



Gutachten zu Freileitungen im Windpark Stralendorf

Referenz-Nummer:

F2E-2019-WND-035, Revision 0 - ungekürzte Fassung

Auftraggeber:

ENERCON GmbH
Dreekamp 5, 26605 Aurich

Die Ausarbeitung des Gutachtens erfolgte durch:

Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG
Borsteler Chaussee 178, 22453 Hamburg, www.f2e.de

Verfasser:

Dipl.-Met. Nicole Stoffels, Sachverständige,

Hamburg, 03.04.2019

Gepüft:

Dr.-Ing. Thomas Hahm, Sachverständiger,

Hamburg, 03.04.2019

Für weitere Auskünfte:

Tel.: 040 53303680-0

Fax: 040 53303680-79

Nicole Stoffels: stoffels@f2e.de oder Dr. Thomas Hahm: hahm@f2e.de

Urheber- und Nutzungsrecht:

Urheber des Gutachtens ist die Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG. Der Auftraggeber erwirbt ein einfaches Nutzungsrecht entsprechend dem Gesetz über Urheberrecht und verwandte Schutzrechte (UrhG). Das Nutzungsrecht kann nur mit Zustimmung des Urhebers übertragen werden. Eine Veröffentlichung und Bereitstellung der ungekürzten Fassung des Gutachtens zum uneingeschränkten Download in elektronischen Medien sind verboten. Eine Einsichtnahme der gekürzten Fassung des Gutachtens gemäß UVPG §23 (2) über die zentralen Internetportale von Bund und Ländern gemäß UVPG §20 Absatz (1) wird gestattet.



0 Kurzdarstellung des Ergebnisses

Die Leiterseile der 380kV-Leitung werden nicht vom schädigenden Einflussbereich der Nachlaufströmung der am Standort Stralendorf betrachteten WEA getroffen. Zusätzliche Schwingungsschutzmaßnahmen an den Freileitungen sind daher aus technischer Sicht nicht erforderlich.

Eine ausführliche Erläuterung der Ergebnisse erfolgt im Kapitel 5 „Zusammenfassung und Bewertung“.

Inhaltsverzeichnis

0 Kurzdarstellung des Ergebnisses.....	2
1 Aufgabenstellung.....	3
2 Grundlagen.....	4
2.1 Normative Festlegungen nach DIN EN 50341-2-4 /1/.....	4
2.2 Analyse der Windbedingungen im Nachlauf mit Bezug zur Anregung von Leiterseilen.....	5
2.3 Darstellung der verwendeten Methodik.....	6
3 Randbedingungen.....	8
3.1 Standortdaten der WEA.....	8
3.2 Daten der Freileitung.....	12
4 Durchgeführte Untersuchungen.....	13
4.1 Bestimmung der Abstände.....	13
4.2 Bestimmung des Einflussbereichs der Nachlaufströmung.....	14
4.2.1 Ergebnisse nach /1/.....	14
4.2.2 Ergebnisse der CFD-Analyse.....	17
5 Zusammenfassung und Bewertung.....	19
6 Formelzeichen und Abkürzungen.....	20
7 Literaturangaben.....	21



2 Grundlagen

2.1 Normative Festlegungen nach DIN EN 50341-2-4 /1/

In /1/ wird für Freileitungen über AC 1kV ein horizontaler Mindestabstand a_{WEA} zwischen Turmachse der WEA und äußerstem ruhenden Leiterseil bestehend aus der Summe aus dem 0.5-fachen des Rotordurchmessers der WEA, einem Arbeitsraum a_{Raum} und einem waagerechten spannungsabhängigen Mindestabstand a_{LTG} gefordert.

Überschreitet die Summe aus Ausschwingbreite $D_{Schwing}$ des Leiterseils und einem spannungsabhängigen Schutzabstand D_V nach /2/ den Wert von a_{LTG} ist diese Summe anstatt des Wertes von a_{LTG} in die Berechnung des horizontalen Mindestabstandes einzusetzen.

Unter dem Arbeitsraum a_{Raum} ist der Abschnitt der Montage- und Kranstellfläche für die WEA zu verstehen, der über den halben Rotordurchmesser hinaus in den Bereich zwischen WEA und der Freileitung ragt. Der benötigte Arbeitsraum a_{Raum} ist laut /1/ projektbezogen vom Antragsteller/WEA-Betreiber verbindlich anzugeben und anschließend zwischen Freileitungsbetreiber und WEA-Betreiber zu vereinbaren.

Die Ausschwingbreite $D_{Schwing}$ ergibt sich entsprechend /1/ aus dem horizontalen Abstand der Leiterpositionen zwischen ausgeschwungenem und ruhendem Leiterseil.

Bis zu einem Abstand von entsprechend drei Rotordurchmessern werden wiederum Schwingungsschutzmaßnahmen gefordert, wenn nicht sichergestellt ist, dass die Leiterseile außerhalb der Nachlaufströmung der WEA liegen.

In /1/ ist ein vereinfachtes Verfahren angegeben, mit dem die Ausdehnung des Nachlaufs abgeschätzt werden kann. Hier wird für die Nachlaufströmung ausgehend vom Rotor der WEA ein Kegelstumpf mit einer Steigung von 0.1 entsprechend einem Aufweitungswinkel von knapp 6° unterstellt. Zusätzlich muss hier der Schwenkbereich des Rotors im Bereich von $\pm 45^\circ$ bezogen auf den kürzesten Abstand zwischen Turmachse und Leiter berücksichtigt werden. Berücksichtigung findet ebenfalls der Abstand s_{Exz} zwischen der Turmachse der WEA und der Rotorblattebene.



