Rhein-Main-Link

Höchstspannungsleitungen (Gleichstrom)

BBPIG Vorhaben Nr. 82

Ovelgönne/Rastede/Wiefelstede/Westerstede – Bürstadt

BBPIG Vorhaben Nr. 82a

Ovelgönne/Rastede/Wiefelstede/Westerstede – Hofheim am Taunus

BBPIG Vorhaben Nr. 82b

Grenzkorridor N-III – Kriftel

[Bestandteil Ovelgönne/Rastede/Wiefelstede/Westerstede – Kriftel]

BBPIG Vorhaben Nr. 82c

Grenzkorridor N-III – Bürstadt/Biblis/Groß-Rohrheim/Gernsheim/Biebesheim am Rhein

[Bestandteil Ovelgönne/Rastede/Wiefelstede/Westerstede – Bürstadt/Biblis/Groß-Rohrheim/Gernsheim/Biebesheim am Rhein]

Unterlagen gemäß § 21 NABEG i. V. m. § 35 Abs. 6 NABEG

Planfeststellungsabschnitt: NI3

Unterlagenteil: Teil E1 – Immissionsschutzbericht

Stand: [September 2026]

Vorhabenträgerin

Amprion GmbH
Robert-Schuman-Straße 7
44263 Dortmund

Amprion Offshore GmbH
Robert-Schuman-Straße 7
44263 Dortmund

In Zusammenarbeit mit

ARGE Arcadis | ILF
c/o Arcadis Germany B.V. & Co. KG
Europaplatz 3 | 64293 Darmstadt | Deutschland

Festgestellt nach § 24 NABEG
Bonn, den

Immissionsschutzbericht B0094

Prognose elektrischer und magnetischer Feldimmissionen gemäß 26. BImSchV

als Bestandteil der Unterlagen zur Planfeststellung nach § 21 NABEG a.F. [1] für die

Vorhaben 82 der Anlage (zu §1 Absatz 1) BBPlG - „Höchstspannungsleitung Ovelgönne/Rastede/Wiefelstede/Westerstede – Bürstadt; Gleichstrom“,

Vorhaben 82a der Anlage (zu §1 Absatz 1) BBPlG - „Höchstspannungsleitung Ovelgönne/Rastede/Wiefelstede/Westerstede – Hofheim am Taunus; Gleichstrom“,

Vorhaben 82b der Anlage (zu §1 Absatz 1) BBPlG - „Höchstspannungsleitung Grenzkorridor N-III – Kriftel; Gleichstrom“ und

Vorhaben 82c der Anlage (zu §1 Absatz 1) BBPlG - „Höchstspannungsleitung Grenzkorridor N-III – Bürstadt/Biblis/Groß-Rohrheim/Gernsheim/Biebesheim am Rhein; Gleichstrom“

Planfeststellungsabschnitt NI3

aus dem Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG)

Erstellt durch: Amprion GmbH
Robert-Schuman-Straße 7
44263 Dortmund
Deutschland

Ausgestellt: August 2026

Dieses Dokument besteht aus 31 Seiten

Inhaltsverzeichnis

1 Der Rhein-Main-Link 6
2 Elektrische und magnetische Felder 9
2.1 Physikalische Grundlagen 9
2.1.1 Elektrisches Feld 9
2.1.2 Magnetisches Feld 10
2.2 Rechtliche Anforderungen an Gleichstromanlagen 11
2.2.1 26. BImSchV 11
2.2.2 26. BImSchVVwV 12
3 Anlagenbeschreibung 13
3.1 Technische Parameter 13
3.1.1 Zu berücksichtigende bestehende Anlagen 16
3.2 Betriebsarten 16
4 Ermittlung 18
4.1 Methodik 18
4.2 Maßgebliche Immissionsorte 18
4.3 Maßgebliche Minimierungsorte 19
5 Ergebnisse 21
5.1 Anforderungen zum Schutz 21
5.2 Immissionsbetrachtungen 21
5.2.1 DC-Erdkabel 21
5.2.2 Vermeidung erheblicher Belästigungen oder Schäden 22
5.2.3 Einordnung des Einflusses der Betriebsarten auf die magnetischen Felder und Ermittlung des Maximalwertes der magnetischen Flussdichte 22
5.3 Anforderungen zur Vorsorge 23
5.3.1 Minimierungsgebot 24
5.3.2 Minimierungsmaßnahmen 24
5.3.3 Maßnahmenbewertung 24
6 Angaben zur Qualität 26
7 Fazit 27

