



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

## Fundamentale Abschätzungen über mögliche Beeinträchtigungen von Link 16 Anlagen durch Windenergieanlagen

### Im Auftrag von:

WRD Wobben Research and Development GmbH,  
Borsigstraße 26,  
26607 Aurich

### Bearbeiter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Robert Geise

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

E-Mail: [r.geise@tu-braunschweig.de](mailto:r.geise@tu-braunschweig.de)

### Institutsleiter:

Prof. Dr. rer. nat. habil. Achim Enders

### Datum:

08.08.2019

### Document Number:

Revision 1.

### Related documents:

ICAO EUR DOC 15, "An Overview of Scattering Measurements of Scaled Dynamic Wind Turbines in the Context of Navigation Systems"

## **Inhalt**

<b>I. Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>II. Elementare Abschätzung zu Abschattungseffekten und Radarquerschnitt“</b>	<b>5</b>
<b>III. Beugungseffekte und Abschattungswahrscheinlichkeit</b>	<b>7</b>
<b>IV. Experimentelle Abschätzung mit skalierten Messungen</b>	<b>11</b>
<b>V. Beispielrechnung zur Abschattung</b>	<b>13</b>
<b>VI. Zusätzliche Effekte</b>	<b>15</b>
<b>VII. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen</b>	<b>16</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>17</b>

## I. Einleitung

Im Rahmen dieser kurzen fachlichen Erörterung wird dargelegt, welche Störmechanismen bei dem militärisch genutzten „Link 16“ Standard insbesondere durch Windenergieanlagen zu erwarten sind und ob das Risiko einer unzureichenden Kommunikationsfunktion besteht. Dieses Gutachten dient in erster Linie dazu, eine allgemeine und grundlegende Einschätzung sowie eine entsprechende Methodik zur Bewertung möglicher Störungen darzulegen.

Die Erkenntnisse können jedoch auch auf konkret geplante Bauvorhaben von Windenergieanlagen (WEA) angewendet werden. Dem Autor dieses Gutachtens lag Informationsmaterial zu einem geplanten Windpark in Hilchenbach Kirchhundem vor mit insgesamt 17 WEA mit Nabenhöhen von 131 und 111 Metern und einem Rotordurchmesser von 138 Metern.

Vorweg genommen sei hierbei, dass insbesondere Windenergieanlagen seit geraumer Zeit im Fokus stehen, wenn es um Störpotenzial von Navigationssystemen wie Radar, Drehfunkfeuer und wie in diesem Fall einer Kommunikationsanlage geht. Dies bzgl. muss erwähnt werden, dass ein fundamentaler Unterschied zwischen solchen Navigationssystemen und eben diesem Kommunikationssystem besteht, der für die Beurteilung einer Störfunktion ganz wesentlich ist. Während die Funktionsweise von Navigationssystemen fundamental darin besteht, in unterschiedliche Raumrichtungen unterschiedliche Signale abzustrahlen, um eine Orientierung im Raum zu ermöglichen, wird ein Kommunikationssignal, wie im Fall des Link16-Standards omni-direktional, also in alle Richtungen gleich, abgestrahlt.

D.h. bei Navigationssystemen stellen Reflexionen an Objekten zusätzlich zum gewollten Ausbreitungsweg immer eine zusätzliche ungewollte Navigationsinformation dar, welche mit der beabsichtigten überlagert zu Kursverfälschungen führen kann. Zunächst und ohne dabei die schwierige Fragestellung zu beantworten, wie sich Einflüsse mehrerer Störungen überlagern, könnte man prinzipiell konstatieren:

je mehr Reflexionsobjekte es gibt, desto potenziell größer kann eine Störung eines Navigationssystems sein. Aufgrund solcher Überlegungen werden z.B. größere Windparkprojekte, also Konstellationen, an denen eine Vielzahl von WEA beteiligt sind, grundsätzlich kritischer gesehen als solche, bei denen nur einzelne Reflexionsobjekte vorliegen.

Hingegen kann ein solches Argument bei der Analyse eines solchen Kommunikationssystems nicht angeführt werden, weil in sämtliche Richtungen das gleiche Nutzsignal abgestrahlt wird, d.h. Reflexionen aus anderen Richtungen stellen keine störende Information dar.

Störmechanismen für Kommunikationssysteme liegen viel mehr darin, dass das abgestrahlte Signal entweder erstens aufgrund von Reflexionen durch destruktive Interferenz oder zweitens durch Abschattungseffekte in seiner Signalstärke so stark abgeschwächt wird, dass das Nutzsignal nicht mehr hinreichend gut detektiert werden kann.

Beide Aspekte sollen hier fundamental zusammengefasst werden gemäß derzeitig geltendem und anerkanntem Stand der Technik. Grundsätzlich kann man bei diesen Fragestellungen der Beeinträchtigungen immer numerische Simulationen durchführen, wie es heutzutage auch kommerziell angeboten wird. Die Absicht

dieses Gutachtens ist es allerdings, eine erste Einschätzung für das Störpotenzial zu geben, welche ausschließlich auf unmittelbar einsehbaren, unzweifelhaft richtigen mathematischen Zusammenhängen basiert, wie sie in entsprechender Fachliteratur [z.B. Knott] zu finden ist. Dieser Ansatz wird deshalb gewählt, um entsprechenden Institutionen, die in Genehmigungsverfahren involviert sind, eine vollständig transparente Abschätzung zu liefern, die man numerischen Lösungen nicht unmittelbar ansehen kann. Solche numerische Berechnungsverfahren sind gut etabliert und gelten als Stand der Technik und können und sollen auch auf solche Fragen angewendet werden. Der Autor dieses Gutachtens will hier keineswegs den Eindruck erwecken, dass solche Verfahren nicht transparent sind. Ziel einer guten und wissenschaftlichen Beurteilung sollte insbesondere bei Vorhandensein verschiedener Meinungen immer auch eine Sammlung verschiedener Beurteilungsmethodiken sein.

Ein weiteres Ziel dieses Gutachtens ist es, dafür zu sensibilisieren, dass pauschale Schutzbereiche um Kommunikations- oder Navigationssysteme– auch wenn sie in Genehmigungsverfahren praktisch gut anwendbar sind, einem individuellen Bewertungsprozess unterzogen werden sollten, insbesondere weil sehr häufig auch damit wirtschaftliche- und volkswirtschaftliche Interessen verbunden sind. Dem Autor dieses Gutachtens ist selbstverständlich bewusst, dass eine Vielzahl von geplanten Baumaßnahmen aus Kapazitätsgründen nicht einer vollständigen wissenschaftlichen Analyse unterzogen werden kann, und deshalb eine pragmatische Vorgehensweise wünschenswert ist. Dieses Gutachten soll daher auch Anleitungsmaterial für eine solche einfache Verfahrensweise geben.

## II. Elementare Abschätzung zu Abschattungseffekten und Radarquerschnitt

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Zusammenhänge für Wellenausbreitung und Abschattungseffekte dargelegt, wie sie in einschlägiger Literatur [Knott] zu finden ist. Grundsätzlich gibt es bei der Mehrwegeausbreitung immer den direkten Ausbreitungspfad und den reflektierten Ausbreitungsweg, für den der Begriff des Radarquerschnitts Anwendung findet.

