

Gutachtliche Stellungnahme in einem verwaltungsgerichtlichen Verfahren zur luftverkehrsrechtlichen Zulässigkeit von Windenergieanlagen im Umfeld eines VOR

– Bezüge zum Verfahren wurden entfernt –

Braunschweig, 26.01.2018

Stellungnahme der Koordinierungsstelle Windenergierecht (k:wer)

In dem verwaltungsgerichtlichen Verfahren

x ./ x

Beigeladen:

1. x

2. x

3. x

4. x

nehme ich nachfolgend Stellung.

Gliederung

I. Wesentliche Folgerungen

II. Erläuterungen im Detail

1. Neue Publikation der ENAC
2. Validierung von Modellen
3. Erkenntnisse aus Flugvermessungen
4. Bedeutung des Signal-Scalloping
5. Voraussetzungen für die statistische Bewertung möglicher Störungen

I. Wesentliche Folgerungen

Die zentralen Folgerungen der Stellungnahme sind:

1. Anhand übereinstimmender Ansichten in der Fachwelt lässt sich zeigen, dass einzelne Annahmen, die dem Vorgehen der DFS zu Grunde liegen, nach heutigem Erkenntnisstand nicht mehr wissenschaftlichen Ansprüchen genügen und anhand der neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse substantiell in Frage zu stellen sind.
2. In der Fachliteratur finden sich Vorgehensweisen zur Bewertung von Einflüssen von Windenergieanlagen auf VOR-Signale, die für eine Störungsbewertung besser geeignet sind, als die Methodik der DFS, da sie beispielsweise die Auswirkung der Flugzeugbewegung sowie die Eigenschaften des VOR-Signals (Amplitude, Phase, Richtung) berücksichtigen.
3. Es mangelt an einer wissenschaftlich fundierten Grundlage für die Entscheidung des BAF darüber, ob nach Errichtung der geplanten Windenergieanlagen des Windparks eine Störung des Signals des VOR möglich ist.
4. Das Tatbestandsmerkmal des § 18a Abs. 1 S. 1 LuftVG kann hinsichtlich der hier betroffenen Windenergieanlagen des Windparks nicht als erfüllt angesehen werden (BVerwG, Urt. v. 07.04.2016 – 4 C 1.15, Rn. 23).

II. Erläuterungen im Detail

Nachfolgend wird der Stand der Wissenschaft zu einzelnen Annahmen dargestellt, die der Bewertung möglicher Störungen von Flugsicherungseinrichtungen durch Windenergieanlagen durch die Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS) zu Grunde liegen. Dazu werden Publikationen und Gutachten von Experten, unter anderem der ENAC, der University of Ohio, der Flight Calibration Services GmbH (Dr. Bre-demeyer, auch Mitglied im Projekt WERAN) und der NAVCOM Consult (Dr. Greving), ausgewertet. Das Ziel ist, übereinstimmende Ansichten zu einzelnen Fragen der Berechnung und Bewertung von möglichen Störungen durch Windenergieanlagen nach § 18a Abs. 1 LuftVG zu identifizieren. Die übereinstimmenden Ansichten werden dann den Annahmen, die der Bewertungsmethodik der DFS zu Grunde liegen, gegenübergestellt. An zentralen Punkten wird deutlich gemacht, welche Implikationen die jeweiligen Erkenntnisse für die Bewertung der hier betroffenen Windenergieanlagen des Windparks haben.

Als Anknüpfungspunkt der Stellungnahme wird eine aktuelle Veröffentlichung der französischen ENAC gewählt, da die derzeitige Bewertungsmethode der DFS auf einem Modell der ENAC aus dem Jahr 2008 basiert.¹ Ausgehend von den neuen Erkenntnissen der ENAC wird gezeigt, dass die der Vorgehensweise der DFS zu Grunde liegenden Annahmen nicht wissenschaftlichen Ansprüchen genügen, da sie nicht etwa durch Einzelmeinungen, sondern anhand übereinstimmender Ansichten in der Fachwelt in Frage zu stellen sind. Angesichts der neuen Erkenntnislage ist nicht davon auszugehen, dass sich anhand der Methodik der DFS mögliche Störungen eines VOR durch Windenergieanlagen allgemein und der hier betroffenen Windenergieanlagen im Speziellen bewerten lassen. Vielmehr existieren besser geeignete Methoden, die sich beispielsweise durch die Berücksichtigung der Flugzeugposition und der Signaleigenschaften (Amplitude, Phase, Richtung) auszeichnen.

