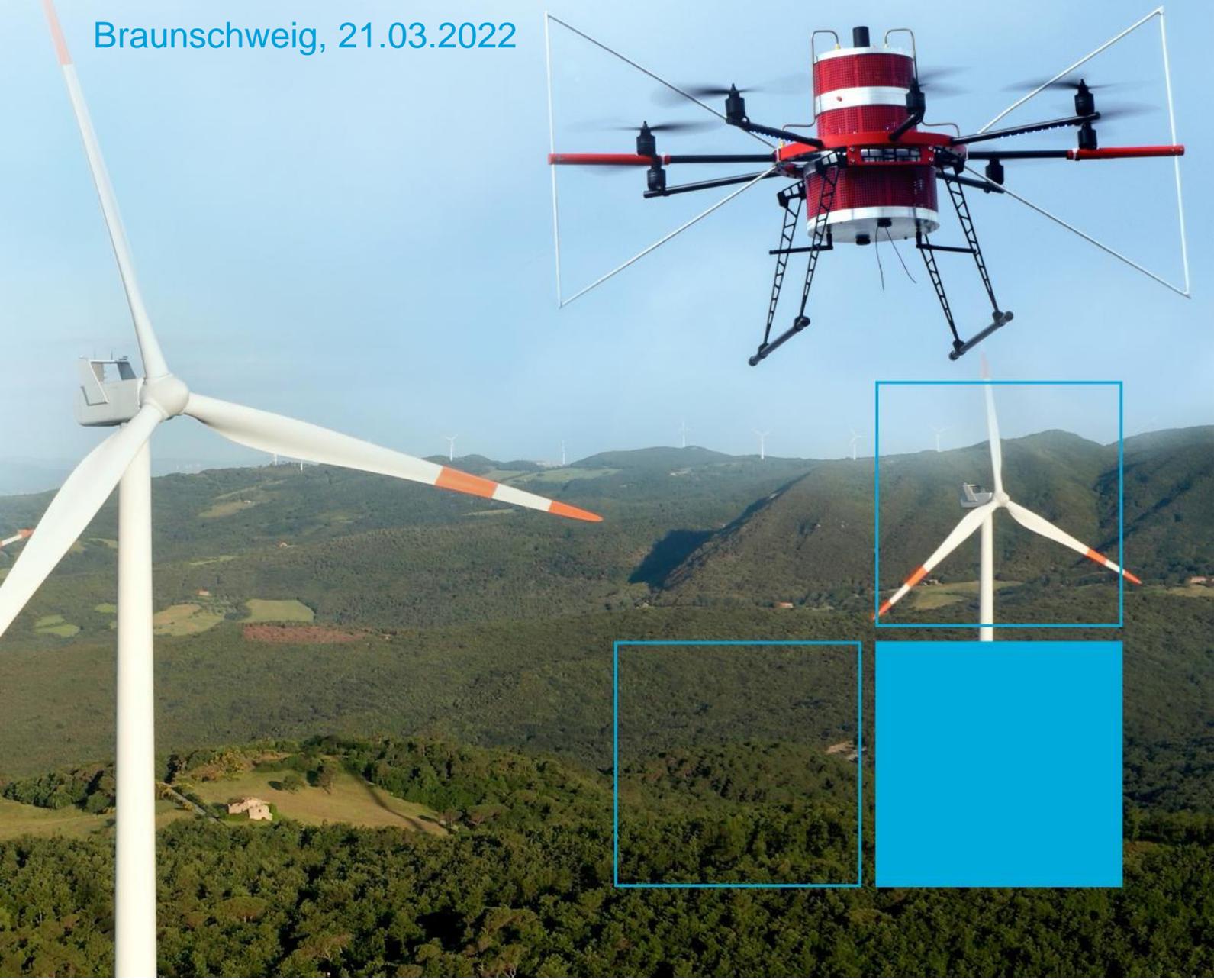


Bericht zur Wechselwirkung von Windenergieanlagen mit terrestrischer Navigation/Drehfunkfeuern

Erkenntnisse und Empfehlungen aus den
Projekten WERAN und WERAN plus

Braunschweig, 21.03.2022



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Abteilung 1- Mechanik und Akustik

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Telefon: (0531) 592-1010
Telefax: (0531) 592 69 1010
www.ptb.de

<https://doi.org/10.7795/120.20220401>

Version 1.1

Projektkoordination für WERAN und WERAN plus

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schrader
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
0531 592 1010
thorsten.schrader@ptb.de

Dir. u. Prof. PD Dr.-Ing. Thomas Kleine-Ostmann
0531 592 2200
thomas.kleine-ostmann@ptb.de

Dipl.-Phys. Bartosz Powierza
bartosz.powierza@ptb.de

Verbundpartner

Leibniz Universität Hannover (LUH)

Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik
Appelstraße 9a
30167 Hannover
0511 762 3760
garbe@geml.uni-hannover.de

Jade Hochschule, Wilhelmshaven/ Oldenburg / Elsfleth (JHS)

Prof. Dr.-Ing. Jens Werner
Fachbereich Ingenieurwissenschaften
Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik, Funksysteme, EMV
Friedrich-Paffrath-Str. 101
26389 Wilhelmshaven
04421 985 2250
jens.werner@jade-hs.de

Karsten Schubert M.Sc.
04421 985 2176
karsten.schubert@jade-hs.de

Jade Hochschule Wilhelmshaven / Oldenburg / Elsfleth (JHS)

Prof. Dr.-Ing. Jens Wellhausen
Fachbereich Ingenieurwissenschaften
Labor für Marine Sensorik
Friedrich-Paffrath-Str. 101
26389 Wilhelmshaven
04421 985 2961
jens.wellhausen@jade-hs.de

TU Braunschweig

Prof. Dr. Harald Löwe
Institut Partielle Differentialgleichungen
Universitätsplatz 2
38106 Braunschweig
0531 391 7401
h.loewe@tu-braunschweig.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
1.1	Abgeleitete Empfehlungen.....	9
2	Ergebnisse aus den Projekten WERAN und WERAN plus.....	11
2.1	Entwicklung von Wissenschaft und Technik bis zum heutigen Stand.....	11
2.1.1	Ergebnisse aus dem Projekt WERAN: Vor-Ort-Messung und Numerische Simulation .	12
2.1.2	Entwicklung der Prognosetools im Projekt WERAN plus	15
2.1.3	Entwicklung der Vorbelastungsanalyse in WERAN plus.....	17
2.1.4	Zulässiger Gesamtfehler der Bodeninstallation bei DVOR.....	20
2.1.5	Anlageneigener Fehler bei DVOR	21
2.1.6	Beiträge von Baukränen zum Winkelfehler.....	22
2.1.7	Beiträge von Hochspannungsleitungen zum Winkelfehler	22
2.1.8	Zur empirischen Validierung der DVOR-Bewertungsmethode der DFS.....	22
2.1.9	Zum Geringfügigkeitskriterium.....	22
2.1.10	Zusammenarbeit mit der DFS.....	23
2.1.11	Einschätzung des fachlichen Vorgehens der DFS im Bereich der Hochfrequenz- Messtechnik und des Anlagenschutzes.....	23
3	Abgeschlossene und offene wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele.....	24
3.1	Abgeschlossene Arbeitsziele	24
3.2	Validierung	25
3.3	Neuer Ansatz für die Berechnung des Winkelfehlers bei DVOR	32
3.4	Systemgrenzen	32
3.5	Offene Arbeitsziele	33
4	Weiteres Vorgehen.....	34
4.1	Perspektive für Behörden und Organisationen mit öffentlichem Auftrag.....	34
5	Erläuterungen zum verringerten Prüfradius bei DVOR	36
5.1	Parameterstudie für einen Windpark am Beispiel des DVOR Bremen	36
6	Pragmatischer Lösungsvorschlag für CVOR.....	40
7	Literaturverzeichnis.....	42
8	Abkürzungsverzeichnis	45
9	Anhang Zukunft der VOR.....	46

1 Einleitung

Ausgangslage

Sollen Windenergieanlagen (WEA) in der Nähe von Einrichtungen der Luftraumüberwachung (Flugsicherung, Luftverteidigung), der Funknavigation (Flugsicherung) sowie der Wetterbeobachtung (Wetterradar und UHF-Windprofiler) errichtet werden, kann dies wegen möglicher Signalstörungen zu Einschränkungen im Betrieb dieser Einrichtungen führen. Gemäß §18a Absatz (1) Luftverkehrsgesetz dürfen Bauwerke nicht errichtet werden, wenn dadurch Flugsicherungseinrichtungen gestört werden können. Dazu entscheidet das Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung (BAF) auf der Grundlage einer gutachterlichen Stellungnahme der Flugsicherungsorganisation (hier: DFS Deutsche Flugsicherung GmbH). Das Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung teilt seine Entscheidung der zuständigen Genehmigungsbehörde des Landes mit.

Die bisherige Praxis ist seitens des Bundesverwaltungsgerichts in Leipzig vom 07.04.2016 zu §18 a LuftVG und Doppler-Drehfunkfeuern (DVOR) – BVerwG 4 C 1.15 – bestätigt. Dazu hat Rechtsanwalt Jann Berghaus, Fachanwalt für Verwaltungsrecht, Aurich, auf der Konferenz „Windenergierecht“ des Bundesverbandes Windenergie e.V. am 21.06.2016, das Urteil des BVerwG erläutert. Zitat: „So lange die Ausgangsannahmen und Aussagen des behördlichen Sachverständigengutachtens (hier der DFS GmbH) nicht im Sinne der Rechtsprechung qualifiziert in Zweifel gezogen werden können bzw. widerlegt werden, gilt die bisherige Praxis. Sollte sich durch Fortentwicklung der einschlägigen wissenschaftlichen Erkenntnisse und Standards eine für die Feststellung der möglichen Störung einer Flugsicherungseinrichtung bestimmte Methode oder für die Risikobewertung ein bestimmter Maßstab durchgesetzt haben und gegenteilige Meinungen als nicht mehr vertretbar angesehen werden, so haben dies DFS und BAF in ihren Gutachten bzw. Entscheidungen zu berücksichtigen.“ Zitat Ende.

Eine wissenschaftliche Weiterentwicklung der Bewertungsmethode zur Störwirkung ist also die einzige verbliebene Möglichkeit, durch genauere und erprobte Verfahren mehr Windenergieanlagen im Sinne der unabdingbaren Energiewende zulassen zu können, wenn keine Störungen im Sinne des §18a LuftVG auftreten, also auch der Anlagenschutz von Navigationseinrichtungen der Luftfahrt gewährleistet bleibt.

Dieser Bericht behandelt die in Deutschland überwiegend verbauten Doppler-Drehfunkfeuer (DVOR), enthält aber auch einen Vorschlag für die älteren konventionellen Anlagen (CVOR). Die verbliebenen CVOR sollen mittelfristig abgeschaltet oder durch die moderneren DVOR ersetzt werden. Die Drehfunkfeuer (VOR) stehen nach der satellitengeführten Navigation sowie der DME/DME-Navigation erst an dritter Stelle in der Reihenfolge der zur Navigation eingesetzten Sensoren, haben also eher eine Back-Up-Funktion in der modernen Luftfahrt (s. Anhang 9). VOR dienen zur Angabe des Kurswinkels eines Luftfahrzeugs in Bezug auf magnetisch Nord. Die Ablage wird im Cockpit als Zeigerinstrument (CDI – *Course Deviation Indicator*) aus dem gefilterten Ausgang des bordeigenen Navigationsempfängers dargestellt und geht in die Flugführung des Autopiloten ein.

Die Internationale Organisation der zivilen Luftfahrt (ICAO) hat Empfehlungen erstellt, die von der Planung, der Inbetriebnahme und der Verwendung bis zur Wartung solcher Sendefunkeinrichtungen (hier Drehfunkfeuer) und Überwachung durch die reguläre Flugvermessung nach ICAO DOC 8071 [1] reichen. Entsprechende Verweise finden sich auch für die Flugverfahrnsplanung, die auf der sicheren

Funktion der Navigationseinrichtungen basiert und die die Flugrouten sowie die Flugbewegungen im dreidimensionalen Raum sicher staffelt. Aus wirtschaftlichen und umwelttechnischen Gründen werden heute möglichst direkte Flugrouten (RNAV - *area navigation*) gewählt. Bei Nutzung des VOR lassen sich gemäß ICAO 8071:2018 Absatz 8.1.2 „The use of VOR is limited to RNAV5.“ bestenfalls 5 nautische Meilen Ablage (Abweichung vom eigentlichen Kurs) bezogen auf die Reichweitengrenze von 80 NM erreichen (entsprechend 3,6°). In Folge der Erkenntnisse aus WERAN/WERAN plus werden 3,5 Grad als maximal zulässiger Fehler angenommen.

Problemstellung

Als Grundlage der gutachterlichen Stellungnahme der Flugsicherungsorganisation in Bezug auf eine potentielle Störwirkung von neuen WEA ist das im Luftraum vorliegende Signal (*Signal-in-Space*) heranzuziehen, welches vom Boden abgestrahlt wird und durch Reflexionen an Objekten in der Nähe eines VOR verfälscht werden kann. Die Objekte können z.B. nahestehende Bäume, Hochspannungsleitungen, Gebäude und Industrieeinrichtungen sein, aber auch das Terrain und Berge oder Höhenzüge. Diese Einflüsse werden als Vorbelastung subsummiert. Das Signal im Luftraum stellt immer die Überlagerung aller Störeinflüsse im Raum dar, unabhängig von der Quelle der Störung. Welcher Abstand der Objekte zum VOR noch relevant für eine Störwirkung ist, war ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen. Er kann bei hohen Objekten durchaus einige km betragen. Laut dem ICAO Dokument EUR DOC 015 [2] sind Gebäude ab einem Abstand von 3 km nicht mehr zu berücksichtigen (zu prüfen), der Prüfradius bei WEA und DVOR reicht bis 10 km, bei CVOR bis 15 km. Die Prüfradien bei Bauwerken und WEA sind also nicht konsistent im ICAO-Regelwerk.

Zur Begutachtung der gesamten Störwirkung sind neben der angesprochenen Vorbelastung noch mindestens die Faktoren maximal erlaubter Winkelfehler des VOR, der anlageneigene Winkelfehler sowie die Prognose des Störbeitrags einer neu zu errichtenden Windenergieanlage zum Winkelfehler zu untersuchen. Inwieweit das zuvor von der DFS angewandte, selbst entwickelte Verfahren einer ingenieurwissenschaftlichen Betrachtung standhält, wurde durch einen systemischen Ansatz der Forschungskonsortien in WERAN¹ und WERAN plus² untersucht.

Problemlösung

Erst mit den Ergebnissen des Projektes WERAN¹ lassen sich die Störwirkungen von WEA auf Drehfunkfeuer wissenschaftlich untersuchen und sowohl qualitativ als auch quantitativ bewerten. Hier wurde international erstmalig der Einfluss von WEA auf Drehfunkfeuersignale messtechnisch nachgewiesen. Mit der neu entwickelten **drohnenbasierten Hochfrequenz-Messtechnik** lassen sich die Eigenschaften realer Funkübertragungskanäle bestimmen, die auf der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen beruhen, unabhängig davon, ob es sich um terrestrische Navigationsanlagen wie VOR und Instrumentenlandesysteme, die Windprofiler oder Wetterradaranlagen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) oder die zivile und militärische Luftraumüberwachung handelt. Die ebenfalls in WERAN und WERAN plus entwickelten **numerischen Simulationsmethoden und nachgeschalteten mathematischen Verfahren** erlauben die Berechnung dynamischer Prozesse der Wechselwirkung von WEA mit VOR. Die Ergebnisse

¹ Verbundvorhaben WERAN - *Wechselwirkung Windenergieanlagen mit terrestrischer Navigation und Radar*, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (WERAN_FKZ 0325644A-D)

der numerischen Simulationen des Übertragungskanals lassen sich nunmehr **messtechnisch validieren**, weil sowohl die Messtechnik als auch die Simulation die gleichen physikalischen Größen – elektromagnetische Felder - heranziehen. Dazu wird bis auf die Signalebene die Auswirkung von Störgrößen untersucht.

Werden die veränderten Signale in die Funktionsmodelle der betrachteten Anlage eingespeist, lässt sich daraus der Effekt auf die zu liefernde Nutzinformation (Zielgröße) ableiten. Der Betreiber der Funknavigationsanlage definiert daraus unter betrieblichen Aspekten die eigentliche Störung bzw. den Grad der Beeinträchtigung.

Im Projekt WERAN plus² werden momentan neue, einfache Bewertungsverfahren für die **Prognose des Winkelfehlers von Drehfunkfeuern** nach Zubau von WEA entwickelt und erprobt, sowohl für CVOR als auch für DVOR. Diese sollten möglichst auf Bürorechnern lauffähig sein und im Bereich von Minuten realistische Ergebnisse liefern. Basierend auf der neuen Hochfrequenz-Messtechnik in einem manntragenden Motorsegler sowie den numerischen Simulationen aus WERAN und WERAN plus lassen sich diese einfachen Bewertungsverfahren durch entsprechende Messungen an realen Anlagen, in realen Szenarien und mit realen Signalen validieren. Simulationen mit gezielt veränderten Betriebsparametern helfen, ein verbessertes Verständnis über die Wirkung einzelner Parameter zu erhalten.

Um bereits **vorhandene Vorbelastungen eines Drehfunkfeuers** zu erfassen und zu bewerten, wurden bisher Orbitflüge um VOR benutzt. Diese werden neben den Radialflügen standardmäßig durch die Flugvermessung durchgeführt, um z.B. die Nordausrichtung von VOR zu überprüfen. Es konnte jedoch in WERAN plus gezeigt werden, dass die Nutzung dieser Daten als Vorbelastung nicht im Einklang mit ICAO Doc 8071 [1] ist, noch eine sinnvolle Bewertung der Vorbelastung erlaubt. Die im Projekt WERAN plus neu entwickelte Doppler-Kreuzpeilung [3] hingegen erlaubt bei DVOR die Lokalisierung von Störern (reflektierender Objekte) und die Messung ihrer Intensität. Diese lassen sich auf einer Karte darstellen [4] (Radar-Begriff: „Clutter-Map“), um z.B. mit „Google Maps“ diese Störeffekte konkret einem Objekt aus einem Luftbild zuweisen zu können. Darüber hinaus lassen sich diese Objekte der Clutter-map in das neue Bewertungsverfahren einfügen. Die Clutter-Map berücksichtigt alle möglichen Störer, auch bereits vorhandene WEA.

