



Technische
Universität
Braunschweig



Institut für
Elektromagnetische
Verträglichkeit



Projekt

miniaturisiertes VHF Omnidirectional Radio range und Windräder



Elektromagnetische Verträglichkeitsanalyse von
Windenergieanlagen und Navigationssystemen
der Luftfahrt
Entwicklung von Verfahrensweisen mit skalierten
Messungen und Hypothesentests mit 1:1
Validierungsflügen

Kontakt

Technische Universität Braunschweig

Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit

Schleinitzstraße 23
38106 Braunschweig

Institut für Flugführung

Hermann-Blenk-Straße 27
38108 Braunschweig

Projekt-Team:

Prof. Dr. Achim Enders
Prof. Dr. Peter Hecker
Dr.-Ing. Robert Geise (Projektleiter)
Dipl.-Ing. Mark Bitter
Dr.-Ing. Thomas Feuerle
Dipl.-Ing. Björn Neubauer
Dipl.-Ing. Georg Zimmer
Dipl.-Ing. Josef Thomas (beratender Ingenieur VDI)

Kontakt:

Email: r.geise@tu-braunschweig.de
Tel. +49 531 391-7726
Fax. +49 531 391-7724
www.tu-braunschweig.de/emv

Gefördert durch:

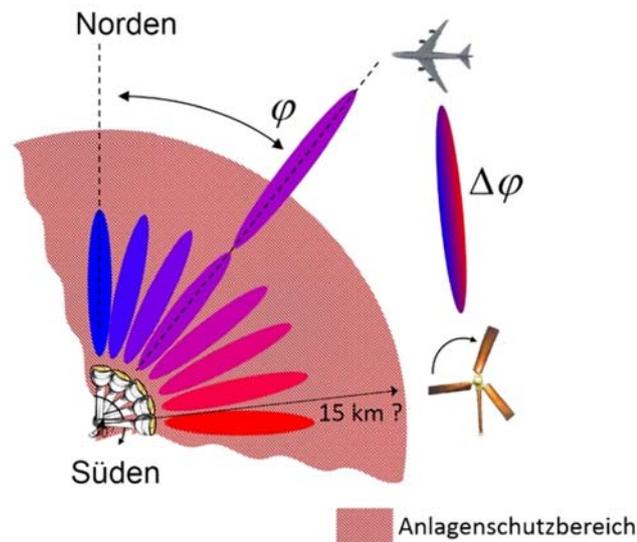


Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

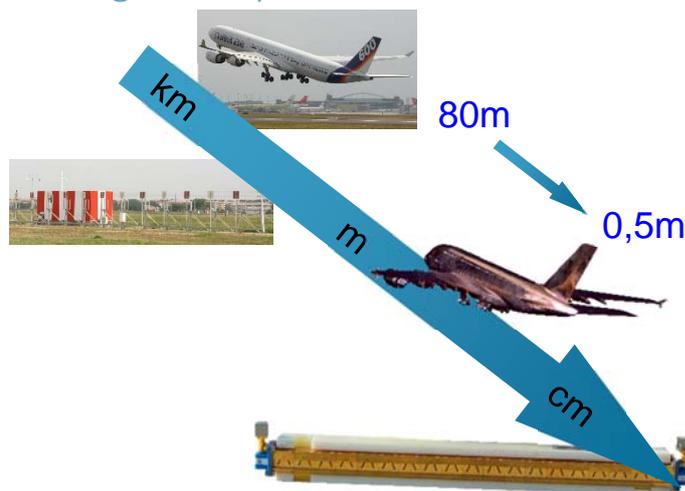
Mehrwegeausbreitung von Navigationssignalen

Die Qualität von Navigationssignalen wird immer durch unbeabsichtigte Mehrwegeausbreitung beeinträchtigt. Von praktischer Bedeutung ist dies insbesondere bei dem Instrumenten-Lande-System (ILS) und dem Drehfunkfeuer (engl.: VHF omni directional radio range, VOR). Gegenmaßnahmen in Form von Anlagenschutzbereichen begrenzen den Ausbau nahegelegener Windenergieanlagen. Die Auslegung dieser Schutzbereiche basiert allerdings auf sehr vagen Annahmen, wobei es bisher keine quantitativen Aussagen über das tatsächliche Störpotenzial von Windenergieanlagen auf das Drehfunkfeuer gibt.



Funktionsweise des Drehfunkfeuers in vereinfachter Darstellung. Unterschiedliche Farben kennzeichnen den frequenzmodulierten Anteil des Navigationssignals. Anlagenschutzbereiche sind definiert, um Missweisungen des Drehfunkfeuers durch Reflektionen an Windrädern zu vermeiden.

Skalierung von Navigationssystemen

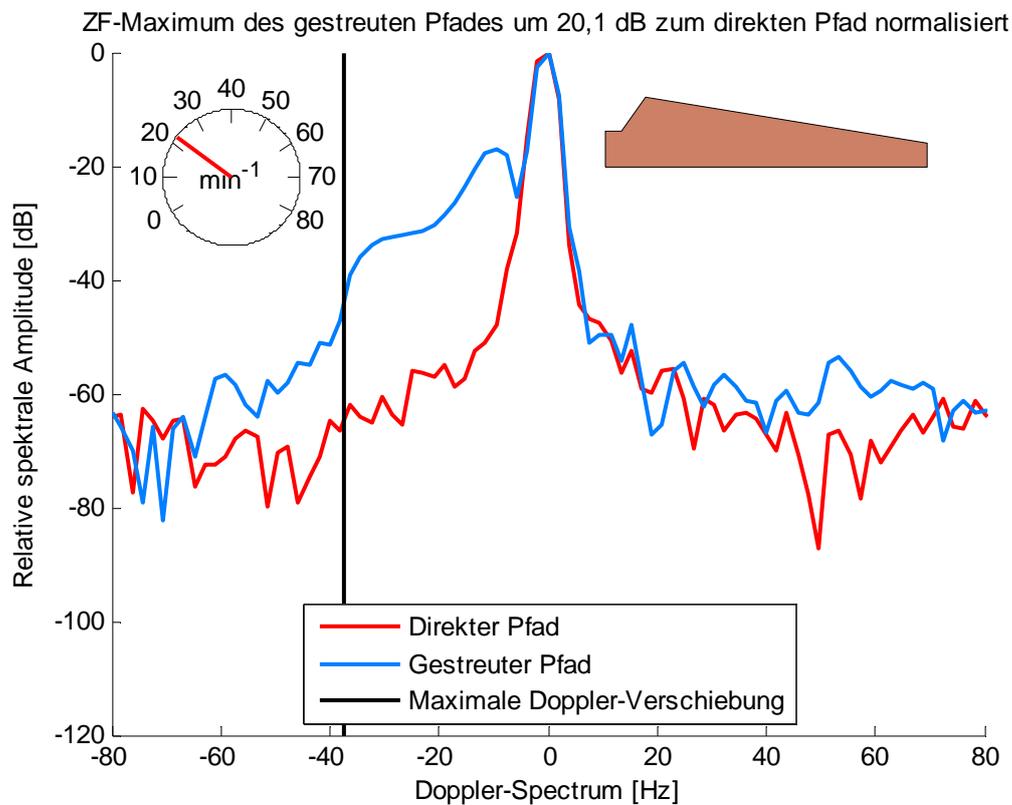


Projektziele

Derzeit sind allein in Deutschland 2300 MW an geplanter Ausbauleistung in der Windenergie blockiert aufgrund vermuteter Unverträglichkeiten mit dem Drehfunkfeuer.

