



Technische Universität Braunschweig
Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit
Schleinitzstraße 23
38106 Braunschweig
Deutschland

Analyse und Bewertung der DFS-Methodik zur Prognose möglicher Störungen von Drehfunkfeuern durch Windenergieanlagen

Im Auftrag von:

ENERCON Windpark GmbH
Dreekamp 5
26605 Aurich

Bearbeiter:

Dr.-Ing. habil. Robert Geise

Telefon: +49 (0)531 / 391-7726

E-Mail: r.geise@tu-braunschweig.de

Institutsleiter:

Prof. Dr. Achim Enders

Datum:

31.03.2019

Document Number:

IEMV-Gutachten zur DFS-Methodik

Related documents:

Bewertungsmethodik der DFS zur VOR-Beeinflussung durch
Windenergieanlagen“, pdf-Dokument, Stand 27.03.2017.

Inhalt

I. Einleitung	1
II. Kurzdarstellung des physikalischen Problems „Mehrwegeausbreitung“ beim Drehfunkfeuer	5
Themenkomplex a : Wie stark reflektiert eine WEA?	6
Themenkomplex b : Wie ist das Empfängerverhalten beschreibbar?	8
Themenkomplex c : Wie überlagern sich Reflektionen von vielen WEA?	12
III. Detailliertere Bewertung der von der DFS verwendeten, zentralen Formel zur Berechnung des DVOR-Winkelfehlers	15
1. Einheitenrechnung	16
2. Plausibilitätsanalyse mit einfachsten Beispielen	17
3. Zur „empirischen Validierung“ der DFS Methodik	18
IV. Zur öffentlichen Diskussion und zur Thematik „Gutachterstreit“	20
V. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	24
Literaturverzeichnis	25

I. Einleitung

Das Gutachten befasst sich mit dem möglichen Störeinfluss von Windenergieanlagen (WEA) auf das in der Avionik verbreitete Navigationssystem „Drehfunkfeuer“ (VOR, heutzutage meistens realisiert als DVOR). Die möglichen Störungen führen zu ungenauen Richtungsangaben, die als Winkelungenauigkeiten bei der Anzeige der aktuellen Flugrichtung im Cockpit eines Flugzeuges auftreten. Diese werden als „Winkelfehler“ bzw. „bearing error“ bezeichnet. Im Gutachten werden zwei wesentliche Zielsetzungen angestrebt:

1) Die Problematik WEA und DVOR vereinfacht zusammenzufassen und wesentliche Begrifflichkeiten und den Stand der Technik auch für Nicht-Fachleute darzustellen.

2) Vereinfacht und exemplarisch aufzuzeigen, dass die in vielen Jahren bis heute praktizierte und in den meisten juristischen Streitigkeiten angewandte Methodik der Deutschen Flugsicherung GmbH (DFS) nicht nur dem wissenschaftlichen Stand der Technik nicht entspricht, sondern auch elementarerer Kriterien wissenschaftlicher Qualitätssicherung nicht genügt.

In der Rechtsprechung der letzten Jahre kommt der in DFS-Gutachten vorgebrachten Argumentation nach wie vor eine herausgehobene Stellung zu,¹ die sich aus der ehemals hoheitlichen und damit qua Amtes letztentscheidenden Tätigkeit der DFS ableiten lässt. Deshalb stellen auch heutzutage die DFS-Gutachten de facto immer noch „das Maß aller Dinge“ dar. Aufgrund der wissenschaftlichen Weiterentwicklung der Thematik im letzten Jahrzehnt ist die Argumentation der DFS, die im vorliegenden Gutachten der auf Seite 1 genannten DFS-Version Stand 27.03.2017 entnommen wurde, definitiv nicht mehr zu rechtfertigen und beinhaltet darüber hinaus elementare Fehler (obwohl nun zwei Jahre alt, ist dem Gutachter keine neuere DFS-Version bekannt, die die grundsätzlichen Kritikpunkte bereinigt hätte). Gesellschaftlich gewünschte und wirtschaftlich relevante Investitionen im Bereich der Energiewende in Deutschland werden hierdurch entscheidend beeinträchtigt.

Die äußerst komplexe Thematik wird mittlerweile adäquat in vielen Forschungsarbeiten auf teilweise hohem und angemessenem wissenschaftlichen Niveau behandelt und sollte auch in Gutachten bei juristischen Auseinandersetzungen berücksichtigt werden. Zu nennen sind hier z.B. auch die BMWi-geförderten Projekte WERAN und min-VOR-Win, das letztere ist vom Gutachter als Gruppenleiter am IEMV der TU Braunschweig federführend bearbeitet worden. Am erstgenannten Projekt WERAN sind sowohl die DFS als auch das DFS-Tochterunternehmen FCS als Projektpartner beteiligt. Deshalb muss hier eingangs bewusst darauf hingewiesen werden, dass das vorliegende Gutachten keine detaillierten wissenschaftlichen Einzelfragen als Gegenstand

¹ Etwa: *OVG Lüneburg*, Urteil vom 03. Dezember 2014 – 12 LC 30/12, juris, Rn. 57.

dieser Projekte erörtert, es wird nur exemplarisch auf einschlägige Publikationen verwiesen.

Bzgl. der Mitarbeit der DFS im mittlerweile seit 6 Jahren laufenden Projekt WERAN ist allenfalls die Frage zu stellen, wieso dennoch keinerlei wissenschaftlicher Fortschritt in der Methodik der DFS im gleichen Zeitraum zu verzeichnen ist. Es ist aber nochmals zu betonen, dass das vorliegende Gutachten sich eben nicht auf wissenschaftliche Detailfragen konzentriert, aus welchem Projekt oder welcher Veröffentlichung auch immer. Stattdessen wird ausschließlich auf elementare, grundlegende Punkte bei der von Seiten der DFS bis heute angewendeten Bewertungsmethodik eingegangen und, wo angebracht, auf heutzutage zur Verfügung stehende Methodiken verwiesen.

Dies soll auch einem Nicht-Fachpublikum auf möglichst kurze und verständliche Weise die wesentlichen Hintergründe für die gegebene Einschätzung nahelegen, dass die z.B. im o.a. Urteil herangezogene gutachterliche Vorgehensweise der DFS wissenschaftlich nicht haltbar ist und dass es unzweifelhaft geeignetere Bewertungsmöglichkeiten gibt.

Das Gutachten konzentriert sich auf die Bewertung möglicher Störungen der mit Abstand häufigsten, sogenannten Doppler-Drehfunkfeuer (DVOR) als derzeit meistverbreitetem VOR-System. Im folgenden Kapitel II werden zunächst drei elementare, grundlegende Themenkomplexe **a**, **b**, und **c** erläutert. Zusammen bilden sie das durch WEA gegebene Problem einer Mehrwege-Signalausbreitung im Kontext des Doppler-Drehfunkfeuers (DVOR) ab und führen ggf. zu den unerwünschten Winkelfehlern. Auf diese Erläuterungen aufbauend, wird dann in Kap. III die Bewertungsmethodik der DFS einer kritischen Analyse unterzogen. In den Kap. IV und V folgen einige allgemeinere Bemerkungen.

Nicht adressiert werden wichtige andere Fragestellungen, z.B. ob das Navigationssystem „Drehfunkfeuer“ heutzutage überhaupt noch zur Navigation erforderlich ist und/oder ob die von der internationalen zivilen Luftfahrtbehörde (ICAO) empfohlenen Toleranzgrenzen für Missweisungen (Winkelfehler) zu eng bemessen sind oder ggf. auch nur zu eng interpretiert werden.

Solche Fragestellungen wären beim Thema Drehfunkfeuer und WEA grundsätzlich zwar auch wichtig und werden in Genehmigungsverfahren häufig ebenfalls diskutiert. Allerdings sind dies aus Sicht des Verfassers des vorliegenden Gutachtens nachgelagert zu erörternde Thematiken. Erstens schlichtweg aufgrund der Gesetzeslage und zweitens eben wegen der zurzeit durch die DFS unzureichend behandelten Fragestellung, ob Windräder überhaupt ein signifikantes Störpotenzial aufweisen.

II. Kurzdarstellung des physikalischen Problems „Mehrwegeausbreitung“ beim Drehfunkfeuer

Das Funktionsprinzip vieler Navigationssysteme beruht auf der Variation der Abstrahlung von einem Sender in Abhängigkeit von der Raumrichtung, so dass die für ein Empfangssystem bekannten, variierenden Signaleigenschaften eine Orientierung bzw. Navigation im Raum ermöglichen. Das hier relevante Drehfunkfeuer DVOR liefert für ein mit einem entsprechenden Empfänger ausgestattetes Luftfahrzeug zunächst die Winkelposition zur signalaussendenden Bodenstation oder ganz elementar: der Empfänger im Flugzeug „sieht“ mit dem grünen Signal in Abb. 1 seine Richtung zur DVOR-Sendestation am Boden. Über die bekannte Lage der Bodenstation ergibt sich hieraus auch direkt die interessierende absolute Himmelsrichtung.

Realisiert wird dieses „Sehen“ mit zwei Komponenten im abgestrahlten Signal der DVOR-Bodenstation, nämlich einer AM- und einer FM-Komponente (AM für amplitudenmoduliert und FM für frequenzmoduliert). Die Funktionsweise wird sehr häufig mittels der Leuchtturmanalogie beschrieben: Die FM-Komponente kann hierbei als das schnell (30 Mal pro Sekunde) rundum rotierende Signal interpretiert werden, welches zu einem bestimmten Startzeitpunkt nach Norden zeigt. Da der Startzeitpunkt der Nordrichtung über die AM-Komponente in alle Raumrichtungen gleich stark signalisiert wird, ist die Zeit bis zur Ankunft des FM-Signals beim Empfänger ein Maß für die Himmelsrichtung, in der sich das Luftfahrzeug befindet (Abbildung 1).

