

Raitersaich – Ludersheim – Sittling – Altheim 380-kV-Neubauprojekt

Juraleitung

Ltg. Abschnitt A-West Raitersaich_West – Ludersheim_West

LH-07-B170

Planfeststellungsunterlage

Anlage 9.1

**Immissionsbericht zu elektrischen und
magnetischen Feldern
mit Minimierungsbetrachtung**

Antragsteller:



TenneT TSO GmbH

Bernecker Straße 70

95448 Bayreuth

Bearbeitung:



K2 Engineering GmbH

Am Egelingsberg 1

38542 Leiferde

Aufgestellt:	TenneT TSO GmbH	Bayreuth, den
	gez. i.V. J. Gotzler gez. i.V. A. Junginger	25.03.2025
Bearbeitung	K2 Engineering GmbH, gez. i.A. C. Güldenpfennig	
Anlagen zum Dokument	Immissionsbericht zu elektrischen und magnetischen Feldern mit Minimierungsbetrachtung - Anhang 1: WinField Zertifikat - Anhang 2: Immissionstabellen für maßgebliche Immissionsorte für elektrische und magnetische Felder - Anhang 3: Grafische Darstellung maßgeblicher Immissionsorte - Anhang 4: Liste maßgeblicher Minimierungsorte und (repräsentativer) Bezugspunkte	
Änderungshistorie:	Änderung:	Änderungsdatum:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Grundlagen.....	7
3	Gesetzliche Vorgaben für elektrische und magnetische Felder	8
4	Methodik.....	10
5	Datengrundlagen und Berechnungsparameter.....	11
6	Ergebnisse	12
6.1	Standardmastfelder	12
6.2	Immissionen anderer Anlagen.....	13
6.3	Maßgebliche Immissionsorte.....	13
6.4	Überspannungsverbot und Vermeidung erheblicher Belästigungen	14
6.5	Zusätzlich untersuchte Immissionsorte	15
7	Minimierung elektrischer und magnetischer Felder	16
7.1	Minimierung elektrischer und magnetischer Felder	16
7.2	Ermittlung der Minimierungsmaßnahmen	16
7.3	Maßnahmenbewertung.....	20
8	Zusammenfassung und Fazit	21
	Gesetze und Literatur	22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Netzkarte des Vorhabens	5
Abbildung 2:	Magnetische Flussdichte eines Standardmastfeldes für das Gestänge D-2-D-2018.3	12
Abbildung 3:	Elektrische Feldstärke eines Standardmastfeldes für das Gestänge D-2-D-2018.3	13

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Leitungsparameter	11
Tabelle 2:	Maximalwerte der magnetischen Flussdichte und elektrischen Feldstärke für das Gestänge D-2-D-2018.3	12
Tabelle 3:	Maximalwerte der elektrischen Feldstärke und magnetischen Flussdichte an maßgeblichen Immissionsorten	14
Tabelle 4:	Minimierungswirkung der Abstandsoptimierung durch Masterhöhung	17
Tabelle 5:	Minimierungswirkung der Optimierung der Leiteranordnung	19

Abkürzungsverzeichnis

A	Ampere (Einheit für die Stromstärke)
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
26. BImSchV	26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
26. BImSchVVwV	Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder
EOK	Erdoberkante
Hz	Hertz (Einheit der Frequenz)
kV	Kilovolt (Einheit für die elektrische Spannung, 1 kV = 1000 V)
kV/m	Kilovolt pro Meter (Einheit für die elektrische Feldstärke)
KÜA	Kabelübergangsanlage
LAI	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz
T	Tesla (Einheit für die magnetische Flussdichte)
μT	Mikrotesla (Einheit für die magnetische Flussdichte, 1 μT = 1 x 10 ⁻⁶ T)

1 Einleitung

Im Rahmen der Untersuchungen zum Netzentwicklungsplan wurde das bestehende, z.T. aus den 1940er-Jahren stammende, Leitungsnetz zwischen den UW Raitersaich und Altheim als Engpass im Übertragungsgebiet der TenneT identifiziert und mit der erstmaligen Aufnahme in den Netzentwicklungsplan Strom im Jahr 2012 der Ersatzneubau der bestehenden Leitungen als Maßnahme zur Überwindung dieses Engpasses definiert. Die Vorhabenträgerin beabsichtigt daher, die vorhandenen 220-kV-Freileitungen durch leistungsstarke und dem Stand der Technik entsprechende 380-kV-Leitungen zu ersetzen und somit das Netz zwischen den UW Raitersaich, Ludersheim, Sittling und Altheim zu verstärken. Im Rahmen des beantragten Planfeststellungsverfahrens, sind die mit der Maßnahme verbundenen Immissionen darzustellen und hinsichtlich der Einhaltung vorgeschriebener Grenz- und Richtwerte zu beurteilen. Dieser Bericht untersucht die zu erwartenden Immissionen elektrischer und magnetischer Felder für den Abschnitt A-West Raitersaich_West – Ludersheim_West und bewertet diese in Hinblick auf die Einhaltung gesetzlicher Vorgaben in Sinne der 26. BImSchV.

