



Gutachten V2

Systemtechnische Untersuchungen der Effekte von zwei geplanten WEAs N175 auf die 13GHz-Richtfunkstrecke des LZPD bei Meschede - Ergebnisse und Vorschläge

Erstellt für: Fa. NATURWERK Windenergie GmbH
Doncaster Platz 5-7 |
D-45699 Herten
Germany

Erstellt von: NAVCOM Consult
Dr.-Ing. Gerhard Greving
Dipl.-Ing. W.-D. Biermann
Dipl.-Ing. R. Mundt
Ludwigsburger Str. 23
D-71711 Steinheim
E-mail: navcom.consult@t-online.de
Internet: <http://www.navcom.de>
Tel.: +49 7144 862560
Fax: +49 7144 862561



Steinheim, 23.06.2025

Naturwerk_Esloher2_RiFu_sb2.docx Ausgabe 2

DOKUMENT HISTORIE

Ausgabe	Datum	Bemerkungen
1	23.06.2025	Abschlussbericht/Gutachten 2 N175 und 13GHz RiFu-Strecke des LZPD
2	23.06.2025	Kleine Anpassungen

0 Verzeichnisse; Vorwort

0.1 Vorwort zum Gutachten mit Bezug zur Sachverständigenordnung

Dieses Gutachten wurde von Dr.-Ing. Gerhard Greving als öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für das Sachgebiet

„Flugsicherungsanlagen, Navigations-, Lande- und Radarsysteme“.

nach den bundeseinheitlichen Regeln zur Sachverständigenordnung (BGBl I S.202 v. 22.2.1991) verfasst.

Die Bestellung erfolgte durch die zuständige IHK-Stuttgart mit Datum v. 20.4.2006 nach den in der Sachverständigenordnung festgelegten Verfahren und Bestimmungen. Insbesondere erfolgte die Bestellung nach einem umfangreichen Begutachtungsverfahren.

In dieser Sachverständigenordnung werden in Abschnitt III die „Pflichten des öffentlich bestellten und vereidigten Sachverständigen“ definiert

- §8 (1) ... Unabhängigkeit
- §8 (2) ... Weisungsfreiheit
- §8 (3) ... Gewissenhaftigkeit
Der Sachverständige hat seine Aufträge unter Berücksichtigung des aktuellen Standes von Wissenschaft, Technik und Erfahrung mit der Sorgfalt eines ordentlichen Sachverständigen zu erledigen. Die tatsächlichen Grundlagen seiner fachlichen Beurteilungen sind sorgfältig zu ermitteln und die Ergebnisse nachvollziehbar zu begründen. ...
- §8 (4) Unparteilichkeit
Der Sachverständige hat bei der Erbringung seiner Leistung stets darauf zu achten, dass er sich nicht der Besorgnis der Befangenheit aussetzt. Er hat bei der Vorbereitung und Erarbeitung seines Gutachtens strikte Neutralität zu wahren, muss die gestellten Aufgaben objektiv und unvoreingenommen beantworten.

Insbesondere darf der Sachverständige nicht

- * Gutachten in eigener Sache oder für Objekte und Leistungen seines Dienstherrn oder Arbeitgebers erstatten.
- * Gegenstände erwerben oder zum Erwerb vermitteln, eine Sanierung oder Regulierung der Objekte durchführen, über die er ein Gutachten erstellt hat, es sei denn, er erhält den entsprechenden Folgeauftrag nach Beendigung des Gutachtenauftrags und seine Glaubwürdigkeit wird durch die Übernahme dieser Tätigkeiten nicht in Frage gestellt.

Das folgende Gutachten entspricht in jeder Beziehung den Bestimmungen dieser Sachverständigenordnung.

Steinheim, den 23.06.2025



0.2 Inhaltsverzeichnis

	Seite
0 Verzeichnisse; Vorwort.....	3
0.1 Vorwort zum Gutachten mit Bezug zur Sachverständigenordnung	3
0.2 Inhaltsverzeichnis	4
0.3 Tabellenverzeichnis	5
0.4 Abbildungsverzeichnis.....	5
0.5 Abkürzungsverzeichnis	7
1 Projektbeschreibung und Aufgabenstellung	8
1.1 Einführung	8
1.2 Einwände des LZPD gegen den Aufbau	8
1.3 Aufgabenstellung des Gutachtens	9
2 Numerische Methoden	10
2.1 Grundlagen.....	10
2.2 Modelle	11
2.2.1 Objekte; WEA N175	11
2.2.2 RiFu-Antennen	12
3 Theoretische Analysen und numerische Ergebnisse	12
3.1 Fresnelzone; Theorie, Grenzen	12
3.1.1 Grundlagen	12
3.2 RiFu-Systembetrachtungen; Beugungsdämpfung und Fresnelzone	13
3.2.1 Spezifikationen.....	14
3.2.2 Zusammenfassung Fresnelzone.....	14
4 Numerische Simulationen; Ergebnisse.....	14
4.1 Numerische Simulationen; Allgemeine Ergebnisse; Schwundreserve	14
4.2 Numerische Ergebnisse WEA-Mast N175	15
4.2.1 Einzelner Mast; Fresnelzone	15
4.2.2 Beide/Zwei Masten	16
4.3 Numerische Ergebnisse Rotorblätter N175	16
4.3.1 Modell Metallisches Blatt; Rotation	16
4.3.2 Modell Blitzableiter; Rotation.....	17
4.3.3 Überlagerung Mast und Rotoren	17
4.4 Ergebnisse und Vorschläge.....	17
4.5 Kommentierung der „Fälle 1 bis 3“ im Schreiben des LZPD/HSK	18
5 Zusammenfassung.....	18
6 Tabellen.....	20
7 Bilder / Ergebnisse	21
8 Anhang A (Weitere Bilder und Daten).....	33
9 Literaturverzeichnis, Publikationen.....	42
10 Ende des Gutachtens.....	43

0.3 Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Halbwertsbreiten (Winkel, absolute Breite B am Ort der WEA) der beiden RiFu-Antennen.....	12
Tabelle 2: Daten der LZPD-Richtfunkstrecke 13 GHz ; Streckenlänge 15.04km (Bild 1, Bild 2)	20
Tabelle 3: Position und Daten der WEAs Nordex N175; Nabenhöhe 179m, Rotordurchmesser 175m, Maximalhöhe 266.5m (Bild 5)	20
Tabelle 4: Daten von 13GHz Parabolantennen der Fa. Andrews.....	21

0.4 Abbildungsverzeichnis

	Seite
Bild 1: LZPD-Richtfunkstrecke Draufsicht und Geländeprofil; Position der Endstellen und der 2 N175 ; Vegetation/Bewuchs	22
Bild 2: Richtfunkstrecke LZPD und 2 N175 gem. Planung; Forderung LZPD mit Dimensionen	22
Bild 3: Österberg-Funkturm mit LZPD-13GHz-Antenne in 646müNN absoluter Höhe	23
Bild 4: Schomberg-Funkturm mit LZPD-13GHz-Antenne in 688müNN absoluter Höhe.....	23
Bild 5: Nordex N175; numerisches, trianguliertes 3D-Modell; Maximalhöhe 266.5m;	24
Bild 6: LZPD-Richtfunkstrecke Seitenansicht in Richtung der Funkstrecke mit WEAs N175; mit Turm, Nabe und Rotorblätter und Rotorkreise.....	25
Bild 7: LZPD-Richtfunkstrecke Seitenansicht und 1. Fresnelzone; Positionen WEAs N175 bei Eslohe; Dimensionen; diskrete 5°-Positionen des 3-Blatt-Rotors	25
Bild 8: LZPD-Richtfunkstrecke 13GHz (Schomberg – Österberg; bei Meschede); Draufsicht mit WEAs N175;.....	26
Bild 9: Beispielhafte Daten von 13GHz-Richtfunkantennen (Fa. Andrews; rotationssymmetrische Parabolspiegel)	27
Bild 10: Beispiel einer typischen 13GHz-RiFu-Antenne (Rotationsförmige Parabolantenne 3ft, Fa. Andrews mit Radom).....	27
Bild 11: Prinzipaufbau Richtfunkverbindung BOS-13GHz; Fresnelzone und WEA als Streuer	28
Bild 12: Theoretisch numerischer Aufbau der 3D-Simulationen (aus: ICEAA 2024 Lissabon)	28
Bild 13: Modellierung der Rotorblattspitze der N175 im Bereich der Funkstreckenverbindung	29
Bild 14: Effekte auf die Feldstärke des RiFu-Links durch parametrische Verschiebung eines Modells des Masts der N175 im Bereich der Funkstrecke; fallbezogene Fresnel-Simulation	29
Bild 15: Modellierung und Rotation der Rotorblattspitze der N175 im Bereich der Funkstreckenverbindung; voll metallisches Blatt auch des dielektrischen GFK als „worst case“	30
Bild 16: Modellierung und Rotation der Rotorblattspitze der N175 im Bereich der Funkstreckenverbindung; Modellierung des Blitzableiters durch eine 10cm breite metallische Platte	30
Bild 17: Relative elektr. Feldstärke auf einem Orbitausschnitt ($\pm 0.5^\circ$) von einer Platte verschiedener Breite (0.5-6.5m), Höhe 20m, bei Erregung durch einen vertikalen Dipol.....	31
Bild 18: Relative elektr. Feldstärke auf einem Orbitausschnitt ($\pm 0.5^\circ$) von 2 Platten (H=20m), Breite 5.0, 6.17m bei Erregung durch einen vertikalen Dipol; Funkstrecke bei 0°	31

Bild 19: Relative elektr. Feldstärke auf einem Orbitausschnitt ($\pm 1^\circ$); Platte an Positionen von 0m bis 25m zur Funkstrecke, Breite 5m, Höhe 20m; Quelle vertikaler Dipol.....	32
Bild 20: Relative elektr. Feldstärke von einer Platte verschiedener Längen (5-50m) / Breite (1-5m) im Azimutwinkel 0° , bei Erregung durch einen vertikalen Dipol	32

Anhang A

	Seite
Bild A - 1: Flussdiagramm der "Integrated Hybrid System Simulation" (IHSS).....	33
Bild A - 2: Windrose für den Standort „Esloher Höhe“	34
Bild A - 3: Übersichtszeichnung der Fa. Nordex für eine N175 (NH=179m).....	35
Bild A - 4: Übersichtszeichnung der Fa. Nordex für das Rotor-Blatt einer N175	36
Bild A - 5: Detail-Modellierung der Blattspitze einer Nordex N175	37
Bild A - 6: Konzeptionelle technische Daten einer Nordex N175	38
Bild A - 7: Regendämpfung in dB pro km als Funktion der Regenintensität in mm/h und der Frequenz in GHz (aus /2/)	39
Bild A - 8: Mittlere Regendämpfung A_R einer Funkstrecke als Funktion der Regenintensität in mm/h für 13GHz (aus /2/).....	40
Bild A - 9: Prinzipien der Abschattung („forward scatter“) von Objekten gleicher Projektionsfläche für elektrisch große Objekte (aus /15/)	41

0.5 Abkürzungsverzeichnis

AGC	Automatik Gain Control
AIP	Aeronautical Information Publication
AMSL	Above Mean Sea Level
ASR	Airport Surveillance Radar (TAR)
ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management
BOS	Behörden, Organisationen, Sicherheitsaufgaben
CNS	Communication, Navigation & Surveillance
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH
DME	Distance Measurement Equipment
DVOR	Doppler-VOR
EMC	Electromagnetic Compatibility
EU	European Union
ft	foot/feet, 1ft=0.3048m
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff (Epoxid-Harz)
GHz	Frequenzangabe 10^9 Hz
HSK	Hoch-Sauerland-Kreis
IAF	Initial Approach Fix
ICAO	International Civil Aviation Organization
ILS	Instrument Landing System
IPO	Improved Physical Optics (beinhaltet auch Kanten/Fock-Ströme, Abschattung ,Reflexionen)
LOS	Line-Of-Sight
LPD	Logarithmisch-Periodische-Dipolantenne
LZPD	Landesamt für Zentrale Polizeiliche Dienste
MHz	Frequenzangabe 10^6 Hz
MoM	Method of Moments (Numerische Integralgleichungsmethode)
MLFML	Multilevel Fast Multipole Method
MSL	Mean Sea Level
NHN	Nörmalhöhennull
NM (nmi)	nautical mile(s) 1NM=1.852km
OPS	Operation Services
PE	Parabolic Equation (moderne numerische Methode für Wellenausbreitung)
PEC	Perfect Electric Conducting
PO	Physical Optics (Numerische Methode; Strom Integrationsmethode)
RiFu	Richtfunk
RR	Radio-Relay (=Richtfunk)
rss	Root sum square
SNM	Signal Multipath Ratio
SNR	Signal Noise Ratio
TACAN	Tactical Air Navigation
UTD	Uniform Theory of Diffraction (Erweiterung der GTD; Numerische Methode zur Lösung elektromagnetischer Probleme)
VOR	Very High Frequency Omni Range
WEA	Windenergieanlage
WT	Wind-Turbine

1 Projektbeschreibung und Aufgabenstellung

1.1 Einführung

Die Fa. Naturwerk Windenergie GmbH (D-45699 Herten) plant, in relativer Nähe zu einer Richtfunkstrecke des LZPD (Digitaler Richtfunk, 13GHz Betriebsfrequenz ; **Bild 1** bis **Bild 10**) bei Meschede

- Länge des Links 15.04km (**Bild 1, Bild 8**) vom Funkturm Österberg bis zum Funkturm Schomberg (**Bild 4, Bild 3**)
- Geplanter Abstand der WEA-Achsen vom RiFu-Link etwa 9.2m und 16.6m
- Parabolspiegelantennen (D=0.6m, 1m) auf beiden Seiten des RiFu-Links (**Bild 9, Bild 10**)
- Radius der 1. Fresnelzone am Ort der WEA etwa 9.3m für 15.04km und 13GHz

zwei große Windenergieanlagen WEA vom Typ Nordex N175 (Höhe Achse des Maschinenhaus 179m, Rotorkreis 175m; Maximalhöhe 266.5m (**Bild 2, Bild 5**) in einem Abstand von ca. 9km bzw. ca.6km zu den RiFu-Antennen (**Bild 1, Bild 8**) aufzubauen. Der Rotor einer N175 dreht sich bei entsprechendem Starkwind mit einer Maximaldrehzahl von 10.85U/min. Dem entsprechen bei 3 Rotorblättern maximal 32.5 Durchgänge pro min durch das Funkfeld (=0.54Hz).

1.2 Einwände des LZPD gegen den Aufbau

Vom Betreiber der Richtfunkstrecke (LZPD; Polizei NRW) wird mit Bezug auf die „Fresnelzone“ (/2/, /3/, /4/) reklamiert, dass die WEAs innerhalb des Bereichs der (ersten?) Fresnelzone lägen (**Bild 6, Bild 7, Bild 8**) und ein nicht akzeptabler „Kollisionsbereich“ zwischen der ersten Fresnelzone und dem Rotorkreis (175m) bestünde.

Es werden im Schreiben v. 16.04.2025 des HSK mit Bezug auf die Stellungnahme des LZPD v. 14.08.2024 vier mögliche „Fehlerfälle“ postuliert, die einer Genehmigung dieser beiden WEAs im Wege stünden, bzw. stehen könnten :

Aus den aufgeführten Punkten können sich die folgenden Fehlerfälle für unsere Richtfunkstrecke ergeben:

Fall 1: Mast der WEA (ohne Rotorblätter) steht direkt in der Richtfunkstrecke (LOS nicht mehr gegeben). Die Richtfunkstrecke kann nicht mehr genutzt werden.

Fall 2: Rotorblätter der WEA stören rhythmisch die LOS Verbindung der Richtfunkstrecke. Die Richtfunkstrecke ist im Rhythmus der Anzahl der Rotoren gestört und dadurch sehr wahrscheinlich nicht mehr nutzbar.

Fall 3: Die gesamte WEA steht in einem Bereich der Fresnelzone: Die Richtfunkstrecke könnte so stark gestört sein, dass diese nicht mehr oder nur eingeschränkt nutzbar wird. Dadurch steigt der Jitter des zu übertragenen Signals. Der Jitter ist ein abrupter und unerwünschter Wechsel der Signalcharakteristik, welcher zu Störungen der Übertragung führen kann.

Fall 4: Beeinflussung der Richtfunkstrecke durch elektromagnetisches Feld der WEA. Hier kann das Richtfunksignal verzerrt werden.

Die ersten 3 „Fälle“ stehen im Zusammenhang mit den potentiellen zusätzlichen Funkfelddämpfungen durch die beiden geplanten WEAs und werden im Laufe der folgenden Untersuchungen behandelt – siehe hierzu zusammenfassend das Kap. 4.4 .

Der „Fall 4“ unterstellt, dass durch die Elektronik in den WEAs (Gleichrichter, Umrichter etc.) elektromagnetische Spektralkomponenten erzeugt würden, die relevant bis in den Frequenzbereich von 13GHz reichen könnten. Es sei daran erinnert, dass die Grundfrequenz in den WEAs die Netzfrequenz von 50Hz ist. Durch Schaltvorgänge und resultierende steile bzw. nahezu sprunghafte Spannungsverläufe können prinzipiell Oberwellen erzeugt werden. Diese können mit relevanten Amplituden vielleicht bis in den MHz-Bereich reichen, aber keinesfalls bis in den GHz-Bereich und insbesondere nicht in den Frequenzbereich 13GHz, wobei diese Spektralkomponenten auch noch relevant abgestrahlt werden müssten, um als RiFu-Störung bei dem mindestens etwa 6km entfernten RiFu-Empfänger noch wirken zu können - „relevant“ heißt in Relation zu der direkten RiFu-Strahlung mit Antennen mit Gewinnen im Bereich 40dBi. Es sei auch daran erinnert, dass die Elektronikkomponenten in den WEAs wie Wechselrichter kommerzielle Produkte sind, für die die zuständigen EU-EMC-Spezifikationen gelten und die eingehalten und nachgewiesen werden müssen („CE-Zertifizierung“). **Gutachterlich werden deshalb derartige in den Raum gestellte elektromagnetische Störungen durch eine WEA im 13GHz-Frequenzbereich sicher relevant nicht gesehen und nicht für möglich gehalten.**

1.3 Aufgabenstellung des Gutachtens

In diesem unabhängigen Gutachten soll der Einfluss der geplanten WEAs N175 auf die betroffene Richtfunkstrecke nach dem Stand der Technik untersucht und ob und gegebenenfalls inwieweit diese in unzulässiger Weise bzgl. des operationellen Betriebs hierdurch gestört werden. Dies geschieht entsprechend der international bewährten Vorgehensweise und mit den Methoden der NAVCOM Consult nach den Regeln der Sachverständigenordnung (siehe 0.1).

In diesem Gutachten werden allseits bekannte und gefestigte Grundlagen der Systemtechnik, der Wellenausbreitung und der Numerik nicht hergeleitet, sondern als bekannt vorausgesetzt und es bedarf daher nicht eines ständigen Gültigkeitsnachweises. Zum tieferen Verständnis sind jedoch einige Grundlagen, die wesentlichen Bestandteile der Aussagen und Ergebnisse sind, erläutert.

Es sei auf entsprechende Literatur- und Herstellerangaben und auf die Referenzen verwiesen. Es werden hier nur solche Parameter genannt und untersucht, die die primären systemrelevanten Eigenschaften für die Funktionsfähigkeit besitzen. Dies schließt auch die Beurteilung über die Notwendigkeit von numerischen Simulationen ein.

