



## Gutachten zu Freileitungen im Windpark Hirschweg Bad Wünnenberg 4WEA

**Referenz-Nummer:**

2024-D-004-P5-R0

**Auftraggeber:**

WBG Energie 1 GmbH & Co. KG  
An der Grotte 17, 33181 Bad Wünnenberg

**Die Ausarbeitung des Gutachtens erfolgte durch:**

Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG  
Borsteler Chaussee 178, 22453 Hamburg, [www.f2e.de](http://www.f2e.de)

**Verfasser:**

M.Sc. Susann Heise, Sachverständige,

Hamburg, 13.09.2024

**Geprüft:**

Dr.-Ing. Thomas Hahm, Sachverständiger,

Hamburg, 13.09.2024

**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 110-kV-Bahnstromleitung 477 Warburg - Ehringhausen werden nicht vom schädigenden Einflussbereich der Nachlaufströmung der am Standort Hirschweg Bad Wünnenberg 4WEA betrachteten WEA getroffen. Zusätzliche Schwingungsschutzmaßnahmen an der Freileitung 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.....	11
4 Durchgeführte Untersuchungen.....	12
4.1 Bestimmung der Abstände.....	12
4.2 Bestimmung des Einflussbereichs der Nachlaufströmung.....	13
4.2.1 Ergebnisse nach /1/.....	13
5 Zusammenfassung und Bewertung.....	15
6 Formelzeichen und Abkürzungen.....	16
7 Literaturangaben.....	17





## 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  $6^\circ$  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.



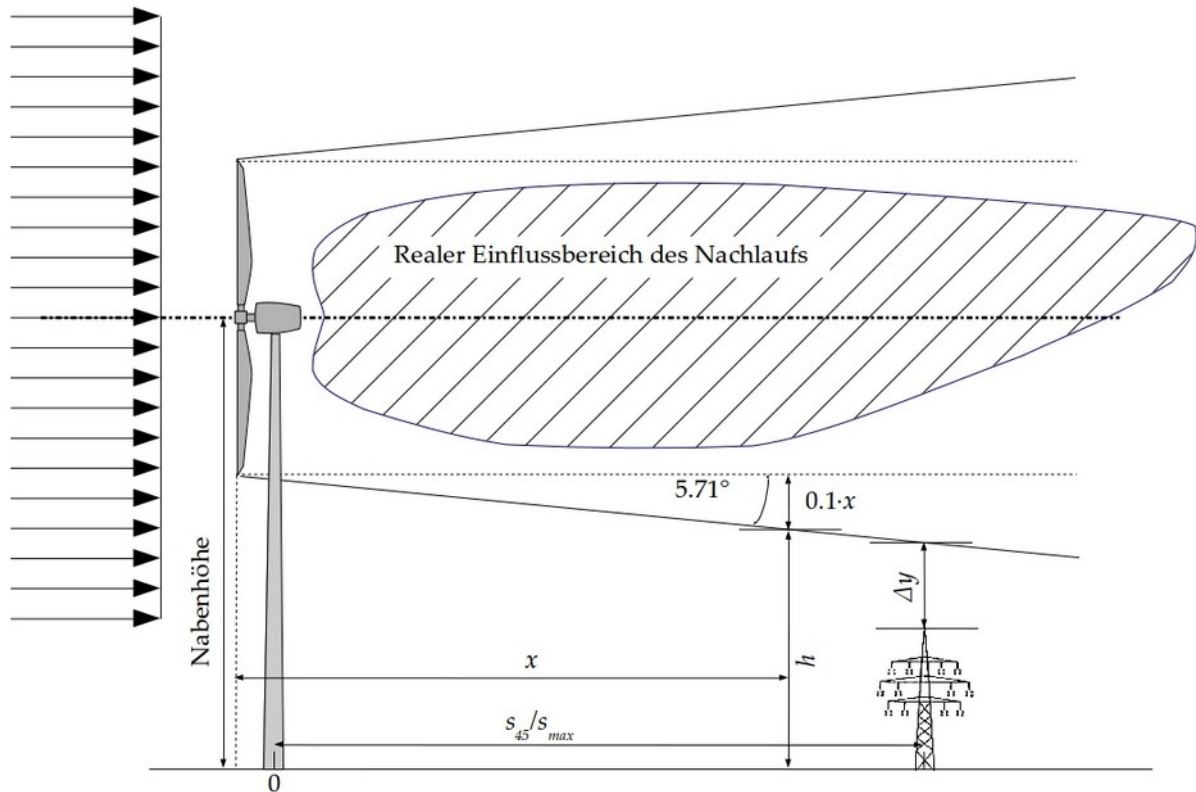
Eine genaue Verifizierung dieses Bereiches gestaltet sich schwierig. Geeignete Freifeldmessungen an realen WEA liegen nicht vor oder geben nur Ausschnitte wieder. Es sind daher verschiedene Nachlaufmodelle entwickelt worden (siehe z.B. /6/). In den letzten Jahren haben sich zunehmend dreidimensionale 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 Hirschweg Bad Wünnenberg 4WEA (Nordrhein-Westfalen) plant bzw. betreibt der Auftraggeber vier Windenergieanlagen vom Typ ENERCON E-160 EP5 E3 R1, 5.56MW, NH 166.6m (WEA 1) und vom Typ ENERCON E-138 EP3 E3, 4.26MW, NH 160m (WEA 2 - 4).