Min-VOR-Win liefert gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse über das tatsächliche Störpotenzial von Windenergieanlagen und dem Drehfunkfeuer. Die wesentlichen Projektziele sind:

- Entwicklung einer skalierten miniaturisierten Messumgebung für elektromagnetische Verträglichkeitsanalysen
- Identifizierung von Windparkzuständen zur Nachbildung in der skalierten Messumgebung
- Validierung der Messergebnisse aus der miniaturisierten Messumgebung durch Hypothesentests mit 1:1 Messflügen
- Ableiten allgemeingültiger Aussagen über das Störpotenzial von Windenergieanlagen



Messbeispiel für ein Dopplerspektrum eines sich drehenden Windrades. Einseitiges Dopplerspektrum entsteht durch Ausleuchtungseffekte mit leitfähigem Untergrund.

Windpark-Parameter



Vorteile

- ✓ skaliertes Messverfahren wurde im Projekt „Sk-ILS“ bereits vollständig validiert
- ✓ Verträglichkeitsanalysen für ganze Windparks und Repowering-Maßnahmen bereits in der Planungsphase möglich
- ✓ Skalierte Messumgebung hat nahezu unbegrenzte Verfügbarkeit und Flexibilität
- ✓ behebt grundlegende Defizite von Simulationswerkzeugen
- ✓ Skaliertes Messverfahren ist rückführbar, justitiabel und kann jederzeit beteiligten Stakeholdern vorgeführt werden

Vorwort

Die Methodik skaliertener Messungen zur Untersuchung von Mehrwegeausbreitung im Kontext der Beeinflussung von Navigationssystemen ist grundsätzlich anerkannte Messpraxis z. B. im Militärbereich zur Untersuchung von Radarquerschnitten von Flugzeugen. Die Adaption dieser Messpraxis auf andere Navigationssysteme wie das Instrumenten-Lande-System oder das Drehfunkfeuer erfordert allerdings zusätzliche Abstraktionsschritte, für deren Verständnis in der Regel auch das Studium zusätzlicher Veröffentlichungen notwendig ist.

Dieses Dokument dient als Einstiegshilfe hierzu, indem es häufig gestellte Fragen zu dem skalierten Messverfahren thematisiert (Teil I) und den prinzipiellen Ansatz des Verfahrens ausgehend von anerkannter Messpraxis für Antennen und Radarquerschnitte erläutert (Teil II). In Teil III werden die wichtigsten Projektergebnisse kurz zusammengefasst.

In Teil IV wird die zusätzliche wissenschaftlich gereviewte Literatur aufgelistet, die im Projektzeitraum entstanden ist.

Grundsätzlich vorweg sei angeführt, dass es um die Untersuchung des Störeinflusses von teilweise bewegten Streuobjekten auf eine Navigationsgröße geht. Dabei ist es zielführend – und darin besteht ein ganz wesentlicher Abstraktionsschritt – das entsprechende Navigationssysteme nicht zwangsläufig in 1:1 bei der erhöhten Frequenz nachzubilden, sondern die Funktionalität des skalierten Navigationssystems auf die Teile zu beschränken, die für die Bewertung von Störobjekten relevant sind. Insbesondere auf diesen Abstraktionsschritt wird im zweiten Teil näher eingegangen.

I. Häufig gestellte Fragen zur Nachbildung von Navigationssignalen in skalierten Messumgebung

1) Wird die Rundstrahlkomponente des VORs nachgebildet?

Das skalierte Messprinzip bildet grundsätzlich nur Ausbreitungswege nach, die für die Realität relevant sind (Publikation 1 und 2). Das sind typischerweise ein direkter Ausbreitungsweg und ein indirekter, z. B. über eine Reflexion an einem sich drehenden Windrad. Selbstverständlich kann man eine einzelne Antenne in eine Richtung, z. B. zum Empfänger oder Störobjekt, aussenden lassen, die die entsprechenden Modulationsinformation, AM und FM des VORs, in diese Richtung beinhaltet. Genauso wird es auch bei der Einspeisung von einem Arbitrary Waveform Generator in den Navigationsempfänger gemacht, um zu messen, wie ein Navigationsempfänger auf die gemessenen Störungen reagiert. Bei der Berücksichtigung der Ausbreitungswege kommt es auch nur auf den Teil der Abstrahlcharakteristik an, der diesem Ausbreitungspfad zuzuordnen ist, d. h. der für die Ausleuchtung des Objektes relevant ist.

Es ist demnach nicht die Zielsetzung, eine integrale Gesamtsituation für ein VOR zu untersuchen, welches z. B. durch einen Wald in der Nähe zusätzliche Störungen erfahren kann. Vielmehr geht es darum, den Einfluss eines einzelnen Windrades bzw. Windparks zu untersuchen. Dass ein Gebäude oder Wald in unmittelbarer Nähe eines VORs zusätzliche Störungen verursacht, ist selbstverständlich und im Regelfall nicht Ablehnungsgrund in Genehmigungsverfahren, bzw. nur dann, wenn Toleranzen für Winkelfehler durch diese Vorbelastung schon zu groß erscheinen. Der bisher unbekannt Stand der Technik bezieht sich allerdings ausschließlich auf die Bewertung von sich drehenden Windrädern. Bisher gibt es keine validierten Aussagen in der Qualität „Ein Windrad in Betriebszustand X (Drehzahl, Ausrichtung, ...) X führt zu Winkelfehlern von Y Grad“.

Dies ist der fundamentale Unterschied zwischen Flugvermessungen in 1:1, die im Regelfall nur eine integrale Gesamtsituation bewerten können, und dem skalierten Messverfahren, welches den Störeinfluss einzelner Objekte bewerten kann.

2) Warum wird in der skalierten Messumgebung nur Continuous Wave gemessen und nicht die AM und FM Komponenten des Navigationssignals?

Die Bandbreite der modulierten Navigationssignale ist mit 20 kHz so klein, dass es ausreichend ist, das Streuverhalten von Objekten bei der VHF Trägerfrequenz zu untersuchen. Dies ist insbesondere deshalb sinnvoll, weil man im Zero-Span Empfänger Modus ohne demodulierende Eigenschaften messen kann. Nur so kann tatsächlich ein zeitabhängiger Übertragungskanal, wie z. B. Streuung an sich drehenden Windrädern, vermessen werden. Natürlich kann anschließend untersucht werden, wie sich die modulierenden Eigenschaften eines zeitvarianten Übertragungskanals auf die Integrität einer FM und AM, z. B. in Form von Winkelfehlern, auswirken. Das wird im Projekt min-VOR-Win sowohl mit software-definierten Empfängern als auch mit realen Navigationsempfängern und einem Arbitrary Waveform Generator (AWG) gemacht. Beide Lösungen hierzu sind bereits validiert und veröffentlicht worden (Publikationen 3 und 4).