A Verzeichnisse 28
A.1 Literaturverzeichnis 28
A.2 Abbildungen 30
A.3 Tabellen 30
A.4 Abkürzungen 30

1 Der Rhein-Main-Link

Im Zuge der Verwirklichung der gesetzlich verankerten Energiewende kommt es durch den massiven Zubau erneuerbarer Energien in Norddeutschland zu Leitungsengpässen für den Stromtransport in Richtung Süddeutschland. Um ihren gesetzlichen Verpflichtungen zur Erfüllung einer sicheren Energieversorgung nachzukommen, sind die Übertragungsnetzbetreiber verpflichtet, in ihren jeweiligen Regelzonen überlastete Übertragungsnetze zu optimieren, zu verstärken oder auszubauen, soweit es wirtschaftlich zumutbar ist (vgl. § 11 Abs. 1 Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)). Da die bestehende Netzinfrastruktur in der Region weitgehend verstärkt ist, erfolgt gemäß NOVA-Prüfung (Netzoptimierung vor Netzverstärkung vor Netzausbau) im Netzentwicklungsplan (NEP) 2037/2045 (BNetzA 2024) [2] die Umsetzung der erforderlichen Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragungsverbindung (HGÜ-Verbindung) Rhein-Main-Link als Ausbau in neuer Trasse.

Übergeordnetes Planungs- und Realisierungsziel des Rhein-Main-Link ist die Errichtung und der Betrieb einer vorrangig erdverkabelten sowie sicheren und zuverlässigen Höchstspannungs-Gleichstromverbindung mit den vier Vorhaben Nr. 82, 82a, 82b und 82c der Anlage zu § 1 Abs. 1 Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG) in einheitlicher Trasse zwischen dem Netzverknüpfungspunkt (NVP) im Suchraum Ovelgönne/Rastede/Wiefelstede/Westerstede in Niedersachsen und den NVP Bürstadt, Hofheim am Taunus, Kriftel und Suchraum Bürstadt/Biblis/Groß-Rohrheim/Gernsheim/Biebesheim am Rhein in Hessen mit einem möglichst kurzen, gestreckten Verlauf unter Sicherstellung von Wirtschaftlichkeit, der regelhaften Meidung von Siedlungsräumen bzw. sensiblen Nutzungen sowie einer schnellstmöglichen sukzessiven Inbetriebnahme ab 2033.

Das Projekt besteht aus vier HGÜ-Leitungen, überwiegend ausgeführt als Erdkabel, einschließlich der für den Betrieb notwendigen Anlagen sowie Folgemaßnahmen gem. § 75 Abs. 1 Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG).

Für das Projekt wurde am 27.06.2024 der Antrag auf Planfeststellung gemäß § 19 Netzausbaubeschleunigungsgesetz (NABEG) a.F. eingereicht. Daraufhin wurde durch die Bundesnetzagentur (BNetzA) der Untersuchungsrahmen gemäß § 20 Abs. 3 NABEG a.F. festgelegt.

Gemeinsame Vorhabenträgerinnen (nachfolgend als „Vorhabenträgerin“ bezeichnet) sind die Amprion GmbH und die Amprion Offshore GmbH. Die Amprion GmbH führt das Zulassungsverfahren im eigenen Namen und im Auftrag stellvertretend für die Amprion Offshore GmbH durch.

Disclaimer: Zur besseren Lesbarkeit wird in vorliegender Unterlage meistens das generische Maskulinum verwendet. Es wird darauf hingewiesen, dass sich die verwendeten

Personenbezeichnungen, soweit es für die Aussage erforderlich ist, auf alle Geschlechter beziehen.

Der Rhein-Main-Link umfasst den Neubau von Höchstspannungserdkabeln mit einer Netzfrequenz von 0 Hertz (Hz) und einer Nennspannung größer 2 Kilovolt (kV). Höchstspannungsleitungen sind gem. § 4 Abs. 1 Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) i. V. m. der 4. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) nicht genehmigungsbedürftige Anlagen [3, 4]. Dennoch sind insbesondere die Betreiberpflichten nach § 22 BImSchG zu beachten. Höchstspannungserdkabel, Höchstspannungsfreileitungen und Konverter stellen Gleichstrom- oder Niederfrequenzanlagen gem. § 1 Abs. 2 Nr. 2 und Nr.3 der 26. BImSchV [5] dar. Nachfolgend (bis einschließlich Kapitel 2) werden zunächst abschnittsübergreifend allgemeingültige rechtliche, technische und physikalische Grundlagen dargestellt. Im Anschluss (Kapitel 3) wird der verfahrensgegenständliche Abschnitt NI3 hinsichtlich der hier vorkommenden, relevanten Anlagenteile und möglichen Betriebsarten beschrieben, um dann (ab Kapitel 4) die zu erwartenden elektrischen und magnetischen Felder rechnerisch zu prognostizieren und die Zulässigkeit des Vorhabens bezüglich der Anforderungen der 26. BImSchV zu untersuchen.

