

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

Juraleitung

**Ltg.-Abschnitt B-Nord Sittling – Ludersheim_West
(LH-08-B171)**

**Planfeststellungsunterlage
Unterlage 9.1**

**Immissionsbericht zu elektrischen und
magnetischen Feldern mit
Minimierungsbetrachtung nach 26. BImSchV**

Antragsteller:



TenneT TSO GmbH

Bernecker Straße 70

95448 Bayreuth

Bearbeitung:



Sweco GmbH

Grenzstraße 26

06112 Halle (Saale)

Aufgestellt:	TenneT TSO GmbH i.V. gez.: Julia Gotzler i.V. gez.: Andreas Junginger	Bayreuth, den 27.11.2024
Bearbeitung	Sweco GmbH i.A. gez.: Anne Geyer	
Anlagen zum Dokument	Anlage 1: Hersteller-Zertifikat für die Software WinField Anlage 2: Liste der berechneten Werte der Freileitung Anlage 3: Graphische Darstellung der Immissionsberechnung Anlage 4: Graphische Darstellung der Einwirkungsbereiche und Immissionen für die Kabelübergangsanlagen KA_MUHN und KA_MUHS	
Änderungs- historie:	Änderung:	Änderungsdatum:

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	4
1 Einleitung und Hintergrund	5
2 Rechtliche Grundlagen und Anforderungen	5
3 Technische Grundlagen und Hintergründe	7
3.1 Elektrische Felder	7
3.2 Magnetische Felder	7
4 Nachweismethodik	7
4.1 Ermittlung der maßgeblichen Immissionsorte für die 380-kV-Leitung	9
4.2 Ermittlung der maßgeblichen Immissionsorte für die Provisorien	10
4.3 Ermittlung der maßgeblichen Minimierungsorte für die 380 kV-Freileitung.....	10
4.4 Ermittlung der maßgeblichen Immissionsorte und der maßgeblichen Minimierungsorte für die Kabelübergangsanlagen Mühlhausen Süd und Mühlhausen Nord.....	11
4.5 Nachweis der Anforderungen zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen	12
5 Darstellung und Bewertung der Ergebnisse	13
5.1 Ermittlung der Immissionen und Prüfung der Grenzwerte für die 380-kV-Freileitung	13
5.2 Prüfung des Minimierungsgebotes für die 380 kV-Freileitung	14
5.3 Prüfung des Minimierungsgebotes für die Provisorien.....	17
5.4 Ermittlung der Immissionen und Prüfung des Minimierungsgebotes für die Kabelübergangsanlagen	17
6 380 kV-Erdkabelabschnitt	18
6.1 Beschreibung der Kabelanlage und Untersuchung ihrer elektrischen und magnetischen Eigenschaften	18
6.2 Ermittlung der Immissionen und Prüfung des Minimierungsgebotes für die Kabelanlage	20
7 Zusammenfassung und Fazit	24
Literaturverzeichnis	25

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
A	Ampere (Einheit für die Stromstärke)
EOK	Erdoberkante
Hz	Hertz (Einheit für die Frequenz)
kV	Kilovolt (Einheit für die elektrische Spannung, 1 kV = 1000 V)
kV/m	Kilovolt pro Meter (Einheit für die elektrische Feldstärke E)
LAI	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz
SK	Stromkreis
μT	Mikrotesla (Einheit für die magnetische Flussdichte B, 1 μT = 1 x 10 ⁻⁶ T)
UW	Umspannwerk

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter der zu betrachtenden Stromkreise	5
Tabelle 2: Maßgebliche Immissionsorte für den Trassenverlauf der Freileitung	9
Tabelle 3: Maßgebliche Minimierungsorte für den Trassenverlauf	11
Tabelle 4: Berechnungsergebnisse	13
Tabelle 5: Berechnungsergebnisse am Zaun der Kabelübergangsanlagen.....	17
Tabelle 6: Phasen-, System- und Stromkreisabstände bei diversen Legetiefen [5].....	19
Tabelle 7: Phasen-, System- und Stromkreisabstände bei geschlossener Verlegung [5]	19
Tabelle 8: Maßgebliche Minimierungsorte für den Erdkabelabschnitt	22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Phasenlage für die Berechnung.....	13
Abbildung 2: Verteilung der magnetischen Flussdichte an der Station 600.....	21
Abbildung 3: Verteilung der magnetischen Flussdichte an der Station 2520.....	22
Abbildung 4: Lage des nächstgelegenen Minimierungsortes an Station 2610.....	23

1 Einleitung und Hintergrund

Im Rahmen ihrer Pflichten nach § 12 EnWG beabsichtigt die TenneT TSO GmbH das Höchstspannungsnetz zwischen den Umspannwerken Raitersaich, Ludersheim, Sittling und Altheim bedarfsgerecht zu verstärken. Dabei soll die 220 kV-Bestandsleitung zurückgebaut und durch den Neubau einer 380 kV-Leitung ersetzt werden. Das hier zu betrachtende Vorhaben umfasst den Genehmigungsabschnitt B-Nord mit einer Länge von ca. 45 km vom Mast an der Regierungsbezirksgrenze Oberpfalz / Niederbayern (M53) bis zum Mast an der Regierungsbezirksgrenze Mittelfranken / Oberpfalz (M166), einschließlich einer Teil-Erdverkabelung von ca. 3 km Länge zwischen den Masten M122 und M123 inkl. zweier Kabelübergangsanlagen Mühlhausen_Süd und Mühlhausen_Nord.

Für die im Rahmen dieses Planfeststellungsverfahrens betrachtete Leitungsanlage LH-08-B171 gelten damit folgende für die weiteren Betrachtungen relevanten Parameter:

Tabelle 1: Parameter der zu betrachtenden Stromkreise

Stromkreis	Bereich	Maximal zulässige Betriebsspannung	Maximal betrieblicher Dauerstrom
380-kV-SK LUHW-SIT 469	Mast 53 bis Mast 166	420 kV	4000 A
380-kV-SK LUHW-SIT 470	Mast 53 bis Mast 166	420 kV	4000 A

Von Stromübertragungsanlagen und -leitungen gehen aufgrund der unter Spannung stehenden und Strom führenden Leiter elektrische und magnetische Felder aus. Es handelt sich hierbei um Wechselfelder mit einer Frequenz von 50 Hertz (Hz). Diese Frequenz ist dem Niederfrequenzbereich im Sinne des § 1 Abs. 2 Nr. 2 26. BImSchV zugeordnet. Demnach sind Niederfrequenzanlagen im Sinne der 26. BImSchV ortsfeste Anlagen zur Umspannung und Fortleitung von Elektrizität mit einer Nennspannung von 1 000 Volt oder mehr, einschließlich Bahnstromfern- und Bahnstromoberleitungen und sonstiger vergleichbarer Anlagen im Frequenzbereich von 1 Hertz bis 9 Kilohertz.

Das elektrische Feld resultiert aus der Betriebsspannung und das magnetische Feld resultiert aus dem Stromfluss. Die physikalischen Grundlagen sind in den Kapiteln 3.1 und 3.2 näher erläutert.

2 Rechtliche Grundlagen und Anforderungen

Im Rahmen der Antragstellung sind u.a. die Vorschriften des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) [1] sowie der aufgrund dessen erlassenen Rechtsverordnungen zu beachten.

Bei einer Höchstspannungs-Freileitung handelt es sich nicht um eine nach § 4 Abs. 1 BImSchG in Verbindung mit der 4. BImSchV genehmigungsbedürftige Anlage, da Freileitungen im Anhang 1 zur 4. BImSchV nicht aufgeführt sind.

Gemäß § 22 Abs. 1 BImSchG sind jedoch auch nicht genehmigungsbedürftige Anlagen insbesondere so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden, die nach dem Stand

der Technik vermeidbar sind, und nach dem Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden. § 23 Abs. 1 BImSchG ermächtigt die Bundesregierung, durch Rechtsverordnung, bestimmte Anforderungen zum Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen und, soweit Anlagen gewerblichen Zwecken dienen, auch zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen vorzuschreiben.

Hinsichtlich elektrischer und magnetischer Felder sind insoweit die Anforderungen der 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV) [2] zu beachten.

