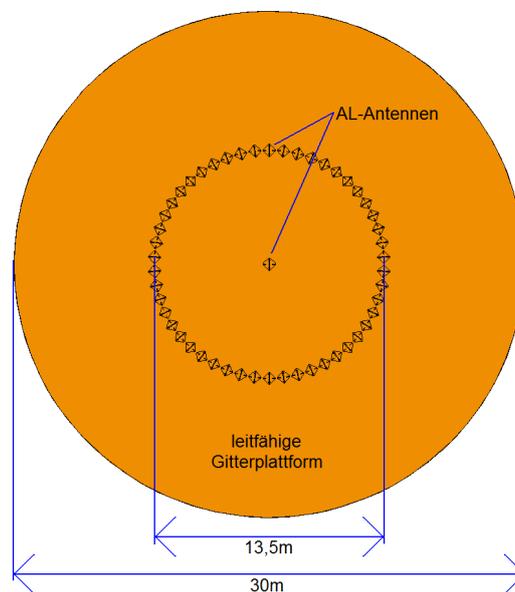


Abbildung 2: DVOR mit 51 AL-Antennen.

Aktiv aussendend sind stets zwei gegenüberliegende AL-Antennen, die in ihrer Position entgegen dem Uhrzeigersinn elektrisch so weitergeschaltet werden, dass makroskopisch eine entsprechend mechanische Kreisbewegung eines fiktiven Antennenpaares nachgeahmt wird [2].

Wie in Abb. 3 illustriert, befindet sich in dem untersuchten Szenario die DVOR-Anlage im Ursprung, während auf einer zylinderförmigen Analysefläche (gelb) mit dem Radius 15 km die Bearing-Werte numerisch berechnet werden [3]. Der Erdboden (hellbraun) wurde hierbei als elektrisch perfekt leitende Fläche modelliert. Die Begrenzung des operationellen Raumes durch die maximal genutzte Flughöhe und den cone-of-silence ist in dunkelbraun dargestellt.

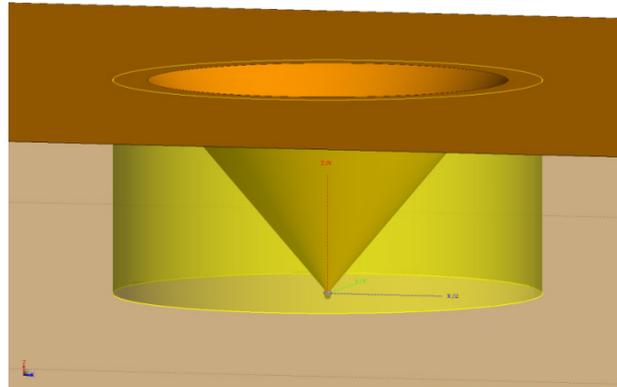


Abbildung 3: Illustration des untersuchten Szenarios.