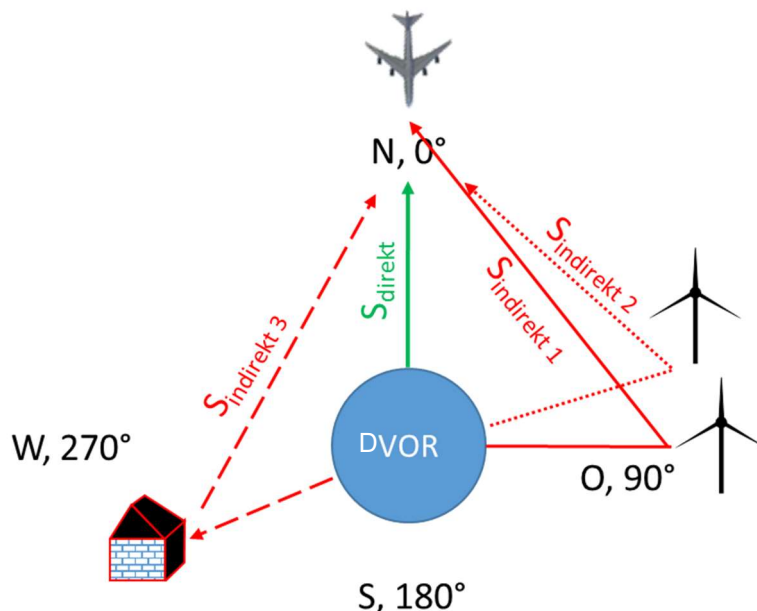


Abb. 1. Darstellung des Prinzips der Mehrwegeausbreitung beim Drehfunkfeuer.

Beispiel: Im DVOR-System wird der Zeitunterschied mittels einer Phase angegeben, so dass bei der Rotationsfrequenz von $1/(30\text{s})$ eine Phase von 0° einem Zeitunterschied von 0 Sekunden (Nordrichtung) und 180° einer halben Rotationszeit, also von $1/60$ Sekunde, d.h. der Südrichtung entspricht.

Beeinträchtigungen dieser Funktionsweise können nun entstehen, wenn durch Reflexionen an anderen Objekten zum Luftfahrzeug Signalanteile gelangen – wie z.B. an einem angenommenen Windrad im Osten (vgl. Abbildung 1) –, die anderen Himmelsrichtungen zugeordnet sind.

Diese Form der sogenannten Mehrwegeausbreitung stellt für jedes Navigationssystem eine fundamentale, potenzielle Fehlerursache dar. Für die tatsächliche Himmelsrichtung, in der sich ein Empfänger befindet, z.B. im Norden bei 0° , könnte nun z.B. $1,0^\circ$ angezeigt werden. Diese Missweisung würde man als Winkelfehler (bearing error) von $1,0^\circ$ bezeichnen. Für erlaubte, d.h. einzuhaltende derartige Winkelfehlertoleranzen hat die ICAO als weltweit anerkannter Dachverband international gültige Empfehlungen ausgesprochen, die entsprechend in nationalen Genehmigungsverfahren Anwendung finden.

Für das Szenario der Mehrwegeausbreitung sind drei wesentliche Einflussfaktoren entscheidend, die man jeweils einem eigenen wissenschaftlichen Themenkomplex und einem jeweils eigenen Stand der Technik zuordnen kann. Wie schon oben herausgestellt, soll die notwendige wissenschaftliche Tiefe im vorliegenden Gutachten nicht im Fokus stehen. Dennoch ist für das Verständnis der hier vorgebrachten Kritik wesentlich, diese drei Komplexe klar zu benennen und entsprechend voneinander zu trennen. Bei der vorgebrachten Kritik an der DFS-Beurteilungsmethodik spielt diese Unterscheidung eine große Rolle, da methodische Unzulänglichkeiten bei einem der Themenkomplexe nicht durch Verweis auf die Vorgehensweise oder auch nur Begriffsbildung in einem der anderen Komplexe verschleiert werden dürfen.

a Wie stark sind, am Ort des empfangenden Flugzeuges, störende Signalanteile durch Reflektion an dem Windrad im Osten relativ zum gewollten Signal, hier also demjenigen der 0° -Richtung im Norden?

b Wie empfindlich reagiert der Flugzeug-Empfänger auf solche zusätzlichen Signalanteile, d.h. wie groß ist der angezeigte Winkelfehler durch diese „Falschinformation“?

c Wie überlagern sich zusätzliche „Falsch“-Signalanteile, d.h. wie groß wird der Winkelfehler, wenn es neben dem einen, zusätzlichen Ausbreitungspfad im Osten noch weitere Reflektoren, ggf. bei verschiedenen Himmelsrichtungen gibt?

Themenkomplex a: Wie stark reflektiert eine WEA?

Die Fragestellung, wohin und wie stark ein Objekt elektromagnetische Wellen reflektiert bzw. streut, wird durch die sogenannte Streutheorie beschrieben, eine beschreibende Größe für das Ergebnis ist der sogenannte Radarquerschnitt (das optische Analogon ist leicht zu beschreiben: wie stark und wohin wird Licht welcher Farbe an einem beleuchteten Objekt gestreut).

Entsprechende Lösungen sind mittlerweile sowohl mit diskret-numerischen Simulationsprogrammen wie auch durch spezifische Messmethoden bestimmbar. Gerade im militärischen Bereich ist die Frage, wieviel von einem Flugzeug in die Richtung eines Radars reflektiert wird und damit „gesehen“ werden kann, von

essentieller Bedeutung. Schon seit Jahrzehnten gelten hier Messmethodiken in einem verkleinerten Maßstab, sogenannte „skalierte“ Messungen, als etabliert und werden in Deutschland z.B. bei der Firma Airbus Defence and Space routinemäßig eingesetzt. Softwarelösungen in Form der erwähnten diskret-numerischen Simulationsprogramme sind ebenfalls etabliert, sowohl als kommerziell erhältliche wie auch in Form proprietärer Software z.B. von Ingenieurbüros.²

Bei diesen derzeit als Stand der Technik geltenden Verfahren ist allerdings zu betonen, dass „nur“ statische Verhältnisse analysiert werden können, d.h. die Drehbewegung von Windrädern wird nicht berücksichtigt. Neue Methoden, die Winkelfehler unter Berücksichtigung der Drehbewegung eines Windrades angeben können, sind erst in den letzten Jahren entwickelt und validiert worden (Projekt min-VOR-Win, BMWI-FKZ 0325831).

Darüber hinaus müssen bzgl. aller derzeit im Einsatz befindlichen Software-Simulationsprogramme zusätzlich die zwei im Folgenden gegebenen, maßgeblichen Einschränkungen genannt werden:

- Weil ein einzelnes Windrad ein sehr großes Objekt darstellt, sind Softwarelösungen sehr rechenintensiv – d.h. die Berechnung eines einzigen Störszenarios erfordert eine Gesamtrechenzeit je nach Computer von mehreren Stunden oder gar Tagen. Es handelt sich dabei um ein Gesamtergebnis von milliardenfachen mathematischen Rechenoperationen, wie es auch vergleichbar bei anderen Simulationen z.B. beim Entwurf von Antennen auftritt. Einem erfahrenen Ingenieur, der mit solchen Programmen arbeitet, muss es zwangsläufig absurd erscheinen, dass das Reflexionsverhalten eines Windrades ohne die Anwendung von genannten Simulationswerkzeugen oder äquivalenten Messverfahren darstellbar sein soll, so wie es in der DFS-Methodik (siehe auch Kap. III) der Fall ist. Zudem hat das Reflexionsobjekt in der relevanten DFS-Formel überhaupt keine Richtungsabhängigkeit, es reflektiert also in alle Richtungen mit der gleichen Stärke. Auch ein Laie wird schnell einsehen, dass ein solches Verhalten nicht der Realität entsprechen kann, denn nicht nur sehen unterschiedliche Gegenstände fast immer auch unterschiedlich aus, sondern ein einzelner Gegenstand sieht aus unterschiedlichen Richtungen in der Regel eben auch unterschiedlich aus.

Die Richtungsabhängigkeit der Abstrahlung ist in den genannten numerischen bzw. computergestützten Simulationswerkzeugen selbstverständlich enthalten und muss als Stand der Technik gelten.

Obwohl in der DFS-Methodik augenscheinlich (Blatt 12 des referenzierten DFS-Gutachtens) der Betrachtungswinkel „ φ_{Test} “ vorkommt, hat er dennoch nichts mit dem gerade erläuterten, winkelabhängigen Reflexionsverhalten des Windrades zu tun, sondern bezieht sich ausschließlich auf den weiter unten folgenden Themenkomplex **b**.

² Z.B. Greving/Spohnheimer, 19th IFIS Proceedings 2016.

- Das Reflexionsverhalten mehrerer Windräder ist für die im vorigen Punkt beschriebenen Softwarelösungen bei weitem zu komplex, um mit heutigen Computerressourcen handhabbar zu sein. Wenn Veröffentlichungen Angaben über Winkelfehler hierzu machen, die also durch einen gesamten Windpark verursacht werden, sind immer starke Vereinfachungen im Spiel. Auf diese wird selten explizit hingewiesen, geschweige denn wird der mit diesen Vereinfachungen verursachte Fehler spezifiziert. Häufig ist die bei solchen schnellen Lösungsmethoden (auch „Solvem“ genannt) verwendete Vereinfachung auch nicht bei der Berechnung des komplexen Streuverhaltens eines kompletten Windparks zu suchen. Stattdessen werden schlicht vereinfachende Annahmen für das Überlagerungsverhalten zahlreicher Einzelreflexionen am Empfänger getroffen, was nach der Systematik zu dem erst weiter unten folgenden, dritten Themenkomplex **c** gehört.