Kommentierend sei aus technischer Sicht angemerkt, dass eine potentielle Störung wohl kaum so interpretiert werden kann, dass eine bloße hypothetische Möglichkeit oder eine bloße nicht näher definierte „Gefahr einer Störung“ gemeint ist und als entscheidende Grundlage von technischen Beurteilungen genommen werden kann. Jedes System – auch das Richtfunksystem - hat Spezifikationen zu erfüllen. Wenn aber z.B. die durch ein Objekt verursachten tatsächlichen Effekte deutlich und hinreichend kleiner als diese festgelegte Spezifikation sind, ist das System zwar „gestört“ (=Abweichung vom „ungestörten“ Idealfall), aber nicht relevant sondern akzeptabel. In der Realität gibt es den Zustand „keine Störungen“ nicht.

Es ist demnach auch die Aufgabe dieses Gutachtens, zunächst die tatsächlichen Effekte und Auswirkungen auf die Richtfunkstrecke mit einer Methodik nach dem Stand der Technik zu ermitteln.

In einer zweiten Stufe muss bewertet werden, ob die festgestellten Effekte tatsächlich „Störungen“ im Sinne einer Verletzung der anwendbaren Spezifikationen oder der Funktionsfähigkeit des Richtfunksystems sind.

2 Numerische Methoden

2.1 Grundlagen

Die numerischen Systemsimulationen werden auch in diesem Projekt mit dem in den Publikationen von NAVCOM Consult beschriebenen Verfahren nach dem Stand der Technik durchgeführt, nämlich der integriert hybriden Systemsimulation IHSS (**Bild A - 1**). In diesem Gutachten werden als Lösungsmethoden des elektromagnetischen Randwertproblems zur numerischen Berechnung der Funkfelder verwendet:

- **MoM** (Methods of Moments)
Integralgleichungsmethode für niedrige Frequenzen (z.B. NDB, ILS, CVOR/DVOR. Diese Methode wird als strenge Modelllösung verstanden und ist ideal für Gitterstrukturen (z.B.: Kräne). Oberflächen werden frequenzangepasst trianguliert oder sektioniert.
Kommentar: Die Effekte von drahtförmigen Objekten (z.B. Blitzableiter in den Rotorblätter können sinnvoll nur mit der MoM berechnet werden. Bei der aktuellen Betriebsfrequenz der RiFu-Strecke von 13GHz sind eine Modellierung und Analyse der kompletten WEA technisch praktisch nicht möglich, so dass ggf. Teil- oder Ersatz-Modellierungen und hieraus abgeleitete aussagkräftige Ergebnisse für das Gesamtsystem erforderlich sind.
- **IPO** (Improved Physical Optics) für Radar und DVOR
Verbesserte/Erweiterte physikalische Optik (PO); berücksichtigbar sind Fock-Ströme, Kanten- und Schattenströme sowie Verschattungen und Reflexionen; ideal für Flächenstrukturen (eben, gekrümmt). Oberflächen werden frequenzangepasst trianguliert.
Kommentar: Die Streueffekte der triangularisierten 3D WEA (Rotoren, Mast, Maschinenhaus) werden in diesem Gutachten mit der IPO-Methode berechnet.
- **PE** (Parabolic Equation)
Zur Berechnung der Wellenausbreitung über Bodenstrukturen

Die Besonderheit dieses von NAVCOM Consult eingeführten IHSS-Verfahrens (**Bild A - 1**) besteht darin, dass für ein bestimmtes Objekt alle zur Verfügung stehenden numerischen Verfahren parallel für die jeweiligen Fragestellungen in Kombination mit den systemtechnischen und operationellen Aspekten eingesetzt werden. Ziel ist immer die abgeleitete Ermittlung des operationellen Systemparameters (z.B. Winkelfehler bei SSR und TACAN, Entfernungsfehler bei DME, DDM bei ILS, (zusätzliche) Streckendämpfung bei RiFu usw.).

Alleinige Abschätzungen der Effekte z.B. mit Fresnel-Zonen, reinen Flächenbetrachtungen (nach m^2 , konstante Aperturbelegung), Ebenen Wellen, RCS/RQS (Radar Cross Section / Radarquerschnitt) usw. werden für die Systembetrachtungen grundsätzlich nicht durchgeführt, da sie als eine grobe Näherung eine Vielzahl von physikalischen Effekten (Antennendiagrammeigenschaften, Fernfeld/Nahfeld-Effekte, Beugung, Aufzipfelung („lobing“) des Elevationsdiagramms über Erdboden im Gegensatz zu den aufwendigen oben genannten numerischen Methoden nicht be-

rücksichtigen und somit auch in der Regel in diesem Sinne zu nicht korrekten Ergebnissen führen (meist zu zu großen Störwerten), auf deren Basis dann entsprechende Maßnahmen gefordert werden müssen oder aber der Bauantrag abgelehnt wird. Dies gilt grundsätzlich auch für Abschattungsbetrachtungen, die nur auf der Basis optisch-geometrischer Betrachtungen durchgeführt werden, da hierbei die Schattengrenz- und Auffüll-Effekte nicht berücksichtigt werden. Mit heutigen dreidimensionalen numerischen 3D-Analysemethoden, wie sie in dieser Untersuchung angewendet werden, sind aussagekräftige Feldberechnungen möglich.

2.2 Modelle

2.2.1 Objekte; WEA N175

Die Streu-Objekte (hier die WEA N175) werden zunächst als rein metallische Körper modelliert (**Bild 5, Bild 6**). Entsprechend der verwendeten numerischen Methode werden vorhandene Flächen frequenzabhängig in eine Vielzahl von dreiecksförmigen Einzelflächen („Patche“) unterteilt („trianguliert“) oder drahtförmige Objekte werden in Sektionen unterteilt. Je höher die Frequenz (hier 13GHz; $\lambda=2.3\text{cm}$) desto mehr Dreiecke sind erforderlich. Bei der Frequenz 13Ghz können dies viele Millionen Patche sein, deren Streu-Strahlungsanteile einzeln berechnet und überlagert werden – z.B. etwa 4.1Mio in **Bild 14**.

In den entsprechenden Bilddarstellungen ist diese Anzahl der Dreiecke drastisch reduziert, um eine unterscheidbare Triangulationsdarstellung zu erhalten. Gegebenenfalls werden falls erforderlich weitere Strukturdetails eingearbeitet, da eine strukturierte Fläche durch Diffusion geringere Störeffekte erzeugt.

Als „worst case“ mit maximaler Reflexion kann eine planare metallische Fläche angesehen werden. Andere Raumstrukturen wie Zylinder oder generell gekrümmte Oberflächen reduzieren durch Diffusion diese Maximalwerte. Bei dem in dieser Untersuchung bzw. Objekt und dessen Effekt auf die Funkfelddämpfung geht es jedoch um Abschattung („forward scatter“; **Bild A - 9**).

Die Rotorblätter einer Windenergieanlage bestehen in der Regel aus nicht-metallischem glasfaserverstärktem Dielektrikum (GFK; Ausnahme Karbon), was weit weniger reflektierend bzw. streuend wirkt als Metall. In diesen GFK-Rotorblättern ist jeweils ein drahtförmiger metallischer Blitzableiter integriert.

In den folgenden numerischen Simulationen werden aufgrund der Größen beider WEAs relativ zu den Funkstreckenparameter durch Teil-Modelle für den Mast und für die Rotorblätter simuliert und verglichen. Die Größe bzw. Höhe oder Länge der metallischen Teilmodelle wird größer als die Dimension der Fresnelzone hinreichend modelliert; siehe auch Kapitel 3.1 .

1. Teilmodell für den Mast im Bereich der Funkstrecke mit der Dicke des gegebenen Masts in diesem Bereich (z.B. **Bild 5, Bild 14, Bild 18**) als „worst-case“.
2. Gesamt- und Teil-Modelle für die Rotorblätter im Bereich der Funkstrecke in etwa 98m Höhe des Masts (**Bild 6, Bild 7, Bild 15, Bild 16**)

Hier ist der metallische Blitzableiter in den Blättern auch bei 13GHz relevanter als das GFK. Somit stellen vollständig metallische Blätter einen elektrischen, unrealistischen “worst case“ dar. Das Teilmodell mit dem vergrößerten Blitzableiter (10cm gegenüber etwa 2cm) wird gutachterlich als insgesamt realistisch für die in die Fresnelzone hineinragenden Blattspitzen beurteilt. Das in der jeweiligen Simulation verwendete Modell ist in jedem Ergebnisbild bildlich deutlich und skaliert dargestellt.

Bild 5 zeigt das vereinfachte numerische 3D-Modell der Windenergieanlage Nordex N175.

Die technische Berechtigung und Möglichkeit, z.B. den Mast durch eine metallische Platte gleicher Projektionsfläche zu modellieren, ergibt sich aus der bekannten physikalischen Tatsache, dass die Abschattung für elektrisch große Strukturen und gleicher Projektionsfläche sehr ähnlich ist (**Bild A - 9**, aus /15/).

2.2.2 RiFu-Antennen

Die in der RiFu-Strecke (**Bild 11**) bei der Frequenz 13 GHz verwendeten RiFu-Antennen sind typische rotationsförmige Parabolantennen mit relativ hohem Gewinn (**Bild 9**, **Bild 10**; Tabelle 4, Tabelle 1; **Bild 3**, **Bild 4**) mit Durchmessern von 0.6m und 1m. Hieraus ergeben sich Halbwertsbreiten von 2.7° und etwa 1.5°.

Antenne	B bei Abstand ca. 6km	B bei Abstand ca. 9km
0.6m -3dB/2 1.35°	141m	212m
1.0m -3dB/2 0.75°	78m	118m

Tabelle 1: Halbwertsbreiten (Winkel, absolute Breite B am Ort der WEA) der beiden RiFu-Antennen

Die relativ kleinen Halbwertsbreiten und die damit verbundenen hohen Gewinne bewirken zusammen mit der schwachen Bodenreflexion eine nur kleine effektive Anstrahlung des Erdbodens und eine nur kleine Winkeldämpfung bzgl. der WEA in der Entfernung von etwa 9.3m bzw. 16.6m zur Richtfunkstrecke in der Entfernung von etwa 9 bzw. 6km zu beiden Richtfunkantennen (**Bild 1**).

Die WEAs mit dem Rotorkreis von 175m werden von beiden Antennen aus in einem azimutalen Winkelsektor von etwa 1.6° bzw. 1.1° gesehen, weshalb die erregte Stromverteilung auf den WEAs und damit die resultierende Streckendämpfung (=“Funkfelddämpfung“) praktisch der eines vertikal polarisierten Quellen-Dipols durch die komplexe Überlagerung nach Betrag und Phase des direkten Signals und des an der WEA gestreuten Signals („forward scatter“) entspricht. Eine effektive Diskriminierung und Ausblendung der WEAs durch das Azimut-Diagramm der RiFu-Antennen ist bei den geplanten bzw. vorgeschlagenen Dimensionen nicht gegeben.

3 Theoretische Analysen und numerische Ergebnisse

3.1 Fresnelzone; Theorie, Grenzen

3.1.1 Grundlagen

Die Theorie der „Fresnelzone“ für Richtfunkverbindungen (**Bild 11**) ist eine Näherung aus der „Vor-Computerzeit“, in der noch keine entsprechenden wirklichen numerischen Simulationen möglich waren. Z.B. werden Dimensionierungen von RiFu-Strecken in dem Fachbuch /2/ „Brodhage, Hormuth; Planung und Berechnung von Richtfunkverbindungen, Siemens AG 1977“ weitgehend noch auf der Grundlage von Fresnelzonen behandelt.

Die Grenze der ersten Fresnelzone ist dadurch definiert, dass der „Umweg“ über das „störende Objekt“ vom Sender zum Empfänger der Richtfunkstrecke eine halbe Wellenlänge beträgt und damit theoretisch das Umwegsignal auf der Funkstrecke gegenphasig überlagert wird und damit eine Dämpfung entsteht. Beim Umweg von einer vollen Wellenlänge entsteht entsprechend eine verstärkende gleichphasige Überlagerung (siehe **Bild 14**).

Relevante Näherungen und oft unphysikalische Vernachlässigungen sind für die Anwendung der Fresnelzonentheorie typisch, z.B.

- Keine quantitative Berücksichtigung der Antenneneigenschaften auf beiden Seiten der RiFu-Strecke möglich.
Bild 9 und **Bild 10** zeigt typische in der aktuellen Richtfunkstrecke installierte Antennen.
- Keine Berücksichtigung des Erdbodens in der Abstrahlung der Antennen und der Wellenausbreitung. Der Boden und eventuelle Berge bzw. Hügel werden als „Störobjekte“ interpretiert.
- Keine Berücksichtigung der 3D-Form- und der komplexen Streu-Eigenschaften des Stör-Objekts nach **Betrag und Phase** - hier der WEA N175 als potentiell Störobjekt. Der Rotorkreis einer WEA (**Bild 6**, **Bild 7**) ist **keine** strahlungsundurchlässige metallische Kreisfläche, sondern wird virtuell gebildet aus 3 schlanken, sich bei hinreichend starkem Wind zeitabhängig drehenden Rotoren bestehen hauptsächlich aus dielektrischem nicht-leitendem GFK und einem in jedes Rotorblatt integrierten drahtförmigen Blitzableiter (Dicke <2cm). Die maximale Rotordrehzahl einer N175 beträgt nominell 10.85U/min (**Bild A - 6**) entsprechend 5.5sec für die kürzeste Umdrehungszeit) und damit kann der Rotor mit seinen 3 Blättern je nach Windrichtung die Richtfunkstrecke 32.5/min (=0.54Hz) kreuzen.

Der auf der Basis einer formal definierten Rotor-Kreisfläche für eine WEA bestimmte und frei zu haltende „Kollisionsbereich“ (**Bild 6**) ist deshalb zur Anwendung der Fresnelzonentheorie nicht gültig und unphysikalisch. Der Einfluss einer WEA auf die BOS-Richtfunkstrecke (z.B. „Schwund“, „Beugungsdämpfung“) bei der Betriebsfrequenz 13GHz kann heute als „Stand der Technik“ mit modernen leistungsfähigen Arbeitsrechnern zuverlässig modelliert und simuliert werden. Diese Methodik (IHSS **Bild A - 1**) wird in diesem Gutachten angewendet.

In der Theorie der Fresnelzone ist die momentane „Verschattung“ der Fresnelzone durch die sich drehenden Rotorblätter wegen der kleinen Projektionsfläche sehr klein, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass die Rotoren hauptsächlich aus dielektrischem GFK mit drahtförmigem Blitzableiter (Durchmesser <2cm) bestehen.

Der Mast der WEA (oben 4.04m, unten 8.73m; Höhe 179m) deckt „optisch“ stark vereinfacht ggf. ebenfalls nur einen kleinen Teil der Fresnelzone (D=18.6m) ab sofern die Masten überhaupt in der ersten Fresnelzone stehen.

3.2 RiFu-Systembetrachtungen; Beugungsdämpfung und Fresnelzone

In dem Fachbuch „/2/ Planung und Berechnung von Richtfunkverbindungen 1977“ finden sich für die aktuelle BOS-13GHz-Richtfunkstrecke folgende prinzipiell anwendbare Daten und Informationen:

/2/ 3.1 Fresnelzonen :

„In der Praxis treten Behinderungen hauptsächlich durch die hügelige Erdoberfläche, insbesondere durch Berge und durch Gebäude auf. In allen Fällen entsteht erst dann eine Beugungsdämp-

fung, wenn mehr als das 0.5- bis 0.7-fache der ersten Fresnelzone behindert ist.“

„etwa 60% der ersten Fresnelzone ($\Delta h/r_{F1} \sim 0.6$) müssen frei von Hindernissen sein, um annähernd freie Ausbreitung (Freiraumdämpfung) zu erreichen.“

Kommentar: Wenn die beiden Masten der N175 vollständig außerhalb der 1. Fresnelzone positioniert werden, dann sollten gem. der zitierten Fresnelzonentheorie praktisch keine zusätzlichen relevanten Funkfelddämpfungen auftreten. Die folgenden numerischen Simulationen von N175-Masten und von temporären Rotorblättern zeigen, dass tatsächlich sehr deutlich weniger als 60% der ersten Fresnelzonenfläche abgedeckt werden.

3.2.1 Spezifikationen

Eine explizite und formelle, schlüssige Spezifikation für die Anwendung der Fresnelzonentheorie existiert nicht. Eine solche Spezifikation existiert erst recht nicht für 3D-Streuobjekte wie die WEAs.

3.2.2 Zusammenfassung Fresnelzone

Die klassische Fresnelzonentheorie selbst lässt für die beiden WEAs N175 keine physikalisch schlüssige Beurteilung der Akzeptanz oder Ablehnung der WEA am geplanten Ort zu. Stattdessen muss die Funkfelddämpfung auf der Richtfunk-Strecke zwischen den beiden RiFu-Antennen mit Hilfe der beschriebenen Beugungstheorie numerisch nach dem Stand der Technik berechnet werden.

4 Numerische Simulationen; Ergebnisse

4.1 Numerische Simulationen; Allgemeine Ergebnisse; Schwundreserve

Zunächst werden einige vorbereitende allgemeine Simulationsergebnisse im Zusammenhang mit der WEA und der Richtfunkstrecke dargestellt.

Bild 14 zeigt den Einfluss eines metallischen WEA-Masts N175 (Kegelstumpf von 20m Höhe und Durchmessern von 5.58m oben und 6.60m unten auf die Signalübertragung bei Verschiebung des Masts von 0m (genau auf der Verbindungsstrecke) bis 30m. Das übertragene RiFu-Signal wird erkennbar periodisch **geschwächt bzw. auch verstärkt** durch die relative Hochfrequenz-Phase zwischen dem direkten Signal und dem am Mast bzw. den Teilmodellen gestreuten komplexen Signal. Der Radius der klassischen 1. Fresnelzone ist mit 9.3m für 13GHz und 15.04km Länge des Links markiert. Es ist deutlich erkennbar, dass die Definition der 1. Fresnelzone als Störgrenze weitgehend willkürlich ist und physikalisch zu falschen Schlüssen führen kann. Z.B. ist es nicht korrekt, dass Objekte außerhalb der 1. Fresnelzone keine relevanten Effekte mehr verursachen können. Es ist auch erkennbar, dass bei „0m“, d.h. der Mast steht genau in der Funkstrecke, keine Unterbrechung der Funkstrecke durch eine vermeintlich sehr hohe Dämpfung (d.h. fehlende LOS „Line-of-Sight“) bzw. eine vollständige Abschattung stattfindet. Tatsächlich ist die sich ergebende Funkfelddämpfung durch den Mast alleine rechnerisch nur etwa 7dB (**Bild 14**), selbst wenn er genau in der Richtfunkstrecke steht. Diese Dämpfung ist immer noch deutlich kleiner als die mitgeteilte Schwundreserve von 25dB. Hierdurch zeigt sich die

bekannte Tatsache auch bei der Frequenz von 13GHz, dass die Wellenausbreitung nicht vollständig optisch verläuft und das Feld sich hinter dem (aktuellen) Objekt wieder bis zu einem bestimmten Grad „erholt“.

Diese theoretischen Funkfelddämpfungen sind insbesondere deutlich kleiner als die Dämpfungen bei (starkem) Regen.