Die rechtlichen, fachlichen und technischen Grundlagen hierfür basieren auf:

- Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 29. März 2026 (BGBl. 2026 I Nr. 84) geändert worden ist
- Sechsundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2013 (BGBl. I S. 3266)
- Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV (26. BImSchVVwV) vom 26. Februar 2016 (BAnz AT 03.03.2016 B5)
- 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
- FNN-Hinweis: Minimierung elektrischer und magnetischer Felder, 2. Ausgabe Februar 2017, Forum Netztechnik / Netzbetrieb im VDE, Berlin
- WinField – Electric and Magnetic Field Calculation, Version 2025 (Build 3278) der Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie – FGEU mbH, Berlin
- DIN EN 50413 (VDE 0848-1) Grundnorm zu Mess- und Berechnungsverfahren der Exposition von Personen in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz); Deutsche Fassung EN 50413:2020, Berlin: VDE Verlag GmbH.
- Grundsätze für die Ausbauplanung des deutschen Übertragungsnetzes der vier Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland. Ausgabe November 2024. https://www.amprion.net/Netzausbau/Rechtsrahmen-und-Leitlinien/Netzplanungsgrundsätze

- Handlungsempfehlungen für EMF- und Schallgutachten zu Hoch- und Höchstspannungstrassen in Bundesfachplanungs-, Raumordnungs- und Planfeststellungsverfahren, Stand Januar 2022, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz

Die für diesen Immissionsschutzbericht verantwortlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter erfüllen aufgrund ihrer fachlichen Ausbildung, jahrelangen Berufserfahrung sowie einschlägiger Kenntnisse in Mess- und Berechnungsverfahren die Anforderungen an Sachverständige für die Bestimmung der Exposition gegenüber elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern [6]. Die entsprechenden Nachweise liegen der Amprion GmbH vor.

2 Elektrische und magnetische Felder

Das Projekt Rhein-Main-Link wird überwiegend als Erdkabel in Gleichstromtechnik ausgeführt, die Konverteranbindungen erfolgen laut Gesetzesgrundlage als Freileitung in Wechselstromtechnik. Eine Gleichstromanlage kann grundsätzlich elektrische und magnetische Gleichfelder hervorrufen, eine Wechselstromanlage kann entsprechend elektrische und magnetische Wechselfelder (Frequenz 50 Hz) hervorrufen. Für die Bewertung der Felder sind die Vorgaben der 26. BImSchV maßgeblich.

Das elektrische Feld wird bei einem unterirdisch verlegten Kabel vollständig abgeschirmt, sodass beim Betrieb der Kabelverbindung nur magnetische Felder an der Erdoberfläche nachweisbar sind. Die Betriebsspannung, die für das elektrische Feld unterhalb von Freileitungen verantwortlich ist, ist bei Erdkabeln entsprechend nicht relevant für die Immissionsbetrachtung. Wenn im Planfeststellungsabschnitt Freileitungen (Anbindungsleitung zwischen Konverter und Netzverknüpfungspunkt), Kabel-Kabel-Übergabestationen (KKÜS) oder Konverter vorhanden sind, so sind für diese sowohl das magnetische als auch das elektrische Feld zu betrachten. Monitoringstationen (MOS) werden zur Überwachung der Erdkabelanlage eingesetzt und im Niederspannungsbereich betrieben. Sie sind nicht Teil der Höchstspannungsanlage und werden deshalb gem. 26. BImSchV in diesem Bericht nicht weiter betrachtet.

Für die Immissionen (Kapitel 2.1) gelten gesetzliche Vorgaben (Kapitel 2.2), deren Einhaltung in Kapitel 5 betrachtet wird.