Einem Ingenieur oder Wissenschaftler, auch mit nur wenigen Jahren Berufserfahrung, muss daher völlig klar sein, dass eine Formel, die die Reflexion eines Windrades schlicht mit einem einzigen Wert ohne jede Richtungs-, bzw. Orientierungs-, sowie ohne Zeitabhängigkeit beschreibt, unzulässig vereinfacht. Es sei vorweggenommen, dass die in der DFS-Methodik angeführte „empirische Validierung“ beim unbedarften Fachmann zwar eine hohe Genauigkeit suggeriert. Diese Validierung ist aber eine Fehlinterpretation eines ganz anderen Phänomens, welches mit dem Streuverhalten einer Windenergieanlage im hier behandelten Themenkomplex **a** überhaupt nichts zu tun hat. Hierauf wird in Abschnitt III.3 näher eingegangen.

Themenkomplex b: Wie ist das Empfängerverhalten beschreibbar?

Während Themenkomplex **a** ausschließlich die Frage behandelt, wie groß eine Störampplitude eines Windrades ist, werden nun in Themenkomplex **b** die Auswirkungen dieses zusätzlichen Ausbreitungsweges auf die Winkelanzeige des Empfängers im Flugzeug behandelt. So können trotz gleichbleibender Störampplitude Auswirkungen z.B. beim Radioempfang gänzlich andere sein als beim System DVOR. Grundsätzlich bedarf es bei einer solchen Störungsbetrachtung also immer einer bewertenden Empfängerfunktion.

Eine solche Empfängerfunktion für Winkelfehler bzw. die entsprechende Fehlanzeige an einem Drehfunkfeuer-Navigationsempfänger durch Mehrwegeausbreitung ist unter der Näherung zeitlich gleichbleibender Verhältnisse von dem Wissenschaftler Anderson im Jahr 1959 mathematisch hergeleitet worden.³ Allerdings werden durch diese Näherung eine ganze Reihe an Vereinfachungen/Vernachlässigungen eingeführt: sowohl das reflektierende Objekt wie auch das Flugzeug bewegen sich nicht, d.h. die am Empfänger anliegenden Signale durch Mehrwegeausbreitung bleiben zeitlich konstant, die Verarbeitungszeiten im Empfänger spielen damit auch keine Rolle, und es wird ausschließlich die Reflexion der FM- und nicht die der AM-Komponente des DVOR berücksichtigt.

³ *Anderson/Flint*, in: Proceedings of the IRE 47 (5), 808 ff.

Diese so genannte „Anderson-Formel“ ist in der Wissenschaft anerkannt, da mathematisch wie messtechnisch bewiesen – natürlich nur für die betrachtete, nicht reale Situation mit ihren drastischen Einschränkungen, d.h. Vereinfachungen. Im Gutachten der DFS wird die Anderson-Formel auf Blatt 12 bzw. graphisch auf Blatt 3 (die Kurve mit den kleineren Werten) dargestellt. Formelmäßig bildet diese den größten Teil der „DFS-Gesamtformel“ für den durch einen Windpark verursachten Winkelfehler (dem Nicht-Fachpublikum erscheint der Formelausdruck genau wegen dieses Terms als zunächst sehr kompliziert).⁴ Natürlich geht in diese Formel als Eingabe auch die Größe mit ein, wie stark ein Windrad reflektiert - der Wert für diese Eingabe gehört zum oben beschriebenen Themenkomplex **a**. Ursprünglich wurde hier nach Anderson das Amplitudenverhältnis zwischen dem gewollten Ausbreitungsweg und dem Ausbreitungsweg mit einer Reflexion an einem Windrad verwendet. Im Rahmen der Herleitung durch Anderson wurde ein Wert von $A=0,1$ als Obergrenze für eine mathematische Näherung abgeschätzt. Die Störampplitude eines Reflexionsobjektes wird also als ein zehntel Mal so groß wie das beabsichtigte Signal angenommen.

Dieser Wert hat aber überhaupt nichts mit dem tatsächlichen Reflexionsverhalten eines Windrades zu tun und müsste, zumindest für den statischen Fall (also ohne Bewegung von WEA und Flugzeug), mit den unter Themenkomplex **a** genannten Methoden als geltendem Stand der Technik berechnet werden. Anderson selbst verwendet in seiner Empfängerfunktion ein richtungsunabhängiges „A“ (gekennzeichnet auf Blatt 3 in der InSet-Grafik als „non-directional“); Ziel seiner mathematischen Herleitung war zu zeigen, dass das Doppler-VOR störunanfälliger ist als das konventionelle Drehfunkfeuer VOR – bei gleicher Störampplitude. Diese Andersonkurve bzw. Formel ist also ein gutes Beispiel, dass Störungen immer auch von der Empfängerfunktion abhängen.

Die Tatsache, dass die DFS in Ihrer Methodik diesen Wert von $A=0,1$ übernimmt (siehe Blatt 12) zeigt, dass die DFS keinerlei Winkelabhängigkeiten des Streuverhaltens berücksichtigt und auch den konstanten Wert von $A=0,1$ für reale Szenarien nicht hinterfragt.

Es ist elementar, dass es nach dieser Formel keine Winkelfehler bei verschwindender Störampplitude der FM-Komponente geben kann. Es wird aber auch ausschließlich nur die Störung der FM-Signalkomponente berücksichtigt, d.h. eine ggf. auftretende AM-Störkomponente wird erst gar nicht betrachtet. Eine Beeinflussung der AM-Komponente ist nach den obigen Betrachtungen aber ebenfalls realistisch, sogar die Situation einer AM-Beeinflussung ohne jede FM-Beeinflussung ist möglich. Aus nachrichtentechnischer Sicht sind solche Störungen einer Amplitudenmodulation sogar viel einfacher bzw. wahrscheinlicher hervorzurufen. (Nebenbemerkung: Die leichtere Störbarkeit bei der AM-Rundfunkübertragung war auch der Grund dafür, kurz nach dem 2. Weltkrieg auf die unempfindlichere FM-UKW-Übertragung umzustellen).

Die früher häufig „salopp“ geäußerte Ansicht, dass mögliche AM-Störungen beim DVOR-System keinen Winkelfehler bedingen können, ist aber wiederum nur mit der

⁴ DFS, Bewertungsmethodik, S. 3.

impliziten Annahme zu rechtfertigen, dass ein gleichbleibendes, d.h. zeitlich konstantes Szenario bei der Mehrwegeausbreitung gegeben ist, wie es die DFS offensichtlich auch implizit annimmt.

Tatsächlich aber ist ein Mehrwegeausbreitungsszenario des Drehfunkfeuers grundsätzlich immer ein dynamisches, sowohl durch die Bewegungen des Flugzeuges wie durch die Drehbewegung von Windrädern. (Bemerkung: Derartige dynamische Szenarien sind mittlerweile ebenfalls erstmalig und vollständig im neueren, vom BMWi geförderten Projekt min-VOR-Win (FKZ 0325831), d.h. im Rahmen aktuellster Forschung, analysiert worden.)

Die von der DFS verwendete und argumentativ vertretene Methodik, insbesondere eine vorgebliche „worst-case“-Analyse möglicher Winkelfehler im Hinblick auf höchste Sicherheitsanforderungen, ist also vom Grundsatz her unvollständig: Die Beschränkung auf ausschließlich die FM-Komponente erfasst sozusagen nur „die Hälfte“ der möglichen Signalverfälschung eines Doppler-Drehfunkfeuers, und auch das nur für Windräder, die sich gar nicht drehen.

Mit einer entsprechenden Prämisse, dass nämlich Störungen möglicherweise sogar größer sein könnten als nach dieser Bewertungsmethodik der DFS, ist deshalb das Forschungsprojekt „min-VOR-Win“ beantragt, bewilligt und durchgeführt worden. Das dokumentierte und so nicht erwartete, weil eben nicht die Hälfte sondern alle Fehlerquellen berücksichtigende Ergebnis lautete, dass Störungen in Form von Winkelfehlern nach der derzeit von der DFS verwendeten Methodik dennoch (wider Erwarten!) überbewertet werden.⁵

Bei allen Lösungen gemäß Themenkomplex **a** ist darüber hinaus das hier behandelte reale Empfängerverhalten (Themenkomplex **b**) niemals mit implementiert, d.h. mögliche Reaktionszeiten des Empfängers auf zeitliche Variationen der Störungen sind sowohl in der DFS-Methodik wie auch bei weiteren als Stand der Technik geltenden Analysen nicht berücksichtigt. Es ist offensichtlich, dass dies ebenfalls hinterfragt werden muss, da ja auch die Zeitdauern bei der Fehlerbetrachtung eine wesentliche Rolle spielen (wie lange liegt welcher Winkelfehler in der Anzeige vor – dies ist genau Gegenstand der ICAO-Spezifikation).

Häufig suggerieren hier Veröffentlichungen zu Winkelfehlern, dass die Berechnungen mit modernsten Rechner- und Softwarelösungen durchgeführt wurden, mit einem ebenfalls modernen und dynamischen Empfängermodell. Allerdings sind ein solches und eine entsprechende Statistik der Winkelfehler-Anzeige nur in den seltensten Fällen zu finden. Zur guten wissenschaftlichen Praxis gehört in jedem Fall auch immer die explizite Beschreibung bzw. Referenzierung des verwendeten Empfängermodells, was selten und auch im Fall der DFS-Methodik nicht der Fall ist.

Folgende Abbildung zeigt das in der Veröffentlichung von Anderson beschriebene Szenario. Es handelt sich um ein Störobjekt im Osten (also bei 90°), wobei die

⁵ Abschlussbericht zum Projekt min-VOR-Win, Abrufbar unter www.tib.eu, weiteres Material unter <https://www.tu-braunschweig.de/emv>.