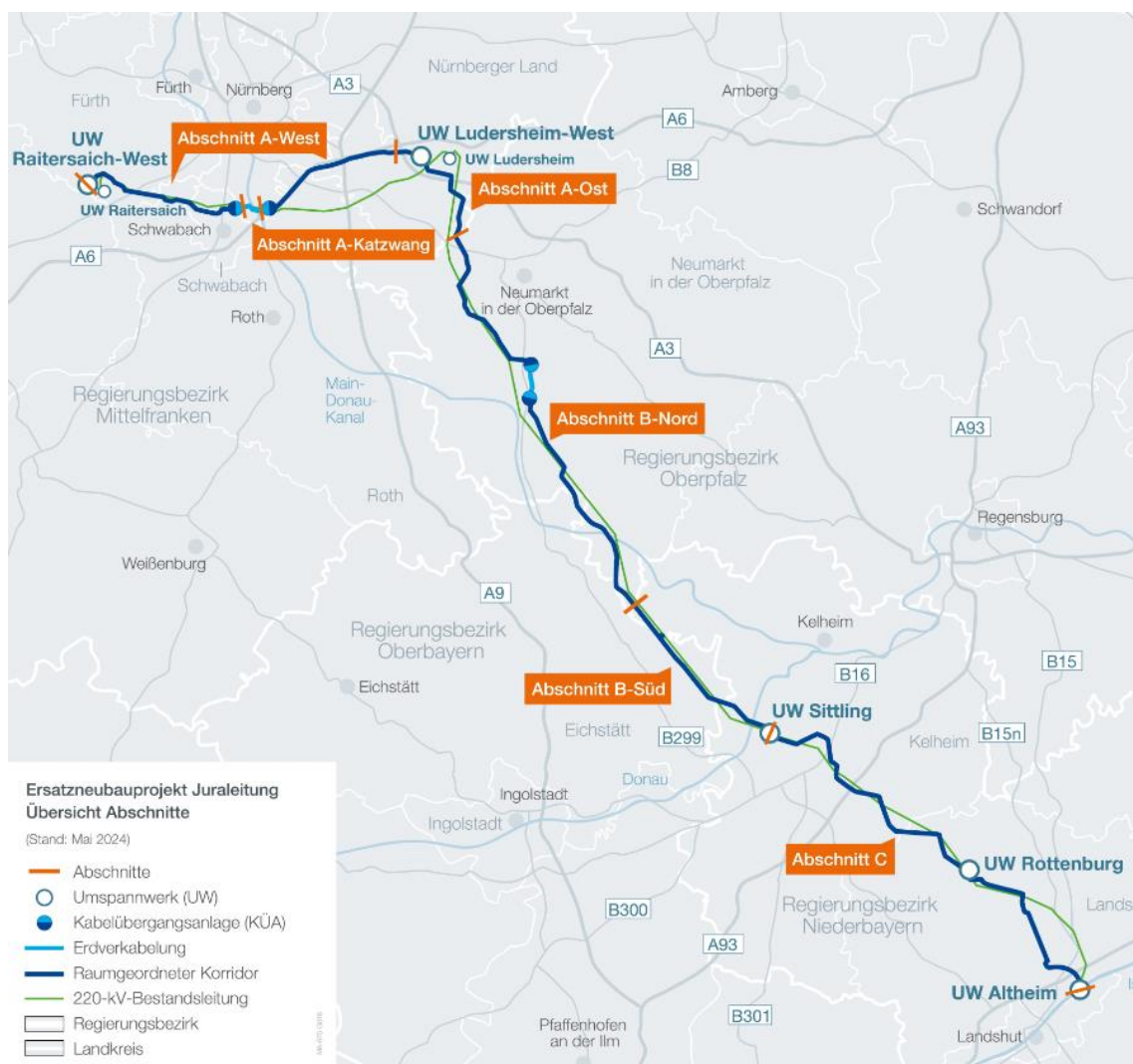


Abbildung 1: Schematische Netzkarte des Vorhabens

Innerhalb des betrachteten Leitungsabschnitts liegt ein separater Erdkabelabschnitt mit eigenem Zulassungsverfahren. Die zum Übergang von Freileitungstechnik zu Erdkabeltechnik notwendigen Kabelübergangsanlagen (KÜA) werden im vorliegenden Bericht beurteilt. Die Erdkabelanlage selbst wird in Hinblick auf die von ihr ausgehenden Immissionen elektrischer und magnetischer Felder hier nicht betrachtet.

2 Grundlagen

Freileitungen erzeugen aufgrund der unter Spannung stehenden und Strom führenden Leiterseile elektrische und magnetische Felder mit einer Frequenz, die zur Betriebsfrequenz identisch ist. Die betrachtete Leitung weist eine Betriebsfrequenz von 50 Hz auf und ist damit als Niederfrequenzanlage im Sinne der 26. BImSchV einzuordnen.

Ursache des elektrischen Feldes ist die Spannung. Der Betrag des elektrischen Feldes hängt von der Höhe der Spannung sowie von der Konfiguration der Leiterseile am Mast, den Abständen zum Boden, der Anzahl der Erdseile und der Phasenordnung ab. Da Netze mit annähernd konstanter Spannung betrieben werden, ergibt sich kaum eine Variation der elektrischen Feldstärke. Die elektrische Feldstärke verändert sich lediglich durch die mit der Leiterseiltemperatur variierenden Bodenabstände.

Ursache für das magnetische Feld ist der elektrische Strom. Bei niederfrequenten Feldern wird als zu bewertende Größe die magnetische Flussdichte herangezogen. Je größer die Stromstärke, desto höher ist auch die magnetische Flussdichte (lineare Abhängigkeit). Da die Stromstärke stark von der Netzbelastung abhängt, ergeben sich tages- und jahreszeitliche Schwankungen der magnetischen Flussdichte. Die höchsten Werte treten beim Betrieb der Leitung mit dem maximal zulässigen Dauerstrom auf. Normalerweise wird die Leitung mit einer geringeren Stromstärke betrieben, wodurch auch geringere magnetische Flussdichten auftreten. Wie auch beim elektrischen Feld, hängt die räumliche Ausdehnung und Größe von der Konfiguration der Leiterseile am Mast, den Mastabständen, der Anzahl der Erdseile und der Phasenordnung ab. Die magnetische Flussdichte verändert sich zusätzlich durch die mit der Leiterseiltemperatur variierenden Bodenabstände.

Die stärksten elektrischen und magnetischen Felder treten direkt unterhalb der Freileitung bei ebenem Gelände zwischen den Masten etwa in Spannungsfeldmitte am Ort des geringsten Bodenabstands der Leiterseile auf. Die Stärke der Felder nimmt mit zunehmender seitlicher Entfernung von der Leitung relativ schnell ab. Elektrische Felder können durch elektrisch leitfähige Materialien, z. B. durch bauliche Strukturen oder Bewuchs, gut abgeschirmt werden. Magnetfelder können anorganische und organische Stoffe nahezu ungestört durchdringen.