Bild A - 7 und Bild A - 8 (entnommen aus: /2/ H. BRODHAGE, W. HORMUTH Planung und Berechnung von Richtfunkverbindungen, Siemens AG, München 1977) zeigen die Regendämpfungen bei 13GHz pro km für variable Regenintensitäten bzw. als mittlere Funkfelddämpfungen bei der gegebenen Linklänge von 15.04km. Bei mäßigem „Starkregen“ (z.B. 30mm/h) beträgt die Funkfelddämpfung für 13GHz und 15.04km etwa 15dB, was die Schwundreserve von 25dB noch deutlich unterschreitet und formell noch reichlich Raum lässt für weitere Funkfelddämpfungen durch andere Objekte. Es ist sicher auch festzustellen, dass ein „Starkregen“ an einem bestimmten Standort wie der Funkstrecke desto seltener auftritt je stärker der Regen ist.

4.2 Numerische Ergebnisse WEA-Mast N175

4.2.1 Einzelner Mast; Fresnelzone

Als Erstes wird der einzelne Mast durch ein 20m hohes Teilmodell (=Kegelstumpf) untersucht. Die Höhe von 20m ist zunächst größer als der Durchmesser der gesamten ersten Fresnelzone (18.6m) und zweitens entspricht die Dicke des Teilmodells der Dicke des tatsächlichen Masts auf der Höhe der Funkstrecke (**Bild 5**):

Bild 14: Effekte auf die Feldstärke des RiFu-Links durch parametrische Verschiebung eines Modells des Masts der N175 im Bereich der Funkstrecke; fallbezogene Fresnel-Simulation

Folgende Ergebnisse sind aus **Bild 14** zu erkennen

- Auf der Funkstrecke entsteht eine Dämpfung von etwa 7dB, wenn der Mast genau auf der Funkstrecke steht. Eine vermeintliche vollständige Blockierung der Funkstrecke durch Blockierung der LOS (Line-of-Sight) gibt es für praktische Szenarien auch bei 13GHz feldtheoretisch nicht.
- Es entsteht eine maximale **Dämpfung von etwa 9.5dB**, wenn die Achse des Masts bei etwa 3m von der Funkstrecke entfernt steht.
- Es entsteht eine theoretische **Verstärkung von 2dB** aufgrund der gleichphasigen Überlagerung des direkten und des an der WEA gestreuten Signals, wenn der Mast bei einer Entfernung von 9.3m zur Funkstrecke steht.
- Bei der Entfernung von etwa 16m tritt theoretisch-numerisch eine kleine verbleibende Dämpfung von etwa 1dB auf.

Weitere Ergebnisse aus den zitierten Bildern:

Bild 17: Relative elektr. Feldstärke auf einem Orbitausschnitt ($\pm 0.5^\circ$) von einer Platte verschiedener Breite (0.5-6.5m), Höhe 20m, bei Erregung durch einen vertikalen Dipol

In **Bild 17** steht ein Teilmodell (20m Höhe) mit variablem Durchmesser von 0.5m bis 6.5m genau auf der Funkstrecke. Für alle Durchmesser wird die LOS formal blockiert. Es ergibt sich das qualitativ erwartete theoretische Ergebnis, dass die Dämpfung mit dicker werdendem Mast von 0.46dB bei 0.5m auf 7.6dB bei 6.5m zunimmt.

Bild 19: Relative elektr. Feldstärke auf einem Orbitausschnitt ($\pm 1^\circ$); Platte an Positionen von 0m bis 25m zur Funkstrecke, Breite 5m, Höhe 20m; Quelle vertikaler Dipol

In **Bild 19** wird das Streuverhalten eines Masts (Durchmesser 5m) für einen variablen Abstand zum Funkfeld von 0m bis 25m auf einem Teil-Orbit bei der Funkfeldlänge von 15.04km dargestellt. Es ergibt sich ein grundsätzlich sehr ähnliches funktionales Verhalten für alle Abstände mit einer Verdrehung, der dem Abstand des Modellmasts zur Funkstrecke entspricht.

Bild 20: Relative elektr. Feldstärke von einer Platte verschiedener Längen (5-50m) / Breite (1-5m) im Azimutwinkel 0° , bei Erregung durch einen vertikalen Dipol

Mit dem numerischen Ergebnis in **Bild 20** bis zu einer Höhe des Teilmodells von 50m wird durch das zu beobachtende Sättigungsverhalten nachgewiesen, dass eine Teilmodelllänge von etwa 20m für die numerische Berechnung der zusätzlichen Funkfelddämpfung hinreichend ist.

4.2.2 Beide/Zwei Masten

Bild 18: Relative elektr. Feldstärke auf einem Orbitausschnitt ($\pm 0.5^\circ$) von 2 Platten (H=20m), Breite 5.0, 6.17m bei Erregung durch einen vertikalen Dipol; Funkstrecke bei 0°

Die Überlagerung von 2 Masten zeigt **Bild 18** auf einem Teilorbit von $\pm 0.5^\circ$ in der Entfernung der Funkfeldlänge von 15.04km

1. Oben : Beide Masten im Abstand von 16.6m
2. Unten: Abstände beider Masten wie geplant 9.3m und 16.6m

Die Funkstrecke ist in **Bild 18** markiert und liegt in dieser Graphik bei dem Azimutwinkel von 0° ,

Es ist ein kleiner, aber nicht entscheidender Vorteil bei der oberen modifizierten Variante festzustellen wegen der etwas breiteren Dämpfungssenke von ca. 1dB. Gutachterlich wird die ursprüngliche Planung aber grundsätzlich auch als akzeptabel bewertet, insbesondere wenn ggf. eine zweite Antenne mit einem Durchmesser von 1m installiert werden sollte (s. Kap. 4.4).

4.3 Numerische Ergebnisse Rotorblätter N175

4.3.1 Modell Metallisches Blatt; Rotation

Aus **Bild 7** und **Bild 15** ist zu sehen, dass die Blattspitzen bei der Rotation mit der vorherrschenden Windrichtung (Süd-West, **Bild A - 2** „Windrose“) im gegebenen Höhenszenario formal die erste Fresnelzone gerade vollständig durchfahren.

In **Bild 15** wird als ein („unrealistischer“) „worst-case“ modelliert, dass das gesamte Rotorblatt aus Metall bestünde. Tatsächlich besteht das Blatt wie oben erläutert aus dielektrischem nicht-leitendem GFK mit einem integrierten, metallischem, drahtförmigem Blitzleiter der Dicke von etwa 1-2cm.

Bild 15: Modellierung und Rotation der Rotorblattspitze der N175 im Bereich der Funkstreckenverbindung; voll metallisches Blatt auch des dielektrischen GFK als „worst case“

Es wird eine einzelne Blattspitze modelliert und die Rotation simuliert von einer relativen Position von 200° bis 135° mit einer Vielzahl von diskreten Winkelpositionen und damit wird die markierte Fresnelzone bei der Rotation deutlich überstrichen.

Maximale Dämpfungswerte von etwa 1.5dB und maximale Verstärkungswerte von etwa 1.4dB sind für dieses vollmetallische Blatt zu sehen. Dieses Verhalten wiederholt sich pro WEA drei Mal für jedes Blatt bei jeder vollen Rotation des Rotors bei entsprechender Windrichtung.

4.3.2 Modell Blitzableiter; Rotation

Bild 16: Modellierung und Rotation der Rotorblattspitze der N175 im Bereich der Funkstreckenverbindung; Modellierung des Blitzableiters durch eine 10cm breite metallische Platte

Bild 16 modelliert und simuliert das gleiche Geometrieszenario wie in **Bild 15** - außer dass jetzt das Rotorblatt durch einen Blitzableiter modelliert wird. Die Breite des Blitzableiters wird zu 10cm festgelegt, was deutlich breiter bzw. dicker ist als ein realer drahtförmiger Blitzableiter. Damit werden Reserven für die Effekte des restlichen GFK-Materials vorgesehen.

Als Ergebnis ist zu sehen, dass die Funkfelddämpfung maximal nur etwa 0.15dB beträgt.

Dieses Verhalten wiederholt sich pro WEA drei Mal bei jeder vollen Rotation des Rotors. Sollte der seltene Fall eintreten, dass die Rotoren beider WEAs zufällig zur gleichen Zeit die Funkstrecke durchfahren, wird die summarische Funkfelddämpfung immer noch $<0.3\text{dB}$ sein.

Ein Wert von 0.15dB für die Funkfelddämpfung ist auch zu erwarten, wenn ein Rotorblatt zufällig genau in der Funkstrecke stehen bleiben sollte.

4.3.3 Überlagerung Mast und Rotoren

Die Effekte der beiden WEAs bzw. Masten und Rotoren überlagern sich (s. **Bild 18**). In **Bild 18** ist ein numerisch geometrisch stabiles Szenario modelliert, was in der Praxis bei (starkem) Wind nicht ganz realistisch sein wird. Es wird aber erwartet, dass die Toleranzen zu Funkfelddämpfungen von $<1.5\text{dB}$ für die beiden Masten bei der anzuwendenden rss-Überlagerung angesichts der Wellenlänge von 2.3cm (13GHz) führen werden. Die Überlagerung der Dämpfungseffekte für den Mast mit denen der Rotoren muss in jedem Fall durch eine rss-Überlagerung wegen der unkorrelierten Bewegungseffekte bei Wind durchgeführt werden. Es werden dadurch überlagerte „worst-case“-Werte der Funkfelddämpfung von $<1.6\text{dB}$ für beide operationellen WEAs für Windrichtungen im Bereich SW erwartet.

Die Maschinenhäuser beider WEAs können vernachlässigt werden, da diese in deutlicher (höherer) Entfernung zur Funkstrecke und damit formal auch weit außerhalb der ersten Fresnelzone positioniert sind.

4.4 Ergebnisse und Vorschläge

Folgende Vorschläge werden aufgrund der Untersuchungen gemacht:

1. Es wurde numerisch untersucht, ob die östliche WEA ebenfalls bis zu einem etwas vergrößerten Abstand z.B. von 16.6m von der Funkfeldverbindung statt des bisher geplanten Abstands von 9.3m aufgebaut werden sollte (s. Kap. 4.2.2. Es ergibt sich kein entscheidender Vorteil, wie in Kap. 4.2.2 gutachterlich bewertet wurde.

2. Sollte in der Richtfunkstrecke tatsächlich eine Antenne mit einem Durchmesser von 0.6m installiert sein, so bietet es sich als Empfehlung an, diese Antenne gegen eine Antenne mit dem Durchmesser von 1m auszutauschen. Damit wird die Schwundreserve um mindestens 3dB erhöht, was die zusätzlichen Funkfelddämpfungen durch die beiden WEAs in jedem Fall sicher kompensiert.

4.5 Kommentierung der „Fälle 1 bis 3“ im Schreiben des LZPD/HSK

Fall 1: Dieser Fall ist in der Realität nicht gegeben. Die WEAs stehen nicht auf der Funkstrecke, sondern planerisch mindestens 9.3m bzw. 16.6m entfernt. Die numerischen Untersuchungen haben aber auch gezeigt, dass die maximale tatsächliche Funkfelddämpfung etwa 7dB wäre, selbst wenn eine WEAs genau auf der Funkstrecke stehen würde.

Fall 2: Es wurde feldtheoretisch-numerisch simuliert, dass die maximale Funkfelddämpfung durch die Rotoren realistisch etwa 0.3dB beträgt, sicher kleiner als 0.5dB ist. Dieser Wert kann einer digitalen Richtfunkverbindung mit einer Schwundreserve von 25dB sicher keine Probleme verursachen.

Fall 3: Die numerischen Modellierungen und Berechnungen haben gezeigt, dass die beiden stationären WEA-Masten in den geplanten Entfernungen zur Funkstrecke nur geringe zusätzliche Funkfelddämpfungen verursachen. Der referenzierte „Jitter“ kann deshalb ggf. nur durch die sich drehenden Rotoren hervorgerufen werden. Für die Rotoren wurde eine maximale Funkfelddämpfung durch 3D-Simulationen nach dem Stand der Technik von <0.5dB ermittelt. Ein zusätzlicher, jeweils kurzzeitiger Dämpfungswert von 0.5dB mit der Wiederholfrequenz von etwa maximal 1Hz kann einem modernen digitalen Richtfunksystem mit einer modernen angepassten AGC-Regelung bei einer bestehenden Schwundreserve von 25dB nach gutachterlicher Bewertung keine relevanten sogenannten „Jitterprobleme“ verursachen, die die RiFu-Datenübertragung (QAM 256) gefährden könnten.

5 Zusammenfassung

In diesem Gutachten werden die Effekte von 2 geplanten WEAs N175 auf eine BOS-13GHz-Richtfunkstrecke von 15.04km-Länge bei Meschede zwischen dem Funkturm auf dem Schomberg und dem Funkturm auf dem Österberg mit Hilfe von numerischen Feldsimulationen nach dem Stand der Technik untersucht und bewertet. Eine der beiden bisher geplanten WEAs steht formal am Rand der ersten Fresnelzone.

Die WEA N175 wird in 3D modelliert bzw. teilmodelliert soweit feldtechnisch möglich und erforderlich. Die Streustrahlung wird am Empfangsort **komplex nach Betrag und Phase** mit der direkten Strahlung überlagert. Die Ergebnisse gelten reziprok für beide Standorte der Funkstrecke.

Die Masten werden durch Kegelstümpfe mit den gegebenen Dimensionen der metallisch angenommenen Masten (=“worst-case“) in der Nähe der Funkstreckenverbindung modelliert und systematisch feldtheoretisch numerisch analysiert.

Die hybriden 3 Rotorblätter bestehend aus dielektrischem und praktisch nicht-leitendem GFK mit integriertem, drahtförmigen Blitzableiter werden in 2 Versionen untersucht, einmal als 3D-

Objekt und voll-metallisch als (unrealistischer) „worst-case“ mit den Querabmessungen des Blattes im Bereich der Funkstrecke und weiter modelliert nur durch den Blitzableiter als eher realistischer „best case“ repräsentiert durch eine metallische auf 10cm verbreitete Platte.

Es wird ausgeführt, dass die Anwendung und Beurteilung des gegebenen Falls einer WEA in der Nähe einer Richtfunkstrecke mit der Fresnelzonentheorie technisch nicht schlüssig ist und nicht Stand der Technik ist.

Als 13GHz-Richtfunkantennen werden rotationsförmige Parabolspiegel mit Durchmessern von 60cm und 100cm mit Halbswertsbreiten von etwa 2.7° und 1.5° eingesetzt. Hiermit ist eine Diskriminierung der beiden WEAs und auch des Bodens nicht möglich. Es kann aber angenommen werden, dass die effektive Bodendämpfung durch die große elektrische Rauigkeit bei 13GHz und durch die Oberflächenmaterialien groß ist.

Es werden systematische Feldsimulationen und Beugungsdämpfungen auf der Funkstrecke für die beiden Masten und für passierende Rotorstellungen eines repräsentativen Blattes durchgeführt und statistisch ausgewertet.

Es ergibt sich für das vollmetallische 3D-Mast-Modell in Abständen von jeweils 16.6m zur Funkstrecke eine maximale zusätzliche Funkfelddämpfung von etwa 1dB bis 1.5dB.

Bei der Passage eines Rotorblattes durch die Funkstrecke ergeben sich kurzzeitige zusätzliche Funkfelddämpfungen von realistisch maximal etwa 0.5dB. Die Dämpfungseffekte des metallischen Blitzableiters alleine ergeben sich numerisch zu maximal 0.2dB, wenn man noch eine seltene Überlagerung der Blätter beider WEAs annimmt.

Es wird zusammenfassend gutachterlich festgestellt, dass die systematisch berechneten Funkfelddämpfungen hervorgerufen durch die geplanten beiden WEAs N175 selbst im „worst-case“ von etwa 1,6dB angesichts der bestehenden Schwundreserve von 25dB zu keinen inakzeptablen Beeinträchtigungen der digitalen BOS-13GHz Richtfunkverbindung führen werden.

Weiter wird empfohlen, auf beiden Seiten der Richtfunkstrecke ggf. Antennen mit dem größeren Durchmesser von 1m zur Vergrößerung der Schwundreserve zu verwenden. Hiermit würde die leichte Vergrößerung der Funkfelddämpfung sicher kompensiert.

Steinheim, den 23.06.2025

NAVCOM
Consult
Dr.-Ing. Gerhard Greving
Ludwigsburger Str. 23 / D-71711 Steinheim
Tel. (+49) 7144 862560, Fax (+49) 7144 862561



6 Tabellen

<u>Standort 1 Schombergturm (Koordinaten aus Internet) :</u> 51°14'17.33"N 8° 0'15.01"E Höhe/Boden Schombergturm: 635müNN Höhe der Senderantenne: 688m
<u>Standort 2 Funkturm Österberge (Koordinaten aus Internet):</u> 51°18'10.20"N 8°11'37.15"E Höhe Senderfußpunkt (Boden): 587 m NHN Höhe Senderantenne: 645 müNN

Tabelle 2: Daten der LZPD-Richtfunkstrecke 13 GHz ; Streckenlänge 15.04km (**Bild 1, Bild 2**)

<u>Standort der Windenergieanlagen WEA N175</u>
 W1 51°16'39.31"N 8° 7'9.22"E Bodenhöhe 566müNN W2 51°16'30.75"N 8° 6'46.93"E Bodenhöhe 562müNN

Tabelle 3: Position und Daten der WEAs Nordex N175; Nabenhöhe 179m, Rotordurchmesser 175m, Maximalhöhe 266.5m (**Bild 5**)

	D/ft	G/dB	-3dB	F/B				
13GHz 12.7-13.25	1	30.9	4.7	5	Class 3	N/A	A-ANT-13G-12-C-A	VHLP1-13
	2	36	2.7	6	Class 3	N/A	A-ANT-13G-24-C-A	VHLP2-13
	4	42	1.3	68	Class 3	Cat B	A-ANT-13G-48-C-A	VHLP4-13
	6	45.2	0.9	72	Class 3	Cat A	A-ANT-13G-72-C-A	VHLP6-13

Tabelle 4: Daten von 13GHz Parabolantennen der Fa. Andrews

7 Bilder / Ergebnisse

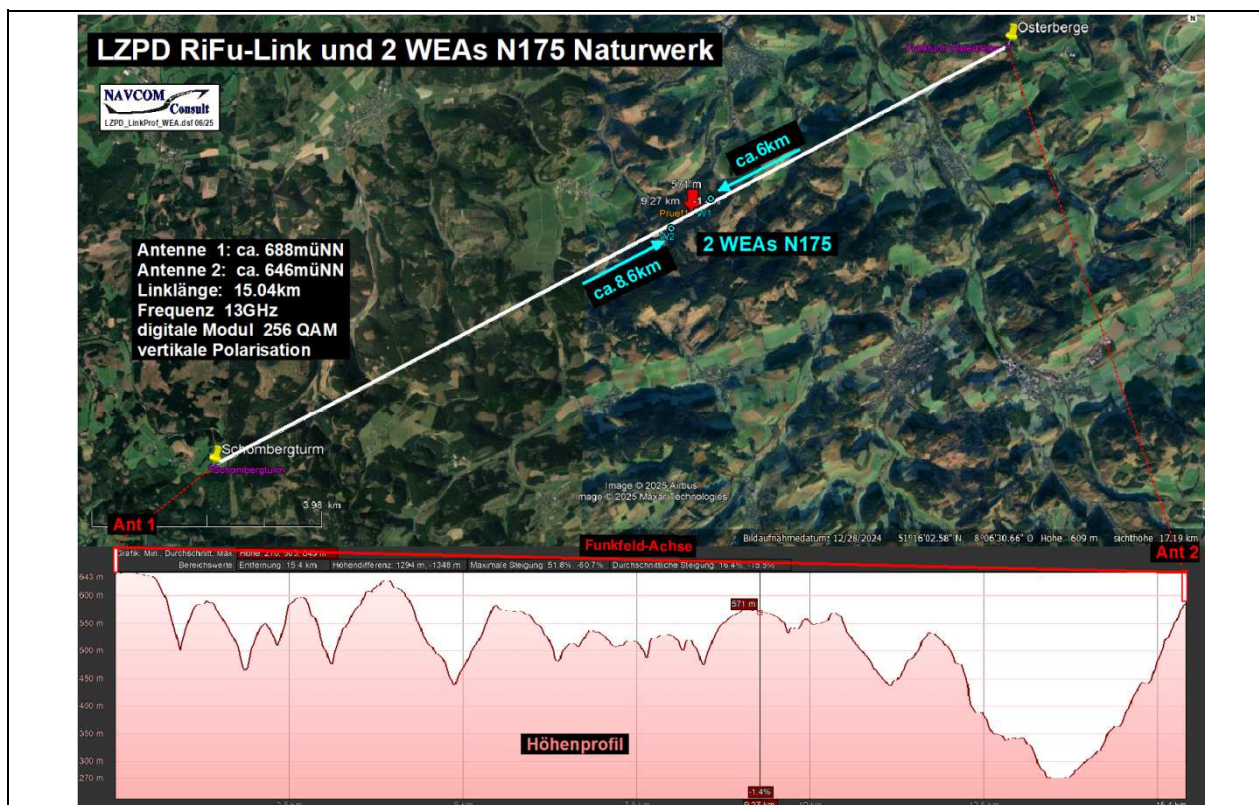


Bild 1: LZPD-Richtfunkstrecke Draufsicht und Geländeprofil; Position der Endstellen und der 2 N175 ; Vegetation/Bewuchs

