

Statistisches Verfahren zur Kalibrierung von luftgestützten VHF-Messantennen

Karsten Schubert M.Sc., Jade Hochschule Wilhelmshaven / Oldenburg / Elsfleth (1)
Prof. Dr.-Ing. Jens Werner, Jade Hochschule Wilhelmshaven / Oldenburg / Elsfleth (1)
Prof. Dr.-Ing. Jens Wellhausen, Jade Hochschule Wilhelmshaven / Oldenburg / Elsfleth (2)
Yannik Schildt B.Eng., Jade Hochschule Wilhelmshaven / Oldenburg / Elsfleth (1)
Oliver Diedrich B.Eng., Jade Hochschule Wilhelmshaven / Oldenburg / Elsfleth (1)
Martin Kumm B.Eng., Jade Hochschule Wilhelmshaven / Oldenburg / Elsfleth (2)

(1) Studienort Wilhelmshaven, Labor für Hochfrequenztechnik und EMV

(2) Studienort Wilhelmshaven, Labor für Meeresmesstechnik und maritime Sensorik

1 Einleitung

Die Wechselwirkung zwischen Windenergieanlagen (WEA) und Funk- bzw. Navigationsdiensten ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen, die von verschiedenen Institutionen betrieben werden. U.a. wurden in dem Projekt WERAN [1, 2] Rückwirkungen durch Reflexionen an WEA auf die Drehfunkfeuer (VOR - VHF omnidirectional range) der Luftfahrt untersucht. Dabei wurden überwiegend ferngesteuerte Flugplattformen (z.B. Oktokopter) eingesetzt, um elektromagnetische Felder in der Luft zu messen. In einem gegenärtig betriebenen Nachfolgeprojekt WERANplus kommt zusätzlich ein Leichtflugzeug in Form eines Reisemotorseglers zum Einsatz, welches Messtechnik in speziellen Außenlastbehältern tragen kann. Mit dieser Plattform sind Messungen über 6-8 Stunden und weite Entfernungen (>600 km) möglich. Damit sind auch Messungen im Offshore-Bereich geplant. Mögliche Einflüsse durch Reflexionen an WEA werden in einem ersten Schritt im VHF-Band hinsichtlich der Funkdienste AIS und UKW-Seefunk untersucht. Weiterhin sind Messungen im X-Band (maritime Radare) geplant. Nachfolgend wird hier für ein einkanalisches Basissystem die Architektur des Empfängers vorgestellt sowie verschiedene Ansätze diskutiert, um die Empfangsantenne gemeinsam mit der Flugplattform zu vermessen.

2 Messhardware

Das Empfangssystem besteht im wesentlichen aus drei Baugruppen (Bild 1). Die zu messenden hochfrequenten Felder im VHF-Bereich werden über die Empfangsantenne empfangen. Im Empfangszweig werden diese Signale gefiltert, verstärkt und auf eine Zwischenfrequenz umgesetzt. Eingangsseitig wird im Empfangszweig ein schmalbandiges Bandpassfilter (BPF) (ca. 5 MHz Bandbreite) verwendet, welches das Nutzsignal herausfiltert. Für DC ist dieses Filter zudem kurzgeschlossen, sodass statische Aufladungen abgeleitet werden können. Dem Filter folgen ein rauscharmer Vorverstärker (LNA - low noise amplifier), ein Diodenringmischer und ein weiteres schmalbandiges Bandpassfilter (ca. 1 MHz Bandbreite). LNA und Mischer sind großsignalfest ausgelegt. Das zweite Bandpassfilter selektiert die gewünschte Zwischenfrequenz von ca. 24 MHz heraus und dient ferner als Antialiasing-Filter. In der zweiten Baugruppe wird das Signal mit einem 14-Bit Analog Digital Converter (ADC) digitalisiert. Die digitalisierten Samples werden in

einem Field Programmable Gate Array (FPGA) vorprozessiert und über eine Ethernet-Schnittstelle zu einem Personal Computer (PC) übertragen. Die Vorprozessierung besteht aus einer digitalen IQ-Mischung und einer Abtastraten-Dezimierung, welche eine Tiefpassfilterung beinhaltet. Der Dezimierungsfaktor kann anwendungsspezifisch gewählt werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wird ein Dezimierungsfaktor von 128 verwendet. Somit liegt das IQ-Basisband mit einer Abtastrate von 96 kSamples/s vor.