Folgende Abbildung stellt Größen eines solchen Mehrwegeausbreitungsszenarios dar.

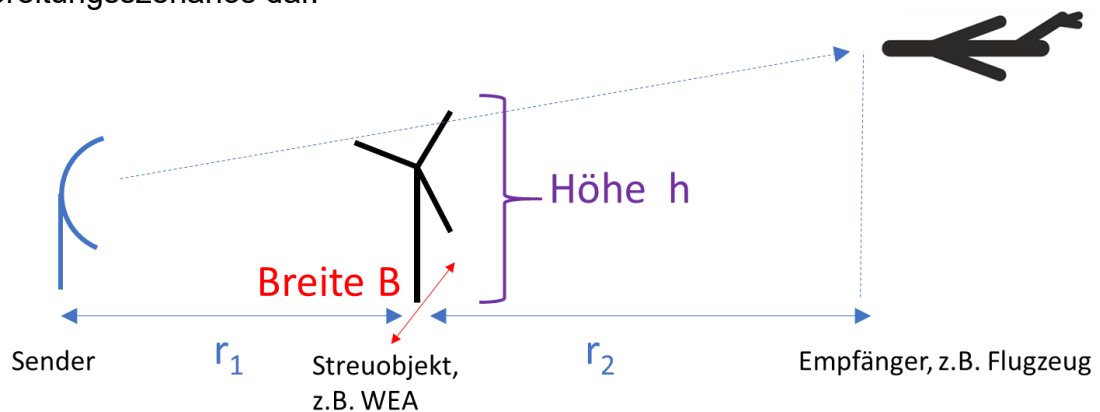


Bild 1. Geometrie eines Mehrwegeausbreitungs- / Abschattungsszenarios.

Für einen hindernisfreien Ausbreitungsweg zwischen Sender und Empfänger gilt die allgemein bekannte Ausbreitungsgleichung von Friis gemäß:

$$P_{e,direkt} = \frac{P_S \cdot G_S}{4\pi \cdot (r_1 + r_2)^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_e = \frac{E_{direkt}^2}{377\Omega} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_e, \quad (1)$$

wobei  $G_S$  und  $G_e$  die Antennengewinne der Sende- bzw. Empfangsantenne sind, und  $P_S$  und  $P_{e,direkt}$  die Sende-, bzw. Empfangsleistung und  $E_{direkt}$  die Feldstärke, wie sie am Empfänger messbar wäre. In nahezu äquivalenter Weise formuliert man für die über ein Objekt gestreute Leistung  $P_{e,indirekt}$  bzw. gestreute Feldstärke  $E_{indirekt}$  unter Verwendung des Radarquerschnitts RCS:

$$P_{e,indirekt} = \frac{P_S \cdot G_S}{4\pi \cdot (r_1)^2} \cdot \frac{RCS}{4\pi \cdot (r_2)^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_e = \frac{E_{indirekt}^2}{377\Omega} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_e. \quad (2)$$

Der Begriff des Radarquerschnitts, so wie er auch in allen numerischen Programmen berechnet wird, unterliegt der folgenden Definition:

$$RCS = \lim_{r_2 \rightarrow \infty} 4\pi \cdot r_2^2 \cdot \frac{E_{indirekt}^2}{E_{am\ Objekt}^2}, \quad (3)$$

wobei  $E_{am\ Objekt}$  die einfallende elektrische Feldstärke am Reflexionsobjekt selbst kennzeichnet, welche analog zu Gleichung (1) angegeben werden kann zu:

$$\frac{E_{am\ Objekt}^2}{377\Omega} = \frac{P_S \cdot G_S}{4\pi \cdot (r_1)^2} \cdot \quad (4)$$

Selbstverständlich handelt es sich hier um idealisierte Gleichungen mit einigen Voraussetzungen. Z.B. sind hier das Einhalten von Fernfeldbedingungen zu nennen sowie die Tatsache, dass z.B. in Gleichung (3) der Abstand zwischen Objekt und Empfänger  $r_2$  nicht gegen unendlich geht, sondern lediglich groß genug ist. Dies bzgl. gibt es allerdings viel Erfahrungswissen und schließlich ist die klassische Fernfeldbedingung, also die Frage, wie groß  $r_2$  für die Anwendbarkeit der Gleichung sein muss, ein empirischer Wert, der in der wissenschaftlichen Community durchgehend anerkannt ist.

Schließlich sei noch erwähnt, dass Bodenreflexionen in der mathematischen Betrachtung zunächst unberücksichtigt bleiben. Solche kann man natürlich in heutiger Simulationssoftware wie auch mit analytischen Methoden wie z.B. der Image Theory mitberücksichtigen, sofern die Permittivität des Bodens bekannt ist.

Allerdings stellt sich im Rahmen dieses Gutachtens nicht die Frage nach einer vollständigen und möglichst genauen Methode, vielmehr geht es darum, bisherige Empfehlungen, wie z.B. formuliert im Dokument „Euro Doc 15“ der internationalen zivilen Luftfahrtorganisation ICAO [ICAO EURODOC 15], substanziell, aber auch einfach zu erweitern. Solchen Empfehlungen liegt lediglich ein pauschales Schutzzonenkonzept zu Grunde, welches die eigentlichen Reflexionseigenschaften von Objekten, die hier mit dem RCS beschrieben werden sollen, überhaupt nicht berücksichtigt. Vielmehr wird bei solchen Betrachtungen immer ein optischer Ausbreitungsstrahl implizit angenommen, der eigentlich sogar im Widerspruch zur Streutheorie steht, welche Beugungseffekte explizit mitberücksichtigt, wie später noch beschrieben.

Mit den Gleichungen (1)-(4) lässt sich nun relativ einfach eine mathematische Beziehung für ein Dämpfungsmaß  $\alpha$  unter Verwendung des RCS aufstellen.

Im grundsätzlichen Verständnis der Streutheorie gilt – häufig gegen die Intuition des Nichtfachmanns -, dass die Gesamtfeldstärke, also die, die man tatsächlich am Empfänger messen würde, die Überlagerung der Feldstärken  $E_{direkt}$  und  $E_{indirekt}$ , (mit negativem Vorzeichen) ist. Für die Feldstärke durch Abschattungseffekte  $E_{shadow}$  kann man also schreiben:

$$E_{shadow} = E_{direkt} - E_{indirekt} \cdot \quad (5)$$

bzw. mit den Gleichungen (1) und (2) für die direkten und indirekten Feldstärken:

$$E_{shadow} = \sqrt{\frac{P_S \cdot G_S \cdot 377\Omega}{4\pi \cdot (r_1 + r_2)^2}} - \sqrt{\frac{RCS \cdot E_{am\ Objekt}^2}{4\pi \cdot (r_2)^2}} \cdot \quad (6)$$

Mit Hilfe dieser Gleichung, in welche man noch Gleichung (4) für die Feldstärke am Streuobjekt einsetzt, kann man nun für das Dämpfungsmaß  $\alpha$  formulieren:

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{RCS}{4\pi}} \cdot \frac{(r_1+r_2)}{r_1 \cdot r_2}. \quad (7)$$

Bevor im Folgenden einige Größenordnungen und Rechenbeispiele für den RCS generischer Objekte angegeben werden, folgt noch eine kurze Diskussion dieser Gleichung. Für den Fall  $r_2 \gg r_1$ , z. B. ein Flugzeug in sehr großem Abstand, würde für eine vollständige Dämpfung  $\alpha = 0$  bedeuten, dass  $RCS = 4\pi \cdot r_1^2$  sein müsste. Dabei wäre der RCS die Kugeloberfläche mit dem Abstand zwischen Sender und Objekt als Radius. Hier ist intuitiv ersichtlich, dass ein solches Objekt mit seiner Oberfläche den Sender vollständig einschließen müsste. Das steht natürlich im Widerspruch zu einem Abschattungsprozess, bei dem strahlenartige Ausbreitung bzw. Abschattung angenommen wird, wie z.B. bei einem Laserpointer, der durch jedes Objekt abgeschirmt wird. Letztere optische Betrachtungsweise stellt tatsächlich auch den sogenannten asymptotischen Grenzfall eines solchen Abschattungsszenarios dar, für den das Verhältnis zwischen Wellenlänge und Objektgröße wesentlich ist. Hierauf wird im Folgenden weiter eingegangen.

Der Fall  $r_2 \gg r_1$  könnte zum Beispiel ein Kommunikationslink vom Boden zu einem Flugzeug sein, welches sich in deutlich größerer Entfernung befindet als eine WEA zum Sendesystem. Für eine Kommunikation auf dem Land, könnte man durchaus auch betrachten:  $r_2 = r_1 = r$ . Mit dieser pragmatischen Reduktion der Variablen kann nun ein Zusammenhang zwischen dem Radarquerschnitt RCS, dem Abstand zum Sender, d.h. einem anzuwendenden Schutzbereich, und einer gegebenen Toleranz für ein erlaubtes Dämpfungsmaß aufgestellt werden. Werte für den Radarquerschnitt eines Objektes können heutzutage sehr gut mit numerischen Softwarelösungen ermittelt werden. Es gibt allerdings auch sehr gute analytische Lösung für bestimmte Szenarien bzw. Objekte, die im Sinne einer transparenten Abschätzung im Folgenden angeführt werden.

### III. Beugungseffekte und Abschattungswahrscheinlichkeit

In der bisherigen Bewertungspraxis, etwa wie in dem ICAO Euro Doc 15 empfohlenen, spielt prinzipiell nur die Höhe eines Reflexions- bzw. Abschattungsobjektes eine Rolle. Im Sinne einer pragmatischen Vorgehensweise mag dies zunächst plausibel erscheinen, wenn man die Intuition zugrunde läge, ein Lichtstrahl würde, sobald er auf ein zu hohes Objekt trifft, abgeschattet werden und für Empfänger hinter dem Objekt nicht mehr sichtbar sein. Jedoch muss dieser Betrachtungsweise der Effekt der Beugung entgegengehalten werden. Auch einem Nichtfachmann würde es plausibel erscheinen, dass ein nur wenige Millimeter dicker Draht mit einer Höhe von 200m nicht den gleichen abschattenden Einfluss haben kann wie eine WEA mit einem Turmdurchmesser von mehreren Metern. Die erste Konstellation würde man intuitiv und richtigerweise als vernachlässigbar einstufen. Um dies zu verdeutlichen, sei folgende Konstellation für das Reflexionsverhalten einer metallischen Platte wie in Abbildung 2 dargestellt untersucht. Für einen gegebenen Einfallswinkel  $\varphi_{ein}$  wird der Radarquerschnitt einer Platte der Breite B und Höhe H, also

die Größe, welche das Reflexionsverhalten beschreibt, in Abhängigkeit eines variierenden Betrachtungswinkels  $\varphi_{aus}$  aufgetragen.

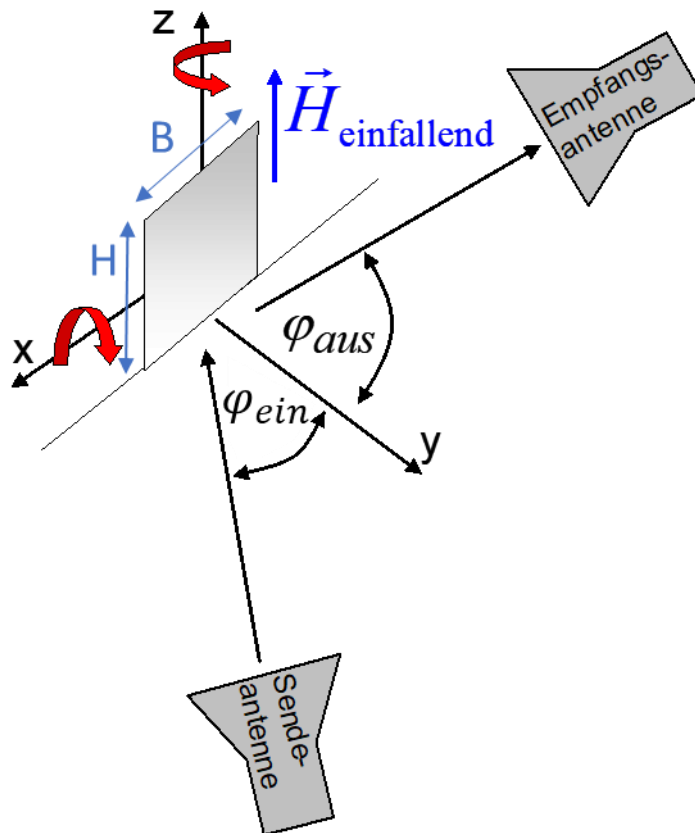


Bild 2. Beispielkonstellation zur Betrachtung des Reflexionsverhaltens einer Metallplatte.

Folgende Abbildung zeigt den Radarquerschnitt, wie er für diese Konstellation mit Hilfe des Verfahrens „physikalischer Optik“ berechnet werden kann. Bei der physikalischen Optik handelt es sich um ein in der Community anerkanntes Berechnungsverfahren, welches gängiger Literatur wie z.B. [Knott] entnommen werden kann. Die Physikalische Optik ist ein Näherungsverfahren, für das entsprechende Einschränkungen gelten, als da wären zu nennen, dass es sich um elektrisch große Objekte handeln muss, deren Abmessungen im Vergleich zur Wellenlänge deutlich größer sein müssen. Zudem wird dieses Verfahren ungenau, wenn der Einfallswinkel zu groß ist. Für die Ergebnisse des simulierten Radarquerschnitts, welche im Folgenden gezeigt werden, sind diese Voraussetzungen erfüllt. Folgende Abbildung 3 zeigt simulierte Radarquerschnittsverläufe für zwei Metallplatten unterschiedlicher Größe (Breite  $B \cdot$  Höhe  $H$ ) bei einer für das Link16-System repräsentativen Frequenz von 1 GHz, also einer Wellenlänge von 0,3 Metern.

Für dieses Szenario wurde ein Einfallswinkel von  $20^\circ$  gewählt.