Störampplitude am Empfänger für diesen zusätzlichen Reflexionsweg im Vergleich zum direkten, also gewollten Signalweg auf ein Zehntel festgelegt ist. Dieser Wert wurde in der ursprünglichen Veröffentlichung übrigens als zeitlich konstante „worst-case“-Obergrenze spezifiziert und hat deshalb wenig bis nichts mit realen Situationen zu tun, wird jedoch in der DFS-Methodik grundsätzlich immer verwendet. Darüber hinaus kann die DFS-Formel damit die Bewegung des Luftfahrzeugs ebenfalls nicht berücksichtigen. Das Amplitudenverhältnis ändert sich in der Realität je nachdem, wo das Flugzeug sich befindet und in welche Richtung es fliegt.⁶ Das Ergebnis der Formel als „Winkelfehler“ über den gesamten Navigationskreis von 0° bis 360° zu interpretieren, ist auch daher nicht haltbar. Wie oben schon in Themenkomplex **a** erläutert, wäre zumindest die richtungsabhängige Reflexionsamplitude seit längerem als Stand der Technik berechenbar.

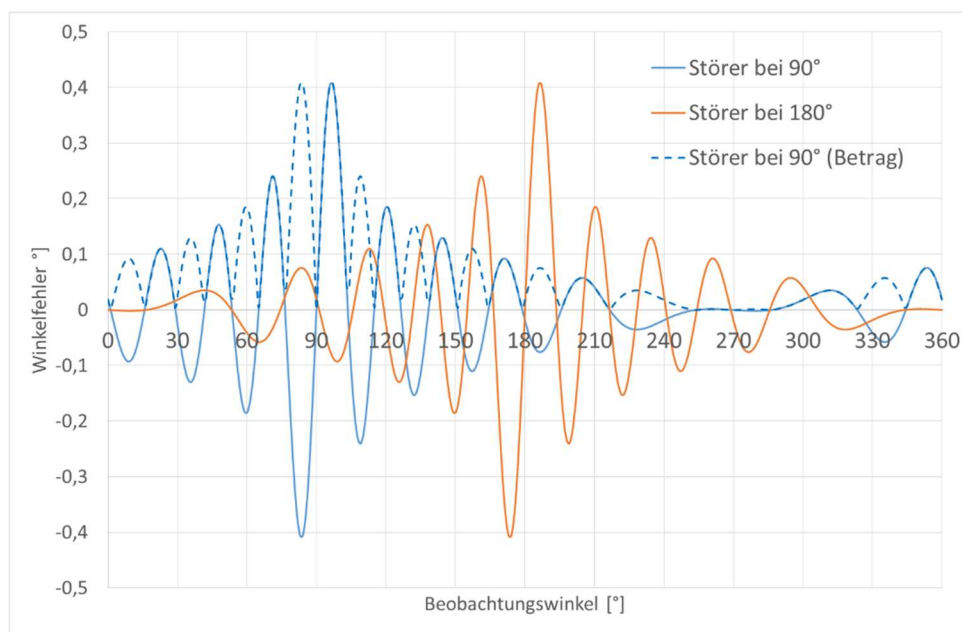


Abbildung 2. Empfängerfunktion gemäß Andersonformel.

In Abbildung 2 entspricht die blaue, gestrichelte Kurve der Kurve, die auch in der Dokumentation der DFS zu ihrer Bewertungsmethode auf Seite 3 zu finden ist.⁷ Schon an dieser Stelle sollte darauf hingewiesen werden, dass die DFS-Methodik nur die gestrichelte Kurve, d.h. die Beträge bzw. die Absolutwerte der Winkelfehler, in der weiteren Bewertung heranzieht. Damit wird implizit und ausschließlich von kumulierenden Wirkungen ausgegangen, d.h. dass sich Winkelfehler immer in die gleiche Richtung ergeben. (Bemerkung: Natürlich gibt es auch negative Winkelfehler in der ursprünglichen Formel, die in blau mit durchgezogener Linie dargestellt sind. Die Absolutwertbildung der DFS scheint im Sinne einer „worst-case“-Abschätzung und den gebotenen Sicherheitsanforderungen in der Luftfahrt begründet zu sein. Ein solches Vorgehen führt aber zu einer grotesken Bewertung bei der Berücksichtigung des Einflusses von mehreren WEA, dies gehört zum Themenkomplex **c** .)

⁶ Vgl. Josipovic, Windenergie und Drehfunkfeuer, S. 13.

⁷ DFS, Bewertungsmethodik, S. 3.

Für die Unzulänglichkeit in der DFS-Methodik wird nun als weiteres Szenario die orangene Kurve zu einem gleichen Reflektor ($A=0.1$) in Südrichtung, d.h. bei 180° betrachtet. Wie leicht zu erkennen ist, verschiebt sich die orangene Störungskurve lediglich um 90° nach rechts, weil sich der Störer nun im Süden statt im Osten befindet. Ebenfalls erkennbar ist, dass das Maximum der Störung über den gesamten Winkelbereich immer den gleichen Wert von etwa 0.41° aufweist. Die Himmelsrichtung, in der sich ein Reflexionsobjekt befindet, hat also auf das Maximum der Winkelfehlerkurve überhaupt keinen Einfluss. Das Festhalten an einem einzigen Zahlenwert wie bei der DFS-Methodik muss man wegen seiner Unplausibilität und der seit längerem zur Verfügung stehenden Methoden, die Winkelabhängigkeiten der Reflektion an WEA berücksichtigen, als schlechte wissenschaftliche Praxis werten.

Themenkomplex c: Wie überlagern sich Reflektionen von vielen WEA?

Die Frage der Überlagerung stellt nach Ansicht des Verfassers inzwischen die entscheidende Thematik dar. Nach derzeitigen Erkenntnissen, z.B. aus dem Projekt min-VOR-Win, den numerischen Gutachten vom Ingenieurbüro Greving⁸ oder auch Flugtests, die in Kooperation von Airbus Defense and Space und der TU Braunschweig (Institut für Flugführung, IFF) durchgeführt wurden, sind Winkelfehler einzelner Windenergieanlagen so klein, dass Bauverbotszonen mit einem Radius von 10 km entsprechend den Vorgaben der ICAO um ein DVOR herum als übertrieben konservativ angesehen werden können, nicht zu sprechen von DFS-Vorgaben bei Einzelvorhaben bei 15 km. Bei großen Windparks dominiert nicht der Winkelfehler einer einzelnen Windenergieanlage das Prognoseergebnis, sondern die Anzahl der Windenergieanlagen selbst.

Weil numerische, genaue Simulationen (vgl. die letzten Unterkapitel in Themenkomplex **a**) wegen der Komplexität nur einzelne Windräder behandeln können, stellt sich bei Windparks immer die Frage, wie sich das direkte Signal und Störungen durch eine Vielzahl von Windrädern zu einem Gesamtsignal am Empfänger überlagern (das dann durch die in Themenkomplex **b** beschriebene Empfängerfunktion zu einem Gesamtwinkelfehler führt). Auch hierzu ist in aktuellen Publikationen selten eine detaillierte Darstellung zu finden, wie ein solches Überlagerungsmodell, z.B. ein Windpark mit über 20 Windenergieanlagen, tatsächlich methodisch realisiert wird.

Die von der DFS praktizierte Vorgehensweise geht bei der Behandlung dieses Szenarios aber einen definitiv nicht nachvollziehbaren, weil absurden Weg: Es wird nämlich nicht nach dem Gesamtsignal am Empfänger Eingang durch Überlagerung aller reflektierten Signale gefragt, aus dem sich dann im Empfänger ein angezeigter Gesamtwinkelfehler ergibt. Es wird stattdessen behauptet bzw. es wird in der verwendeten Methodik implizit davon ausgegangen, dass sich alle auf je eine einzelne Reflektion zurückzuführenden Winkelfehler immer positiv, d.h. betragsmäßig (!, s.o. Bemerkung im Abschnitt unter Abb. 2) zu einem Gesamtwinkelfehler aufaddieren.

⁸ Z.B. Greving/Spohnheimer, 19th IFIS Proceedings 2016.

Dies entspricht aber einer fiktiven anderen, physikalisch gar nicht gegebenen und völlig absurden Situation: dass nämlich jedes einzelne Reflektionssignal zunächst einzeln zusammen mit dem jeweils direkten Signal an einem einzelnen Empfänger anliegen würde und sich hieraus ein einzelner Winkelfehler in der Empfängeranzeige ergibt. Dann werden alle sich so ergebenden Einzel-Winkelfehler aufaddiert, und zwar nur die Beträge, wie gestrichelt in Abb. 2. Das Absurde ist sofort zu erkennen: Es wird davon ausgegangen, dass jedem einzelnen Reflektionssignal ein jeweils zugehöriges direktes Signal und ein jeweils zugehöriger einzelner Empfänger zugeordnet wird, d.h. in diesem Modell gibt es z.B. bei Reflektionen von 20 einzelnen Windrädern auch 20 direkte Signale und 20 Empfänger, die sich ergebenden 20 Winkelfehler werden alle positiv (absolut gezählt) und zu einem Gesamtwinkelfehler aufaddiert, der dann dem Gesamtwinkelfehler im realen einzelnen (!) Flugzeugempfänger zugeordnet wird.

Beispiel: Fundamental falsch in diesem Sinne ist also die simple Aussage „Wenn ein Windrad einen Winkelfehler von 1° hervorruft, führt die Errichtung eines zweiten, identischen Windrades zu einem Winkelfehler von 2° “. Das ist bereits optisch schon sehr einfach anhand von Abbildung 2 einzusehen, wo sich zwei Reflexionsobjekte in unterschiedlichen Himmelsrichtungen befinden und deren Maxima bei unterschiedlichen Beobachtungswinkeln auftreten.