Die Grundhardware der zweiten Baugruppe basiert auf einem modifizierten RedPitaya-Board [3]. Hierbei wurde ein handelsüblicher RedPitaya so erweitert, dass sowohl Linearität als auch Empfindlichkeit erheblich verbessert wurden. Die Größe „Effective Number of Bits“ (ENOBs) konnte von 10 Bit auf 12 Bit erhöht werden, was einer Steigerung der Dynamik um 12 dB entspricht. Durch die schmalbandige Filterung im zweiten Bandpassfilter und die hohe Dynamik im ADC kann das Empfangssystem ohne Verstärkungsregelung (AGC - automatic gain control) arbeiten. Temperaturgänge und Nichtlinearität einer AGC-Stufe werden somit vermieden. Weiterhin können innerhalb der Empfangsbandbreite auch schwache Signale in Anwesenheit von starken Signalen ohne Einschränkungen detektiert und mit hoher Pegelgenauigkeit gemessen werden.

Die dritte Baugruppe stellt eine hochgenaue Zeitreferenz bereit. Kernkomponente dieser Baugruppe ist ein hochpräziser Quarz-Doppelofen, der phasenstarr mit den Zeitreferenzen der GPS-Satelliten synchronisiert ist. Von diesem Takt wird sowohl der Lokaloszillator (LO) für den Empfangszweig als auch die Taktversorgung des ADC und des FPGA abgeleitet. Bei der Auslegung dieser Oszillatoren wurde besonderes Augenmerk auf geringes Phasenrauschen gelegt. Messort und Messdaten werden mit Zeitstempeln versehen, die vom GPS-Empfänger bereitgestellt werden.

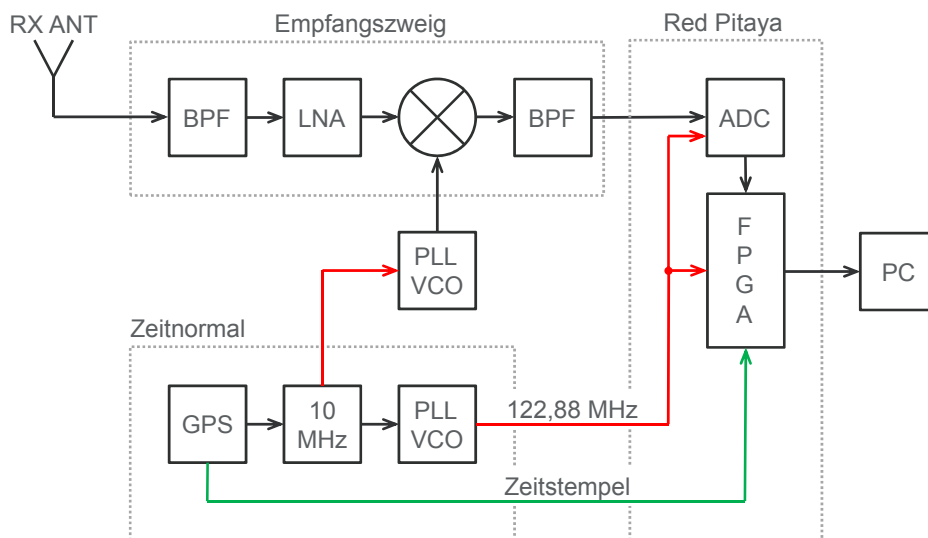


Bild 1: Blockschaltbild des einkanaligen VHF-Empfangssystems

3 Richtdiagramm des Flugzeugs

Um mit dem Flugzeug quantitative Feldstärkemessungen durchführen zu können, muss das Richtdiagramm der Empfangsantenne bekannt sein. Entscheidend ist, dass das Flugzeug einen Einfluss auf das Abstrahl- bzw. hier reziprok das Empfangsverhalten hat. Somit muss das Antennengesamtsystem bestehend aus Antenne und Flugzeug charakterisiert werden.

risiert werden. Hierzu werden in den drei folgenden Unterkapiteln verschiedene Ansätze diskutiert. Um eine einheitliche Nomenklatur zu verwenden, wird ausschließlich die Bezeichnung Antennendiagramm genutzt, die im Rahmen dieser Untersuchung den Einfluss des Flugzeugs grundsätzlich mit berücksichtigt. Zur Darstellung des Antennendiagramms werden Kugelkoordinaten verwendet. Der Bezug für den Elevationswinkel Θ und den Azimutwinkel ϕ ist wie folgt gewählt: $\Theta = 0^\circ$ zeigt senkrecht in den Himmel nach oben und $\Theta = 90^\circ$ und $\phi = 0^\circ$ in Flugrichtung.