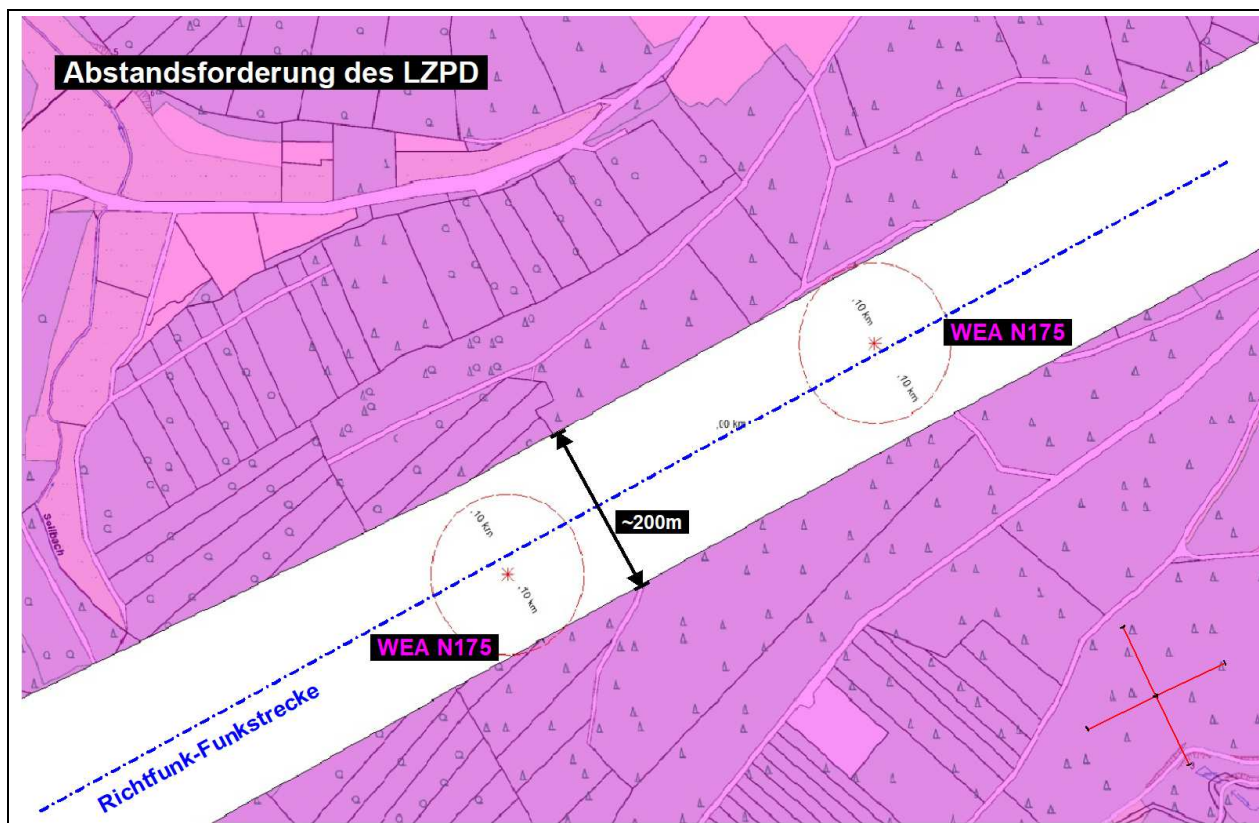


Bild 2: Richtfunkstrecke LZPD und 2 N175 gem. Planung; Forderung LZPD mit Dimensionen



Bild 3: Österberg-Funkturm mit LZPD-13GHz-Antenne in 646müNN absoluter Höhe

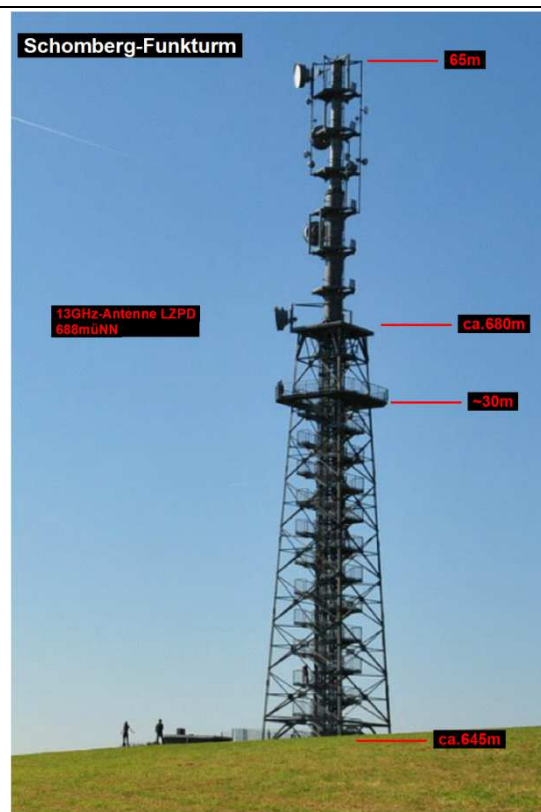


Bild 4: Schomberg-Funkturm mit LZPD-13GHz-Antenne in 688müNN absoluter Höhe

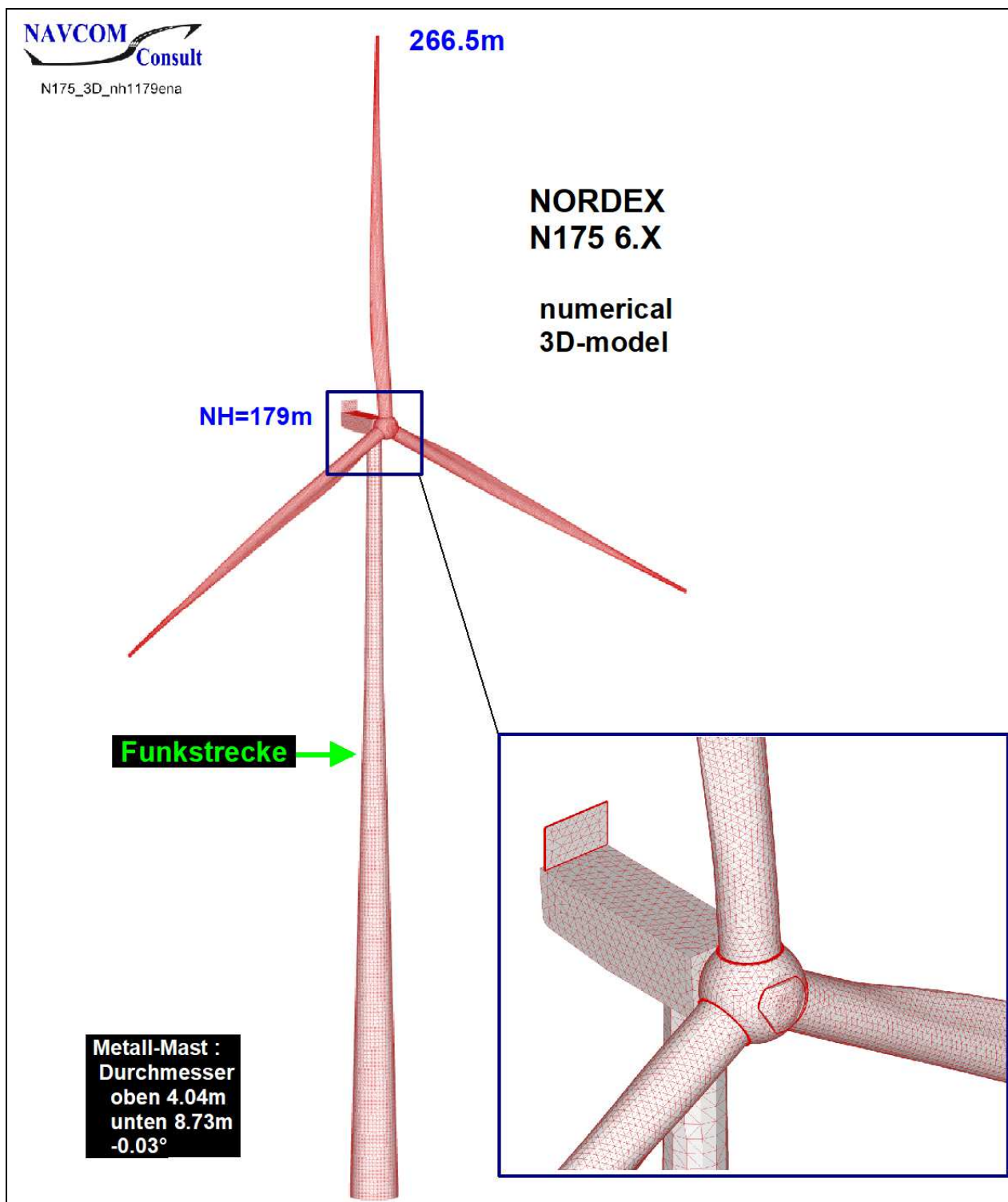


Bild 5: Nordex N175; numerisches, trianguliertes 3D-Modell; Maximalhöhe 266.5m; voll-metallische WEA; reduzierte Zahl der Patche

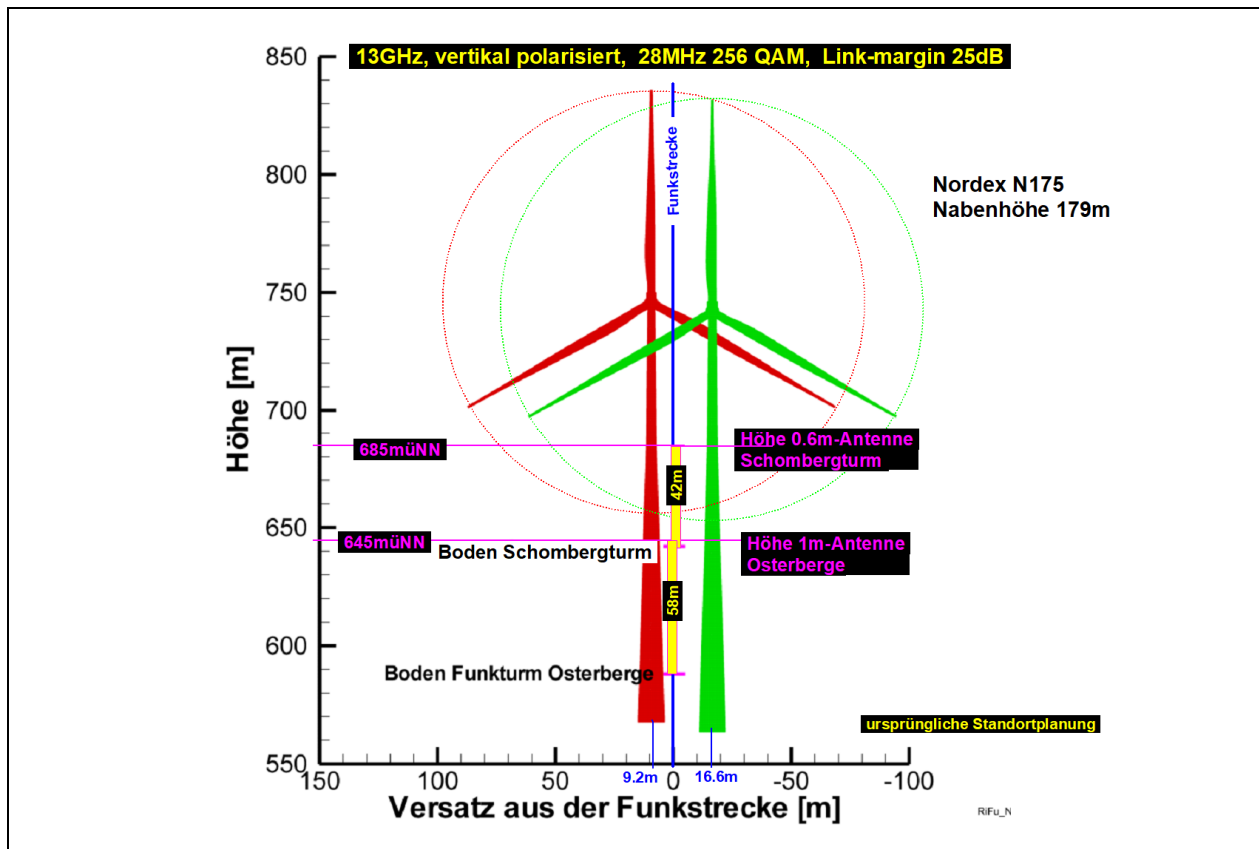


Bild 6: LZPD-Richtfunkstrecke Seitenansicht in Richtung der Funkstrecke mit WEAs N175; mit Turm, Nabe und Rotorblätter und Rotorkreise

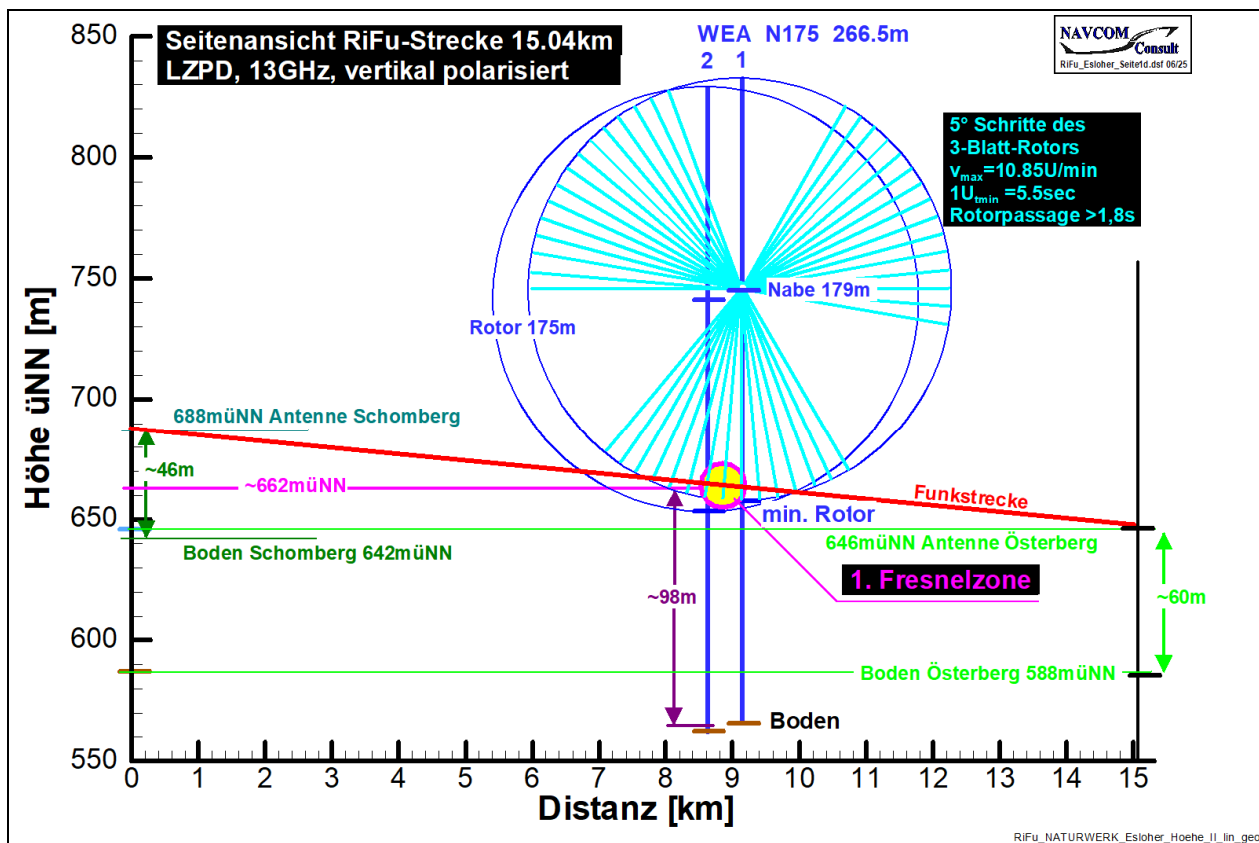


Bild 7: LZPD-Richtfunkstrecke Seitenansicht und 1. Fresnelzone; Positionen WEAs N175 bei Eslohe; Dimensionen; diskrete 5°-Positionen des 3-Blatt-Rotors