2.2 Analyse der Windbedingungen im Nachlauf mit Bezug zur Anregung von Leiterseilen

Die Nachlaufströmung hinter einer WEA entsteht dadurch, dass dem Wind Energie entzogen und umgewandelt wird. Aus diesem Grund verringert sich die Windgeschwindigkeit direkt hinter einer WEA spürbar. Parallel dazu wird die Turbulenz deutlich erhöht. Eine Grenze zwischen ungestörter und gestörter Strömung lässt sich jedoch nur schwer definieren. Physikalisch gesehen ist die Annahme eines sich beständig erweiternden Nachlaufs unplausibel. Vielmehr wird das entstehende Windgeschwindigkeitsdefizit wieder aufgefüllt und die Störung löst sich auf. Um ein Kriterium für die relevante Ausdehnung der Nachlaufströmung angeben zu können, müssen mögliche Ursachen für Leiterseilanregungen genauer betrachtet werden.

Angeströmte Leiterseile werden durch eine periodische Ablösung von Luftwirbeln zu erzwungenen Schwingungen angeregt. Die Ablösefrequenz von Wirbeln an feststehenden Zylindern ist allgemein proportional zur Windgeschwindigkeit und umgekehrt proportional zum Zylinderdurchmesser. Stimmt die Wirbelablösefrequenz mit einer Eigenfrequenz des Seils etwa überein, erfolgt eine Erregung des Seils zu Schwingungen quer zum Wind. Die auftretenden Schwingungen können wegen der damit verbundenen Biegewechselbeanspruchung vorwiegend an den Unterstützungen zu Bruchschäden der Seile führen. Relevante Schwingungsamplituden in der Aufhängung der Leiterseile liegen nach /4/ und /5/ im Bereich bis 50Hz. Ablösefrequenzen bis 50Hz entstehen durch Windgeschwindigkeiten unterhalb von ca. 7m/s.

Für typische Bedingungen von Leiterseilen beträgt der Abstand der Eigenfrequenzen, wie in /4/ weiter nachgewiesen wird, nur etwa 0.1Hz. Wegen der geringen Seil-Eigendämpfung und der dichten Folge von Eigenfrequenzen erfahren die an sich niedrigen Anregekräfte eine Resonanzüberhöhung, so dass Dämpfer zur Reduzierung der auftretenden Biegewechselbeanspruchung verschiedentlich eingesetzt werden /4, 5/.

Da nur die geringen Windgeschwindigkeiten bis ca. 7m/s zur Anregung führen und andererseits eine WEA die Windgeschwindigkeit in ihrem Nachlauf reduziert, wird vermutet, dass es durch benachbarte WEA aufgrund der häufiger auftretenden geringen Windgeschwindigkeiten zu einer erhöhten Schwingungsbelastung kommt. Diesem Ansatz folgt die bereits erwähnte Studie /3/. Bei der Ermittlung der Schädigungspotentiale wurden hier folgende Annahmen getroffen:

- Das Seil befindet sich in der gesamten Länge des Spannungsfelds ständig im Einflussbereich der Nachlaufströmung.



- Als natürliche Turbulenzintensität wurden 1% und für deren Erhöhung im Nachlauf 5% unterstellt. Nach [3] wirken dabei hohe Turbulenzintensitäten dämpfend.
- Weiterhin werden die Leiterseile vom Kern der Nachlaufströmung getroffen und erfahren dabei eine gegenüber dem ungestörten Wind bis auf 40% reduzierte Anströmgeschwindigkeit.

Diese Werte sind als konservativ in Bezug auf ihr Schädigungspotential zu sehen, weil:

- es bei einer typischen Spannfeldlänge von 350m bis 400m bei Hochspannungsleitungen (110 - 220kV) nicht möglich ist, dass die Seile in ihrer gesamten Länge und ständig vom Nachlauf einer WEA getroffen werden,
- unterhalb von 7m/s Windgeschwindigkeit sowohl die Umgebungsturbulenzintensität als auch deren Erhöhung durch den Nachlauf größer als die unterstellten Werte sind. Im Bereich von 3 bis 7m/s werden WEA für Umgebungsturbulenzintensitäten von 42.0 bis 24.9% ausgelegt. Dies kann als Obergrenze angesehen werden und entspricht in etwa der Größenordnung, die im direkten Nachlauf der WEA bei diesen Windgeschwindigkeiten erreicht wird.
- Eine Erniedrigung der Windgeschwindigkeit auf 40% der ungestörten Strömung dicht am erreichbaren Grenzwert liegt.

2.3 Darstellung der verwendeten Methodik

Grundsätzlich unterscheidet man den Nahbereich der Nachlaufströmung, in dem die von den Blattspitzen generierte Turbulenz und das von der WEA insgesamt erzeugte Windgeschwindigkeitsdefizit mit deutlichen Konturen präsent sind. Abhängig von der atmosphärischen Strömung geht dieser Nahbereich zwischen 3 bis 5 Rotordurchmesser Abstand hinter der WEA in den Fernbereich der Nachlaufströmung über, in dem die vorhandenen scharfen Konturen verschwinden und in einen weichen Verlauf übergehen.

Interessant in Bezug auf die Anregung von Leiterseilen ist nur der Nahbereich der Nachlaufströmung, da nur hier die oben definierten Bedingungen erreicht werden können. Der Kern der Nachlaufströmung mit einer nennenswerten Reduzierung der Windgeschwindigkeit ist in diesem Bereich scharf abgegrenzt und kleiner als der Rotordurchmesser.



Der angenommene schädigungsrelevante Bereich der auf 40% reduzierten Anströmgeschwindigkeit muss daher deutlich kleiner als der in /1/ und /3/ definierte Kegelstumpf sein.

Eine genaue Verifizierung dieses Bereiches gestaltet sich schwierig. Geeignete Freifeldmessungen an realen WEA liegen nicht vor oder geben nur Ausschnitte wieder. Es sind daher verschiedene Nachlaufmodelle entwickelt worden (siehe z.B. /6/). In den letzten Jahren haben sich zunehmend dreidimensionale Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen etabliert /6, 7, 8/, die bereits in stationären Berechnungen gute Übereinstimmungen mit Messergebnissen bezüglich des Windgeschwindigkeitsdefizits liefern (siehe z.B. /7/).