3.1 EM Simulation

Um das Abstrahlverhalten des Flugzeugs simulieren zu können, wurde dieses mit einem Laserscanner vermessen. Die Geometrie wurde in Oberflächenelemente überführt und in die Software FEKO [4] importiert. Zur Lösung der Feldverteilung wurde in FEKO der "Method of Moments"(MoM) Solver eingesetzt. Als Vereinfachung wurde die Oberfläche als Perfect Electric Conductor (PEC) modelliert. Bild 2 zeigt eine Sicht auf das 3D-Modell.

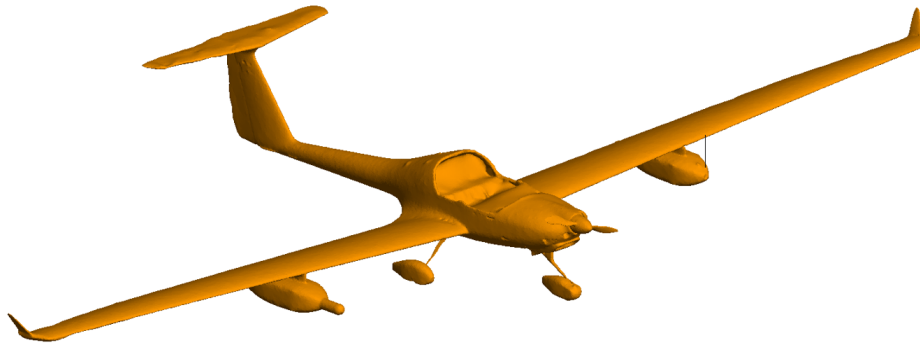


Bild 2: 3D-Modell des Flugzeugs: Vermessung mittels Laser-Scanner und Import als PEC Modell in FEKO

Die verwendete Antenne ist ein $\lambda/4$ -Monopol. Dieser befindet sich am linken Außenlastbehälter des Flugzeuges und zeigt nach oben, was zu einer vertikalen Polarisation führt. Mittels der Simulation in FEKO lässt sich das Abstrahlverhalten in alle Raumrichtungen bestimmen. Exemplarisch zeigt Bild 3a das Richtdiagramm in der horizontalen Ebene ($\theta = 90^\circ$). Es ist erkennbar, dass in Flugrichtung ($\phi = 0^\circ$) der Antennengewinn über einen weiten Winkelbereich für ϕ nahezu konstant ist. Im Bereich zwischen $-60^\circ \leq \phi \leq +90^\circ$ schwankt der Antennengewinn lediglich zwischen 0 dBi und +2 dBi. Schaut man sich die rückwärtige Richtung an, so ist erkennbar, dass der Antennengewinn weit mehr variiert. Für $\phi = 180^\circ$ ergibt sich beispielsweise ein Einbruch auf -8 dBi.

In Bild 3b ist das vertikale ($\phi = 0^\circ$) Abstrahlverhalten abgebildet. Auch hier ist erkennbar, dass in frontale Richtung der Antennengewinn über einen großen Bereich nahezu konstant ist. So variiert der Antennengewinn für $60^\circ \leq \Theta \leq +150^\circ$ lediglich zwischen 0 dBi und +2 dBi. Für $\Theta = 0^\circ$ bzw. für $\Theta = 180^\circ$ ergeben sich Werte von -4 dBi bzw. -8 dBi. Bei einem idealen Monopol (ohne Flugzeug) würde man in diesen Richtungen Nullstellen ($-\infty$ dBi) erhalten.