3 Gesetzliche Vorgaben für elektrische und magnetische Felder

Zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen definiert die 26. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetz (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV) [1] an Orten, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, Grenzwerte für die Immission von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern im Einwirkungsbereich von Anlagen. Für niederfrequente Anlagen mit einer Frequenz von 50 Hz und Nennspannungen größer als 1 kV dürfen gemäß § 3 (1) i. V. m. Anhang 1a 26. BImSchV folgende Grenzwerte nicht überschritten werden:

- elektrische Feldstärke 5 kV/m
- magnetische Flussdichte 100 μ T

Die LAI-Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder [2] definieren in Ziffer II.3.1 (Einwirkungsbereich von Niederfrequenzanlagen und maßgebliche Immissionsorte) für Wechselstromanlagen mit einer Nennspannung von 380 kV die Orte als maßgebliche Immissionsorte, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind und sich in einem Streifen mit der Entfernung von 20 m, gemessen ab dem äußeren ruhenden Leiter, befinden. Die betrachteten KÜA sind in Ziffer II.3.1 der LAI-Hinweise nicht aufgeführt. Hilfsweise wird der Wert für Umspannanlagen herangezogen. Hier beträgt der zu betrachtende Bereich einen Streifen von 5 m um die Anlage.

Unabhängig von der Einhaltung der Grenzwerte sind gemäß § 4 (2) 26. BImSchV die Möglichkeiten auszuschöpfen, die von der jeweiligen Anlage ausgehenden elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Felder nach dem Stand der Technik unter Berücksichtigung von Gegebenheiten im Einwirkungsbereich zu minimieren.

Dazu definiert die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV (26. BImSchVVwV) [3] für Wechselstromanlagen mit Nennspannungen von 380 kV einen Einwirkungsbereich von 400 m, gemessen ab der Bodenprojektion des äußeren ruhenden Leiterseils. Maßgebliche Minimierungsorte sind alle im Einwirkungsbereich liegenden Gebäude oder Grundstücke im Sinne von § 4 (2) 26. BImSchV, sowie jedes Gebäude oder Gebäudeteil, das zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt ist. Der Einwirkungsbereich für Umspann- und Schaltanlagen mit mehr als 110 kV, der für die KÜA genutzt wird, beträgt 100 m, gemessen ab der Eingrenzung der Anlage.

Zur Einhaltung der Grenzwerte elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder sind auch die Immissionsbeiträge anderer Anlagen mit Frequenzen zwischen 1 Hz und 10 MHz zu betrachten. Dabei dürfen die prozentualen Anteile jedes Frequenzbeitrags am Grenzwert ihres jeweiligen Frequenzbandes zusammengenommen 100% nicht überschreiten. Andere Niederfrequenzanlagen tragen gemäß Ziffer II.3.4 der LAI-Hinweise nur an den maßgeblichen Immissionsorten relevant zur Vorbelastung bei, die sich in einem der in Ziffer II.3.1 definierten Bereich von 300 m um diese Anlage befinden.

Gemäß §4 (3) 26. BImSchV dürfen Niederfrequenzanlagen zur Fortleitung von Elektrizität mit einer Frequenz von 50 Hertz und einer Nennspannung von 220 Kilovolt und mehr, die in einer neuen

Trasse errichtet werden, Gebäude oder Gebäudeteile nicht überspannen, die zum dauerhaften Aufenthalt von Menschen bestimmt sind. Darüber hinaus sind für Niederfrequenzanlagen nach §3 (4) 26. BImSchV Wirkungen wie Funkenentladungen auch zwischen Personen und leitfähigen Objekten zu vermeiden, wenn sie zu erheblichen Belästigungen oder Schäden führen können.

Für die Berechnung und Bewertung der Immissionen muss die höchste betriebliche Anlagenauslastung zugrunde gelegt werden.

4 Methodik

Zur Bestimmung der elektrischen Feldstärke und magnetischen Flussdichte werden in einem ersten Schritt maßgebliche Immissionsorte als Orte identifiziert, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt bestimmt sind und sich in einem Abstand von bis zu 20 m bei 380-kV-Leitungen von den äußeren ruhenden Leiterseilen befinden. Anschließend erfolgt eine Modellierung der zu betrachtenden Leitung und die Berechnung der elektrischen Feldstärke sowie der magnetischen Flussdichte mit Hilfe des Programms WinField [5].

Da die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte in einer Höhe von 1 m über Erdoberkante (EOK) zu bestimmen sind, wird ein digitales Geländemodell verwendet. Es werden jeweils die höchsten Immissionswerte auf einem zu betrachtenden Flurstück bestimmt. Befinden sich Gebäude oder Gebäudeteile auf dem zu betrachtenden Grundstück, so wird an diesem eine zusätzliche Berechnung der Feldstärken durchgeführt. Dabei wird im Bereich von Freileitungen insbesondere auch die tatsächliche Gebäudehöhe zur Ermittlung der Feldstärken herangezogen. Dies ist eine stark konservative Betrachtungsweise, die mögliche Ausbauten von Dachgeschossen berücksichtigt, unabhängig vom tatsächlichen Ausbau, da der Nachweis grundsätzlich 1 m über dem Boden des obersten Stockwerks erfolgen sollte.

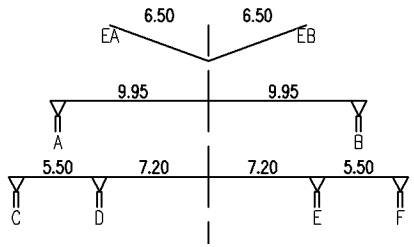
5 Datengrundlagen und Berechnungsparameter

Die Modellierung der geplanten Leitungsneubauten erfolgt auf Grundlage der Lagepläne aus der Unterlage 4.1.1 Lage-/Rechtserwerbspläne und der Mastkopfbilder aus der Unterlage 7.1 Profilpläne.

Für die Berechnung werden die technischen Parameter aus Tabelle 1 genutzt. Die überwiegend zu erwartende Stromrichtung basiert auf einer angenommenen Stromtransportrichtung erneuerbarer Energien auf der Gesamtleitung von Nord nach Süd, wobei sich daraus für den betrachteten Leitungsabschnitt ein Verlauf von West nach Ost ergibt. Die betrachtete Frequenz beschränkt sich auf die jeweilige Netzfrequenz der Leitung. Oberwellenanteile sind so gering, dass diese vernachlässigt werden können.