Die Addition solcher Winkelfehlerbeiträge widerspricht dem Prinzip, dass sich immer nur alle reflektierten Signalamplituden zusammen mit dem einen direkten Signal an einem Empfänger überlagern können, während ein Winkelfehler für sich ja bereits die vom Empfänger aufbereitete, d.h. verarbeitete Größe darstellt. Die Reflektion an einer zweiten WEA kann durch destruktive Interferenz sogar bewirken, dass der ursprüngliche Winkelfehler durch die erste WEA kleiner wird. Dies ist z.B. in der Veröffentlichung (ICNAAM 2018) messtechnisch unbestreitbar demonstriert worden.⁹

Ein derartiges Verhalten ist auch dem Nicht-Fachpublikum durchaus aus anderen Bereichen plausibel zu machen, z.B. bei Kopfhörern, die mit sogenannten aktivem Noise-Cancelling Umgebungsgeräusche minimieren oder sogar unterdrücken können. Ein zweites zusätzliches Signal wird dem störenden Umgebungssignal hierzu „geschickt“ überlagert, so dass eine Störgröße auch kleiner werden kann. Die Annahme, ein zweites Signal müsse in der Überlagerung mit dem störenden Umgebungssignal eine noch lautere Störung ergeben, ist hier genauso wie bei der Fragestellung „Drehfunkfeuer und weitere Windenergieanlagen“ offensichtlich falsch.

Wenn im Sinne einer „worst-case-Analyse“ nun behauptet wird, die einfache Aufaddition der Einzelwinkelfehler wie in der DFS-Methodik sei eine sinnvolle Fehlerabschätzung „nach oben“, stößt im Sinne des Absurden dieses Vorgehens aber bei der Berücksichtigung von 10 oder mehr WEA schnell auf Gesamtwinkelfehler, die gar nicht auftreten können und dürfen. Und diese Annahme der Addition führt auch automatisch immer zu einer Überbewertung der Signale, die mit zunehmender Anzahl immer größer wird und in der Konsequenz fälschlicherweise automatisch zur Ablehnung eines größeren Windparks führen muss.

⁹ Geise/Kerfin/Citaku, 16th ICNAAM 2018.

Eine präzise Berücksichtigung aller Signalanteile (d.h. ein direkter und eine Anzahl von reflektierten Signalen) am Ort des einen Empfängers im Flugzeug ist natürlich nach wie vor eine Herausforderung (erste Ansätze und Ergebnisse hierzu sind in der schon referenzierten Veröffentlichung ICNAAM 2018 zu finden). Nach den Ausführungen sollte aber klar geworden sein, dass hier eine Überlagerung aller Signalanteile aufgrund ihres Wellencharakters zu grundlegend kleineren Fehlereffekten führen muss, da sich Wellen sowohl destruktiv wie konstruktiv überlagern.

Dieser Teil der Überlagerung könnte auch zum vorherigen Themenkomplex **b** gezählt werden, also einem korrekten Empfängermodell, welches eine Vielzahl von Ausbreitungswegen berücksichtigen kann. In der derzeitigen DFS-Methodik erscheint er allerdings explizit gesondert unter dem Begriff der sogenannten „Vorbelastung“ der Drehfunkfeuerumgebung. Führt ein großer Berg in der Nähe eines Drehfunkfeuers oder eine bereits vorhandene Windenergieanlage zu einem Winkelfehler von 1° , dürfe danach ein zusätzliches Windrad nur einen Winkelfehler von 2° verursachen, damit eine erlaubte Toleranz von 3° nicht überschritten wird. Diese Argumentation ist wegen der o.a. Gründe aber ebenso physikalisch falsch bzw. absurd.

Grundsätzlich könnte man natürlich die Auffassung vertreten, die Abschätzung durch grundsätzlich positiv gewichtete Fehleraddition stelle im Sinne der Flugsicherheit eine Abschätzung nach oben dar, siehe oben. Allerdings müsste man bei einer solchen Argumentation dann auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung berücksichtigen, insbesondere bei einer steigenden Anzahl von Windrädern, bei der eine solche Fehleraddition immer unwahrscheinlicher wird.¹⁰

Zudem gibt es nicht zuletzt durch eine Flugvermessungsstudie von Airbus Defense and Space und dem Institut für Flugführung (IFF) der TU Braunschweig entsprechende Hinweise dafür, dass solche Auftrittswahrscheinlichkeiten in der Flugpraxis entsprechend gering sind.¹¹

In jedem Fall handelt es sich bei der DFS-Methodik der Fehleraddition um eine systematisch unphysikalische Herangehensweise, die zumindest schon lange nicht mehr dem Stand der Technik entspricht. Dass diese Überlagerungsmethodik weiterhin praktiziert und vor Gericht und in Genehmigungsverfahren allgemein als Stand der Technik dargestellt wird, kann in wissenschaftlicher Hinsicht nur noch befremden. Damit nicht genug, berücksichtigt die DFS-Methodik nur „die Hälfte“ des Drehfunkfeuersignals und nur statische Szenarien und weist weitere substantielle Fehler auf (siehe Abschnitt III), so dass sich mehr die Frage nach der allgemeinen ingenieurmäßig-wissenschaftlichen Qualitätssicherung aufdrängt.

An dieser Stelle sei dem Verfasser eine Bemerkung zu solchen „Worst-Case“-Argumentationen wegen ihrer grundsätzlichen Bedeutung bei Sicherheitsfragen, hier also im Bereich der Elektromagnetischen Verträglichkeit, gestattet. Gerade im Bereich

¹⁰ *Claudepierre et al.*, EuCAP 2017, 2057 (2059); *Greving/Spohnheimer*, 19th IFIS Proceedings 2016, 102 (105).

¹¹ *Frye*, Signaturtechnisches Gutachten der Airbus Defence and Space GmbH.

der Flugsicherheit fühlt man sich schon subjektiv aufgrund eigener Flugerfahrung immer selbst betroffen und würde intuitiv immer „Worst-Case“-Methodiken anwenden. Die kritisierte Methodik – also die lineare, betragsmäßige Winkelfehleraddition – stellt aber einen Worst-Case-Ansatz innerhalb eines grundsätzlich falschen physikalischen Modells dar.

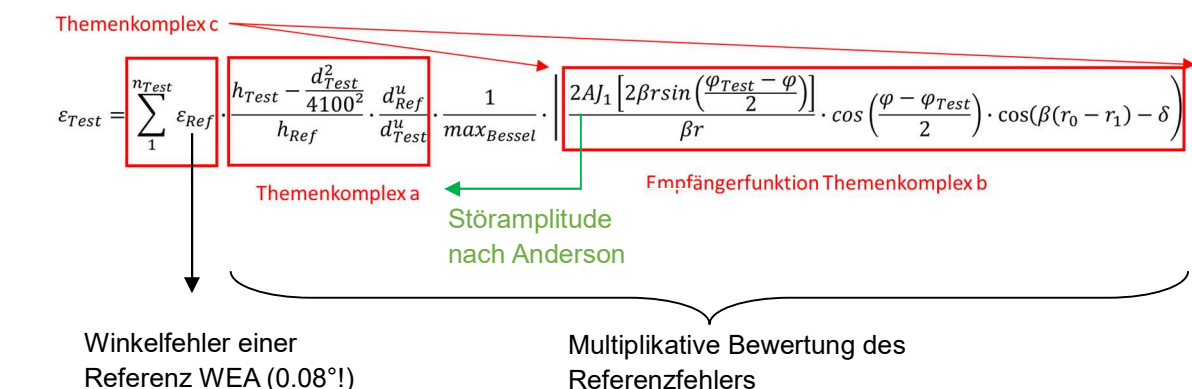
III. Detailliertere Bewertung der von der DFS verwendeten, zentralen Formel zur Berechnung des DVOR-Winkelfehlers

In ihrer Dokumentation zur Prognoseberechnung gibt die DFS folgende Formel an:¹²

$$\varepsilon_{Test} = \sum_1^{n_{Test}} \varepsilon_{Ref} \cdot \frac{h_{Test} - \frac{d_{Test}^2}{4100^2}}{h_{Ref}} \cdot \frac{d_{Ref}^u}{d_{Test}^u} \cdot \frac{1}{\max_{Bessel}} \cdot \left| \frac{2AJ_1 \left[2\beta r \sin \left(\frac{\varphi_{Test} - \varphi}{2} \right) \right]}{\beta r} \cdot \cos \left(\frac{\varphi - \varphi_{Test}}{2} \right) \cdot \cos(\beta(r_0 - r_1) - \delta) \right|$$

ε_{Test} kennzeichnet hierbei den zu prognostizierenden Gesamtwinkelfehler. Die übrigen Größen werden an dieser Stelle nicht weiter genannt, es wird auf Blatt 12 des referenzierten DFS-Gutachtens verwiesen.

Den in der Formel der DFS-Methodik auftauchenden Ausdrücken seien zunächst die in Kap. II erläuterten Themenkomplexe **a**, **b**, und **c** zugeordnet. Wie schon erwähnt, lässt ausschließlich die Empfängerfunktion (Themenkomplex **b**) die Formel als relativ kompliziert erscheinen. Der Teil des Themenkomplexes **a** entspricht in der hier verwendeten Weise elementarer Schulmathematik und nicht demjenigen, der mit aufwändigen Programmen nach Stand der Technik, wie in Themenkomplex **a** eben erläutert, berechenbar wäre. Lediglich dieser als Themenkomplex **a** gekennzeichnete Teil stellt einen Eigenbeitrag der DFS in ihrer Formel zum Streuproblem Windenergieanlagen und Drehfunkfeuer dar.



¹² DFS, Bewertungsmethodik, S. 12.

Für das Nicht-Fachpublikum soll nun in den folgenden Punkten 1.) bis 3.) über die schon kritisierte betragsmäßige Winkelfehleraddition hinaus weiter verdeutlicht werden, dass diese Formel schlichtweg als unwissenschaftlich bezeichnet werden muss. Weitere Aspekte, wie die Nichtberücksichtigung einiger physikalisch relevanter Parameter und zusätzliche Plausibilitätsbetrachtungen, seien hier der Einfachheit halber weggelassen.