Zusammenfassend ist erkennbar, dass in frontale Richtung über einen großen Bereich sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Ebene ein nahezu konstanter Antennengewinn zu erwarten ist. In der Realität besteht die Oberfläche des Flugzeugs jedoch nicht aus

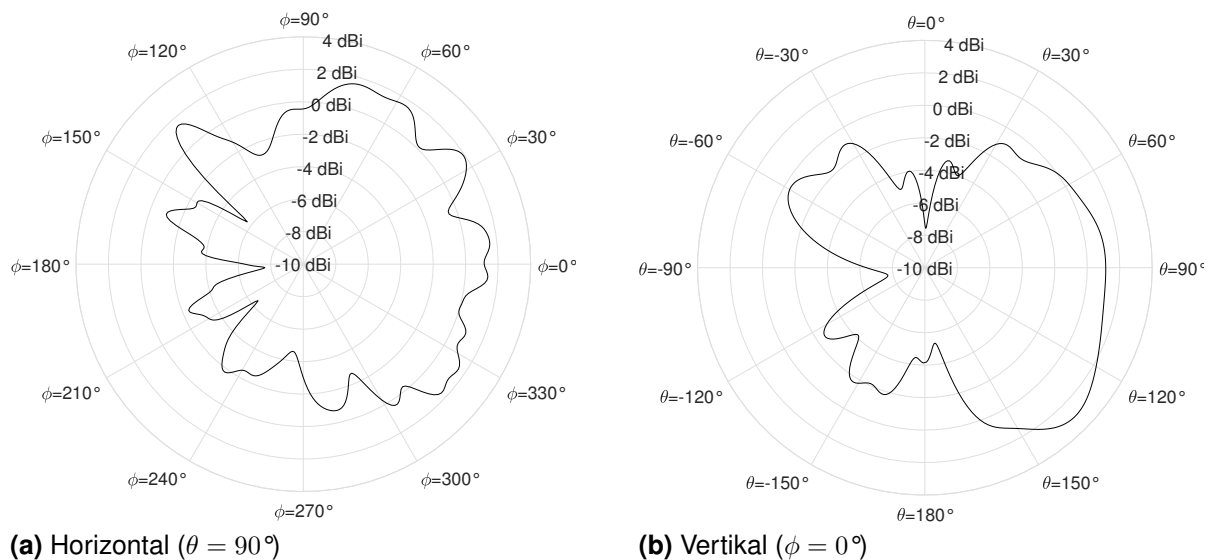


Bild 3: Antennendiagramm des Flugzeugs

PEC, sondern aus einer Mischung von Kohle- und Glasfaserverbundstoffen (CFK und GFK). Somit sind beim realen Antennendiagramm Abweichungen zwischen Simulation und Messung zu erwarten.

3.2 Referenzsender

Um das reale Antennendiagramm des Flugzeugs zu bestimmen, wurden Messungen mit einer Referenzstation durchgeführt. Die Referenzstation besteht aus einem leistungskalibrierten Sender (+10,0 dBm) und einer Referenzantenne. Die Referenzantenne ist eine 6-Element Yagi-Uda Antenne, die einen Antennengewinn von 11,8 dBi aufweist, einen Öffnungswinkel von $\pm 25^\circ$ hat und ferner in Hinblick auf die Nebenkeulenunterdrückung (besser 20 dB) optimiert ist. Aufgrund dieser hohen Nebenkeulenunterdrückung lässt sich bei einem Erhebungswinkel von 30° und mehr eine erhebliche Unterdrückung der Bodenreflexion erreichen. Somit kann sichergestellt werden, dass vorwiegend der direkte Pfad zwischen Referenzstation und Flugzeug gemessen wird und unerwünschte Pfade durch Reflektionen am Boden oder Objekten stark bedämpft werden.

Das mit der Referenzstation ermittelte Antennendiagramm ist in Bild 4 in schwarz dargestellt. Erkennbar ist, dass dieses Antennendiagramm im Vergleich mit dem aus der Simulation (Bild 3) größeren lokalen Schwankungen unterliegt. So schwankt beispielsweise der Antennengewinn zwischen $-30^\circ \leq \phi \leq +30^\circ$ zwischen -6 dBi und -3 dBi. Allgemein ist erkennbar, dass der gemessene Antennengewinn gegenüber der Simulation um 4 dB bis 6 dB schwächer ausfällt.

Aus den Abweichungen zwischen Simulation und Messung kann gefolgert werden, dass die Flugzeugmodellierung mit dem Material PEC Modell eine unzulässige Vereinfachung darstellt. Offensichtlich treten im Flugzeug und den Außenlastbehältern Verluste auf, die zu einem geringeren Antennengewinn führen. Ferner wird auch die innere tragende Metallstruktur des Flugzeugs einen Einfluss auf die Richtcharakteristik haben, die in einer Simulation nur dann erfasst werden kann, wenn die Außenhaut des Flugzeuges nicht als PEC modelliert wird.