3) Können in der skalierten Messumgebung auch unterschiedliche Permittivitäten, z. B. des Erdbodens, untersucht werden?

Grundsätzlich ja, im Projekt min-VOR-Win werden allerdings ausschließlich metallische Randbedingungen angenommen. Für Streuobjekte wie Flugzeuge oder Windräder ist das wegen ihres metallischen Blitzschutzes zunächst zulässig. Metallische Randbedingungen können zudem als obere Abschätzungen im Sinne eines Worst Case verstanden werden. Die Leitfähigkeit des Erdbodens ist natürlich abhängig von vielen Parametern und als variable Randbedingung zu verstehen. Allerdings bleibt festzustellen, dass die Unschärfe der Bodeneigenschaften im Vorgängerprojekt „Sk-ILS“ offenbar keine wesentliche Rolle spielte. Es sind Messszenarien aus der ICAO Studie an den Flughäfen Frankfurt, Toulouse und Heathrow in der skalierten Messumgebung nachgestellt und validiert worden (Publikation 5). Das Maß der elektromagnetischen Verkopplung zwischen Flugzeugen auf Taxiwegen und dem Boden ist dabei sicherlich noch größer als bei Windrädern und dem Erdboden. Die grundsätzliche Frage nach der Permittivität des Erdbodens wird allerdings als zweitrangig angesehen, da es zum gegenwärtigen Stand der Technik nicht einmal sinnvolle Aussagen darüber gibt, welche Winkelfehler ein einzelnes Windrad gänzlich ohne Boden mit seinen Betriebsparametern (Drehzahl und Ausrichtung) verursacht. Solche inhärente Eigenschaften eines Windrades, nämlich seine Bewegung, sind innerhalb des Projektes min-VOR-Win der Fokus (siehe auch FAQ7). Im Projekt vorgesehen sind allerdings auch Variationen der Geländetopologie, z. B. Windrad auf Ebene oder Berg, die Einfluss auf die Ausleuchtung der Windräder haben. (Publikation 7)

4) Welche Entfernungen sind in der skalierten Messumgebung darstellbar?

In dem Vorgängerprojekt Sk-ILS sind Messentfernungen bis zu 70 m zwischen skaliertem ILS und Flugzeug (entspricht unskaliert 10 km) realisiert worden. Im Projekt min-VOR-Win sind deutlich größere Entfernungen möglich von ca. 200 m. Dies entspricht Entfernungen von etwa 30 km. Diese Entfernungen sind sogar größer als in klassischen Flugvermessungen in 1:1 Umgebungen. Anflüge an ein VOR haben zwar in der Regel Abstände von bis zu 70 km. Für solche großen Entfernungen reicht allerdings auch eine Prüfung bis zu 30 km, weil sich die Winkelverhältnisse in Elevation nicht mehr signifikant ändern.

5) Was ist der Unterschied zwischen klassischen Feldstärkemessungen, z. B. aus der Flugvermessung, und Messungen in der skalierten Messumgebung?

Flugvermessungen in der 1:1 Umgebung liefern Messwerte, in denen immer sämtliche Umgebungseinflüsse enthalten sind. Die größte Schwierigkeit liegt in der räumlich differenziellen Betrachtung, also in der Unterscheidung, woher Störeinflüsse tatsächlich kommen, also ob eine gemessene Störung tatsächlich auf ein Windrad kausal zurückzuführen ist. Eine entsprechende Analyse erfolgt in der skalierten Messumgebung einfach durch das Entfernen des Windrades aus der Messumgebung. Prinzip bedingt wird in der skalierten Messumgebung räumlich unterschieden in den idealen Ausbreitungsweg und den gestörten (siehe auch FAQ1). Feldstärkemessungen erfordern grundsätzlich a-priori die Kenntnis sowohl über die Orientierung des elektrischen Feldvektors wie auch über den Ausbreitungsvektor der Welle, also darüber, aus welcher Richtung eine Welle kommt. Feldstärkemessungen in einer Mehrwegeausbreitungsumgebung erfordern also eine messtechnische Zerlegung, aus welchen Teilwellen sich eine Empfangsleistung an einem Gerät ergibt. Genau diese Zerlegung ist dem skalierten Messverfahren inhärent. Ein wesentliches Merkmal der skalierten Messungen ist es zudem, dass aufgrund der Flexibilität

des Messaufbaus gezielte und umfangreiche Parameterstudien (Abstand zwischen Drehfunkfeuer und Windrad, Drehzahl, etc...) möglich sind, die sich in einer 1:1 Umgebung so nicht realisieren lassen.

6) Sind Beugungseffekte in der Skalierung ebenfalls berücksichtigt?

Die Frage, ob Beugungseffekte mit berücksichtigt werden, bezieht sich prinzipiell nur auf die Anwendung numerischer Methoden zur Untersuchung des Streuverhaltens. Raytracer z. B. können Beugungseffekte nicht berücksichtigen, weil sie nur für elektrisch große Objekte anwendbar sind. Für die Vermessung der Objekte ist eine solche Klassifizierung gar nicht erforderlich, sondern natürlicherweise in Messwerten immer enthalten.

7) Wie genau ist das Modell?

In dem Vorgängerprojekt Sk-ILS, welches mit Flugzeug-Modellen A380 und B747 validiert worden ist, zeigte sich eine absolut ausreichende Modellgenauigkeit der Flugzeuge und auch der Bodeneigenschaften (siehe FAQ3). Im Gegensatz zu gängigen Simulationstools, die aufgrund der Komplexität solche Flugzeuge häufig nur durch ihre Heckflosse repräsentieren, wird das Modell in der skalierten Messumgebung überhaupt erst vollständig abgebildet. Entsprechende Näherungen z. B. der Rotorblätter in der numerischen Beschreibung von Windrädern erfolgen häufig nur durch einfache rechteckförmige Strukturen. Das Modell in der skalierten Messumgebung wird deshalb als genauer als derzeit in Simulationen üblich angesehen, insbesondere auch deswegen, weil die Drehbewegung des Windradmodells auch unter den Begriff der Modellgenauigkeit fällt, und sich Simulationen derzeit ausschließlich nur auf statische Windräder beziehen. Zudem sei angemerkt, dass im Projekt „min-VOR-Win“ tatsächliche Flügelgeometrien verwendet werden, wie sie von Windradherstellern mit ausführlichem Datenmaterial zur Verfügung gestellt werden.

8) Was ist das Alleinstellungsmerkmal von min-VOR-Win?

Der Fokus von min-VOR-Win liegt auf der Störbewertung unterschiedlicher dynamischer Windrad- bzw. Windparkzustände, z. B. bzgl. Drehzahl. Insbesondere Simulationsverfahren beziehen sich lediglich auf eine konstante und zeitinvariante Störfeldstärke von Windrädern. Messungen mit generischen Windradmodellen haben allerdings gezeigt, dass die Drehbewegung insbesondere bzgl. der AM-Störungen eine entscheidende Rolle spielen kann (Publikation 6). Für rein statische Szenarien mit unbewegten Objekten und Empfängern kann mathematisch gezeigt werden, dass keinerlei AM-Störungen auftreten. Üblicherweise bezieht sich eine Störbewertung durch Simulationstools deshalb in der Regel auch nur auf die FM-Komponente eines VORs und ist deshalb unvollständig.