Die einzelnen Aussagen in der folgenden Stellungnahme sind aus Gründen der Transparenz und Rückführbarkeit der Informationen mit exakten Quellenangaben versehen. Damit soll auch belegt werden, dass es sich tatsächlich um übereinstimmende Ansichten in der Fachwelt und nicht etwa um Einzelmeinungen handelt.

1. Neue Publikation der ENAC

Das Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung (nachfolgend: BAF) trifft gemäß § 18a Abs. 1 S. 2 LuftVG auf Grundlage einer gutachtlichen Stellungnahme der Flugsicherungsorganisation, im vorliegenden Fall der Deutschen Flugsicherung GmbH (nachfolgend: DFS), eine Entscheidung über die Möglichkeit der Störung der Flugsicherungseinrichtung (hier: VOR). Die DFS bewertet das Störungspotenzial nach Aussage des BAF² auf Grundlage des Ergebnisses einer Berechnungsmethode, die auf einer Publikation der ENAC aus dem Jahr 2008 basiert. Die Publikation trägt den Titel „Wind Turbine Effects on VOR System Performance“³.

Am 9. Januar 2017 veröffentlichte die ENAC einen neuen wissenschaftlichen Beitrag. Die Autoren erklären, dass zur Bewertung der Auswirkungen von Mehrwegeausbreitung auf ein VOR-Signal elektromagnetische Simulationen nötig seien.⁴ Im Speziellen brauche das VOR-Empfängermodell als Eingangsgrößen eine Abbildung der Amplitude, Phase und der Einfallrichtung der direkten und reflektierten

¹ Anlage zum Schriftsatz des BAF vom 18.05.2016, S. 4.

² Anlage zum Schriftsatz des BAF vom 18.05.2016, S. 4.

³ *Morlaas/Fares/Souny*, in: IEEE TAES, 44 (4) 2008, 1464.

⁴ *Claudepierre et al.*, in: IEEE TAES, Vol. 53, Issue 1, 2017, 247.

elektromagnetischen Wellen.⁵ Diese Ansicht deckt sich mit der Meinung anderer Fachleute auf dem Gebiet der elektromagnetischen Simulation von Einflüssen auf VOR-Signale durch Windenergieanlagen.⁶

Die genannten Eingangsgrößen vermag das Modell aus der Publikation des Jahres 2008, das die DFS als Grundlage für ihr Vorgehen nutzt, nicht zu liefern. Für eine physikalisch verlässliche Bewertung von möglichen Störungen sind also die komplexwertige Überlagerung aller am Flugzeugempfänger eintreffenden Signalanteile der Störobjekte sowie die entsprechenden Anteile der sonstigen Umgebung zu berücksichtigen.⁷ Das ist das wesentliche Merkmal einer validen Prognoseberechnung. Bereits aus dem Grund kann aus den Ergebnissen der DFS-Methodik in ihrer aktuellen Form kein Rückschluss auf die mögliche Störung des VOR durch die betreffenden Windenergieanlagen des Windparks gezogen werden.

2. Validierung von Modellen

Die Autoren der neuen Publikation weisen außerdem darauf hin, dass die in der Veröffentlichung aus dem Jahr 2008 vorgenommenen Vereinfachungen insbesondere aufgrund der damit verkürzten Berechnungsdauer erfolgt sind und dafür Einbußen bei der Ergebnisgenauigkeit in Kauf genommen wurden.⁸ Ein Kernmerkmal des neuen Ansatzes der ENAC aus dem Jahr 2017 ist, dass er die Ergebnisgenauigkeit erhöht und sich aufgrund der Abbildung des physikalischen Ausbreitungsverhaltens von direktem und gestreutem Signal mit Messungen abgleichen und somit validieren lässt.⁹

Eine solche unmittelbare Validierung ist die Voraussetzung für den Nachweis, dass ein Modell zur Abschätzung möglicher Störungen geeignet ist.¹⁰ Eine unmittelbare Validierung des bisherigen Ansatzes der DFS ist nicht möglich und stellt einen Grund dar, aus dem das Modell nicht wissenschaftlichen Ansprüchen genügt und noch nicht nachgewiesen wurde, dass es geeignet ist, um eine Aussage über mögliche Störungen von Drehfunkfeuern zu treffen.¹¹ Insbesondere ist die Aussage, das VOR werde durch die geplanten Windenergieanlagen des Windparks gestört, in Frage zu stellen.