2.1 Physikalische Grundlagen

Beim Betrieb von Höchstspannungsleitungen treten elektrische und magnetische Felder auf. Je nach Frequenz von Spannung und Strom handelt es sich um statische und / oder niederfrequente Felder. Sie entstehen in unmittelbarer Nähe von spannungs- bzw. stromführenden Leitern. Die Feldstärken lassen sich messen und berechnen. Die theoretische Grundlage bietet die von James Clerk Maxwell Mitte des 19. Jahrhunderts begründete, klassische Elektrodynamik mit den nach ihm benannten Maxwell-Gleichungen [7]. Sowohl statische als auch niederfrequente elektrische und magnetische Felder, wie sie in der Energieversorgung vorkommen, sind voneinander entkoppelt und werden daher getrennt, als stationär oder in quasistationärer Näherung betrachtet. Im Fall von Gleichstromleitungen bleibt die Polarität der elektrischen und magnetischen Felder konstant. Bei Wechselstromleitungen wechseln die elektrischen und magnetischen Felder ihre Polarität mit einer Frequenz von 50 Hz.

2.1.1 Elektrisches Feld

Ursache statischer oder niederfrequenter elektrischer Felder sind spannungsführende Leiter in elektrischen Geräten ebenso wie Leitungen zur elektrischen Energieversorgung. Das elektrische Feld tritt immer dann auf, wenn elektrische Energie durch das Anliegen einer Spannung bereitgestellt wird. Es resultiert aus der Betriebsspannung einer Leitung und ist deshalb nahezu konstant. Das elektrische Feld ist unabhängig von der Stromstärke.

Das elektrische Feld wird durch leitfähige Gegenstände wie Bäume, Büsche oder Bauwerke beeinflusst. Daher können elektrische Felder relativ leicht und vollständig abgeschirmt werden. Nach dem Prinzip des Faraday'schen Käfigs ist das Innere eines leitfähigen Körpers feldfrei. So sind beispielsweise die meisten Baustoffe ausreichend leitfähig, um bei Freileitungen ein von außen wirkendes elektrisches Feld fast vollständig im Inneren eines Gebäudes abzuschirmen.

Die zu betrachtende physikalische Größe ist die elektrische Feldstärke E. Sie wird in Kilovolt pro Meter (kV/m) angegeben.

Das elektrische Feld wird bei den in diesem Vorhaben verwendeten Höchstspannungserdkabeln, in welchen der stromführende Leiter und das Isoliersystem von einem elektrisch leitfähigen Schirm aus Einzeldrähten und einem durchgängigen Metallmantel aus Aluminium umhüllt sind, vollständig abgeschirmt. Beim Betrieb von Erdkabelverbindungen sind demnach keine elektrischen Felder an der Erdoberfläche nachweisbar. Die einzige Ausnahme können (falls vorhanden) KKÜS darstellen, bei denen aufgrund oberirdischer Komponenten auf Höchstspannungspotenzial E-Felder vorliegen und betrachtet werden.

2.1.2 Magnetisches Feld

Statische oder niederfrequente magnetische Felder treten nur dann auf, wenn elektrischer Strom fließt. Der Betriebsstrom, der durch die Erdkabel fließt, ist im Gegensatz zur Spannung nicht konstant. Er schwankt je nach Einspeisung und Last tageszeiten-, jahreszeiten- und witterungsabhängig. Im gleichen Verhältnis wie die Stromänderung ändert sich auch die Stärke des Magnetfeldes.