In der unmittelbaren Umgebung der WEA befindet sich die 110-kV-Bahnstromleitung 477 Warburg - Ehringhausen der DB Energie GmbH. Die Standorte der WEA 1 - 4 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.

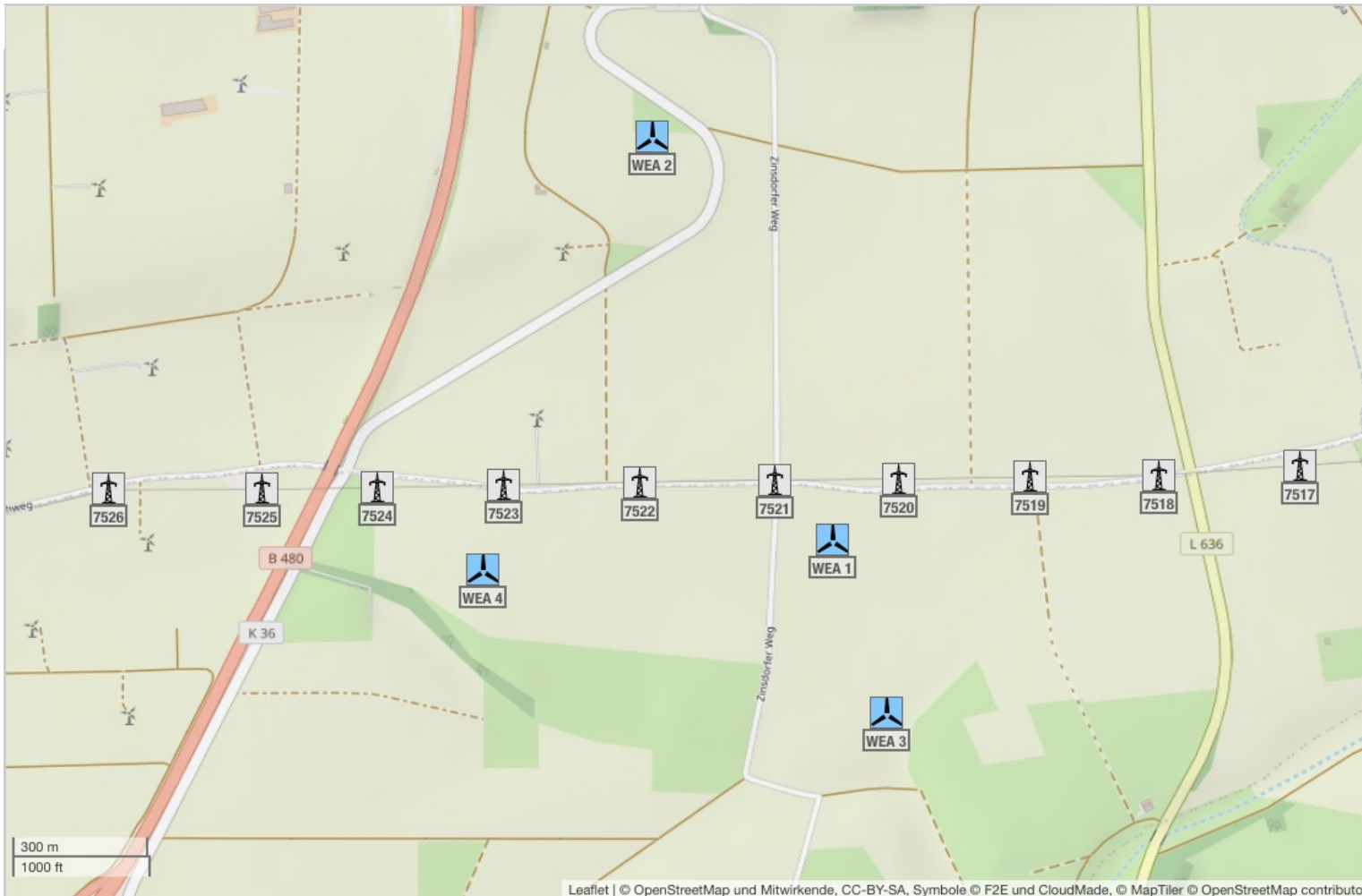




	Lfd. Nr.	Bezeichnung	WEA-Typ	P <sub>N</sub> [MW]	NH [m]	RD [m]	Koordinaten (GK PD Bessel)		Koordinaten (UTM ETRS89 / WGS84 Zone 32)		Höhe EOK üNN [m]	S <sub>exz</sub> [m]
							Rechts	Hoch	East	North		
	1	WEA 7 (Az.40905-24-600)	ENERCON E-160 EP5 E3 R1	5.56	166.6	160	3481184	5712157	32481118	5710312	315.52	6.10
	2	WEA 8 (Az. 41237-24-600)	ENERCON E-138 EP3 E3	4.26	160	138.25	3480789	5713073	32480723	5711228	344.33	6.31
	3	WEA 9 (Az. 41254-24-600)	ENERCON E-138 EP3 E3	4.26	160	138.25	3481303	5711762	32481237	5709917	307.62	6.31
	4	WEA 10 (Az. 41271-24-600)	ENERCON E-138 EP3 E3	4.26	160	138.25	3480410	5712090	32480344	5710245	329.50	6.31

**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/.

-  WEA geplant
-  weitere WEA
-  Freileitungsmast

### 3.2 Daten der Freileitung

Die vom Auftraggeber übermittelten Daten zur 110-kV-Bahnstromleitung 477 Warburg - Ehringhausen sind in den Tabellen 3.2.1 und 3.2.2 dargestellt.

	Tragmast	Koordinaten (GK PD Bessel)		Masttyp	Traversen -breite [m]	Höhe EOK üNN [m]	Mast- höhe [m]	Höhe Mastspitze üNN [m]
		Rechts	Hoch					