3. Erkenntnisse aus Flugvermessungen

Die Autoren der ENAC führen auch die Ergebnisse von Flugvermessungen an, die im Rahmen der Studie durchgeführt wurden. Dabei wurden mehrere Radiale befolgen, wobei das Flugzeug sich stets ausgehend vom VOR in Richtung der überflogenen Windenergieanlagen bewegt hat. Um die konkreten Implikationen der Flugvermessungsergebnisse darzulegen und mit dem Ergebnissen der Flugvermessungsstudie der Airbus Space and Defence GmbH¹² abzugleichen, werden die Randbedingungen der ENAC-Vermessung und zentrale Befunde nachfolgend zusammenfassend vorgestellt.

⁵ Ebd.

⁶ So explizit: *Bredemeyer*, Fortführendes Gutachten, S. 44; *Greving/Biermann/Mundt*, Bewertung der DFS-Plausibilitätsmethode, S. 11.

⁷ Fn. 6.

⁸ *Claudepierre et al.*, in: IEEE TAES, Vol. 53, Issue 1, 2017, 247.

⁹ *Claudepierre et al.*, in: IEEE TAES, Vol. 53, Issue 1, 2017, 251.

¹⁰ *Bredemeyer*, Fortführendes Gutachten, S. 26–28; *Greving/Spohnheimer*, in: 15th IFIS Proceedings 2008, Abb. 17.

¹¹ Eine ausführliche Analyse in: *Greving/Biermann/Mundt*, Bewertung der DFS-Plausibilitätsmethode, S. 14.

¹² Vgl. dazu auch die Stellungnahme der Airbus Defence and Space GmbH vom 19.01.2018, Az. TEATE-021/18.

Abbildung 1 zeigt einen Kartenauszug des Gebiets um das im Rahmen der Studie untersuchte VOR Boulogne-sur-Mer. Das Radial 0° zeigt in der Abbildung nach Osten. Ausgehend davon wird in der Abbildung oben herum positiv bis 180° und unten herum hin negativ bis 180° (Westen) gezählt. Auf den Radialen -1° , -22° und -40° (Ostsüdost) befanden sich zu einem Untersuchungszeitpunkt mehrere Windenergieanlagen, in der Abbildung gekennzeichnet durch gelbe Kreise. Die Windenergieanlagen auf Radial -1° befanden sich in Entfernungen von 4,4 bis 5 km, die auf dem Radial -22° in Entfernungen von 3,5 bis 4,1 km. Die hier betreffenden Windenergieanlagen im Windpark liegen somit mehr als doppelt so weit vom VOR entfernt, wie die von der ENAC vermessenen Windenergieanlagen.

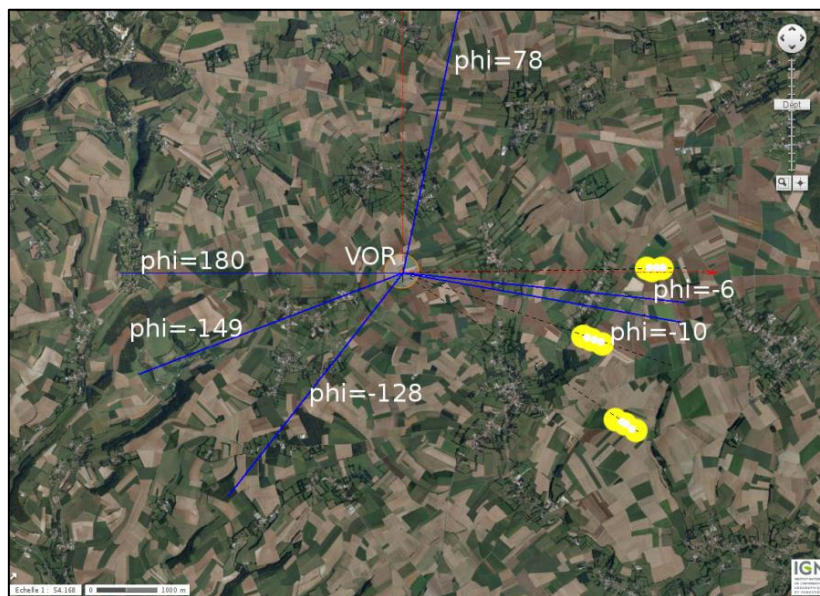


Abbildung 1: Position der von der ENAC beflogenen Windparks (gelb) und Radiale (blau), Quelle: Claudepierre et al., in: IEEE TAES, Vol. 53, Issue 1, 2017, 251.

