

Flight Calibration Services

Gutachten zur Interaktion zwischen Windenergieanlagen und DVOR-Anlagen der Flugsicherung

Vergabenummer ZB-U0-13-0689000-4121.1

— Abschlussbericht —

(Kurzfassung)

erstellt für das

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume
des Landes Schleswig-Holstein (LLUR)

Hamburger Chaussee 25
24220 Flintbek

Verfasser:

Dr.-Ing. Jochen Bredemeyer



*Öffentlich bestellter und vereidigter
Sachverständiger für Funknavigations-
und Radaranlagen der Flugsicherung
(Ingenieurkammer Niedersachsen)*

Braunschweig, 06.03.2014

1 Zusammenfassung

In diesem Gutachten ist zu klären, welcher Fehleranteil der Zielgröße "Azimutwinkel" beim Doppler-Drehfunkfeuer Michaelsdorf (DVOR MIC) durch die bereits errichteten Windenergieanlagen (WEA) in der Nähe entsteht und ob einige zusätzliche, im Genehmigungsverfahren befindliche WEA diesen etwaigen Wert weiter messbar erhöhen würden.

Nur bei bestimmten Flugmanövern in geringer Höhe weit außerhalb der zulässigen Nutzung der Funknavigationsanlage ist ein Effekt reproduzierbar und messbar. Bei größeren Höhen nimmt die nachweisliche Störung durch WEA stark ab und wird vollständig vom Rauschen der dynamischen Messumgebung überlagert. Die Herleitung dieser Effekte erfolgt auf Basis von durchgeführten Sondervermessungen mit Hubschrauber und Vermessungsflugzeug. Dazu werden in dieser dynamischen Umgebung auf Signalebene des DVOR Einflüsse aus der näheren Umgebung von denen aus größerer Entfernung auf Signalebene eindeutig getrennt.

Die am stärksten fehlerbehafteten Winkelbereiche sind eindeutig auf Störungen im Nahfeld zurückzuführen und keinesfalls auf WEA im Bestand. In der Folge bestehen für die untersuchten Winkelbereiche des DVOR MIC auf Signalebene keine Bedenken, dass durch einige zusätzliche WEA ein messbares Störpotential hinzukommen könnte.

Die fiktive Konstruktion eines "Worst-Case-Szenarios" in Abhängigkeit von Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten ist aufgrund des Ausmaßes der in diesem Gutachten gezeigten dynamischen Effekte unerheblich, da ausgeschlossen werden kann, dass hierdurch jemals ein durch die Flugvermessung oder bei der regulären Nutzung des DVOR messbarer Einfluss auf die Signalqualität entstehen würde.

Es zeigt sich darüber hinaus, dass die unterschiedliche Dynamik des Messfluges auf Kreisen und Radialen differenzierbare Effekte auf Signalebene hervorruft und insbesondere der Winkelfehler durch das Phasenrauschen des DVOR-Referenzsignals beim Kreisflug größer ist als auf den Radialen. Dies erfordert eine separate Bewertung des vorhandenen Fehleranteils unter Berücksichtigung der tatsächlichen Nutzung der Anlage, z.B. auf Radialen der An- und Abflugverfahren von Flughäfen.

Alle in diesem Gutachten getätigten Äußerungen und Folgerungen beziehen sich technisch ausschließlich auf ein Doppler-VOR und örtlich betrachtet auf das DVOR MIC. Eine direkte Übertragung auf ein konventionelles VOR (CVOR) und dessen Sensitivität für Mehrwegeausbreitung elektromagnetischer Wellen durch umgebende Objekte ist aufgrund einer anderen Funktionsweise dieser Anlage unzulässig.