In WERAN plus werden zusätzlich zu den Themenblöcken „Bewertung der Störwirkung“ und „Vorbelastungsanalyse“ auch die Fragen nach dem **erlaubten maximalen Winkelfehler von Drehfunkfeuern** (3,5° statt momentan 3°) sowie der **anlageneigene Fehler von Drehfunkfeuern** (momentan 2°) mit der DFS diskutiert. Neben der Auswirkung von Hochspannungsleitungen auf den Winkelfehler (bisher unberücksichtigt) konnte auch der Einfluss von Baukränen gezeigt werden.

Damit lassen sich in einem komplett neu aufgesetzten Bewertungsprozess die Wirkung von WEA auf das Signal im Luftraum von Doppler-Drehfunkfeuern qualitativ und quantitativ bewerten.

² Verbundvorhaben WERAN plus - Wechselwirkung Windenergieanlagen und terrestrische Navigation/Radar plus, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (WERAN plus_FKZ 0324252A-D)

1.1 Abgeleitete Empfehlungen

Durch die systematische Betrachtung und Validierung der Wechselwirkung von Windenergieanlagen und Drehfunkfeuern, beginnend bei der Vor-Ort-Messtechnik der Signale im Luftraum, der numerischen Simulation mit nachgeschalteten mathematischen Verfahren, der Entwicklung neuer Prognoseverfahren zur Beschreibung der Wechselwirkung, der Studie des internationalen Empfehlungsrahmens von ICAO sowie den zahlreichen Diskussionen mit externen Fachexperten von Flugsicherungsorganisationen, Lotsen, Rechtsexperten sowie den seit 2016 jährlich stattfindenden Tagungen der EMWT (*Specialist Meeting on Electromagnetic Waves and Wind Turbines*), des IEA Wind TCP (Internationale Energieagentur, *Technology Collaboration Programme for Cooperation in the Research, Development, and Deployment of Wind Energy Systems*), *Topical Expert Meeting #100*, Aviation System Cohabitation [5] zum wissenschaftlichen Diskurs sowie auch der inhaltlichen Auseinandersetzung mit BAF und DFS, kommen die Autoren zu dem Schluss, dass **das bisherige Vorgehen zur Bewertung von WEA-Bauvorhaben nicht mehr angemessen ist und dringend überarbeitet werden sollte**. Es wurde festgestellt, dass die grundsätzliche Systematik des Vorgehens der DFS national wie international nicht gebräuchlich ist.

Durch den Erkenntnisgewinn der beiden Projekte lässt sich jetzt sehr viel genauer die Auswirkung von Hindernissen auf die Signale von Drehfunkfeuern im Raum und den Winkelfehler beschreiben. Damit ergeben sich bessere Handlungsmöglichkeiten und neue Perspektiven für die Windenergie, ohne die Flugsicherheit zu beeinträchtigen. Für die Autoren liegt die nicht verhandelbare Sicherheit des Flugbetriebs gleichauf mit der Verantwortung, im Rahmen der Möglichkeiten Quellen regenerativer Energie zu erschließen.

Der Ausgleich beider legitimer Interessen auf der Basis metrologischer und systemischer Ansätze stellte immer den Leitfaden innerhalb der WERAN-Projektfamilie dar. Die Autoren gehen von einer zeitgleich möglichen Umsetzung der im folgenden beschriebenen Maßnahmen beim DVOR aus. Eine isolierte säulenhafte Betrachtung hat sich mit fortschreitendem Projektverlauf als überholt und nicht mehr angemessen gezeigt. Eine genauere Erläuterung der einzelnen Kriterien finden sich in Kapitel 2.

Folgende Maßnahmen werden beim DVOR empfohlen:

1. Maximal erlaubter Winkelfehler von 3,5°
2. Maximaler DVOR-anlageneigener Winkelfehler von 1,5°
3. Neue Analyse der Vorbelastung durch die Doppler-Kreuzpeilung
4. Verwendung der modellbasierten Prognose (3.0)
5. Entfall des nicht ICAO-konformen „Geringfügigkeitskriteriums“

Grundsätzlich wäre zu empfehlen, dass das BAF bei seiner Entscheidung zur Genehmigung von Bauwerken neben der gutachterlichen Stellungnahme des Anlagenbetreibers auch auf unabhängige gutachterliche Stellungnahmen zurückgreifen könnte. Die derzeitige Rechtsgrundlage schließt dies jedoch aus.

Das WERAN/WERAN plus-Konsortium gelangt zu der Ansicht, dass strukturelle Defizite innerhalb der DFS und die fehlende Nähe zu wissenschaftlichen Betrachtungsweisen die Kompetenz einschränken. Allein Erfahrungswerte und die Bewertung von Messergebnissen der Flugvermessung gemäß ICAO DOC 8071 [1] sind unzureichend, um die übertragene Aufgabe des Anlagenschutzes vollumfänglich wahrzunehmen. Es ist zu überprüfen, in welchen Teilen die Deutungshoheit über den Anlagenschutz

bei der Flugsicherungsorganisation verbleiben kann. Als Begründung dient die Einführung des sogenannten „Geringfügigkeitskriteriums“ seitens der DFS (s. Abschnitt 2.1.9), welches in unkontrolliertem Maße und ohne jegliche Validierung den Aufbau von nahezu allen WEA im Anlagenschutzbereich ermöglicht, selbst die, die nach ICAO-Kriterien abzulehnen wären. Diese überraschende Abkehr vom vorher praktizierten Verfahren hebt den Anlagenschutz de facto aus, sodass die Aufgabe der Flugsicherungsorganisation im Sinne des § 18a LuftVG hinsichtlich der Drehfunkfeuer nicht mehr erfüllt wird.

Es wird außerdem die Übernahme des Schweizer Modells mit der Einrichtung einer zentralen Prüfstelle für Raumordnungs- und Planungsverfahren zur Beschleunigung der Planungsvorgänge empfohlen (s. Abschlussbericht des IEA *Topical Expert Meeting #100, Aviation System Cohabitation* [5]).

Unter Beachtung der Maßnahmen 1. – 5. könnte sofort eine Reduktion des Prüfradius um DVOR auf 7 km erfolgen, da Windparks mit 100 WEA und einer Turmhöhe von jeweils 200 m bei größeren Abständen nur noch geringen Einfluss auf den Winkelfehler von DVOR haben (vgl. Kapitel 5). Er liegt ab 10 km Abstand in der Größenordnung der täglichen Schwankung des Erdmagnetfelds, wodurch magnetisch Nord, also der Bezug der Kursangabe, wandert. Eine Verringerung des Prüfradius auf 6 km erscheint aus technischer Sicht mit vertretbaren Auswirkungen machbar, wird aber vom WERAN plus Projektkonsortium nur bedingt empfohlen.

Unterhalb von 6 km Abstand zum DVOR ist immer eine Einzelfallentscheidung für Bauanträge von WEA zu treffen, um den Anlagenschutz und damit einen sicheren Flugbetrieb zu gewährleisten.

Die Bundesministerien BMWK und BMDV sollten die Weiterentwicklung der Doppler-Kreuzpeilung sowie deren Überführung in den Regelbetrieb durch geeignete Fördermaßnahmen begleiten. Ein aktuell offenes Arbeitsziel stellt die operative Nutzbarmachung der Doppler-Kreuzpeilung bei der Flugvermessung dar. Eine entsprechende Förderskizze wurde eingereicht, vgl. Az. -100579055.

2 Ergebnisse aus den Projekten WERAN und WERAN plus

2.1 Entwicklung von Wissenschaft und Technik bis zum heutigen Stand

Drehfunkfeuer (CVOR/DVOR-Anlagen) dienen Luftfahrzeugen zur Navigation. Hierzu sendet eine VOR/DVOR-Anlage ein speziell moduliertes Funksignal aus, welches als Nutzinformation unter anderem eine Winkelinformation enthält, welche demjenigen Radial entspricht, in welches das Funksignal gesendet wurde. Diese Winkelinformation kann von einem VOR-Empfänger demoduliert und interpretiert werden.

In realen Umgebungen empfängt ein Luftfahrzeug nicht nur das Funksignal entlang der Sichtverbindung zwischen DVOR und Flugobjekt, da es unter anderem an Gebäuden und Geländeunebenheiten zu Reflexionen kommen kann (siehe Abbildung 1). Diese zusätzlichen Signale können dazu führen, dass die demodulierte Winkelinformation von der idealen Winkelinformation abweicht, da die reflektierten Signale unter Umständen abweichende Winkelinformationen enthalten. Die Differenz zwischen idealer Winkelinformation und tatsächlicher Winkelinformation des *Signal-in-Space* wird als Winkelfehler (engl. *Bearing Error*) bezeichnet, welcher inklusive anlageeigenem Fehler einen Wert von in Zukunft $3,5^\circ$ (bisher 3°) nicht überschreiten darf.

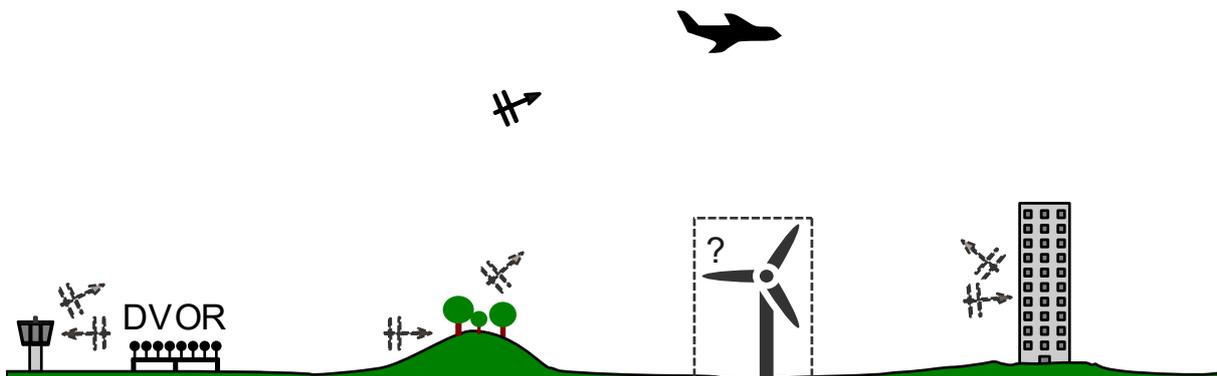


Abbildung 1: Reale Umgebung mit neu zu errichtender Windenergieanlage mit schematischer Darstellung der Wellenausbreitung. Die Farbtintensität einer jeden Welle ist hier als Maß für die Amplitude zu verstehen.

Aufgabe einer Winkelfehler-Prognose im Rahmen der Genehmigung des Baus einer neuen Windenergieanlage ist es, die Einhaltung des maximal zulässigen Winkelfehlers bei Einfügung der neuen WEA in die bestehende Umgebung zu überprüfen.

In den Projekten WERAN und WERAN plus wurde der wissenschaftliche Erkenntnisstand zur Änderung der Signale von Drehfunkfeuern im Raum durch Hindernisse wie Windenergieanlagen in allen Teilbereichen stark verbessert. Grundsätzlich ist es nicht möglich, aus den Messdaten der konventionellen Flugvermessung die Beiträge einzelner Objekte zu einem Winkelfehler qualitativ und quantitativ abzuleiten. Die örtliche und zeitliche Auflösung, Aufnahme und Filterung der Messdaten eines Flugvermessungssystem (FIS - *Flight Inspection System*) lassen dies per se nicht zu. Derartige Messsysteme erlauben nur eine Validierung der Funktionalität der Sendefunkanlagen entlang der Flugrouten, eine wissenschaftliche Identifikation und Analyse der einzelnen Störungen ist jedoch nicht möglich. Gerade diese technischen Möglichkeiten sind aber zur Beurteilung der Störwirkung von WEA-Neubauten oder

bei Repowering essentiell notwendig und wurden in den Projekten WERAN und WERAN plus entwickelt.

Verfahren der Beurteilung von neuen Windenergieanlagen

Die DFS hat für die Beurteilung der Störwirkung die in Gl. 1 gezeigte Formel zu Grunde gelegt.

$$\Delta\varphi_{max} \geq \Delta\varphi_{anlage} + \sqrt{\Delta\varphi_{Vorbelastung}^2 + \Delta\varphi_{Prognose}^2} \quad \text{Gl. 1}$$

Dabei sind $\Delta\varphi_{max}$ der maximal erlaubte Winkelfehler, $\Delta\varphi_{anlage}$ der anlageneigene Winkelfehler, $\Delta\varphi_{Vorbelastung}$ der Winkelfehler durch bereits vorhandene Gebäude, Türme, nahe Vegetation, etc. und $\Delta\varphi_{Prognose}$ der Beitrag der neuen WEA zum Winkelfehler. Die DFS hat diese Formel mit den folgenden Ansätzen nach Gl. 2 genutzt.

$$3 \geq 2 + \sqrt{\Delta\varphi_{Orbit}^2 + \Delta\varphi_{Prognose}^2} \quad \text{Gl. 2}$$

Alle vier Eingangsgrößen nach Gl. 1 wurden wissenschaftlich untersucht, inwieweit diese richtig verwendet werden, ob die Methoden zur Ermittlung der Eingangsgrößen wissenschaftlich belastbar sind und wie groß die einzelnen Beiträge zum Gesamtfehler sind. Bei den im weiteren Fortgang beschriebenen Vor-Ort-Messungen wird der im Luftraum tatsächlich vorliegende Winkelfehler $\Delta\varphi_{ist}$ als Überlagerung aller Beiträge zum Winkelfehler gemessen und in Relation zum maximal erlaubten Winkelfehler $\Delta\varphi_{max}$ gesetzt.

2.1.1 Ergebnisse aus dem Projekt WERAN: Vor-Ort-Messung und Numerische Simulation

Durch die vorliegenden Ergebnisse aus dem **Projekt WERAN** lassen sich die durch Windenergieanlagen (WEA) oder andere Hindernisse verursachten Signalveränderungen (Winkelfehler bei VOR, $\Delta\varphi_{ist}$) von terrestrischen Navigationsanlagen im Übertragungskanal sowohl direkt messen als auch dynamisch simulieren (z.B. die Drehbewegung der Rotoren von WEA). Darüber hinaus lassen sich die Störungen auch konkret einem Objekt zuordnen. Aus den gemessenen Rohdaten kann z.B. bei Drehfunkfeuern der Durchgriff der Signaländerung auf die Zielgröße direkt angegeben werden. Sowohl die Signalveränderung als auch deren Ausbreitung und Verteilung im Raum lassen sich durch Messungen und numerische Simulationen auf einem Großrechner bestimmen und vergleichen sowie an vorhandenen realen Anlagen gegenseitig validieren. Im Falle von Rechnungen können auch Vorhersagen bzgl. der Störwirkung für neue WEA erfolgen.

Dies wurde möglich, weil die komplexe, kaskadierte Signalkette in den linearen Teil der elektromagnetischen Feldausbreitung im Übertragungskanal einerseits und die nicht-lineare Auswertung (z.B. beim Luftüberwachungsradar oder bei der FM-Demodulation im VOR-Empfänger) andererseits aufgetrennt wurde. Die lineare Überlagerung der Feldgrößen lässt sich sowohl in den Messungen als auch in den Simulationen bestimmen.



Abbildung 2: Übersicht von Messmöglichkeiten und Simulationstechnologien aus den Projekten WERAN und WERAN plus.

Die Abbildung 2 zeigt eine Übersicht über Messmöglichkeiten und Simulationstechnologien, die in den Projekten WERAN und WERAN plus entwickelt wurden.

Vor-Ort-Messtechnik

Für die Messungen stehen dabei verschiedene Flugmessplattformen bereit. Dazu gehören die ferngesteuerten Multikopter ([6] , [7]) mit einem Flugradius von ca. 1 km, <https://www.drohnen.de/tag/hisystems-gmbh/>, der ferngesteuerte FW-VTOL (Fixed-Wing Vertical-Take-off and Landing, www.germanndrones.de) mit einem Aktionsradius von ca. 100 km sowie der mantragende Motorsegler Jade One mit einer Reichweite von bis zu 1000 km (s. Abbildung 2).

Um während der Messungen das korrekte Radial zu bestimmen, wird mit dem aus dem GPS oder differentiellen GPS bekannten Ort des Multikopters im Luftraum sowie dem bekannten Standort des VOR über eine einfache Geometrie das aktuelle Radial bestimmt (vgl. Abbildung 3).

Numerische Simulation und Zeitbereichsmethode

Die numerischen Simulationen berechnen die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Raum, ausgehend von einem sehr detaillierten Funktionsmodell des DVOR. Die Physik der Wellenausbreitung inkl. der Reflexion, Beugung und Streuung an Objekten ist inhärent in der Simulation enthalten. Derartige Simulationen komplexer Geometrien wie Windparks laufen nur auf Großrechnern mit entsprechendem Speicher und hoher Rechenleistung. Mit Hilfe eines eigenen Softwarealgorithmus (Zeitbereichsmethode) werden aus den Simulationen der elektromagnetischen Felder die Winkelfehler errechnet [8]. Dies fassen die Autoren unter dem Begriff Vollwellensimulation zusammen.