	7515	3482723	5712354	T + 0	5.6	306.60	25.06*	331.66
	7516	3482453	5712337	T + 0	5.6	301.44	25.43*	326.87
	7517	3482220	5712321	T + 0	5.6	306.06	24.90*	330.96
	7518	3481909	5712300	WT + 0	6.3	311.07	24.90*	335.97
	7519	3481624	5712297	T - 1.5	5.6	315.27	23.51*	338.78
	7520	3481332	5712294	T - 1.5	5.6	317.65	23.51*	341.16
	7521	3481059	5712291	T - 1.5	5.6	321.73	23.49*	345.22
	7522	3480760	5712287	T + 0	5.6	326.11	24.93*	351.04
	7523	3480458	5712284	T - 1.5	5.6	331.24	23.68*	354.92
	7524	3480177	5712280	---	5.6	329.88	21.72	351.60
	7525	3479924	5712277	---	5.6	328.23	24.53	352.76
	7526	3479582	5712278	---	5.6	329.62	25.11	354.73
	7527	3479300	5712207	---	5.6	336.35	21.61	357.96
	7528	3479018	5712137	---	5.6	342.35	23.31	365.66
	7529	3478751	5712070	---	5.6	346.37	26.06	372.43

**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	$D_{\text{schwing}}$ [m]	$D_V$ [m]	$D_{\text{schwing}^+}$ $D_V$ [m]	>/<	$a_{\text{LTG}}$ [m]	$a_{\text{Raum}}$ [m]	Breite des Schutz- streifens [m]
7520 - 7521	1	7.6*	3	10.6	>	20	15	13.1
	3						0	
7521 - 7522	2	8.5*	3	11.5	>	20	0	14.1
7523 - 7524	4	---*	3	---	---	20	0	---*

**Tabelle 3.2.2:** Weitere verwendete Daten zu den Spannfeldern.

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

---\*: Zu  $D_{\text{schwing}}$  und zur Breite des Schutzstreifens der Freileitungen lagen keine Daten vor.