2 Gutachterlicher Auftrag

Das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein beteiligt im Rahmen des immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahrens für Windkraftanlagen u.a. auch den Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein (LBV SH) als zuständige Luftfahrtbehörde des Landes, um – sofern erforderlich – eine Zustimmung nach luftverkehrsrechtlichen Vorschriften einzuholen. Nach §18a Abs. 1 Luftverkehrsgesetz (LuftVG) dürfen Bauwerke nicht errichtet werden, wenn dadurch Flugsicherungseinrichtungen gestört werden können. Hierzu leitet der LBV SH nach Vorprüfung in einem internen Verwaltungsverfahren den Vorgang zur Entscheidung dem Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung (BAF) zu, das seinerseits die betroffene Flugsicherungsorganisation, im hier zu betrachtenden Fall also die DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, beteiligt.

In der Nähe von Heringsdorf, Ostholstein, befindet sich das Doppler-UKW-Drehfunkfeuer (DVOR) Michaelsdorf. Unter Berufung auf §18a LuftVG auf Basis von Gutachten der DFS zur potentiellen Störwirkung von Windenergieanlagen (WEA) auf das Nutzsignal des DVOR sind zwischenzeitlich vermehrt Zustimmungen zu Anträgen auf Errichtung von WEA innerhalb der Eignungsgebiete versagt worden, die innerhalb des Anlagenschutzbereichs 15km um das DVOR liegen. Dieser wurde von der ICAO (Internationale Zivilluftfahrt-Organisation) 2009 neu definiert [Quelle: ICAO EUR DOC 015] und 2010 in Deutschland umgesetzt.

Die bisher verwendeten Methoden zur Bewertung des Störpotentials von WEA basieren auf vereinfachenden Simulationen der elektromagnetischen Wellenausbreitung, einem simplen Modell des Funknavigationsempfängers und Interpretationen der Ergebnisse der konventionellen Flugvermessung eines VOR. Da hierbei eine ganze Reihe von Unsicherheitsfaktoren auftreten, stellt dies die Aussagekraft und die Schlussfolgerungen in Bezug auf §18a LuftVG insgesamt in Frage.

Grundlage dieses Gutachtens ist ein neuer Ansatz, der auf Messungen des Signals im Raum bei der Flugvermessung deutlich vor der Signalverarbeitung in einem Navigationsempfänger basiert sowie auf absoluten Feldstärkemessungen an definierten Positionen im Anlagenschutzbereich. Hiermit werden die wesentlichen Fehlerquellen und Annahmen einer reinen Simulation durch messtechnische Fakten ersetzt. Im Detail soll dieses Gutachten Antworten zu folgenden Fragestellungen liefern:

- Welchen Beitrag zum bestehenden Winkelfehler des DVOR liefern die Reflexionen bestehender WEA und wann treten diese auf?
- Können die zu errichtenden und bisher abgelehnten WEA innerhalb des Anlagenschutzbereiches von 15km generell Effekte oberhalb des Rauschens hervorrufen, die messtechnisch nachweisbar sind?

- Können zusätzlich zu errichtende WEA im ungünstigsten Fall solche Reflexionen hervorrufen, dass dadurch der bereits vorhandene Winkelfehler mit diesem Zusatz tatsächlich messbar erhöht wird?
- Sind häufig zitierte Studien und deren Veröffentlichungen in Zusammenhang mit WEA und VOR geeignet, um sie für die Prognose einer potentiell verschlechterten Signalqualität zu nutzen?

3 Durchgeführte Messungen

Die Vermessung des DVOR MIC mit der speziellen Messeinrichtung SISMOS (Signal-in-Space Monitoring System) gliedert sich in drei Teilaufgaben:

3.1 Hubschraubermessflüge

Mit einer speziellen, von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) rückführbar kalibrierten Antenne und SISMOS, die beide als Außenlast unter einem Hubschrauber hingen, wurden Feldmessungen des VOR-Signals im quasi-stationären Schwebезustand an einigen ausgewählten Punkten nahe dem Boden durchgeführt. Neben der Analyse des zeitdynamischen Verhaltens im Interferenzfeld des Bodens und vorhandener Bebauung sollte hierbei auch die Messung der absoluten Feldstärke an einigen bestehenden und potentiellen Aufbauorten von WEA in verschiedenen Höhen erfolgen.