Es sei nochmals herausgestellt, dass in obiger „DFS-Formel“ lediglich der als Themenkomplex **a** gekennzeichnete Faktor einen tatsächlichen Eigenbeitrag der DFS darstellt. Diesen kann man aber nicht ernsthaft dem Stand der Technik bzw. aktuellem Ingenieurwissen der Streutheorie zuordnen (siehe darüber hinaus der nächste Punkt „Einheitenrechnung“). Die anderen Terme in der Formel sind ohnehin elementar oder der Literatur entnommen, vom zugrundeliegenden falschen physikalischen Modell ganz abgesehen.

III.1. Einheitenrechnung

Zunächst sei im Folgenden ein fundamentaler Fehler in der „DFS-Formel“ erwähnt, der sich auf den mit Themenkomplex **a** rot eingerahmten, zweiten Faktor des Summenterms bezieht. Auf der einen Seite könnte man die Meinung vertreten, dass dies als „Flüchtigkeitsfehler“ durchaus passieren kann. Dem ist zunächst zuzustimmen, aber Flüchtigkeitsfehler kann man und sollte man eben umgehend korrigieren. Wenn eine Korrektur aber in einer Methodik über Jahre nicht erfolgt, ist die Frage nach wissenschaftlicher Sorgfalt und Qualitätssicherung legitim! (Wenn hier ein Flüchtigkeitsfehler eingeräumt werden sollte, stellt sich natürlich zusätzlich direkt die Frage, wie die tatsächlich angewendete Formel aussieht.)

Zu einem Zahlenwert muss auch immer die richtige Einheit der physikalischen Größe gehören, hierauf wird im naturwissenschaftlichen Unterricht schon in der Schule zu Recht großer Wert gelegt.

Z.B. würde in keinem Ordnungswidrigkeitenverfahren einem Beschuldigten ein Bußgeld auferlegt werden, wenn ein Gutachten zu dem Schluss käme, jemand sei mit einer Geschwindigkeit von 3° (3 Grad) zu schnell gefahren, völlig unabhängig davon, welche Forschungsinstitution diese Messung durchgeführt hat. Ebenso absurd wäre die Vermessung einer Entfernung, deren Ergebnis in Quadratmetern (einer Fläche) angegeben würde. Eine Gleichung wie die obige „DFS-Formel“ kann also auch nur erfüllt sein, wenn auf der linken und auf der rechten Seite die Einheit $^\circ$ (Grad) steht. Diese Minimalvoraussetzung für die Richtigkeit ist nicht erfüllt, wie folgende Rechnung sehr leicht veranschaulicht, im finalen Resultat wird also eine dimensionsbehaftete von einer dimensionslosen Größe abgezogen (die Einheiten der einzusetzenden Größen sind rot angegeben):

Themenkomplex a

$$\frac{[m] h_{Test} \cdot \frac{[m] d_{Test}^2}{[m] 4100^2} \cdot d_{Ref}^u [m]}{[m] h_{Ref} \cdot d_{Test}^u [m]} \downarrow$$

$$\frac{m - \frac{m^2}{m^2}}{m} \cdot \left(\frac{m}{m}\right)^u = (1 - 1/m)$$

Antizipierend sei gesagt, dass diese Einheitenrechnung auch dann falsch wäre, wenn man bei der Entfernung von 4100 die Einheit „Meter“ weglassen würde.

Es ist schwer verständlich, dass der DFS ein derartiger „Schreibfehler“ nicht nur dauerhaft unterläuft, sondern u.a. auch in der weiteren wissenschaftlichen Auseinandersetzung z.B. mit den Konsortialpartnern des BMWi-Projektes „WERAN“ nicht korrigiert wird. Solche Flüchtigkeiten lassen, zumindest in den Augen des Verfassers dieses Gutachtens, erhebliche Zweifel an der ausgeübten Sorgfalt und Qualitätssicherung aufkommen, die doch in deutlichem Widerspruch zu diversen Aussagen der DFS in Verhandlungen stehen, man wolle mit dieser Formel im Sinne der Flugsicherheit lieber ganz sicher gehen.¹³

Prinzipiell erübrigt sich an dieser Stelle bereits jede weitere Diskussion, da die Formel aufgrund des Einheitenfehlers niemals Werte für mögliche Winkelfehler berechnen kann. Es sei zur Unterstützung der Argumentation aber noch eine weitere kurze Überlegung bzgl. der Plausibilität angestellt.

III.2. Plausibilitätsanalyse mit einfachsten Beispielen

In die DFS-Formel gehen die eigentliche Geometrie eines Windrades und seine Materialbeschaffenheit nicht ein. Es wird lediglich die WEA-Höhe berücksichtigt, siehe oben den einheitenmäßig inkorrekten Faktor. Demgemäß wäre ein „Luftschloss“ in Form eines riesigen, 300 m hohen Luftballons in Form einer WEA nach dieser Formel absolut kritisch und müsste aus Sicht der verwendeten DFS-Methodik abgelehnt werden, obwohl ein Luftballon (solange er nicht aus metallisierter Folie besteht) für das DVOR-System durchsichtig ist und damit keine Reflexionsamplitude von 0,1 wie in der Formel angenommen, sondern von Null aufweist und somit kein Winkelfehler auftritt.

¹³ Vgl. etwa: OVG Lüneburg, Urteil vom 03. Dezember 2014 – 12 LC 30/12, juris, Rn. 31.

Mit den heute verfügbaren Softwarelösungen nach dem Stand der Technik können diese Szenarien dagegen korrekt erfasst werden. Auch skalierte Messungen mit Windparkmodellen (wie in dem Projekt min-VOR-Win verwendet) können dies messtechnisch sauber erfassen. Derzeit werden dabei übrigens nur metallische Objekte berücksichtigt, die also den WEA-bedingten Winkelfehler immer nach oben abschätzen. Trotz dieser „worst-case-Überbewertung“ resultiert dennoch ein relevanter Störeinfluss einer großen WEA erst bei Abständen kleiner als 3 km vom DVOR-Sender am Boden.¹⁴

Viele weitere Plausibilitätsbetrachtungen, z.B. auch für prinzipiell mögliche Wertebereiche für den Winkelfehler, könnten hier angeführt werden.

3. Zur „empirischen Validierung“ der DFS Methodik

In diversen Genehmigungs-Verfahrensstreitigkeiten sowie in ihrem Gutachten führt die DFS die Methodik der sogenannten „empirischen Validierung“ an. Hiermit soll gemeint sein, dass die Prognose der DFS im Durchschnitt bis auf wenige Zehntel Grad einer anderen Vorhersage oder Prognose entspricht. Zunächst und intuitiv erscheint dies dem Nicht-Fachmann als ein sehr kleiner Wert, und man würde das Prognosemodell für ein sehr valides halten.

Dieses ist allerdings aus zwei recht offensichtlichen Gründen ein gravierender Denkfehler:

Erstens: Wie die triviale Einheitenbetrachtung aus vorigem Abschnitt zeigt, kommt bei der DFS-Prognose gar kein Winkel, d.h. ein Wert mit der Einheit Grad [°], heraus. Sollte diese „empirische Validierung“ tatsächlich valide sein, bedeutet das ja, ein Winkel würde nicht in Grad angegeben, welche Zahlenwerte man hier vergleicht, würde dann doch überhaupt keine Rolle spielen können.

Zweitens: Selbst wenn man aber die Einheiten ignorieren würde, wäre das „Vorhersagemodell“ der DFS bei weitem schlechter, als es seitens der DFS mit einer Statistikbetrachtung suggeriert wird. Das liegt daran, dass die Formel immer aus den beiden Themenkomplexen **a** (Amplitude des vom Windrad abgestrahlten Signals) und **b** (Empfängermodell), ggf. auch noch **c** (Überlagerung) besteht.

Den Teil **b** hat die DFS von der „Andersonformel“, wie oben dargestellt, übernommen. Die eigentliche Prognose, wie stark ein Windrad reflektiert, bezieht sich ausschließlich auf Themenkomplex **a**. Und hierbei sind die Vorhersageschwankungen nach der Formel der DFS exorbitant hoch, wie folgende einfache Überlegung zeigt:

Angenommen, der richtige Wert für ein solches Störampplitudenverhältnis sei $A=0.1$, wie z.B. bei der Originalveröffentlichung von Anderson. Durch die Empfängerfunktion ergibt sich hieraus ein angenommener maximaler Winkelfehler durch Streuobjekte von 0.4° , wie in den Kurven der Abbildung 2 zu erkennen ist.

¹⁴ Abschlussbericht zum Projekt min-VOR-Win, Abrufbar unter www.tib.eu, weiteres Material unter www.tu-bs.de/emv..

Ein anderes Prognosemodell soll nun für das gleiche Szenario z.B. mit einem Wert von $A=0.01$ arbeiten, für dass sich ein Winkelfehler von 0.04° ergibt.

Mit der „empirischen Validierung“, d.h. dem Vergleich der beiden Modelle, wird nun suggeriert, die Abweichung zwischen beiden Prognosen bei den Winkelfehlern, d.h. der Wert $0.4^\circ - 0.04^\circ = 0.36^\circ$ sei ja dennoch minimal, weil man ohne tieferes Nachdenken die Angabe solch kleiner Winkel leicht mit einem grundsätzlich genauen geometrischen Maß verwechselt.

Die richtige Analyse in diesem Fall ist aber, dass die Vorhersagen bzgl. Themenkomplex **a** um einen **Faktor 10** voneinander abweichen. Solche Vorhersageungenauigkeiten würde aber auch jeder Nicht-Fachmann zu Recht für völlig indiskutabel halten.