Für die Anwendung der Zeitbereichsmethode wird zunächst das gesamte Szenario modelliert. Neben der DVOR-Anlage kann das Szenario sowohl beliebige Objekte wie Windenergieanlagen, Freileitungsmasten, Gebäude, Baukräne und Zäune als auch die Topographie der Umgebung beinhalten. Das Modell wird anschließend mit einem kommerziellen Simulationsprogramm elektromagnetisch mehrfach simuliert. Hierbei werden alle 51 bzw. 49 Einzelantennen der DVOR-Anlage separat als Quelle betrachtet (s. Abbildung 3: Simulationsmodell einer DVOR-Sendeeinrichtung, und die jeweiligen elektromagnetischen Felder in den zuvor definierten Analysepunkten entsprechend ermittelt. Diese dienen als Eingangsgröße für den nachgeschalteten Algorithmus der Zeitbereichsmethode, die daraus den sog. Winkelfehler als Zielgröße in jedem simulierten Analysepunkt berechnet. Die Zeitbereichsmethode [8] wurde im Rahmen des Verbundprojektes WERAN entwickelt und berücksichtigt sowohl alle relevanten Signaleigenschaften auf physikalischer Ebene als auch eventuelle Bewegungsabläufe eines dynamischen Szenarios.

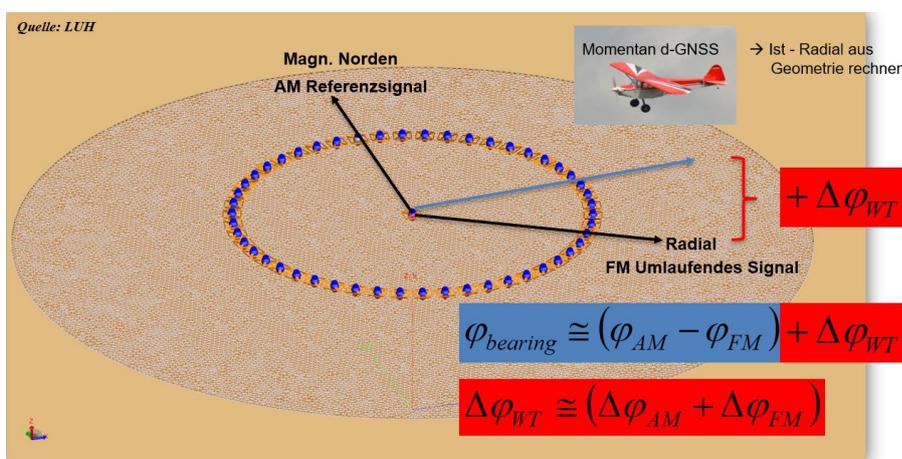


Abbildung 3: Simulationsmodell einer DVOR-Sendeeinrichtung.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft das Abstrahldiagramm der DVOR-Mittenantenne (rotationssymmetrisch zur Mittelachse des DVOR). Nach oben lässt sich ein Einzug im Abstrahlungsdiagramm, der sogenannte



Abbildung 4: Numerisch simuliertes Abstrahlungsdiagramm der Mittenantenne des DVOR.

„cone of silence“, erkennen. Der schräg nach oben verlaufende Anteil des Antennendiagramms ist das

eigentliche Nutzsignal. Das Abstrahldiagramm wird in Abbildung 5 nochmals verwendet, um die grundsätzliche Geometrie des Problems der Wechselwirkung zwischen DVOR und WEA zu diskutieren.

Mit diesem wissenschaftlichen Erfolg aus dem Projekt WERAN ist nunmehr die Basis geschaffen, die potentielle Störwirkung von WEA im Luftraum vorherzusagen und diese im Luftraum nachzuweisen.

2.1.2 Entwicklung der Prognosetools im Projekt WERAN plus

Da weder die Messung des Fehlerbeitrags von WEA $\Delta\varphi_{Prognose}$ noch die Beurteilung der Vorbelastung $\Delta\varphi_{Vorbelastung}$ einer DVOR-Umgebung durch WEA anhand der konventionellen Flugvermessung möglich waren, wurden im **ersten Excel-basierten Prognosetool der DFS** sowohl bestehende als auch neue WEA als zusätzliche WEA berechnet. Das Excel-Tool nutzt ein Ergebnis von Morlaas ([9], [10]) der für eine Referenz-WEA mit 95 m Höhe in 4000 m Entfernung und für eine Elevation von 1° einen Referenz-Winkelfehler von $0,08^\circ$ numerisch simuliert hatte. Durch einen empirischen Vorfaktor wurde der Referenzfehler für WEA mit anderen Höhen und Entfernungen angepasst. Für die Beurteilung eines Windparks mit mehreren WEA wurden die Beträge alle Winkelfehler aufsummiert.

Eine Analyse dieser Prognosemethode ergab deutliche Schwachstellen, die in der **vom Konsortium modifizierten (und von der DFS momentan benutzten) Variante DFSM** vermieden werden. So werden die Fehlerbeiträge nun vorzeichenrichtig zum Gesamtfehler addiert und nicht mehr einfach die Beträge der Fehlerbeiträge einzelner WEA aufsummiert. Ein Einheitenfehler wurde ebenfalls korrigiert sowie der Scaloping-Term eingeführt.

Auch die DFSM überlagert weiterhin Winkelfehler anstelle der elektromagnetischen Felder. Diese Evolution der Prognosemethode war der einfachen Argumentationskette für die DFS und der erwarteten Machbarkeit der Umsetzung geschuldet. Die Ergebnisse waren hinreichend genau im Vergleich zur Vor-Ort-Messung und zur Simulation, wenn auch aus wissenschaftlicher Sicht nicht zufriedenstellend. Parallel zur DFSM wurde die Prognosemethode AFIS (Anderson Flint Integral Solution) entwickelt, die bereits die einzelnen Felder überlagert und dann erst nachfolgend aus der Überlagerung den Winkelfehler bestimmt. Damit war neben der Vor-Ort-Messung und der Vollwellensimulation eine weitere Möglichkeit der Validierung gegeben.

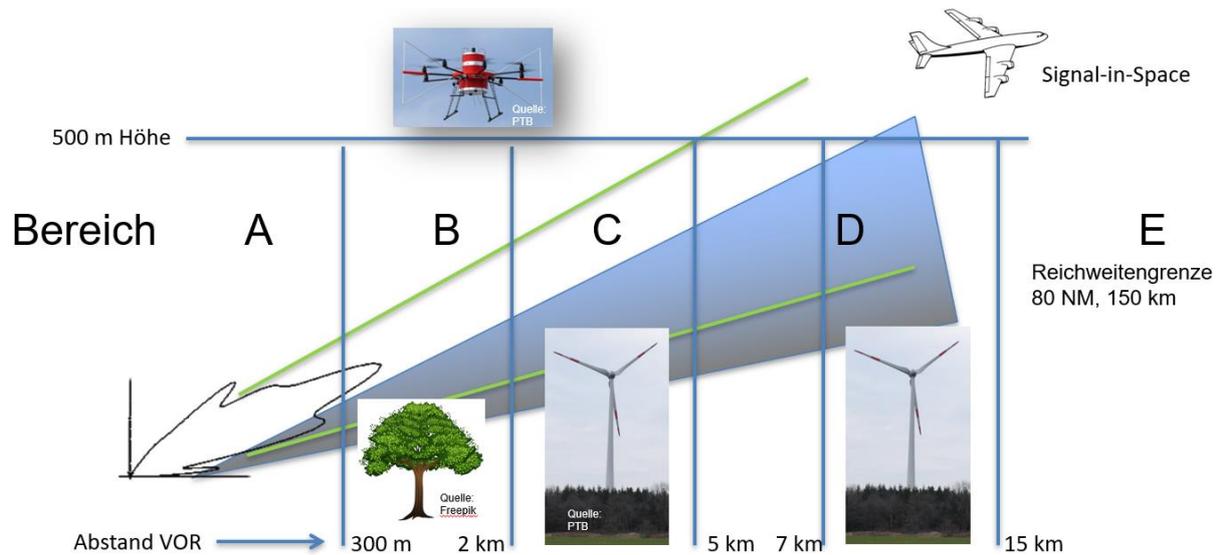


Abbildung 5: Geometrie des Problems der Wechselwirkung zwischen dem DVOR-Signal und der Umgebung. Links ist ein Teil des Abstrahldiagramms der Zentralantenne gezeigt (vgl. Abbildung 4). Diese elektromagnetischen Wellen können im Bereich A z.B. an Bäumen oder im Bereich C an Windenergieanlagen reflektiert werden. Die Wirkung dieser Mehrwegeausbreitung werden an der Reichweitengrenze im Bereich E für den Luftraum (Signal-in-Space) ausgewertet. Die vertikalen Linien deuten mögliche Flugpfade für den Otokopter an, der bis zu einer Höhe von 500 m eingesetzt wurde. Im Bereich D leuchtet das Abstrahlungsdiagramm Hindernisse nur noch gering aus, daher verringert sich eine mögliche Wechselwirkung stark.

Die jetzt in WERAN plus neu entwickelten Prognoseverfahren 3.0 für DVOR als auch CVOR nutzen eine analytische Beschreibung der Feldausbreitung, der Phase und der 3D-Reflexion an Hindernissen. Die direkten Felder und die indirekten Felder der Mehrwegpfade werden an den Punkten im Raum überlagert und daraus der resultierende Winkelfehler berechnet [11]. Das ist im Grunde auch der tatsächliche physikalische Vorgang, der zu Winkelfehlern bei VOR führt. Weiterhin entfällt die empirische Anpassung der Daten durch einen Vorfaktor, dieser wird nun durch ein physikalisches Modell ersetzt. Eine Analyse des Winkelfehlers kann im gesamten Raum erfolgen, wobei der maximale Fehler - wie auch im 3D-AFIS berechnet - im Bereich niedriger Elevationen auftritt. Objekte lassen sich durch ihre 3D-Reflektivität charakterisieren und standortgenau berücksichtigen. Die Prognoseverfahren zur Ermittlung des Beitrags von neuen WEA $\Delta\varphi_{Prognose}$ zum Gesamtfehler sind damit jetzt auf dem Stand einer auch wissenschaftlich angemessenen Herangehensweise.

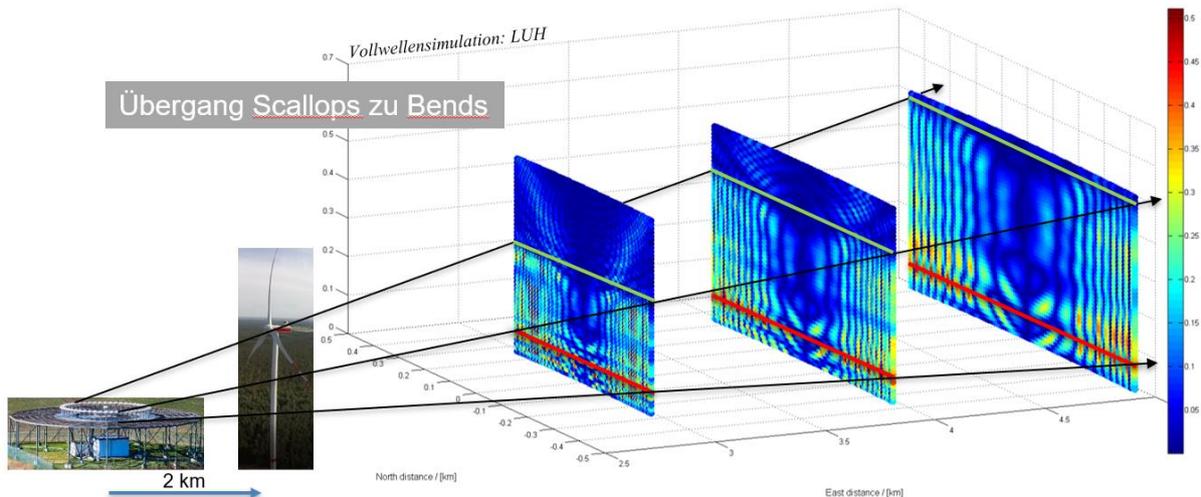


Abbildung 6: Numerische Vollwellensimulation zur Analyse der Fehlerausbreitung in den Raum. Als Hindernis dient eine WEA in 2 km zum DVOR, mit 150 m Tophöhe und einer Blattanordnung in λ -Konfiguration. In den virtuellen Analyseebenen in 3 km, 4 km und 5 km lassen sich die Fehlerausbreitung und der Übergang von schnell veränderlichen (sog. Scallops) zu langsam veränderlichen (sog. Bends) Winkel Fehlern erkennen.

2.1.3 Entwicklung der Vorbelastungsanalyse in WERAN plus

Neben den Fehlerbeiträgen durch WEA sind auch die Winkelfehler durch Vorbelastungen der VOR $\Delta\varphi_{Vorbelastung}$ zu berücksichtigen. Dazu zählen alle Objekte, die im Abstrahlungsbereich des VOR stehen und durch das wirksame Antennendiagramm ausgeleuchtet werden. Hierbei können Abschattungen z.B. durch Wald, aber auch Beugung, Streuung und Reflexion der elektromagnetischen Wellen an Hindernissen auftreten und zu einem Winkelfehler beitragen (s. Abbildung 5). Der von einem Hindernis erzeugte Winkelfehler breitet sich ähnlich einer optischen Projektion in den Raum hinein aus und erreicht so auch Höhen, die für den Flugverkehr genutzt werden (s. Abbildung 6).

Gemäß ICAO wird die Ortsfrequenzveränderung der Winkelfehler (Schwankung des Winkelfehlers über dem Ort zwischen positiven und negativen Werten) in schnellveränderliche (Scallops) sowie langsam veränderliche (Bends) Änderungen unterschieden. Flugzeuge können aufgrund ihrer Trägheit nur den langsam veränderlichen Bends folgen. Nur diese stellen eine mögliche Beeinträchtigung für die korrekte Navigation von Flugzeugen dar. Folgerichtig stellt ICAO bei der regelmäßigen Überprüfung der Funktionalität von VOR durch die Flugvermessung auch nur auf diese Bends ab. Gemäß ICAO 8071 2.3.12 [1] ist die Ausprägung von Bends auf Radialen, also Flugmanövern auf einem konstanten Winkel des VOR, zu untersuchen. Diese Daten aus der Flugvermessung werden periodisch erhoben, um damit die grundsätzliche Nutzbarkeit des Signals und bei Anlagen in der Nähe von Flughäfen die Fliegbarkeit der An- und Abflugmanöver sicherzustellen.

Die bisherige Analyse der Vorbelastung seitens der DFS nutzt entgegen der Vorgehensweise von ICAO die Messdaten aus einer Orbitalflugvermessung $\Delta\varphi_{Orbit}$ nach Gl. 2, die für die Bestimmung der Nordausrichtung des VOR gedacht ist. Ein Fehler in der Nordausrichtung würde sich als konstanter Offset mit hinreichender Genauigkeit - aus den 360° - Kreisflugdaten ermitteln lassen. Dieselben Daten wurden hingegen auch genutzt, um daraus eine vermeintliche Vorbelastung zu konstruieren. Dies ist aus mehreren Gründen nicht sinnvoll.

Während die Ergebnisse aus den radialen Messflügen über die Jahre eher konstanter Natur sind und auch nur geringe Streuungen aufweisen, fallen Orbitalmessdaten von Jahr zu Jahr stark unterschiedlich aus und zeigen eher geringe oder keine Übereinstimmung auf. Schon vom rein optischen Eindruck beim Vergleich von radialen und orbitalen Flugmessdaten fällt ein gravierender Unterschied auf. Während die radialen Daten wenig Rauschen aufweisen, zeigen die orbitalen Daten ein stark rauschartiges Verhalten. Auf Nachfrage konnte die DFS keine Begründung dafür angeben (fachliche Begründung s. übernächster Absatz). Einen naheliegenden Vergleich der Winkelfehler an den Kreuzungspunkten aus radialen und Orbitalmessdaten hat es nach Aussage der DFS nicht gegeben.

Die radialen Messdaten weisen erst im Bereich oberhalb von 10 nautischen Meilen Abstand langsam veränderliche Winkelfehler (Bends) auf. Diese könnte man sehr grob genähert als sinusförmige Vorgänge betrachten, da die gemessenen Winkelfehler sich sinusförmig um das Radial ausprägen. Die Abtastung einer sinusförmigen Kurve an einem Punkt lässt mathematisch keinerlei Aussage zu in Bezug auf die weitere Signalausprägung in den Raum hinein. Es könnte z.B. ein Nulldurchgang des Winkelfehlers auf einem Radial aufgezeichnet worden sein. Dann wäre daraus keine Vorbelastung bestimmt worden, obwohl diese vorhanden sein könnte und bei einem radialen Flugmanöver auch entdeckt worden wäre. Bei 10 NM Abstand treten diese Bends in den radialen Daten oftmals nicht prägnant auf, sondern erst bei größeren Entfernungen.

Die Art des Antennendiagramms am Messflugzeug (V-Dipol auf dem Cockpit-Dach) ist eher für die Nutzung bei radialen Flugmanövern für die Messung horizontal polarisierter Felder mit einem Feldvektor parallel zur Tragfläche ausgelegt. Das wäre optimal für die Messung des eigentlichen Nutzsignals vom DVOR, welches horizontal polarisiert und mit tangentialem Feldvektor zu einem gedachten Kreis rund um das VOR in den Raum abgestrahlt wird. Messantenne und zu messendes Feld liegen parallel zueinander. Im Orbitalflug liegen Messantenne und zu messendes Feld jedoch kreuzpolar, d.h. die Empfangsfeldstärke ist deutlich geringer und es werden größere Winkelfehler bestimmt als eigentlich vorhanden sind. Das erklärt auch das rauschartige Verhalten bei den Orbitalmessdaten.

Da diese Daten rauschbehaftet sind und somit nicht für eine Vorbelastungsanalyse verwendbar erschienen, hat die DFS eine Datenbereinigung mit einem Sliding Window von $\pm 4,5^\circ$ über den Vollkreis eingeführt. Dabei wird in einem Sliding Window von ± 4.5 die 95% Percentile bestimmt und als Vorbelastung verwendet (es werden also 5% der hohen Messwerte verworfen). Dies ist, anders als von der DFS dargestellt, keine Filterung der Messwerte, welche wesentlich geringere Vorbelastungswerte ergeben würde. Die Begründung über die von der DFS angegebenen Quelle dazu ist nicht nachvollziehbar, weder aus mathematischer noch aus physikalischer Sichtweise.