Die später im Betrieb angewandte Phasenordnung steht zum jetzigen Zeitpunkt der Planung noch nicht abschließend fest. Lediglich diejenigen Phasenordnungen, bei denen die elektrischen Felder unterhalb der Leitung am höchsten sind, werden bereits mittels Planungsgrundsatz der TenneT ausgeschlossen und müssen somit in der Ermittlung der maximalen magnetischen und elektrischen Felder nicht berücksichtigt werden. Für die verbleibenden vier möglichen Phasenordnungen wurde jeweils an den Immissionsorten die magnetische Flussdichte und die elektrische Feldstärke berechnet und diejenige mit den höchsten Immissionswerten ausgewertet.

Tabelle 1: Leitungsparameter

Leitungsparameter	Ausprägung
Höchste Betriebsspannung	420 kV
Höchster Betriebsstrom je Phase	4000 A
Frequenz	50 Hz
Überwiegend zu erwartende Stromrichtung	West nach Ost (aufsteigende Mastnummern)
Leiterseil	2x3x4 AL/ST 565/72
Erdseile	2x AL3/A20SA 261/25
Mastkopfskizze (Gestänge D-2-D-2018.3)	 T1-Tragmast (Weitere Mastkopfbilder sind in Unterlage 7.1 Profilpläne dargestellt.)

6 Ergebnisse

6.1 Standardmastfelder

Zur Darstellung der Immissionen werden das in Tabelle 1 aufgeführte Gestänge zur Definition von Standardmastfeldern genutzt. Dazu wird quer zur Leitungsachse ein Profil in Feldmitte für den minimalen Bodenabstand von 12 m erstellt. Die Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen die Höchstwerte der magnetischen Flussdichte und des elektrischen Feldes in einem Meter über EOK für diese Bereiche zusammen mit dem Abstand des Höchstwerts zur Leitungsachse.

Tabelle 2: Maximalwerte der magnetischen Flussdichte und elektrischen Feldstärke für das Gestänge D-2-D-2018.3

Standard-mastfeld	Magnetische Flussdichte		Elektrische Feldstärke	
	Höchstwert [μT]	Auslastung Grenzwert [%]	Höchstwert [kV/m]	Auslastung Grenzwert [%]
D-2-D.2018.3	62,4	62,4	4,8	96

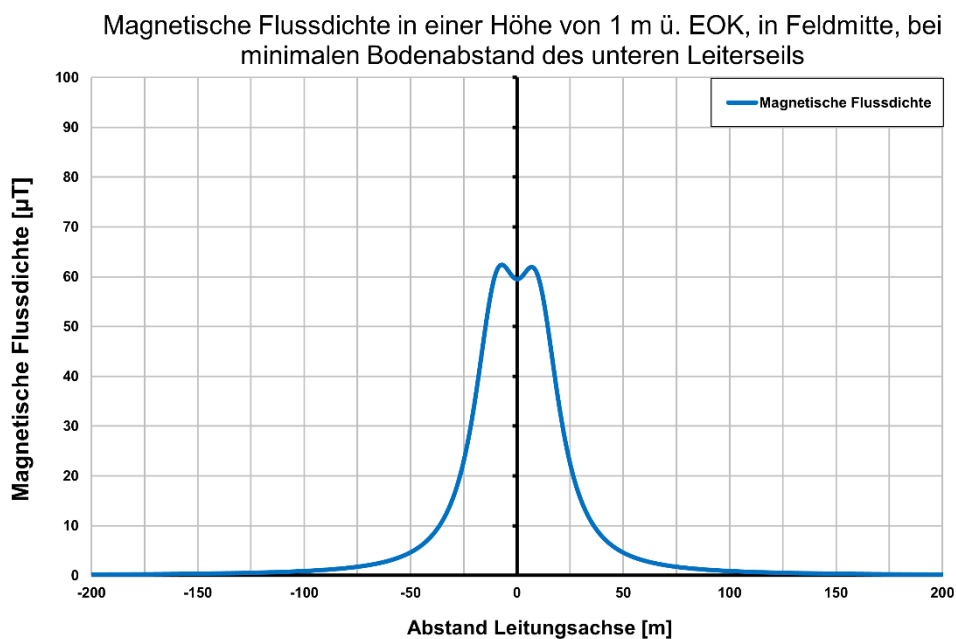


Abbildung 2: Magnetische Flussdichte eines Standardmastfeldes für das Gestänge D-2-D-2018.3

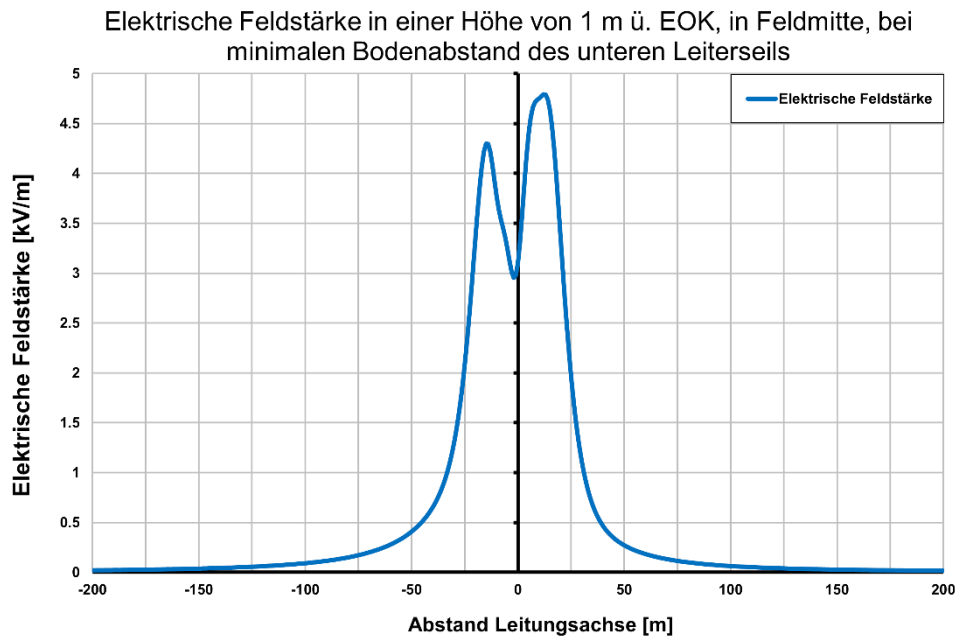


Abbildung 3: Elektrische Feldstärke eines Standardmastfeldes für das Gestänge D-2-D-2018.3

6.2 Immissionen anderer Anlagen

Die betrachteten Leitungen verlaufen abschnittsweise parallel zu anderen Freileitungen oder werden von diesen gekreuzt. Allerdings befinden sich diese Bereiche nicht in der Nähe maßgeblicher Immissionsorte. Eine Betrachtung der Fremdleitungen ist daher nicht notwendig.