Es liegt daher nahe, den relevanten Einflussbereich einer WEA bezüglich benachbarter Freileitungen durch eine dreidimensionale CFD-Simulation zu erfassen.

In den von uns bislang durchgeführten Untersuchungen dehnt sich der oben definierte schädigungsrelevante Einflussbereich des Nachlaufs nicht über die horizontal nach hinten verlängerte Rotorfläche hinaus aus und löst sich zum Ende des Nahbereichs auf /9/.

Demgegenüber führt das in /1/ definierte Verfahren (siehe Abbildung 2.3.1) für Freileitungen über AC 1kV zu einer vergleichsweise sehr konservativen Abschätzung.

Im Einzelfall erfolgt eine genauere Analyse auf Basis von CFD-Berechnungen, die eine realistischere und unter Berücksichtigung der in 2.2 dargelegten Randbedingungen konservative Eingrenzung des schädigungsrelevanten Anteils der Nachlaufströmung ermöglicht. In sehr strukturiertem Gelände wird der Einfluss des Geländeprofiles berücksichtigt.

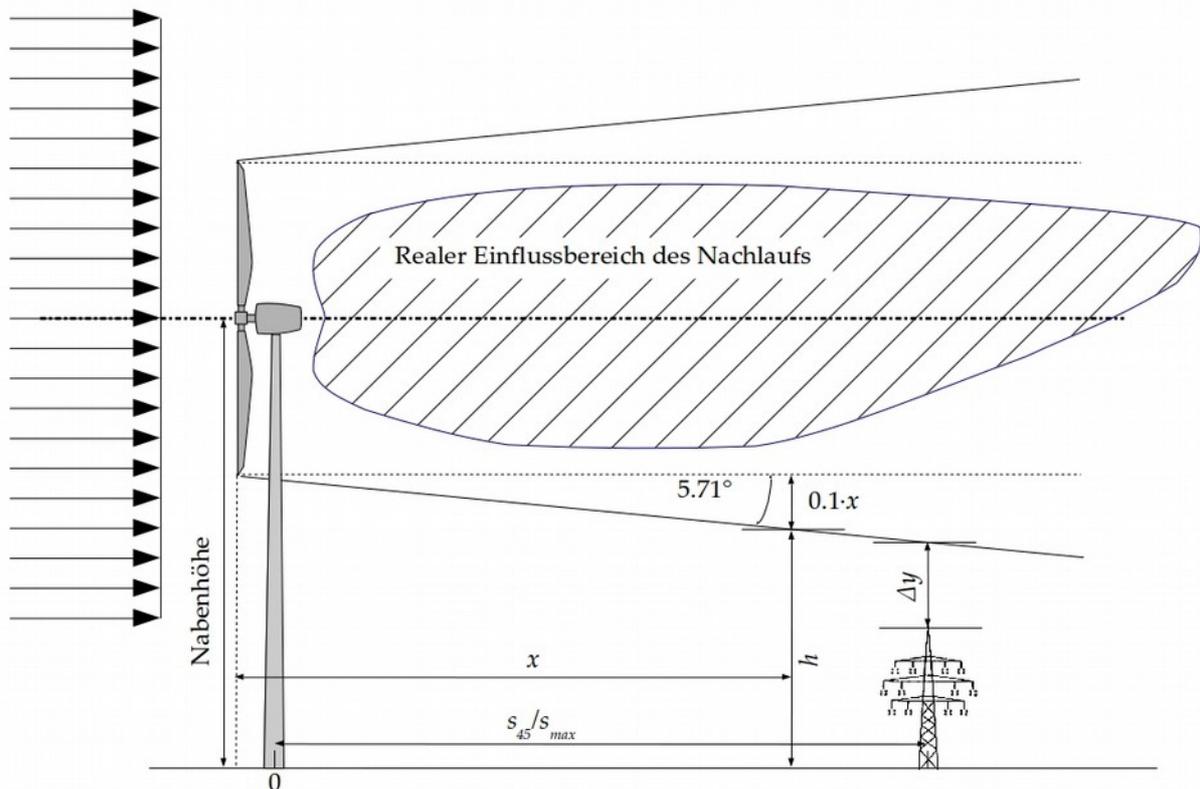


Abbildung 2.3.1: Vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung des schädigenden Einflussbereichs der Nachlaufströmung nach [1] und beispielhafter realer Einflussbereich (gestreift) auf Basis von CFD-Berechnungen.

3 Randbedingungen

3.1 Standortdaten der WEA

Am Standort Stralendorf (Mecklenburg-Vorpommern) plant bzw. betreibt der Auftraggeber 19 Windenergieanlagen (WEA 1 - 19) vom Typ ENERCON E-138 EP3 E2, NH 160m.

In der unmittelbaren Umgebung der WEA befindet sich die 380kV-Leitung der 50Hertz Transmission GmbH. Die Standorte der WEA 9 - 19 liegen in unmittelbarer Nähe zur Freileitung.

Die vom Auftraggeber übermittelten Daten zur Windparkkonfiguration sind in Tabelle 3.1.1 bzw. Abbildung 3.1.1 dargestellt.



	Lfd.Nr.	Bezeichnung	Koordinaten (UTM ETRS89 Zone 33)		Hersteller	WEA-Typ	P _N [MW]	RD [m]	NH [m]	s _{exz} [m]	Höhe EOK üNN [m]
			East	North							
	1	A001	255339	5939060	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	2	A002	255464	5939440	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	3	A003	255101	5939482	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	4	A004	254926	5939801	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	5	A005	255157	5940068	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	6	A006	254721	5940070	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	7	A007	255473	5940442	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	8	A008	254970	5940333	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	9	A009	254715	5940558	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	10	A010	254349	5940477	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	11	A011	255064	5940774	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	12	A012	254209	5940971	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	13	A013	254674	5941032	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	14	A014	255356	5941004	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	15	A015	255785	5941101	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	16	A016	255629	5940791	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	17	A017	256176	5941091	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---



	Lfd.Nr.	Bezeichnung	Koordinaten (UTM ETRS89 Zone 33)		Hersteller	WEA-Typ	P _N [MW]	RD [m]	NH [m]	S _{exz} [m]	Höhe EOK üNN [m]
			East	North							
	18	A018	256543	5941249	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---
	19	A019	256471	5940922	ENERCON	E-138 EP3 E2	4.2	138.25	160.0	5.985	---

Tabelle 3.1.1: Windparkkonfiguration.