Die in einer Höhe 3120 bis 3180 ft (= ca. 1 km) durchgeführten Flugvermessungen ergaben, dass bis zu einer Entfernung von 18,5 km – also einschließlich des Bereichs bis 15 km, der von der DFS als Prüfbereich für VOR definiert wird – Einflüsse auf das VOR-Signal in den bestehenden Umgebungseinflüssen untergingen und die Einflüsse einen Maximalwert von 1° nicht überschritten.¹³ Es wurde deutlich, dass der Einfluss der Windenergieanlagen völlig im Messrauschen untergeht. Die Ansicht, dass Einflüsse von Windenergieanlagen ab einer bestimmten Entfernung der Windenergieanlage vom VOR nicht mehr nachweisbar sind und im ansonsten vorhandenen Rauschen untergehen, deckt sich auch mit den Ansichten, die andere Experten anhand von Flugvermessungsergebnissen entwickelt haben.¹⁴

Ein weiteres Ergebnis der Messreihe war, dass Einflüsse auf dem Radial bei 78° unter Anwesenheit der Windenergieanlagen geringer ausfielen, als die Einflüsse auf dem Radial bei -10° .¹⁵ Das Ergebnis steht in direktem Widerspruch zu den physikalischen Überlegungen, anhand derer eine theoretische Fehlerverteilung im Raum bisher abgeschätzt wurde. Die theoretisch erwartete Fehlerverteilung wird auch

¹³ Claudepierre et al., in: IEEE TAES, Vol. 53, Issue 1, 2017, 252.

¹⁴ Greving/Spohnheimer, in: 19th IFIS Proceedings 2016, Abb. 14; Odunaiya, in: 14th IFIS Proceedings, 2006, 77 (78); Flugvermessungsstudie der Airbus Defence and Space GmbH und des Instituts für Flugführung der TU Braunschweig vom 22.02.2017.

¹⁵ Claudepierre et al., in: 10th EuCAP, 2016, S. 3.

als „Systemfehlerkurve“¹⁶ bezeichnet und stellt eine wesentliche Grundlage für das Berechnungsmodell der DFS dar. Sie nimmt an, dass die VOR-Systemfehlerkurven für die Bewertung möglicher Störungen herangezogen werden können.¹⁷ Dem folgend hätte jedoch gerade auf dem Radial bei 78° ein erhöhter Einfluss der Windenergieanlagen gemessen werden müssen. Der Befund deckt sich auch mit dem Ergebnis der Flugvermessungsstudie der Airbus Defence and Space GmbH und des Instituts für Flugführung der TU Braunschweig vom 22.02.2017, das eine den theoretischen Systemfehlerkurven folgende Verteilung von Einflüssen auf das VOR-Signal in den Messergebnissen ebenfalls nicht erkennen lässt.

Die theoretischen Grundlagen der DFS-Methodik stimmen folglich entweder nicht mit realen Gegebenheiten überein oder die tatsächlichen Einflüsse von Windenergieanlagen sind in ihrer quantitativen Ausprägung zu gering, um messtechnisch erfasst werden zu können. In beiden Fällen zeigen die neuen Erkenntnisse, dass die der DFS-Plausibilitätsmethode zu Grunde liegende Annahme, es ließe sich unter Heranziehung der VOR-Systemfehlerkurven eine mögliche Störung eines VOR ermitteln,¹⁸ wissenschaftlich nicht haltbar ist.

Es kann folglich anhand der Prognose der DFS vom 8. März 2016¹⁹ nicht davon ausgegangen werden, dass das Tatbestandsmerkmal der möglichen Störung nach § 18a Abs. 1 LuftVG im Falle des VOR durch die geplanten Windenergieanlagen des Windparks erfüllt ist.

4. Bedeutung des Signal-Scalloppings

Vor dem Hintergrund der Diskussion um die Nutzbarkeit der Systemfehlerkurven für die Störungsbeurteilung wird nachfolgend auf die Herleitung der Kurven eingegangen. Die Kurven ergeben sich aus einer Vereinfachung der vollständigen Berechnungsformeln für theoretische Winkelfehler aufgrund von reflektierten Anteilen eines VOR-Signals. Die Vereinfachung, die auch von der DFS als zulässig erachtet wird, besteht darin, dass anstatt des tatsächlichen Winkelfehlerverlaufs lediglich die lokalen Maxima und Minima des tatsächlich auftretenden Scalloppings betrachtet werden. Ein veranschaulichendes Beispiel dazu ist im Anhang zur Stellungnahme zu finden.