Gerade diese Parametervariation der Betriebszustände von Windrädern lässt sich in einer 1:1 Umgebung in der erforderlichen Parametervielfalt nicht wirtschaftlich und sinnvoll darstellen. Für noch nicht gebaute Windenergieanlagen können zum derzeitigen Stand der Technik Simulationstools lediglich den statischen Zustand berücksichtigen, die Bewertung einer noch nicht gebauten Anlage kann durch Flugvermessung überhaupt nicht erfolgen.

II. Nähere Erläuterungen zum Mehrwege-Ausbreitungsmodell bei skalierten Messungen

Im Folgenden wird die anerkannte und gängige Messpraxis für Antennen und Radarquerschnitte dargestellt.

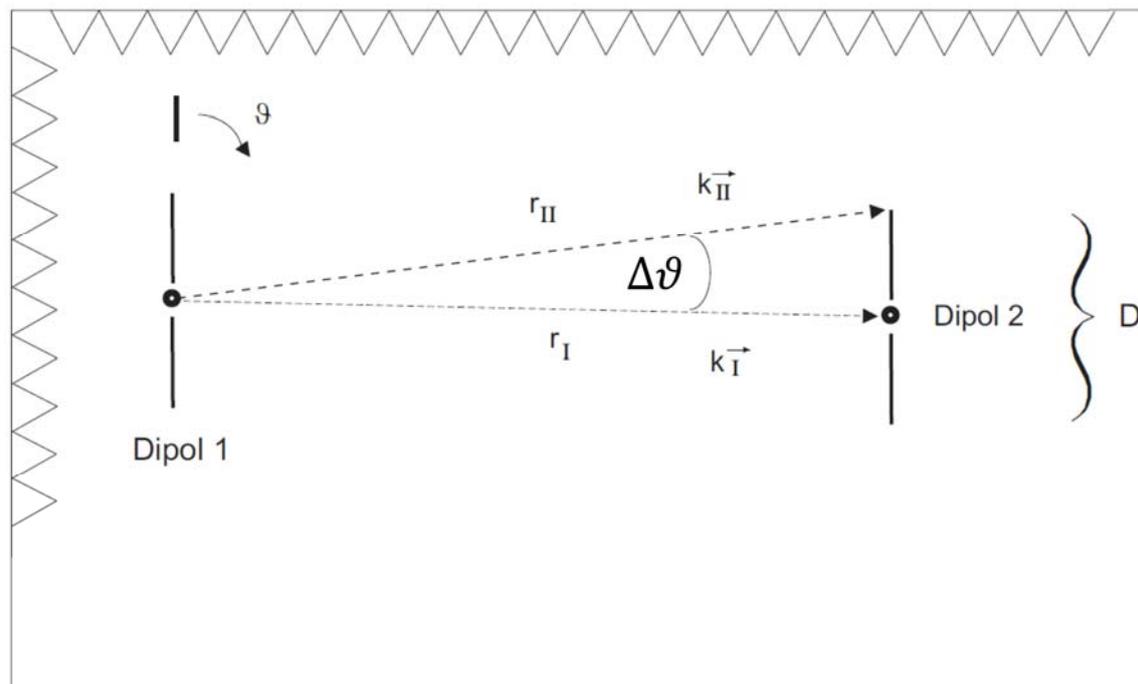


Bild 1: Geometrie einer Gewinnmessung im Absorberraum.

Mit einem Netzwerkanalysator wird das Übertragungsmaß $S_{21,direkt}$ zweier Antennen wie in der Bild 1 dargestellten Konfiguration gemessen.

$$(1) \quad |S_{21,direkt}|^2 = \frac{P_e}{P_s} = \frac{G_{Sende}}{4\pi r_I^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{unbekannt}$$

Der Sendegewinn G_{Sende} ist bekannt und mit einer Messung von $S_{21,direkt}$ kann diese Ausbreitungsgleichung von Friis nach $G_{unbekannt}$ aufgelöst werden. Die Friis-Formel bezieht sich dabei auf eine von Dipol 1 nach Dipol 2 ausbreitende Welle. Der damit assoziierte Wellenvektor k_I zeigt von Dipol 1 direkt auf Dipol 2. D. h. er liegt auf der direkten Verbindungslinie der Länge r_I zwischen den beiden Antennen.

Theoretisch könnte man sich auch einen zweiten Vektor k_{II} bzw. r_{II} denken, der vom Ursprung des einen Dipols 1 zum Ende des Dipols 2 geht, der eine nicht infinitesimale Ausdehnung hat.

Jedoch tauchen k_{II} und r_{II} in der Friis-Gleichung nicht auf, obwohl der Dipol 2 nicht punktförmig ist. Das liegt daran, dass die integrale Größe $G_{unbekannt}$, welche bestimmt wird, bereits die theoretischen Größen wie r_{II} und k_{II} implizit beinhaltet.

Numerisch würde $G_{unbekannt}$ über ein Integral berechnet, welches r_{II} und k_{II} und den Bereich dazwischen berücksichtigt.

Wie groß ein $\Delta\vartheta$ respektive ein $r_{II} \cdot k_{II} - r_I \cdot k_I$ sein darf, findet z. B. durch die Einhaltung der hierfür definierten Fernfeldbedingung $r_I > \frac{2D^2}{\lambda}$ bei der Wahl/dem Design eines entsprechenden Messaufbaus Berücksichtigung. Diese Fernfeldbedingung ist natürlich nur als eine empirische Abschätzung zu verstehen.

- In Gleichung (1) setzt man für die winkelabhängige Gewinnfunktion des Dipols 1 $G_{sende}(\vartheta)$ den Wert für $G_{sende}(\vartheta = 90^\circ)$ ein.
- Die Gewinnfunktion der Sendeantenne für den Wertebereich $|\vartheta - 90^\circ| > \Delta\vartheta$ spielt bei der Bestimmung von $G_{unbekannt}$ überhaupt keine Rolle, unabhängig davon, wie gut Fernfeldbedingungen erfüllt sind.
- Wenn von einer nicht ebenen Welle ausgegangen werden soll, die Ausleuchtung des Dipols 2 durch Dipol 1 also berücksichtigt werden muss, weil Fernfeldbedingungen eben nicht erfüllt sind, ist ausschließlich der Wertebereich $|\vartheta - 90^\circ| < \Delta\vartheta$ relevant. Genau dieser wird im skalierten Messverfahren auch nachgestellt.
- Die Gewinnfunktion G_{sende} für diesen Bereich beinhaltet ja bereits die Ausdehnung eines Dipols 1 als integrale Größe.