Alle Benennungen von WEA im Dokument beziehen sich auf die Nomenklatur von Spalte 2 (Lfd. Nr.) in Tabelle 3.1.1!

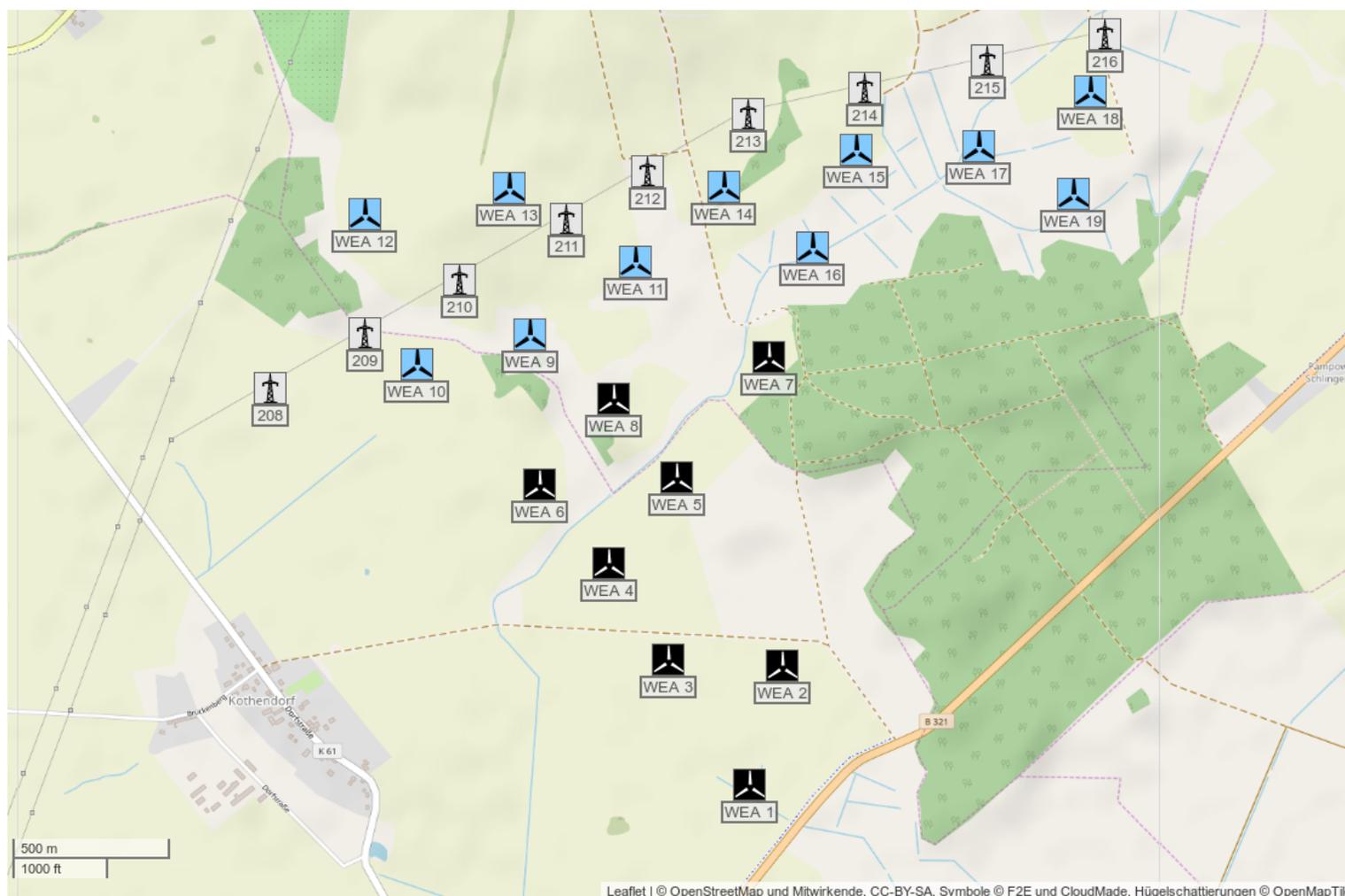


Abbildung 3.1.1:
Lage des Windparks,
Karte /11/.

-  betrachtete WEA
-  weitere WEA
-  Freileitungsmast



3.2 Daten der Freileitung

Die vom Auftraggeber übermittelten Daten zur 380kV-Leitung sind in den Tabellen 3.2.1 und 3.2.2 dargestellt.

	Tragmast	Koordinaten (UTM ETRS89 Zone 32)		Masttyp	Traversen -breite [m]	Höhe EOK üNN [m]	Mast- höhe [m]	Höhe Mastspitze üNN [m]
		East	North					
	208	651297	5936429	---	20.0	47.01	61.43*	108.44
	209	651594	5936614	---	20.0	44.80	61.42*	106.22
	210	651890	5936799	---	20.0	50.71	64.07*	114.78
	211	652222	5937007	---	20.0	50.46	63.92*	114.38
	212	652478	5937168	---	20.0	47.61	64.08*	111.69
	213	652793	5937365	---	20.0	48.35	64.16*	112.51
	214	653159	5937460	---	20.0	46.51	61.52*	108.03
	215	653546	5937561	---	20.0	43.84	63.93*	107.77
	216	653921	5937658	---	20.0	44.68	64.18*	108.86

Tabelle 3.2.1: Liste der Tragmasten mit Höhenangaben.

* Die Masthöhe berechnet sich aus der Höhe der Mastspitze üNN abzüglich der Höhe der EOK üNN.