Neuere Bestrebungen gehen offenbar in die Richtung, abseits von klassischen Flugmanövern der Flugvermessung, arbiträre Flüge in Reichweite der Anlagen zu nutzen. Die Daten des Flugvermessungssystems sollen hierbei interpretiert werden, um daraus Erkenntnisse über die Vorbelastung abzuleiten. Dies ist jedoch ebenso ungeeignet wie die Nutzung der Daten aus den bisherigen Orbitflügen, weil sich aus den Winkelfehlerwerten allein kein qualifizierter Rückschluss auf die gestörte Wellenausbreitung ableiten lässt. Es bleibt auch bei diesem Ansatz bei dem grundsätzlichen Problem, dass Daten verwendet werden sollen, die vom Prinzip her ungeeignet sind für den Zweck des Anlagenschutzes.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich, dass die bisherige Vorbelastungsanalyse in dieser Form weder sinnvoll ist noch dem Anlagenschutz dient und daher dringend revidiert werden muss. Im Projekt WERAN plus konnte die Analyse der Vorbelastung durch die Entwicklung der Doppler-Kreuzpeilung [3]

auf eine sinnvolle und physikalische Methode umgestellt werden. Es ist nunmehr möglich, beliebige Störer (reflektierende Objekte, z.B. Bäume, Gebäude, Hochspannungsleitungen und auch bereits vorhandene WEA) nach Ort und Störpotential zu identifizieren. Die daraus entstehende Clutter-Map [4] kann in das neue Prognoseverfahren direkt als Vorbelastung eingefügt werden. Da jetzt beliebige Störer unabhängig von ihrer Art erkannt werden, wird die tatsächlich vorliegende Vorbelastung ermittelt und in die Berechnung der Störwirkung von neuen WEA mit aufgenommen. Bisher wurden z.B. hohe Gebäude ab 3 km Abstand zum VOR gemäß ICAO EUR DOC 015 [2] nicht einmal auf ihre potentielle Störwirkung geprüft. Auch Hochspannungsleitungen wurden trotz oftmals geringen Abstands und damit hoher Störwirkung nicht als Gefährdung eingestuft. Das erscheint inkonsistent und auch nicht hilfreich für den Anlagenschutz. Wenn ein Winkelfehler die Sicherheit in der Luftfahrt gefährdet, dann ist der Grund für seine Entstehung irrelevant.

Hybride Winkelfehlerprognose

Im Rahmen des Projekts WERAN plus ist nun ein Tool entstanden, welches eine durchzuführende Vorbelastungsmessung direkt zur Modellierung des Umgebungseinflusses $\Delta\varphi_{\text{Vorbelastung}}$ nutzt. Auf Basis des in [4] beschriebenen Verfahrens können unter Anwendung eines Doppler-Kreuzpeilungsverfahrens die Positionen und Streuwirkungen signifikanter Streuobjekte (wie bestehende Gebäude oder Hügel) identifiziert werden.

Die so identifizierten Streuobjekte lassen sich durch äquivalente Störquellen ersetzen, deren Störfelder annähernd identisch mit den tatsächlich gestreuten Feldern der ursprünglichen Anordnung sind. Abbildung 7 verdeutlicht das Prinzip: Eine komplexe Umgebung mit diversen Streuern (siehe Abbildung 1) wird durch eine einfachere Modellierung der Umgebung ersetzt und Abweichungen von dieser einfachen Umgebung mit Hilfe zusätzlicher Störquellen modelliert.

Eine neu zu errichtende WEA kann in dieser vereinfachten Umgebung platziert werden und der Gesamtwinkelfehler (bestehend aus Umgebungseinflüssen und dem Einfluss der neuen WEA) berechnet werden. Eine Vorbelastungsmessung wird bei diesem Vorgehen integraler Bestandteil der Winkelfehlerprognose, was eine realitätsnähere Modellierung des Gesamtproblems erlaubt.

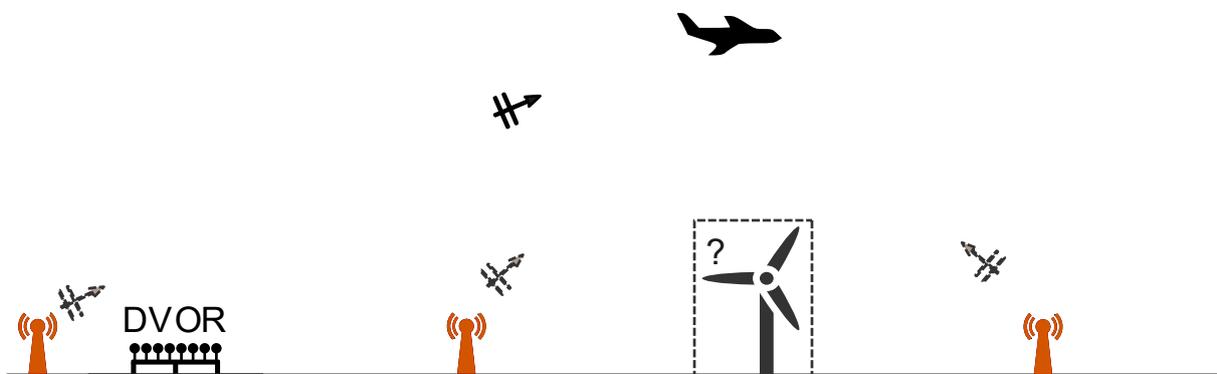


Abbildung 7: Vereinfachte Modellumgebung mit neu zu errichtender Windenergieanlage

Die potentielle Störwirkung von Objekten hängt einerseits vom Abstand zum DVOR, andererseits auch von der Höhe der Objekte ab. So können kleine, aber nahestehende Objekte wie Bäume eine ähnlich hohe Störwirkung erzeugen wie weit entfernte hohe Gebäude oder Hochspannungsleitungen in einigen km Entfernung zum DVOR.

Durch die neue Doppler-Kreuzpeilung wird die Sicherheit in der Luftfahrt erhöht, da sie die für den Anlagenschutz maßgeblichen Quellen identifiziert und nicht allein herausgehobene Reflexionsobjekte wie WEA betrachtet.

Vorschlag zur Interimslösung bei DVOR

Bevor die Doppler-Kreuzpeilung bei DVOR operativ als Standardverfahren in der Flugvermessung genutzt werden kann, schlagen die Autoren als Interimslösung vor, für $\Delta\varphi_{\text{Vorbelastung}}$ pauschal eine Vorbelastung von 1° in Gl. 5 anzusetzen. Dies wird bereits heute von der DFS bei Bauanträgen genutzt, wo noch keine Erstflugvermessung nach der Inbetriebnahme eines DVOR vorliegt. Grundlage dafür ist die Auswertung der Radialflüge, die 1° als obere Schranke für die Bends aufgezeigt haben. Wenn die Ergebnisse aus der Doppler-Kreuzpeilung vorliegen, können aufgrund der besseren Daten für $\Delta\varphi_{\text{Vorbelastung}}$ weitere Bauanträge genehmigt werden, da nach vorliegender Erfahrung die tatsächliche Vorbelastung unterhalb und z.T. auch deutlich unterhalb von 1° liegt. Der Anlagenschutz bleibt somit auch in der Zwischenzeit gewährleistet.

Alternativ ließe sich ein pragmatisches Vorgehen zur Bestimmung der Vorbelastung im Einklang mit ICAO aufsetzen. Dazu können radiale Messdaten aus der Flugvermessung gemäß ICAO 8071 2.3.12 [1] herangezogen werden. Hier bestehen keine Bedenken hinsichtlich der Messdatenaufnahme wie bei den Orbitflügen, die Messdaten sind über die Jahre auch eher stabil. Aus den radialen Messdaten lassen sich direkt die langsam veränderlichen Winkelfehler (Bends) ablesen. Für eine gutachterliche Stellungnahme wird jeweils die letzte (aktuelle) Flugvermessung als Vorbelastung ausgewertet. Falls zusätzliche Radiale für eine Beurteilung notwendig sind, könnten diese durch eine zusätzliche Flugvermessung aufgenommen werden. Der Antragsteller für ein neues WEA-Bauvorhaben müsste diese Kosten übernehmen.

2.1.4 Zulässiger Gesamtfehler der Bodeninstallation bei DVOR

Der zulässige Gesamtfehler der Bodeninstallation $\Delta\varphi_{\text{max}}$ liegt laut ICAO Doc 8071 [1], ICAO Annex 10 Vol 1 [12], ICAO Doc 9613 [13], ICAO Doc 8168 [14] sowie EUROCONTROL GUID-0114 [15] und EUROCAE ED-75D [16] bei $3,5^\circ$ oder $3,6^\circ$, je nachdem welches Dokument herangezogen wird. Inhaltlich lässt sich dieser Wert aus der maximalen Ablage des Kurses (RNAV5, entspricht 5 nautischen Meilen) bei einer Reichweite von 80 nautischen Meilen aus der einfachen Geometrie zu $3,6^\circ$ berechnen. Die Autoren haben den Wert $\Delta\varphi_{\text{max}} = 3,5^\circ$ übernommen, da er unter „RNAV5“ übereinstimmend in den meisten ICAO-Dokumenten zu finden ist.

Die DFS nennt häufig besondere Anforderungen für RNAV-Flüge, einem Navigationsverfahren für Instrumentenflüge mit einer Route über frei gewählte Strecken vs. „Standard VOR route“, also einer Navigation entlang festgelegter Wegstrecken z.B. entlang der VOR. Im Gegensatz zur DFS besagt ICAO Doc 8168 [14] unter Absatz 8.1 „RNAV requires VOR accuracy as standard VOR route.“ Unter 4.2.3.1

findet sich weiterhin „The RNAV system use accuracy of the VOR is equal to the VOR system use accuracy of facility not providing track, which is equal to ± 4.5 degrees“, vgl. auch Tabellen I-2-2-1 und I-2-2-2. Das bedeutet, es gibt lt. ICAO keine besonderen Anforderungen für RNAV-Flüge, es gelten die gleichen Anforderungen wie bei Standardflügen entlang von VOR-Routen.

2.1.5 Anlageneigener Fehler bei DVOR

Der anlageneigene Fehler der VOR $\Delta\varphi_{anlage}$ wird an mehreren Stellen im ICAO-Regelwerk angesprochen. Technisch liegen hier mehrere Punkte vor, die zu diskutieren sind. Hierzu gehört der Aufbau der Anlage aus 49/51 Sendeantennen bei DVOR oder 4 Antennen bei CVOR. Die Abstrahlung der beiden Signale (Referenz- und Umlaufsignal) ist technisch bedingt nicht ideal und kann vom kreisrunden Diagramm abweichen (Unrundheit). Die Anlage unterliegt einer gewissen Drift und muss regelmäßig gewartet und durch die Flugvermessung rekaliert werden. Weiterhin ist der nahestehende Bewuchs in Form von z.B. Bäumen entsprechend kurz zu halten, so dass mindestens die Reflektorebene unterhalb der Sendeantennen zur Erzeugung eines Abstrahldiagramms in den Raum frei bleibt. Der Bezugswert magnetisch Nord ist einer geophysikalisch bedingten Drift und einem Tagesgang unterworfen, die z.B. beim Deutschen GeoForschungsZentrum Potsdam (<https://www.gfz-potsdam.de/>) oder auch bei der PTB (<https://www.ptb.de/cms/nc/ptb/fachabteilungen/abt2/fb-25/ag-251/live-daten-erdmagnetfeldmessung.html>) abgerufen werden können. Während die Drift vernachlässigbar ist und durch die Rekalibrierungen ausgeglichen wird, ist der Tagesgang unregelmäßig und muss daher in der Unsicherheitsbilanz berücksichtigt werden. Die Größenordnung in hiesigen Breiten- und Längengraden beträgt $0,5^\circ$.

Jedes VOR hat gemäß ICAO Annex 10 Vol I [12] eine Monitorantenne aufzuweisen, die das abgestrahlte Signal aufzeichnet. Bei einem Winkelfehler $> 1^\circ$ hat die Anlage sich selbsttätig auszuschalten und eine Warnung an die Betriebstechnik auszusenden. Wenn es hier häufig Probleme geben würde, müssten die Vorkommnisse eine Datenbank füllen. Darüber hinaus enthält technisches Regelwerk üblicherweise den Stand der Technik, so dass in der Praxis bei DVOR von einem Wert deutlich besser als 1° Abweichung auszugehen ist. Bisher wurde aufgrund von ICAO Annex 10 Vol I [12] ein 2° großer anlageninterner Winkelfehler angesetzt.

Aus den vorgenannten Gründen stellt die Reduktion des anlageneigenen Fehlers $\Delta\varphi_{anlage}$ nach Gl. 3 eine technisch sichere Entscheidung dar.

$$\Delta\varphi_{anlage} = \Delta\varphi_{Warnwert} + \Delta\varphi_{Magnetfeld} = 1,0^\circ + 0,5^\circ = 1,5^\circ \quad \text{Gl. 3}$$

Dabei werden der Warnwert nach ICAO von 1° sowie der Tagesgang des Erdmagnetfelds von $0,5^\circ$ als lineare Addition angesetzt. Die DFS ist aufgefordert, durch Messdatenaufnahme und kontinuierliche Auswertung den bisher pauschalen Ansatz durch einen datenbasierten Stabilitätswert zu ersetzen. Pauschale Ansätze zu Lasten Dritter lassen sich nicht mehr rechtfertigen. Insofern ist die DFS aufgefordert nachzuweisen, dass sie diese großzügigen Systemtoleranzen für den Betrieb ihrer Anlagen wirklich benötigt und dies entsprechend zu dokumentieren. Dann ließe sich der Wert für den anlageneigenen Winkelfehler ggf. auch unter $1,5^\circ$ senken.

2.1.6 Beiträge von Baukränen zum Winkelfehler

Die Störwirkung von Objekten ist umso größer, je dichter diese an das VOR heranrücken. Insbesondere Baukräne (Turmdrehkräne) können als temporäre Reflektoren wirken. Daher wurden deren Auswirkungen durch entsprechende Vollwellensimulationen bestimmt. Die Abstände wurden zwischen 1 km und 200 m variiert. Für einen Kran mit 71 m Höhe und einem 51 m langen Ausleger ergeben sich zwischen 0,4° (1 km Abstand) und 1,2° (200 m Abstand) Winkelfehler [11].

2.1.7 Beiträge von Hochspannungsleitungen zum Winkelfehler

In drohnenbasierten Vor-Ort-Messungen am Drehfunkfeuer Hehlingen (DVOR HLZ) wurde die südlich verlaufende Hochspannungsleitung als Störobjekt identifiziert. Sowohl im daraufhin untersuchten numerischen Simulationsmodell als auch in den Messungen im südlichen Kontrollpunkt zeigte sich ein Winkelfehler von 0,5° bis 0,6°. Im nördlichen Kontrollpunkt am DVOR HLZ zeigten weder die Vor-Ort-Messungen noch die Simulationen einen Winkelfehler. Die Messwerte zeigten für Flughöhen zwischen 100 m und 250 m Fehler in der Größenordnung von wenigen 0,01° [11] (vgl. Abbildung 12).

2.1.8 Zur empirischen Validierung der DVOR-Bewertungsmethode der DFS

Die DFS gab zur Plausibilisierung in ihren Dokumentationen zum DVOR-Bewertungsverfahren an, einen empirischen Vergleich zwischen allen verfügbaren Simulationsergebnissen und ihrer ursprünglichen Methodik ausgeführt zu haben. Dabei sollen die gemittelten DFS-Bewertungen in der Mitte aller ausgewerteten numerischen Ergebnissen liegen, die zu einem Großteil aus einer einzigen Quelle stammen.

Da nach Durchsicht des DFS-Dokuments und der gefundenen Inkonsistenzen (z.B. Betragsbildung bei der Überlagerung der einzelnen Fehlerbeiträge) eine deutliche Überbewertung von WEA (ca. Faktor 3) seitens der DFS im Sinne eines Worst-Case vorlag, die Simulationen jedoch eher den Ist-Bereich zeigen, hätten die DFS-Ergebnisse eine obere Schranke für die Vergleiche mit den numerischen Ergebnissen aufzeigen müssen.

2.1.9 Zum Geringfügigkeitskriterium

Das bereits genannte „Geringfügigkeitskriterium“ (GFK) wird herangezogen, wenn die schlechten Daten der Flugvermessung eine Genehmigung von WEA-Bauvorhaben nach ICAO nicht erlauben, jedoch die Prognose die 1° noch nicht erreicht hat. Dazu wird die schlechteste Flugvermessung der letzten 10 Jahre, bezogen auf jedes Radial, als Basis benutzt. Der prognostizierte Gesamtwinkelfehler der gemäß GFK zugelassenen WEAs und der normal zugelassenen WEAs muss kleiner 1° sein und der gesamte Winkelfehler (Kombination aus Vorbelastungswert und Prognose der WEA durch geometrische Addition) darf sich um nicht mehr als 0,05° erhöhen. Ist die Änderung geringer als 0,05°, wird der Bauantrag genehmigt. Daraus folgt, je schlechter die Vorbelastung ausfällt, desto mehr wird genehmigt. Dieses Vorgehen erscheint nicht sinnvoll.

Die Wirkung ist diametral zum vorherigen Worst-Case-Ansatz und bewirkt eine Genehmigungsrate von 95 % bis 98 % aller Bauanträge, auch derer, die sich später als problematisch herausstellen können.

Damit wird der Anlagenschutz de facto ausgehebelt. Darüber hinaus ist das Vorgehen nicht durch die Empfehlungen der ICAO gedeckt.