Gemäß §3 (3) 26. BImSchV sind bei der Ermittlung der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte auch alle Immissionen, die durch ortsfeste Hochfrequenzanlagen mit Frequenzen zwischen 9 Kilohertz und 10 Megahertz, die einer Standortbescheinigung nach §§ 4 und 5 der Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder bedürfen, zu berücksichtigen.

Nach II.3.4 der LAI-Durchführungshinweise tragen Immissionen durch andere Hochfrequenzanlagen ab einem Abstand von 300 Metern nicht relevant zur Vorbelastung bei und machen daher eine gezielte Vorbelastungsermittlung entbehrlich, sofern keine gegenteiligen Anhaltspunkte bestehen.

Auf Grundlage der EMF Datenbank der Bundesnetzagentur können im Abstand von 300 Metern um die Leitung keine entsprechenden Funkanlagen identifiziert werden. Eine weitere Betrachtung ist daher entbehrlich.

6.3 Maßgebliche Immissionsorte

Es werden die Immissionen des elektrischen und magnetischen Feldes in 1 m Höhe über der Erdoberkante (EOK) an Orten ermittelt, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind. Befinden sich Gebäude im Bereich maßgeblicher Immissionsorte (siehe Kapitel 3, 20 m gemessen vom äußeren ruhenden Leiterseil) werden für diese die Immissionswerte ebenso bestimmt.

Da zum Planungszeitpunkt noch keine elektrotechnisch optimale Phasenlage vorliegt, wurde für die Berechnung jedes maßgeblichen Immissionsortes die jeweilige Phasenordnung bestimmt, die die höchsten Immissionen erzeugt. Nach Festlegung der Phasenordnung sind daher geringere oder höchstens ebenso hohe Immissionswerte zu erwarten, wie in diesem Bericht aufgeführt sind.

Die Immissionswerte aller einzelnen Flurstücke mit maßgeblichen Immissionsorten werden zusammen mit den Immissionswerten für Gebäude in Anhang 2 aufgeführt und in Anhang 3 grafisch dargestellt. Dabei konnten die Maximalwerte aus Tabelle 3 ermittelt werden.

Tabelle 3: Maximalwerte der elektrischen Feldstärke und magnetischen Flussdichte an maßgeblichen Immissionsorten

Bereich	Magnetische Flussdichte		Elektrische Feldstärke	
	Höchstwert [μT]	Auslastung Grenzwert [%]	Höchstwert [kV/m]	Auslastung Grenzwert [%]
Flurstück	22,7	22,7	2,1	41,9
Gebäude	19,2	19,2	1,5	29,3

Die Maximalwerte des elektrischen und magnetischen Feldes unterschreiten die Grenzwerte gemäß 26. BImSchV an den maßgeblichen Immissionsorten deutlich.

Um die geplanten KÜA können in einem Abstand von 5 m um die Anlage keine Orte zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt identifiziert werden. Für diese Anlagen liegen keine maßgeblichen Immissionsorte vor.

6.4 Überspannungsverbot und Vermeidung erheblicher Belästigungen

Die geplante Leitungsführung wurde auf die Einhaltung des Überspannungsverbots nach §4 (3) 26. BImSchV geprüft. Dabei konnten keine Gebäude oder Gebäudeteile zum dauerhaften Aufenthalt von Menschen identifiziert werden, die durch die von den maximal ausgeschwungenen Leitern aufgespannte Fläche überspannt werden.

In Bezug auf erhebliche Belästigungen oder Schäden durch Berührungsspannungen oder Funkenentladungen werden in den LAI-Hinweisen Wirkungen auf Grundlage von Untersuchungen der Strahlenschutzkommission genannt. Der geringste Wert der elektrischen Feldstärke, ab dem diese Wirkungen auftreten können beträgt 7 kV/m. Wie aus den Berechnungen für die Standardmastfelder (vgl. Kapitel 6.1 hervorgeht, wird dieser Wert an jedem Punkt in einer Höhe von 1 m über dem Boden für den geplanten, minimalen Bodenabstand unterschritten. Es liegen daher keine Anhaltspunkte für erheblicher Belästigungen oder Schäden durch Berührungsspannungen oder Funkenentladungen vor.

6.5 Zusätzlich untersuchte Immissionsorte

Zusätzlich zu den in Kapitel 6.3 identifizierten maßgeblichen Immissionsorten wird über die Abstände nach Ziffer II.3.1 der LAI-Hinweise hinaus ein Immissionsort untersucht. Dabei handelt es sich um eine Arbeiterunterkunft im Industriegebiet Nürnberg-Langwasser (Flurstück 254/902, Gemarkung Fischbach b. Nürnberg). Es wird nur das Gebäude in einer Höhe von 13m betrachtet, da es sich bei den übrigen Flächen des Flurstücks hauptsächlich um Parkplätze handelt.

Es können folgende Werte festgestellt werden:

Magnetische Flussdichte:	19,2 μ T	Grenzwertauslastung: 19,2%
Elektrisches Feld:	0,54 kV/m	Grenzwertauslastung: 10,8%

Die Grenzwerte des elektrischen Feldes und der magnetischen Flussdichte werden auch für den zusätzlich untersuchten Ort deutlich unterschritten.

7 Minimierung elektrischer und magnetischer Felder

In § 4 Abs. 2 26. BImSchV werden Anforderungen zur Vorsorge geregelt. Im speziellen geht es dabei um die Möglichkeiten elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder nach dem Stand der Technik zu minimieren. Näheres regelt die 26. BImSchVVwV.