Betroffenes Spannfeld	WEA in diesem Bereich	D_{schwing} [m]	D_V [m]	D_{schwing}^+ D_V [m]	>/<	a_{LTG} [m]	a_{Raum} [m]	Breite des Schutz- streifens [m]
209 - 210	10, 12	20*	5	25	<	30	0	40
210 - 211	9, 13	20*	5	25	<	30	0	40
211 - 212	11	20*	5	25	<	30	0	40
212 - 213	14, 16	20*	5	25	<	30	0	40
213 - 214	15, 16	20*	5	25	<	30	0	40
214 - 215	17	20*	5	25	<	30	0	40
215 - 216	18, 19	20*	5	25	<	30	0	40

Tabelle 3.2.2: Weitere verwendete Daten zu den Spannfeldern.

* Für D_{schwing} wurde mangels Angaben konservativ abdeckend die Strecke zwischen äußerstem ruhenden Leiterseil und dem breitesten Punkt des Schutzstreifens zu Grunde gelegt.

Für die WEA 9 - 19 wurden für a_{Raum} Werte von 0m ermittelt.



4 Durchgeführte Untersuchungen

4.1 Bestimmung der Abstände

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2 kann die Bestimmung der einzuhaltenden Mindestabstände nach /1/ vorgenommen werden.

Nach /1/ ist der Abstand zwischen der Turmachse und dem äußersten ruhenden Leiterseil zu ermitteln. Dieser darf die Summe aus dem 0.5-fachen Rotordurchmesser, dem Arbeitsraum a_{Raum} und dem spannungsabhängigen Mindestabstand a_{LTG} nicht unterschreiten.

Die in der Tabelle 3.2.2 dargestellte Summe aus D_{schwing} und D_V ist in der vorliegenden Konfiguration an den WEA 9 - 19 kleiner als a_{LTG} . Zur weiteren Berechnung wird daher a_{LTG} als spannungsabhängiger Mindestabstand verwendet.

	Lfd.Nr.	Bezeichnung	Mindestabstand a_{WEA} nach /1/ [m]	Vorhandener Abstand a_{WEA}	
				[m]	in RD
	9	A009	99.1	244.9	1.77
	10	A010	99.1	149.6	1.08
	11	A011	99.1	212.7	1.54
	12	A012	99.1	313.5	2.27
	13	A013	99.1	155.2	1.12
	14	A014	99.1	142.2	1.03
	15	A015	99.1	167.4	1.21
	16	A016	99.1	456.4	3.30
			99.1	446.9	3.23
	17	A017	99.1	244.0	1.76
	18	A018	99.1	150.1	1.09
	19	A019	99.1	460.3	3.33

Tabelle 4.1.1: Abstand der Turmachse der WEA zum äußersten ruhenden Leiterseil nach /1/.

Die Standorte der WEA 9 - 15, 17 und 18 weisen Abstände von weniger als drei Rotordurchmessern zwischen Turmachse der WEA und äußerstem ruhenden Leiterseil der Freileitung auf. Für diese WEA ist daher nach /1/ der Nachweis zu führen, dass die Freileitung nicht vom schädigenden Einflussbereich der Nachlaufströmung



getroffen wird.

Der in der Norm /1/ geforderte horizontale Mindestabstand zwischen Turmachse der WEA und äußerstem ruhenden Leiterseil a_{WEA} wird in der vorliegenden Konfiguration an keiner der betrachteten WEA unterschritten.

4.2 Bestimmung des Einflussbereichs der Nachlaufströmung

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2 erfolgt die Bewertung des schädigenden Einflussbereiches der Nachlaufströmung mit dem vereinfachten Berechnungsverfahren nach /1/. Falls erforderlich wird eine Bewertung mittels einer detaillierten CFD-Analyse vorgenommen.

Im vorliegenden Fall wurde zusätzlich für die WEA 9, 11, 12, 15 und 17 eine Bewertung mittels einer CFD-Analyse vorgenommen.

4.2.1 Ergebnisse nach /1/

Im vorliegenden Fall wird der vertikale Abstand in Bezug zum höchstgelegenen Leiterseil in Mastmitte bestimmt.

Aufgrund der in /1/ geforderten Betrachtung des Schwenkbereiches des Rotors von $\pm 45^\circ$ ist entweder der Abstand für 45° s_{45° oder der maximal zu betrachtende Abstand von drei Rotordurchmessern s_{max} maßgeblich (siehe Abbildung 4.2.1.1). Dabei ist die Exzentrizität der Rotorebene zu berücksichtigen.

Im vorliegenden Fall ist der Abstand für 45° s_{45° für die WEA 9 - 11, 13 -15, 17 und 18 und der maximal zu betrachtende Abstand von drei Rotordurchmessern s_{max} für die WEA 12 maßgeblich und in Tabelle 4.2.1.1 dargestellt.