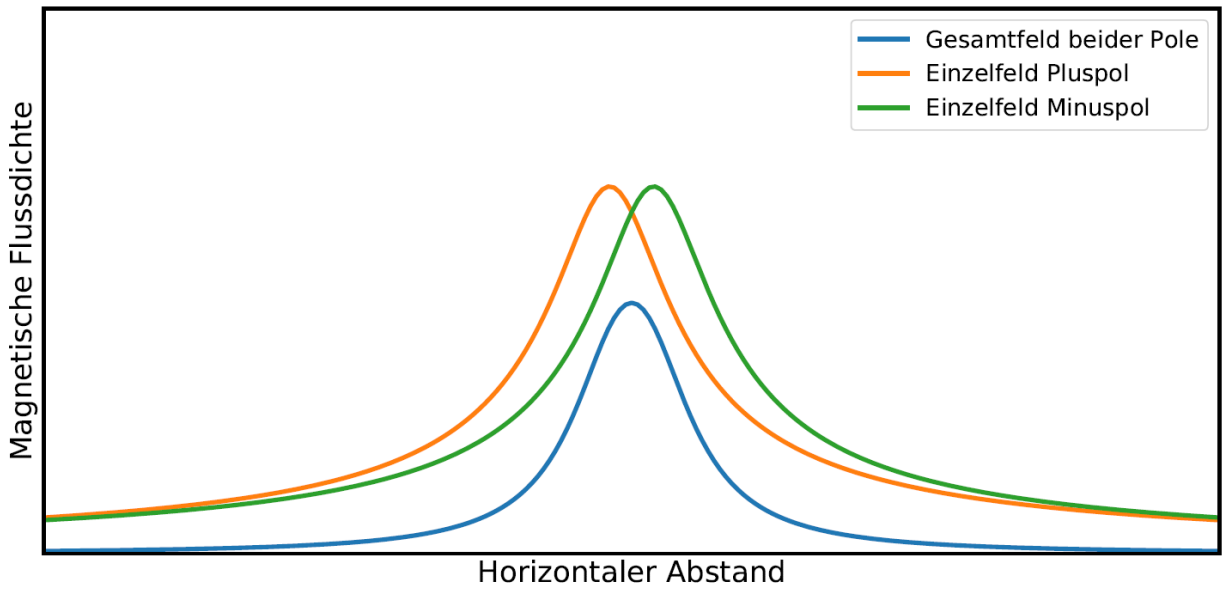


Abbildung 1: Schematische Darstellung des horizontalen Verlaufs des Betrags der magnetischen Flussdichte in 0,2 m Höhe oberhalb der Geländeoberkante

Die vorangegangene Abbildung 1 zeigt schematisch den horizontalen Verlauf des Betrags der magnetischen Flussdichte in 0,2 m über der Geländeoberkante (GOK). In Orange und Grün sind

jeweils die Einzelfelder des Plus- bzw. des Minuspols zu sehen. In Blau ist das Gesamtfeld abgebildet, welches sich aus der Überlagerung beider Pole ergibt.

Das Magnetfeld kann im Gegensatz zum elektrischen Feld nur durch spezielle Werkstoffe, die eine hohe Permeabilität besitzen, beeinflusst werden. Dies ist großflächig, etwa bei Gebäuden, nicht praktikabel.

Die zu betrachtende physikalische Größe ist die magnetische Flussdichte $\boldsymbol{B}$. Sie wird in Mikrotesla (µT) angegeben.

2.2 Rechtliche Anforderungen an Gleichstromanlagen

Die Festlegung von Grenzwerten zur Gewährleistung einer hohen Sicherheit der Bevölkerung obliegt dem Gesetzgeber. Zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch elektrische und magnetische Felder hat er Anforderungen in der 26. BImSchV festgesetzt [5]. Die Vorgaben beruhen auf Empfehlungen eines von der Weltgesundheitsorganisation anerkannten wissenschaftlichen Gremiums, der Internationalen Kommission für den Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung (ICNIRP), und spiegeln den aktuellen Stand der Forschung bezüglich möglicher Wirkungen durch Felder auf den Menschen wider [8, 9].

2.2.1 26. BImSchV

Die 26. BImSchV ist seit dem 16. Dezember 1996, zuletzt novelliert am 14. August 2013, im deutschen Recht verankert und für Höchst- und Hochspannungsleitungen verbindlich anzuwenden.

Nach § 3a S. 1 Nr. 1 der 26. BImSchV sind Gleichstromanlagen so zu errichten und zu betreiben, dass sie bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung in ihrem Einwirkungsbereich an Orten, die zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, den in Anhang 1a der 26. BImSchV genannten Grenzwert (vgl. Tabelle 1) für die magnetische Flussdichte nicht überschreiten.

Tabelle 1: Grenzwerte für 0-Hz-Anlagen

Betriebsfrequenz f	**Elektrische Feldstärke E**	**Magnetische Flussdichte B**
0 Hz	-	500 µT

Zudem sind bei Gleichstromanlagen nach § 3a S. 1 Nr. 2 der 26. BImSchV Wirkungen, die zu erheblichen Belästigungen oder Schäden führen können, zu vermeiden.

Zum Zwecke der Vorsorge sind nach § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV bei Errichtung und wesentlicher Änderung von Niederfrequenz- und Gleichstromanlagen die Möglichkeiten auszuschöpfen, die von der jeweiligen Anlage ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder nach dem Stand der Technik unter Berücksichtigung von Gegebenheiten im Einwirkungsbereich zu minimieren. Das Nähere regelt die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV (26. BImSchVVwV) [10].