Die ermittelten Werte für  $a_{\text{Raum}}$  sind in Tabelle 3.2.2 dargestellt.

## 4 Durchgeführte Untersuchungen

### 4.1 Bestimmung der Abstände

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2 kann die Bestimmung der einzuhaltenen 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  $a_{\text{Raum}}$  und dem spannungsabhängigen Mindestabstand  $a_{\text{LTG}}$  nicht unterschreiten.

Die in der Tabelle 3.2.2 dargestellte Summe aus  $D_{\text{schwing}}$  und  $D_V$  ist in der vorliegenden Konfiguration an den WEA 1 - 3 kleiner als  $a_{\text{LTG}}$ . Zur weiteren Berechnung wird daher  $a_{\text{LTG}}$  als spannungsabhängiger Mindestabstand verwendet.

Auf Grund fehlender Angaben zu  $D_{\text{schwing}}$  im Bereich der WEA 4 wird zur weiteren Berechnung  $a_{\text{LTG}}$  als spannungsabhängiger Mindestabstand verwendet.

Lfd.Nr.	Bezeichnung	Mindestabstand $a_{\text{WEA}}$ nach /1/ [m]	Vorhandener Abstand $a_{\text{WEA}}$	
			[m]	in RD
1	WEA 7 (Az.40905-24-600)	115.0	129.8	<b>0.81</b>
2	WEA 8 (Az. 41237-24-600)	89.1	779.5	5.64
3	WEA 9 (Az. 41254-24-600)	89.1	525.8	3.80
4	WEA 10 (Az. 41271-24-600)	89.1	187.8	<b>1.36</b>

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

Die Standorte der WEA 1 und 4 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  $a_{\text{WEA}}$  wird in der vorliegenden Konfiguration an keiner der betrachteten WEA unterschritten.

## 4.2 Bestimmung des Einflussbereichs der Nachlaufströmung

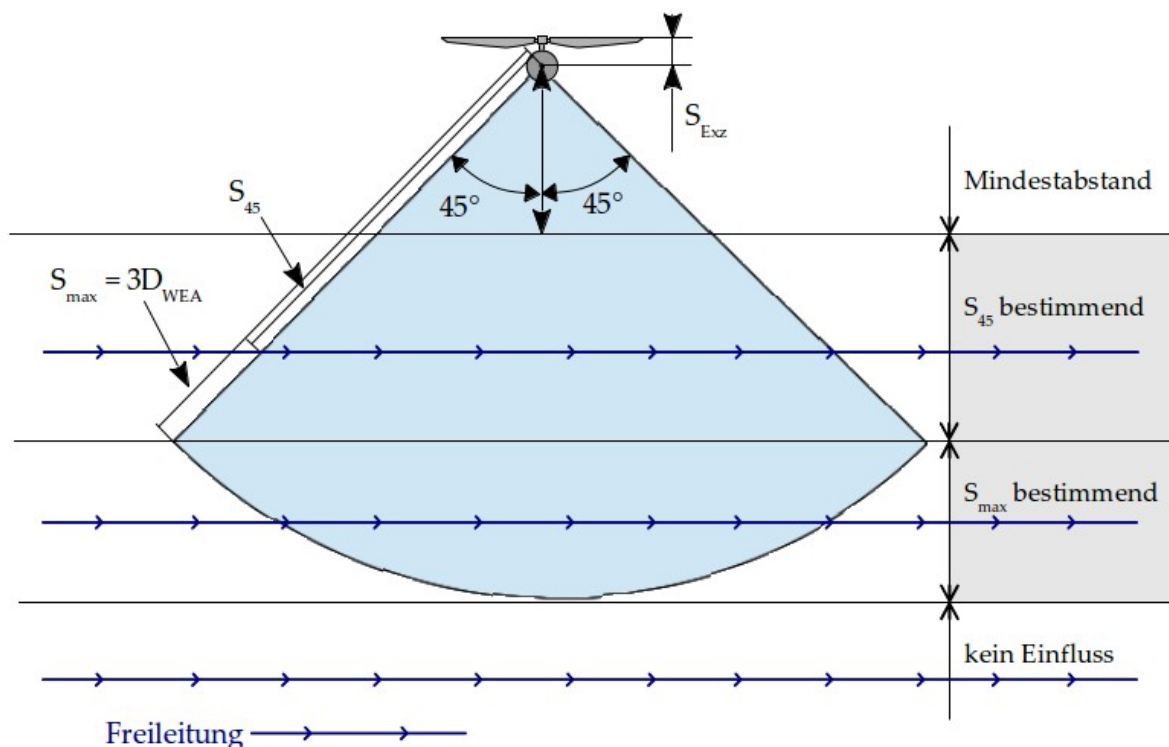
Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2 erfolgt die Bewertung des schädigenden Einflussbereiches der Nachlaufströmung mit dem vereinfachten Berechnungsverfahren nach /1/. Falls erforderlich wird eine Bewertung mittels einer detaillierten CFD-Analyse vorgenommen.