Für die beschriebene Maßnahme sind, weil es sich dabei um eine Neuerrichtung im Sinne der 26. BImSchV handelt, die mit dem Vorhaben verbundenen elektrischen und magnetischen Felder darzustellen und hinsichtlich der Einhaltung vorgeschriebener Grenzwerte zu beurteilen.

Gemäß § 3 Abs. 2 Satz 1 i.V.m. Anhang 1a zur 26. BImSchV sind für das vorliegende Vorhaben an Orten zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen im Einwirkungsbereich der Anlage folgende Grenzwerte einzuhalten:

- Elektrische Feldstärke: 5 kV/m
- Magnetische Flussdichte: 100 μ T

Bei diesen Werten handelt es sich um Effektivwerte, wie sie üblicherweise in der Wechselstromtechnik verwendet werden. Unter dem Effektivwert wird in der Elektrotechnik der quadratische Mittelwert einer zeitlich veränderlichen physikalischen Größe, wie beispielsweise Wechselspannung und Wechselstrom, verstanden. Da die elektrische Feldstärke spannungsabhängig und die magnetische Flussdichte abhängig von der Stromstärke ist, werden auch diese Werte üblicherweise als Effektivwerte angegeben.

Im Zusammenhang mit den anzustellenden Betrachtungen zur 26. BImSchV sind die von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) erlassenen Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder [3] zu beachten.

Die 26. BImSchV enthält zum anderen in § 4 für Niederfrequenzanlagen auch über den Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen hinausgehende Anforderungen zur Vorsorge durch Minimierung.

Näheres dazu regelt die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV (26. BImSchVVwV) [4].

3 Technische Grundlagen und Hintergründe

3.1 Elektrische Felder

Wesentlicher Parameter für die Stärke des elektrischen Feldes ist die Betriebsspannung. Darüber hinaus spielt für die bodennahe Feldstärke in der Umgebung einer Freileitung die Anzahl, Abstände und Anordnung der Systeme zueinander (Mastkopfgeometrie), der Abstand der Leiter zum Boden sowie die Anordnung der Phasen eine wichtige Rolle. Zudem hat auch der Leitertyp und Bündelkonfiguration sowie die Anzahl und Anordnung der Erdseile einen geringen Einfluss. Durch diese Parameter wird insbesondere der Verlauf der Feldstärke in unmittelbarer Nähe der Freileitung bestimmt. Mit zunehmendem Abstand von der Freileitung nimmt die elektrische Feldstärke rasch ab und auch der Einfluss dieser Parameter wird geringer. Elektrische Felder können mithilfe elektrisch leitfähiger Materialien, z.B. durch Bewuchs oder Bebauung gut abgeschirmt werden.

Bei Erdkabeln wird das elektrische Feld durch deren Kabelschirm und das überdeckende Erdreich vollständig abgeschirmt.

Die Stärke eines elektrischen Feldes wird als elektrische Feldstärke in Kilovolt pro Meter (kV/m) angegeben.

3.2 Magnetische Felder

Wesentlicher Parameter für die Stärke des magnetischen Feldes ist die Stromstärke, welche in Abhängigkeit der Belastungssituation zeitlichen Schwankungen unterliegt. Darüber hinaus spielt für die bodennahe Feldstärke in der Umgebung einer Freileitung die Anzahl, Abstände und Anordnung der Systeme zueinander (Mastkopfgeometrie), der Abstand der Leiter zum Boden sowie die Anordnung der Phasen eine wichtige Rolle. Auch die magnetische Feldstärke nimmt mit zunehmendem Abstand zur Anlage ab.

Bei Erdkabeln hängt das Magnetfeld neben dem Abstand der einzelnen Kabel und der Verlegetiefe auch von den u.a. daraus resultierenden elektrischen Eigenschaften, insbesondere der Leiterstromaufteilungen und der Schirmströme ab [5].

Im Gegensatz zu den elektrischen Feldern durchdringen magnetische Felder organische und anorganische Materialien nahezu ungestört.

Bei niederfrequenten Feldern wird als zu bewertende Größe die magnetische Flussdichte B angegeben. Die ermittelten Werte werden in Mikrottesla (μT) angegeben.

4 Nachweismethodik

Entsprechend den Regelungen in § 5 Satz 4 der 26. BImSchV [2] sind für die Ermittlung der Feldstärke- und Flussdichtewerte an den maßgeblichen Einwirkungsorten keine Messungen erforderlich, wenn die Einhaltung der Grenzwerte durch Berechnungsverfahren festgestellt werden kann. Dementsprechend

wird für Freileitungen das Berechnungsverfahren mit der zertifizierten Software WinField durchgeführt, die den Anforderungen an Mess- und Berechnungsverfahren nach DIN EN 50413 (Ausgabe August 2009) (siehe Anlage 1) entspricht. Hierzu werden in dem Berechnungsprogramm die Freileitungsabschnitte als Feldquelle modelliert.

Für die Erdkabelabschnitte werden mit Hilfe des universellen Schaltungssimulationsprogrammes ATP-EMTP (ElectroMagnetic Transients Program, Version Alternative Transients Program) hinsichtlich der elektrischen Eigenschaften analysiert und im Anschluss mit dem speziell für Problemstellungen der Energieübertragungskabeltechnik entwickelten Finite-Elemente-Simulator „sta-fem“ die magnetische Flussdichte berechnet.

Für die Berechnung der Immissionswerte werden durchgängig konservative Ansätze gewählt. Es werden somit Feldstärke- und Flussdichtewerte ermittelt, die über den im Betrieb zu erwartenden Werten liegen.

Für die Betriebsparameter ist die höchste betriebliche Anlagenauslastung zu Grunde zu legen. Dies bedeutet, dass folgende Betriebsspannungen in die Berechnung einfließen:

- für 380 kV-Systeme 420 kV,
- für 220 kV-Systeme 245 kV,
- für 110 kV-Systeme 123 kV.

Zudem wird für die Strombelastbarkeit der maximale betriebliche Dauerstrom eines Systems herangezogen. Für die Freileitungsstromkreise bzw. -abschnitte wird ein maximaler Betriebsstrom von 4000 A angesetzt. Bei den Erdkabeln teilt sich der maximale Betriebsstrom auf die zwei parallel geschalteten Erdkabelsysteme auf.

Diese konservativen Parameter werden sowohl für die beantragte Leitungsanlage als auch für alle zu berücksichtigenden Niederfrequenzanlagen, wie z.B. andere Freileitungen angenommen.

Berücksichtigte Fremdleitungen werden für den jeweiligen betrachteten Leitungsabschnitt aufgeführt. Die Immissionsbeiträge dieser anderen relevanten Niederfrequenzanlagen wurden beim Betreiber erfragt und entsprechend im Berechnungsprogramm berücksichtigt.

Nach § 3 Abs. 3 26. BImSchV [2] sind auch Immissionen ortsfester Hochfrequenzanlagen im Frequenzbereich 9 kHz bis 10 MHz zu berücksichtigen. Diese tragen gemäß den Ausführungen in den LAI-Durchführungshinweisen [3] ab einem Abstand von 300 Metern nicht relevant zur Vorbelastung bei und machen daher eine gezielte Vorbelastungsermittlung entbehrlich, sofern keine gegenteiligen Anhaltspunkte bestehen. Für den Trassenverlauf sind laut EMF-Datenbank der Bundesnetzagentur, welche am 01.08.2024 aufgerufen wurde, (<https://emf3.bundesnetzagentur.de/karte/>) keine entsprechenden Hochfrequenzanlagen in diesem Abstand vorhanden, sodass dieser Aspekt hier nicht weiter zu betrachten ist.

In den Berechnungen werden die Immissionen der Grundfrequenz (50 Hz) ermittelt. In Hoch- und Höchstspannungsnetzen sind Oberwellenanteile (z.B. 100 Hz, 150 Hz) sehr gering. Deren zusätzliche Immissionsbeiträge sind gegenüber den Immissionen der Grundfrequenz zu vernachlässigen und werden daher im Weiteren nicht betrachtet.

Die für die Ermittlung der Immissionsorte notwendigen Geodaten wurden beim Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern abgefragt.