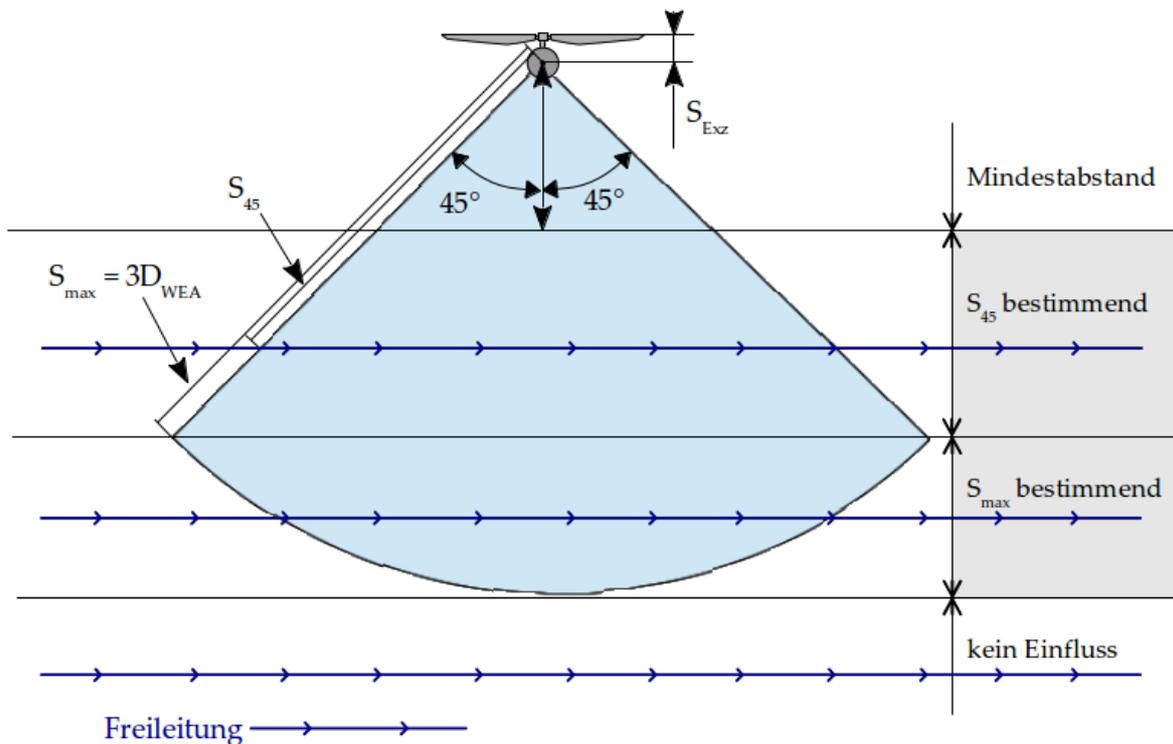


Abbildung 4.2.1.1: Zu betrachtender Einflussbereich der Nachlaufströmung (blau) in der Draufsicht und relevante Abstände.

Aufgrund der nicht allzu großen Steigungen des Geländes kann unterstellt werden, dass die bodennahe Strömung dem Gelände folgt.

Es ergeben sich damit folgende vertikalen Abstände zwischen der Unterkante des Einflussbereiches der Nachlaufströmung und dem ruhenden Leiterseil:

Betrachteter Abstand	WEA	Vertikaler Abstand der Nachlaufströmung zum ruhenden Leiterseil Δy
		[m]
S_{45°	9	-11.5
S_{45°	10	2.0
S_{45°	11	-6.9
S_{max}	12	-15.2
S_{45°	13	1.2
S_{45°	14	3.0



Betrachteter Abstand	WEA	Vertikaler Abstand der Nachlaufströmung zum ruhenden Leiterseil Δy
		[m]
S_{45°	15	-0.6
S_{45°	17	-11.2
S_{45°	18	1.8

Tabelle 4.2.1.1: Abstände der Nachlaufströmung zu den Leiterseilen der 380kV-Leitung.

Damit ragt der Einflussbereich der Nachlaufströmung der WEA 9, 11, 12, 15 und 17 nach dem vereinfachten Verfahren bei Queranströmung in den Bereich der Leiterseile der 380kV-Leitung.

Der Einflussbereich der Nachlaufströmung der WEA 10, 13, 14 und 18 liegt nach dem vereinfachten Verfahren oberhalb der Leiterseile der 380kV-Leitung.

In Abbildung 4.2.1.2 werden der kürzeste Abstand s_{quer} und der Abstand s_{max} im Verhältnis zur WEA 12 und der Freileitung und ihren Masten dargestellt.

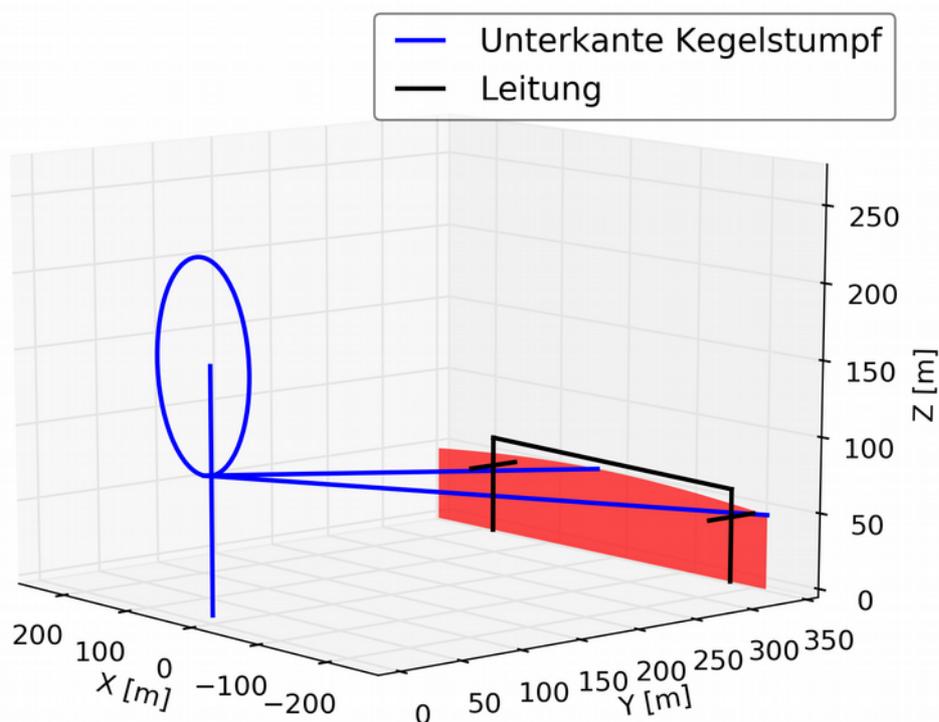


Abbildung 4.2.1.2: Vertikale Abstände zum Leiterseil für einen Rotorschwenkbereich von -36° bis $+36^\circ$.