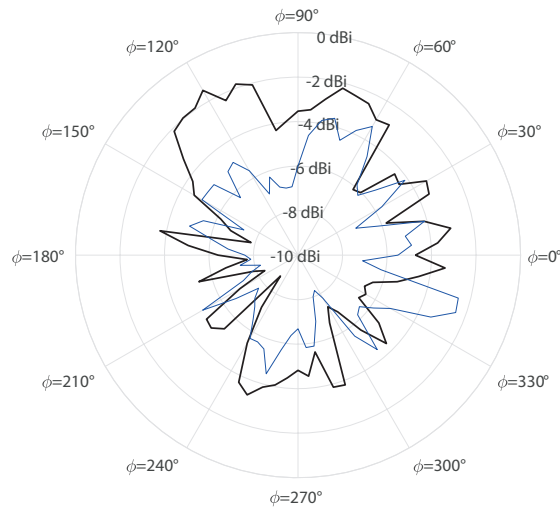


Bild 4: Gemessenes Antennendiagramm des Flugzeugs (schwarz/dick: Referenzmessung mit einer Yagi-Uda Antenne; blau/dünn: zahlreiche AIS-Sender als Referenzsender)

Zusammenfassend ist erkennbar, dass das gemessene Antennendiagramm in Bild 4 (in schwarz/dick), Schwankungen zwischen -8 dBi und -2 dBi zeigt. In Flugrichtung ($-30^\circ \leq \phi \leq +30^\circ$) schwankt der Antennengewinn zwischen -6 dBi und -3 dBi, was als Abschätzung für die Unsicherheit gemessener Feldstärken dienen kann.

3.3 AIS-Signale als Referenz

Eine weitere Ermittlung des Antennengewinns wurde anhand von Automatic Identification System (AIS) Signalen durchgeführt. AIS wird in der Seefahrt zur Überwachung des Schiffsverkehrs eingesetzt und arbeitet im VHF-Band bei ca. 162 MHz. Für diese Untersuchung ist entscheidend, dass jedes Schiff seine Position und Kennung sendet und weiterhin die Sendeleistung mit $+41 \text{ dBm} \pm 1 \text{ dB}$ [5] relativ exakt spezifiziert ist. Unter der Annahme von üblichen Leitungslängen zwischen Sender und Schiffsantenne von einige 10 m (bewirkt eine Dämpfung von ca. 3 dB bis 7 dB) und üblichen Schiffsantennen wie einzelnen Dipole oder gestockten Systemen (2 dBi bis 6 dBi), kann die Equivalent Isotropically Radiated Power (EIRP) mit ca. 40 dBm EIRP angenommen werden.

Durch die hohe Anzahl von Schiffen auf den Verkehrswegen in der Deutschen Bucht, stehen somit viele Pseudo-Referenzstationen zur Verfügung, deren Position aus den AIS-Telegrammen entnommen werden kann. Zur Ermittlung des Flugzeug-Antennengewinns wurde ein Messflug von Wilhelmshaven nach Helgoland und zurück durchgeführt. Bei der Auswertung wurde eine Flughöhe zwischen 1500 m und 1600 m gewählt. Sind Flugzeugantennenhöhe h_{fa} und Schiffsantennenhöhe h_{sa} bekannt, so kann nach (1) die Maximalentfernung $s_{ek,max}$, bei der aufgrund der Erdkrümmung noch Sichtverbindung besteht, bestimmt werden. Bei einer minimalen Auswerteflughöhe von $h_{fa} = 1500 \text{ m}$ und einer minimalen Schiffsantennenhöhe von $h_{sa} = 10 \text{ m}$ ergibt sich $s_{ek,max} = 150 \text{ km}$.

$$s_{ek,max} = 3,57 \text{ km} \cdot \left(\sqrt{\frac{h_{fa}}{1\text{m}}} + \sqrt{\frac{h_{sa}}{1\text{m}}} \right) \quad (1)$$

Bei geringer Entfernung zwischen Schiff und Flugzeug stellt sich für Θ ein deutlich größerer Wert als 90° ein. Um ausschließlich das horizontale Antennendiagramm zu ermitteln, ist somit ein Minimalabstand zwischen Schiff und Flugzeug erforderlich. Dieser wurde so gewählt, dass die Bedingung $\Theta \leq 95^\circ$ für jedes Schiff erfüllt ist. Bei der Maximalflughöhe von 1600 m ergibt sich daraus ein Mindestabstand von 18,3 km. Tatsächlich wurde ein Auswertintervall von 20 km bis 120 km gewählt.