4.1 Ermittlung der maßgeblichen Immissionsorte für die 380-kV-Leitung

Bei der Ermittlung der maßgeblichen Immissionsorte sind die Anforderungen der 26. BImSchV [2] und die zugehörigen Ausführungen in den LAI-Durchführungshinweisen [3] zu beachten (siehe auch Kapitel 2).

Maßgebliche Immissionsorte sind gem. § 3 Abs. 2 Satz 1 26. BImSchV Orte, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind und sich im Einwirkungsbereich der Anlage befinden. Der Einwirkungsbereich einer Niederfrequenzanlage beschreibt den Bereich, in dem die Anlage einen signifikanten von der Hintergrundbelastung abhebenden Immissionsbeitrag verursacht, unabhängig davon, ob die Immissionen tatsächlich schädliche Umwelteinwirkungen auslösen. Bei einer 380 kV-Freileitung ist dies innerhalb eines Streifens von 20 m seitlich des äußersten ruhenden Leiters der Fall (Ziff. II.3.1 der LAI-Durchführungshinweise [3]). Die äußeren ruhenden Leiterseile befinden sich je nach Masttyp in einem Abstand von 12,70 bis 18,50 Metern zur Trassenachse.

Bei Erdkabeln ist gemäß LAI-Durchführungshinweise [3] der Bereich im Radius von 1 m um das Kabel auf maßgebliche Immissionsorte zu untersuchen. Der Verlauf des Erdkabelabschnittes wurde einerseits so geplant, dass keine maßgeblichen Immissionsorte vorliegen. Andererseits wurde der Abschnitt so geplant, dass trotz Nichtvorliegens von maßgeblichen Immissionsorten der erwartete Maximalwert den Grenzwert von 100 µT für die magnetische Flussdichte in 0,2 m über EOK immer eingehalten wird.

Um für den Trassenverlauf der Freileitung die maßgeblichen Immissionsorte zu ermitteln, wurde der gesamte Verlauf auf entsprechende Orte mit Hilfe von Luftbildern abgesucht. Eine kartographische Darstellung der Anlage ist in den Übersichtsplänen (siehe Unterlage 2.1) zu finden. Dabei wurden folgende maßgebliche Immissionsorte identifiziert (siehe Tabelle 2):

Tabelle 2: Maßgebliche Immissionsorte für den Trassenverlauf der Freileitung

Lfd. Nr.	Bereich	Immissionsort	Gemarkung	Art der Gebäude-nutzung	Abstand Gebäude zur Trassen-achse	Abstand Grundstück zur Trassenachse
1	Mast 77 bis Mast 78	Am Kanal 4, 92345 Dietfurt a.d. Altmühl	Dietfurt a.d. Altmühl	Gewerbe	18 m	18 m
2	Mast 157 bis Mast 158	92353 Postbauer-Heng	Heng	Freizeit	28 m	0 m
3	Mast 157 bis Mast 158	92353 Postbauer-Heng	Heng	Freizeit	28 m	0 m

Bei dem maßgeblichen Immissionsort mit der lfd. Nr. 1 handelt es sich um die Schleuse Dietfurt. Hier wurde nicht das Flurstück im Ganzen in die Betrachtung einbezogen, sondern nur der dem nicht nur vorübergehenden Aufenthalt dienliche Teil des Grundstückes. Der größte Teil des Flurstückes umfasst

den Wasser- und Uferbereich des Main-Donau-Kanals, in dem nicht von einem dauerhaften Aufenthalt von Menschen ausgegangen wird.

4.2 Ermittlung der maßgeblichen Immissionsorte für die Provisorien

Da die Leitung während der Bauphase aus versorgungstechnischen Gründen grundsätzlich in Betrieb bleiben muss, sind zusätzliche technische Einrichtungen (Provisorien) zur Aufrechterhaltung des Leitungsbetriebs erforderlich.

Eine mögliche Maßnahme ist die Errichtung von Freileitungsprovisorien. Diese werden i. d. R. auf Hilfsgestängen errichtet und können Abschnitte einer bestehenden Leitung durch eine provisorische Leitung ersetzen, sodass der im Arbeitsbereich der neuen Leitung befindliche Abschnitt abgeschaltet werden kann. Bei Provisorien handelt es sich um zeitlich begrenzte (temporäre) Einrichtungen. Die Lage der Freileitungsprovisorien wird durch einen Korridor eingegrenzt, welcher in den Lage- und Rechtserwerbsplänen (siehe Unterlage 4.1.1) dargestellt wird. Innerhalb dieses Korridors werden im Zuge der Ausführungsplanung die Freileitungsprovisorien geplant.

Um auch für die Provisorien die maßgeblichen Immissionsorte zu ermitteln, d.h. Orte des nicht nur vorübergehenden Aufenthalts, die sich innerhalb eines Abstandes von bis zu 10 m bei 110 kV-Provisorien bzw. 15 m bei 220 kV-Provisorien vom äußeren Leiterseil des Provisoriums befinden, wurden die Korridore mit Hilfe von Luftbildern abgesucht. Dabei wurden innerhalb eines Abstands von 10 m bzw. 15 m zum äußersten Rand der Provisoriumskorridore keine maßgeblichen Immissionsorte identifiziert.

4.3 Ermittlung der maßgeblichen Minimierungsorte für die 380 kV-Freileitung

Bei der Ermittlung der maßgeblichen Minimierungsorte wurden die in Kapitel 3.2.1.2 26. BImSchVVwV [4] genannten konservativen Pauschalwerte für den Einwirkungsbereich von 400 m bei einer 380-kV-Freileitung herangezogen.

Analog zum Kapitel 4.1 wurde der gesamte Verlauf der Leitung mit Hilfe von Luftbildern abgesucht. Dabei wurden in folgenden Bereichen maßgebliche Minimierungsorte zusätzlich zu den in Tabelle 2 aufgelisteten maßgeblichen Immissionsorten ermittelt (siehe Tabelle 3):

Tabelle 3: Maßgebliche Minimierungsorte für den Trassenverlauf

Bereich	Maßgebliche Minimierungsorte im Einwirkungsbereich	
	links	rechts
Mast 56 bis 57		x
Mast 60 bis 61		x
Mast 73 bis 74		x
Mast 75 bis 76	x	x
Mast 76 bis 78	x	
Mast 80 bis 81	x	
Mast 95 bis 96		x
Mast 104 bis 105		x
Mast 108 bis 109		x
Mast 118 bis 119	x	
Mast 121 bis KA_MUHS	x	
Mast 125 bis 127	x	
Mast 128 bis 129	x	
Mast 131 bis 132		x
Mast 132 bis 133	x	x
Mast 134 bis 135		x
Mast 142 bis 143	x	
Mast 143 bis 144	x	x
Mast 158 bis 159		x
Mast 159 bis 160	x	
Mast 162 bis 163	x	x
Mast 163 bis 164	x	

In den mit x markierten Bereichen befinden sich maßgebliche Minimierungsorte im Einwirkungsbereich der Anlage.

4.4 Ermittlung der maßgeblichen Immissionsorte und der maßgeblichen Minimierungsorte für die Kabelübergangsanlagen Mühlhausen Süd und Mühlhausen Nord

Im hier zu betrachtenden Planfeststellungsabschnitt B-Nord ist auch eine Teil-Erdverkabelung von ca. 3 km Länge inklusive zweier Kabelübergangsanlagen Mühlhausen Süd (KA_MUHS) und Mühlhausen Nord (KA_MUHN) geplant.

Gemäß 26. BImSchV [2] in Verbindung mit den LAI-Durchführungshinweisen [3] wurden die beiden Kabelübergangsanlagen auf maßgebliche Immissionsorte im auf maßgebliche Immissionsorte zu untersuchenden Bereich der Anlagen untersucht. Dieser beträgt 5 m von der äußeren Umgrenzung der Anlage (Ziff. II.3.1 der LAI-Durchführungshinweise [3]). Die Prüfung hat ergeben, dass hier keine maßgeblichen Immissionsorte vorliegen. Um festzustellen, ob die Grenzwerte an sämtlichen Orten zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen eingehalten werden, reicht es zur Umsetzung der 26. BImSchV aus, die auf maßgebliche Immissionsorte zu untersuchenden Bereiche um die Anlagen näher zu betrachten. Für weiter von den Anlagen entfernt liegende Orte zum nicht nur vorübergehenden

Aufenthalt von Menschen kann davon ausgegangen werden, dass eine Überschreitung der Grenzwerte weder durch die Kabelübergangsanlagen selbst stattfinden, noch maßgeblich verursacht werden kann (z.B. bei bereits sehr großer Vorbelastung des Ortes). Obwohl keine maßgeblichen Immissionsorte vorliegen, wurden die Immissionen der beiden Anlagen ermittelt (siehe Kapitel 5.3).