3.2 Flugvermessung mit zusätzlicher Aufnahme des Signals im Raum

Zur Gewinnung von Messdaten für den speziellen Zweck dieses Gutachtens wurde ein Messprogramm für die Flugvermessung geplant, welches zusätzlich zu den konventionellen Ergebnissen des Flugvermessungssystems (FIS) durch Einrüstung von SISMOS die Speicherung von Empfängerrohdaten der Funkfeldumgebung des DVOR MIC ermöglicht.

Dieser Teil der Flugvermessung wurde nach Instrumentenflugregeln (IFR) in 3500ft Höhe durchgeführt und war somit weitestgehend wetterunabhängig. Er umfasste das Fliegen von Kreisen um das DVOR sowie von ausgewählten Radialen.

3.3 Flugvermessung im Tiefflug

Zur direkten Messung von Reflexionseigenschaften bestehender WEA wurden Tiefflüge auf Radialen mit dem Vermessungsflugzeug in verschiedenen Höhenbändern beginnend ab 600ft durchgeführt. Mittels der Dopplerfrequenzmethode können durch die Auswertung im Frequenzbereich die Signalstärken des DVOR sowie ihre Reflektionen separiert werden, sodass der Einfluss von WEA auf das empfangene Signal direkt abzuleiten ist.

4 Zusammenfassung der Messergebnisse

Hinweis: Die Messgrafiken und deren detaillierte Diskussion sind in dieser Kurzfassung des Abschlussberichts nicht enthalten.

Die Analyse des aufgezeichneten DVOR-Bandpasssignals mit separater Behandlung der einzelnen Teilkomponenten durch Software-Demodulation zeigt, dass zwischen Effekten unterschieden werden muss, die einerseits in unmittelbarer Umgebung (Nahfeld) eines DVOR und andererseits durch Reflexionen nahe dem Boden in größerer Entfernung entstehen.

Reflexionen von Hindernissen wie WEA oder auch andere, z.B. die des Bodens an Geländekanten in größerer Entfernung, beeinflussen vornehmlich die beim DVOR eigentlich als stabil angesehene 30Hz-Referenzphase (amplitudenmoduliert, AM), indem durch die dynamische Umgebung reflektierende Komponenten im Durchlassbereich des 30Hz-Filters Flugzeug-Navigationsempfängers wirksam werden. Dieses Phasenrauschen wirkt auf Kreisflügen stärker als auf Radialflügen und nimmt mit zunehmender Flughöhe ab. Bewegt sich das Vermessungsflugzeug in geringer Höhe (z.B. 600ft) zwischen VOR und mehreren WEA, so kann durch die große Dopplerverschiebung des Trägers auch ein 30Hz-Seitenband kurzzeitig stark betroffen sein. In der Summe wird das durch den Einfluss des Bodens vorhandene Phasenrauschen der 30Hz-AM jegliche Reflexion von Teilen einer oder mehrerer WEA im Nutzersegment des DVOR in größeren Höhen (z.B. 3600ft) vollständig überlagern.

Es wurden bei den Flugvermessungen verschiedene, auch orthogonal zueinander liegende Radiale vermessen, bei denen der dominante dynamische Effekt immer wieder reproduzierbar aufgetreten ist. Hieraus lässt sich ableiten, dass die Windrichtung und damit die Stellung der Rotorebenen zum DVOR und Empfangsantenne eine untergeordnete Rolle spielt.

Nachweisbare Wirkungen auf die 30Hz-Umlaufphase (frequenzmoduliert, FM) entstehen hingegen vornehmlich durch Reflexionen im elektromagnetischen Nahfeld des DVOR und äußern sich darin, dass beim Umschalten der Phasen durch die 25 Antennenpaare der DVOR-Anlage Effekte auftreten, die sich im elektromagnetischen Fernfeld bei der Flugvermessung als Phasensprünge auswirken. Dies kann sowohl durch nahe statische Objekte wie auch sehr wahrscheinlich durch Bewuchs ausgelöst werden.