Bei dem Messflug ergaben sich unter diesen Bedingungen ($1500 \text{ m} \leq \text{Flughöhe} \leq 1600 \text{ m}$ und $20 \text{ km} \leq \text{Entfernung zu den Schiffen} \leq 120 \text{ km}$) 35308 Datenpakete von ca. 1500 verschiedenen Schiffen. Unter Verwendung der Friis Übertragungsgleichung [6] wurde für jedes einzelne Datenpaket der Antennengewinn des Flugzeuges bestimmt. Für eine Clusterung über Winkelbereiche von $\pm 2.5^\circ$ wurden die berechneten Gewinnangaben über die jeweiligen Datenpakete richtungsabhängig gemittelt: Der Messpunkt $\phi = 0^\circ$ setzt sich beispielsweise aus der Mittelung über das Intervall $-2.5^\circ < \phi \leq 2.5^\circ$ zusammen. Das derart ermittelte Antennendiagramm ist in Bild 4 in blau (dünne Linie) dargestellt.

Beim Vergleich dieser messtechnisch bestimmten Antennengewinne (eine Referenzstation bzw. viele AIS-Signale) fällt auf, dass die Abweichung, über einen großen Winkelbereich, $< 2 \text{ dB}$ ist. Lediglich in den Intervallen $100^\circ < \phi < 140^\circ$ und $330^\circ < \phi < 350^\circ$ liegt eine Abweichung von bis zu 4 dB vor. Bei der Auswertung der AIS-Daten war weiterhin zu beobachten, dass die gemessene Empfangsfeldstärke mitunter stark von der nach der Friis-Übertragungsgleichung zu erwartenden Feldstärke abwich. Bild 5a zeigt hierzu die Empfangsfeldstärke in Abhängigkeit von der Entfernung für Schiffe, die sich im Winkelintervall $-2.5^\circ < \phi \leq 2.5^\circ$ befinden. Jeder Punkt entspricht hierbei einem empfangenem AIS-Datenpaket. Die durchgehende schwarze Linie zeigt die nach der Friis-Übertragungsgleichung zu erwartende Empfangsfeldstärke (+40 dBm EIRP Sendeleistung und -4 dBi Empfängerantennengewinn). Bei einer Entfernung von 80 km ist beispielsweise eine Streuung zwischen -100 dBm und -70 dBm zu erkennen. Diese massive Streuung ist vermutlich auf destruktive Interferenz zurückzuführen. Hierzu wird im folgenden die Reflexion an der Wasseroberfläche näher untersucht.