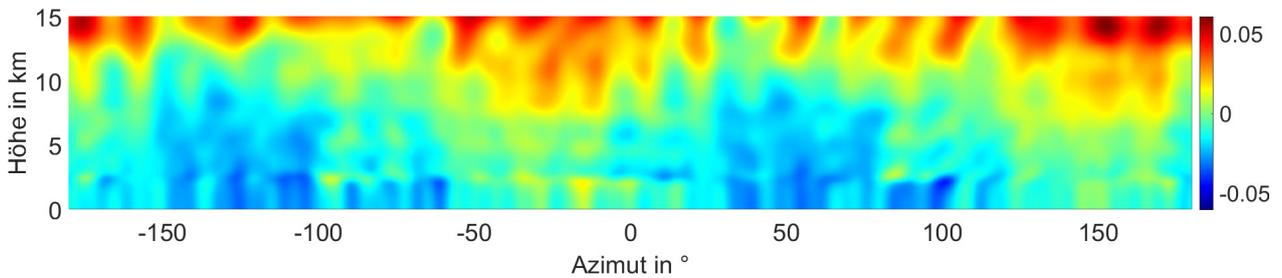


Abbildung 4: Bearing-Fehler in orbitaler Polarisation und ohne Streukörper

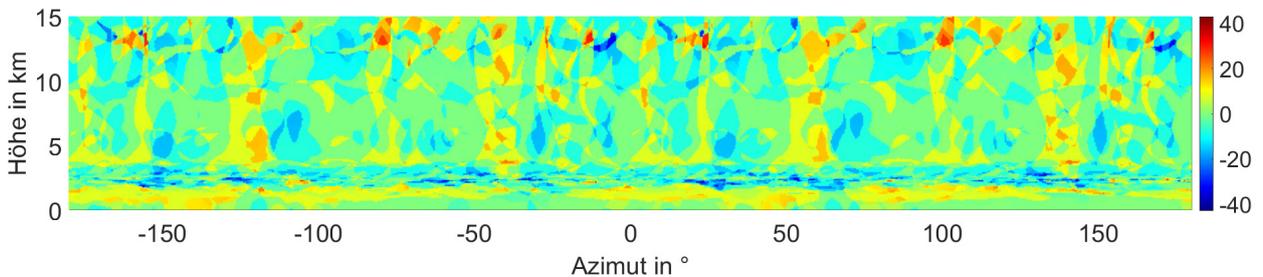


Abbildung 5: Bearing-Fehler in radialer Polarisation und ohne Streukörper

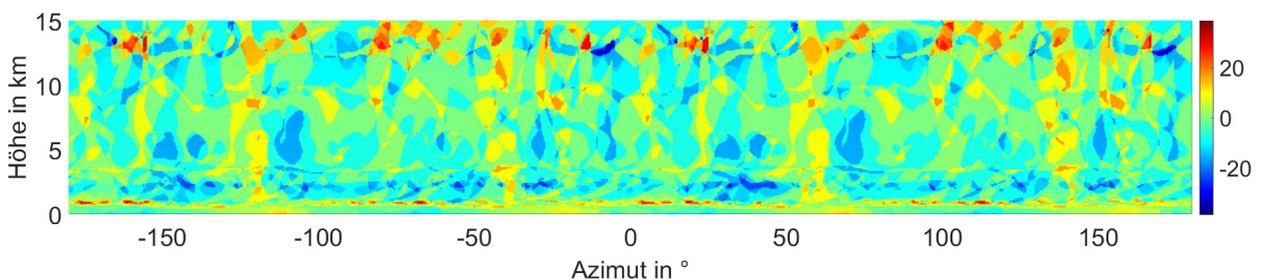


Abbildung 6: Bearing-Fehler in vertikaler Polarisation und ohne Streukörper

Werden die abgestrahlten DVOR-Signalanteile numerisch simuliert und für die orbitale Polarisation ausgewertet, ergibt sich nach der Subtraktion des idealen Azimutwinkels

der in Abb. 4 dargestellte Verlauf des Bearing-Fehlers auf der abgewickelten Analysefläche. Die entsprechenden Werte für die radiale bzw. vertikale Polarisation sind der Abb. 5 bzw. Abb. 6 zu entnehmen.

Deutlich lässt sich feststellen, dass die Bearing-Werte lediglich in der orbitalen Polarisation verwertbar sind. Die maximalen Abweichungen von $\pm 0.06^\circ$ sind dabei auf die Bauart der Antenne und eventuelle Modellungenauigkeiten zurückzuführen.

Werden in das in Abb. 3 dargestellte Szenario mittig zwischen DVOR und Analysefläche bei einem Azimutwinkel von 90° WEA hinzugefügt, so induzieren diese Streuobjekte Abweichungen der empfangenen Bearing-Werte [4], [5] aufgrund einer gestörten elektromagnetischen Feldausbreitung im Raum [6], [7]. Die Bearing-Fehler lassen sich generell im gesamten Raum verzeichnen, während sie im Bereich des direkten elektromagnetischen Schattens der WEA am größten sind. Ausschnitte aus diesem Bereich der Analysefläche sind in den Abb. 7 bzw. Abb. 8 für eine bzw. fünf eingefügte WEA bei ausgewerteter orbitaler Polarisation dargestellt.