Des Weiteren sind alle maßgeblichen Minimierungsorte im Einwirkungsbereich der Anlage zu untersuchen. Gemäß Kapitel 3.2.1.2 26. BImSchVVwV [4] ist als Einwirkungsbereich einer Schaltanlage ein Bereich von 100 m ab der Eingrenzung der Anlage zu betrachten. Innerhalb des Einwirkungsbereiches nach 26. BImSchVVwV [4] der Kabelübergangsanlage KA_MUHS existieren keine maßgeblichen Minimierungsorte. Im südöstlichen Bereich des Einwirkungsbereiches nach 26. BImSchVVwV [4] der Kabelübergangsanlage KA_MUHN liegt ein maßgeblicher Minimierungsort mit gewerblicher Nutzung auf dem Flurstück 577/4.

Die Einwirkungsbereiche nach 26. BImSchV [2] und 26. BImSchVVwV [4] sind grafisch für die beiden Kabelübergangsanlagen in der Anlage 4 dargestellt.

4.5 Nachweis der Anforderungen zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 2 ist zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen der Nachweis zu erbringen, dass im Einwirkungsbereich der zu betrachtenden Anlage an Orten, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, die Grenzwerte für die elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte eingehalten werden.

Die Immissionen werden bei Freileitungsabschnitten in der Regel in einer Höhe von 1 m über Erdoberkante (EOK) ermittelt. 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. Wie bereits dargelegt, sind die Feldstärken stark abstandsabhängig. Die größten Feldstärken werden bei dem geringsten Abstand des betrachteten Ortes von der Feldquelle, d. h. der Anlage, erreicht. Für ein zu betrachtendes Freileitungsspannfeld ist dies in der Regel am Ort des geringsten Bodenabstands der Leiterseile der Fall. Dies ist somit von der örtlichen Topographie abhängig, wird aber bei ebenem Gelände etwa in Spannfeldmitte erreicht.

Bei Erdkabeln wird die magnetische Flussdichte in 0,2 m über der Erdoberkante berechnet und bewertet.

Gemäß §3 (4) der 26. BImSchV sind Wirkungen wie Funkenentladungen auch zwischen Personen und leitfähigen Objekten zu vermeiden, wenn sie zu erheblichen Belästigungen oder Schäden führen können. Funkenentladungen und ähnliche Wirkungen sind mittels Planungsgrundsatz der TenneT aufgrund der Einhaltung des Grenzwertes der elektrischen Feldstärke bei Freileitungen und aufgrund der Abschirmung des elektrischen Feldes bei Erdkabeln nicht zu erwarten.

5 Darstellung und Bewertung der Ergebnisse

5.1 Ermittlung der Immissionen und Prüfung der Grenzwerte für die 380-kV-Freileitung

Für jeden in Tabelle 2 aufgeführten maßgeblichen Immissionsort wurden die dort maximal zu erwartenden elektrischen Feldstärken und magnetischen Flussdichten mit Hilfe des Programms WinField berechnet. Die Ergebnisse aus WinField sind tabellarisch in Anlage 2 und grafisch in Anlage 3 dargestellt. Dabei sind die Immissionsorte mit ihrer laufenden Nummer angegeben. Zudem sind die maximal zu erwartenden Stärken des elektrischen Feldes und der magnetischen Flussdichte in nachfolgender Tabelle 4 angegeben und dargestellt, dass die Grenzwerte der elektrischen Feldstärke von 5 kV/m und der magnetischen Flussdichte von 100 µT eingehalten werden.

Die später im Betrieb angewandte Phasenanzahl steht zum jetzigen Zeitpunkt der Planung noch nicht abschließend fest. Lediglich diejenigen Phasenanzahlungen, 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 Phasenanzahlungen wurde jeweils an den Immissionsorten die magnetische Flussdichte und die elektrische Feldstärke berechnet und ausgewertet. Die in Tabelle 4 und in den Anlagen 2 und 3 dargestellten Berechnungsergebnisse stellen die höchsten zu erwartenden Immissionen dar und beziehen sich auf die in Abbildung 1 dargestellte Phasenanzahlung:

Abbildung 1: Phasenlage für die Berechnung

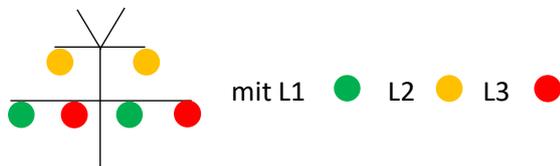


Tabelle 4: Berechnungsergebnisse

Lfd. Nr.	Maximalwert auf dem Flurstück		Maximalwerte am Objekt		Grenzwerte eingehalten
	Magnetische Flussdichte	Elektrische Feldstärke	Magnetische Flussdichte	Elektrische Feldstärke	ja/nein
1	12 µT	1,2 kV/m	19 µT	1,5 kV/m	ja
2	9 µT	0,8 kV/m	7 µT	0,5 kV/m	ja
3	9 µT	0,8 kV/m	7 µT	0,6 kV/m	ja

Nach II.3.4 der LAI-Durchführungshinweise [3] tragen bei diesem Vorhaben keine weiteren Niederfrequenzanlagen relevant zur Vorbelastung bei.

Wie anhand der Werte in Tabelle 4 ersichtlich ist, werden die Grenzwerte der 26. BImSchV [2] uneingeschränkt eingehalten.

5.2 Prüfung des Minimierungsgebotes für die 380 kV-Freileitung

Neben der Einhaltung der einschlägigen Grenzwerte sind die Vorgaben der 26. BImSchV [2] zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen zu prüfen.

Nach § 4 Abs. 2 Satz 1 26. BImSchV [2] sind bei der Errichtung und bei wesentlicher Änderung von Niederfrequenzanlagen sowie Gleichstromanlagen 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.

Daher werden im Folgenden die nach Kapitel 5.3 der 26. BImSchVVwV [4] zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten zur Minimierung geprüft sowie bewertet und für alle maßgeblichen Minimierungsorte betrachtet. Hierzu zählen alle in Tabelle 2 und Tabelle 3 enthaltenen Objekte. Es wurde eine individuelle Minimierungsprüfung (Fall II i.S.d. Kapitels 3.2.2.2 26. BImSchVVwV [4]) durchgeführt.

Das Minimierungspotenzial wurde also an jedem maßgeblichen Minimierungsort innerhalb des Bewertungsabstandes sowie zusätzlich an den (repräsentativen) Bezugspunkten (Fall II) ermittelt. Das Minimierungspotential wurde hier für die Maßnahmen Abstandsoptimierung, elektrische Schirmung, Minimieren der Seilabstände und Optimieren der Mastkopfgeometrie über eine pauschalierende Betrachtung ermittelt.

Um den Grundsatz der Verhältnismäßigkeit zu wahren, werden je möglicher Minimierungsmaßnahme der spezifische Aufwand und Nutzen bei diesem Vorhaben beschrieben. Dabei wurden auch mögliche nachteilige Auswirkungen auf andere Schutzgüter berücksichtigt.

Abstandsoptimierung

Abstandsoptimierung durch Masterhöhung: In den betrachteten Leitungsabschnitten beträgt der minimale Bodenabstand 12,51 m. Somit wird der nach DIN EN 50341-2-4 geforderte minimale Bodenabstand übertroffen. Eine darüberhinausgehende Erhöhung der Bodenabstände durch Masterhöhungen hätte nur eine geringe weitere Immissionsreduzierung von weniger als 2 % zur Folge. Gleichzeitig bedingt die damit verbundene Erhöhung der Maste einen zusätzlichen Eingriff ins Landschaftsbild und beeinträchtigt den Vogelschutz. Wegen der geänderten statischen Anforderungen und notwendigen Änderungen an den Mastfundamenten ist damit auch ein zusätzlicher Eingriff in den Boden und in die Eigentumsrechte Dritter verbunden. Aufgrund der nur geringen Immissionsreduzierungen, des erhöhten Aufwandes und der negativen Auswirkungen auf andere Schutzgüter ist diese Maßnahme unverhältnismäßig.