Abbildung 4 zeigt zur Erläuterung der Simulationsergebnisse die Konfiguration und stellt dar, in welchen Richtungen Abschattung und in welche Richtung Reflexionen stattfinden.



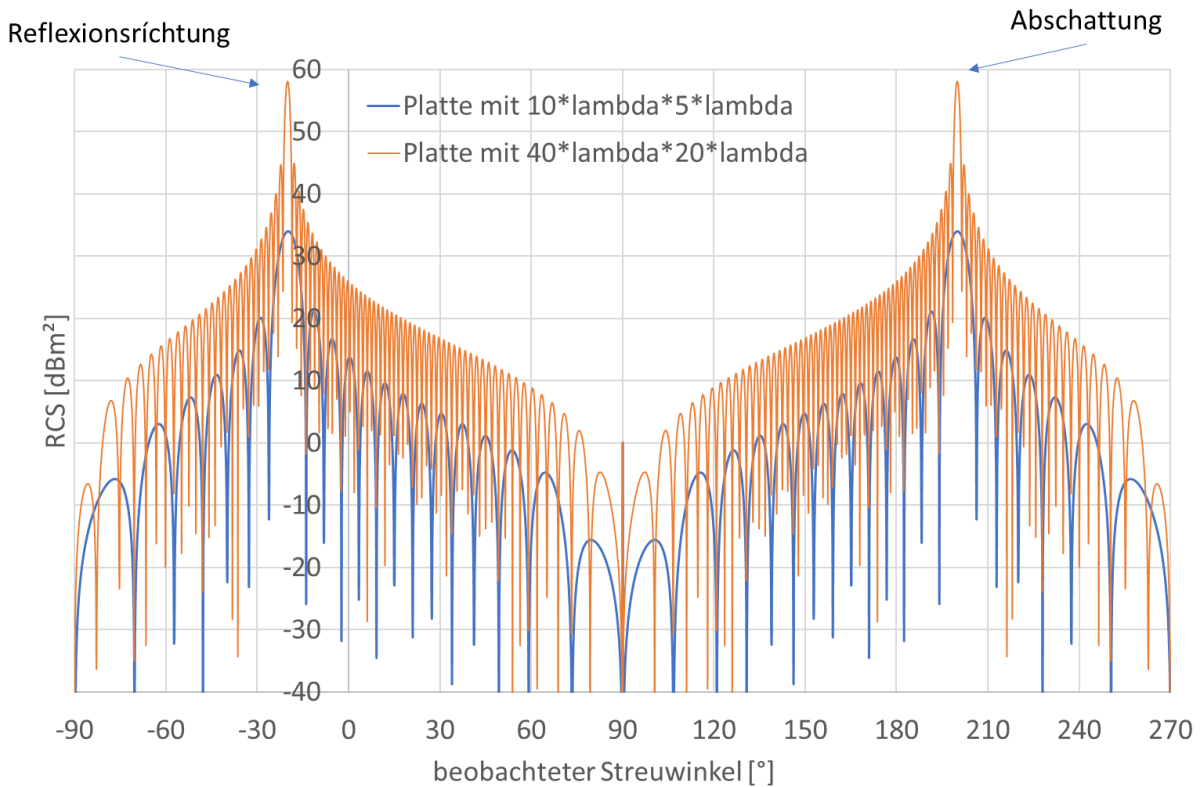


Bild 3. RCS-Simulationsergebnisse für generische Metallplatten mit dem Verfahren Physikalische Optik.

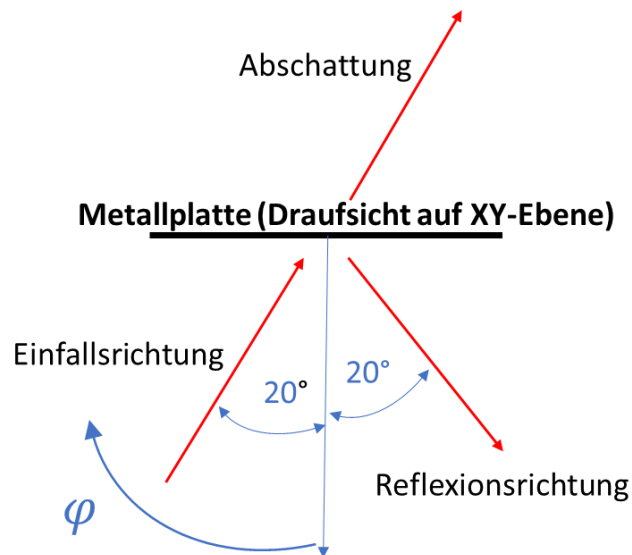


Bild 4. Darstellung der Einfallsrichtung, Reflexionsrichtung und Richtung, in welche abgeschattet wird.

An diesem Simulationsbeispiel seien folgende Dinge, im Wesentlichen auch der Effekt der Beugung, erklärt. Beide Kurven zeigen, dass es eine Reflexion in die Richtung von  $\varphi = -20^\circ$  gibt. Diese Richtung ist jedem Nichtfachmann bekannt nach dem Prinzip „Einfallswinkel=Ausfallswinkel“. Deutlich zu sehen ist hierbei, dass aufgrund der begrenzten Größe des Objektes, diese Vorzugsrichtung der Reflexion zwar zu erkennen ist, in andere Richtungen allerdings auch Reflexionen messbar

wären. Für den Betrachtungswinkel  $\varphi = 200^\circ$  ergibt sich der Bereich der Abschattung. Dieser Bereich liegt also hinter dem eigentlichen Reflexionsobjekt.

Einen zweiten fundamentalen Zusammenhang kann man beim Unterschied der beiden Kurven für unterschiedlich große Objekte beobachten. Zwar ist der Radarquerschnitt für das größere Objekt auch größer, d.h. in die Richtung findet eine größere Abschattung statt. Allerdings ist auch deutlich zu erkennen, dass der Winkelbereich der Verschattung viel kleiner wird. Diesem Effekt liegt das mathematische Grundprinzip der räumlichen Fouriertransformation zu Grunde und ist jedem Fachbuch, einer Simulation oder Messung zu entnehmen und in der wissenschaftlichen Community unstrittig. Der Grad der Abschattung hängt also immer mit auch mit dem verschatteten Winkelbereich zusammen. Ein großes Objekt verschattet also einen kleineren Winkelbereich stärker.

Der maximale Radarquerschnitt einer rechteckigen Struktur kann für den anwendbaren Fall der physikalischen Optik sehr gut mit der Gleichung:

$$RCS = 4\pi \frac{(Länge \cdot Breite)^2}{\lambda^2} \quad (8)$$

angegeben werden.

Folgende Tabelle fasst die Maximalwerte des RCS und den Winkelbereich der Abschattung, bei dem der Abschattungseffekt bereits nur noch 1/10-mal so groß ist (bezogen auf die Leistung) für beide Metallplatten zusammen. Ergänzend dazu sei das Transfermaß  $\alpha$  gemäß Gleichung (7) angegeben für den Fall, dass  $r_2 = r_1 = r = 4km$ .