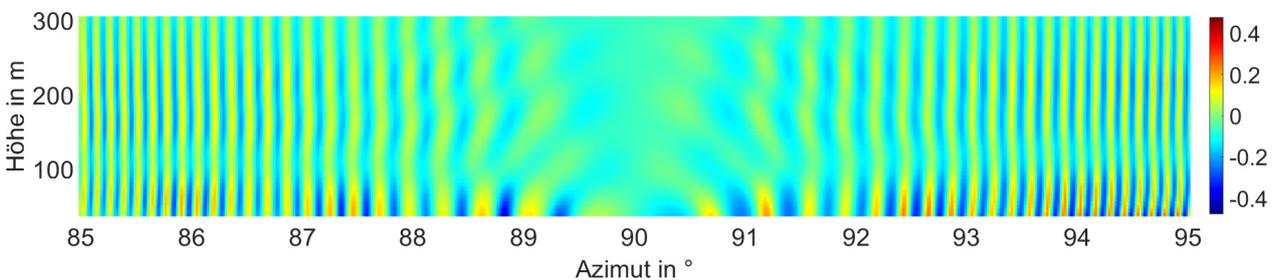


Abbildung 7: Bearing-Fehler mit 1 WEA als Streuobjekt (Ausschnitt aus der Analysefläche)

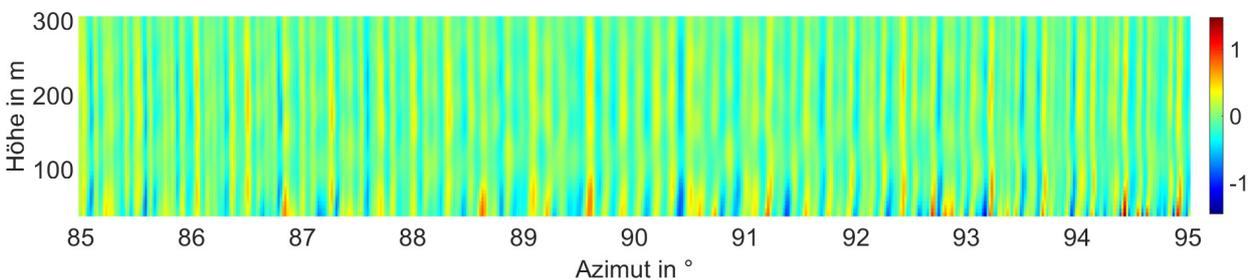


Abbildung 8: Bearing-Fehler mit 5 WEA als Streuobjekte (Ausschnitt aus der Analysefläche)

3 Einflüsse der Empfangscharakteristik

Insbesondere für den durch Streuobjekte gestörten Fall ist ersichtlich, dass das elektromagnetische Feld aus verschiedenen Raumrichtungen und mit potentiell verschiedenen Polarisationsanteilen an der Empfangsantenne des LFZ eintrifft. Des Weiteren muss davon ausgegangen werden, dass die einzelnen Signalanteile zusätzlich von der LFZ-Karosserie verschieden gebeugt und abgeschattet werden.

Die an der Empfangsantenne eintreffenden Signalanteile werden mit verschiedenen Antennenfaktoren komplex gewichtet aufgenommen. Diese, sowohl von dem Aufenthaltsort als auch von der Lage im Raum, abhängigen Effekte müssen bei der Untersuchung des Zielgrößenfehlers mitberücksichtigt werden.

Für die Untersuchung der durch ein LFZ empfangenen Zielgröße wird das elektrische Feld der DVOR in 144 gleichmäßig verteilten Raumpunkten auf der Analysefläche mit der simulierten Empfangscharakteristik eines LFZ von Typ „King Air 350“ der Beech Aircraft Corporation verrechnet und anschließend ausgewertet. Hierbei wird die Lage des LFZ im Raum parametrisch in mehreren Schritten nach Tab. 1 variiert.