Abstandsoptimierung durch zusätzliche Maste: Eine Erhöhung der Bodenabstände durch Errichtung zusätzlicher Maste würde zu zusätzlichen Beeinträchtigungen und Eingriffen in das Landschaftsbild führen. Der zusätzliche Flächenbedarf macht Eingriffe ins Eigentum Dritter notwendig. Die zusätzlichen Mastfundamente würden gleichzeitig einen erhöhten Eingriff in den Boden darstellen.

Abstandsoptimierung durch Führung des Stromkreises auf abgewandter Traverse: Eine Minimierung an einem maßgeblichen Minimierungsort durch die Führung eines Stromkreises auf der dem Minimierungsort abgewandten Traverse ist nicht möglich, da beide Stromkreise der Freileitung betrieben werden.

Eine weitere Optimierung der Abstände als derzeit bereits umgesetzt ist daher aus oben genannten Gründen nicht möglich.

Elektrische Schirmung

Die Maßnahme wirkt sich ausschließlich auf das elektrische Feld aus, welches gegenüber dem magnetischen Feld nachrangig zu minimieren ist. In diesem Zusammenhang kann es gleichzeitig nachteilige Auswirkungen auf die Geräuschentwicklung geben. Zusätzlich ist zur Realisierung dieser Minimierungsmaßnahme ggf. eine Masthöhung notwendig, um die erforderlichen Bodenabstände einzuhalten. Somit bedingt die damit verbundene Erhöhung der Maste einen zusätzlichen Eingriff in das Landschaftsbild und beeinträchtigt den Vogelschutz. Wegen der geänderten statischen Anforderungen und notwendigen Änderungen an den Mastfundamenten ist damit auch ein zusätzlicher Eingriff in den Boden und in die Eigentumsrechte Dritter verbunden.

Die zur Schirmung erforderlichen zusätzlichen (dünnen) Leiterseile auf zusätzlichen Traversen können zu einer Erhöhung des Anflugrisikos und damit zu zusätzlichen naturschutzfachlich relevanten Eingriffen führen.

Aufgrund der geringen Wirksamkeit, insbesondere im Hinblick auf das magnetische Feld, der Maßnahme und der damit verbundenen zusätzlichen Beeinträchtigungen wird auf die Anwendung dieser Maßnahme verzichtet. Unter Berücksichtigung des geringen Minimierungspotentials ist darüber hinaus der zusätzliche Aufwand bei der Errichtung und Montage unverhältnismäßig groß.

Minimieren der Seilabstände

Eine wirksame Optimierung wird dann erreicht, wenn der Abstand der Phasen zueinander möglichst klein gewählt wird, wobei aber der Abstandsminimierung auf Grund physikalischer Gegebenheiten Grenzen gesetzt sind. Gründe dafür sind:

Für eine sichere Isolation der unter Spannung stehenden Leiter sind vorgeschriebene Mindestabstände (DIN EN 50341-2-4) unter Berücksichtigung der windbedingten Ausschwingweiten zwischen den Leitern notwendigerweise einzuhalten. Darüber hinaus sind die technischen und betrieblichen Anforderungen zu berücksichtigen.

Für Wartungsarbeiten muss ein Sicherheitsabstand zwischen dem Arbeitsbereich und den unter Spannung stehenden Anlageteilen eingehalten werden. Bei Mehrfachleitungen muss in der Regel ein zu wartender Stromkreis unabhängig von den anderen Stromkreisen zugänglich sein, um die Versorgungssicherheit nicht durch zu viele gleichzeitig abgeschaltete Stromkreise zu gefährden. Diese unabhängige Freischaltungsmöglichkeit einzelner Stromkreise ist bei zu geringen inneren Abständen nicht mehr gewährleistet

Zusätzlich erhöht sich die Feldstärke zwischen den Leitern und somit die Randfeldstärke an den Leiteroberflächen mit sinkendem Leiterabstand, was zu einem Anstieg der Korona-Entladungen und den damit verbundenen Geräuschen führt – welche ihrerseits eine immissionschutzrelevante Größe sind.

Eine weitere Reduzierung der Leiterabstände als derzeit bereits umgesetzt ist daher aus oben genannten Gründen nicht möglich.

Optimieren der Mastkopfgeometrie

Die Wahl der Mastkopfgeometrie wird abhängig von den lokalen Anforderungen und den betriebstechnischen Aufgaben gewählt. Eine vertikale Anordnung z.B. durch Tonnenmaste hat eine größere Masthöhe zur Folge. Diese wiederum wirkt sich nachteilig auf das Landschaftsbild und, in Abhängigkeit vom Vorkommen anfluggefährdeter Vogelarten, auch auf den Vogelschutz aus.

In dem hier betrachteten Abschnitt ist die Donauanordnung die Vorzugsbauweise, da diese deutliche Vorteile hinsichtlich der elektrischen Symmetrie, dem Verhältnis aus Masthöhe und Trassenbreite, dem Landschaftsbild sowie der Anforderungen an das Gestänge und an die Gründung bietet.

Weitergehende Optimierungen hinsichtlich der Auswahl der Mastgeometrie sind nicht vorgesehen, da sie insbesondere aufgrund der ohnehin schon niedrigen Immissionswerte nur noch ein sehr geringes Minimierungspotential bieten. Im Hinblick auf andere Schutzgüter werden sie daher als nicht mehr verhältnismäßig im Sinne von Kapitel 3.1 der 26. BImSchVVwV erachtet.

Optimieren der Leiteranordnung

Die Phasenordnung beeinflusst auch die elektrischen Eigenschaften der Leitung im Netz, wobei aus betrieblicher Sicht insbesondere elektrische Asymmetrien die Wahl der Phasenordnung einschränken können. Daher ist eine Optimierung, mit Blick auf einzelne Immissionsorte entlang einer Leitung, oft nicht möglich. Eine im Hinblick auf die Feldminimierung optimierte Leiteranordnung kann ggf. nur für einen Teilabschnitt, aber nicht über die komplette Leitungslänge, hergestellt werden.

Für das magnetische Feld kann eine optimierte Anordnung nur für einen speziellen Betriebsfall hergestellt werden. Das Minimierungspotential ist dabei gemäß Ziff. 4 der 26. BImSchVVwV für die überwiegend zu erwartende Stromrichtungskonstellation zu prüfen. Bei einer anderen Auslastung oder geänderter Stromrichtung kann diese vermeintlich optimierte Anordnung sogar eine Verstärkung des Magnetfeldes am Minimierungsort bewirken.

Eine feldoptimierte Phasenfolge kann sich ggf. nachteilig auf die Geräuschemissionen auswirken.

Mit Ausschluss der Phasenordnungen, bei denen direkt unterhalb der Leitung die höchsten elektrischen Felder auftreten, stellt der Planungsstand mit maximalen Immissionswerten unter 20 % der Grenzwertausschöpfung eine ausreichende Minimierung der elektrischen und magnetischen Felder dar. Die Unterschiede zwischen den verbleibenden möglichen Phasenordnungen liegen bei maximal 8 % der Grenzwertausschöpfung der Immissionen.

Hinsichtlich Abstandsoptimierung, elektrischer Schirmung, Minimieren der Seilabstände, Optimieren der Mastkopfgeometrie und Optimieren der Leiteranordnung sind, wie zuvor dargestellt, die bereits im Zuge der Planungen erarbeiteten und zu ergreifenden Maßnahmen als ausreichend feldminimierend zu bewerten. Darüberhinausgehende Optimierungen sind aus wirtschaftlichen Gründen und aufgrund der Belange anderer Schutzgüter nicht verhältnismäßig.

5.3 Prüfung des Minimierungsgebotes für die Provisorien

Das Minimierungspotential der Provisoriumsleitungen ist aufgrund ihrer Konstruktion begrenzt. Die besonderen konstruktiven Anforderungen ermöglichen nicht, dass eine elektrische Schirmung bzw. eine Optimierung der Leiteranordnung erfolgen. Aufgrund der limitierten Standzeit sind weitere Minimierungsmaßnahmen unverhältnismäßig.