$\Delta\vartheta$ nach Bild 1 ist der häufig Gegenstand der Diskussion bzgl. der Ausleuchtung von Objekten. Zu der Größenordnung des $\Delta\vartheta$ einige Beispiele:

In [2], siehe FAQs, erfolgte eine Validierung des skalierten Messverfahrens für ILS im Maßstab 1:144 mit einer analytischen Lösung für eine Kugel mit Durchmesser 15 cm in Entfernung 9 m und 11 m. Hier wird ein Winkelbereich von $2 \cdot \Delta\vartheta = 1^\circ$ abgedeckt. Winkelbereiche für Flugzeuge, die in der skalierten Umgebung eine Länge von bis zu 50 cm haben, sind noch deutlich größer. Mit dem skalierten Verfahren war es möglich, die in der zitierten ICAO-Studie gezeigten Ergebnisse reproduzierbar zu messen [5]. D. h. das skalierte Verfahren reproduziert wie zu erwarten auch die Eigenschaften der Ausleuchtungseffekte korrekt. Für einige Geometrien wie z. B. einem A380 wurde dabei gezeigt [1], dass der Antennen-Footprint des ILS also $G_{sende}(\vartheta)$ im Bereich $\Delta\vartheta$ der Ausdehnung des Objekts, Variationen der Amplitude von bis zu 10 dB gegenüber einem ebenen Wellenfeld aufweist.

Ein 1 GHz-Halbwellen-Dipol, gemessen in einem Abstand von 10 m überstreicht mit seinen Abmaßen einen Winkelbereich von $2 \cdot \Delta\vartheta = 0.9^\circ$.

Für das in 3 km Entfernung (der nach ICAO empfohlene Minimalabstand für Bebauungen) befindliche Windrad MM92 von Senvion ist eine Winkelöffnung $2 \cdot \Delta\vartheta = 1,8^\circ$ notwendig, um dessen Flügelspannweite zu erfassen.

Zusätzlich zu einer Antenne könnte nun auch ein Streuobjekt bzw. ein Windrad zur Übertragungsstrecke hinzugefügt werden. Man hätte dann die erweiterte Friisgleichung mit dem Radarquerschnitt RCS. Bzgl. des Streuobjektes gelten die gleichen Voraussetzung wie vorher für den Dipol 2.

$$(2) \quad |S_{21,streue}|^2 = \frac{P_e}{P_s} = \frac{G_{sende}}{4\pi r_1^2} \frac{RCS}{4\pi r_2^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{Empfang}$$

Während in der numerischen Bestimmung eines RCS immer von einer ebenen Welle ausgegangen wird, kann sich Gleichung 2 durchaus auf einen RCS bzgl. einer bestimmten Ausleuchtung eines Objektes beziehen.

Das in der Andersonformel (ein analytischer Ausdruck für Winkelfehler von statischen Objekten bzgl. der FM Komponente des Doppler-VOR aus dem Jahr 1958) verwendete Amplitudenverhältnis A zwischen Amplitude des gestreuten Anteils und der Amplitude des direkten Ausbreitungsanteils ist

$$(3) \quad A = \frac{|S_{21,streul}|}{|S_{21,direkt}|}$$

In der Veröffentlichung von Anderson erscheint dieses A als ein winkelunabhängiges Amplitudenverhältnis. Für ein Streuobjekt ließe sich aber ohne Beschränkung der Allgemeinheit eine winkelabhängige Streufunktion $A(\vartheta)$ analog zur Gewinnfunktion $G(\vartheta)$ einer Antenne festlegen.

In allen drei Gleichungen werden folglich integrale, nicht aber infinitesimale Strukturen berücksichtigt.

Wenn nun statt des Sende-Dipols 1 eine VOR-Anordnung Verwendung finden soll, gilt die gleiche Betrachtung wie oben, wie im Folgenden gezeigt wird. Bild 2 enthält die Anordnung mit den relevanten Größen.

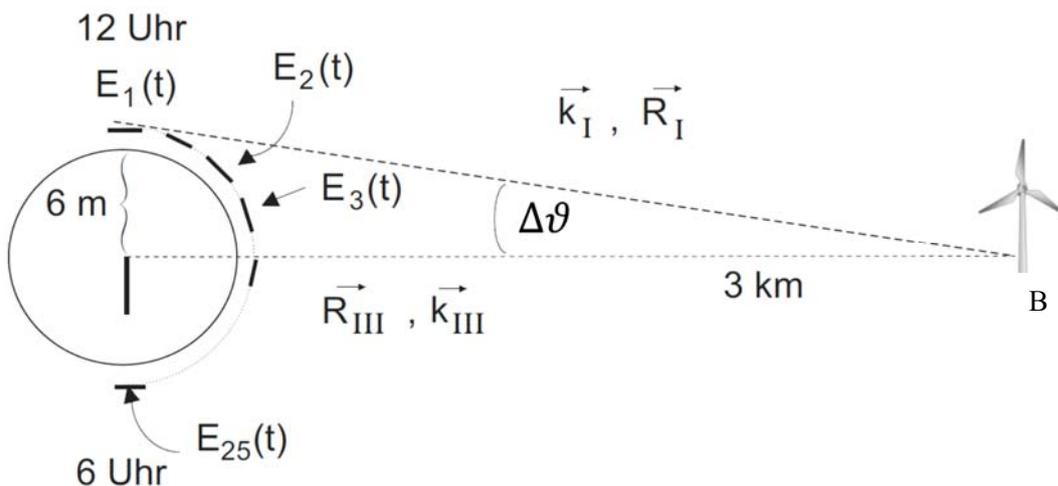


Bild 2: VOR-Anordnung mit mehreren Antennen.

Zunächst handelt es sich um mehrere zeitversetzt betriebene bzw. modulierte Antennen.

Ein Gesamtfeld an einem Raumpunkt B kann allgemein als Überlagerung der Felder $E_i(t)$ aller einzelnen Antennen formuliert werden:

$$(4) \quad \vec{E}_{gesamt}|_B = \sum_{i=1}^{N=50} \vec{E}_i(t) \cdot e^{j(\omega t - \vec{k}_i \cdot \vec{R}_i)}$$

Die Größen $E_i(t)$ beinhalten dabei sowohl die Zeitfunktion der Modulation des VOR, also den zeitversetzten Betrieb der Antennen, wie auch den entsprechenden Antennengewinn, der aufgrund der Orientierung der Einzelantennen auf der Kreisbahn unterschiedlich sein kann.

Gleichung 4 setzt dabei nicht voraus, dass sich die einzelnen Felder E_i als ebene Wellen ausbreiten. Wie bei einer Hohlleiter-Mode könnten sich, z. B. aufgrund des Erdbodens, auch höhenabhängige Feldverteilungen mit dem Exponentialterm in Richtung \vec{k}_i ausbreiten.