	Minimalwert	Maximalwert	Inkrement
Azimut	0°	340°	20°
Höhe	1 km	15 km	2 km
Gierwinkel	0°	330°	30°
Nickwinkel	-30°	30°	15°
Rollwinkel	-30°	30°	15°

Tabelle 1: Parameter für die Lage des LFZ im Raum

Darüber hinaus wurden jeweils auch die Bearing-Werte berechnet, die sich ergeben, wenn anstatt der Empfangscharakteristik des LFZ „King Air 350“ die Charakteristik einer Alford-Loop-Antenne genutzt würde. Da diese Antenne eine horizontal nahezu omnidirektionale Charakteristik aufweist, während sie unempfindlich für die vertikale Polarisation ist, eignet sich diese Untersuchung, wie auch die Auswertung der rein orbitalen Komponente, in besonderem Maße zu Vergleichszwecken.

Die Ergebnisse sind in Abb. 9 für das ungestörte Szenario und in Abb. 10 bzw. Abb. 11 für ein Szenario mit einer bzw. fünf WEA als Streukörper nach Kap. 2 dargestellt.

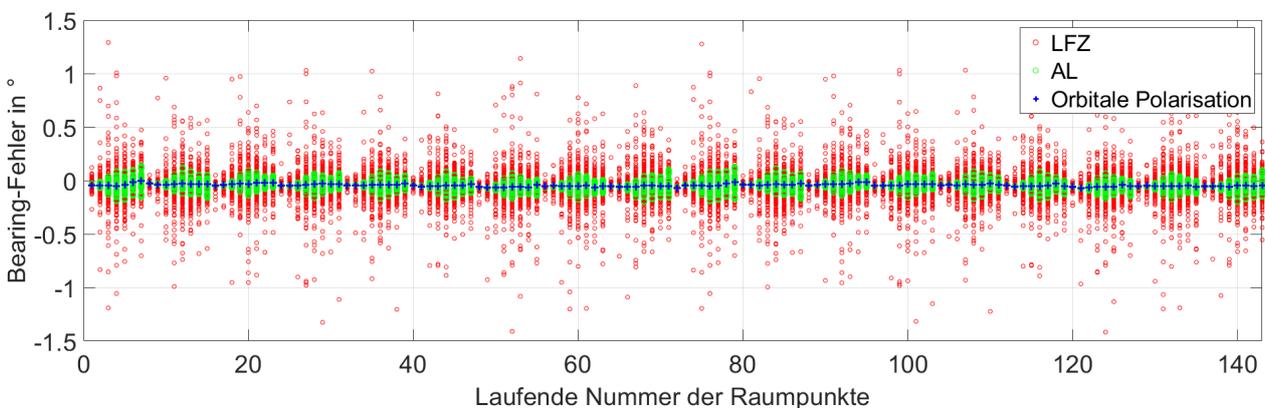


Abbildung 9: Bearing-Fehler auf der gesamten Analysefläche ohne Streuobjekte

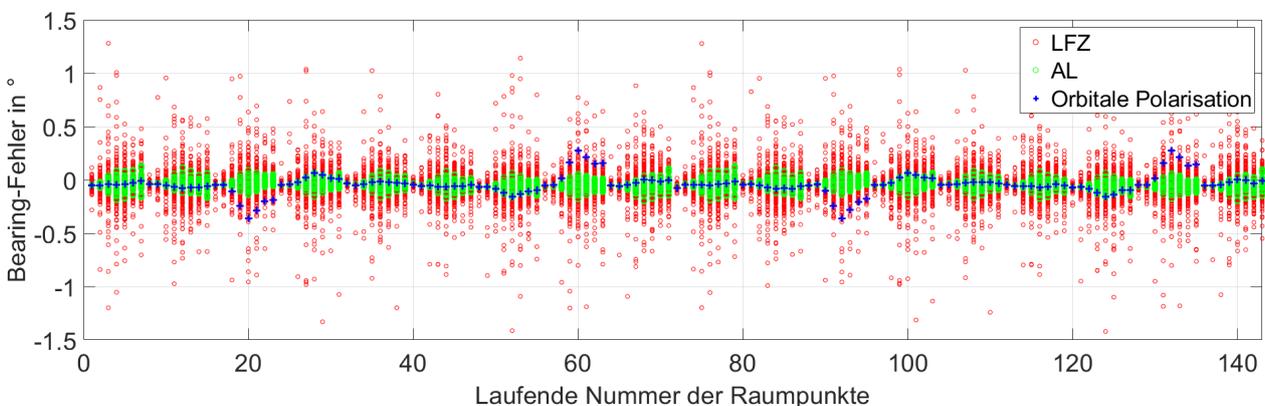


Abbildung 10: Bearing-Fehler auf der gesamten Analysefläche mit einer WEA als Streukörper