2.1.10 Zusammenarbeit mit der DFS

Auf Arbeitsebene bei der DFS und dem Projektteam von WERAN plus gab es zumindest in Teilen bereits seit längerer Zeit eine gute Übereinstimmung in wissenschaftlichen Fragen, gemeinsame Entwicklungen und gemeinsame Vorträge (s. z.B. Vorträge auf der EMWT 2021, [11], [17]). Die Umsetzung dieser Erkenntnisse hätte jedoch deutlich schneller erfolgen können und müssen. Die Gesamtproblematik wurde immer wieder in einzelne Teilbereiche (Säulen) aufgespalten und länglich sowie kontrovers diskutiert. Die Umsetzung gesicherter Erkenntnisse dauerte im gesamten Prozess viel zu lange, trotz eigener hier dokumentierter Versäumnisse der DFS wurden immer wieder bereits erledigte Teilaspekte erneut aufgegriffen und diskutiert.

2.1.11 Einschätzung des fachlichen Vorgehens der DFS im Bereich der Hochfrequenz-Messtechnik und des Anlagenschutzes

Bei der Validierung der Projektergebnisse wurden die am DVOR Bremen direkt gemessenen Winkelfehler in einem Kreisflug mit 25 km Radius und einer Höhe von 600 m entsprechend einer Elevation von $1,15^\circ$ aufgezeichnet. Aus den Messdaten wurden weiterhin durch die zuvor beschriebene Doppler-Kreuzpeilung die Störquellen ermittelt. Ein Vergleich der direkt gemessenen AM- und FM-Komponenten des *Signal-in-Space* und der daraus bestimmten Winkelfehler sowie der Winkelfehler berechnet aus der Clutter-Map zeigten auf dem Vollkreis eine weitgehende Übereinstimmung. Jedoch zeigte sich vor allem im nördlichen Bereich (0°) eine spiegelsymmetrische Abweichung von über 1° , die sich ebenfalls in den Messdaten der regulären Flugvermessung (hierbei speziell: Empfangspegel und Modulationsgrad des 10 kHz-Hilfsträgers) auffinden ließ. Eine Kontrolle der möglichen Ursachen identifizierte die Installation der Antenne eines 75-MHz-Einflugzeichensenders direkt am Rand der Reflektorebene in unmittelbarer Nähe zu den Seitenbandantennen des DVORs. Die Vollwellensimulation zeigte einen Winkelfehler von ca. 1° . Diese Wechselwirkung hätte bei der Planung des kombinierten Aufbaus erkannt und analysiert werden können, denn die Aufgabe des Anlagenschutzes erfordert gerade bei diesen geringen Abständen zu Sendeantennen besondere Sorgfalt.

Des Weiteren wurde im Verlauf des Projekts festgestellt, dass einige, die Qualität des Signals wahrscheinlich negativ beeinflussende Faktoren vorhanden waren, die im Rahmen der regelmäßigen Wartungsarbeiten hätten vermieden werden können. Hierzu zählen u.a. die Installation eines Geländers u.a. auf der Reflektorebene des DVOR Klasdorf (sowie einer offenstehenden, aber vermutlich klappbaren Treppe am DVOR Sarstedt), hoher Bewuchs sowie eine langjährig nicht aufgefallene defekte Seitenbandantenne am ehemaligen DVOR Michaelsdorf [18] [19] und hoher Bewuchs am DVOR Maisach.

Der anlageninterne Fehler bzw. die bisher bestimmte Vorbelastung wäre ohne diese negativen Faktoren wahrscheinlich geringer gewesen, was dem Fehlerbudget für tatsächliche externe Störer zugutegekommen wäre.

3 Abgeschlossene und offene wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele

3.1 Abgeschlossene Arbeitsziele

Das Gesamtziel des laufenden Projektes WERAN plus war es, aufbauend auf metrologischen Erkenntnissen über die elektromagnetische Signalbeeinflussung von WERAN, vereinheitlichte, reproduzierbare Kriterien und Rahmenbedingungen unabhängig von den Auswertelgorithmen der Endeinrichtungen im Planungsprozess von Windenergieanlagen (WEA), Hochhäusern, Rundfunktürmen und anderen Bauwerken zu schaffen, anhand derer die DFS und das BAF eine klare Unterscheidung zwischen erwarteter Störwirkung und störungsfreiem Betrieb treffen können.

In WERAN konnte weltweit zum ersten Mal eine Wechselwirkung zwischen Windenergieanlagen und den Signalen von Drehfunkfeuern messtechnisch und in Übereinstimmung mit Simulationen nachgewiesen werden.

Das Konzept sollte einerseits ein einfaches, jedoch auf wissenschaftlichen Daten beruhendes neues Prognosewerkzeug der DFS für die Wechselwirkung von WEA und VOR ermöglichen. Andererseits sollte die Vorbelastung eines VOR messtechnisch korrekt charakterisiert werden können. Beide Projektziele wurden erreicht.

In WERAN plus wurde erstmalig korrekt eine Vorbelastung eines DVOR messtechnisch charakterisiert.

Die Entwicklung und Erprobung neuer einfacher Bewertungsmethoden wäre ohne die Entwicklung der drohnenbasierten Vor-Ort-Messtechnik und der Simulationsmethoden im Projekt WERAN nicht möglich gewesen. Durch den Einsatz des manntragenden Motorseglers Jade One der Jade Hochschule in WERAN plus konnten die Ergebnisse auch großräumig und in für die Luftfahrt typischen Szenarien untersucht werden.

Nach heutigem Sachstand hat das Projekt WERAN plus, aufbauend auf den umfassenden Forschungs- und Entwicklungsergebnissen von WERAN, das Potential, die Fragestellung der Wechselwirkung von WEA mit terrestrischer Navigation und Radar belastbar zu lösen.

Begründung:

A Es steht eine *State-of-the-art* – Hochfrequenz-Messtechnik für alle relevanten Sendeeinrichtungen in terrestrischer Navigation und Radartechnik zur Verfügung, mit der an realen Anlagen, in realem Gelände und mit realen Signalen die Signalinhalte und deren Veränderungen durch WEA im Übertragungskanal erfasst werden können.

B Es steht eine *State-of-the-art* - Simulationsumgebung zur Verfügung, mit der sich auch dynamische Effekte wie Drehung der Rotoren von WEA, Bewegung von Flugzeugen etc. untersuchen lassen.

C Sowohl die messtechnischen Ergebnisse als auch die numerischen Simulationen haben die gleichen Zwischengrößen zum Ziel, nämlich die zeitliche/räumliche Verteilung der elektromagnetischen Felder im Raum. Es wird der Übertragungskanal der Signale physikalisch erfasst. Die Größen lassen sich damit im Sinne einer Validierung vergleichen.

D Die elektromagnetischen Felder sind die grundlegendsten Größen, die man ohne Filterung / Vorverarbeitung zur Beurteilung der potentiellen Wechselwirkung heranziehen kann. Alle anderen Größen, insbesondere die zu beurteilenden Zielgrößen, werden daraus abgeleitet.

E Durch Vorher-/Nachher-Vergleiche an neugebauten WEA oder an WEA, deren Betriebsparameter (wie Rotordrehzahl, Gondelstellung, Blattanstellwinkel) gezielt eingestellt werden, lässt sich ein grundlegendes Verständnis der Wechselwirkung ableiten. Alternativ lassen sich dazu auch kooperative experimentelle Ziele wie Autokräne einsetzen.

F Durch die im Projekt WERAN plus entwickelten Prognoseprogramme für DVOR und CVOR, die jeweils auf handelsüblichen PC lauffähig sind, sind BAF, DFS und Planer in der Lage, wirtschaftlich eine objektive Beurteilung der Störwirkung von WEA auf Drehfunkfeuer durchführen zu können.

H Der Rückkanal im Radar durch Aussendung künstlicher, WEA-ähnlicher Ziele wird durch laufende Arbeiten im Projekt behandelt, um die Wirkung auf die Zielgröße des Radars im Gesamtsystem zu testen.

3.2 Validierung

Die Messungen von WERAN / WERAN plus wurden an realen Anlagen in realem Gelände mit den realen Signalen durchgeführt. Wo immer möglich, wurden die Ergebnisse direkt auf die Zielgröße, bei VOR der Winkelfehler, abgebildet oder eben der Winkelfehler $\Delta\varphi_{ist}$ direkt gemessen. Die numerischen Simulationen berücksichtigen ebenso reale Anlagen, Gelände und Signale. Der Vergleich der Simulationen mit den Messwerten und die damit einhergehende Validierung ist explizit einer der Grundgedanken von WERAN / WERAN plus.

Weiterhin sind Plausibilitätskontrollen in alle Arbeitsschritte bei WERAN / WERAN plus eingebaut. Nach der Kalibrierung der Messtechnik mit Rückführung auf die Internationalen Einheiten inklusive einer Messunsicherheitsbetrachtung wurden bekannte Testsignale z.B. auf dem PTB-Referenzfreifeld erzeugt, die ausgesandten Signale stationär überwacht und mit der fliegenden Messtechnik gemessen. Damit ist zusätzlich zur Kalibrierung eine Validierung der gesamten Messkette erreicht. So konnte z.B.

der Temperatureinfluss auf die Messelektronik im Multikopter beim Aufstieg vom Boden bis auf 600 m Höhe durch eine Temperaturregelung stark verringert werden.

Validierung am DVOR Kladorf

Zum Zeitpunkt der Vor-Ort-Messungen standen in der Nähe zum DVOR Kladorf 9 WEA mit jeweils 135 m Turmhöhe (196 m Tophöhe) in ca. 8 km Abstand zum DVOR (s. Abbildung 8). In drei Flügen wurden mit dem Kopter die Winkelfehler im Raum in der 1°-Elevation gemessen. Es sei noch einmal daran erinnert, dass die Vor-Ort-Messungen die Überlagerungen aller Beiträge zum resultierenden Winkelfehler $\Delta\varphi_{ist}$ enthalten. Zum Vergleich wurde dann die Prognose des Winkelfehlers $\Delta\varphi_{Prognose}$ auf der Flugtrajektorie des Kopters berechnet (s. Abbildung 9). Hier ergibt sich eine gute Übereinstimmung, sowohl in der Variation der Ortsfrequenz abhängig vom Abstand der Messung hinter dem Störer, als auch bei der Amplitude des Winkelfehlers von ca. 0,3°. Das bedeutet, dass hier weder der anlageneigene Fehler noch die Umgebung große Fehleranteile beitragen.

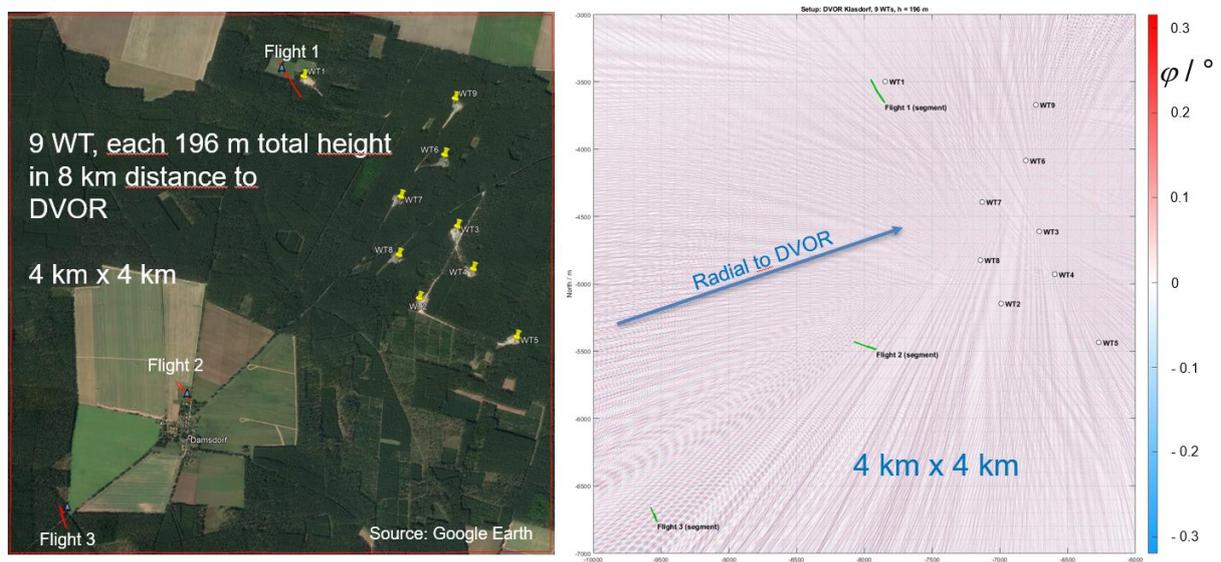


Abbildung 8: Windpark mit 9 WEA (Standort gekennzeichnet durch die gelben Pins), mit jeweils 196 m Tophöhe, in ca. 8 km Abstand zum DVOR. Die rechte Grafik zeigt den prognostizierten Winkelfehler als Verteilung in einem 4 km x 4 km großen Gebiet. Da der Winkelfehler zwischen positiven und negativen Werten oszilliert, erscheint das Bild eher magentafarben. Zusätzlich sind drei Flugpfade Flight 1 bis 3 gekennzeichnet, die in der nächsten Abbildung als Vor-Ort-Messwert und Prognose ausgewertet werden.

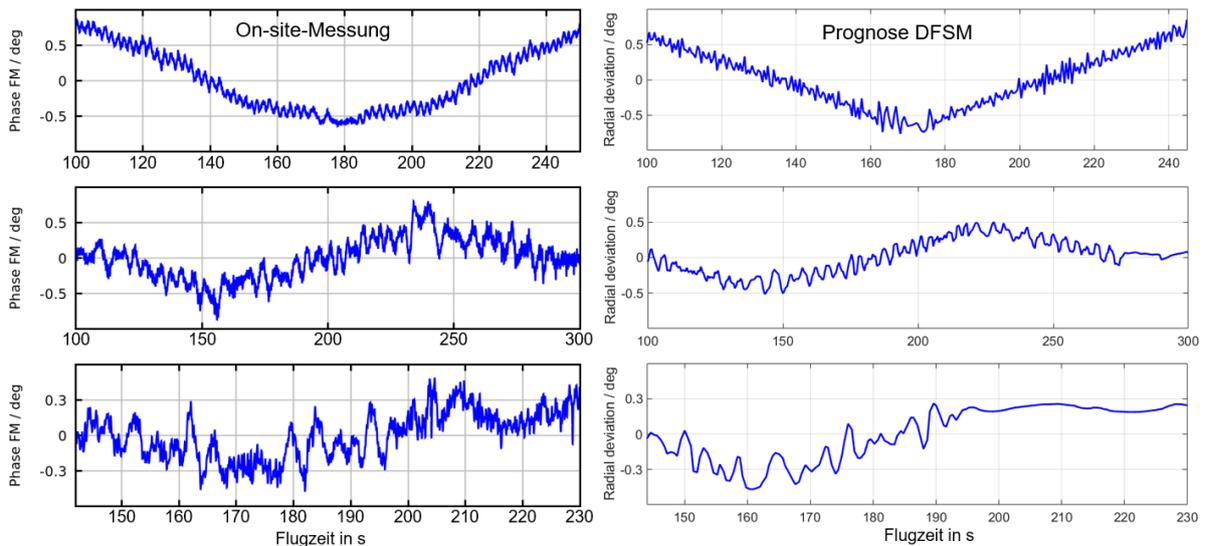


Abbildung 9: Hier sind in der linken Grafik die Ergebnisse der Vor-Ort-Messung mit dem Multikopter und in der rechten Grafik die Prognose für die gleiche Flugtrajektorie gegenübergestellt. Die Flughöhe wurde jeweils für 1° Elevation ausgewählt.

Validierung am DVOR Hehlingen

Der Windpark mit 15 WEA steht im Osten des DVOR Hehlingen (s. Abbildung 10). Bei Validierungsmessungen am Kontrollpunkt südlich vom DVOR haben die Prognose und die Vollwellensimulation zunächst einen geringen Winkelfehler von $0,05^\circ$ ergeben, die Vor-Ort-Messungen ergaben jedoch ca. $0,6^\circ$ Winkelfehler. Eine Analyse der Situation vor Ort zeigte eine Hochspannungsleitung in ca. 700 m Abstand zum DVOR. Wurde diese in das numerische Modell integriert, zeigte sich im numerischen Ergebnis ebenfalls ein Winkelfehler von ca. $0,5^\circ$ für die Flughöhe von 125 m (Elevation von 1°). Für den Kontrollpunkt im Norden konnten weder in der Prognose noch in der Simulation größere Winkelfehler festgestellt werden, auch nicht bei der Verwendung der Hochspannungsleitung im numerischen Simulationsmodell. Die maximalen Winkelfehler treten bei DVOR in Vorwärtsstreurichtung auf, daher ist das gefundene Ergebnis in Übereinstimmung mit der erwarteten Fehlerverteilung. Die drohnenbasierten Vor-Ort-Messungen zeigten im nördlichen Kontrollpunkt vom DVOR ebenfalls nur geringe Winkelfehler von $<0,1^\circ$ (vgl. Abbildung 12). Hinter dem Windpark wurde ein Gesamtwinkelfehler $\Delta\varphi_{ist}$ von $0,3^\circ$ gemessen.