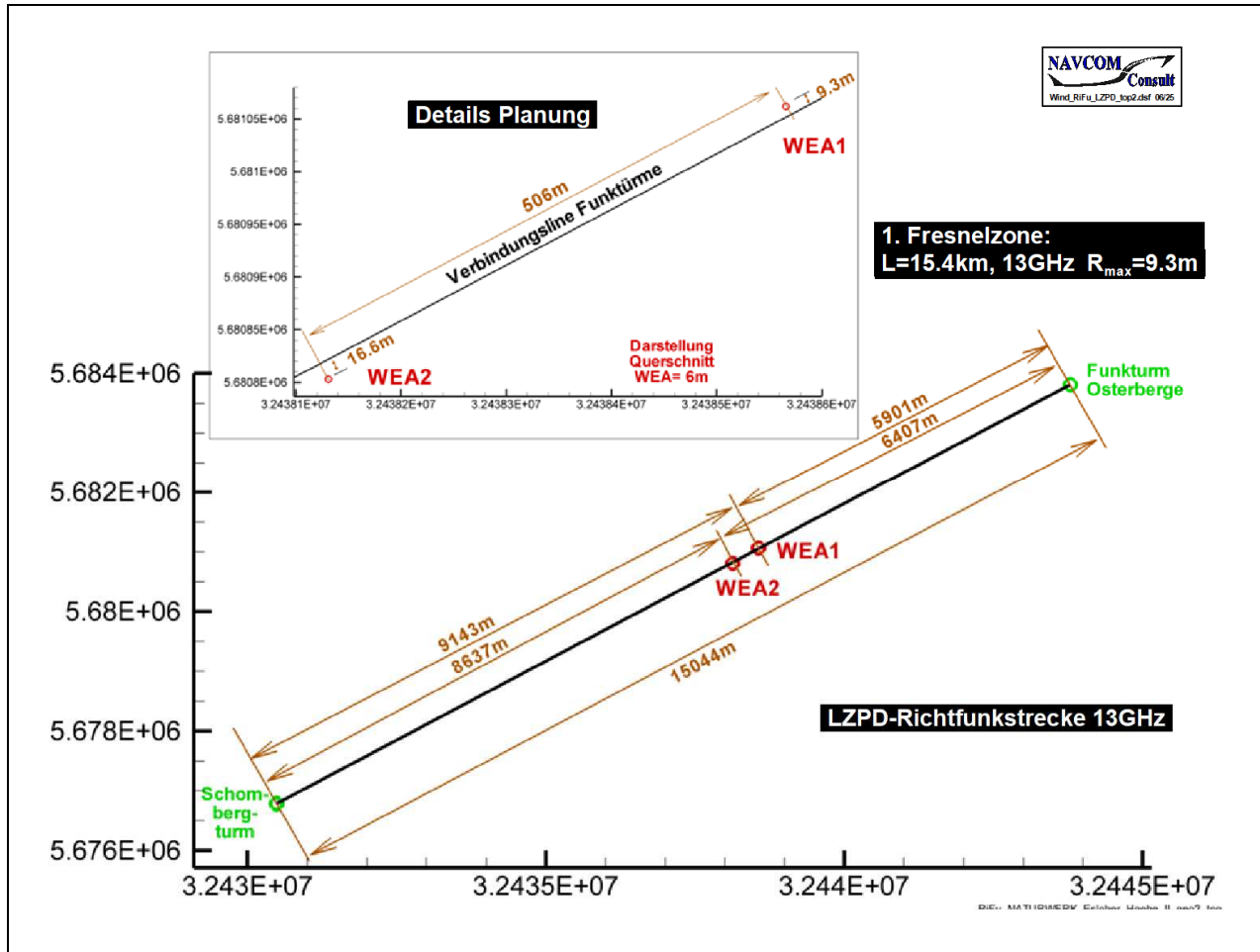


Bild 8: LZPD-Richtfunkstrecke 13GHz (Schomberg – Österberg; bei Meschede); Draufsicht mit WEAs N175;

	D/ft	G/dB	-3dB	F/B				
13GHz 12.7-13.25	1	30.9	4.7	5	Class 3	N/A	A-ANT-13G-12-C-A	VHLP1-13
	2	36	2.7	6	Class 3	N/A	A-ANT-13G-24-C-A	VHLP2-13
	4	42	1.3	68	Class 3	Cat B	A-ANT-13G-48-C-A	VHLP4-13
	6	45.2	0.9	72	Class 3	Cat A	A-ANT-13G-72-C-A	VHLP6-13

Bild 9: Beispielhafte Daten von 13GHz-Richtunkantennen (Fa. Andrews; rotationssymmetrische Parabolspiegel)

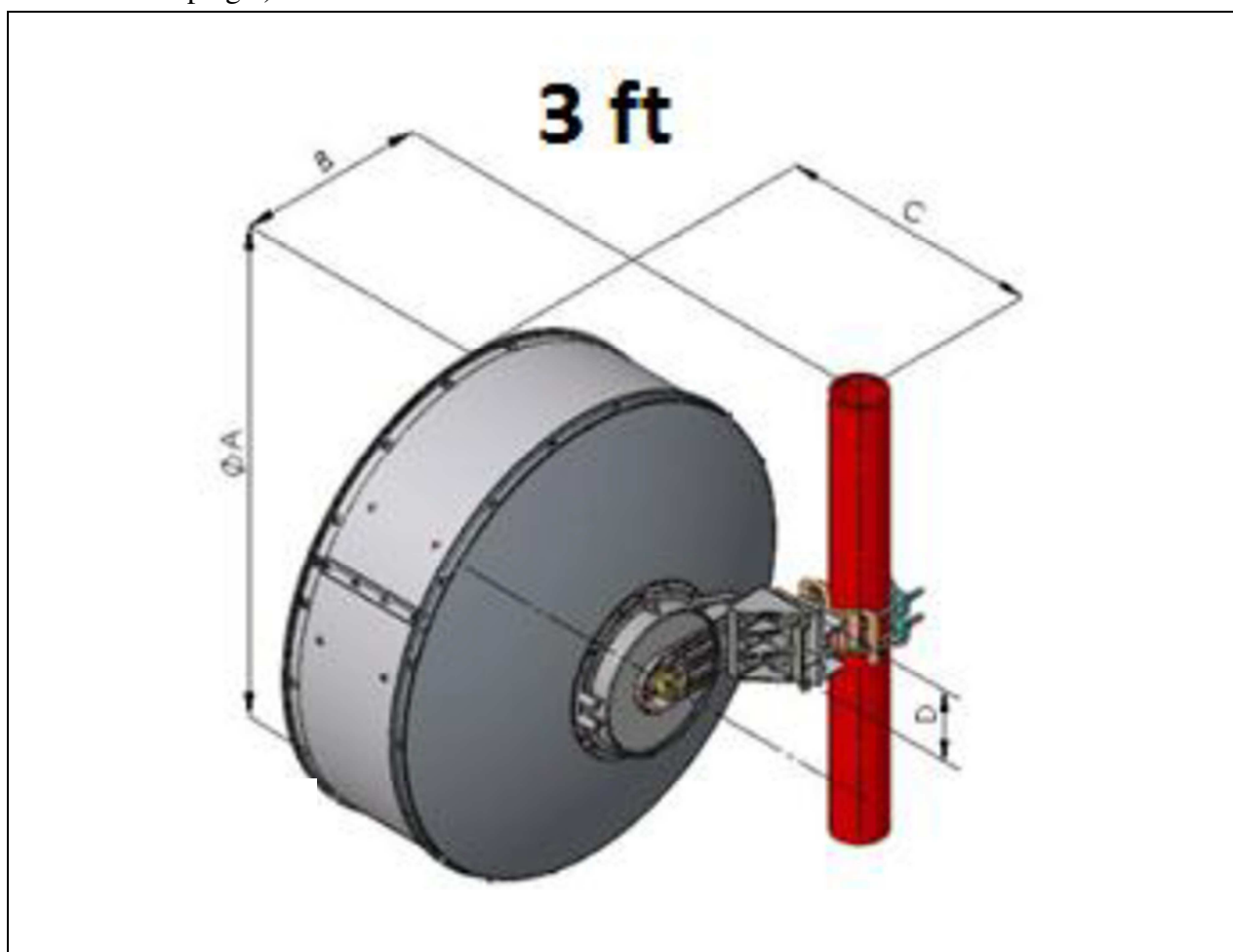


Bild 10: Beispiel einer typischen 13GHz-Rifu-Antenne (Rotationsförmige Parabolantenne 3ft, Fa. Andrews mit Radom)

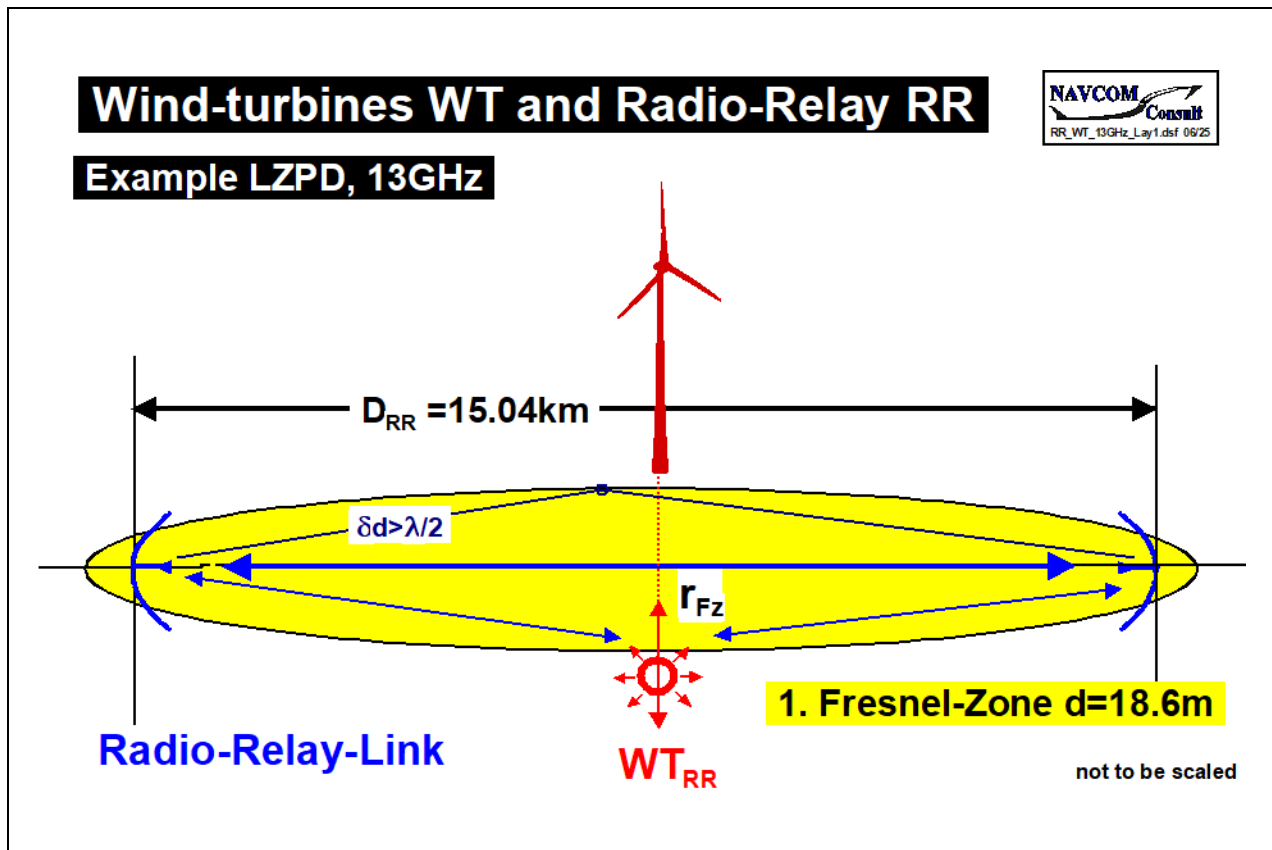


Bild 11: Prinzipaufbau Richtfunkverbindung BOS-13GHz; Fresnelzone und WEA als Streuer

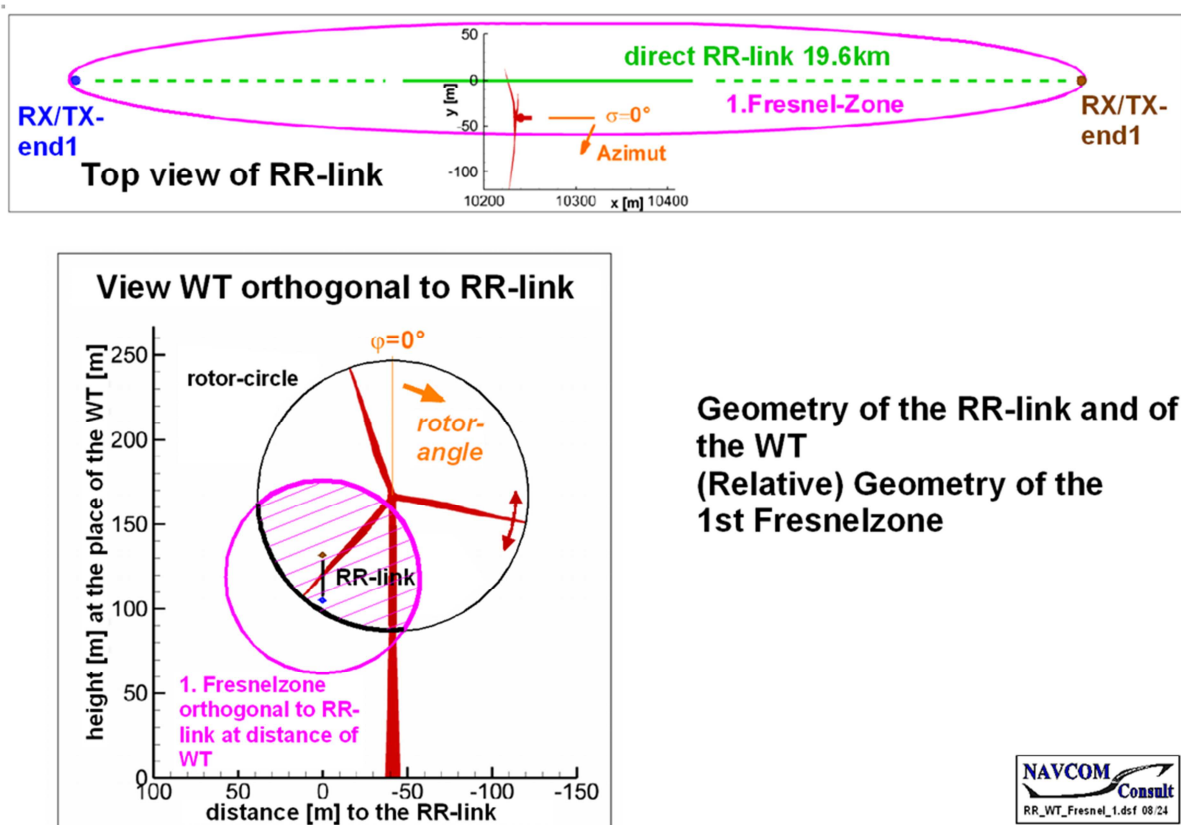


Bild 12: Theoretisch numerischer Aufbau der 3D-Simulationen (aus: ICEAA 2024 Lissabon)

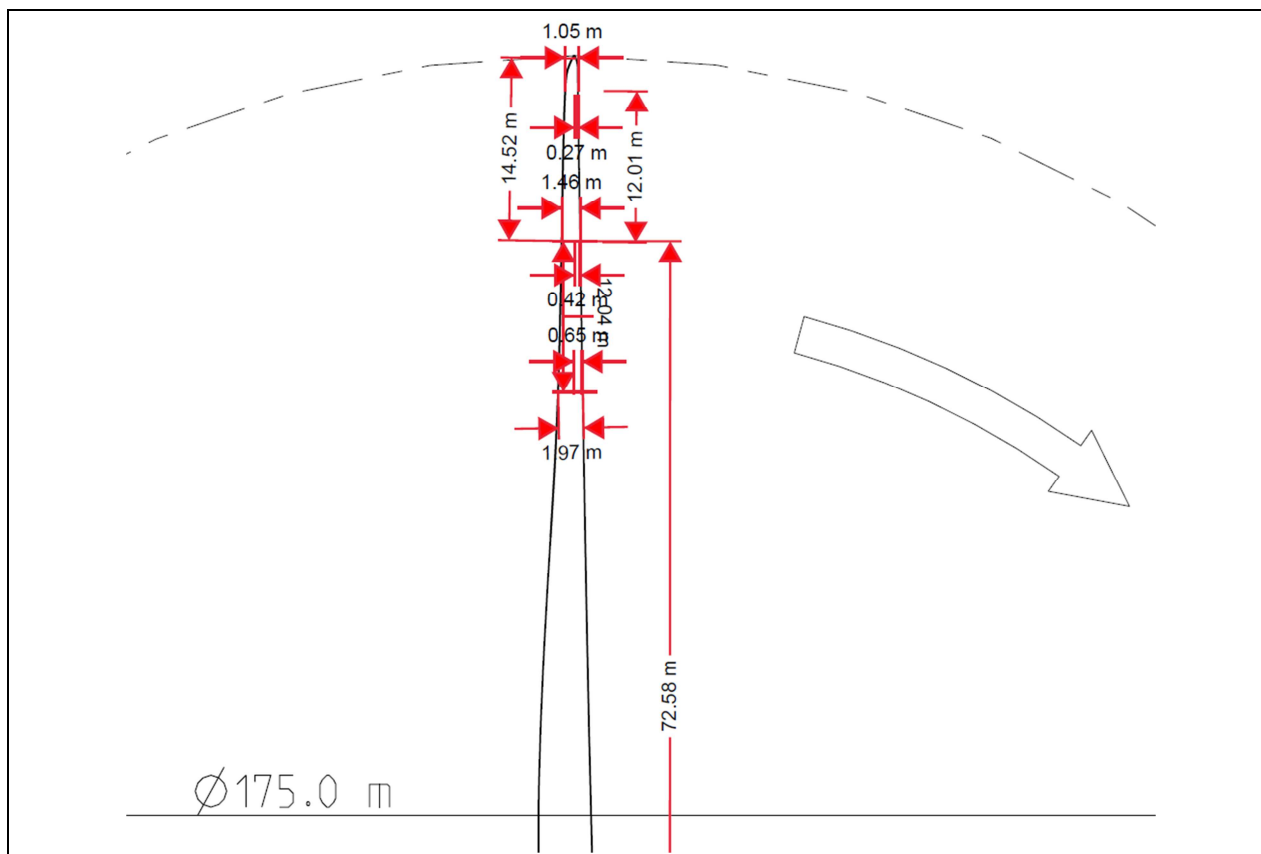


Bild 13: Modellierung der Rotorblattspitze der N175 im Bereich der Funkstreckenverbindung

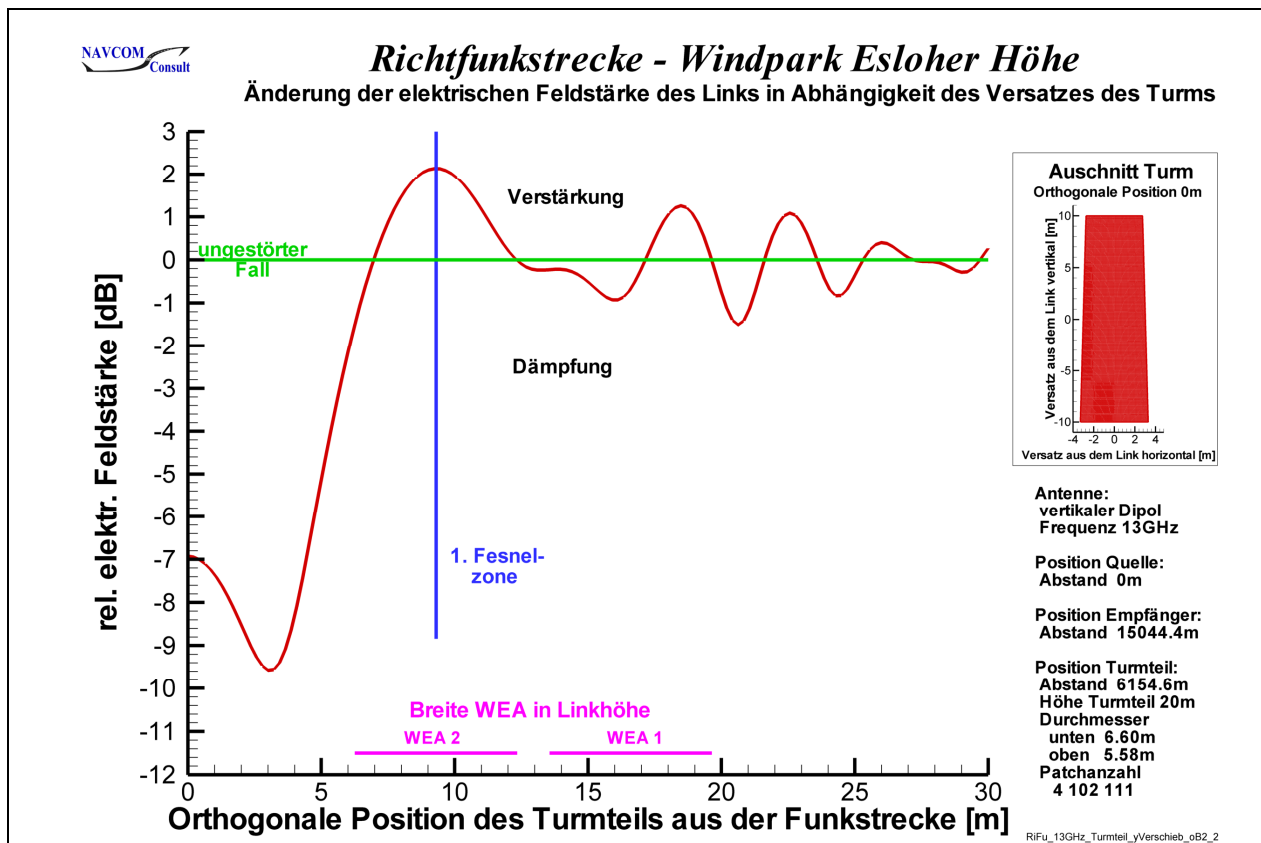


Bild 14: Effekte auf die Feldstärke des RiFu-Links durch parametrische Verschiebung eines Modells des Masts der N175 im Bereich der Funkstrecke; fallbezogene Fresnel-Simulation