Die verwendete Empfängerfunktion, die mit der Störampplitude A multipliziert wird, führt also nahezu unabhängig von der eigentlichen Störampplitude immer zu solch kleinen Winkelfehlern. Das ist allerdings ein gewichtiges Indiz (neben vielen anderen nach dem erläuterten Stand der Technik), dass die mit dieser Methodik sich ergebenden WEA-Fehlerbeiträge in der Praxis eine untergeordnete Rolle spielen, die eigentliche Störampplitude eines Windrades also gar nicht der entscheidende Faktor bei Winkelfehlern sein dürfte. Bisherige Untersuchungen legen vielmehr nahe, dass reale Unsicherheiten für Winkelfehler eher durch Rauschen dominiert werden.

So zeigen die Flugvermessungen, die in dem Projekt „min-VOR-Win“ durchgeführt wurden, sowie die aufwändige Flugvermessungsstudie von Airbus Defence and Space und dem Institut für Flugführung der TU Braunschweig z.B. keine Unterschiede in Winkelfehlerstatistiken zwischen konventionellem VOR und Doppler-VOR, wobei letzteres unempfindlicher gegen Mehrwegeausbreitung ist.

In keinem Fall jedoch ist dies ein Qualitätsmerkmal für das Prognosetool der DFS, unabhängig davon, welche Vergleichsdaten herangezogen wurden. Hier werden in der dazugehörigen Dokumentation der DFS ohnehin keine genauen Angaben in Form von konkreten Szenarien gemacht, lediglich einige Zahlenangaben.¹⁵

Da dies ein wesentlicher Kernpunkt in der DFS-Argumentation ist, sei ein einfaches, aber vollständig analoges Beispiel gegeben:

Ein Gärtner behauptet, er hätte eine komplexe Formel entwickelt, mit der die Anzahl von Äpfeln eines Apfelbaums bei der Ernte sehr genau vorhergesagt werden kann.

Aus irgendeinem Grund sei der Gewinn beim Verkauf von Äpfeln extrem klein und betrage nur 1 Cent pro Apfel.

Um seine Vorhersage empirisch zu validieren, wertet der Gärtner den Verkaufserlös pro Baum aus, z.B. maximal 1000 Äpfel pro Jahr, also insgesamt 10 Euro.

Der Gärtner prognostiziert nun einen Mittelwert von 5 Euro und könnte folglich behaupten, diese seine Mittelwertformel sei sehr genau, weil er den Ertrag mit einer Unsicherheit von maximal 5 Euro vorhersagen kann.

Intuitiv könnte man dies als gute Vorhersageformel betrachten, weil der Gärtner um maximal 5 Euro daneben liegt. Würde man allerdings die Äpfel zählen und diese Vorhersage bewerten, läge der Gärtner in einem schlechten Sommer, der nur 10 Äpfel Ertrag liefert, um den Faktor 500 (!) daneben.

¹⁵ DFS, Bewertungsmethodik, S. 13, 14.

Der Gärtner hat sich lediglich der Kostenfunktion für Äpfel (Empfängerfunktion, bzw. Themenkomplex **b** für die Äpfel bedient, um seine Prognose genau aussehen zu lassen. Der Gärtner könnte sogar vorhersagen, dass auch 10 Birnen an dem Apfelbaum wachsen – in diesem Fall hätte seine Prognoseformel einen Einheitenfehler wie in Abschnitt III.1 erläutert.

Am prognostizierten Erlös von 5€ würde das nur marginal etwas ändern, allerdings würde ihm auch jeder Nicht-Gärtner attestieren, dass diese Prognose absurd sei.

Der gesamte Abschnitt der DFS-Methodik über die empirische Validierung mag aufgrund der kleinen Werte für Winkelfehler dem Nicht-Fachpublikum als überaus genau erscheinen,¹⁶ lenkt im Grunde aber lediglich von den beschriebenen gravierenden Mängeln der eigentlichen Bewertungsmethodik ab.

IV. Zur öffentlichen Diskussion und zur Thematik „Gutachterstreit“

In den vorangehenden Abschnitten ist gezeigt worden, dass die derzeitige DFS-Formel und die zugrunde liegende Methodik wissenschaftlich definitiv nicht dem Stand der Technik genügen.

Grundsätzlich können bei dieser komplexen Thematik „Drehfunkfeuer und Windenergieanlagen“ natürlich Fehler auftreten. Auch werden wissenschaftliche Methodiken ständig und prinzipiell verbessert und in Form eines wissenschaftlichen Diskurses zwischen involvierten Arbeitsgruppen gegenseitig kontrolliert und validiert.

U.a. ist ein solcher wissenschaftlicher Diskurs trotz wiederholter und dokumentierbarer Kontaktversuche von Seiten des IEMV an der TU Braunschweig zur DFS leider nicht zustande gekommen (und leider auch nur sehr eingeschränkt zur PTB, die mit der DFS im Rahmen des WERAN-Projektes zusammenarbeitet). Dies wird sowohl vom Verfasser wie auch generell seitens des IEMV bedauert (natürlich kann hier nur die Wahrnehmung aus Sicht des IEMV beschrieben werden, es sei dahingestellt, wie die Wahrnehmung von außen in Richtung IEMV aussehen würde). Für die Wertungen im vorliegenden Gutachten spielte dies aber, wie schon in der Einleitung erwähnt, keine Rolle, da nur auf die grundsätzlichen methodischen Probleme der DFS-Methodik eingegangen wird.

Die DFS möchte diesbzgl. mit ihrer Teilnahme im WERAN-Projekt zwar offenbar suggerieren, dass ihre Methodik einem kontinuierlichen wissenschaftlichen Diskurs unterzogen wird (auf dieses Projekt wird in Gerichtsverhandlungen ja auch des Öfteren verwiesen). Dennoch bleibt festzustellen, dass sich in den nunmehr mehr als sechs Jahren Projektlaufzeit die Bewertungsmethodik seitens der DFS überhaupt nicht geändert hat. Der Stand der Technik sowie die bisherigen Erkenntnisse anderer Arbeitsgruppen weisen immerhin deutliche wissenschaftliche Fortschritte in dieser Thematik auf.

¹⁶ DFS, Bewertungsmethodik, S. 13, 14.

In diesem Zusammenhang muss die Frage erlaubt sein, wieso es bzgl. der bisherigen DFS-Methodik keinen öffentlich zugänglichen/dokumentierten Diskurs gegeben hat, gerade auch nicht im Rahmen des WERAN-Projektes.

Stattdessen erfolgt ein stark eingeschränkter wissenschaftlicher Austausch ausschließlich im Gutachterwesen vor Gericht, der entsprechend intransparent ausfällt und damit den Förderanliegen öffentlich geförderter Forschung widerspricht. Darüber hinaus ist auch beklagenswert, dass sich dies als Hemmschuh für die Energiewende in Deutschland auswirkt, wenn große Flächenbereiche um DVOR-Anlagen herum trotz bereitstehender Investitionsgelder aufgrund von Negativ-Gutachten nicht mit WEA-Anlagen bestückt werden können.

Zwei weitere einfache Beispiele sollen hierzu intransparente und irreführende Erörterungen bei gutachterlichen Aussagen der DFS vor Gericht wiedergeben:

Zum einen findet man in der DFS-Dokumentation auf Blatt 12 den Ausdruck „maxBessel“ mit dem Kommentar, man schneide die Besselfunktion nach der 6. Nullstelle ab.¹⁷ Das Maximum dieser Funktion, wie sich auch exemplarisch in Abbildung 2 erkennen lässt, ist immer 0.41° für ein $A=0.1$ und den gegebenen Radius des Drehfunkfeuers. Es besteht überhaupt keine Notwendigkeit, die Kurve „abzuschneiden“, in der Berechnung der Besselfunktion ohnehin nicht. Vielmehr führt dieser Kommentar dazu, mit der Nennung einer sechsten Nullstelle erstens eine völlig falsche Vorstellung von Genauigkeiten zu vermitteln, die wie bereits diskutiert in dieser Formel überhaupt nicht vorhanden ist, und zweitens mit den Begriffen „Maximalwertbildung“ und „Abschneiden“ eine mathematische Aktivität zu vermitteln, welche die Formel komplizierter erscheinen lässt.

In den Gerichtsverfahren vor dem VG Magdeburg und dem VG Düsseldorf wurde eine Flugstudie vorgestellt, die durch Airbus Defense and Space GmbH und dem Institut für Flugführung (IFF) der TU Braunschweig durchgeführt wurde und mit einer Vielzahl von Flugvermessungen aufzeigt, dass selbst bei größeren Windparks keine relevanten Störungen der Drehfunkfeuersignale (sowohl CVOR als auch DVOR) auftreten (wohlgemerkt: das IFF ist ein anderes Institut mit anderem Personal als das IEMV an der TU Braunschweig, beide gehören darüber hinaus zu verschiedenen Fakultäten und arbeiten unabhängig voneinander).¹⁸ Bzgl. dieser Studie wurde durch die DFS entgegnet, man sei nicht im „Radiohorizont“ geflogen und die Messwerte seien deshalb nicht repräsentativ. Der sogenannte Radiohorizont kennzeichnet dabei den Bereich, in dem abgestrahlte Signale des Drehfunkfeuers eine geringe Signalstärke haben, in diesem Fall bei geringen Elevationswinkeln, also bei größeren Entfernungen und kleinen Flughöhen. Dass in diesem Bereich der Empfang schlechter ist, also Winkelfehler größer ausfallen, ist erstens eine triviale Erkenntnis, hat aber zweitens mit dem Einfluss von Windenergieanlagen überhaupt nichts zu tun, sondern ausschließlich mit der Tatsache, dass das Signal dort zu schwach ist.

¹⁷ DFS, Bewertungsmethodik, S. 12.