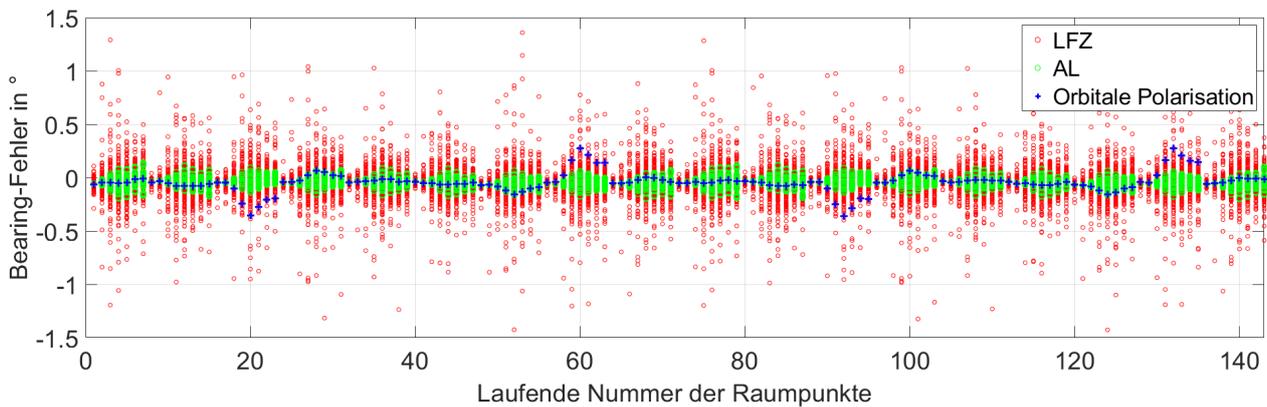


Abbildung 11: Bearing-Fehler auf der gesamten Analysefläche mit fünf WEA als Streukörper

Die sich aus Tab. 1 ergebende Raumpunktdichte ist gut geeignet, um die Störungseinflüsse des gesamten operationellen Raumes abzubilden. Da der direkte elektromagnetische Schattenbereich der WEA jedoch vergleichsweise klein ist, ist eine höhere Raumpunktdichte in diesem Bereich notwendig, um diesen zu repräsentieren. Es wird daher eine weitere Menge von 136 Raumpunkten nach Tab.2 für die Untersuchungen definiert. Die entsprechenden Ergebnisse für ein Szenario mit einer bzw. fünf WEA als Streukörper sind in den Abb. 12 und Abb. 13 dargestellt.

	Minimalwert	Maximalwert	Inkrement
Azimut	70°	110°	2,5°
Höhe	38 m	304 m	38 m

Tabelle 2: Raumpunkte auf der Analysefläche im elektromagnetischen Schattenbereich der WEA