Struktur	Max RCS in Abschattung logarithmisch	Max RCS in Abschattung linear	Verschatteter Winkelbereich	Transfermaß $\alpha$ für $r_2 = r_1 = r = 4km$
<b>Metallplatte (40 lambda * 20 lambda)</b>	58 dBm <sup>2</sup>	6.3e5 m <sup>2</sup>	3,4°	0.88
<b>Metallplatte (10 lambda * 5 lambda)</b>	34 dBm <sup>2</sup>	2500 m <sup>2</sup>	9°	0.99

Tabelle 1. Zusammenfassende Beispiele für Abschattungseffekte

Die kleinere Metallplatte hätte demnach die Reduktion des Transfermaßes um 1% zur Folge, allerdings nur in der direkten Sichtlinie zwischen Sender, Objekt und Empfänger. In wenigen Grad Versatz hierzu wäre ein Verschattungseffekt nicht mehr messbar. Die in der Fläche 16fach so große Metallplatte verschlechtert das Übertragungsmaß lediglich um 10%.

Ein Laserstrahl hingegen würde durch beide Platten vollständig verdeckt, weil seine Wellenlänge von einigen hundert Nanometern um Größenordnungen kleiner als die Abmessungen der Platte ist. Für einen solchen könnte man sich eine Strahlunterbrechung zwar vorstellen – sofern man das Streuobjekt tatsächlich genau

trifft, allerdings ist das bei Frequenz des Link16 Systems und bei fast allen anderen Kommunikations- oder Navigationssystemen so nicht anwendbar. Natürlich sind sowohl ein Laserstrahl als auch das Link16-Signal elektromagnetische Wellen, und die Streutheorie überführt diese beiden auch asymptotisch zu sehr hohen Frequenzen. Der Anschauung halber sei deshalb erwähnt, dass man das Streuobjekt in 4 km Entfernung für einen messbaren Abschattungseffekt sehr genau mit dem Laser anpeilen müsste. Für die große Metallplatte mit einer Breite von 12 m wäre hierzu eine Winkelgenauigkeit von  $0.09^\circ$  erforderlich, ein Winkelwert, der in der betrieblichen Praxis sicherlich vernachlässigbar wäre und dessen Auftretungswahrscheinlichkeit in einem Kommunikationsszenario kleiner wäre als die Ausfallwahrscheinlichkeit des ganzen Systems. Zudem müsste eine entsprechende Winkelgenauigkeit in dem ungünstigsten Abschattungsszenario auch für den Empfänger relativ zum Streuobjekt gelten.

#### IV. Experimentelle Abschätzung mit skalierten Messungen

Der Autor dieses Gutachtens hat in Zusammenarbeit mit dem japanischen Institut für elektronische Navigation (Electronic Navigation Research Institute, ENRI) im Jahr 2017 eine Messkampagne zur initialen Bewertung des Reflexions- und Abschattungsverhaltens von Windrädern in skaliertem Maßstab durchgeführt und auf der internationalen Konferenz für „Antennas and Measurement Application“ veröffentlicht [CAMA2017]. Der Messaufbau wird detailliert in der genannten Veröffentlichung beschrieben, so dass an dieser Stelle lediglich die Ergebnisse und eine Skizze des Aufbaus, wie in Abbildung 5 gezeigt, präsentiert werden.

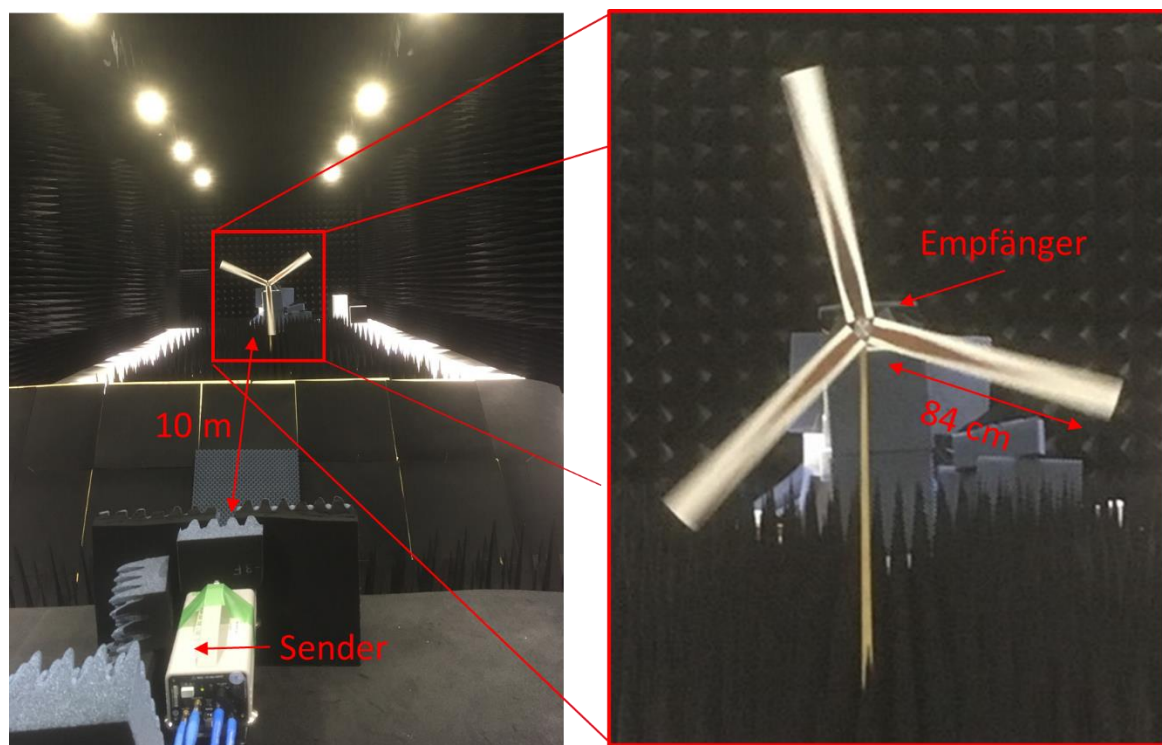


Bild 5. Messaufbau zur Untersuchung von Abschattungseffekten in der Absorberkammer des Electronic Navigation Research Institute (ENRI), Japan.

Die Skalierung solcher Abschattungs- und Reflexionsprobleme ist eine validierte Bewertungsmethode. Der Ansatz besteht darin, die Reflexionsobjekte zu verkleinern und im selben Maßstab die Messfrequenzen zu erhöhen. Bzgl. der Validierung und der Funktionsweise sei auf diverse recherchierbare Veröffentlichungen des Autors verwiesen. Legt man für das Link16 System eine Betriebsfrequenz von 1 GHz zu Grunde, führt man skalierte Messungen im Maßstab 1:100 bei 100 GHz durch. Die Flügellänge der benutzten Windenergieanlage hätte dann im Original eine Flügellänge von 84 m. Bzgl. des Modells sei erwähnt, dass die Flügel hierbei nur 2D-Strukturen sind. Der Mast der WEA hingegen ist 3-dimensional gefertigt. Die WEA dreht sich mit einer Rotationsfrequenz von 20 Umdrehungen pro Minute. Sämtliche reflektierende Strukturen der skalierten WEA sind aus Metall und stellen deshalb schon eine obere Abschätzung für das Abschattungsverhalten einer originären WEA dar, die aus Komposit-Materialien zusammengesetzt ist. Bzgl. des Messaufbaus sei betont, dass der Abstand zwischen Sender und WEA sowie WEA und Empfänger jeweils nur 10 m beträgt, in der Originalumgebung wären dies Abstände von nur einem 1 km!.