Die Autoren der neuen ENAC-Veröffentlichung bestätigen, dass sich Einflüsse von Störobjekten in Form des sogenannten Signal-Scalloppings – also schnellen Signaländerungen – äußern.²⁰ Bei steigender Anzahl an Streuobjekten ist Scallopping in Flugvermessungsergebnissen, aufgrund der oben erwähnten komplexen Überlagerung der Einzelsignale, immer weniger sichtbar.²¹ Im Ergebnis wird der Einfluss zusätzlicher Windenergieanlagen mit ihrer Anzahl immer geringer.²²

¹⁶ Zur Herleitung: *Anderson/Flint*, in: IRE Proceedings, 47 (5) 1959, S. 808–821; *Sengupta*, in: IEEE TAES, Vol. AES-11, Issue 1, 1975, 86 ff.

¹⁷ DFS, Bewertungsmethodik der DFS zur VOR-Beeinflussung durch Windenergieanlagen, Stand: März 2016, S. 11, 12.

¹⁸ DFS, Bewertungsmethodik der DFS zur VOR-Beeinflussung durch Windenergieanlagen, Stand: März 2016, S. 11, 12.

¹⁹ Anlage zum Schriftsatz des BAF vom 18.05.2016, S. 8.

²⁰ *Claudepierre et al.*, EuCAP 2017, 2057 (2059).

²¹ *Claudepierre et al.*, in: IEEE TAES, Vol. 53, Issue 1, 2017, 252.

²² *Greving/Spohnheimer*, in: 19th IFIS Proceedings 2016, 102 (105); *Claudepierre et al.*, EuCAP 2017, 2057 (2059).

Auch ein Vertreter der Ohio University, die von der DFS selbst u. a. im Rahmen des Verfahrens vor dem OVG Lüneburg²³ als Expertin hinzugezogen wurde, bestätigte diese Vermutung bereits es in einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2006:

„Es wird bemerkt, dass Windenergieanlagen nichts anderes als ein Hintergrundrauschen übermitteln oder abstrahlen, welches ähnlich zu jedem beliebigen nicht-abstrahlenden elektrischen Gerät ist.“²⁴

Aufgrund dieser Wirkung von Windenergieanlagen sind die Positionen der Maxima und Minima des Scalloping nicht exakt berechenbar.²⁵ Vielmehr kommt es zu komplexen Überlagerungen der verschiedenen reflektierten Signale am Flugzeugempfänger. Das Signalverhalten erfordert somit, auch nach Ansicht der ENAC-Autoren, eine statistische Betrachtung möglicher Einflüsse von Windenergieanlagen auf VOR-Signale.²⁶

Das Scalloping bei Einflüssen auf VOR-Signale wurde bereits 1975 in einer Publikation hergeleitet und beschrieben.²⁷ Der Autor erklärt, dass sich die Variation des Winkelfehlers in Abhängigkeit der Flugzeugbewegung aus einem langsam ändernden Anteil und einem überlagerten schnell oszillierenden Anteil (dem Scalloping) besteht.²⁸ Der langsam variierende Anteil wird als „Bend“ bezeichnet.

Ein Vergleich der DFS-Formeln mit den vollständigen theoretischen Winkelfehlerformeln für VOR²⁹ bestätigt, dass erstere das beschriebene Scalloping völlig vernachlässigen, indem in ihnen der entsprechende Faktor gar nicht berücksichtigt wird. Die DFS legt ihrer Plausibilitätsmethode stattdessen die Annahme zu Grunde, dass sich der Ort des schlimmsten anzunehmenden Fehlers (Worst Case) durch den Verlauf der Systemfehlerkurven bestimmen lässt.

Für die Bewertung möglicher Störungen von VOR durch Windenergieanlagen ist aber gerade die Berücksichtigung der Wirkungsweise der Einflüsse auf die Navigationsgüte aus Sicht des Luftfahrzeugs von besonderer Bedeutung. Daher sehen die einschlägigen Vorgaben für die Signalqualität von VOR (ICAO Doc 8071, Vol. I) auch verschiedene Spielräume für die oben beschriebenen Fehleranteile „Scalloping“ und „Bend“ vor.

Anhand der absoluten Benennung von Fehlerwerten, so von der DFS für die geplanten Windenergieanlagen im Windpark gemäß ihrer Stellungnahme vom 14.03.2016 (Az. 201600308)³⁰ unter Angabe eines maximalen Fehlers von 1,4° erfolgt, ist es folglich gemäß des Standes der Wissenschaft nicht möglich, auf das Störungspotenzial eines Bauwerks nach § 18a Abs. 1 LuftVG zu schließen. Vielmehr existieren Prognosemethoden, die sich an neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen orientieren und unter Berücksichtigung der elementaren Variablen und der tatsächlichen Wirkung von Einflüssen eine Abschätzung möglicher Störungen zulassen.