Natürlich haben die Antennen aufgrund ihres räumlichen Abstandes Phasenunterschiede des RF-Trägers. Diese RF-Phasenunterschiede $\Delta\beta_i$ können auf die Phase der Antenne in Abstrahlrichtung, in diesem Fall auf 3 Uhr, bezogen werden:

$$(5) \quad \vec{E}_{gesamt}|_B = \sum_{i=1}^{N=50} \vec{E}_i(t) \cdot e^{-j\Delta\beta_i} \cdot \underbrace{e^{j(\omega t - \vec{k}_{III} \cdot \vec{R}_{III})}}_{\text{Term unabhängig von } i}$$

$$(6) \quad \underbrace{\vec{E}_{gesamt}|_B}_{\substack{\text{Signal am} \\ \text{Empfängereingang} \\ g(t)}} = \underbrace{e^{j(\omega t - \vec{k}_{III} \cdot \vec{R}_{III})}}_{\substack{\text{Ausbreitungsweg} \\ \text{des Signals} \\ H}} \underbrace{\sum_{i=1}^{N=50} \vec{E}_i(t) \cdot e^{-j\Delta\beta_i}}_{\substack{\text{Das VOR-Signal, das in Richtung } \vec{k}_{III} \\ \text{abgestrahlt wird} \\ s_3(t)}}$$

Die kohärente Überlagerung der Einzelantennen ist also in dem $s_3(t)$ -Term bereits enthalten. In diesem Beispiel kennzeichnet H lediglich die Ausbreitung im Freiraum. In dem Projekt „min-VOR-Win“ sind wir aber an der Bestimmung einer Übertragungsfunktion interessiert, die durch Streuung an einem Windrad mit sich bewegenden Rotorblättern entsteht. D. h. im Gegensatz zur klassischen Impulsantwort einer Übertragungstrecke bezieht sich das zu charakterisierende H auf einen zeitvarianten Übertragungskanal.

Elementare Nachrichtentechnik besagt, dass bei bekannter Impulsantwort eines Systems die Ausgangssignale für beliebige Eingangssignale berechnet werden können. Der Signalfluss ist hierbei sei in folgender Abbildung erläutert:

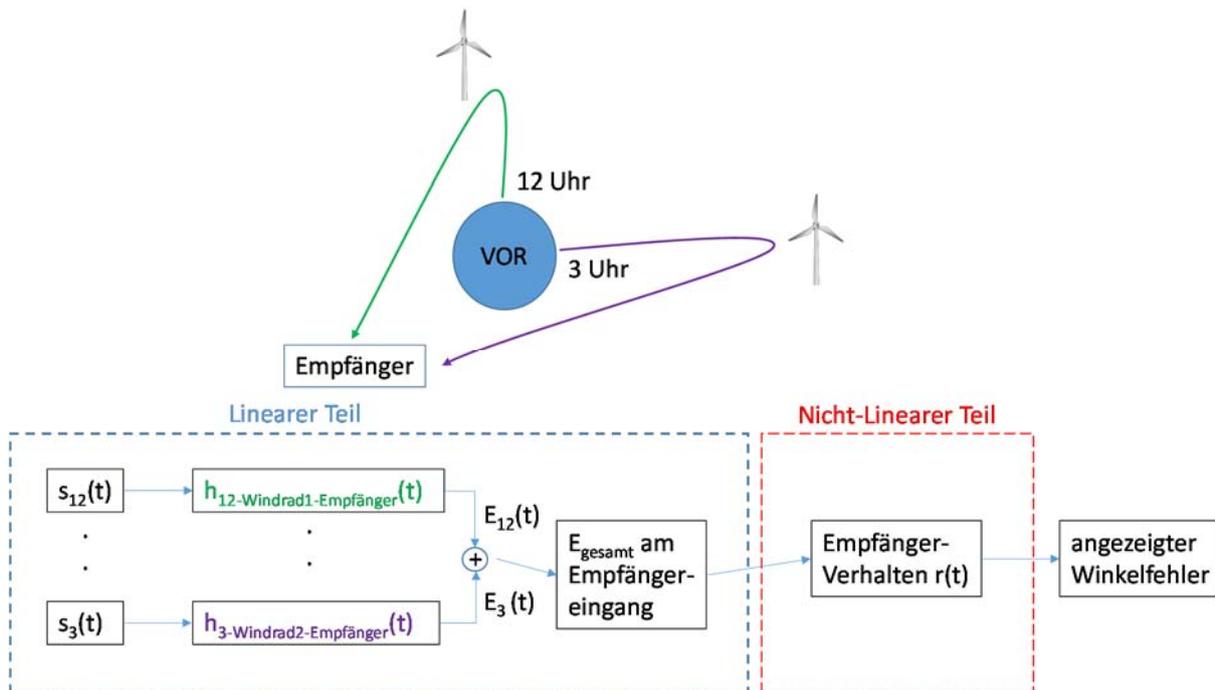


Bild 3: Signalfluss beim skalierten VOR und Überlagerung von Einzelsignalen.

Wenn nun mehrere Windräder oder ein Windpark mit einer großen Ausdehnung nachgestellt werden sollen, werden die einzelnen Felder wie in Abb. 3 dargestellt überlagert.

Ziel ist es, die Übertragungsfunktionen $h_{12}(t)$ und $h_3(t)$ zu bestimmen. Das muss nicht zwangsläufig mit VOR-Signalen erfolgen, sondern kann für schmalbandige Eingangssignale, die im Fall des VOR's mit einer Kanalbandbreite von 20kHz vorliegen, auch mit continuous

wave geschehen (siehe hierzu Publikation [3] der FAQs). Bei der klassischen Bestimmung von Impulsantworten ist diese Vorgehensweise sogar üblich: für statische Übertragungskanäle kann mit einem Netzwerkanalysator breitbandig das Frequenzverhalten gemessen werden, dessen anschließende inverse Fourier-Transformation die Impulsantwort liefert. Die Flugvermessung in einer 1:1 Umgebung kann hingegen einen Übertragungskanal h_{12} gar nicht isoliert betrachten, sondern misst immer die Reaktion $g(t)$ auf ein VOR-Signal, bestimmt also bestenfalls E_{gesamt} als Ausgang des linearen Teils. Mit dem skalierten Messverfahren [2] misst man die Phasenlage der Felder $E_{12}(t)$ und $E_3(t)$ – bezogen auf den RF-Träger! – nicht direkt mit. Dieses stellt aber keine Einschränkung bzgl. der Auswertung für Winkelfehler dar, denn die RF-Phasenbeziehung ist ohnehin abhängig vom Empfängerort, d. h. abhängig von den Wegunterschieden könnte man diese Phasenlage einsetzen oder pragmatischerweise im Sinne eines Worst-Cases von einer Kohärenz (bezogen auf RF) der Felder $E_{12}(t)$ und $E_3(t)$ ausgehen. Dies geschieht mit Hilfe von Software-defined Receivern oder mit Hilfe der Einspeisung der Signale in VOR-Empfänger wie in Publikation [4] beschrieben.

Bzgl. der Superposition der Felder $E_{12}(t)$ und $E_3(t)$ muss gelten, dass $E_{12}(t)$ keine Abhängigkeit von $E_3(t)$ besitzt, die Störbeiträge zweier Windräder in diesen Positionen also elektromagnetisch voneinander entkoppelt sind, was bei den Entfernungen zunächst zu erwarten ist. Wie stark Windräder miteinander elektromagnetisch verkoppeln, wird im Projekt „min-VOR-Win“ mit einer Windradgruppe von drei bis vier Windrädern untersucht, die dicht zusammen, z. B. auf 3 Uhr stehen.