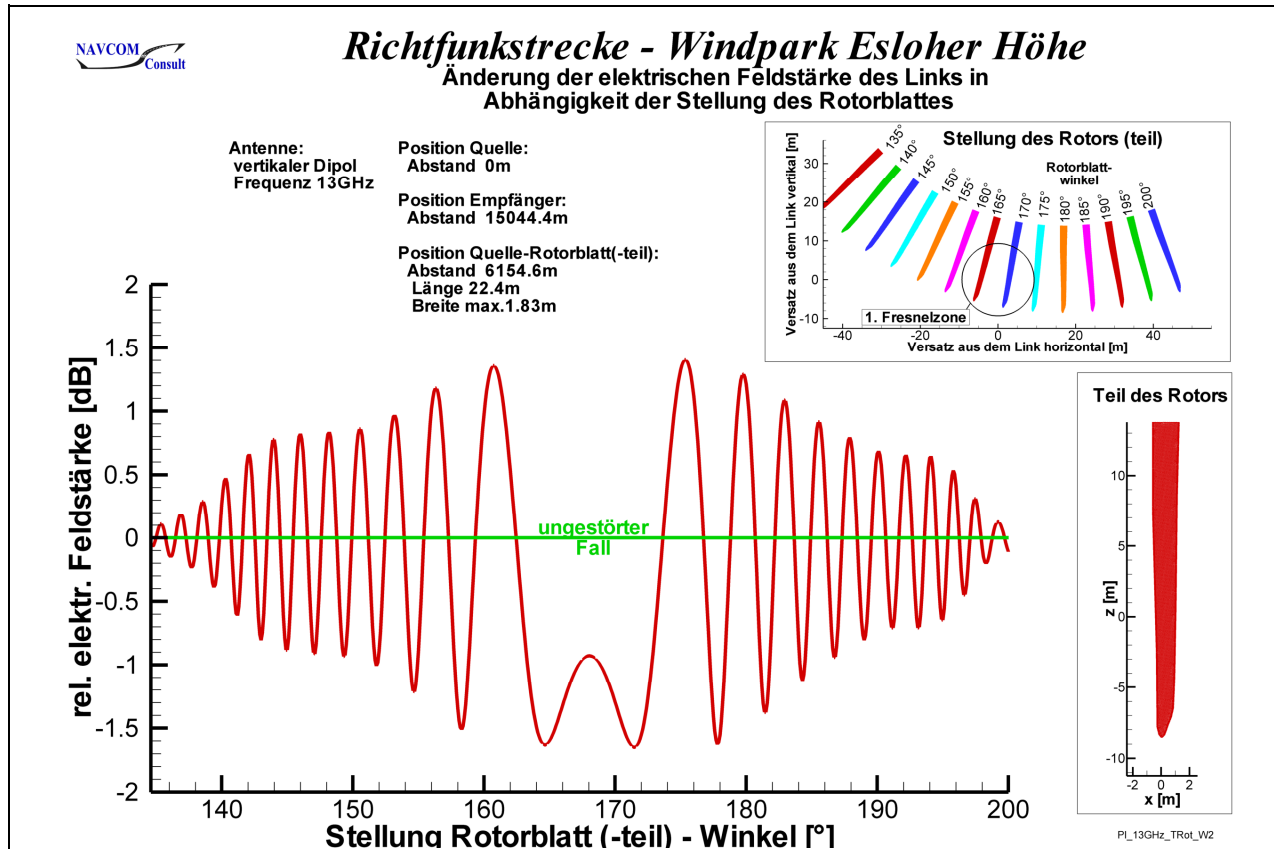


Bild 15: Modellierung und Rotation der Rotorblattspitze der N175 im Bereich der Funkstreckenverbindung; voll metallisches Blatt auch des dielektrischen GFK als „worst case“

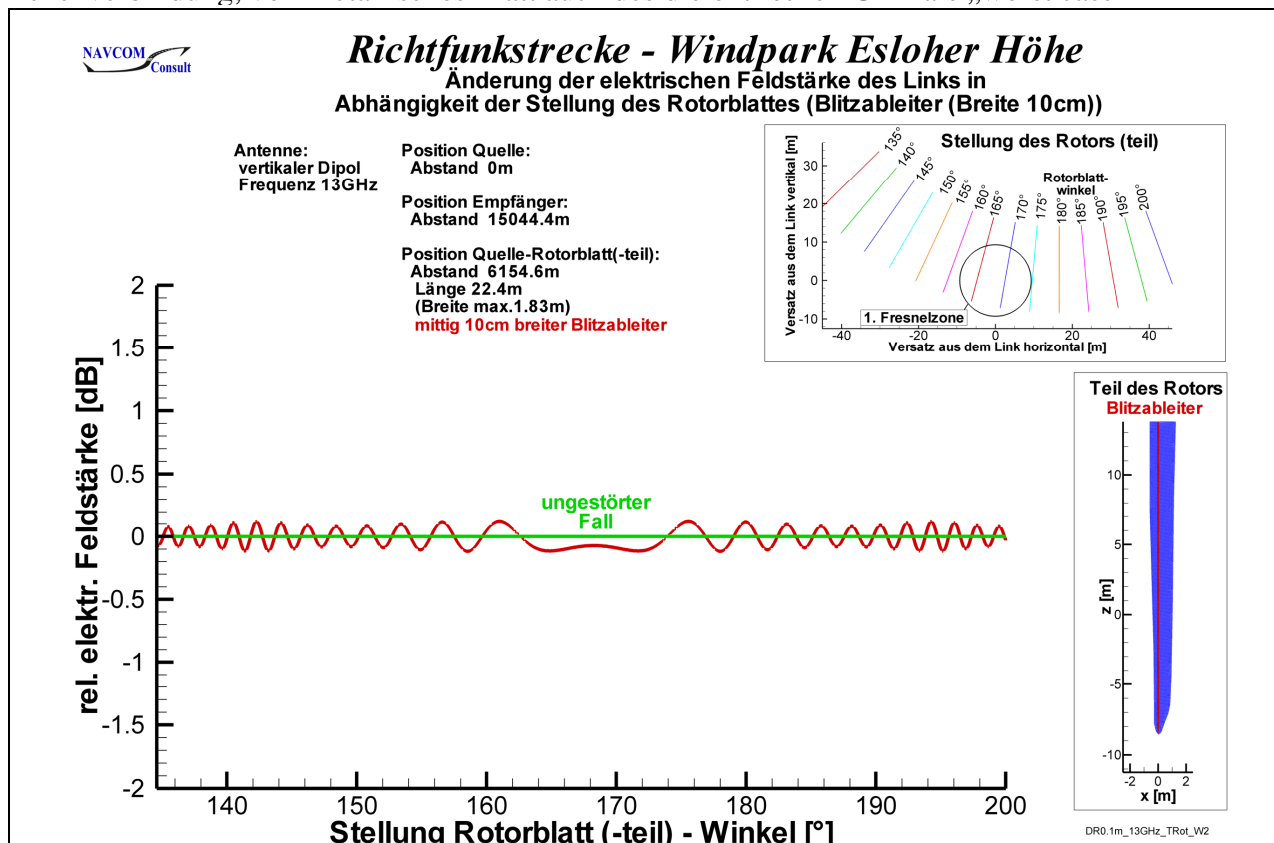


Bild 16: Modellierung und Rotation der Rotorblattspitze der N175 im Bereich der Funkstreckenverbindung; Modellierung des Blitzableiters durch eine 10cm breite metallische Platte

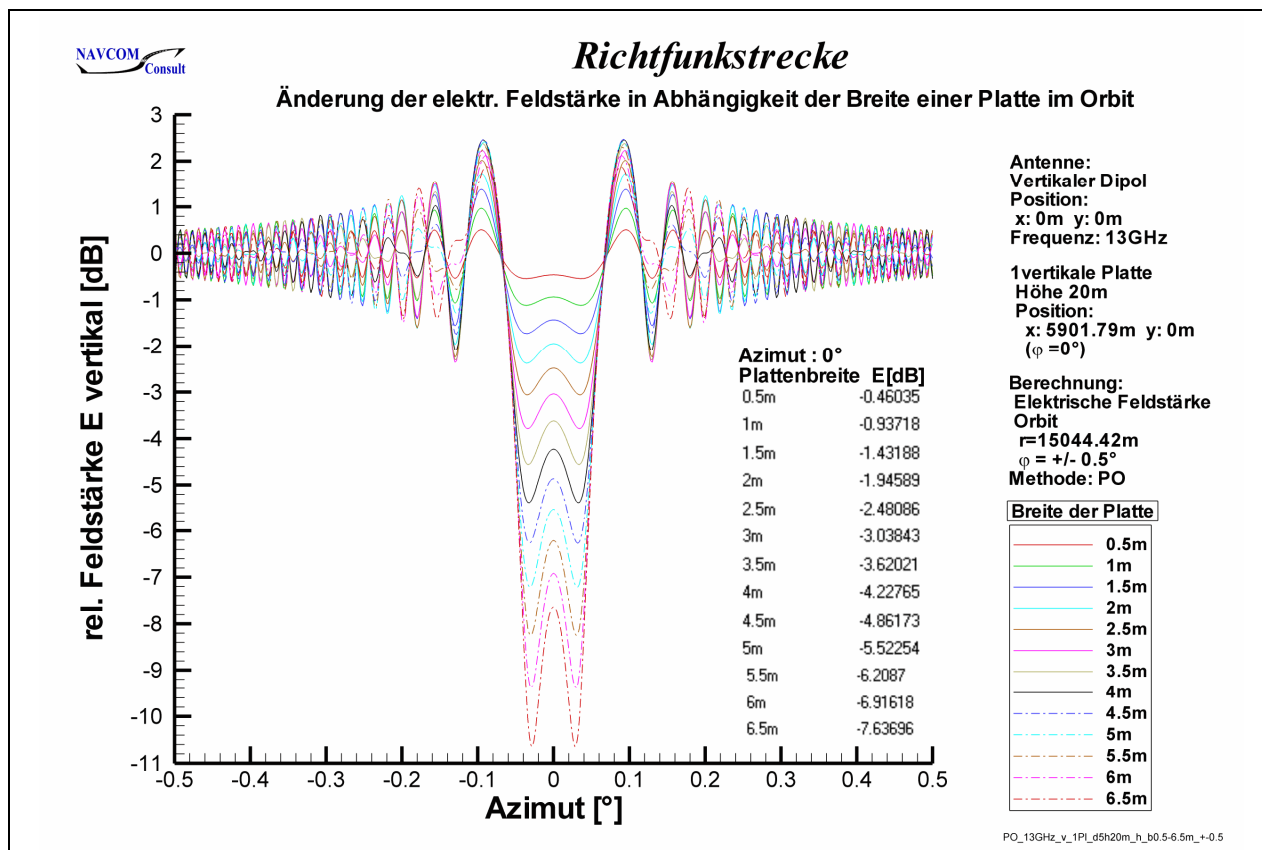


Bild 17: Relative elektr. Feldstärke auf einem Orbitausschnitt ($\pm 0.5^\circ$) von einer Platte verschiedener Breite (0.5-6.5m), Höhe 20m, bei Erregung durch einen vertikalen Dipol

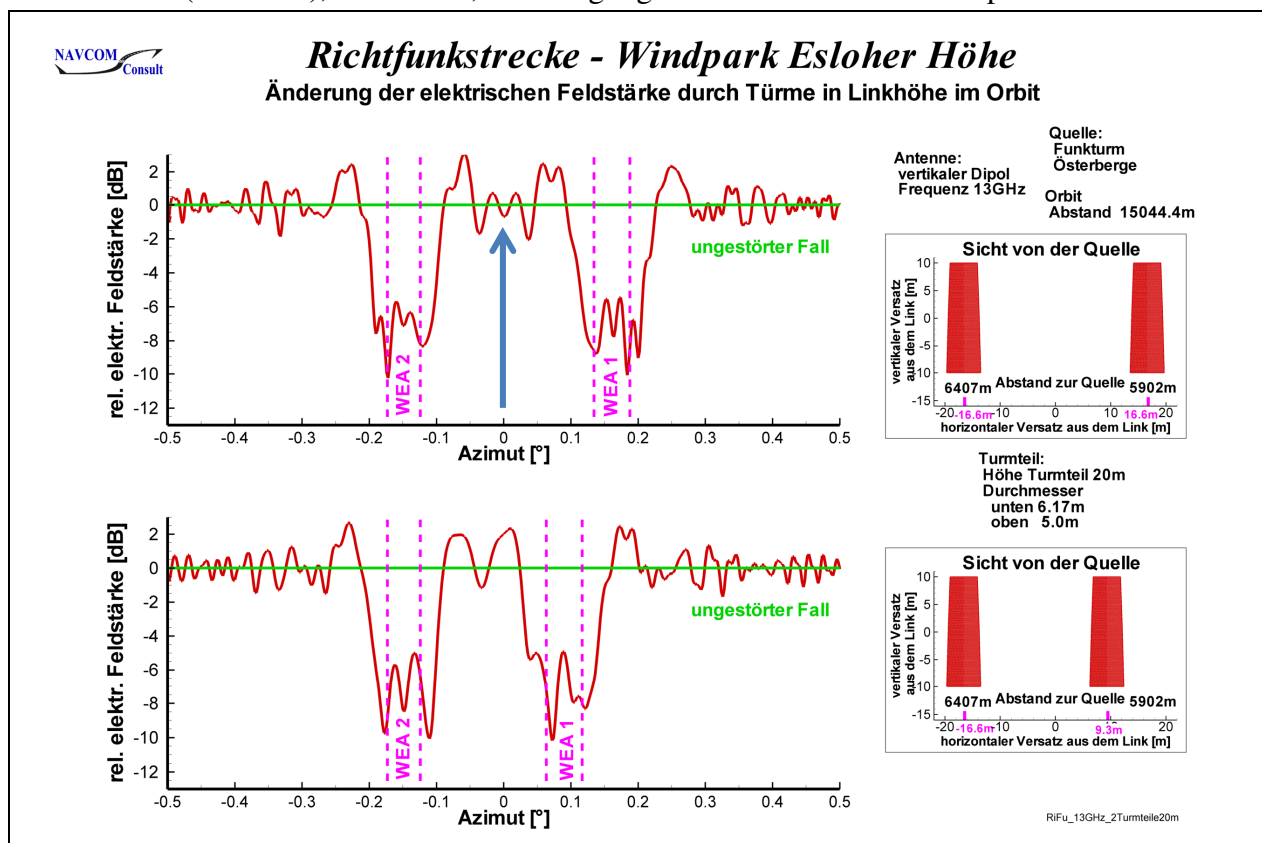


Bild 18: Relative elektr. Feldstärke auf einem Orbitausschnitt ($\pm 0.5^\circ$) von 2 Platten (H=20m), Breite 5.0, 6.17m bei Erregung durch einen vertikalen Dipol; Funkstrecke bei 0°

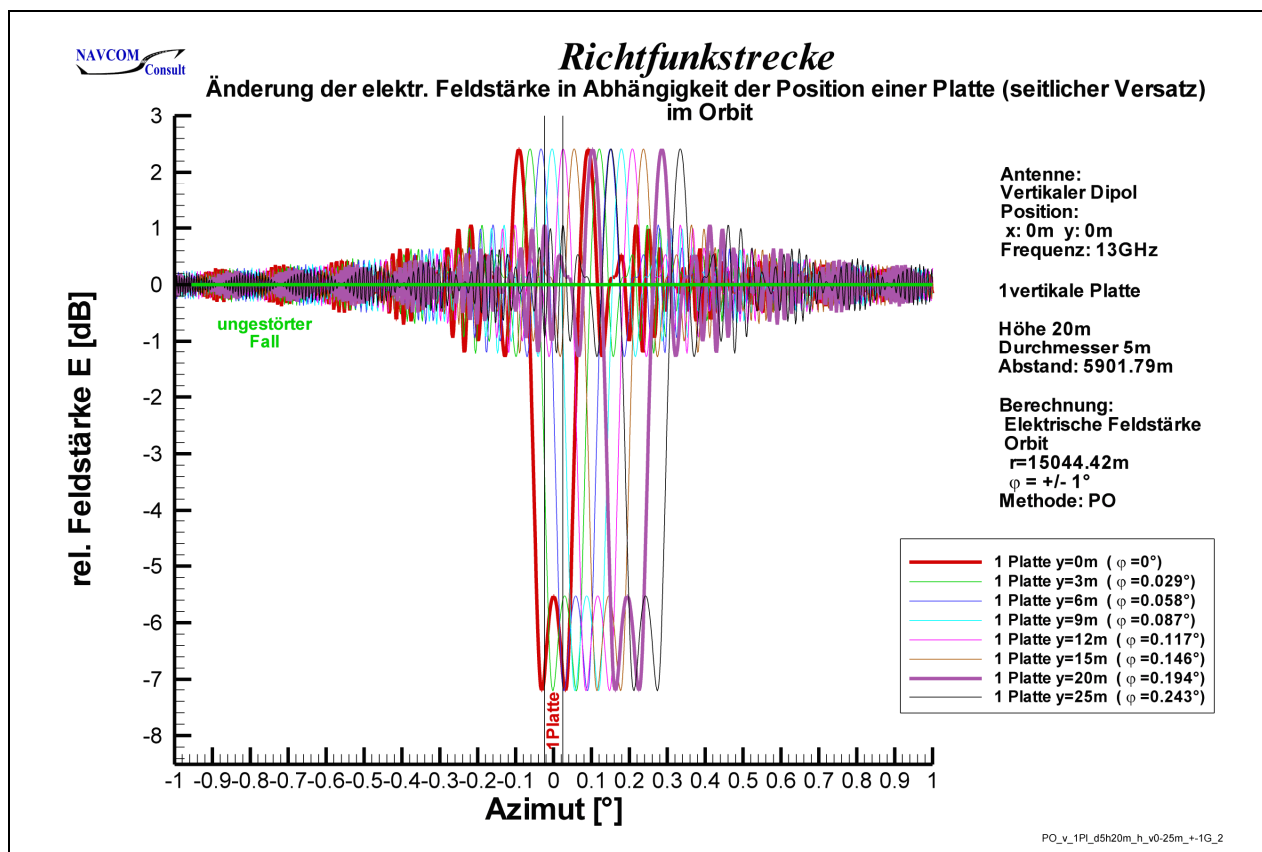


Bild 19: Relative elektr. Feldstärke auf einem Orbitausschnitt ($\pm 1^\circ$); Platte an Positionen von 0m bis 25m zur Funkstrecke, Breite 5m, Höhe 20m; Quelle vertikaler Dipol