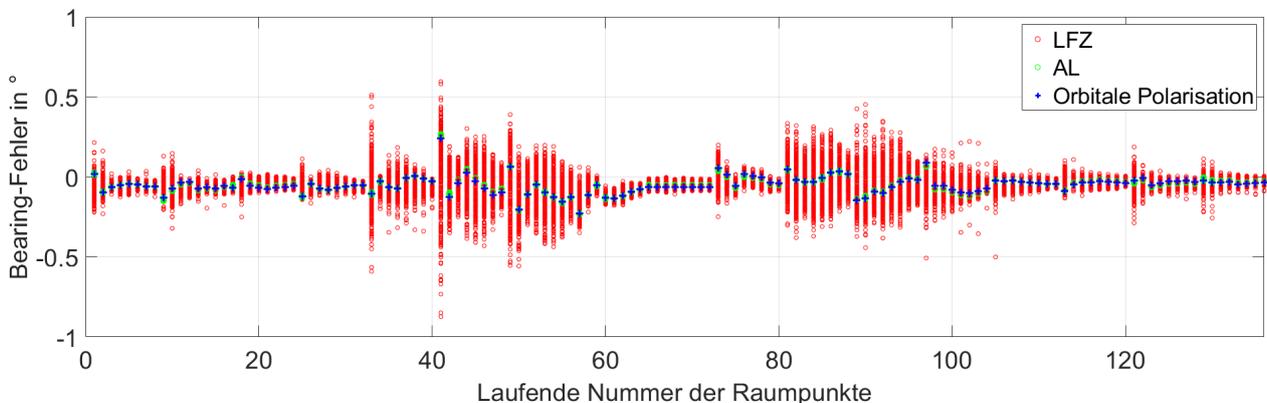


Abbildung 12: Bearing-Fehler auf einem Ausschnitt der Analysefläche im direkten elektromagnetischen Schattenbereich einer WEA

Auf den Abszissen der Abb. 9-13 ist jeweils die laufende Nummer der Raumpunkte aufgetragen, wobei deren Numerierung mit dem Azimutwinkel in der äußeren und der Höhe in der inneren Schleife erfolgt. Wie bereits andere Untersuchungen gezeigt haben, fällt die Zunahme der Bearing-Fehler durch die Erhöhung der Streuobjekt-Anzahl von einer auf fünf WEA vergleichsweise gering aus [8]. Dieser Effekt ist insbesondere in den Abb. 10 und Abb. 11 festzustellen, die die gesamte Analysefläche repräsentieren.

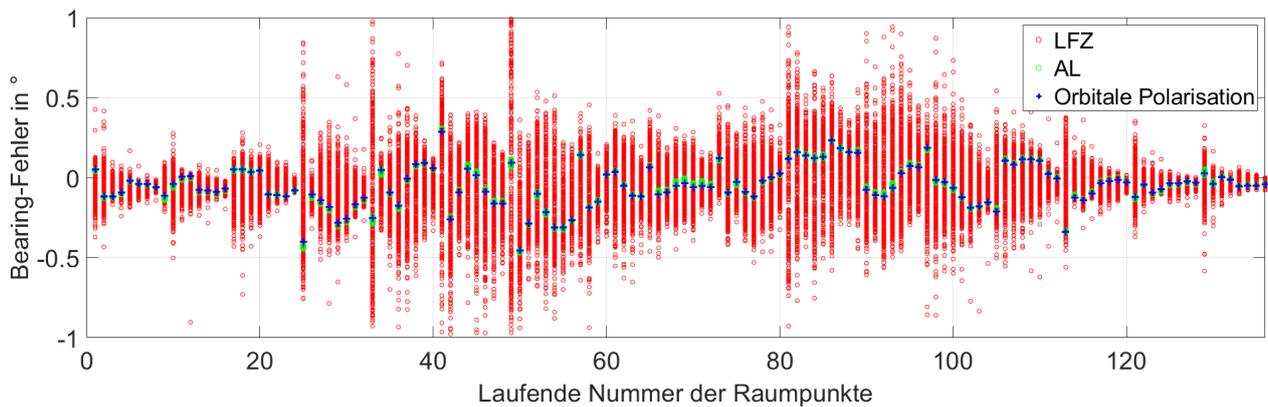


Abbildung 13: Bearing-Fehler auf einem Ausschnitt der Analysefläche im direkten elektromagnetischen Schattenbereich von fünf WEA

Wie den Abb.9-11 des Weiteren zu entnehmen ist, verursacht die Empfangscharakteristik des LFZ eine Schwankungsbreite der Bearing-Fehler, die in etwa den maximalen Fehlern entspricht, die durch die WEA verursacht werden, wobei auch Ausreißer bis ca. 2° auftreten. Ein Ersatz der Empfangscharakteristik des LFZ durch die einer AL-Antenne reduziert die Schwankungsbreite auf einen etwa halb so großen Wert.