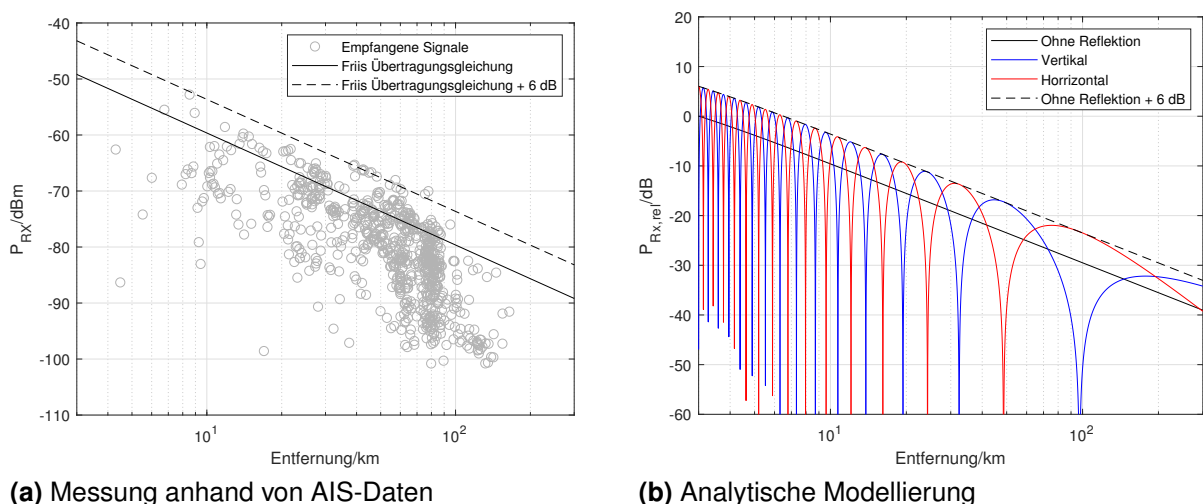


Bild 5: Streckendämpfung zwischen Schiff und Flugzeug bzw. normierte Empfangsleistung

Betrachtet man die Wasseroberfläche als eine im VHF-Bereich elektrisch gut leitende

Oberfläche, so treten Reflexionen an der Wasseroberfläche auf. Wird die Wasseroberfläche als PEC und die Erdoberfläche als näherungsweise unendlich ausgedehnte Ebene angenommen, so kann die Image Theorie angewandt werden [7]. Gedanklich kann somit eine zweite Antenne gespiegelt an der Wasseroberfläche betrachtet werden. Je nach Polarisation muss diese jedoch inphase (bei vertikaler Polarisation) oder gegenphasig (bei horizontaler Polarisation) gespeist werden. Die so ermittelten elektromagnetischen Felder, oberhalb der Wasseroberfläche, bilden damit das Reflexionsverhalten ab.

Je nach Antennenhöhen (Schiff und Flugzeug) und Entfernung kommt es zu konstruktiven oder destruktiven Interferenzen, die auf die Laufzeitunterschiede zwischen Sendeantenne und gespiegelter Sendeantenne zurückzuführen sind. Mathematisch lässt sich so ein Zwei-Wege Funkkanal vereinfacht mit (2) beschreiben, wobei P_0 eine normierte Sendeleistung, d die Entfernung zwischen Sender und Empfänger, V_{pol} die Polarisation (1 für vertikal und -1 für horizontal) und k die Wellenzahl repräsentiert.

$$P_{Rx,rel} = P_0 \left| \frac{e^{-jk\sqrt{(h_{fa}-h_{sa})^2+d^2}}}{\sqrt{(h_{fa}-h_{sa})^2+d^2}} + V_{pol} \cdot \frac{e^{-jk\sqrt{(h_{fa}+h_{sa})^2+d^2}}}{\sqrt{(h_{fa}+h_{sa})^2+d^2}} \right|^2 \quad (2)$$

Für die modellhafte Annahme einer Schiffsantennenhöhe von $h_{sa} = 30$ m und einer Flugzeugantennenhöhe von $h_{fa} = 1500$ m ergibt sich nach (2) das in Bild 5b dargestellte Verhalten. Hierbei wurde P_0 so gewählt, dass sich bei einer Entfernung von 3 km eine normierte Empfangsfeldstärke von 0 dB einstellt. Aufgrund der Mehrwegeausbreitung kommt es zu konstruktiven Interferenzen, die bis zu 6 dB über dem Referenzwert, dem Pegel ohne Bodenreflexion, liegen. Es ist ferner erkennbar, dass an den Stellen, wo die eine Polarisation Auslöschung zeigt, die andere gerade maximal konstruktiv überlagert ist. Für den hier betrachteten vertikal polarisierten Fall ist ferner zu erkennen, dass bei knapp 100 km Entfernung eine sehr ausgeprägte vollständige Auslöschung auftritt.

Das in Bild 5b in blau dargestellte Interferenzverhalten für vertikale Polarisation ist in 5a nicht unmittelbar erkennbar, da sich die Sendeantennen der Schiffe auf verschiedenen Höhen befinden und somit das Interferenzverhalten jedes einzelnen Schiffes unterschiedlich ist. Geht man dennoch davon aus, dass sich die Sendeantennen der Schiffe typischerweise in einigen 10 m Höhe befinden, so ist ein ähnliches Interferenzverhalten für jedes einzelne Schiff erwartbar. Es kann somit vermutet werden, dass die breite Streuung in 5a auf solch einen Interferenzeffekt zurückzuführen ist. Was in 5a hingegen gut zu erkennen ist, dass praktisch keine Signale über den erwarteten zusätzlichen 6 dB liegen, die bei konstruktiver Interferenz auftreten. Letztlich ist in Bild 5a eine Häufung von Messwerten im Abstand von 80 km markant, die bis auf sehr niedrige Werte um knapp -100 dB reicht. Unter Berücksichtigung, dass der Messung zahlreiche Schiffe mit unterschiedlichen Antennenhöhen zugrunde liegen, kann dieses Verhalten mit dem tiefen Einbruch bei knapp 100 km in der analytischen Modellierung erklärt werden.