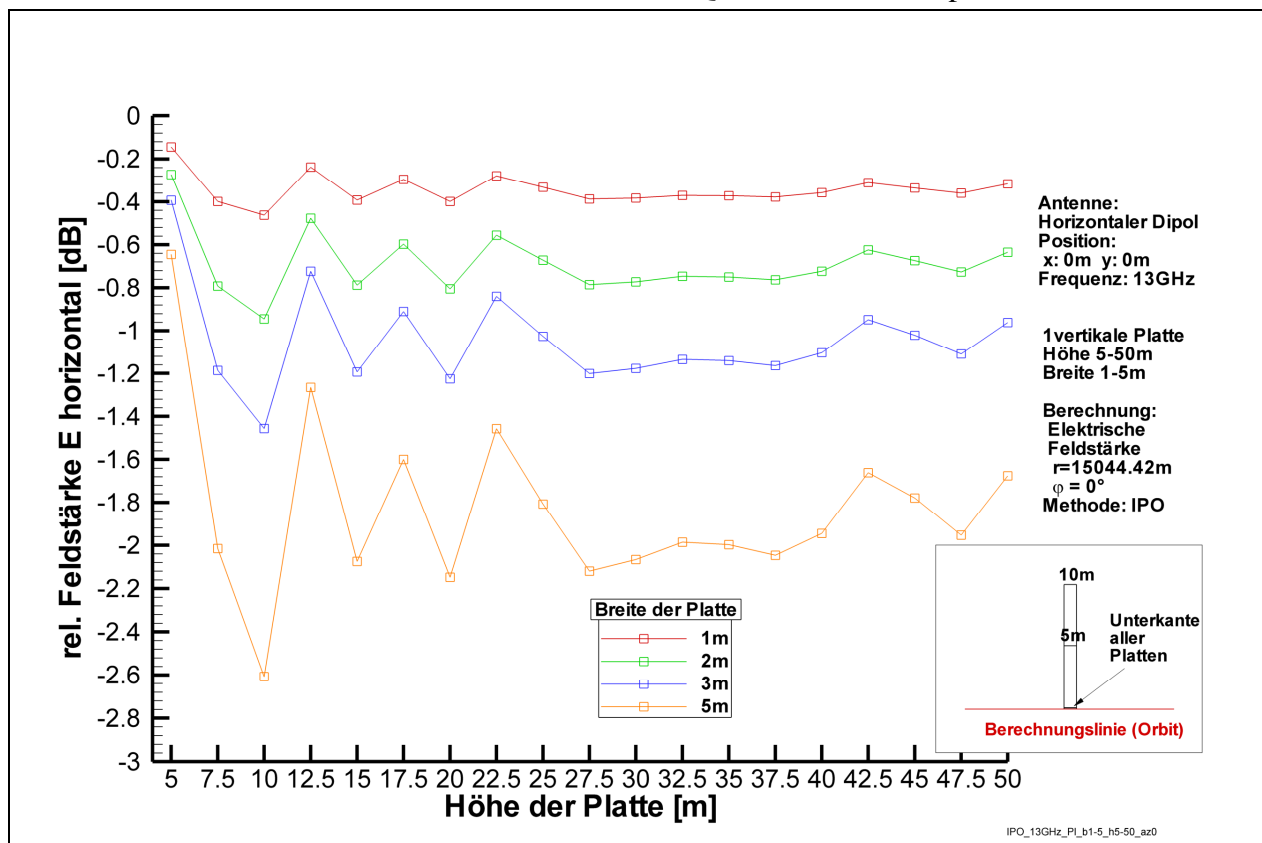


Bild 20: Relative elektr. Feldstärke von einer Platte verschiedener Längen (5-50m) / Breite (1-5m) im Azimutwinkel 0° , bei Erregung durch einen vertikalen Dipol

8 Anhang A (Weitere Bilder und Daten)

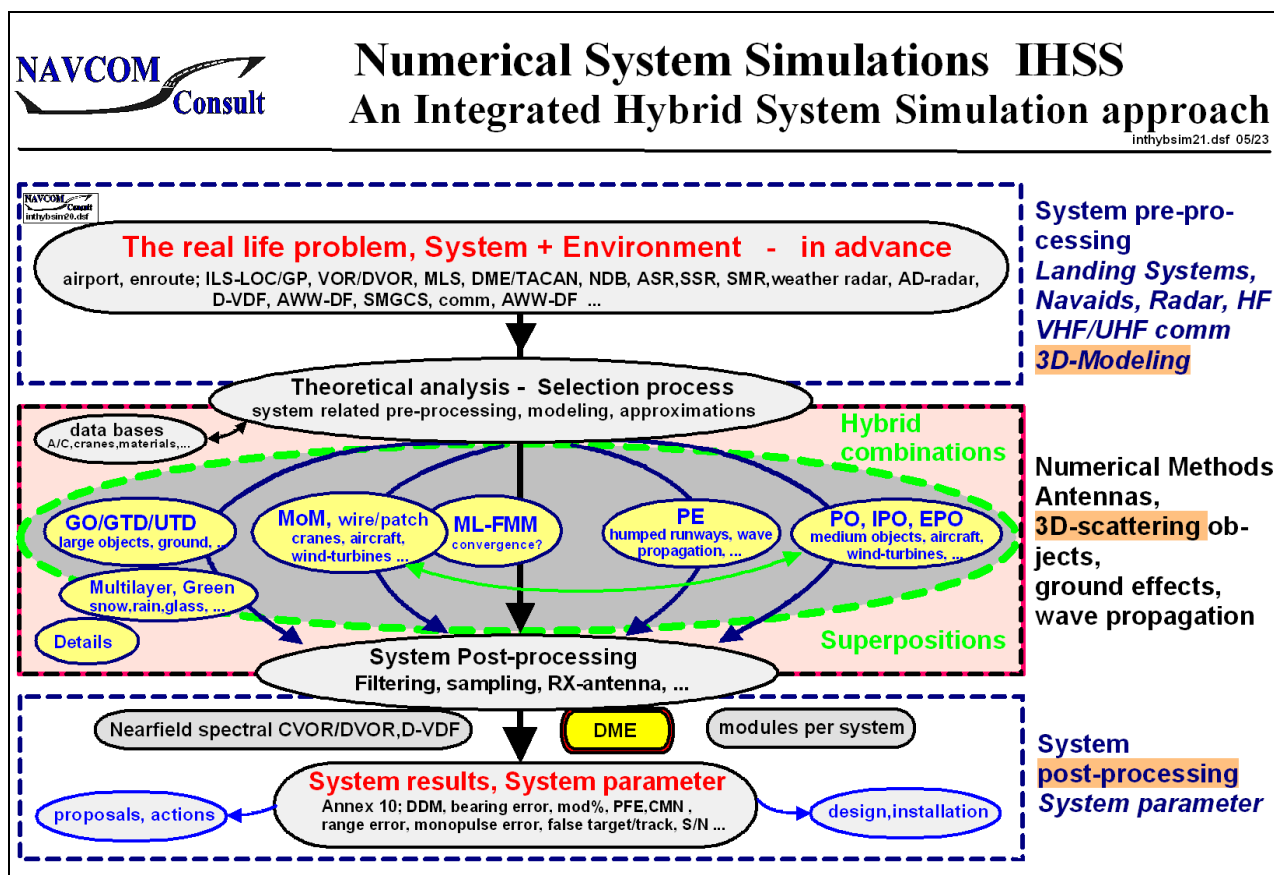


Bild A - 1: Flussdiagramm der "Integrated Hybrid System Simulation" (IHSS)

7.9 Relative Häufigkeit der Windrichtung

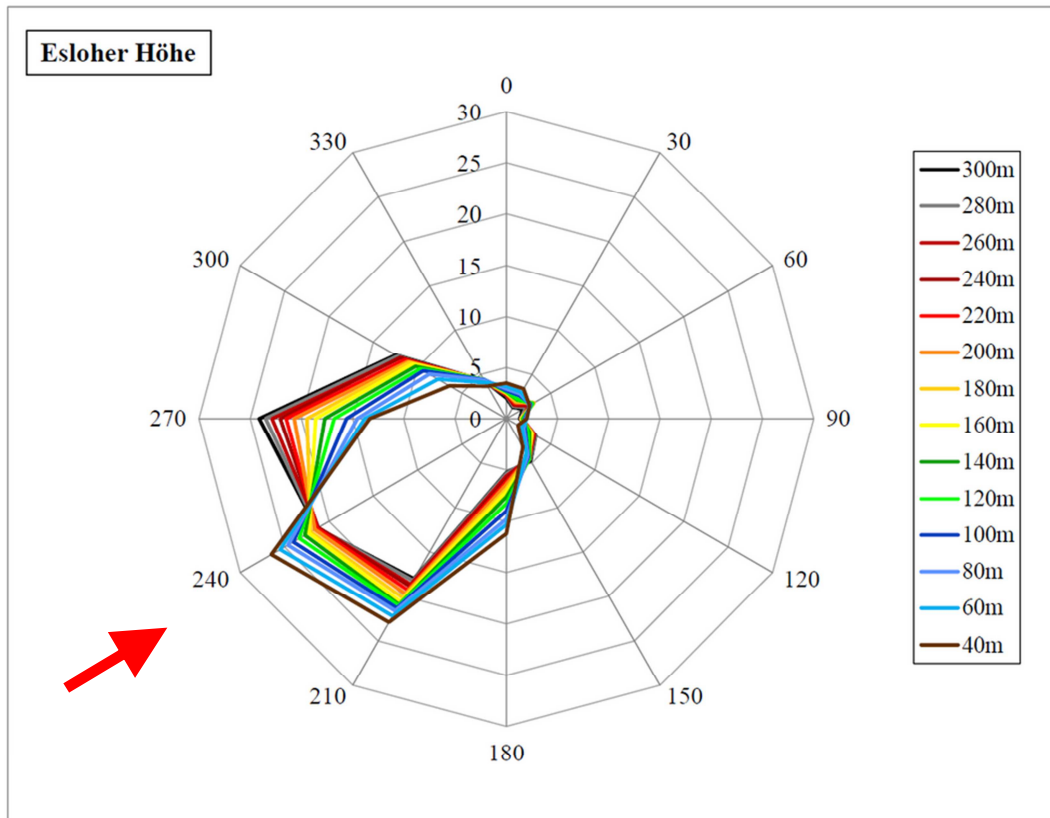


Abbildung 25: Relative Häufigkeit der Windrichtungen in ausgewählten Höhen für den

Bild A - 2: Windrose für den Standort „Esloher Höhe“

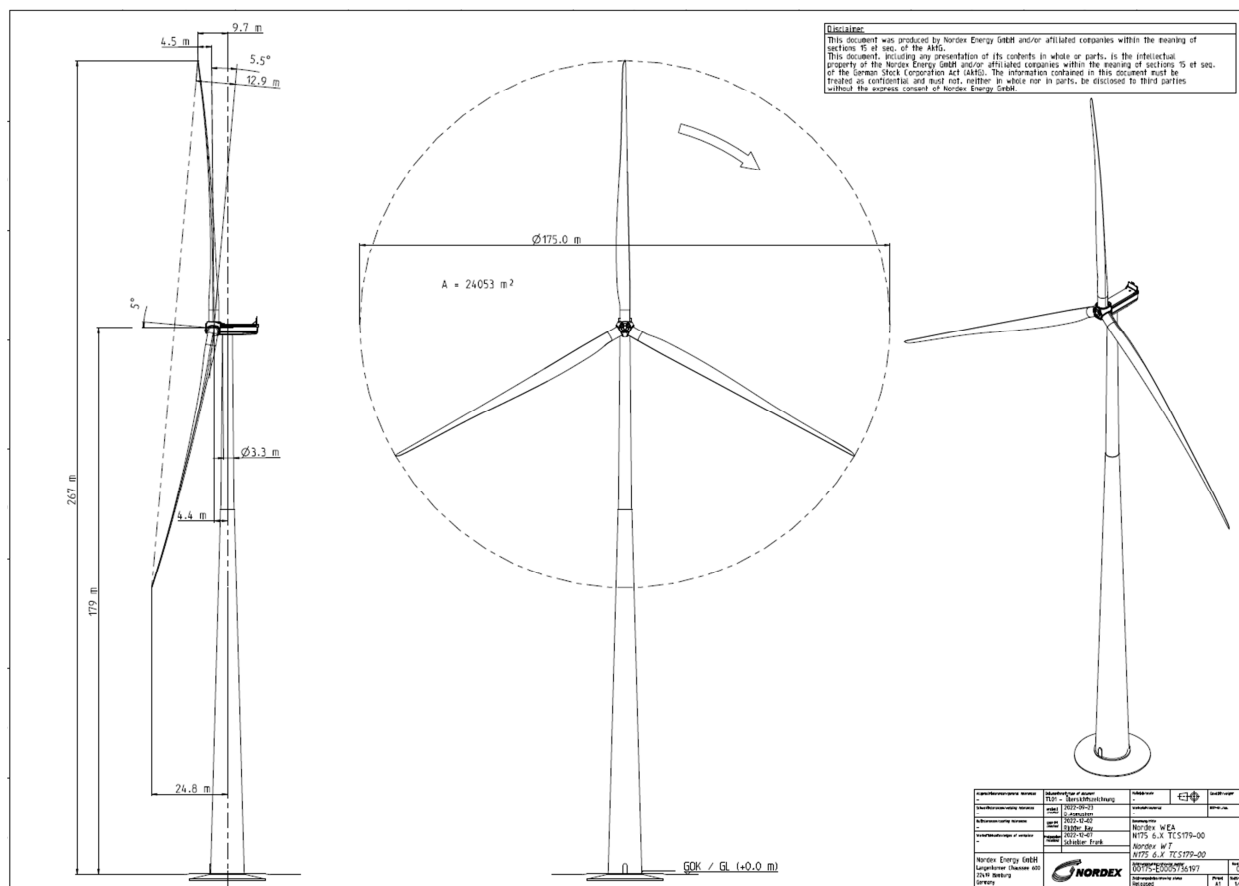


Bild A - 3: Übersichtszeichnung der Fa. Nordex für eine N175 (NH=179m)

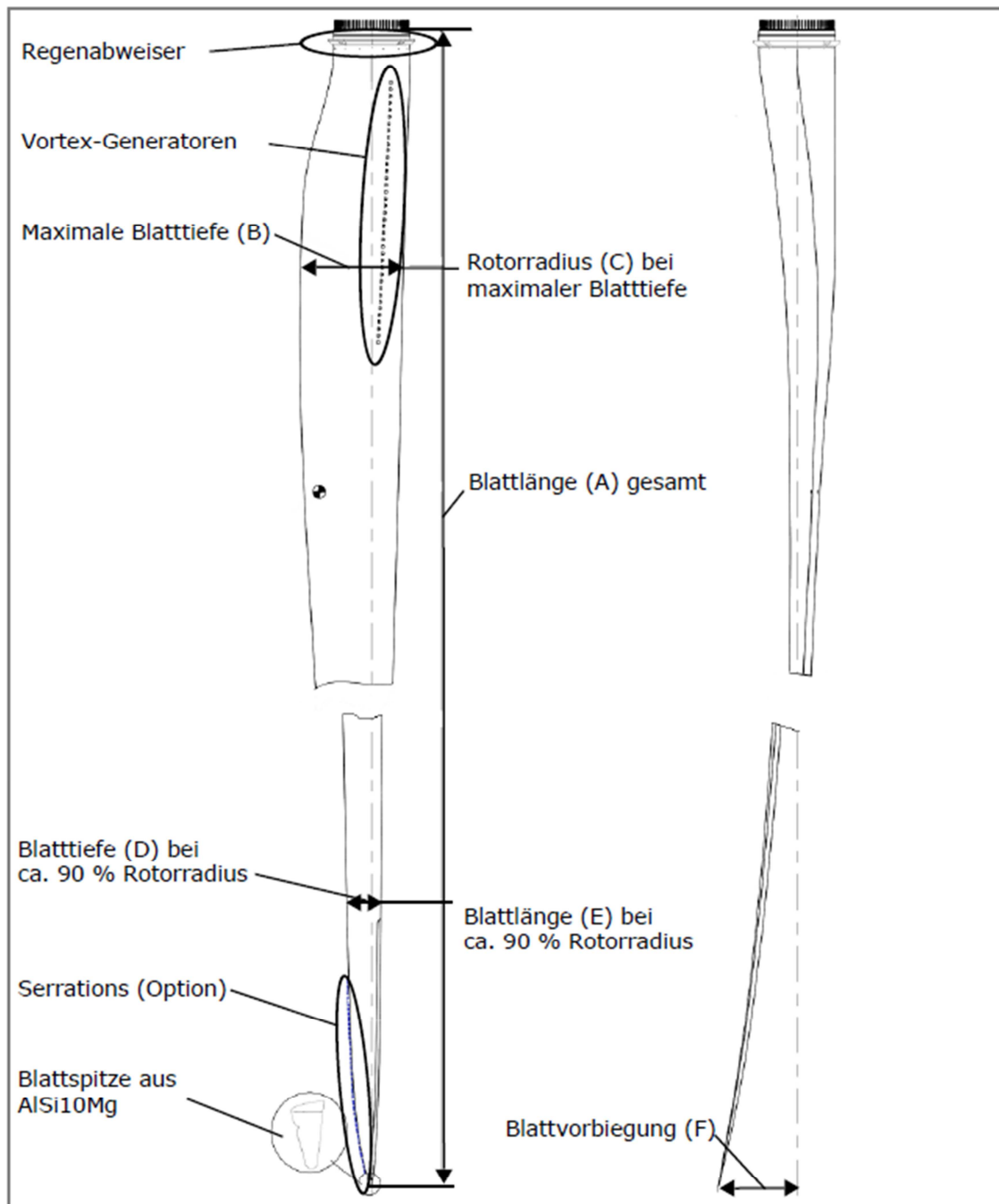


Abb. 2: Abmessungen und Details Rotorblätter

	N133	N149	N163	N175
A	64,40 m	72,40 m	79,70 m	85,70 m
B	3,94 m	4,15 m	4,15 m	4,30 m
C	11,04 m	9,63 m	12,14 m	20,45 m
D	1,13 m	1,21 m	1,11 m	1,34 m
E	57,73 m	65,01 m	71,54 m	75,12 m
F	3,00 m	3,00 m	3,94 m	4,50 m