Verglichen mit den Ergebnissen der gesamten Analysefläche, ergeben sich bei den in Abb.12-13 dargestellten Ergebnissen, die den direkten elektromagnetischen Schattenbereich der Analysefläche repräsentieren einige Änderungen. Auffallend ist, dass die Erhöhung der WEA-Anzahl zu einer stärkeren Zunahme der Bearing-Fehler führt als auf der gesamten Analysefläche. Die Schwankungsbreite aufgrund der Empfangscharakteristik ist etwas größer als der maximale Fehler, der durch die Anwesenheit der WEA hervorgerufen wird. Besonders auffällig ist, dass die Schwankungsbreite durch den Einsatz einer AL-Charakteristik enorm reduziert wird.

4 Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Empfangscharakteristik eines Luftfahrzeugs die empfangenen Bearing-Werte eines DVOR negativ beeinflussen kann. Die typische Schwankungsbreite bei der Variation der Lage im Raum bewegt sich im untersuchten Szenario etwa in der gleichen Größenordnung wie die maximalen Fehler, die von Windenergieanlagen als Streukörper hervorgerufen werden. Durch die Vergleichsuntersuchungen mit einer Alford-Loop-Empfangscharakteristik wurde gezeigt, dass die störenden Einflüsse der Antennencharakteristik deutlich abgeschwächt werden können, insbesondere im direkten elektromagnetischen Schattenbereich von Streukörpern, wo typischerweise auch die größten Fehler in DVOR-Szenarien zu erwarten sind.

Danksagung

Diese Arbeit wurde teilweise unterstützt vom Verbundprojekt WERANplus. Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. FKZ: 0324252B.

Des Weiteren wurden die Ergebnisse dieser Arbeit teilweise mit der Software FEKO (Altair) und unter Nutzung des Scientific Computing Clusters (LUIS) der Leibniz Universität Hannover erstellt.

Literaturangaben

[1] ICAO, DOC 8071, Volume I, Fourth Edition: Manual on testing of radio navigation aids. Testing of ground-based radio navigation systems, 2000.

[2] S. R. Anderson and R. B. Flint, "The CAA Doppler Omnidirectional Range," in Proceedings of the IRE, vol. 47, no. 5, pp. 808-821, May 1959. DOI: 10.1109/JRPROC.1959.287274

[3] S. Sandmann, J. Bredemeyer, T. Schrader, H. Garbe: A Numerical Time Domain Method for Calculation of the Indicated DVOR Bearing in Dynamically Disturbed Scenarios. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 8pp. DOI: 10.1049/iet-map.2018.5591, August 2019.

[4] Ludovic Claudepierre; Rémi Douvenot; Alexandre Chabory; Christophe Morlaas: A Deterministic VOR Error Modeling Method—Application to Wind Turbines. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Year: 2017, Volume: 53, Issue: 1 Pages: 247 - 257, DOI: 10.1109/TAES.2017.2650058.

[5] Ludovic Claudepierre; Rémi Douvenot; Alexandre Chabory; Christophe Morlaas: A method for computing the VOR multipath error - comparisons with in-flight measurements. 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Year: 2016, Pages: 1 - 5, DOI: 10.1109/EuCAP.2016.7481546.

[6] S. Sandmann, Heyno Garbe: Uncertainty contribution of a wind turbine to the electric field of a DVOR antenna as a function of wind direction and rotor position, Adv. Radio Sci., 14, 17-24, <https://doi.org/10.5194/ars-14-17-2016>, 2016.

[7] S. Sandmann, S. Divanbeigi, H. Garbe: Reflexionseigenschaften von Windenergieanlagen im Funkfeld von Funknavigations- und Radarsystemen. Adv. Radio Sci., 13, 9-18, <https://doi.org/10.5194/ars-13-9-2015>, 2015.

[8] S. Sandmann, H. Garbe, J. Bredemeyer, T. Schrader: Ermittlung der gesamten Unsicherheit des Winkelfehlers eines Doppler-Drehfunkfeuers (DVOR) in XXX. Messtechnisches Symposium 2016, pp 175-182, 2016 Walter de Gruyter GmbH, Berlin / Boston, ISBN 978-3-11-049487-7, DOI: 10.1515/9783110494297-023.