5.4 Ermittlung der Immissionen und Prüfung des Minimierungsgebotes für die Kabelübergangsanlagen

Wie in Kapitel 4.4 dargestellt, existieren im Einwirkungsbereich der beiden Kabelübergangsanlagen KA_MUHS und KA_MUHN nach 26. BImSchV [2] keine maßgeblichen Immissionsorte. Dennoch wurden die Immissionen der beiden Anlagen ermittelt. Dabei wurden auch die Berechnungsergebnisse aus Tabelle 10 der Erdkabelstudie sta-fem [7] an den Stationen 40 und 50 am Zaun der KA_MUHS sowie 2710 und 2720 am Zaun der KA_MUHN auf jeweils 1,0 m über EOK berücksichtigt (siehe Unterlage 4.1.1). In nachfolgender Tabelle 5 sind die Immissionswerte am Zaun der beiden Kabelübergangsanlagen zusammengestellt. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die für maßgebliche Immissionsorte anzusetzenden Grenzwerte gemäß 26. BImSchV [2] bereits am Zaun der beiden Anlagen uneingeschränkt eingehalten werden. In Anlage 4 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt.

Tabelle 5: Berechnungsergebnisse am Zaun der Kabelübergangsanlagen

Lfd. Nr.	Magnetische Flussdichte			Elektrische Feldstärke
	Kabelübergangsanlage (Freileitung/Kabelseite)	Erdkabel	Summation	
KA_MUHN	29 μ T / 4 μ T	39-42 μ T	46 μ T	2,8 kV/m
KA_MUHS	11 μ T / 1 μ T	47 μ T	48 μ T	1,3 kV/m

Die zu untersuchenden Minimierungsmaßnahmen für Schaltanlagen sind in Kapitel 5.3.3 der 26. BImSchVVwV [4] beschrieben und werden im Folgenden geprüft und bewertet.

Abstandsoptimierung

Feldverursachende Anlagenteile werden mit größtmöglicher Distanz zu möglichen maßgeblichen Minimierungsorten errichtet, wozu auch die Erhöhung der Portale für zu- und abführende Freileitungen zählt. Die Wirksamkeit ist vom Umfang der Maßnahme abhängig.

Da sich im Einwirkungsbereich der Kabelübergangsanlage KA_MUHS nach 26. BImSchVVwV [4] keine maßgeblichen Minimierungsorte befinden, muss im Weiteren lediglich die Kabelübergangsanlage KA_MUHN betrachtet werden. Für diese wurden die oberirdischen Leiter auf der von dem Minimierungsort abgewandten Seite geplant. Die stromführenden Kabel wurden im südlichen Teil der Anlage sobald möglich als Erdkabel ausgeführt. Elektrische Felder wurden auf der südlichen Seite durch die Verlegung als Erdkabel eliminiert und treten nur noch in den Feldern mit oberirdischen Leitern auf.

Minimieren der Distanzen zwischen Betriebsmitteln mit unterschiedlicher Phasenbelegung

Um eine bestmögliche Kompensation der elektrischen und magnetischen Felder zu erreichen, werden die Betriebsmittel mit unterschiedlicher Phasenbelegung möglichst nah zusammen aufgebaut. Allein schon aus Kostengründen sind die Abstände bereits so gewählt, dass sie möglichst gering bei gleichzeitiger Wahrung der Betriebssicherheit und des Arbeitsschutzes sind.

Eine weitere Optimierung der Abstände als derzeit bereits umgesetzt ist daher nicht möglich.

Die Prüfung und Bewertung gemäß der 26. BImSchVVwV [4] ergab, dass die Maßnahmen entweder schon in der Planung berücksichtigt wurden oder nicht weiter umgesetzt werden können, da sie bereits standardmäßig umgesetzt wurden.

6 380 kV-Erdkabelabschnitt

6.1 Beschreibung der Kabelanlage und Untersuchung ihrer elektrischen und magnetischen Eigenschaften

Zwischen den in den Kapiteln 4.4 und 5.4 berücksichtigten Kabelübergangsanlagen befindet sich ein ca. 3 km langer Erdverkabelungsabschnitt. Dieser wurde hinsichtlich der elektrischen Eigenschaften und der u.a. daraus resultierenden magnetischen Flussdichte in einer separaten Studie von der Firma sta-fem GmbH [7] untersucht, deren Ergebnisse nachfolgend zusammengefasst dargestellt werden.

Das verwendete Regelgrabenprofil ist in der Bauwerksskizze (siehe Unterlage 6.3) zu finden. Die Standard-
Legetiefe im Regelgraben beträgt 1,6 m.

Zu unterscheiden sind im Regelgraben die folgenden drei Abstandsarten. Die genannten Abstände beziehen sich auf die Standardlegetiefe:

- Phasenabstand: Aderachsabstand zwischen zwei Kabeladern innerhalb eines Dreileitersystems, hier 0,6 m.
- Systemabstand: Aderachsabstand zwischen der rechten Kabelader von System 1 und der linken von System 2 (bzw. der rechten Kabelader von System 3 und der linken von System 4 oder der rechten Kabelader von System 5 und der linken von System 6), hier: 1,90 m. Die beiden benachbarten Systeme führen in Parallelschaltung zum selben Freileitungssystem und liegen im selben Kabelgraben.
- Stromkreisabstand: Aderachsabstand zwischen den benachbarten Adern von Stromkreis 1 und 2, bzw. von Stromkreis 2 und 3 also der Abstand zwischen der rechten Ader im mittleren Kabelgraben und der linken Ader im rechten Graben, bzw. der Abstand zwischen der rechten Ader im linken Kabelgraben und der linken Ader im mittleren Graben, hier jeweils: 13,60 m.

Für größere Legetiefen gelten die Abstände in der nachfolgenden Tabelle 6.

Tabelle 6: Phasen-, System- und Stromkreisabstände bei diversen Legetiefen [5]

Nennlegetiefe (m) (+0,2/-0,1 m Toleranz)	Achsabstand der Schutzrohre im System (m)	Abstand der Kabelsysteme (Achse-Achse der innenliegenden Schutzrohre) (m)	Kabelstromkreisabstand (m)			Trassenbreite (m)		
			bei 90° Graben	bei 60° Graben	bei 45° Graben	bei 90° Graben	bei 60° Graben	bei 45° Graben
1,6	0,6	1,9	11,7	12,5	14,1	20,3	21,1	22,7
1,9	0,75	2,5	11,7	12,9	14,7	22,7	23,9	25,7
2,2	0,95	2,7	11,7	13,3	15,3	24,7	26,3	28,3
2,5	1,1	3,2	11,7	13,7	15,9	26,9	28,9	31,1
2,8	1,3	3,6	11,7	13,9	16,5	29,3	31,5	34,1
3,1	1,55	4	11,7	14,3	17,1	32,1	34,7	37,5
3,4	1,75	4,4	11,7	14,7	17,7	34,5	37,5	40,5
3,7	1,95	4,9	11,7	15,1	18,3	37,1	40,5	43,7

Im Bereich geschlossener Verlegung (Spülbohrungen oder Pressungen) gelten folgende Abstände:

Tabelle 7: Phasen-, System- und Stromkreisabstände bei geschlossener Verlegung [5]

Bohrtiefe (m)	Ausführung		
	Phasen- und Systemabstand (m)	Stromkreisabstand (m)	Trassenbreite (m)
4	4	7	47
4,5	4	7	47
5	4	7	47
6	4	7	47
7	4,6	7	53
8	5,3	7	60
9	6,2	7	69
10	7	7	77

Der Regelgraben nach [5] ist dabei so ausgestaltet, dass es beim Einhalten bestimmter Rahmenbedingungen, z.B. einer Minderlegetiefe von 1,5 m, zu magnetischen Flussdichten kommt, die unterhalb von 100 µT in 0,2 m oberhalb der EOK liegen.