4.2.2 Ergebnisse der CFD-Analyse

Die Ausdehnung der Nachlaufzone der Windenergieanlagen wurde auf Grundlage einer Simulation der Nachlaufströmung bewertet. Hierzu wurde in einem 3-D-Modell das Strömungsfeld hinter einer Windenergieanlage in der Größe der WEA vom Typ ENERCON E-138 EP3 E2, NH 160m, mit der Computational Fluid Dynamics (CFD) Software FLUENT berechnet. CFD-Software wird zur Berechnung dreidimensionaler Strömungsprozesse unter Berücksichtigung des Wärmetransports durch Leitung, Konvektion und Strahlung sowie chemischer Reaktionen eingesetzt. Die Programmentwicklung und -auslieferung von Fluent ist nach BSI qualitätsgesichert (British Standard Institution America Inc.; Certificate No. FM 55686; Reston VA, 2000).

Aufgrund der nicht allzu großen Steigungen des Geländes kann unterstellt werden, dass die bodennahe Strömung dem Gelände folgt. In der CFD-Berechnung wurden Höhenunterschiede zwischen den einzelnen WEA- und Tragmast-Positionen daher nicht berücksichtigt.

Die Abbildung 4.2.2.1 zeigt eine Darstellung des sich einstellenden Geschwindigkeitsfeldes hinter den WEA in Bezug auf die betroffenen Tragmasten für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 10m/s auf Nabenhöhe.

Die Windenergieanlagen vom Typ ENERCON E-138 EP3 E2, NH 160m, reichen bei einem Rotordurchmesser von 138.25m mit ihrem Rotor in ungünstigster Stellung bis auf 90.88m über Grund herunter.

Man erkennt in der Abbildung 4.2.2.1, dass der Bereich starker Geschwindigkeitsabsenkung auf einen engen Bereich begrenzt ist. Absenkungen der mittleren Windgeschwindigkeit auf 40% der Anströmwindgeschwindigkeit, wie sie in der der Norm /1/ zugrunde liegenden Studie /3/ angenommen werden, treten im Nachlauf der WEA nur in geringem Maße auf. In der Abbildung 4.2.2.1 ist daher der auf 50% der mittleren Windgeschwindigkeit reduzierte Bereich dargestellt. Auch dieser Bereich reicht nicht bis zu den Masten der Freileitung.

Weiterhin ist zu erkennen, dass sich das Geschwindigkeitsdefizit hinter den WEA nicht trichterförmig aufweitet, sondern eine relativ konstante zylindrische Form aufweist.

Insbesondere ist sehr gut zu erkennen, dass die Windgeschwindigkeit auf Höhe des Erdseils und darunter in der Umgebung der WEA nicht reduziert wird.

Eine Darstellung des weiteren Kriteriums aus /3/, der für eine Schwingungsanregung



notwendigen niedrigen Turbulenz, erübrigt sich, da der in /3/ angenommenen Wert der Turbulenzintensität von 6% im Nachlauf der WEA überall deutlich überschritten wird.

Die in Abbildung 4.2.2.1 enthaltenen Aussagen enthalten daher entsprechend sehr viele Konservativitäten. Auf Basis der Ergebnisse der CFD-Simulation lässt sich somit der Schluss ziehen, dass die Leiterseile der Freileitung nicht vom schädigenden Einflussbereich der Nachlaufströmung der WEA getroffen werden.

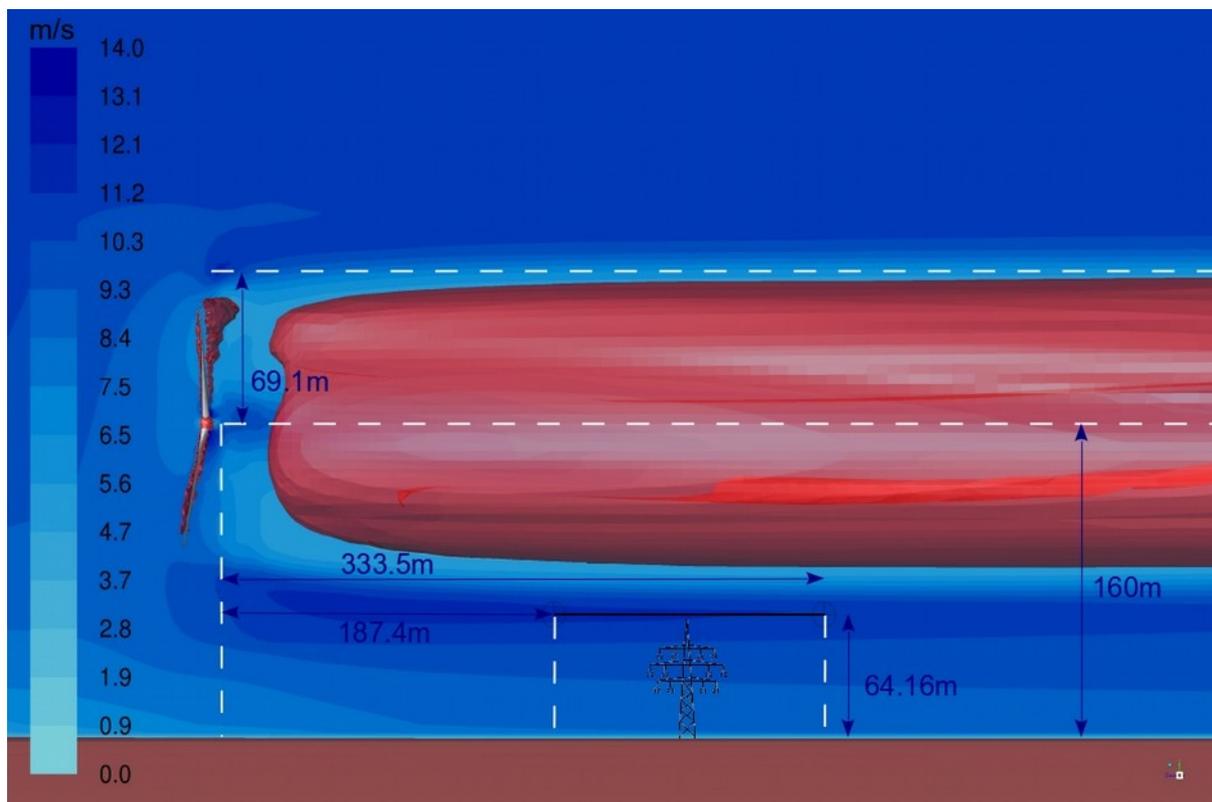


Abbildung 4.2.2.1: Vertikaler Schnitt in der Achse einer WEA vom Typ ENERCON E-138 EP3 E2, NH 160m, bei einer Anströmung mit 10m/s. Dargestellt sind zusätzlich die Positionen der einzelnen Tragmasten entsprechend ihres Abstandes. Weiterhin dargestellt ist der einhüllende Isoflächenbereich der auf 50% reduzierten Windgeschwindigkeit (rot).