Zunächst wird in Abbildung 6 das frequenzabhängige Übertragungsmaß ohne die WEA in der Mitte zwischen Sender und Empfänger dargestellt.

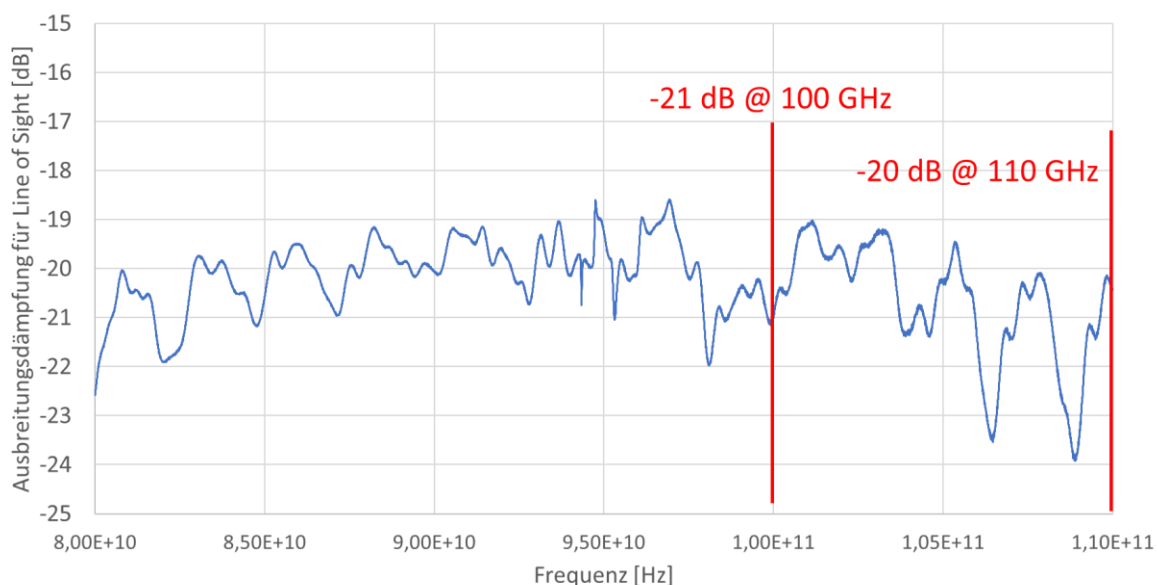


Bild 6. Übertragungsmaß zwischen Sender und Empfänger in Sichtlinienverbindung ohne abschattende WEA.

Abbildung 7 zeigt das Übertragungsmaß, wenn die WEA genau in die Mitte der Sichtlinie zwischen Sender und Empfänger platziert wird. Dies ist selbstverständlich der ungünstigste Fall, weil der Empfänger so ausgerichtet ist, dass er genau in der abgeschatteten Region der WEA liegt (vgl. Abb. 3 und 4). Diese ist allerdings auch nur wie im vorherigen Abschnitt erläutert in einem sehr schmalen Winkelbereich zu finden.

In Abbildung 7 ist zudem eine periodische Änderung des Übertragungsmaßes zu erkennen aufgrund der sich drehenden WEA.

In diesem Fall wäre eine mittlere Abschattungswirkung von etwa 10 dB gegeben, allerdings für den worst case Fall einer WEA aus Vollmetall und für den Fall sehr kleiner Abstände zwischen Sender, Objekt und Empfänger. Aus nachrichtentechnischer Sicht können diese 10 dB Abschattungsdämpfung für einen funktionsfähigen

Kommunikationskanal allerdings nicht ausschlaggebend sein, wenn man z.B. eine Mindestreichweite von 100 km annehmen würde. Dies lässt sich mit der Formel (1) sehr leicht zeigen. Wenn man von einer funktionsfähigen Anlage ausgeht, die in 100 km noch ausreichend Signalpegel zur Kommunikation aufweist, können zusätzliche 10 dB mittlere Abschattungswirkung durch eine WEA in einem Abstand von wenigen Kilometern keine Rolle spielen. Des Weiteren stellt die Umgebung der Absorberkammer, in der gemessen wurde, einen weiteren worst case dar, weil zusätzliche Reflexionen, z.B. in der Originalumgebung an Geländetopologien unterdrückt werden.

Der klassische Mobilfunkkanal z.B. nutzt insbesondere diese Mehrfachreflexionen an Gebäuden aus, um einen stabilen Übertragungskanal mit ausreichend Signalstärke zu erhalten. In den seltensten Fällen liegt aber tatsächlich eine Sichtverbindung vor.