### 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  $45^\circ$   $s_{45^\circ}$  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  $45^\circ$   $s_{45^\circ}$  für die WEA 1 und 4 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.



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

Betrachteter Abstand	WEA	Bezeichnung	Vertikaler Abstand der Nachlaufströmung zum ruhenden Leiterseil $\Delta y$
			[m]
S <sub>45°</sub>	1	WEA 7 (Az.40905-24-600)	36.9
S <sub>45°</sub>	4	WEA 10 (Az. 41271-24-600)	37.2

**Tabelle 4.2.1.1:** Abstände der Nachlaufströmung zu den Leiterseilen der 110-kV-Bahnstromleitung 477 Warburg - Ehringhausen.

Damit liegt der Einflussbereich der Nachlaufströmung der WEA 1 und 4 nach dem vereinfachten Verfahren oberhalb der Leiterseile der 110-kV-Bahnstromleitung 477 Warburg - Ehringhausen.

## 5 Zusammenfassung und Bewertung

Am Standort Hirschweg Bad Wünnenberg 4WEA (Nordrhein-Westfalen) plant bzw. betreibt der Auftraggeber vier Windenergieanlagen vom Typ ENERCON E-160 EP5 E3 R1, 5.56MW, NH 166.6m (WEA 1) und vom Typ ENERCON E-138 EP3 E3, 4.26MW, NH 160m (WEA 2 - 4), siehe hierzu Abbildung 3.1.1.

In der unmittelbaren Umgebung der WEA befindet sich die 110-kV-Bahnstromleitung 477 Warburg - Ehringhausen der DB Energie GmbH. Die Standorte der WEA 1 - 4 liegen in unmittelbarer Nähe zur Freileitung.

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 1 und 4 weisen Abstände von weniger als drei Rotordurchmessern zwischen Turmachse der WEA und äußerstem ruhenden Leiterseil 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 wird in der vorliegenden Konfiguration an keiner der betrachteten WEA unterschritten.

Die Untersuchung ergab, dass mit den gewählten Windenergieanlagentypen ENERCON E-160 EP5 E3 R1, 5.56MW, NH 166.6m (WEA 1) und ENERCON E-138 EP3 E3, 4.26MW, NH 160m (WEA 2 - 4), die Leiterseile der Freileitung nicht vom schädigenden Einflussbereich der Nachlaufströmung der WEA getroffen werden.

Von den WEA 1 - 4 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	
GK	Gauß Krüger Projektion	
PD	Potsdam-Datum	
ETRS89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989	
UTM	Universale Transversale Mercator Projektion	
WGS84	World Geodetic System 1984	
$D_{WEA}$	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]
$s_{45}$	Für einen Schwenkbereiches des Rotors von +/- 45° zu betrachtender Abstand nach DIN EN 50341-2-4	[m]
$s_{max}$	Maximal zu betrachtender Abstand nach DIN EN 50341-2-4	[m]
$\Delta y$	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 50341-2-4:2019, September 2019.
- /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>.