5 Zusammenfassung und Bewertung

Am Standort Stralendorf (Mecklenburg-Vorpommern) plant bzw. betreibt der Auftraggeber 19 Windenergieanlagen vom Typ ENERCON E-138 EP3 E2, NH 160m, siehe hierzu Abbildung 3.1.1.

In der unmittelbaren Umgebung der WEA befindet sich die 380kV-Leitung der 50Hertz Transmission GmbH.

Die Planung wurde von uns daraufhin bewertet, ob die Möglichkeit von Leiterseilanregungen durch den Nachlauf der WEA unter Berücksichtigung der örtlichen Bedingungen gegeben ist.

Die Standorte der WEA 9 - 15, 17 und 18 weisen Abstände von weniger als drei Rotordurchmessern zwischen Turmachse der WEA und äußerstem ruhenden Leiterseil der Freileitung auf. Für diese WEA ist daher nach /1/ der Nachweis zu führen, dass die Freileitung nicht vom schädigenden Einflussbereich der Nachlaufströmung getroffen wird.

Der in der Norm /1/ geforderte horizontale Mindestabstand zwischen Turmachse der WEA und äußerstem ruhenden Leiterseil a_{WEA} wird in der vorliegenden Konfiguration an keiner der betrachteten WEA unterschritten.

Die Untersuchung ergab, dass mit dem gewählten Windenergieanlagentyp ENERCON E-138 EP3 E2, NH 160m, die Leiterseile der Freileitung nicht vom schädigenden Einflussbereich der Nachlaufströmung der WEA getroffen werden.

Von den WEA 9 - 15, 17 und 18 gehen deshalb keine die Lebensdauer durch Schwingung verkürzende Einwirkung auf die betrachtete Freileitung aus.

Zusätzliche Schwingungsschutzmaßnahmen an der Freileitung sind daher aus technischer Sicht nicht erforderlich.



6 Formelzeichen und Abkürzungen

WEA	Windenergieanlage	
RD	Rotordurchmesser	
NH	Nabenhöhe	
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission	
CFD	Computational Fluid Dynamics	
EOK	Erdoberkante	
üNN	über Normal Null	
ETRS89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989	
UTM	Universale Transversale Mercator Projektion	
D_{WEA}	Rotordurchmesser WEA	[m]
v	Windgeschwindigkeit	[m/s]
h	Höhe	[m]
a_{WEA}	Horizontaler Mindestabstand zwischen Turmachse und äußerstem ruhenden Leiterseil	[m]
a_{Raum}	Arbeitsraum	[m]
a_{LTG}	Spannungsabhängiger Mindestabstand	[m]
$D_{Schwing}$	Ausschwingbreite der Leiterseile.	[m]
D_V	spannungsabhängiger Schutzabstand	[m]
s_{Exz}	Abstand zwischen der Turmachse der WEA und der Rotorebene	[m]
Δy	Vertikaler Abstand zwischen dem betrachteten Leiterseil und der Nachlaufströmung nach dem vereinfachten Modell der DIN EN 50341-2-4	[m]



7 Literaturangaben

- /1/ DIN EN 50341-2-4 (VDE 0210-2-4); Freileitungen über AC 1 kV - Teil 2-4: Nationale Normative Festlegungen (NNA) für Deutschland (basierend auf EN 50341-1:2012); Deutsche Fassung EN 50341-2-4:2016, April 2016.
- /2/ DIN VDE 0105-100 (VDE 0105-100); Betrieb von elektrischen Anlagen - Teil 100: Allgemeine Festlegungen; Oktober 2009.
- /3/ Degener, T.; Kießling, F.; Tzschoppe, J.; Mindestabstand zwischen Windenergieanlagen und Freileitungen; Elektrizitätswirtschaft Jg. 98 (1999), Heft 7, Seite 32-35.
- /4/ P. Hagedorn : LeiterseilSchwingungen in Theorie und Praxis - ein Überblick. etz-Report 26, VDE-Verlag, Berlin, Offenbach (1990).
- /5/ W. Philipps : SeilSchwingungen bei Freileitungen Elektrizitätswirtschaft Jg. 67 (1968), Heft 11, S. 279 ff.
- /6/ L.J. Vermeer, J.N. Sørensen, A. Crespo; Wind turbine wake aerodynamics; Progress in Aerospace Sciences 39, pp. 467-510, 2003.
- /7/ Th. Hahm, J. Kröning; Modellierung der Nachlaufströmung einer Windenergieanlage; Fluent Anwenderkonferenz 2001; Bingen, 17./18. Sept. 2001
- /8/ St. Wußow, L. Sitzki, Th. Hahm; 3D-simulation of the turbulent wake behind a wind turbine; The Science of Making Torque from Wind, Journal of Physics: Conference Series 75 (2007) 012033.
- /9/ Th. Hahm; Hochspannung und Windkraft; energy 2.0, S. 44-46, April 2008.
- /10/ Prof. B. R. Oswald; Universität Hannover, Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik; Vorlesung Elektrische Energieversorgung I – Skript Freileitungen, korrigierte Ausgabe 2005.
- /11/ OpenStreetMap und Mitwirkende; siehe Internet: <http://www.openstreetmap.org>, <http://opendatacommons.org>, <http://creativecommons.org>.