²³ OVG Lüneburg, Urt. v. 3. Dezember 2014, Az. 12 LC 30/12, Rn. 56.

²⁴ Odunaiya, in: 14th IFIS Proceedings, 2006, 77 (78).

²⁵ Claudepierre et al., in: IEEE TAES, Vol. 53, Issue 1, 2017, 252.

²⁶ Claudepierre et al., in: IEEE TAES, Vol. 53, Issue 1, 2017, 252.

²⁷ Sengupta, in: IEEE TAES, Vol. AES-11, Issue 1, 1975, 86 (88, Formel 16).

²⁸ Sengupta, in: IEEE TAES, Vol. AES-11, Issue 1, 1975, 86 (90, Formel 28). Ein weiterer Nachweis in: Odunaiya, in: 14th IFIS Proceedings, 2006, 77 (80).

²⁹ Sengupta, in: IEEE TAES, Vol. AES-11, Issue 1, 1975, 86 (88, Formel 16).

³⁰ Stellungnahme der DFS, S. 8.

5. Voraussetzungen für die statistische Bewertung möglicher Störungen

Die ENAC-Wissenschaftler erläutern, anknüpfend an die Notwendigkeit, den Einfluss von Windenergieanlagen statistisch zu ermitteln, in einer anderen Publikation:

„Damit ein Bauvorhaben zulässig ist, muss für gewöhnlich sichergestellt werden, dass der im Flug gemessene VOR-Fehler kleiner als ein bestimmter Grenzwert ist (üblicher Weise 3°). Dieser Fehler kann an einigen Positionen überschritten werden (üblicher Weise über 5 % der geflogenen Trajektorie). Quantile eignen sich perfekt für diese Art von Information.“³¹

Solange die Prognosemethode den bisher beschriebenen physikalischen Anforderungen genügt, fällt auch nicht so stark ins Gewicht, ob bei der Entscheidung über das Störungspotenzial nunmehr ein Grenzwert von 3°, abgeleitet aus IACO Annex 10, Att. C, oder 3,5° nach ICAO Doc 8071, Vol. I angesetzt wird. Wichtiger ist stattdessen, dass der Grenzwert nicht als absolutes Limit, sondern als Abschnitt in der stochastischen Verteilung möglicher Fehler verstanden wird. Dieser Ansicht sind unter anderem auch die Autoren der ENAC-Studien.³²

Zentral ist hier, dass Toleranzwerte in 95 % des betrachteten Raums (Radial, Orbit, andere Raumbereiche) überschritten werden dürfen (sog. 95 %-Regel). Diese von der ICAO gemäß Annex 10, Vol. I, Att. C, 3.7.3.4 explizit für VOR vorgesehene Prinzip erlaubt es, vereinzelt auftretende maximale Einflüsse von der Bewertung auszuschließen.

Die Vorgehensweise der DFS ist genau umgekehrt: sie gründet ihre Bewertungsmethodik genau auf den weniger häufig auftretenden maximalen Fehlern, welche die Grundlage für ihre Störungsbewertung darstellen. Der Methode liegt ein Ansatz zu Grunde, nach dem ausschließlich die lokalen Maximalwerte der Amplitude des oben beschriebenen Scallopings für die Berechnung herangezogen werden.

Aus dem Grund ist anzunehmen, dass die Methode fälschlicher Weise mögliche Störungen prognostiziert, obwohl physikalisch begründet keine zu erwarten sind. Diese Einschätzung trifft insbesondere auch für den geplanten Windpark zu.

Braunschweig, 26.01.2018

³¹ Claudepierre et al., in: 11th EuCAP 2017, 2057.

³² Claudepierre et al., EuCAP 2017, 2057 (2059).

Quellenverzeichnis

Anderson/Flint, The CAA doppler omnirange, in: Proceedings of the IRE 47 (5) 1959, S. 808–821.