Die Hubschraubermessungen haben gezeigt, dass die Verteilung der Feldstärke an verschiedenen Stellen um das DVOR nahe dem Boden auch bei gleichen Entfernungen uneinheitlich ist. Dies wird ausgelöst durch Geländeeigenschaften (Höhen, Permeabilität und Permittivität) und bestehende Bebauung (Gebäude, Hochspannungsmasten/leitungen, WEA). Die Charakterisierung eines einfallenden Feldes zur Simulation von Streueigenschaften von WEA wird hierdurch sehr komplex. Weiterhin haben die Messungen der DVOR-Signaleigenschaften bereits im quasistationären Schwebezustand ergeben, wie empfindlich die 30Hz-AM-Phase in einer dynamischen Umgebung mit starken Reflexionen vom Boden ist.

Der Einfluss des Dopplereffekts im 30Hz-AM-Seitenband und damit auf den Azimutwinkel durch Rotation der WEA kann vernachlässigt werden. Im Spektrum müsste sich eine nennenswerte Reflexion des Trägers im Spektralbereich von $\pm 30^\circ$ zeigen, was aber aufgrund der viel zu geringen Streuung an den WEA-Rotorblättern nicht der Fall ist und selbst bei Messungen in unmittelbarer Nähe nicht nachzuweisen ist.

5 Betrachtung häufig zitierter Quellen

Für die Bewertung der Störeeigenschaften von WEA auf das Signal von CVOR und DVOR werden einige Literaturquellen häufig zitiert und als Grundlage einer Sachverständigenbewertung herangezogen. Eine davon ist die Studie der französischen "Ecole Nationale de l'Aviation Civile" (ENAC) mit dem Titel „Wind Turbine Effects on VOR“ aus dem Jahr 2008. Die Autoren wenden für die Berechnung der Streueigenschaften von einzelnen WEA detaillierte CAD-Modelle an und berechnen das Streufeld mit der Momentenmethode (asymptotisch exakte Lösung der Maxwell-Gleichungen). Statt aber als einfallendes Feld eine elektromagnetische Welle über dem Boden zu betrachten, wird die Modellannahme dahingehend unzulässig vereinfacht, dass eine ebene Welle angenommen wird, für die die Fernfeldformeln gelten. Unter dieser Voraussetzung werden dann Radarrückstreuquerschnitte (RCS) in verschiedenen Drehrichtungen des Rotors berechnet, um daraus den "Worst-Case" abzuleiten.

Die Anwendbarkeit dieser Fernfeldannahme setzt allerdings voraus, dass über die gesamte Höhe der WEA in einer bestimmten Entfernung zum VOR immer dieselbe Amplitude und Phase auftreten würden. Dass dieses so nicht der Realität entspricht, lässt sich sowohl durch Simulation der Abstrahlungseigenschaften der (D)VOR-Antenne über dem Boden nachweisen als auch durch die Ergebnisse der Feldstärkemessung mit dem Hubschrauber in verschiedenen Höhen. Dieselben Autoren führen in einer weiteren Veröffentlichung ein verbessertes Modell der Wellenausbreitung über dem Boden ein und revidieren darin einige wesentliche ihrer ursprünglichen Annahmen aus erstgenannter Studie. Eine Validierung durch geeignete Messungen über realem Gelände fand jedoch nicht statt.

Weiterhin wird mit den Ergebnissen dieser Vereinfachungen ein statisches Empfängermodell gespeist, welches nur die Umlaufphase für den Fall des DVOR berücksichtigt. Aus den Messergebnissen dieses Gutachtens geht aber nunmehr hervor, dass das für das DVOR gerade nicht zulässig ist, da vor allem die 30Hz-AM-Referenzphase ein starkes Rauschen durch Mehrwegeausbreitung aufweist. Das Rauschen entsteht durch das dynamische Verhalten der Funkfeldumgebung, was im Empfängermodell völlig unberücksichtigt bleibt. Ein Studium der Quelle Nr. 4 der ENAC-Veröffentlichung (Ohio University) belegt, dass tatsächlich nur die Umlaufphase beim DVOR Berücksichtigung findet.