Die beiden Teilsysteme in einem Stromkreis sind parallelgeschaltet. Es wurde die Phasenfolge L1, L2, L3 – L1, L2, L3 – L1, L2, L3 gewählt, weil sie die niedrigste maximale magnetische Flussdichte in der Mitte der Trasse ermöglicht. Aufgrund der gewählten Phasenfolge und der magnetisch unsymmetrischen Flachverlegung der Kabeladern wird sich eine ungleichmäßige Stromaufteilung der beiden parallelgeschalteten Systeme ergeben. Die Minimierung des Magnetfeldes durch Verwenden der oben genannten Phasenreihenfolge wird auch in [6] bestätigt.

Im Sinne der 26. BImSchV wird für die Berechnung der magnetischen Flussdichte von der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung ausgegangen, so dass pro Erdkabelsystem von 2000 A ausgegangen wird.

Bei der geplanten Kabelanlage gibt es jedoch zwei Besonderheiten zu beachten.

- 1) An einem Freileitungsseil sind zwei Kabeladern angeschlossen, welche somit als parallelgeschaltet gelten. Aufgrund der auf Abstand und flach verlegten Kabeladern spannen diese unterschiedlich große Flächen und weisen somit unterschiedliche Induktivitätsbeläge auf. Daraus resultieren unterschiedlich große Ströme auf den Kabeladern. Die Stromverteilung wurde im Abschnitt 3 der Studie [7] berechnet.
- 2) Die von den stromdurchflossenen Leitern ausgehenden Magnetfelder induzieren Spannungen in die Kabelschirme. Sind die Kabelschirme beidseitig geerdet, bilden die Schirme geschlossene Leiterschleifen und die induzierten Spannungen treiben einen Schirmstrom. Durch Auskreuzen der Kabelschirme werden die Schirmströme reduziert. Aufgrund der Tatsache, dass nicht jede Muffe an einem anderen Standort gelegt werden soll und somit eine nicht vollständig optimierte Lage der Muffenpositionen vorliegt, verbleiben aufgrund der unterschiedlichen Induktivitätsbeläge unvermeidbare Restströme auf den Schirmen.

Daraus ergeben sich zwei Konsequenzen: Da ein System immer das energetische Minimum einnimmt, ergibt sich durch die ungleichmäßige Leiterstromverteilung ein geringeres Magnetfeld im Vergleich zu zwei nicht parallelgeschalteten Kabeladern, die jeweils 2000 A führen würden.

Die Schirmströme werden durch das Magnetfeld der Leiterströme verursacht. Die hierzu benötigte Energie wird dem treibenden Magnetfeld entzogen (vergleiche Lenz'sche Regel: das Magnetfeld der induzierten Ströme ist dem induzierenden Magnetfeld entgegengerichtet). Schirmströme bewirken also eine Schwächung des Magnetfeldes. Vernachlässigt man diese, werden die magnetischen Emissionen zu groß berechnet.

In der Erdkabelstudie sta-fem [7] wurden die Magnetfelder mit Hilfe des Linienleiterverfahrens und des Biot-Savart-Gesetzes analytisch berechnet und mit Hilfe der FEM-Software verifiziert.

6.2 Ermittlung der Immissionen und Prüfung des Minimierungsgebotes für die Kabelanlage

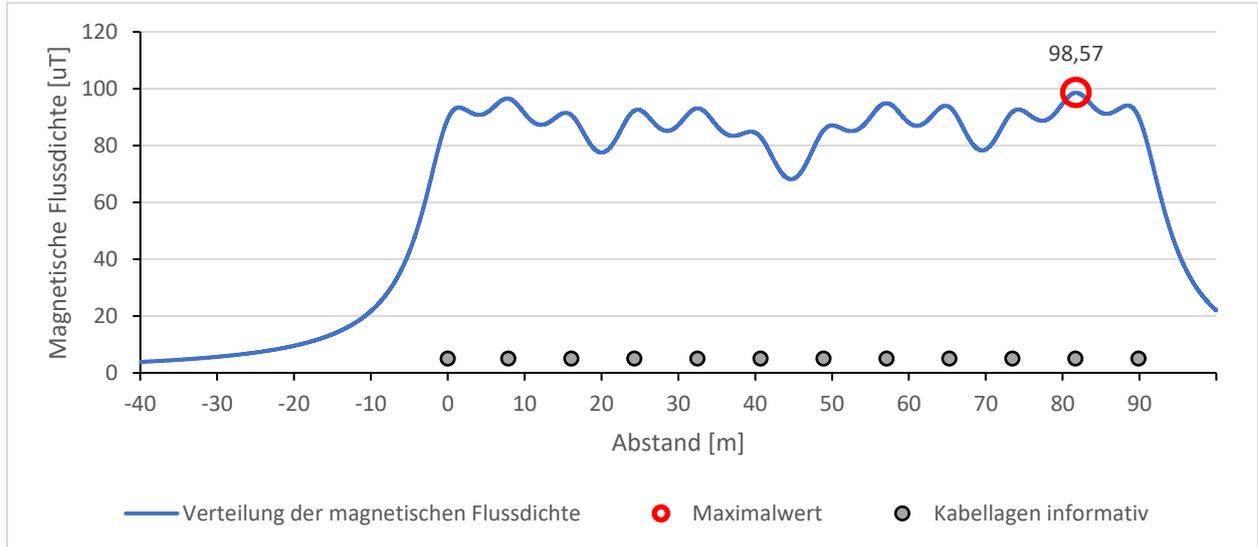
Für das hier vorliegende Netzanschlussystem ist festzuhalten, dass keine maßgeblichen Immissionsorte (nicht nur vorübergehender Aufenthalt von Menschen im Einwirkungsbereich) vorhanden sind. Jedoch wird der für diese Orte anzusetzende Grenzwert von 100 μT dennoch in 0,2 m oberhalb der EOK eingehalten.

Wie anhand der Tabelle 10 der Erdkabelstudie sta-fem [7] erkennbar ist, liegen alle maximalen magnetischen Flussdichten unter 100 μT , außer bei Station 20 (siehe Unterlage 4.1.1). Diese liegt jedoch noch innerhalb des eingezäunten Betriebsgeländes der Kabelübergangsanlage, ist somit nicht für die Allgemeinbevölkerung zugänglich und aus diesem Grund nicht relevant. Die magnetische Flussdichte liegt auf 0,2 m Höhe über EOK im Bereich zwischen 43,78 μT und 98,57 μT bzw. auf 1,0 m Höhe über EOK zwischen 29,68 μT und 79,45 μT . Der maximale Wert für die magnetische Flussdichte beträgt an Station 600 (siehe Unterlage 4.1.1) auf 0,2 m Höhe über EOK 98,57 μT und auf 1,0 m Höhe über EOK 79,45 μT .

Abbildung 2 stellt die Verteilung der magnetischen Flussdichte an Station 600 (siehe Unterlage 4.1.1) im Bereich der geschlossenen Querung auf 0,2 m über EOK, wo die höchsten Immissionswerte erreicht werden, in einem Diagramm dar. Die Lage der einzelnen Kabeladern ist dabei schematisch dargestellt. Es

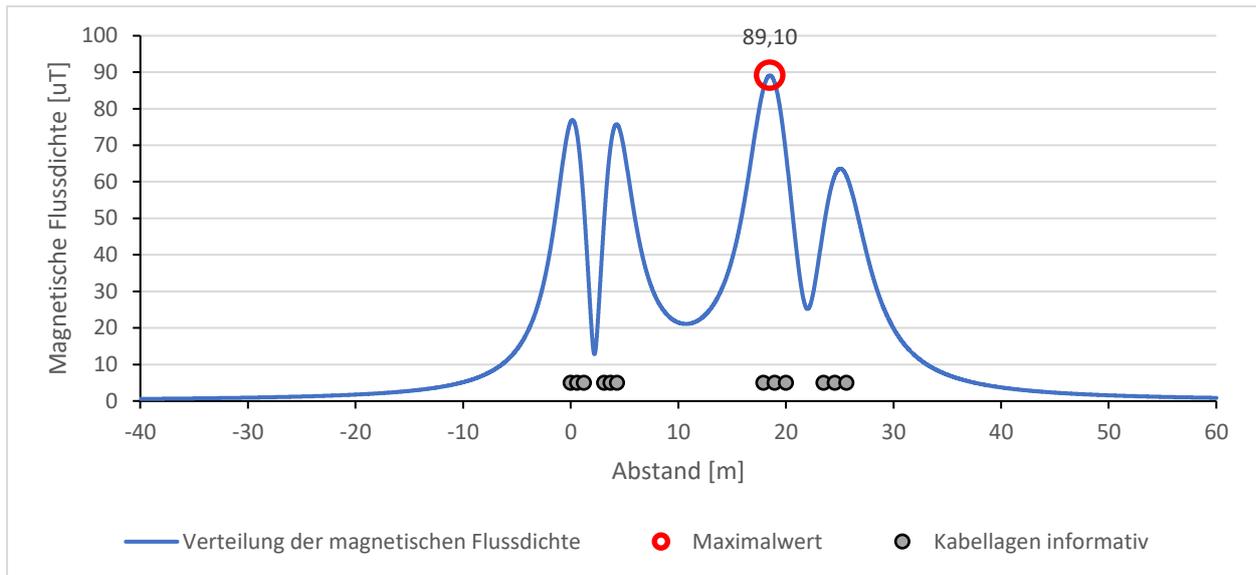
ist erkennbar, dass die magnetische Flussdichte beiderseits der jeweils äußeren Kabeladern schnell absinkt und bereits in einem Abstand von 10 m zur äußeren Kabelader nur noch ca. 22 % des Grenzwertes beträgt.