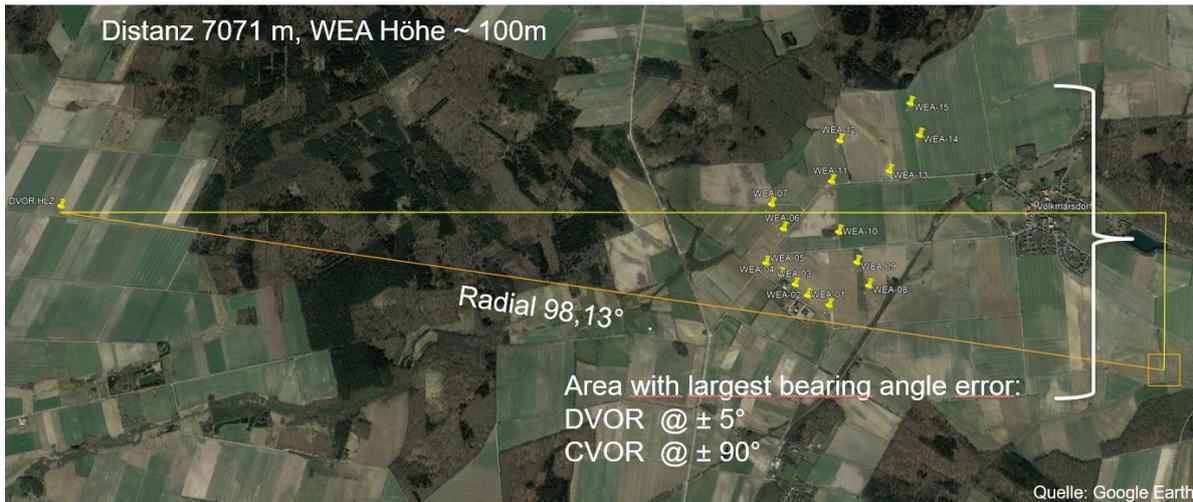


Abbildung 10: Windpark mit 15 WEA und einer Tophöhe von ca. 100 m in ca. 7 km zum DVOR. Die WEA sind durch die gelben Pins gekennzeichnet, das DVOR steht am linken Bildrand. Für das orangefarbene Quadrat unten rechts auf dem Radial 98,13° wurde die flächenhafte Verteilung des Winkelfehlers in 1° Elevation untersucht. Exemplarische Ergebnisse sind der nächsten Abbildung zu entnehmen.

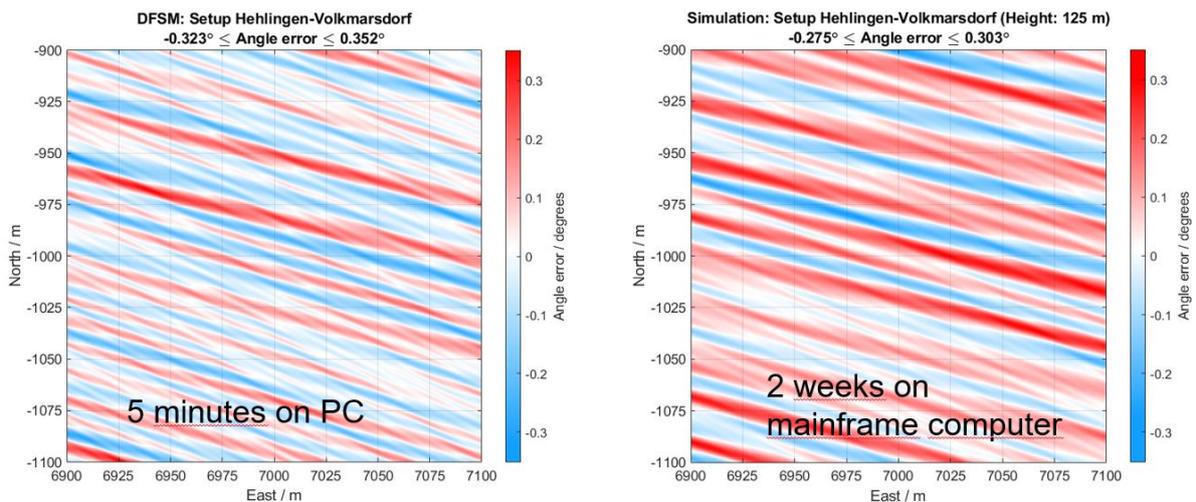


Abbildung 11: Auswertung des Winkelfehlers für eine horizontale Fläche 100 m x 100 m nach Abbildung 10. Die linke Grafik zeigt Ergebnisse für die modifizierte DFSM-Prognose (Rechenzeit 5 Minuten), die rechte Grafik zeigt Ergebnisse aus der Vollwellensimulation (Rechenzeit 2 Wochen auf einem Großrechner). Sowohl die örtliche Verteilung des Winkelfehlers als auch die Amplitude stimmen gut überein (0,05° Differenz bei einem erlaubten maximalen Fehler von 3,5°).

Einen Vergleich des Winkelfehlers, ermittelt mit Hilfe der Vollwellenanalyse sowie der DFSM-Prognose, zeigt Abbildung 11. Sowohl die örtliche Verteilung des Winkelfehlers in der 100 m x 100 m großen Analysefläche als auch die Fehleramplitude stimmen gut überein.

Damit sind die Ergebnisse aus Vor-Ort-Messungen, Vollwellensimulation und Prognose gegenseitig in guter Übereinstimmung und validiert. Auch hier gilt, dass weder der anlageneigene Fehler noch die Umgebung große Fehleranteile aufweisen.

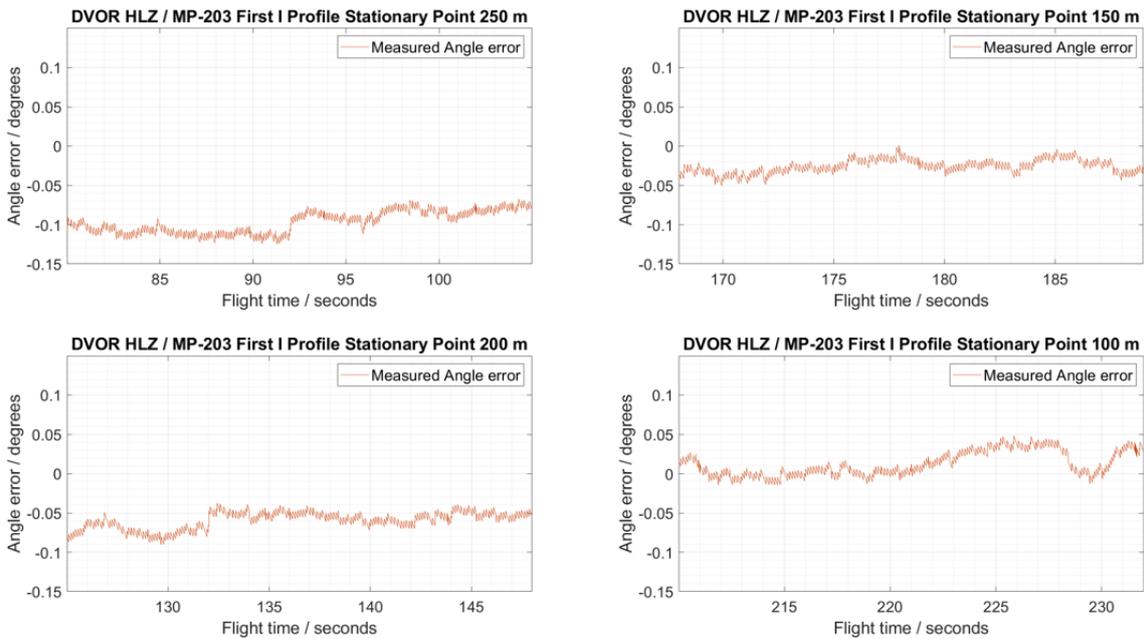


Abbildung 12: Ergebnisse der Vor-Ort Messung des Winkelfehlers in verschiedenen Flughöhen des Multikopters zwischen 100 m und 250 m. Dieser Messpunkt Nord dient als Referenz für die Messung extrem geringer Winkelfehler.

Validierung am DVOR Bremen

Neben der Prognose der Störwirkung von WEA ist auch die Vorbelastungsanalyse Gegenstand der Untersuchungen von WERAN plus. Die Doppler-Kreuzpeilung erlaubt es, sowohl den Standort eines Störers als auch dessen Störpotential aus den Messdaten zu gewinnen. Die Standorte lassen sich mit Objekten in Google Maps korrelieren. So konnten am DVOR Bremen nahestehende Bäume, Gebäude und Schornsteine des im Norden gelegenen Kraftwerks, Hafenkranne, Hochspannungsleitungen sowie WEA identifiziert werden. Die so entstandene Clutter-Map wurde wiederum in das Prognoseprogramm eingelesen und daraus die Vorbelastung bestimmt. Als Validierung vergleicht man den direkt gemessenen Winkelfehler mit dem aus der Clutter-Map prognostiziertem Winkelfehler. Zur Beurteilung der gesamten Störwirkung müssen jetzt nur noch die neuen WEA hinzugefügt werden, da die vorhandenen bereits als Reflektoren identifiziert wurden.

Am DVOR Bremen wurde die technische Leistungsfähigkeit erprobt. Der Messflug mit dem Forschungsflugzeug Jade One erfolgte im Radius von 25 km und in einer Höhe von 600 m über Grund. Dies ergibt eine Elevation von $1,15^\circ$. Damit wird die Störwirkung dicht an der untersten nutzbaren Elevation untersucht. Dagegen erfolgte die bisher durchgeführte Flugvermessung auf dem Orbit meist in ca. 18,5 km Entfernung und 1000 m Höhe, also einer Elevation von $3,0^\circ$ und damit nicht in der untersten Elevation. Aus den Untersuchungen hat sich jedoch ergeben, dass die größten Winkelfehler in der untersten Elevation auftreten.



Abbildung 13: Clutter-Map aus der Doppler-Kreuzpeilung am DVOR Bremen. Am oberen Bildrand ist der Flugpfad des Messflugzeugs Jade One eingezeichnet, am unteren Bildrand steht das DVOR in Verlängerung der Start- und Landebahn des Flughafens Bremen.



Abbildung 14: Details aus der Clutter-Map. Die linke Grafik zeigt einen als Hindernis detektierten Baum in 400 m Abstand und mit 17 m Höhe, die rechte Grafik zeigt ein größeres Gebäude in 4,4 km Entfernung.

In Abbildung 13 ist eine solche Clutter-Map zu sehen. Die roten Pins markieren Standorte, die als Reflektoren auffällig sind. Das Verfahren der Doppler-Kreuzpeilung erkennt einerseits nahestehende Bäume in ca. 400 m Distanz, andererseits auch höhere Gebäude (s. Abbildung 14). Auch ein Windpark in ca. 20 km Entfernung konnte noch aufgelöst werden. Als Beispiel wird ein Windpark in 8,5 km Abstand zum DVOR in Abbildung 15 gezeigt.



Abbildung 15: Windpark ca. 8,5 km südwestlich vom DVOR Bremen als Teil der Cluttermap.

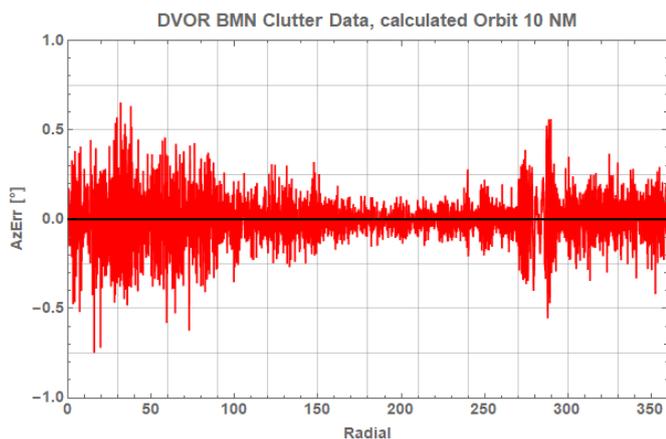


Abbildung 16: Aus der Clutter-Map mit mehr als 2000 Objekten berechneter Winkelfehler für einen Orbit von 10 NM.

In Abbildung 16 ist die aus einer Clutter-Map berechnete Vorbelastung des Winkelfehlers gezeigt. Die Berechnungen wurden für den Abstand von 10 NM durchgeführt.

Validierung mit Hilfe kooperativer Störer (Autokran)

Zur Validierung lassen sich kooperative und vorher charakterisierte Störer, wie z.B. ein Autokran, einsetzen. Seine Reflektivität ist eine inhärente Eigenschaft unabhängig vom Ort. Seine Position ist aus den GPS-Daten genau bekannt. Bei den Validierungsmessungen sollte der Kran nun an den verschiedenen Orten identifiziert werden können, die gemessene Reflektivität muss jedoch jeweils identisch sein. Natürlich ist die Störwirkung eines Hindernisses in 3 km Abstand zum DVOR größer als bei 5 km Abstand. Mit Hilfe der Doppler-Kreuzpeilung und der Berechnung von Ersatzquellen wird jedoch immer die Eigenschaft des Störers unabhängig vom Abstand bestimmt. In die Analyse der Vorbelastung gehen

dann sowohl die Reflektivität als auch der Abstand zum DVOR als Parameter ein, damit wird die abstandsabhängige Störwirkung von Reflektoren korrekt betrachtet. Diese Messungen stehen kurzfristig an (vgl. eingereichte Förderskizze zu WERAN plus2).

3.3 Neuer Ansatz für die Berechnung des Winkelfehlers bei DVOR

Nachdem nun alle Beiträge nach Gl.1 aufgearbeitet wurden, kann die Gl. 1 zur Beurteilung der Störgrößen wie folgt umgeschrieben werden (s. Gl.4):

$$\Delta\varphi_{max} \geq \Delta\varphi_{Warn} + \Delta\varphi_{Magnet} + \sqrt{\Delta\varphi_{Vorbelastung}^2 + \Delta\varphi_{Prognose}^2} \quad \text{Gl. 4}$$

Mit den zuvor diskutierten Größen kann für DVOR folgende Betrachtung nach Gl. 5 übernommen werden.

$$3,5^\circ \geq 1^\circ + 0,5^\circ + \sqrt{\Delta\varphi_{Vorbelastung}^2 + \Delta\varphi_{Prognose}^2} \quad \text{Gl. 5}$$

Bei einer Vorbelastung von 1° stehen $1,7^\circ$ Winkelfehler für WEA zur Verfügung, bei $0,5^\circ$ Vorbelastung wären es $1,93^\circ$ für WEA.

3.4 Systemgrenzen

Das örtliche Auflösungsvermögen des Doppler-Kreuzpeilungsverfahrens hängt entscheidend von der Auflösungsbandbreite ab. Wird eine kleine Bandbreite gewählt, so kann ein Streuszenario (bspw. eine Stadt wie Bremen) räumlich feingranular (in der Größenordnung von 50 m) aufgelöst werden. Die damit einhergehende Einschwingzeit von einigen 10 Sekunden kann dazu führen, dass kurzauftretende Reflektionen an großen Gebäudeflächen, in ihrer Störwirkung, unterschätzt werden. Dieser Effekt tritt allerdings nur signifikant bei Gebäuden $> 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ Fassadenfläche auf.

In kritischen Fällen kann jedoch das Erhöhen der Auflösungsbandbreite dazu genutzt werden, um auch kurzfristig auftretende Reflektionen in ihrer Amplitude richtig zu erfassen. Die erhöhte Bandbreite führt jedoch dazu, dass das räumliche Auflösungsvermögen sinkt. Sprich mehrere kleine Objekte dicht beieinander können nicht mehr getrennt erfasst werden. In kritischen Fällen ist es von daher erforderlich, weitere Flugmanöver (Radial und Orbitalflügen in verschiedenen Höhen und Abständen) durchzuführen. Je feingranularer das Messszenario erfasst wird, um so präziser ist das daraus resultierende Reflexionsmodell.

In den derzeit durchgeführten orbitalen Messflügen in rund 10 NM Entfernung zum DVOR ist eine Mindestentfernung von rund 250 m zwischen Streuobjekt und DVOR erforderlich, um ein solches Streuobjekt detektieren zu können. So können derzeit keine Objekte detektiert werden, die sich in unmittelbarer Umgebung (Zaun, Bäume, weitere Antennen, ...) zum DVOR befinden. Auch hier sind weitere Flugmanöver denkbar, die gezielt einzelne Streuobjekte erfassbar machen.

Momentan werden Objekte in der Doppler-Kreuzpeilung z.T. auch noch mehrfach erfasst, weil sie aus verschiedenen Richtungen beobachtet werden. Eine entsprechende Objektklassifikation und Filterung

sind Gegenstand aktueller Arbeiten. Aus diesem Grund kann die Vorbelastung momentan noch leicht überschätzt werden.

3.5 Offene Arbeitsziele

Die noch offenen Ziele beinhalten im Wesentlichen die operationelle Nutzbarmachung der Projektergebnisse aus dem Projekt WERAN plus in Bezug auf die Drehfunkfeuer. Diese bauen auf den Messmöglichkeiten und Simulationsmethoden aus dem Projekt WERAN sowie den neuen Bewertungsmethoden für die Beurteilung der Störwirkung von WEA auf die Signale von VOR sowie die Vorbelastungsanalyse von VOR aus WERAN plus auf.

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele beinhalten die Aspekte:

- a) die erzielten Projektergebnisse aus WERAN plus durch die Entwicklung dauerhaft flugtauglicher und luftfahrtzugelassener hochauflösender Messempfänger als zugelassener Zusatz des Flugvermessungssystems (FIS) in die operationelle Nutzung bei der Flugvermessung zu überführen; nur diese ist in der Lage, allwettertauglich die Doppler-Kreuzpeilung messtechnisch auszuführen.
- b) die Ergebnisse aus der Flugvermessung und dem Forschungsflugzeug anhand von kooperativen Störern (z.B. Autokran) experimentell nachzuweisen;
- c) geeignete Konzepte für BAF und DFS zu entwickeln, wie die wissenschaftlichen Daten für den Betrieb nutzbar gemacht werden können;
- d) der Nutzung oder Einbau von Hardware zur Überwachung der Frequenzstabilität der DVOR-Sender

Damit wäre erstmals ein umfassendes ganzheitliches wissenschaftliches Konzept, wie vom Bundesverwaltungsgericht gefordert (s. Einleitung), zur Beurteilung der Störwirkung von WEA auf terrestrische Navigationsanlagen wie Drehfunkfeuer von der wissenschaftlichen Untersuchung bis hin zur operationellen Nutzung abgeschlossen.

Dazu wurde ein Ergänzungsantrag als Skizze WERAN plus2 beim Projektträger Jülich unter dem Aktenzeichen – 100579055 eingereicht.