Allein die beiden genannten Probleme stehen einer Nutzung der Ergebnisse vollständig entgegen. Von einem weiteren Gebrauch der ursprünglichen ENAC-Studie als Grundlage für die Vorhersage des Störpotentials von WEA wird daher vom Verfasser dieses Gutachtens dringend abgeraten.

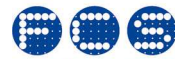
6 Schlussfolgerungen und Konsequenzen

Als wesentliche Erkenntnis für das LLUR als Auftraggeber dieses Gutachtens lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass zumindest die beantragten WEA außerhalb von 3km des DVOR MIC errichtet werden können, ohne dass hierdurch eine messbare Störung des VOR-Signals oberhalb des Rauschens entstehen wird.

Es soll jedoch nicht der Eindruck erweckt werden, als könne man hieraus sofort die Anlagenschutzbereiche für alle DVOR pauschal neu definieren. An einigen wenigen, noch auszuwählenden Anlagen in Deutschland sollten Messungen ähnlich wie in diesem Gutachten bei DVOR MIC durchgeführt werden, um das Reflexionsverhalten der Bebauung am Boden mit oder ohne WEA zu vermessen. Aus einer erhöhten Stichprobenanzahl heraus würde sich dann eine gesicherte Prognose ergeben.

Das wichtigste technisch-wissenschaftliche Ergebnis dieses Gutachtens besteht darin, dass der dominante, dynamische Effekt der Mehrwegausbreitung und ihr Durchgriff auf den Azimutwinkelfehler eines DVOR zweifelsfrei nachgewiesen werden konnte, indem das Signal in seine Bestandteile zerlegt und diese getrennt voneinander analysiert wurden. Daraus ergibt sich unmittelbar, dass eine rein statische Betrachtung des Problems insbesondere auch als Prognose des Störpotentials schwacher Reflexionen durch eine Simulation unzulässig ist, da ihr Ergebnis in einer realen Funkfeldumgebung immer durch die dynamischen Anteile vollständig überlagert wird. Dies schließt gleichzeitig die Anwendung eines einfachen Empfängermodells aus, das für das DVOR nur die statischen Anteile der 30Hz-FM-Umlaufphase berücksichtigt. Lediglich die Wirkung großer, statischer Objekte auf die FM-Phase könnte durch eine Simulation im elektromagnetischen Nahfeld nachgebildet werden, da ihr Ausmaß das des AM-Phasenrauschens übersteigt. Der direkte Einfluss von Signalstörungen des DVOR durch WEA besteht hingegen nur dann, wenn auf Tiefflügen zwischen DVOR und WEA Doppler-verschobene Linien in den Bereich von 30Hz gelangen. Für die betriebliche Nutzung des DVOR ist dies aber unerheblich.

Die Messergebnisse in diesem Gutachten belegen den Unterschied der Wirkung des dynamischen Verhaltens auf Kreis- und Radialflügen. Für die Beurteilung der Vorbelastung eines DVOR durch bestehende Störungen sollte daher zukünftig nicht allein der Winkelfehler des Kreisfluges herangezogen werden.



Es wird empfohlen, nach der Entfernung des Bewuchses in unmittelbarer Umgebung des DVOR MIC eine erneute Flugvermessung mit SISMOS durchzuführen, um insbesondere die veränderte Wirkung auf die 30Hz-FM-Phase des Nahfeldes messtechnisch nachzuvollziehen. Damit sollte sichergestellt sein, dass die seit Anfang 2013 festgestellten und weiter angewachsenen Winkelfehler der genannten Radialbereiche deutlich verringert werden. Hiermit einher ginge weiterhin die zuverlässige betriebliche Nutzbarkeit des Radials 182° (SID RAMAR 4J) , das derzeit in keinem gebrauchsfähigen Zustand ist.