Die 26. BImSchVVwV sieht für die Umsetzung des Minimierungsgebotes drei Teilschritte vor: eine Vorprüfung, eine Ermittlung der Minimierungsmaßnahmen und Bewertung der Maßnahmen.

7.1 Minimierung elektrischer und magnetischer Felder

Im Zuge der Vorprüfung wird der Einwirkungsbereich der Niederfrequenzanlage auf maßgebliche Minimierungsorte überprüft. Der Einwirkungsbereich, im Sinne der 26. BImSchVVwV, beträgt für Freileitungen mit einer Nennspannung von 380 kV, gemessen ab der Bodenprojektion des äußeren ruhenden Leiterseils, 400 m.

Innerhalb dieses Bereichs können die in Anhang 4 aufgeführten maßgeblichen Minimierungsorte bzw. (repräsentativen) Bezugspunkte identifiziert werden. Eine Minimierungsprüfung in Bezug auf die Freileitung ist daher notwendig.

In einem Abstand von 100 m um die KÜA können keine maßgeblichen Minimierungsorte identifiziert werden. Die Ermittlung von Minimierungsmaßnahmen in Bezug auf die KÜA ist daher nicht durchzuführen.

7.2 Ermittlung der Minimierungsmaßnahmen

Die Minimierungsprüfung ist abhängig von der Lage der maßgeblichen Minimierungsorte in Bezug auf den Bewertungsabstand. Für Freileitungen mit einer Spannung von 380 kV beträgt der Bewertungsabstand 20 m, gemessen ab der Bodenprojektion des äußeren ruhenden Leiterseils. Liegt mindestens ein maßgeblicher Minimierungsort innerhalb dieses Bewertungsabstandes ist eine individuelle Minimierungsprüfung durchzuführen. Für maßgebliche Minimierungsorte außerhalb des Bewertungsabstandes erfolgt die Minimierungsprüfung an Bezugspunkten. Die Bezugspunkte liegen dabei im Bewertungsabstand auf der kürzesten Geraden zwischen Trassenachse und maßgeblichen Minimierungsort. Bei dichter Bebauung können mehrere Bezugspunkte zu repräsentativen Bezugspunkten zusammengefasst werden.

Die technischen Möglichkeiten, die gemäß 26. BImSchVVwV zu prüfen sind, umfassen folgende Punkte:

- **Abstandsoptimierung:** Das Ziel besteht darin die Distanz zwischen den Leiterseilen und der maßgeblichen Minimierungsorte zu vergrößern. Dies geschieht durch Masterhöhung, Verringerung der Spannfeldlänge oder Verlegung von Leiterseilen auf die dem Minimierungsort abgewandte Seite.

Die Masthöhe ist bereits so gewählt, dass der einzuhaltenden Mindestbodenabstand gemäß DIN EN 50341-1 von 7,8 m um mindestens 4,2 m überschritten wird. Eine weitere Erhöhung um 2 m für maßgebliche Minimierungsorte im Bewertungsabstand wurde geprüft. Für diese maßgeblichen Minimierungsorte ist die Reduktionswirkung einer Masterhöhung

in Tabelle 4 dargestellt. Für maßgebliche Minimierungsorte außerhalb des Bewertungsabstandes hat eine Masterhöhung eine noch geringere Wirkung. Die Reduktionswirkung beträgt dabei an nahezu jedem maßgeblichen Immissionsort unter 6% in Bezug auf die absolute Immissionsreduktion bei einer Grenzwertauslastung von deutlich unter 50%. Nur an den zusammenhängenden maßgeblichen Immissionsorten 3 und 4 ergäbe sich eine Reduktion von ca. 13% bei einer Grenzwertauslastung von ca. 50% im projektierten Zustand.

Eine weitere Erhöhung der Maste wäre mit einem zusätzlichen Eingriff in das Landschaftsbild sowie dem Vogelschutz verbunden. Außerdem benötigen höhere Masten größere ausgelegte Fundamente wodurch sich der Eingriff in den Boden und in Eigentumsrechte erhöht. Diese Eingriffe sind als unverhältnismäßig hoch im Vergleich zu den geringen Reduktionswirkungen auf die Immissionen der magnetischen Flussdichte und der elektrischen Feldstärke durch Masterhöhungen zu bewerten.

Tabelle 4: Minimierungswirkung der Abstandsoptimierung durch Masterhöhung

Lfd. Nr.	Projektierter Zustand		Masterhöhung um 2 m		Reduktionswirkung	
	Magnetische Flussdichte [μT]	Elektrische Feldstärke [kV/m]	Magnetische Flussdichte [μT]	Elektrische Feldstärke [kV/m]	Magnetische Flussdichte [μT]	Elektrische Feldstärke [kV/m]
1+2	15,1	1,36	14,1	1,24	-1,0%	-2,5%
3+4	26,7	2,53	24,2	1,89	-2,5%	-12,8%
5+6	17,2	1,72	16,0	1,43	-1,2%	-5,8%
7	10,9	0,89	10,3	0,83	-0,6%	-1,2%
8	11,2	0,92	10,5	0,85	-0,7%	-1,3%
9	11,8	1,03	11,1	0,95	-0,7%	-1,7%
10+11	13,7	1,24	12,8	1,12	-0,9%	-2,3%

Die Verringerung der Spannfeldlänge würde die Errichtung weiterer Masten notwendig machen und somit das Landschaftsbild stärker als erforderlich beeinträchtigen.

Die Verlegung der Leiterseile auf die einem Minimierungsort abgewandte Seite ist grundsätzlich nicht möglich, da die Leitung über jeweils ein System auf beiden Seiten verfügt. Beide Systeme auf einer Seite zu führen ist statisch nicht sinnvoll.

- **Elektrische Schirmung:** Bei dieser Maßnahme geht es darum, elektrisch leitfähige Schirmflächen oder -leiter zwischen spannungsführenden Leitungsteilen und einem maßgeblichen Minimierungsort als Bestandteil der Leitung einzufügen oder zusätzliche Erdleiter mitzuführen.