III. Projektergebnisse zusammengefasst

III.1 Messtechnik in skaliertem Umgebung

Im Folgenden seien stichpunktartig wesentliche Projektergebnisse zusammengefasst:

- Eine portabler CW-Channel-sounder zur Vermessung dynamischer Übertragungskanäle ist bei 16 GHz entwickelt und charakterisiert worden.
- Modelle von Windenergieanlagen und Geländetopologien können in einer skalierten Messumgebung hergestellt werden. Ihre Betriebsparameter können reproduzierbar eingestellt und vermessen werden.
- Doppler-Spektren und dynamische Modulationseffekte von Windenergieanlagen können gemessen werden.
- Empfängermodelle zur Bewertung dynamischer Effekte sowohl für AM-Störungen als auch für FM-Störungen und Winkelfehler sind entwickelt worden.

Eine Dokumentation und Charakterisierung der Messtechnik sowie die Darstellung von Messergebnissen ist in den unter Abschnitt IV genannten Veröffentlichungen zu finden.

III.2 Flugvermessung in 1:1 Umgebung im Rahmen von „min-VOR-Win“

Die Ergebnisse der Flugvermessung sind zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht veröffentlicht, werden an dieser Stelle der Vollständigkeit halber in einem ersten Fazit aber schon dargestellt. Ziel der Flugvermessung im Projekt war die Validierung einer Hypothese, die aus der skalierten Messumgebung abgeleitet wurde. In der skalierten Messumgebung wurde der Einfluss einzelner Windenergieanlagen auf Winkelfehler des Drehfunkfeuers untersucht, wobei auch in der Variation vieler Parameter keine kritischen Fälle außerhalb der ICAO-Toleranzen zu beobachten waren. Solche Fälle, bei denen Winkelfehler deutlich außerhalb der ICAO-Toleranzen lägen, wären für einen Hypothesentest zur Validierung des skalierten Messverfahrens prinzipiell zwar besser geeignet, konnten allerdings nicht beobachtet werden.

Insgesamt erfolgten Messflüge an 8 Tagen. Untersucht wurde ein Dopplerdrehfunkfeuer in Hehlingen und ein konventionelles Drehfunkfeuer in Magdeburg.

Folgende Grafiken zeigen ein Messbeispiel für das DVOR Hehlingen.

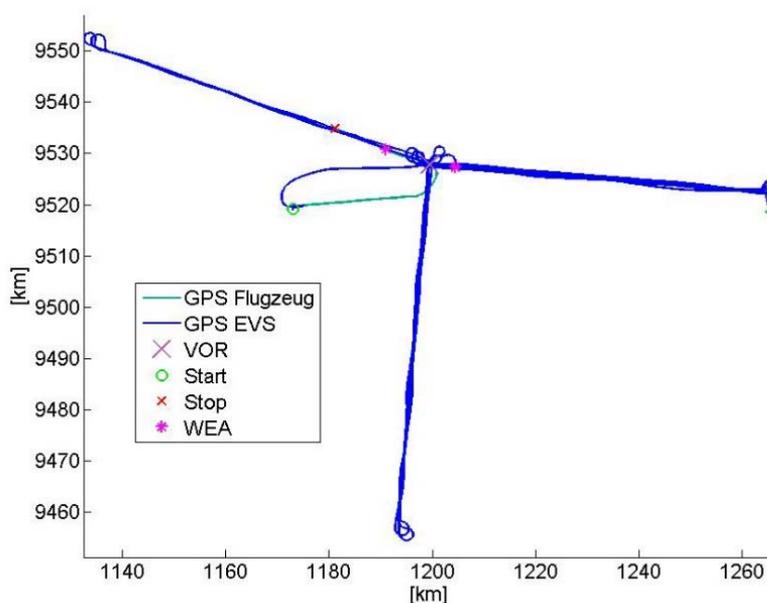


Bild 4: Geometrie des Messfluges und geflogene Trajektorien.

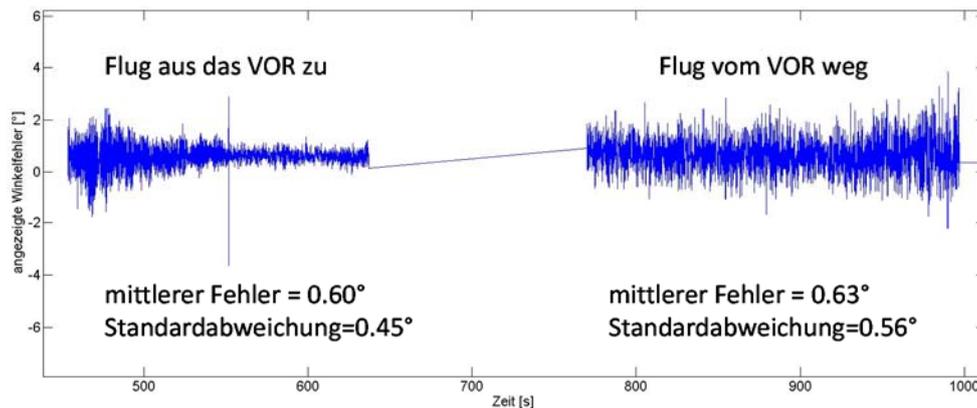


Bild 5: Beispiel für gemessene Winkelfehler für die angegebene Konfiguration und die statistische Zusammenfassung mit Mittelwert und Standardabweichung.

Als Fazit der Flugvermessung lässt sich festhalten, dass der Prognose aus der skalierten Messumgebung entsprechend nur sehr kleine Winkelfehler durch Windenergieanlagen in der 1:1 Umgebung gemessen wurden, die innerhalb der vorgegebenen ICAO Toleranzen liegen. Zwar sind Messpunkte einzelner Winkelfehler vereinzelt größer als zurzeit diskutierte Grenzen für Einzelanlagen im Bereich eines einzigen Grades. Allerdings werden die ICAO Empfehlungen für Toleranzgrenzen in diesen Messungen nicht überschritten. Diese sehen 3° Toleranzen für die assoziierte Auftrittswahrscheinlichkeit von 95 % vor, die doppelten der Standardabweichungen, also in diesem Fall etwa 1° beträgt.

Deutlich zu erkennen ist auch, dass die Winkelfehler mit zunehmendem Abstand zum VOR größer werden aufgrund geringer werdender Signalpegel. Der empfangene Signalpegel ist zudem auch geringer, wenn das Flugzeug vom VOR wegfliht, da die Empfangsantenne aus dieser Richtung weniger empfindlich empfängt.

III.3 Fazit

Zusammenfassend seien folgende drei Fazits basierend auf genannten Projektergebnissen gezogen.

- 1) gemessene Winkelfehler von WEA (durch Voll-Metall nach oben abgeschätzt) liegen offensichtlich selbst bei kurzen Distanzen deutlich unter erlaubten Toleranzwerten.
- 2) Im Rahmen des Projektes durchgeführte Flugvermessungen zeigen, dass prognostizierte Werte ohnehin im Schwankungsbereich von Messflügen liegen (abhängig von Empfängereinstellungen, die in ICAO Empfehlungen gar nicht spezifiziert sind)
- 3) Entscheidend ist es bei Störungen des Drehfunkfeuers in Form von Winkelfehlern, die Statistik zu berücksichtigen, insbesondere bei der Fragestellung, wie sich Fehlerbeiträge von ganz vielen Windenergieanlagen überlagern.