4 Zusammenfassung

In dieser Veröffentlichung wurden drei verschiedene Methodiken zu Ermittlung des Antennengewinns einer an einem Flugzeug montierten VHF-Antenne diskutiert. Eine Simulation kann ohne aufwändige Messungen (Messflüge) durchgeführt werden. Weiterhin ermöglicht sie die Angabe für beliebige Azimut- und Elevationswinkel. Es ist jedoch erkennbar, dass selbst bei bekannter Geometrie das genaue Abstrahlverhalten nur bedingt bestimmt werden kann, da die räumliche Verteilung der Materialien sowie deren elektromagnetische Eigenschaften (σ , μ_0 , ϵ_0) nicht exakt bekannt sind bzw. nur mit höchstem Aufwand zu ermitteln wären. Eine Kalibrierung mit einer Referenzstation kann so optimiert werden, dass ungewollte Reflexionen minimiert werden. Hierzu werden jedoch mitunter sehr aufwendige Sendeantennen benötigt. Zudem muss das Flugzeug in zahlreichen verschiedenen Flugbahnen zum Referenzsender vermessen werden, um wenigstens in einer Ebene eine möglichst vollständige Beschreibung der Richtcharakteristik zu erhalten. Die Kalibrierung an AIS-Signalen hat den Vorteil, dass sehr viele Pseudo-Referenzsender räumlich verteilt und quasi gleichzeitig verfügbar sind. Somit kann anhand statistischer Auswertungen das Antennendiagramm bestimmt werden. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass der so ermittelte Antennengewinn aufgrund von Mehrwegeausbreitung eine erhebliche Messunsicherheit aufweist. Dennoch ist eine derartige statistische Auswertung grundsätzlich möglich. In zukünftigen Messungen wird untersucht, inwieweit der Wechsel zwischen konstruktiver und destruktiver Interferenz zwischen vertikaler und horizontaler Polarisation genutzt werden kann, um den Mehrwegeausbreitungseffekt herauszurechnen. Ferner ist erkennbar, dass eine wesentlich größere Anzahl an gemessenen AIS-Signalen erforderlich ist um eine genauere statistische Auswertung durchführen zu können.

Literatur

- [1] SCHRADER, T.: WERAN - "Wechselwirkung Windenergieanlagen und Radar/Navigation". <http://dx.doi.org/10.2314/KXP:1677946466>. Braunschweig : Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), 12 2018.
- [2] SCHRADER, T. et. al.: High-resolution signal-in-space measurements of VHF omnidirectional ranges using UAS. In: *Advances in Radio Science* 17 (2019), September, 1–10. <http://dx.doi.org/10.5194/ars-17-1-2019>. – DOI 10.5194/ars-17-1-2019
- [3] *DATA ACQUISITION PLATFORM*. <https://www.redpitaya.com/>, 2020
- [4] *Simulation Software - Altair Feko*. <https://altairhyperworks.com/product/FEKO>,
- [5] M.1371-5, ITU-R: Technical characteristics for an automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile frequency band / International Telecommunication Union. 2014. – ITU Recommendation
- [6] FRIIS, H. T.: A Note on a Simple Transmission Formula. In: *Proceedings of the IRE* 34 (1946), May, Nr. 5, S. 254–256. <http://dx.doi.org/10.1109/jrproc.1946.234568>. – DOI 10.1109/jrproc.1946.234568. – ISSN 2162–6634
- [7] UNGER, Hans-Georg: *Elektromagnetische Theorie für die Hochfrequenztechnik*. Bd. VIII. 2. Aufl. Hüthig Verlag, 1989. – ISBN 3778515748

Diese Arbeit wurde gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (FKZ 0324252C).