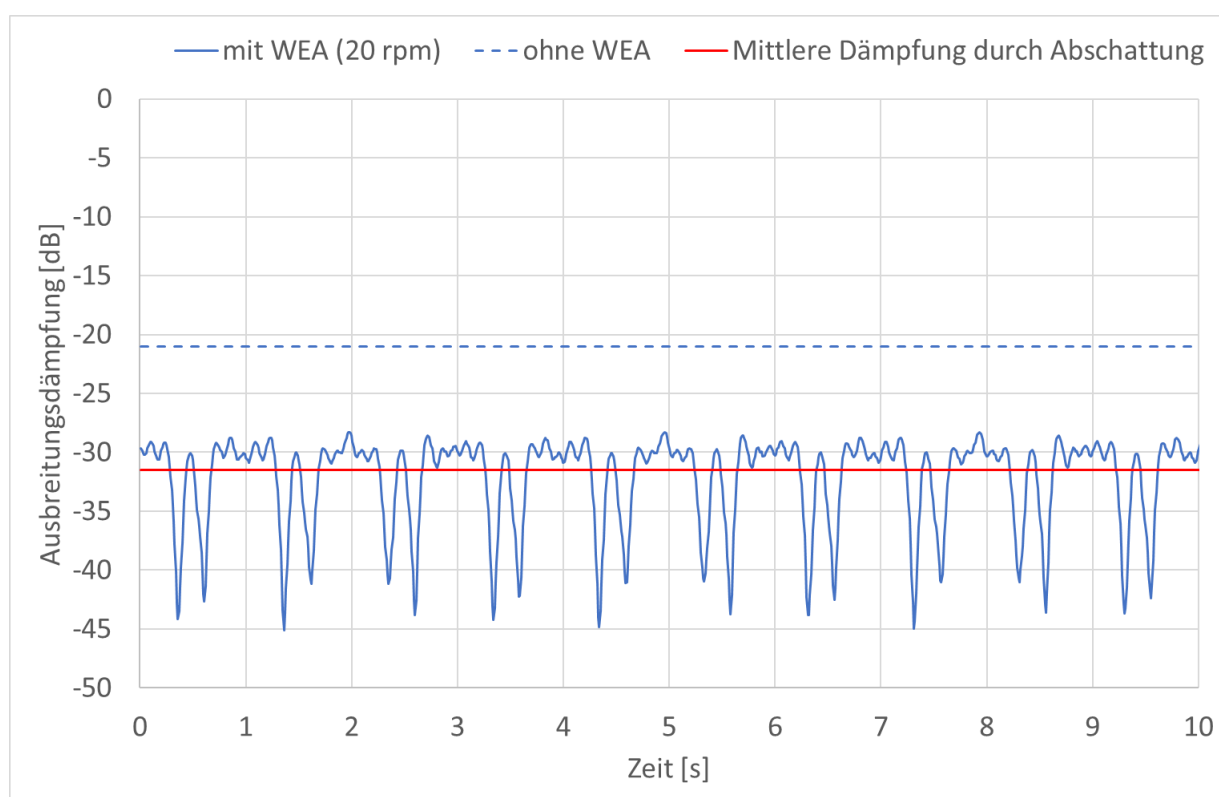


Bild 7. Änderung der Ausbreitungsdämpfung durch Abschattung mit einer WEA.

In jedem Fall zeigen die Messergebnisse, dass durch die zuvor genannten Beugungseffekte, die pragmatische Betrachtung mit Strahlenoptik nicht gerechtfertigt ist. Es kommt zwar zu messbaren Abschattungseffekten, allerdings unterbrechen diese den Kommunikationskanal nicht vollständig.

## V. Beispielrechnung zur Abschattung

Zur Veranschaulichung und zur Zusammenfassung der Ergebnisse sei folgendes Abschattungsszenario mit dem vereinfachten Dämpfungsmaß gemäß Gleichung (7) gerechnet für eine vollmetallische Platte der Breite von 4 Metern bei variabler Höhe für eine Link16-Frequenz von 1 GHz.

Folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang aufgetragen über die Höhe der Platte.

Der Abstand zwischen Sender und Objekt  $r_1$  betrage 5 km und der Abstand zwischen Objekt und Empfänger, z.B. ein Flugzeug, betrage  $r_2=20$  km. Es handelt sich bei der Berechnung um den worst-case Fall, dass der Empfänger sich tatsächlich in dem sehr schmalen Winkelbereich hinter dem Objekt aufhält.

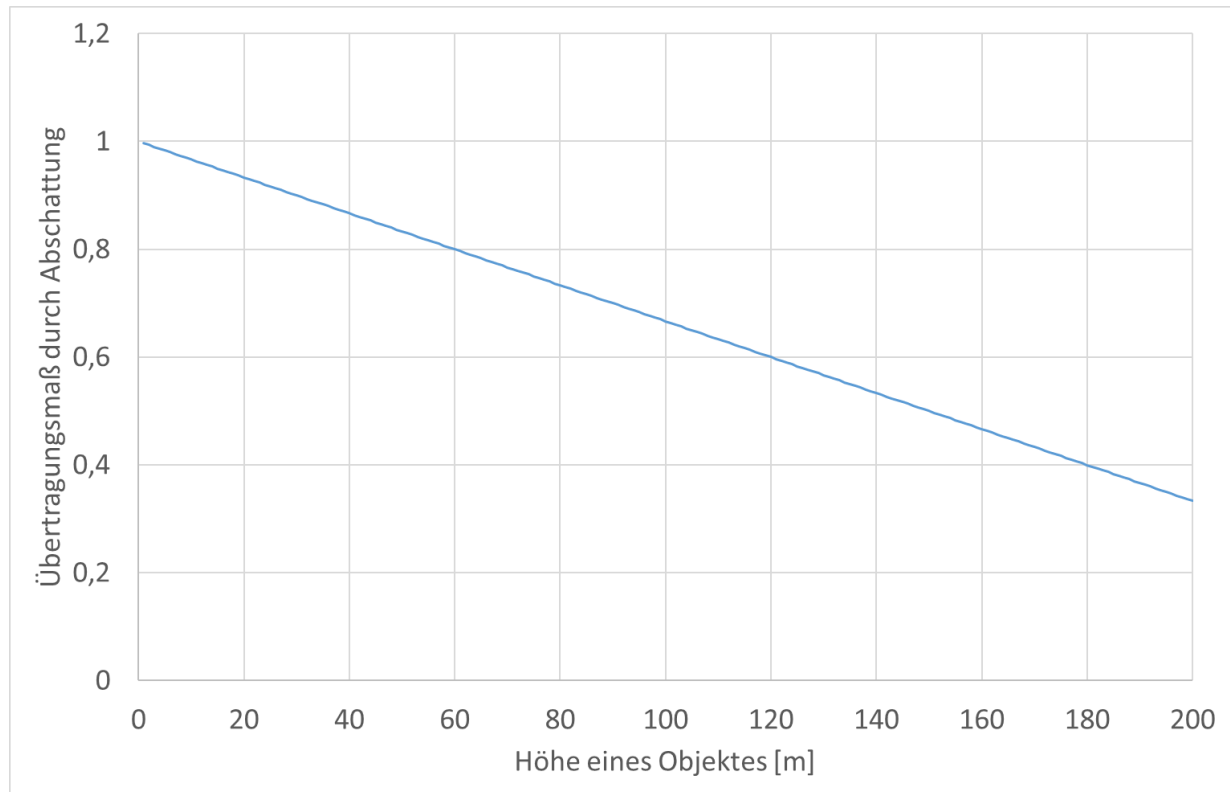


Bild 8. Beispielrechnung für reduziertes Übertragungsmaß aufgrund von Abschattung durch ein rechteckiges, metallförmiges Hindernis.

Anhand dieses Beispiels seien zwei Dinge veranschaulicht. Zunächst sei das Zahlenbeispiel gegeben für den Abschattungseffekt einer fiktiven 200 m hohen Platte mit einer Breite von 4 Metern. Eine solche hätte eine Reduzierung des Signalpegels um 10 dB zu Folge. Sicherlich eine Größenordnung, die bei einem gut dimensionierten nachrichtentechnischen System keine Rolle bzgl. der Übertragungsqualität spielen dürfte und die ohnehin im Schwankungsbereich eines Übertragungskanal mit Mehrwegeausbreitung liegen dürfte. Hierbei handelt es sich ohnehin um eine obere Abschätzung des Abschattungsverhaltens. Des Weiteren soll mit dieser Kurve, die lediglich aus international anerkannten Fakten in der Streutheorie hergeleitet wurde, gezeigt werden, dass die Anwendung eines pauschalen Schutzzonenkonzepts nicht mit den physikalischen Fakten der der Streutheorie vereinbar ist. Diese obere Abschätzung für ein Objekt mit 200 m Höhe gilt aus Sicht des Autors durchaus als repräsentativ für moderne Windräder mit Nabenhöhen von 130 Metern und Rotordurchmessern von 140 Metern.