IV. Recherchierbare Publikationen

1) R. Geise,

Skalierte Messungen zu bistatischen Radarquerschnitten und Landkursverfälschungen des ILS,

Dissertation, ISBN 978-3-86955-570-6, Cuvillier Verlag Göttingen, 2010.

Inhalt: Grundsätzliche Erläuterung zu dem skalierten Messverfahren, Gruppenantennen und Streuobjekten, erste Messungen mit generischem skalierten Instrumenten-Lande-System mit Proof of Principle, Erläuterung zur Bewertung der Größe ddm [μA].

2) R. Geise, B. Neubauer, G. Zimmer,

Analysis of Navigation Signal Disturbances by Multipath Propagation – Scaled Measurements with a Universal Channel Sounder Architecture,

Frequenz. Band 69, Heft 11-12, Seiten 527–542, ISSN (Online) 2191-6349, ISSN (Print) 0016-1136, DOI: 10.1515/freq-2015-0080, September 2015.

Inhalt: Erweiterung des skalierten Messverfahrens zur Erfassung dynamischer Vorgänge, Validierung des skalierten Messverfahrens mit Kugeln als analytisch zu berechnbare Referenz-Streuobjekte, Messungen mit CAT III ILS, Messungen von Dopplerspektren von sich drehenden Windrädern, messtechnischer Nachweis, dass Ausrichtung der Flügel zum VOR und zum Empfänger wesentlich sind.

3) R. Geise, G. Zimmer, B. Neubauer,

Distortion of Modulated Signals by Time-Variant Channels - Measurement Concepts and Algorithms,

European Conference on Antennas and Propagation 2016, Davos, Switzerland.

Inhalt: Mit Hilfe von Software-defined Receivern kann der Einfluss von dynamischen/zeitvarianten Übertragungskanälen untersucht und mögliche Störungen von Amplituden und Frequenzmodulation quantifiziert werden. Im Fall des Drehfunkfeuers erfolgt so die Bewertung von „bearing errors“. Dies kann sowohl mit theoretischen mathematisch synthetisierten Testsignalen erfolgen als auch mit Messergebnissen aus der skalierten Messumgebung. Die Funktionalität dieses Software-defined Receivers ist mit Hilfe von analytischen Ausdrücken validiert worden.

4) R. Geise, O. Kerfin, G. Zimmer, B. Neubauer, A. Enders,

Investigating EMI-Characteristics of Navigation Receivers,

ESA workshop on Aerospace EMC 2016, Valencia, Spain.

Inhalt: In dieser Veröffentlichung wird ein Messaufbau mit einem Arbitrary Waveform Generator und einem ILS/VOR Empfänger vorgestellt, um das dynamische Verhalten eines Empfängers auf dynamische Übertragungskanäle zu untersuchen. Weiterhin erfolgen erstmals überhaupt Bewertungen der Navigationsgrößen ddm [μA] und bearing [$^\circ$] unter Einfluss unterschiedlicher Signal-to-Noise-Ratios. Diese Veröffentlichung liefert auch den messtechnischen Beweis, dass z. B. für Winkelfehler zeitvariante Übertragungskanäle z. B. durch Amplitudenmodulation sich drehender Windräder eine entscheidende Rolle spielen und die rein statische Betrachtung eines Windrades wie in gängigen Simulationstools bisher praktiziert daher nicht ausreichend ist.

5) R. Geise, G. Zimmer, B. Neubauer, A. Enders,

Investigating Multipath Propagation for Navigation Systems in a Miniaturized Airport Environment – ILS and extension to VOR,

18th International Flight Inspection Symposium, IFIS 2014, 16-20 June, 2014, Oklahoma City, Oklahoma, United States.

Inhalt: Diese Veröffentlichung zeigt die vollständige Validierung des skalierten Messverfahrens für ILS durch Vergleiche zwischen den skalierten Messungen und den Messergebnissen aus der ICAO Studie „ICAO, 2006, Assessment of ILS protection areas impact on large aircraft operations, V1.3.“

6) B. Neubauer, R. Geise, G. Zimmer,

A Benchmark Study on Measurement and Simulation Techniques for Navigation Systems and Multipath Propagation,

International Flight Inspection Symposium, pp. 1-9, 13-17 June, Belgrade, Serbia.

Inhalt: Diese Veröffentlichung zeigt Messergebnisse von generischen Windradgeometrien für unterschiedliche Ausrichtungskonstellationen und Drehgeschwindigkeiten. Anhand der bekannten Relativgeschwindigkeiten der rotierenden Rotorblätter werden Grenzen für das sich ergebende Dopplerspektrum ermittelt und mit Messwerten verglichen, womit die Vermessung von Dopplerspektren validiert wird. Ebenfalls wird gezeigt, dass die rotierende Bewegung der Rotorblätter ausschlaggebend für Winkelfehler, insbesondere der AM-Komponente des Drehfunkfeuers ist. Diese Veröffentlichung ist auch als Ringvergleich gedacht, an dem sich Simulationstechniken beteiligen können und sollen.

7) B. Neubauer, R. Geise, G. Zimmer, O. Kerfin, A. Andree, N. Ueffing,

Modular Terrain Modeling with Flexible Conductive Materials in a Scaled Measurement Environment,

European Conference on Antennas and Propagation 2016, pp. 1-5, 19-24 March, Paris, France.

Inhalt: Diese Veröffentlichung beschreibt ein Verfahren zur Herstellung beliebiger Geländetopologien in modularer Bauweise mit einer Charakterisierung der Materialparameter. Beispielmessungen werden mit der Spezifizierung des Einflusses der Geländetopologie auf die Wellenausbreitung werden gezeigt.

8) G. Zimmer, R. Geise, B. Neubauer,

Einfluss eines durch Windenergieanlagen amplitudenmodulierten Übertragungskanals auf die Amplitudenmodulation des VOR,

EMV 2018 Düsseldorf, internationale Fachmesse, 20-22.02.2018, ISBN 978-3-86359-396-4, Seiten 157-164, Düsseldorf.

Inhalt: In dieser Veröffentlichung wird unter einer Vielzahl von Parametervariationen wie Abstände zwischen Drehfunkfeuer und Windenergieanlage, Drehzahl, Ausrichtung der Rotoren der Einfluss von Windrädern auf Winkelfehler des Drehfunkfeuers messtechnisch bestimmt.

9) G. Zimmer,

Ein simples MISO-Channel-Sounder-System für die Analyse von störenden Streuszenarien bei Avionik-Navigationsanlagen,

Dissertation, ISBN 978-3-7369-9561-1, Cuvillier Verlag Göttingen, 2017.

Inhalt: Diese Dissertation beschreibt wesentliche Komponenten der in dem Projekt min-VOR-WIn verwendeten Messtechnik und korrespondierender Verfahren und Algorithmen zur Nachbildung von Navigationssystemen. Ein weiterer Fokus liegt auf Empfängermodellen, insbesondere zur Analyse von Störungen der AM-Komponente eines Drehfunkfeuers. Erstmals werden überhaupt dynamische Empfängereffekte untersucht.