Bild A - 4: Übersichtszeichnung der Fa. Nordex für das Rotor-Blatt einer N175

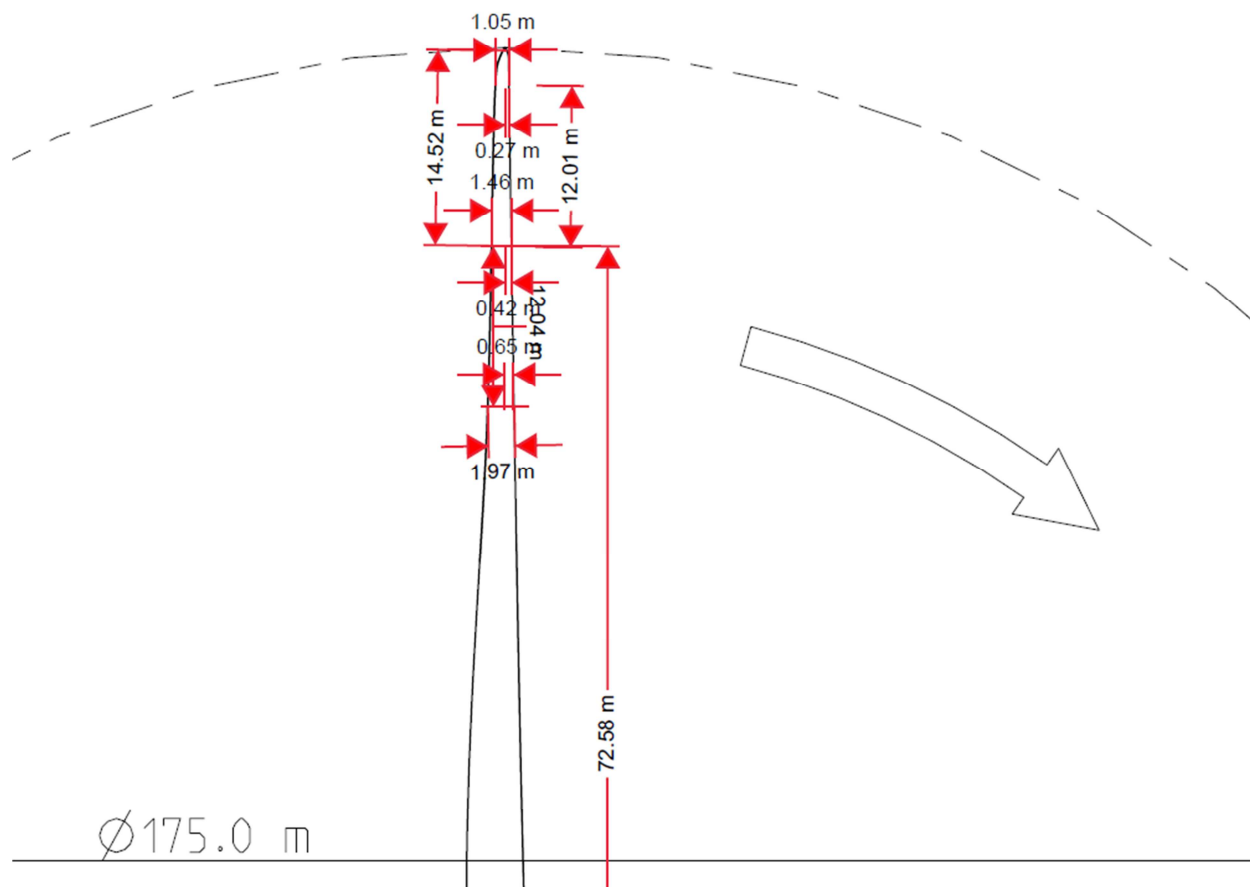



Bild A - 5: Detail-Modellierung der Blattspitze einer Nordex N175

Nordex N175

2030462DE Rev. 04/11.05.2023	Technische Beschreibung	
---------------------------------	-------------------------	---

4. Technische Daten

4.1 Technische Konzeption

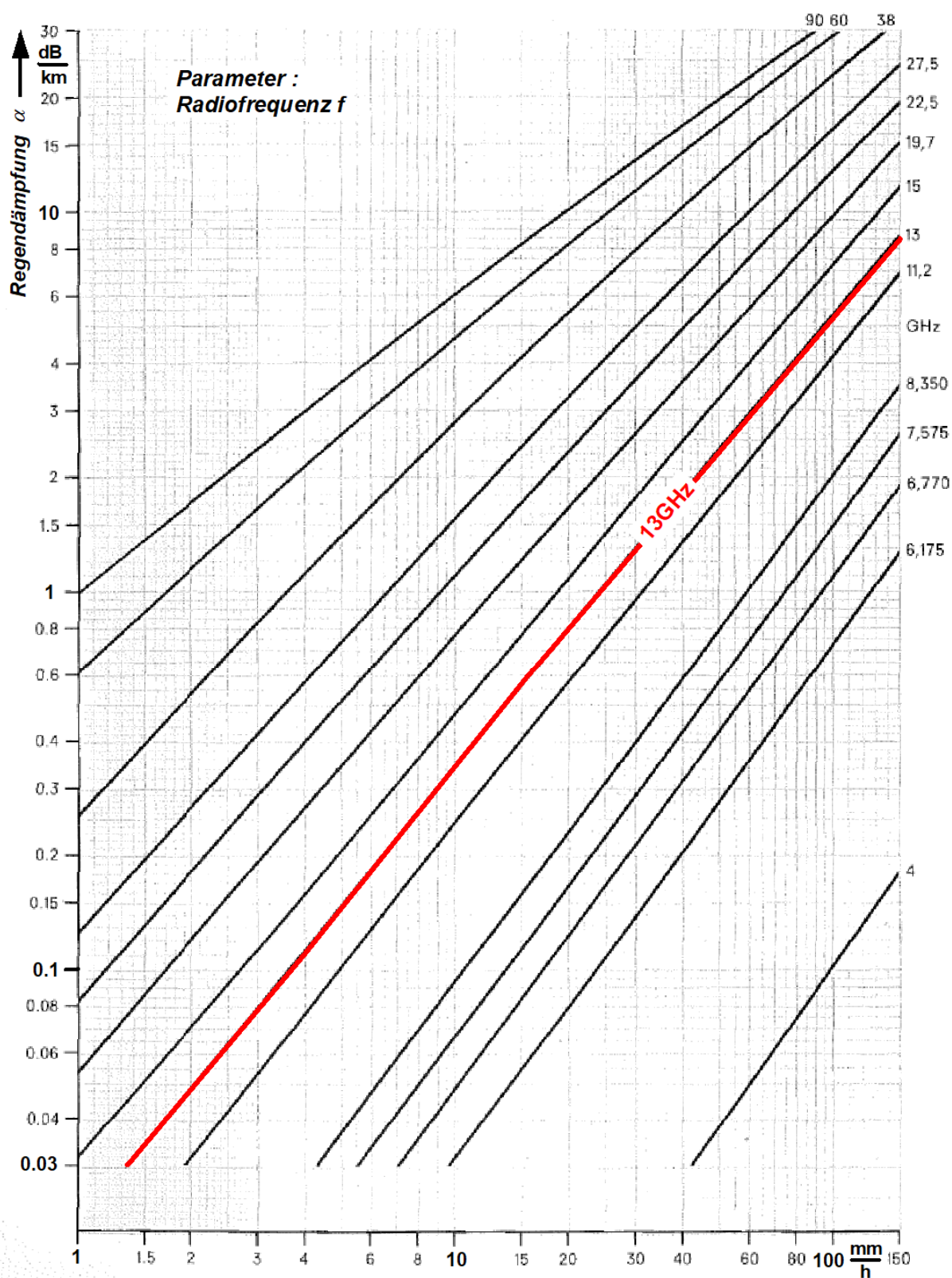
Technische Konzeption	
Überlebenstemperatur (Design temperature)	NCV: -20 °C bis +45 °C CCV: -40 °C bis +45 °C
Betriebstemperaturbereich Normal Climate Version	-20 °C bis +40 °C ¹⁾
Betriebstemperaturbereich Cold Climate Version	-30 °C bis +40 °C ¹⁾
Stopp	Standard: -20 °C, Wiederanlauf bei -18 °C CCV: -30 °C, Wiederanlauf bei -28 °C
Max. Höhe über N.N.	2000 m ¹⁾
Zertifikat	gemäß IECRE-OD501 mit IEC 61400 und DIBt 2012
Typ	3-Blatt-Rotor mit horizontaler Achse Luv-Läufer
Leistungsregelung	aktive Einzelblattverstellung
Nennleistung	bis zu 6800 kW ¹⁾
Nennleistung ab Windgeschwindigkeit (bei einer Luftdichte von 1,225 kg/m ³)	ca. 12,5 m/s
Betriebsdrehzahlbereich des Rotors	5,31 min ⁻¹ bis 10,85 min ⁻¹
Nenndrehzahl	9,025 min ⁻¹
Einschaltwindgeschwindigkeit	3 m/s
Abschaltwindgeschwindigkeit	20 m/s ²⁾
Wiedereinschaltwindgeschwindigkeit	19,5 m/s ²⁾
Rechnerische Lebensdauer	≥ 25 Jahre ³⁾

¹⁾ Nennleistung wird in Abhängigkeit vom Leistungsfaktor und der Aufstellhöhe bis zu definierten Temperaturbereichen erreicht.

²⁾ Die Abschaltwindgeschwindigkeit kann projektspezifisch zur Sicherstellung der Standsicherheit reduziert werden.

³⁾ Die angegebene rechnerische Lebensdauer kann standort- und leistungsbezogen reduziert sein.

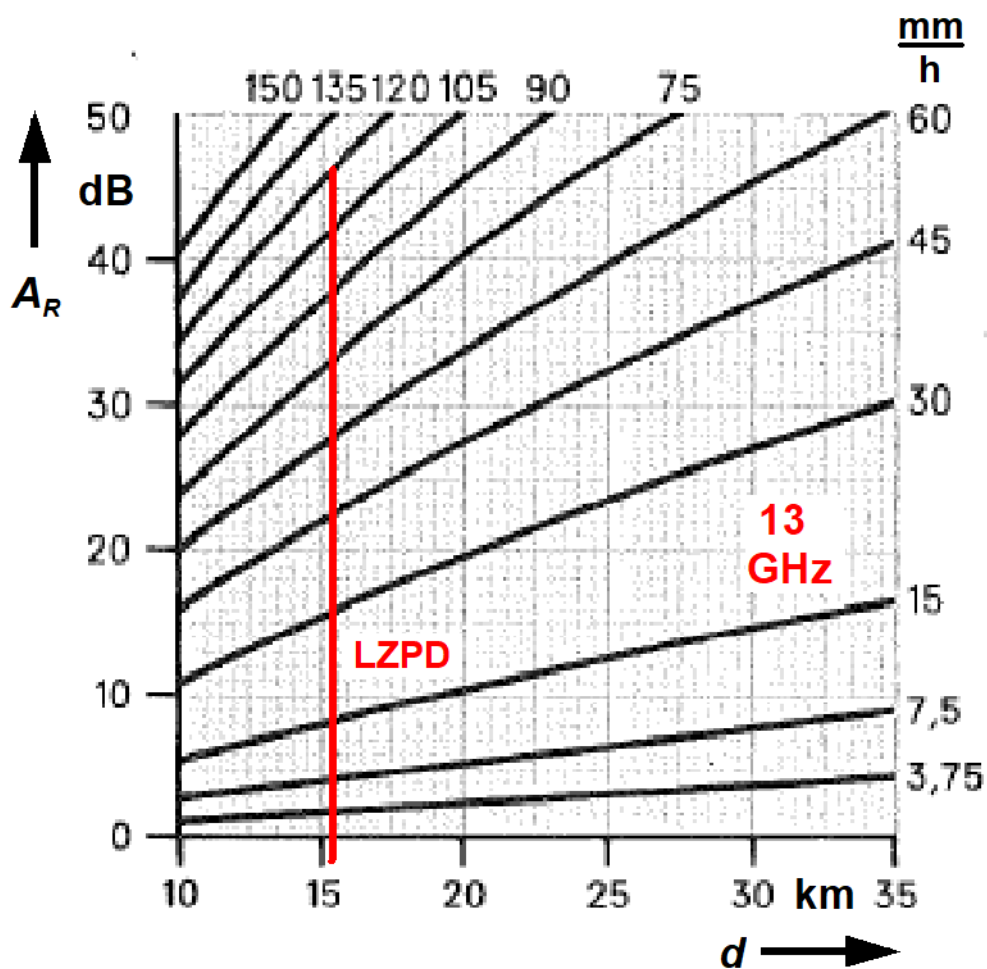
Bild A - 6: Konzeptionelle technische Daten einer Nordex N175



Bildanlage 13

Kilometrische Regendämpfung α in Abhängigkeit von der Regenintensität i_R und der Radiofrequenz f

Bild A - 7: Regendämpfung in dB pro km als Funktion der Regenintensität in mm/h und der Frequenz in GHz (aus /2/)



Funkfeldlänge d
Mittlere Regendämpfung A_R

Bild A - 8: Mittlere Regendämpfung A_R einer Funkstrecke als Funktion der Regenintensität in mm/h für 13GHz (aus /2/)

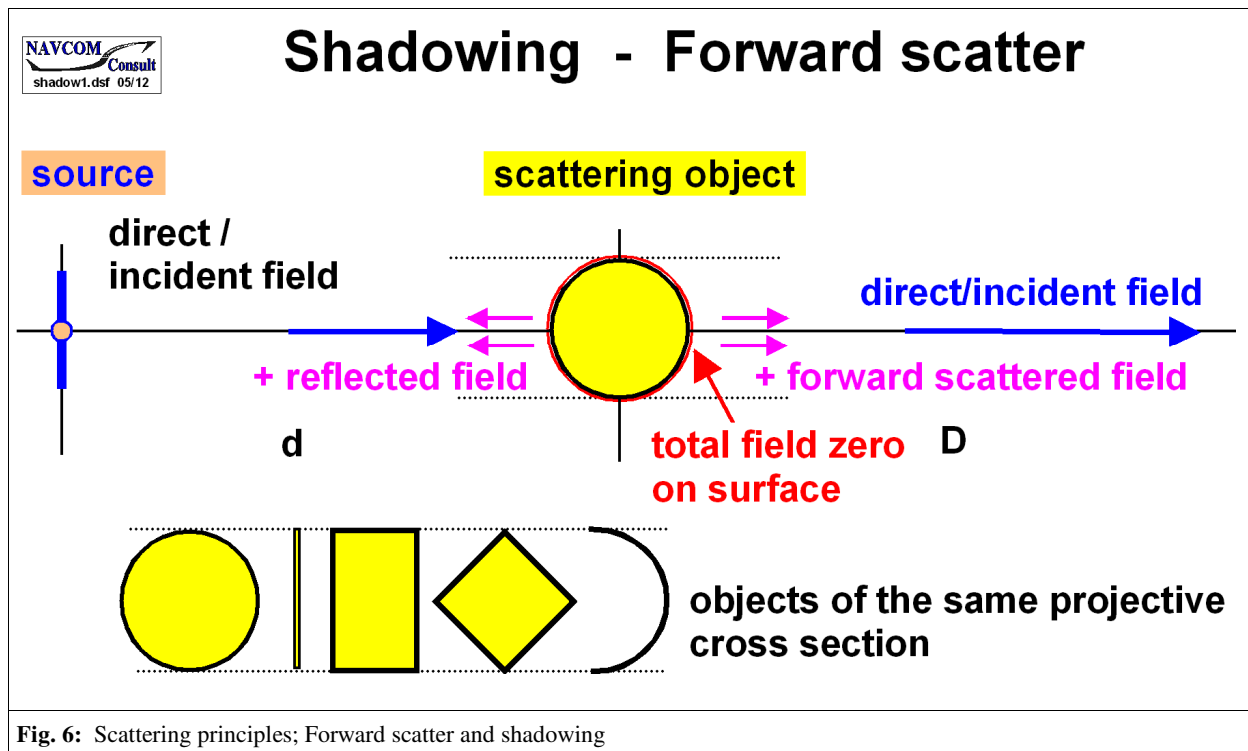


Bild A - 9: Prinzipien der Abschattung („forward scatter“) von Objekten gleicher Projektionsfläche für elektrisch große Objekte (aus /15/)

9 Literaturverzeichnis, Publikationen

Nicht alle der aufgeführten Referenzen werden in der Untersuchung explizit zitiert.

- /1/ **Y. T. LO, S. W. LEE** "Antenna Handbook", Chapman & Hall, New York 1996
- /2/ **H. BRODHAGE, W. HORMUTH** Planung und Berechnung von Richtfunkverbindungen, Siemens AG, München 1977
- /3/ **ITU-R**, Recommendation ITU-R P.530-18 Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems, Geneva 2022
- /4/ **H. MEINKE, F.W. GUNDLACH** Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Springer Verlag, Berlin 1968
- /5/ **G. GREVING** Status and capabilities of advanced computer based analysis and simulations for the air traffic related navigation and radar systems; "invited paper SEATI 2006" Hong Kong, March 2006; <http://www.navcom.de/seati2006pt.pdf>
- /6/ **G. GREVING** Measurements and System Applications - Verification Tasks and Interpretation Issues, AMTA Europe Symposium 2006, Munich, May 2006, <http://www.navcom.de/amta2006pt.pdf>
- /7/ **G. GREVING** Modern Numerical Methods in the context of System Simulations for ATC-systems - Examples, Results and Consequences, 14th IFIS Toulouse, June 2006, <http://www.navcom.de/ifis2006ggpt.pdf>
- /8/ **G. GREVING** Wind Turbines in the Radiation Field of Systems from a Prediction and Siting Point of View; IEA Topical Expert Meeting #53 "RADAR, RADIO AND WIND TURBINES", Oxford, March 29/30, 2007
http://www.ieawind.org/Task_11/Proceedings/53%20Radar%20Radio%20and%20Wind%20Turbines.pdf
- /9/ **G. GREVING, W.D. BIERMANN** Wind Turbines and Radar - The Radar Cross Section RCS a Useful Figure for Safeguarding?, IRS 2007, Cologne/Germany, September 2007; <http://www.navcom.de/irs2007pt.pdf>
- /10/ **G. GREVING, W.D. BIERMANN** System Simulations Based on Antenna and Scattering Analysis - Capabilities and Limitations; EuCAP 2007, Edinburgh/UK, November 2007; <http://www.navcom.de/eucap2007pt.pdf>
- /11/ **G. GREVING** Status and Progress of System Simulations for ATC-systems - Examples, Results and Consequences, 15th IFIS Oklahoma/USA, June 2008; <http://www.navcom.de/ifis2008ggpt.pdf>
- /12/ **G. GREVING, W.-D. BIERMANN, R. MUNDT** Aspects and Results of Numerical Methods and Wave Propagation Integrated into System Simulations; EUCAP 2009, Berlin March 2009
<http://www.navcom.de/eucap2009npt.pdf>
- /13/ **G. GREVING** Latest Achievements of Complex System Simulations for ATC-systems - Actual Examples and Flight Inspection, 16th IFIS Beijing/China, June 2010, <http://www.navcom.de/ifis2010ggpt.pdf>
- /14/ **G. GREVING, W.-D. BIERMANN, R. MUNDT** The Radar Cross Section and Wind Turbines - Definition and Effects of the Ground and Finite Distances; IRS 2011 (International Radar Symposium), Leipzig September 2011; <http://www.navcom.de/irs2011pt.pdf>
- /15/ **G. Greving, Wolf-Dieter Biermann, Rolf Mundt** Wind Turbines as Distorting Scattering Objects for Radar - Visibility, desensitization and shadowing; IRS 2012, Warschau May 2012
<http://www.navcom.de/irs2012pt.pdf>
- /16/ **G. GREVING** On Scattering Field Calculations Integrated into System-Simulations for Navigation-, Landing- and Radar Systems - Overview - "Update", Presentation, U.R.S.I. Kleinheubacher Tagung, Sept. 2015
- /17/ **G. GREVING, W.-D. BIERMANN, R. MUNDT** Investigation of System Distortions by Scattering of Very Large Wind-Turbines in Some Distance to DME-Navigation Stations on the Ground; ICEAA 2023; Venice, Italy; October 9-13, 2023 <http://www.navcom.de/ICEAA2023pt.pdf>

10 Ende des Gutachtens