Abbildung 2: Verteilung der magnetischen Flussdichte an der Station 600



In der folgenden Abbildung 3 ist die Verteilung der magnetischen Flussdichte an Station 2520 (siehe Unterlage 4.1.1) auf 0,2 m über EOK für die Verlegung im Regelgrabenprofil dargestellt. Auch hier ist die Lage der einzelnen Kabeladern schematisch dargestellt. Ebenso ist das schnelle Absinken der magnetischen Flussdichte beiderseits der jeweils äußeren Kabeladern auf ca. 7 % des Grenzwertes in einem Abstand von 10 m zur äußeren Kabelader erkennbar.

Abbildung 3: Verteilung der magnetischen Flussdichte an der Station 2520



Der Einwirkungsbereich gemäß Kapitel 3.2.1.2 der 26. BImSchVVwV [4] liegt für Erdkabel mit einer Spannung von größer/gleich 380 kV bei 100 m ausgehend vom äußeren Kabel. Im zu betrachtenden Abschnitt sind Orte des nicht nur vorübergehenden Aufenthalts innerhalb des genannten Abstandes vorhanden, so dass die Maßnahmen aus Kapitel 5.3.2 der 26. BImSchVVwV zu prüfen sind.

Tabelle 8: Maßgebliche Minimierungsorte für den Erdkabelabschnitt

Bereich	Maßgebliche Minimierungsorte im Einwirkungsbereich	
	links	rechts
Station 400		x
Station 2300 bis 2650	x	x

In den mit x markierten Bereichen befinden sich maßgebliche Minimierungsorte im Einwirkungsbereich der Kabelanlage.

Minimieren der Kabelabstände

Um die thermische Belastung der Kabel und die Erwärmung des Bodens zu begrenzen, sind Mindestabstände zu beachten. Die Wirksamkeit der Maßnahme ist hoch und wird von anderen Anlagenparametern beeinflusst. Die hier gewählten Abstände sind bereits dahingehend optimiert, so dass eine weitere Verringerung der Kabelabstände nicht möglich ist.

Optimieren der Leiteranordnung

Die geplante Phasenfolge wurde gewählt, weil sich bei ihr an und oberhalb der Erdoberfläche die kleinste magnetische Flussdichte ergibt; der Kabelabschnitt ist dahingehend demnach als minimiert zu bewerten. Die Maßnahme wird umgesetzt.

Optimieren der Verlegegeometrie

Die Verlegung von Einzelkabeln im Dreieck ist für die Kompensation der Emissionen günstig. Jedoch ist aufgrund der zu berücksichtigenden Abstände, bedingt durch die thermischen Anforderungen, eine Verlegung im Dreieck nur mit erhöhtem Aufwand verbunden.

Am nächstgelegenen Minimierungsort an der Station 2610 (siehe Unterlage 4.1.1) beträgt die magnetische Flussdichte am Gebäude lediglich $2,5 \mu\text{T}$ (aus Datengrundlage Erdkabelstudie sta-fem [7]). Dies entspricht einer Grenzwertausschöpfung von 2,5 %. Eine Optimierung der Verlegegeometrie hätte somit nur noch ein sehr geringes Potential, so dass eine Umsetzung mit Blick auf den erhöhten Aufwand nicht verhältnismäßig ist.

Abbildung 4: Lage des nächstgelegenen Minimierungsortes an Station 2610



Optimieren der Verlegetiefe

Mit zunehmender Verlegetiefe reduziert sich die magnetische Flussdichte. Jedoch muss in der Regel der Abstand zwischen den Kabeln aufgrund der thermischen Bedingungen vergrößert werden, wodurch die Kompensation des Magnetfeldes durch die Nähe der Kabel zueinander abnimmt. In Anbetracht der Tatsache, dass bereits direkt über der Erdkabeltrasse die Einhaltung der Grenzwerte gewährleistet ist, am nächstgelegenen Minimierungsort nur noch eine Grenzwertausschöpfung von 2,5 % vorliegt sowie eine Tieferlegung eine Verbreiterung der Trasse und somit eine größere Flächeninanspruchnahme bedingt, erscheint diese Maßnahme als nicht verhältnismäßig.

7 Zusammenfassung und Fazit

Freileitungen und Kabelübergangsanlagen erzeugen aufgrund der unter Spannung stehenden und Strom führenden Leiter elektrische und magnetische Felder; Erdkabel aufgrund ihrer Kabelschirme und dem überdeckenden Erdreich lediglich magnetische Felder. Daher sind die Vorschriften des BImSchG [1] zu beachten bzw. die Einhaltung der konkreten Anforderungen der 26. BImSchV [2] für Niederfrequenzanlagen darzulegen.

Im vorliegenden Bericht wurde überprüft, ob beim Betrieb der geplanten Leitungsanlage LH-08-B171 von Mast 53 bis Mast 166 die Anforderungen der 26. BImSchV eingehalten werden. Die Berechnungen und Prüfungen zeigen, dass die an den maßgeblichen Immissionsorten der Freileitung ermittelten elektrischen Feldstärken und magnetischen Flussdichten unterhalb der zulässigen Grenzwerte liegen und damit alle Schutzanforderungen erfüllt sind. Auch die Anforderungen zur Vorsorge wurden geprüft und dem enthaltenen Minimierungsgebot des § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV wird Rechnung getragen.

Im Einwirkungsbereich der Kabelübergangsanlagen gemäß 26. BImSchV [2] sind keine Immissionsorte vorhanden. Dennoch wurden die Immissionen der beiden Anlagen ermittelt und es wurde nachgewiesen, dass die Grenzwerte bereits am Zaun der beiden Anlagen eingehalten werden. Die Anforderungen zur Vorsorge wurden geprüft und dem enthaltenen Minimierungsgebot des § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV wird Rechnung getragen.

Im Einwirkungsbereich des Erdkabels gemäß 26. BImSchV [2] liegen keine Immissionsorte vor. Jedoch wurden Kabelabstände und Verlegetiefen so gewählt, dass die Grenzwerte der magnetischen Flussdichte von 100 μT immer unterschritten werden. Die Anforderungen zur Vorsorge wurden geprüft und bereits im Rahmen der Planung berücksichtigt oder wurden als nicht verhältnismäßig bewertet.

Literaturverzeichnis

- [1] *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.

- [2] *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)*, Neugefasst durch Bek. v. 14.8.2013 I 3266.

- [3] 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.

- [4] *Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV (26. BImSchVVwV)*, 2015.

- [5] TenneT, *Berechnungen für 380 kV Zwischenverkabelungsabschnitte*, Version 1.8, April 2023, Revision vom 24.04.2023.

- [6] D. Oeding e.a., *Elektrische Kraftwerke und Netze*, Auflage 7, 2011.

- [7] sta-fem, *Elektrische, magnetische und thermische Eigenschaften des Erdkabelabschnitts der 380-kV-Leitung Raitersbach-Altheim (Vorhaben A070/Juraleitung)*, März 2025.