Bredemeyer, Fortführendes Gutachten zur Interaktion zwischen Windenergieanlagen und dem DVOR MIC unter besonderer Betrachtung der Störwirkung auf den Empfänger. Abschlussbericht, erstellt für das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR), Braunschweig, 17.04.2015, abrufbar unter: https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/W/windenergie/Downloads/fortfuehrendesGutachtenWindenergie.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (abgerufen: 12.01.2018)

Claudepierre/Douvenot/Chabory/Morlaas, A Deterministic VOR Error Modeling Method – Application to Wind Turbines, in: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 53, Issue 1, 2017, S. 247–257

Claudepierre/Douvenot/Chabory/Morlaas, A Method for Computing the VOR Multipath Error – Comparisons with In-flight Measurements, in: 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2016, S. 1–5

Claudepierre/Douvenot/Chabory/Morlaas, Probabilistic VOR error due to several scatterers — Application to wind farms, in: 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2017, S. 2057–2060

DFS, Bewertungsmethodik der DFS zur VOR-Beeinflussung durch Windenergieanlagen, Stand: März 2016

Greving/Biermann/Mundt, Beschreibung, Technische Analyse und Bewertung der DFS-Plausibilitätsmethode („Prognoseberechnung“) für CVOR/DVOR (Drehfunkfeuer), NAVCOM Consult GmbH, Stand 19.02.2016

Greving/Spohnheimer, Status and Progress of System Simulations for ATC-systems-Examples, Results and Consequences, in: Proceedings of the 15th International Flight Inspection Symposium (IFIS), USA 2008

Greving/Spohnheimer, ATC-Systems and Wind-Turbines: Status of Numerical Simulations and Flight Measurements – Evaluation and Systematic Results of Examples, in: Proceedings of the 19th International Flight Inspection Symposium, Serbia 2016, S. 102–108

Morlaas/Fares/Souny, Wind turbine effects on VOR system performance, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 44 (4) 2008, S. 1464–1476

Odunaiya, Wind Farms and Their Effect on Radio Navigation Aids, Proceedings of the 14th International Flight Inspection Symposium (IFIS), Frankreich 2006, S. 77–80

Sengupta, Theory of Scalloping Amplitude Errors in Standard VOR Bearing Indications, in: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-11, Issue 1, 1975, S. 86 ff.

Anhang

Abbildung 2 zeigt das Beispiel einer Konfiguration für einen südlich des DVOR TAU geplanten Windparks, der im Rahmen einer Studie der NAVCOM Consult (Dr. Greving) im Jahr 2015 untersucht wurde.³³ Die orangene Kurve in Abbildung 3 ergibt sich aus der unveränderten Anwendung der DVOR-Formel der DFS:

$$\varepsilon_{Test} = \sum_1^{n_{Test}} \varepsilon_{Ref} \cdot \frac{h_{Test} - \frac{d_{Test}^2}{4100^2}}{h_{Ref}} \cdot \frac{d_{Ref}^4}{d_{Test}^4} \cdot \frac{1}{\max_{Besse!}} \cdot \frac{2A_{J1} \left[2\beta r \sin\left(\frac{\varphi_{Test} - \varphi}{2}\right) \right]}{\beta \cdot r} \cdot \cos\left(\frac{\varphi - \varphi_{Test}}{2}\right) \cdot \cos(\beta(r_0 - r_1) - \delta)$$

Der letzte Faktor der Formel enthält Variablen für die Wege des direkten (r_0) und des reflektierten (r_1) Signals. Die DFS trifft für ihre Berechnung die Annahme $r_0=r_1$, wodurch der Abstand des Störobjekts vom DVOR und der Abstand des Flugzeugs vom Störobjekt, also die Variablen, die für das Scalloping verantwortlich sind,³⁴ vernachlässigt werden. Die blaue Kurve in Abbildung 3 zeigt das Ergebnis der Formel unter Berücksichtigung der tatsächlichen Werte für r_0 und r_1 aus Abbildung 2 aus der Perspektive eines Flugzeugs in 20 NM (= ca. 38 km) Entfernung.

Zu erkennen ist, dass die Annahme $r_0=r_1$, also die Vernachlässigung des Scalloping, zu einer starken quantitativen Überschätzung des theoretischen Winkelfehlers bei vielen Windenergieanlagen führt. Darüber hinaus verliert das Ergebnis der vereinfachenden Berechnung auch seine qualitative Richtigkeit, wie am Vergleich mit einer numerischen Simulation gezeigt werden soll. Die rote Linie in Abbildung 4 zeigt das Ergebnis einer elektromagnetischen Simulation desselben Szenarios unter Berücksichtigung der komplexen Überlagerung des direkten und der indirekten Signalanteile am Flugzeug.

Es zeigt sich, dass die Methodik der DFS Winkelfehler aufgrund ihrer starken Vereinfachung generell stark überschätzt. Aus dem Grund sollte für die Prognose möglicher Störungen nach § 18a Abs. 1 LuftVG eine numerische Simulation den vereinfachenden Formeln vorgezogen werden. Auch wenn das aufgeführte Beispiel sich auf ein DVOR bezieht, ist es prinzipiell auch auf VOR übertragbar.