Das Einbringen zusätzlicher Schirmflächen ist aufgrund der Maststatik nicht möglich. Zusätzliche Erdleiter zeigen nur eine Minderungswirkung, wenn sie mit einem signifikanten Abstand unterhalb der Leiterseile geführt werden. Diese Wirkung ist in ihrem Umfang gering, auf das elektrische Feld beschränkt und entfaltet sich nur direkt unterhalb des Erdleiters. Zur Einhaltung vorgeschriebener Abstände des Erdleiters zum Boden oder zu Objekten

wäre daher eine Erhöhung der Masten notwendig. Daher wird auf eine Berechnung an maßgeblichen Minimierungsorten bzw. Bezugspunkten für diese technische Möglichkeit verzichtet.

- **Minimieren der Seilabstände:** Der Abstand zwischen den Traversen und damit zwischen den Leitern eines Systems und der Abstand zwischen den Systemen sind konstruktionsbedingt optimiert worden. Eine weitere Abstandsverringerung ist wegen der nach DIN EN 50341 erforderlichen inneren Abstände nicht möglich. Weiterhin werden standardisierte Masten verwendet, um die Baukosten zu optimieren. Eine statische Berechnung und bauliche Veränderung an den bestehenden Masten ist daher sehr aufwändig und angesichts der bereits erfolgten Optimierung nicht vertretbar.

Zusätzlich erhöht sich durch ein geringeren Seilabstand die Feldstärke zwischen den Leitern und somit die Randfeldstärke an den Leiteroberflächen, was zu einem Anstieg der Korona-Entladungen und den damit verbundenen Geräuschen führt – welche ihrerseits eine immisionsschutzrelevante Größe sind.

Es wird daher auf eine individuelle Beurteilung an allen maßgeblichen Minimierungsorten bzw. Bezugspunkten für diese technische Möglichkeit verzichtet.

- **Optimieren der Mastkopfgeometrie:** Durch die Wahl der Mastkopfgeometrie soll eine bestmögliche Kompensation der Felder der einzelnen Leiterseile erreicht werden. Für die Leitung wird das Mastkopfbild „Donau“ verwendet, welches aufgrund der Dreiecksanordnung der Leiterseile gute Kompensationseigenschaften des elektrischen Feldes und der magnetischen Flussdichte aufweist. Eine Veränderung des Mastkopfbildes zum Mastkopfbild „Tonne“ oder „Einebene“ würde zu deutlich höheren Masten führen bzw. die Flächeninanspruchnahme deutlich erhöhen. Daher wird auf eine individuelle Beurteilung an allen maßgeblichen Minimierungsorten bzw. Bezugspunkten für diese technische Möglichkeit verzichtet.
- **Optimieren der Leiteranordnung:** Die Phasen sollen den Leiterseilen so zugeordnet werden, dass eine bestmögliche Kompensation der Felder erreicht wird. Eine allgemeingültige optimale Leiteranordnung zur Optimierung der elektrischen und magnetischen Felder gibt es nicht. Abhängig vom Beurteilungsort sind unterschiedliche Leiteranordnungen zu wählen. Im Allgemeinen werden Leiteranordnungen in einem Netz so koordiniert und festgelegt, dass sich für dieses Netzgebilde geringstmögliche Unterschiede zwischen den Spannungen des Drehstromsystems ergeben. Insofern hat die Vorhabenträgerin für die Änderung auf einem kurzen Leitungsabschnitt nur geringe Freiheitsgrade, die feldoptimierte Leiteranordnung zu wählen. Für dieses Projekt liegt die netztechnisch optimale Phasenanordnung noch nicht vor. Die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte ist für alle maßgeblichen Minimierungsorte bzw. (repräsentativen) Bezugspunkte für jede grundsätzlich mögliche Phasenanordnung beurteilt worden. Dabei wurden die beiden Phasenanordnungen, an denen die gleiche Phase auf der unteren Traverse innen am Mastschaft liegen, nicht betrachtet, da diese durch die Vorhabenträgerin ausgeschlossen werden. Diese beiden Phasenanordnungen zeigen typischerweise sehr hohe Immissionswerte des elektrischen Feldes und werden daher nicht verwendet.

Tabelle 5 vergleicht die Minimierungswirkung der vier verbleibenden Leiteranordnungen. Die Immissionsreduzierung bezieht sich dabei auf Leiteranordnung 1, da diese an den betrachteten maßgeblichen Minimierungsorten die höchsten Feldwerte der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte aufweist. Je nach betrachteten maßgeblichen Minimierungsort erzeugen Leiteranordnung 3 bzw. 4 die geringsten Feldstärken.

Tabelle 5: Minimierungswirkung der Optimierung der Leiteranordnung

Leiteranordnung 1 L1L2L3-L1L2L3		Leiteranordnung 2 L1L2L3-L1L3L2		Leiteranordnung 3 L1L2L3-L2L1L3		Leiteranordnung 4 L1L2L3-L2L3L1	
Magneti- sche Fluss- dichte	Elektri- sche Feld- stärke	Magneti- sche Fluss- dichte	Elektri- sche Feld- stärke	Magneti- sche Fluss- dichte	Elektri- sche Feld- stärke	Magneti- sche Fluss- dichte	Elektri- sche Feld- stärke
Immissionsort lfd. Nr. 1+2							
15,1 µT	1,36 kV/m	9,6 µT	0,49 kV/m	9,5 µT	1,07 kV/m	4,2 µT	0,55 kV/m
± 15,1 %	± 27,3 %	± 9,6 %	± 9,8 %	± 9,5 %	± 21,4 %	± 4,2 %	± 11,1 %
Immissionsreduzierung		-5,5 %	-17,4 %	-5,6 %	-5,8 %	-10,9 %	-16,2 %
Immissionsort lfd. Nr. 3+4							
26,7 µT	2,53 kV/m	19,2 µT	2,08 kV/m	20,7 µT	1,37 kV/m	14,3 µT	1,37 kV/m
± 26,7 %	± 50,6 %	± 19,2 %	± 41,6 %	± 20,7 %	± 27,5 %	± 14,3 %	± 27,5 %
Immissionsreduzierung		-7,5 %	-9,0 %	-6,0 %	-23,1 %	-12,4 %	-23,1 %
Immissionsort lfd. Nr. 5+6							
17,2 µT	1,72 kV/m	13,7 µT	1,35 kV/m	13,0 µT	0,70 kV/m	8,2 µT	0,68 kV/m
± 17,2 %	± 34,4 %	± 13,7 %	± 26,9 %	± 13,0 %	± 13,9 %	± 8,2 %	± 13,7 %
Immissionsreduzierung		-3,5 %	-7,5 %	-4,2 %	-20,5 %	-9,0 %	-20,7 %
Immissionsort lfd. Nr. 7							
10,9 µT	0,89 kV/m	7,4 µT	0,80 kV/m	6,6 µT	0,42 kV/m	4,9 µT	0,52 kV/m
± 10,9 %	± 17,8 %	± 7,4 %	± 16,1 %	± 6,6 %	± 8,3 %	± 4,9 %	± 10,4 %
Immissionsreduzierung		-3,5 %	-1,7 %	-4,3 %	-9,5 %	-6,0 %	-7,4 %
Immissionsort lfd. Nr. 8							
11,2 µT	0,92 kV/m	7,6 µT	0,81 kV/m	6,9 µT	0,39 kV/m	4,8 µT	0,50 kV/m
± 11,2 %	± 18,4 %	± 7,6 %	± 16,1 %	± 6,9 %	± 7,8 %	± 4,8 %	± 10,0 %
Immissionsreduzierung		-3,6 %	-2,3 %	-4,3 %	-10,6 %	-6,4 %	-8,4 %
Immissionsort lfd. Nr. 9							
11,8 µT	1,03 kV/m	7,7 µT	0,70 kV/m	7,5 µT	0,39 kV/m	4,1 µT	0,36 kV/m
± 11,8 %	± 20,6 %	± 7,7 %	± 13,9 %	± 7,5 %	± 7,7 %	± 4,1 %	± 7,1 %
Immissionsreduzierung		-4,1 %	-6,7 %	-4,3 %	-12,9 %	-7,7 %	-13,5 %