Interessant ist an dieser Stelle noch die Betrachtung: Wie ändert sich der Abschattungseffekt, wenn das Streuobjekt etwas höher gebaut ist, im Prinzip also die praktische Frage des Repowerings von WEA. Diese Größe entspricht der Ableitung der

dargestellten Kurve und ist zahlenmäßig  $-0,0033 / \text{m}$ . D.h. wenn die Höhe des Streuobjektes um 1 m vergrößert wird, sinkt das Übertragungsmaß um 0,3 Prozent. Das Ziehen einer festen Elevationswinkelgrenze, also Zahlenpaare von Abstand zur Sendeanlage und Höhe des Streuobjektes würde diesem Zusammenhang widersprechen.

## VI. Zusätzliche Effekte

Bei dieser Untersuchung handelt es sich nur um eine grobe Abschätzung und um eine initiale Bewertung eines pauschalen Schutzzonenkonzeptes, wie es häufig in der Luftfahrt angewendet wird. Es ist daher nicht als eine vollständige Methode anzusehen, wie es z.B. heute mit Simulationssoftware oder Messtechnik möglich wäre. Auf einige Aspekte sei der Vollständigkeit halber dennoch hingewiesen.

- **Dopplereffekte:** Bei Abschattungsszenarien, also solchen, bei denen das Objekt zwischen Sender und Empfänger steht, sind Dopplereffekte immer gleich null. Die Relativgeschwindigkeiten des Rotorblattes sind z.B. positiv bzgl. des Senders und negativ bzgl. des Empfängers. Hier bedarf es keiner zusätzlichen Betrachtung.
- **Geländetopologie und Bodeneffekte:** Objekte, die nahe auf dem Boden stehen, reflektieren immer schlechter als dieselbe Konfiguration im Freiraum, für die hier Rechnungen und Messungen angestellt wurden. Bei Abschattungseffekten stellt der Boden also immer bzgl. der Signalstärke eine günstige Randbedingung dar. Das ist insbesondere von Bedeutung für Kommunikationsverbindungen vom Boden in die Luft. Prinzipiell könnte man eine solche Geländetopologie auch näherungsweise mitberücksichtigen, allerdings müsste hierzu die Permittivität des Bodens bekannt sein, was nicht nur in den seltensten Fällen der Fall ist, sondern auch ohnehin witterungsbedingt ist und daher Schwankungen unterliegt.
- **Modulationsaspekte:** In diesem Gutachten wurde lediglich auf die Signalstärke des Systems eingegangen, welche durch Abschattungseffekte gemindert werden könnte. Dieser wird vom Autor als der Wesentlichste erachtet. Eine zusätzliche Untersuchung könnte noch darin bestehen, zu prüfen, ob die Drehbewegung der WEA selbst Modulationscharakteristika aufweist, welche in besonderer, resonanter Weise nicht die Signalstärke, sondern den Modulationsgehalt verändern könnten. Eine ähnliche Fragestellung ergab sich z. B. auch bei Verträglichkeitsanalysen von WEA und dem Drehfunkfeuer, wobei es zu prüfen galt, ob die Drehbewegung einer WEA 30 Hz modulierte Komponenten aufweist. Dies bzgl. sei auf das Projekt „min-VOR-Win“ [Geise2018] verwiesen.



## VII. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Ziel dieses Gutachtens ist und war es, mit aus einschlägiger Literatur anerkanntem Formelwerk eine fundierte wissenschaftliche Abschätzung über das Störpotenzial von WEA bzgl. des Kommunikationssystems „Link 16“ zu geben und diese mit einer repräsentativen Messung zu bestätigen. Eine solche Abschätzung ist selbstverständlich nur als eine Näherung zu betrachten ohne den Detailgrad einer vollständigen numerischen signaturtechnischen Analyse. Gleichwohl sei erwähnt, dass die hier angestellten Abschätzungen eine detailliertere Analyse darstellen, als es bisher z.B. wie im ICAO Euro Doc 15 Dokument mit Hilfe von Strahlenoptik geschieht, mit der Konsequenz eines pauschalen Schutzzonenlayouts, in welches individuelle Reflexionseigenschaften von WEA in keinster Weise berücksichtigt werden.

Mit den angestellten mathematischen Betrachtungen und Messergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Ein pauschales Schutzzonenlayout wie etwa ein Kreis mit definiertem Radius stellt keine sinnvolle Maßnahme gemäß aktuellem Stand der Technik dar.
- Abschattungseffekte werden, wenn lediglich mit Strahlenoptischen Überlegungen analysiert, grundsätzlich signifikant überbewertet. Den Effekt einer totalen Signalabschattung bei Erreichen einer Mindesthöhe gibt es nicht.
- Der Grad der Störung für eine Kommunikationsverbindung hängt für den Fall des Link16 Kommunikationssystems nicht von der Anzahl möglicher WEA ab - im Gegensatz zu ggf. kumulierenden Störwirkungen bei Mehrwegeausbreitungen bei Navigationssystemen (hierzu sei auf die Publikation ICNAAM 2018 des Autors verwiesen).
- Für Land-Land Kommunikationsverbindungen bei fest installierten Anlagen lässt sich, sofern es tatsächlich seitens der genehmigenden Institution Bedenken gibt, die WEA so platzieren, dass sich die Abschattungsszenarien in Sichtlinie der beteiligten Sender und Empfänger vermeiden lassen. Solche Bedenken sollten, sofern dies gravierende Auswirkungen auf die Planung der WEA hat, mit zusätzlichen numerischen Simulationen im Vorfeld allerdings abgewogen werden. Hier sei ein Beispiel angeführt: Die Verschiebung einer WEA in 3 km Entfernung tangential um nur 100 Meter würde die Hauptabschattungsrichtung um 2° ändern, vgl. hierzu auch Tabelle 1, und so ggf. eine maximale Abschattung vermeiden. Aus Sicht des Autors des Gutachtens und anhand der gezeigten Beispiele ist das Szenario einer solchen maximalen Abschattung allerdings unkritisch.
- Für Land-Luft Verbindung sind wegen der entsprechenden Entfernungen und aufgrund eines Elevationswinkels durch die Empfängerhöhe, erstens die Abschattungseffekte so klein, dass sie in der Praxis keine Rolle spielen würden und zweitens wäre die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Empfängers in dem kleinen Abschattungsbereich so klein, dass solche Szenarien in der Praxis vernachlässigbar wären.



## Literaturverzeichnis

**[Knott]** F. Knott, Radar Cross Section, ISBN 978-0-89006-174-9, 2nd edition, SciTech Publishing, Inc., Raleigh, NC, 2004.

**[ICNAAM 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.  
AIP Conference Proceedings 2116, 340001 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5114347>.

**[ICAO EURODOC 15]** ICAO: EURODOC 015, Europäisches Anleitungsmaterial zum Umgang mit Anlagenschutzbereichen, Third Edition, 2015

**[Cama 2017]** R. Geise, N. Yonemoto, B. Neubauer, G. Zimmer, A. Enders, An Overview of Scattering Measurements of Scaled Dynamic Wind Turbines in the Context of Navigation Systems, 2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), pp. 1-4, 4-6 December, Tsukuba, Japan

**[Geise2018]** <https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/emv/minvorwin-infomappe.pdf>, 05 / 2019.