³³ Greving/Biermann/Mundt, Systemtechnische Untersuchung und Beurteilung der Effekte von 10 Windenergieanlagen ENERCON E115 im Windpark „Taunuskamm“ auf die DVOR TAU (Taunus) der DFS, Gutachten im Auftrag der ESWE Taunuswind GmbH vom 16.04.2015.

³⁴ Anderson/Flint, in: IRE Proceedings, 47 (5) 1959, S. 808 (813).

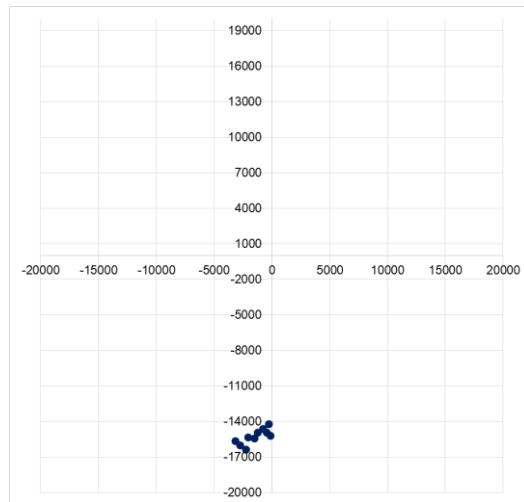


Abbildung 2: Windenergieanlagen-Konfiguration 1 gem. für das DVOR TAU durchgeführter Untersuchung.

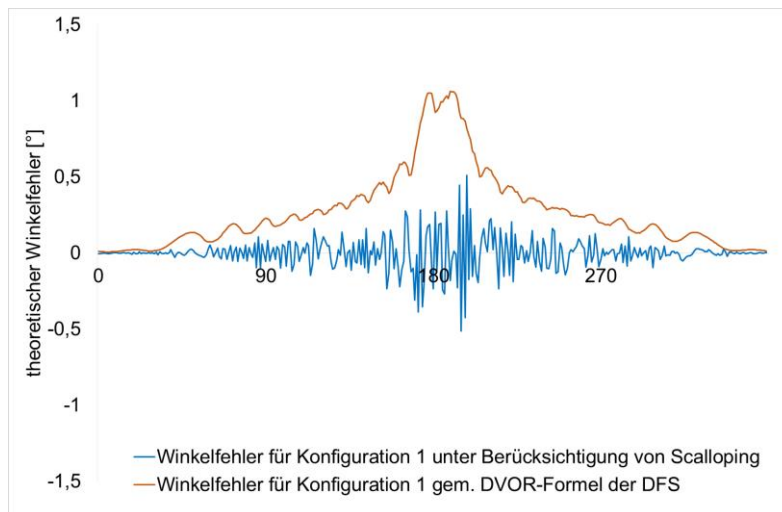


Abbildung 3: Auswirkung der Annahme der DFS "Weg des direkten Signals = Weg des indirekten Signals".

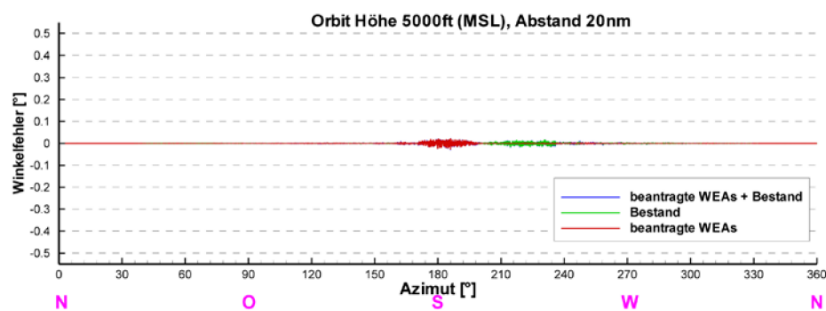


Abbildung 4: Ergebnis einer elektromagnetischen Simulation der NAVCOM für Konfiguration 1 (Methode: IPO)³⁵.

³⁵ Greving/Biermann/Mundt, Systemtechnische Untersuchung und Beurteilung der Effekte von 10 Windenergieanlagen ENERCON E115 im Windpark „Taunuskamm“ auf die DVOR TAU (Taunus) der DFS, Gutachten im Auftrag der ESWE Taunuswind GmbH vom 16.04.2015.