¹⁸ VG Magdeburg, Urt. v. 30.11.2017 – 4 A 297/14; VG Düsseldorf, Urt. v. 22.02.2018 – 28 K 8724/14; Frye, Signaturtechnisches Gutachten der Airbus Defence and Space GmbH.

Würde man einem im Norden Deutschlands stationierten Radiosender eine generelle schlechte Planung der Abdeckung unterstellen, weil man im Süden Deutschland schlechten Empfang gemessen hat? Natürlich nicht! Jedoch ist genau dies die von der DFS vorgetragene Argumentation, die eine konsistente und umfangreiche Studie damit herabwürdigen möchte. Man hätte an dieser Stelle fragend erwidern können, wie dieser sogenannte Bereich des Radiohorizontes in der DFS-Methodik denn überhaupt berücksichtigt wird.

Die Antwort hierzu ist: überhaupt nicht; weder die Entfernung eines Flugzeuges noch dessen Flughöhe erscheinen als Parameter in der DFS-Formel.

Letzteres Beispiel fällt nun klar in die Thematik „Gutachterstreit“:

Anfragen an die DFS außerhalb von Gerichtsverfahren werden überhaupt nicht beantwortet, und während eines Verfahrens gekontert mit Gegenfragen, so dass einem Zuschauer suggeriert wird, die gesamte Sachlage sei unklar und strittig.

Für einen Zuschauer impliziert eine Frage, die ggf. sogar von anwaltlicher Seite nur unklar beantwortet werden kann, immer Zweifel, so dass eine Folge von Frage und Gegenfrage seitens der Richter als generelle Unklarheit, oder eben als Gutachterstreit interpretiert wird. Ein solches Frage- und Gegenfragespiel bezieht sich dabei häufig fälschlicherweise nicht auf die Qualität und Aussagekraft einer Methodik, sondern lenkt auf für die Richter nicht nachvollziehbare, aber für den Sachverhalt dennoch irrelevante Nebengebiete ab.

Hierzu ein weiteres typisches Fragebeispiel aus der Praxis des Verfassers:

Bzgl. des Projektes „min-VOR-Win“ wurde häufig gefragt, ob bei der Prognose der Winkelfehler durch ein Windrad auch die Materialeigenschaften eines Windrades oder des Erdbodens berücksichtigt würden. Die Antwort darauf ist: nein, es werden alle Materialien mit metallischen Eigenschaften abgeschätzt, wie in den meisten Simulationen auch. Das Vorgehen ist also nicht ganz vollständig, was dem Nichtfachpublikum zurecht als ein Mangel in der Methodik erscheinen kann, im Sinne einer wissenschaftlich an dieser Stelle absolut korrekten „worst-case-Vorgehensweise“ aber nicht zu beanstanden ist – so, wie die DFS z.B. in der Anderson-Formel ein $A=0,1$ als „worst-case-Fall“ annimmt (die Kritik oben war dennoch, dass dieser Fall mit der heutigen Simulationsanalyse nicht mehr pauschal verwendet werden sollte und insbesondere für die Überlagerungsanalyse hinterfragt werden muss). In Gegenrede müsste man aber feststellen, dass das Projekt „min-VOR-Win“ überhaupt erstmals sowohl bewegte Windräder wie auch die AM-Komponente berücksichtigt.

Eine weitere irreführende Fehldarstellung, die in diesem Gutachten erwähnenswert ist, ist auf Blatt 9 Anlage 2 der DFS-Methodik zu finden.¹⁹ Hier wird die für den Flugbereich festgesetzte **kumulative** Unfallwahrscheinlichkeit im Luftverkehr in Form einer mindestens einzuhaltenden Unfallrate von 10^{-9} pro Flugstunde genannt. Eine solche **kumulative** Wahrscheinlichkeit bezieht sich praktisch immer auf die unglückliche Verkettung mehrerer Störungen, also z.B. gleichzeitiger Ausfall eines Triebwerkes **und** Störung eines Radars **und** Bordinstrumentenausfall.²⁰ Diese

¹⁹ DFS, Bewertungsmethodik, S. 9.

²⁰ Josipovic, ZLW 2018, 432 ff.

Wahrscheinlichkeit, die als Wahrscheinlichkeit deshalb sehr kleine Werte hat, mit der Wahrscheinlichkeitsgrenze von 95% für Winkelfehler, wie sie in den ICAO Empfehlungen spezifiziert ist, in Relation zu setzen, ist sachlich weder richtig noch im Sinne der ICAO:

Diese empfiehlt eine VOR-Toleranz von $<3^\circ$ mit einer 95% Wahrscheinlichkeit, also dass 95% der Winkel-Messwertfehler kleiner als 3° sind. Grundsätzlich sind hierbei richtigerweise auch Werte von 4° oder sogar 7° möglich; diese dürfen eben nur entsprechend selten auftreten, zumal es sich bei dem Drehfunkfeuer ohnehin um ein redundantes System handelt.

Ein Flugzeug kommt selbstverständlich nicht vom Flugkorridor ab, wenn es für den Bruchteil einer Sekunde 4° statt 3° VOR-Missweisung hat – genau deshalb hat die ICAO dafür entsprechende Toleranzen empfohlen.

Dass hier diese unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten offenbar bewusst in den falschen Zusammenhang gesetzt und mit einer Kollision eines Flugzeuges mit Hindernissen assoziiert werden, hält der Autor dieses Gutachten für unsachliche Panikmache.

Vielmehr erscheint dies eine pragmatisch bedingte Ablenkungs-Argumentation zu sein, weil die ohnehin mit gravierenden Mängeln behaftete DFS-Formel eine entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung in ihrer Systematik überhaupt nicht vorsieht. Zusätzlich könnte man entgegen: wenn die DFS derartige Maßstäbe ansetzt, warum behandelt sie dann z.B. in ihrer Methodik nicht die AM-Komponente des Drehfunkfeuers (siehe Abschnitt II.), d.h. erklärt eine wichtige mögliche Fehlerquelle für Winkelfehler für nicht existent?

Eine Darstellung in entsprechender Klarheit ist in gerichtlichen Auseinandersetzungen offenbar bisher unzureichend erfolgt und das vorliegende Gutachten ist vielleicht ein Schritt in diese Richtung. Wie gesagt, liegt das natürlich an der Komplexität dieser Fragestellung, aber leider auch daran, dass in solchen Verfahren irreführende und auch irrelevante Fragen, teilweise auch in unprofessioneller Vortragsweise, gestellt werden.

Die Frage, ob das Drehfunkfeuer als redundantes System gebraucht wird oder nicht, spielt für die Bewertung möglicher Störungen im Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen keine Rolle. Ebenso, ob Toleranzgrenzen zu eng bemessen sind,²¹ hierauf haben sich die ICAO-Mitgliedsstaaten verständigt.

Also müssen eigentlich vor Gericht ausschließlich zwei Fragen thematisiert werden:

- 1) Können Windräder stören oder nicht?**
- 2) Wird zur Beantwortung der Frage 1) der aktuelle und beste Stand der Technik angewendet?**

Der Fokus auf diese Fragen würde zumindest den juristischen Teil im Gutachterstreit ausblenden und Genehmigungsverfahren auf das Wesentliche, nämlich die wissenschaftliche Fragestellung reduzieren.

²¹ Dazu: *Josipovic*, ZNER 2017, 182 ff.

V. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Ziel dieses Gutachtens ist und war es, einen hoffentlich auch dem Nichtfachmann zugänglichen Überblick über die Thematik Drehfunkfeuer und Windenergieanlagen zu geben und vorhandene und anwendbare Methoden und Begrifflichkeiten einzuordnen. Da in laufenden Genehmigungsverfahren der Begutachtungsmethodik der DFS aufgrund ihrer ehemals hoheitlichen Stellung offenbar nach wie vor eine tradierte, besondere Bedeutung zukommt, wurde die DFS-Methodik hier exemplarisch diskutiert und als wissenschaftlich klar überholt und bei weitem nicht dem Stand der Technik entsprechend eingeordnet. Zukünftig sollte man klar zwischen wissenschaftlichen Fakten und diesem institutionellen Reputationsbonus unterscheiden.

In diesem Sinne müsste die DFS ehrlicherweise sowohl existierende Mängel ihrer Methodik beseitigen wie auch wissenschaftlich belastbare Fehlerbetrachtungen so transparent darstellen, dass auch weitere externe Fachleute dieses nachvollziehen können.

Literaturverzeichnis

Anderson, S. R./R. B. Flint, The CAA Doppler Omnirange, in: Proceedings of the IRE 47 (5), 1959, S. 808—821

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

Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS), Bewertungsmethodik der DFS zur VOR-Beeinflussung durch Windenergieanlagen, Stand: 27.03.2017

Frye, Andreas, Signaturtechnisches Gutachten der Airbus Defence and Space GmbH zur Grundsatzuntersuchung von Störeinflüssen auf DVOR- und VOR-Navigationsanlagen inkl. Flugvermessung, 2017, abrufbar unter: <http://kwer.net/flugvermessungsstudie-zu-dvor-vor-der-airbus-defence-and-space-gmbh-und-der-tu-braunschweig> (abgerufen: 20.08.2018)

Geise, R./Kerfin, O./Citaku, M., On the Superposition of Error Contributions, 16th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, ICNAAM, September 2018, Rhodes Greece.

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

Josipovic, Neven, Die Interpretation der ICAO-Vorgaben zur Störungsbewertung bei Drehfunkfeuern, Zeitschrift für Neues Energierecht (ZNER) 2017, Heft 3, S. 182—188

Josipovic, Neven, Das Unfallrisiko in der Luftfahrt und die Genehmigung von Windenergieanlagen im Umfeld von Drehfunkfeuern, Zeitschrift für Luft- und Weltraumrecht 3/2018, S. 432—446

Josipovic, Neven, Windenergie und Drehfunkfeuer – Stand der Wissenschaft und Perspektiven, Berlin 2018 (k:wer-Texte)