4 Weiteres Vorgehen

Die zunehmende Komplexität bei der Bewertung von Bauvorhaben im Anlagenschutzbereich gemäß § 18a LuftVG und § 35 BauGB (Bauen im Außenbereich) stellt für die zustimmungspflichtigen Behörden eine große Herausforderung dar, wenn es um die Bewertung von potentiellen Signalstörungen der Wellenausbreitung von Funk- und Radar-Anlagen durch geplante Bauvorhaben geht. Hierbei ist häufig eine wissenschaftlich fundierte Begleitung notwendig, die auf Grundlage der Kombination von Simulationen und rückgeführter Messungen an diesen Anlagen sachverständige Aussagen ermöglicht. Genau dies ist Gegenstand der Forschungsprojekte „WERAN“ (bis 2018) und „WERAN plus“ (laufend), deren Projektleitung bei der PTB liegt.

Die in den Genehmigungsverfahren beteiligten Behörden sind keine wissenschaftlichen Einrichtungen und verfügen nur in eingeschränkter Form über die notwendige Expertise, sodass sie häufig auf externe Institute oder Sachverständige zurückgreifen müssen. Die oft streitbefangenen Vorgänge bergen ein erhebliches Konfliktpotential.

Im Verlauf der beiden Forschungsprojekte hat sich gezeigt, dass durch die kontinuierliche Zusammenarbeit mit den Behörden eine stetig gewachsene Vertrauensbasis entstanden ist. Insbesondere bei der Interaktion von WEA mit Navigationsanlagen der Flugsicherung haben grundlegende Untersuchungen Lösungen herbeigeführt, die durch die Neudefinition einer Prognose zur Störwirkung den Zubau von zahlreichen WEA an zuvor abgelehnten Standorten ermöglichte [20]. Dies ist ein wichtiger Beitrag für die Energiewende in Deutschland.

Aber auch in anderen Ländern wie z.B. Frankreich sind ähnliche Probleme zu lösen. Auf der deutsch-französischen Konferenz „Onshore-Windenergie und Genehmigungsverfahren in Deutschland und Frankreich: Rechtsrahmen, Hemmnisse und Perspektiven 2021“ [21] wurden die gemeinsamen Probleme erörtert und die wissenschaftlichen Ergebnisse aus WERAN plus vorgestellt.

4.1 Perspektive für Behörden und Organisationen mit öffentlichem Auftrag

Das beteiligte Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung (BAF), welches für den Anlagenschutz nach § 18a LuftVG zuständig ist, wünscht sich für die Zeit nach Beendigung des Projekts WERAN plus einen dauerhaften Ansprechpartner in Form einer Institution für diese Problemstellungen. Diese Institution soll unabhängig sein von den Interessen der Anlagenbetreiber (z.B. DFS Deutsche Flugsicherung GmbH) und denen der Bauplanung. Die vorhandene Messtechnik auf Flugmessplattformen bei der PTB ist hierbei ein wesentlicher Baustein, der auch zukünftig genutzt werden kann.

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) als Partner der Forschungsprojekte WERAN (plus) und RIWER³ (Entwicklung von neuen Verfahren zur Überwindung des Störeinflusses von Windenergieanlagen auf Wetterradarsysteme)

³ Verbundvorhaben RIWER - Entwicklung von neuen Verfahren zur Überwindung des Störeinflusses von Windenergieanlagen auf Wetterradarsysteme, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (RIWER_FKZ 03EE3004A-E).

terrardarsysteme) hat ebenfalls Interesse bekundet, die bestehenden Messmöglichkeiten für weitergehende Untersuchungen an ihren Niederschlagsradaren zu nutzen. Dies ist nicht explizit in den bisherigen Projektinhalten abgebildet.

Für die Behörden ist es von Vorteil, wenn die beratende Institution unabhängig von privatwirtschaftlichen Interessen ist und einen öffentlich-rechtlichen Hintergrund besitzt. Das Konsortium befasst sich derzeit unter Leitung der PTB zusätzlich damit, zusammen mit den Verantwortlichen eine Konstituierung in die Wege zu leiten.

5 Erläuterungen zum verringerten Prüfradius bei DVOR

Gemäß ICAO EUR DOC 15 [2] beträgt der Prüfradius bei DVOR 10 km, bei CVOR 15 km. Nach einer Prüfung seitens der DFS behält diese sich auch bei DVOR einen Prüfradius von 15 km vor, außer in Hamburg, wo dieser auf 10 km verringert wurde. Im Vergleich dazu werden gemäß des ICAO Dokuments hohe Gebäude ab 3 km Abstand nicht untersucht.

Der Vorschlag, den Prüfradius im Anlagenschutzbereich bei DVOR von derzeit 15 km auf 7 km zu verringern, wird durch zahlreiche Vor-Ort-Messungen des tatsächlich im Luftraum vorliegenden Winkelfehlers begründet. Typischerweise liegt der gemessene Gesamtfehler, also die Überlagerung aller Winkelfehleranteile, in der gleichen Größenordnung von etwa $0,5^\circ$ wie die tägliche Schwankung des Erdmagnetfelds, also der Nordausrichtung. Andere Einflussfaktoren, wie Hochspannungsleitungen, Gebäude, nahe Vegetation oder auch Einbauten von Antennensystemen und Geländern direkt auf der Reflektorplatte unterhalb der DVOR-Antennen oder z.B. des DFS-Towers am Flughafen Bremen führen häufig zu höheren Winkelfehlern als Windparks, wurden aber bisher bei der gutachterlichen Stellungnahme gar nicht berücksichtigt.

Auch innerhalb des Prüfradius von DVOR können WEA errichtet werden, nur unterliegen sie dann einer Einzelfallprüfung. Ein verringerter Prüfradius schafft im Außenraum viel Platz für Windenergie und verringert den Planungsaufwand und die Verfahrensdauer erheblich.

5.1 Parameterstudie für einen Windpark am Beispiel des DVOR Bremen

Am Beispiel des DVOR Bremen⁴ wird exemplarisch untersucht, welchen Einfluss ein großer Windpark (bestehend aus 100 einzelnen WEAs) auf den Winkelfehler hat. Hieraus kann schließlich abgeleitet werden, inwieweit der Prüfradius von derzeit 15 (10) km verkleinert werden kann.

Hierzu werden im Folgenden drei Szenarien untersucht:

- a) ein sehr dicht gepackter Windpark entlang des Radials mit größter Vorbelastung,
- b) ein sehr dicht gepackter Windpark entlang des Radials mit kleinster Vorbelastung,
- c) ein weniger dicht gepackter Windpark entlang des Radials mit größter Vorbelastung.

Für jedes Szenario wird in einem Abstand von 10 km ... 13 km zum DVOR ein zufällig verteilter Windpark generiert, der die in Tabelle 1 beschriebenen Anforderungen erfüllt. Anschließend wird der Abstand jedes Windparks zum DVOR variiert und der maximale Winkelfehler in 80 NM Entfernung bei 1° Elevation ermittelt. Für jedes Szenario wurden insgesamt 25 Windparks generiert und der (abstandsabhängige) Maximal-Winkelfehler ermittelt.

⁴ Die Untersuchungen erfolgen exemplarisch am DVOR Bremen, da dessen Umgebung bereits mit Hilfe der Doppler-Kreuzpeilungsmethode charakterisiert wurde. Die abgeleiteten Erkenntnisse sind allerdings allgemeingültig.

Tabelle 1: Parameter der untersuchten Szenarien

	Szenario a	Szenario b	Szenario c
Anzahl WEAs	100		
Mindestabstand zwischen den WEAs	300 m		600 m
Höhe der WEA Türme	200 m		
Mittleres Radial	50°	230°	50°
Radialbereich in 10 ... 13 km Entfernung	±20°		±40°
Anzahl Anordnungen	25		

Insgesamt zeigt sich, dass selbst bei unrealistisch dichtem Bau von 100 WEAs mit einer Einzelhöhe des Turms von 200 m ein Maximalfehler von 2° bei einem Mindestabstand von 7 km typischerweise nicht überschritten wird (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20). Für das realistischere Szenario c wird selbst bei einem Mindestabstand von 5 km ein Maximalfehler von 2° nicht überschritten. Daher ist eine Verringerung der Prüfradien auf 7 km ohne Einschränkungen machbar.

Anmerkung: Die Winkelfehler-Prognose basiert hier auf einem im Rahmen des Projekt WERAN plus entstandenen 3D-Prognosetool, welches den Winkelfehler auf Basis der *Odunaiya Expressions* ermittelt [22], [23]. Die Vorbelastung bzw. der Umgebungseinfluss wird mit Hilfe äquivalenter Störquellen modelliert. Eine WEA wird mit Hilfe einfacher Grundkörper (z.B. kleiner Zylinder) modelliert, deren Streuverhalten vorberechnet wurde, was eine schnelle Winkelfehler-Prognose (selbst bei einer großen Anzahl von WEAs) erlaubt.

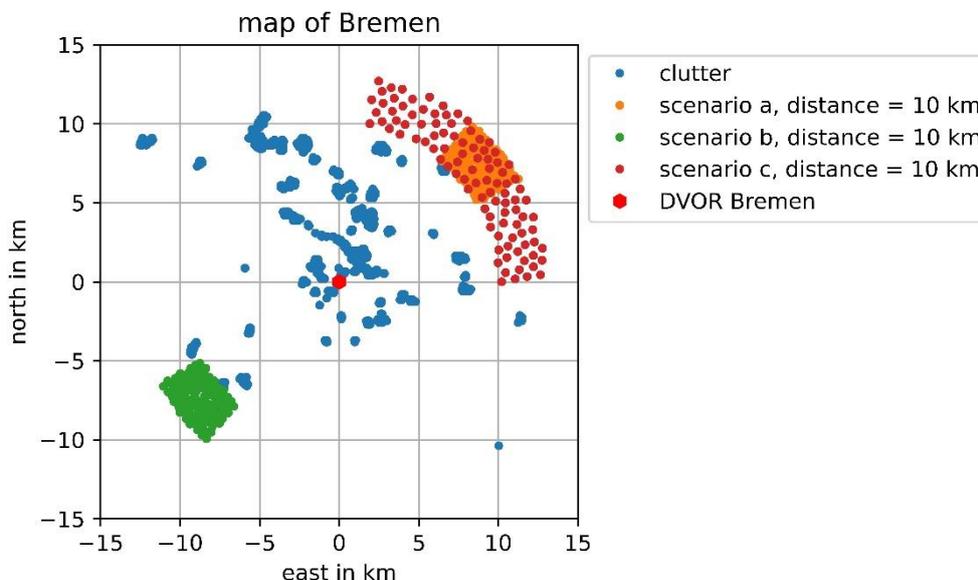


Abbildung 17: Clutter-Map um das DVOR-Bremen mit zusätzlichen Windparks in drei unterschiedlichen Szenarien

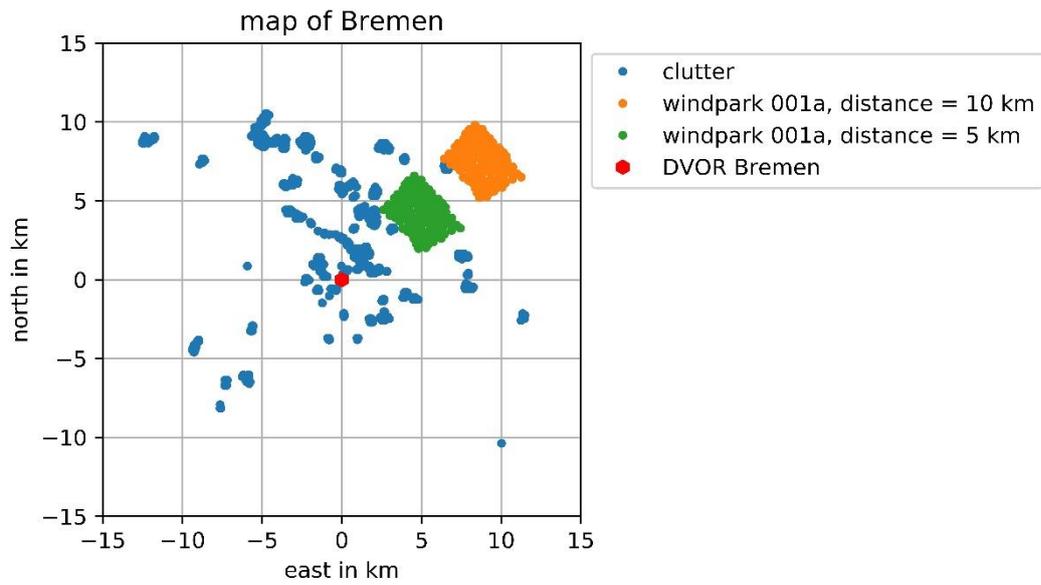


Abbildung 18: Abstandsvariation des Windparks 001a (die Anordnung der einzelnen WEAs wird bei der Abstandsvariation nicht beeinflusst)

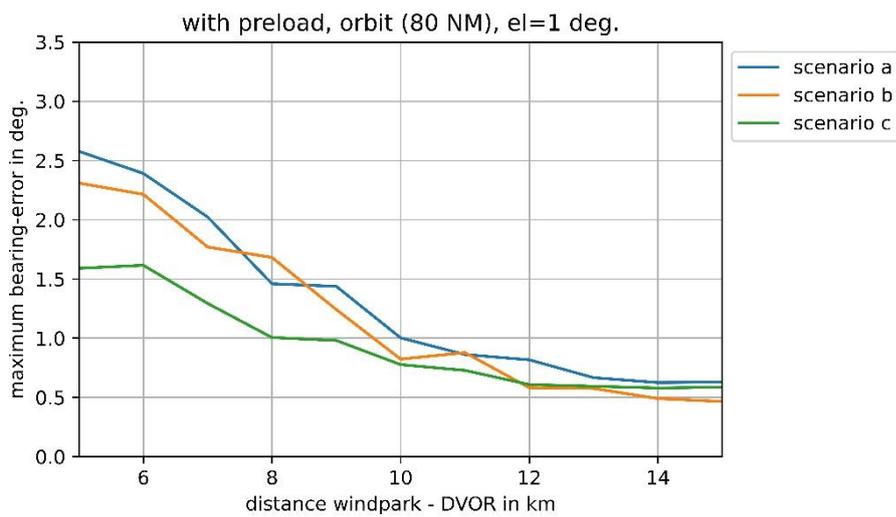


Abbildung 19: Maximaler Winkelfehler der zufällig generierten Windparks als Funktion des Abstands zwischen DVOR und Windpark (kleinster Abstand) mit Vorbelastung

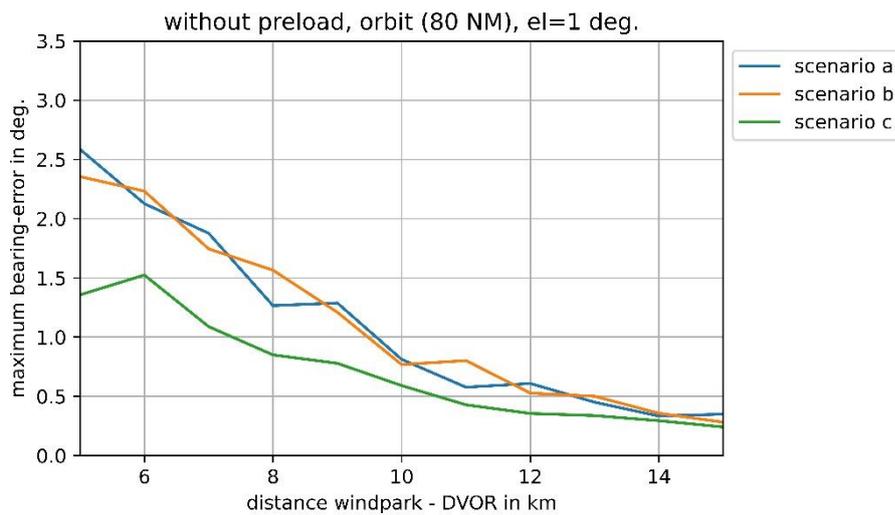


Abbildung 20: Maximaler Winkelfehler der zufällig generierten Windparks als Funktion des Abstands zwischen DVOR und Windpark (kleinster Abstand) ohne Vorbelastung

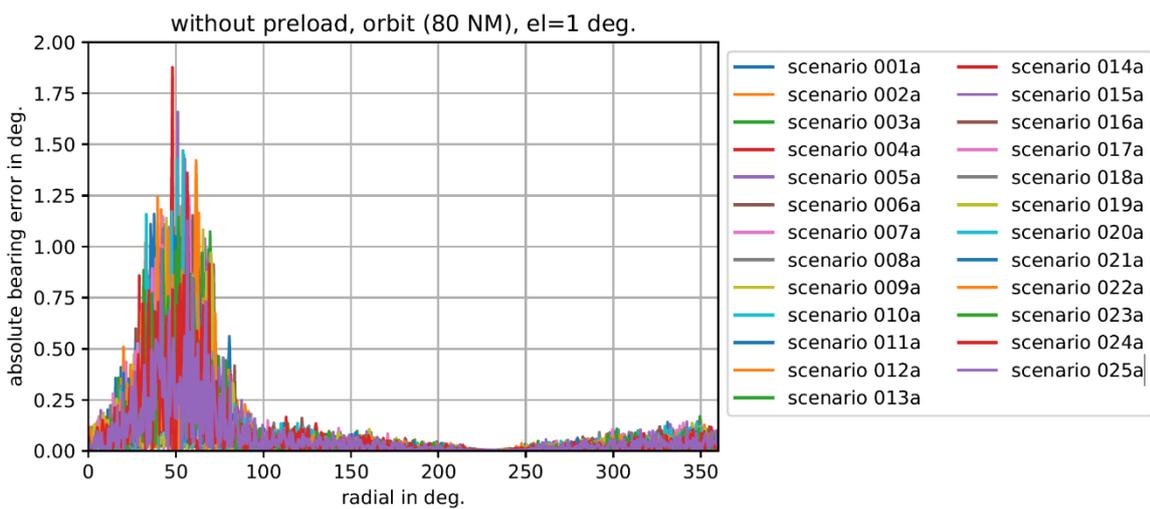


Abbildung 21: Maximaler Betrag des Winkelfehlers für 25 Windparks mit zufälliger Verteilung der Windenergieanlagen in 7 km Abstand zum DVOR

Für den Abstand 7 km ist hier beispielhaft gezeigt, wie sich der maximale Winkelfehler für 25 unterschiedliche Anordnungen der WEA im virtuellen Windpark auf die Radiale verteilt.