Leiteranordnung 1 L1L2L3-L1L2L3		Leiteranordnung 2 L1L2L3-L1L3L2		Leiteranordnung 3 L1L2L3-L2L1L3		Leiteranordnung 4 L1L2L3-L2L3L1	
Magneti- sche Fluss- dichte	Elektri- sche Feld- stärke	Magneti- sche Fluss- dichte	Elektri- sche Feld- stärke	Magneti- sche Fluss- dichte	Elektri- sche Feld- stärke	Magneti- sche Fluss- dichte	Elektri- sche Feld- stärke
Immissionsort lfd. Nr. 10+11							
13,7 μT	1,24 kV/m	9,5 μT	0,87 kV/m	9,4 μT	0,47 kV/m	4,5 μT	0,35 kV/m
$\triangleq 13,7 \%$	$\triangleq 24,8 \%$	$\triangleq 9,5 \%$	$\triangleq 17,4 \%$	$\triangleq 9,4 \%$	$\triangleq 9,4 \%$	$\triangleq 4,5 \%$	$\triangleq 7,0 \%$
Immissionsreduzierung		-4,2 %	-7,4 %	-4,3 %	-15,4 %	-9,2 %	-17,8 %

7.3 Maßnahmenbewertung

Folgende Minimierungsmaßnahmen sind somit in der Planung im Rahmen der Verhältnismäßigkeit bereits umgesetzt:

- Abstandoptimierung durch die Wahl höherer Bodenabstände als nach DIN EN 50341-1 vorgegeben
- Minimieren der Seilabstände bis zu Beschränkungen durch innere Abstände gemäß DIN EN 50341
- Wahl des Mastkopfbildes „Donau“

Für die Wahl der Leiteranordnung sind die Anordnungen 3 und 4 im Rahmen der technischen Netzbedingungen zu bevorzugen.

8 Zusammenfassung und Fazit

Entsprechend den Anforderungen der 26. BImSchV wurde die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte bestimmt und auf die Einhaltung der Grenzwerte untersucht.

Die vom Verordnungsgeber in der 26. BImSchV festgelegten Grenzwerte für Orte, die zum nicht vorübergehenden Aufenthalt bestimmt sind, betragen:

Elektrisches Feld:	5 kV/m
Magnetische Flussdichte:	100 μ T

Aus der Betrachtung der maßgeblichen Immissionsorten ergeben sich folgende Maximalwerte:

Betrachtete Flurstücke:

Magnetische Flussdichte:	22,7 μ T	Grenzwertauslastung:	22,7%
Elektrisches Feld:	2,1 kV/m	Grenzwertauslastung:	41,9%

Gebäude:

Magnetische Flussdichte:	19,2 μ T	Grenzwertauslastung:	19,2%
Elektrisches Feld:	1,5 kV/m	Grenzwertauslastung:	29,3%

In allen Fällen werden die Grenzwerte deutlich unterschritten.

Es werden keine Gebäude oder Gebäudeteile zum dauerhaften Aufenthalt von Menschen durch die von den maximal ausgeschwungenen Leitern aufgespannte Fläche überspannt.

Ferner liegen keine Anhaltspunkte für erheblicher Belästigungen oder Schäden durch Berührungsspannungen oder Funkenentladungen vor.

Entsprechend der 26. BImSchVVwV wurden Minimierungsmaßnahmen überprüft und im Rahmen der Verhältnismäßigkeit umgesetzt.

Gesetze und Literatur

- [1] *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)*, Neugefasst durch Bek. v. 14.8.2013 I 3266.
- [2] LAI, *Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder*, mit Beschluss der 54. Amtschefkonferenz in der Fassung des Beschlusses der 128. Sitzung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz am 17. und 18. September 2014 in Landshut.
- [3] *Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV (26. BImSchVVwV)*, 2015.
- [4] *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG)*, Neugefasst durch Bek. v. 17.5.2013 I 1274; zuletzt geändert durch Art. 3 G v. 18.7.2017 I 2771.
- [5] LAI, *Handlungsempfehlungen für EMF- und Schallgutachten zu Hoch- und Höchstspannungstrassen in Bundesfachplanungs-, Raumordnungs- und Planfeststellungsverfahren sowie Hinweise zur schalltechnischen Beurteilung bei der Umstellung von Übertragungsnetzen auf das Betriebskonzept des witterungsabhängigen Freileitungsbetriebs (WAFB)*, Beschlussfassung durch die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI) in der 143. Sitzung am 29. und 30. März 2022.