6 Pragmatischer Lösungsvorschlag für CVOR

Die Arbeiten im Projekt WERAN plus befassen sich auch mit der Prognoseformel für mögliche Winkelfehler durch WEA an CVOR-Signalen. Durch die Außerbetriebnahme von CVOR oder Umrüstung von CVOR zu DVOR werden in Zukunft vermutlich ab 2030 in DE keine CVOR mehr betrieben. In dieser Übergangszeit muss der Anlagenschutz noch sichergestellt werden, aber auch der Ausbau der Windenergie darf angesichts der Bedeutung einer gesicherten Energieversorgung nicht behindert werden. Beide Belange müssen also gleichberechtigt nebeneinanderstehen. Aus technischer Sicht sind daher die Faktoren zu benennen, die zur gutachterlichen Bewertung von Bauanträgen für WEA im Anlagenschutzbereich von CVOR in Übereinstimmung mit ICAO herangezogen werden können.

Die Prognoseformel für CVOR ist in mehreren Implementierungen verfügbar, gemäß Odunaiya [23], Ben-Hassine [22] und Eichhorn/Fries [24]. Die Verfahren wurden implementiert, die Ergebnisse werden gerade abschließend verglichen. Bislang liefern alle Methoden Ergebnisse von Winkelfehlern in guter Übereinstimmung.

Parallel dazu wurden numerische Simulationen entwickelt, die wiederum aus den elektromagnetischen Feldern plus nachgeschalteter Mathematik den Winkelfehler berechnen. Damit lässt sich z.B. auch die systembedingte Unrundheit in der Abstrahlung von CVOR ermitteln und mit Messungen vergleichen.

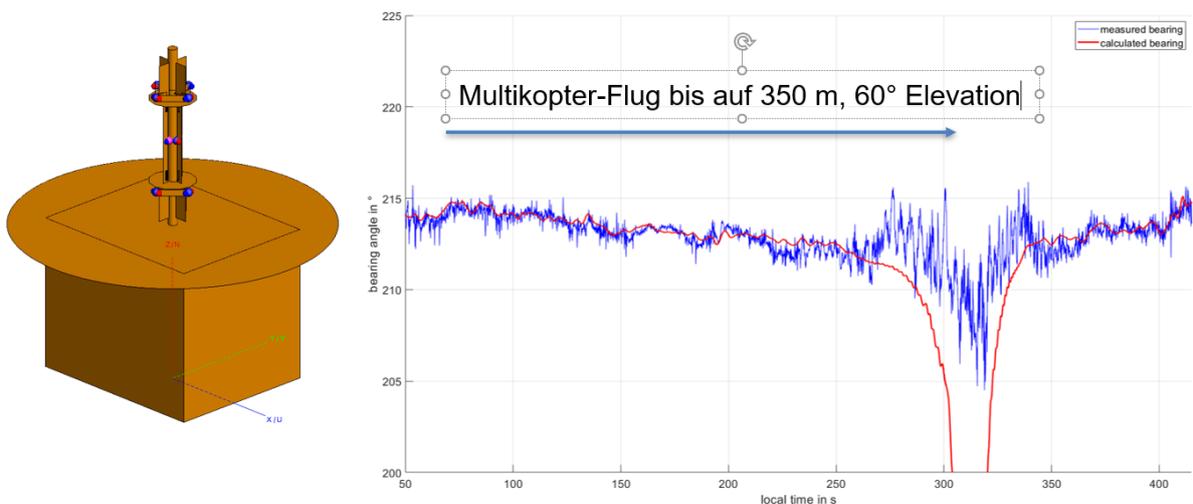


Abbildung 22: Simulationsmodell einer CVOR; Vergleich der Radiale von Vor-Ort-Messung und Vollwellensimulation in der Nähe eines Windparks. Beim Aufstieg des Multikopters bis auf 350 m Höhe über Grund, entsprechend einer Elevation von 60°, erreicht man den Bereich der eingeschränkten Abstrahlung (in der Messzeit 275-350 s). Dort steigen dann die Fehler stark an.

Sowohl mit den Multikoptern als auch dem Motorsegler Jade One wurden Vor-Ort-Messungen des Signals im Luftraum durchgeführt. Die bisher durchgeführten Vergleiche zeigen in guter Übereinstimmung die technischen Probleme der CVOR, nämlich eine nicht-ideale Abstrahlungscharakteristik sowie ein stark rauschbehaftetes Signal im Raum. Ein Flugzeugempfänger filtert diese Messdaten stark mit einer Tiefpasscharakteristik. Solange das Ergebnis mittelwertfrei bleibt, gibt es keinen großen Beitrag zum Winkelfehler. Aber es ist schwierig, in einem solchen Signal den Einfluss von weit entfernt stehenden WEA nachzuweisen, weil sich der Einfluss von WEA ebenfalls als zusätzlicher rauschartiger Vorgang bemerkbar macht (ohne dass es Rauschen im klassischen Sinne ist). Die neuen CVOR-Prognoseformeln

können damit aufgrund der bisherigen Messergebnisse als ausreichend gesichert und validiert gelten [17].

Aufgrund der Betriebsweise kann bei CVOR keine Doppler-Kreuzpeilung zur Bestimmung der Vorbelastung genutzt werden. Da CVOR für die Flächennavigation (*area navigation* - RNAV) im Luftfahrthandbuch AIP abgekündigt sind und daher ausschließlich für An- und Abflugverfahren auf wenigen Radialen genutzt werden und in Zukunft ganz entfallen sollen, ließe sich wie bei DVOR ein pragmatisches Vorgehen zur Bestimmung der Vorbelastung im Einklang mit ICAO aufsetzen.

Dazu können radiale Messdaten aus der Flugvermessung gemäß ICAO 8071 2.3.12 [1] für die Beurteilung der Vorbelastung $\Delta\varphi_{\text{Vorbelastung}}$ herangezogen werden. Hier bestehen keine Bedenken hinsichtlich der Messdatenaufnahme wie bei den Orbitflügen, die Messdaten sind über die Jahre auch eher stabil. Aus den radialen Messdaten lassen sich direkt die langsam veränderlichen Winkelfehler (Bends) ablesen. Für eine gutachterliche Stellungnahme wird jeweils die letzte (aktuelle) Flugvermessung als Vorbelastung $\Delta\varphi_{\text{Vorbelastung}}$ ausgewertet. Der Einfluss der WEA und der maximale Winkelfehler würden dann nur entlang des jeweiligen Radials berechnet.

Die bei DVOR gültigen 3,5° maximaler Winkelfehler lassen sich auf CVOR übertragen. Aufgrund der deutlich schlechteren Abstrahleigenschaften (Unrundheit) ist der anlageneigene Fehler bei CVOR größer als bei DVOR, allerdings wird dieser Fehler bereits bei den Flugvermessungen auf dem Radial berücksichtigt. Daher kann auch hier von einem anlagenbedingten Winkelfehler von 1,5° ausgegangen werden.

Die Implementierung des Verfahrens an Standorten, wo die CVOR ersatzlos entfallen, erfordert nur wenig Aufwand seitens der DFS und sollte in wenigen Wochen etabliert sein. An Standorten, wo von CVOR auf DVOR umgerüstet wird, legt man die DVOR-Kriterien zu Grunde.

7 Literaturverzeichnis

- [1] ICAO, DOC 8071, Volume I, Testing of Ground-based Radio Navigation Systems, Fifth Edition - 2018.
- [2] ICAO, „EUR DOC 015, Europäisches Anleitungsmaterial zum Umgang mit Anlagenschutzbereichen,“ Third Edition, November 2, 2015.
- [3] K. Schubert, J. Werner und J. Bredemeyer, „Localisation and Characterisation of Scatter Objects using VHF channel sounding,“ in *Specialist Meeting on Electromagnetic Waves and Wind Turbines 2021 (EMWT 2021)*, Zürich, Schweiz (online), 2021.
- [4] K. Schubert, J. Bredemeyer und J. Werner, „Generation of VHF ground clutter map employing partially cooperative transmitter,“ in *2021 21st International Radar Symposium (IRS)*, pp. 1-10, doi: 10.23919/IRS51887.2021.9466199, 2021.
- [5] IEA, International Energy Agency, Aviation System Cohabitation, Task 11, Topical Expert Meeting #100, 8-9 December 2020.
- [6] T. Schrader und J. Bredemeyer, „Signal-in-Space Measurements using Microcopters,“ in *Proceedings 19th International Flight Inspection Symposium (IFIS)*, Belgrad, Serbien, 2016.
- [7] T. Schrader, J. Bredemeyer, M. Mihalachi, J. Rohde und T. Kleine-Ostmann, „Concept and design of a UAS-based platform for measurements of RF signal-in-space,“ *Adv. Radio Sci.* 14, <https://doi.org/10.5194/ars-14-1-2016>, pp. 1-9, 2016.
- [8] S. Sandmann, J. Bredemeyer, T. Schrader und H. Garbe, „A Numerical Time Domain Method for Calculation of the Indicated DVOR Bearing in Dynamically Disturbed Scenarios,“ *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, pp. 8pp., DOI: 10.1049/iet-map.2018.5591, August 2019.
- [9] C. Morlaas, M. Fares und B. Souny, „Wind Turbine Effects on VOR,“ *IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS*, October 2008.
- [10] C. Morlaas, A. Chabory und B. Souny, „Propagation model for estimating VOR bearing error in the presence of wind turbines — Hybridation of parabolic equation with physical optics,“ in *4th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Barcelona, Spain, 2010.

- [11] T. Schrader, D. Ulm, S. Sandmann, T. Kleine-Ostmann und R. Eichhorn, „WERAN plus: Interaction of DVOR with Wind Turbines,“ in *Specialist Meeting on Electromagnetic Waves and Wind Turbines 2021 (EMWT 2021)*, Zürich, Schweiz (online), 2021.
- [12] ICAO, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation: Aeronautical Telecommunications - Volume I: Radio Navigation Aids, 2018.
- [13] ICAO, Doc 9613, Performance-based Navigation Manual, 2013.
- [14] ICAO, Doc 8168, Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations, Seventh Edition, Vol 2, 2020.
- [15] EUROCONTROL, GUID-0114, Edition 1.2, 2008.
- [16] EUROCAE, ED-75D, 2014.
- [17] T. Schrader, B. Powierza, S. Sandmann, T. Kleine-Ostmann und R. Eichhorn, „WERAN plus: Interaction of CVOR with Wind Turbines ,“ in *Specialist Meeting on Electromagnetic Waves and Wind Turbines 2021 (EMWT® 21)*, Zürich, Schweiz (online), 2021.
- [18] J. Bredemeyer, Gutachten zur Interaktion zwischen Windenergieanlagen und DVOR-Anlagen der Flugsicherung, Braunschweig: Land Schleswig-Holstein, Vergabenummer ZB-UO-13-068-9000-4121.1, 2014.
- [19] J. Bredemeyer, Fortführendes Gutachten zur Interaktion zwischen Windenergieanlagen und dem DVOR MIC unter besonderer Betrachtung der Störwirkung auf den Empfänger, Land Schleswig Holstein, Vergabenummer ZB-UO-14-0811000-4122.3, 2015.
- [20] Bundesverband WindEnergie e.V., „Ergebnisse der BWE-Umfrage 2021 zu Genehmigungshemmnissen durch Drehfunkfeuer und militärische Belange der Luftraumnutzung in Kooperation mit der FA Wind,“ Bundesverband WindEnergie e.V., Berlin, Deutschland, 2021.
- [21] T. Schrader und T. Kleine-Ostmann, „Results of the WERAN / WERAN plus Research Projects: Coexistence of Wind Turbines and Terrestrial Navigation/Radar Systems,“ in *Onshore wind energy and permission process in France and Germany: regulatory framework, issues and perspectives*, Online, November 2021.
- [22] S. Ben-Hassine, Multipath and receiver models for assessing the VOR bearing error: application to wind farms. Signal and Image processing., Toulouse, Frankreich: Université Paul Sabatier - Toulouse III, ffNNT : 2020TOU30047ff. fftel-03001293f, 2020.

[23] S. Odunaiya und D. Quinet, „Calculations and analysis of signal processing by various navigation receiver architectures,“ in *Digital Avionics Systems Conference*, Athens, Ohio, 2004.

[24] M. Fries und R. Eichhorn, „Full wave simulation based assessment methodology for conventional VOR,“ Zürich, Schweiz (online), 2021.

8 Abkürzungsverzeichnis

AIP	Luftfahrthandbuch (englisch <i>Aeronautical Information Publication</i>)
AM	Amplitudenmodulation
AIS	<i>Automatic Identification system</i> , automatisches Positionsmeldesystem für Schiffe
BAF	Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BWE	Bundesverband Windenergie
CDI	<i>Course deviation Indicator</i>
CVOR	<i>Conventional Very High Frequency Omnidirectional Radio Range</i>
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH
DVOR	<i>Doppler Very High Frequency Omnidirectional Radio Range</i> , Doppler-UKW-Drehfunkfeuer
3D	drei-dimensional
DWD	Deutscher Wetterdienst
FM	Frequenzmodulation
FW-VTOL	<i>Fixed-Wing Vertical-take-off-and-landing</i> , spezielle Flugmessplattform mit schwenkbaren Motoren
ICAO	<i>International Civil Aviation Organisation</i>
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RCS	Radar Cross Section, Radarquerschnitt, auch als quasi RCS
RNAV	<i>Area Navigation</i> , Flächennavigation
SIS	<i>Signal-in-Space</i> im Raumpunkt vorliegendes Signal
VOR	<i>VHF Omnidirectional Radio Range</i> , Drehfunkfeuer der terrestrischen Navigation
WEA	Windenergieanlagen

9 Anhang Zukunft der VOR

Quelle:

Persönliche Kommunikation mit Dr. Ferdinand Behrend, Sachverständiger und Gutachter DIN/ISO EN/IEC 17024 Flugbetrieb und Flugsicherung.

- **ICAO Doc 9750 – „Global Air Navigation Plan 2016 – 2030“**
 - Der „Global Air Navigation Plan 2016 – 2030“ (ICAO Doc 9750) der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation **ICAO** (*International Civil Aviation Organization*) sieht vor, dass zukünftig nur noch Flächennavigationsverfahren im Sinne der leistungsbasierten Navigation (*Performance Based Navigation PBN*) eingesetzt werden sollen. Diese verwenden als primäres System Satellitennavigation (GPS, GLONASS, Galileo), bordeigene Trägheitsnavigation und bodengestützte konventionelle DME-Anlagen.
- **ICAO Annex 10 – Aeronautical Telecommunication, Radio Navigation Aids**
 - Der ICAO Annex 10 sieht hier in der „Strategy for Rationalization of Conventional Radio Navigation Aids Evolution toward supporting Performance Based Navigation“ (Attachment H) einen Rückbau der VOR/DVOR Anlagen um bis zu 50% vor - in Abhängigkeit der jeweiligen Luftraumsituation (u.a. Sicherheit, Verkehrsaufkommen, Ausstattungsgrad, Kapazität) – um nur noch ein rudimentäres Netz an Instrumentenflugverfahren mit VOR/DVOR zur Verfügung zu stellen.
- **(EU) 2018/1048, (EU) 2018/1139**
 - Auf europäischer Ebene werden die Inhalte dieser Strategie konkret mit der Durchführungsverordnung (EU) 2018/1048 vom 18. Juli 2018 zur „Festlegung von Anforderungen an die Luftraumnutzung und von Betriebsverfahren in Bezug auf die leistungsbasierte Navigation“ (gestützt auf die Verordnung (EU) Nr. 2018/1139 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2018 zur Festlegung gemeinsamer Vorschriften für die Zivilluftfahrt und zur Errichtung einer Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit) verbindlich für alle europäischen Mitgliedsstaaten vorgeschrieben. Alle Flugsicherungsanbieter und Betreiber von Flughäfen müssen ihre Instrumentenflugverfahren und entsprechende Navigationsinfrastruktur bis spätestens 6. Juli 2030 auf Flächennavigation mit spezifischen Leistungswerten im Sinne der leistungsbasierten Navigation (PBN) umstellen.
- **(EU) 716/2014**
 - Dies soll auch entsprechende **Contingency**-Maßnahmen – insbesondere die Aufrechterhaltung eines Netzes konventioneller Flugnavigationshilfen (z.B. VOR/DVOR) – beinhalten (Artikel 6 EU 2018/1048), um im Falle eines Ausfalls der Satelliten-Navigation weiterhin Instrumentenflugverfahren aufrecht zu erhalten. Ein vollständiger Abbau aller VOR/DVOR Anlagen ist demnach vorerst nicht vorstellbar, ohne in der Konsequenz nicht bestimmte Luftraumteilnehmer auszuschließen. Unter Berücksichtigung dieser

Gesichtspunkte – insbesondere die Europäische Verordnung 716/2014 – ist die Bedeutung von VOR/DVOR Anlagen zukünftig für den Flugbetrieb jedoch als gering einzustufen. Auf Basis der Europäischen Durchführungsverordnung (EU) 716/2014 vom 27. Juni 2014 über die „Einrichtung des gemeinsamen Pilotvorhabens für die Unterstützung der Durchführung des europäischen Masterplans für das Flugverkehrsmanagement“ müssen bis zum 1. Januar 2024 alle deutschen Großflughäfen (Frankfurt/Main, München, Düsseldorf, Berlin BER) ihre Instrumentenflugverfahren (An- und Abflugverfahren) vollständig auf Flächennavigation ohne VOR/DVOR umstellen.