2.2.2 26. BImSchVVwV

Das Ziel des Minimierungsgebots nach § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV ist es, die von Gleichstromanlagen ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder nach dem Stand der Technik unter Berücksichtigung von Gegebenheiten im Einwirkungsbereich so zu minimieren, dass die Immissionen an den maßgeblichen Minimierungsorten der jeweiligen Anlage reduziert werden. Als maßgebliche Minimierungsorte gelten Gebäude, Gebäudeteile oder Grundstücke, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, insbesondere Wohnungen, Krankenhäuser, Schulen, Kindergärten, Kinderhorte, Spielplätze oder ähnliche Einrichtungen.

Die Umsetzung des Minimierungsgebotes erfolgt in drei Teilschritten: einer Vorprüfung nach Nr. 3.2.1, einer Ermittlung der Minimierungsmaßnahmen nach Nr. 3.2.2 und einer Maßnahmenbewertung nach Nr. 3.2.3 der 26. BImSchVVwV.

Die Prüfung möglicher Minimierungsmaßnahmen erfolgt dabei individuell für die geplante Anlage im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens. Das Minimierungsgebot verlangt jedoch keine Prüfung nach dem im Energiewirtschaftsrecht verankerten sogenannten NOVA-Prinzip und keine Alternativenprüfung (z. B. Erdkabel statt Freileitung), alternative Trassenführung oder Standortalternativen, die nach den sonstigen Rechtsvorschriften, insbesondere nach dem Planfeststellungsrecht, erforderlich sein können. Es sind Minimierungsmaßnahmen dann zu prüfen, wenn sich mindestens ein maßgeblicher Minimierungsort im Einwirkungsbereich der jeweiligen Anlage befindet. Liegen mehrere maßgebliche Minimierungsorte innerhalb des Einwirkungsbereiches, werden bei der Minimierung alle maßgeblichen Minimierungsorte gleichrangig betrachtet.

In Abhängigkeit der geplanten Anlagen kann die Anwendung mehrerer Minimierungsmaßnahmen in Betracht kommen. Soweit deren gemeinsame Anwendung ausscheidet, ist eine Auswahl anhand der in der 26. BImSchVVwV enthaltenen inhaltlichen Maßgaben zu treffen. Wirken sich eine oder mehrere Minimierungsmaßnahmen unterschiedlich auf das elektrische und das magnetische Feld aus, ist bei der Auswahl für Gleichstromanlagen die Minimierung des elektrischen Feldes zu bevorzugen. Da bei Erdkabeln allerdings das elektrische Feld durch den Kabelmantel ohnehin vollständig abgeschirmt wird, wird in diesem Fall für die Minimierung nur das magnetische Feld berücksichtigt. Eine Maßnahme kommt als Minimierungsmaßnahme nicht in Betracht, wenn sie zu einer Erhöhung der Immissionen an einem maßgeblichen Minimierungsort führen würde.

Bei der Auswahl der Minimierungsmaßnahmen ist auch der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit zu wahren, indem Aufwand und Nutzen der möglichen Maßnahmen betrachtet werden. Zudem sind mögliche nachteilige Auswirkungen auf andere Schutzgüter zu berücksichtigen.

3 Anlagenbeschreibung

Grundlage für die Ermittlung und Bewertung der elektrischen und magnetischen Felder an den Immissions- und Minimierungsorten ist der Verlauf der Trasse sowie die technischen und elektrischen Konfigurationen der Höchstspannungsleitungen. Eine detaillierte Trassenbeschreibung findet sich in „Teil A1 – Erläuterungsbericht“. In „Teil C3.2 – Kombinierte Lage- und Rechtserwerbspläne Erdkabelanlage“ ist der Trassenverlauf des Vorhabens kartografisch dargestellt (M 1 : 2.000).

Das Projekt Rhein-Main-Link ist in mehrere Planfeststellungsabschnitte unterteilt. Im verfahrensgegenständlichen Abschnitt NI3 soll eine Erdkabelanlage mit vier DC-Systemen errichtet und betrieben werden.

Der Abschnitt NI3 enthält keine Konverter, weshalb diese Anlagen nachfolgend nicht weiter betrachtet werden. Es sind zwei KKÜS vorhanden.

Um eine vollumfängliche immissionsschutzrechtliche Bewertung des Planfeststellungsabschnitts zu erreichen, wird zunächst eine Aufteilung des Planfeststellungsabschnitts vorgenommen, um Bereiche, die hinsichtlich der Immissionen gleichartig sind, zu identifizieren.

Der Planfeststellungsabschnitt NI3 unterschiedet keine technischen Abschnitte (TA), da die Anzahl parallel verlaufender Kabelsysteme sowie die anderen übergeordneten technischen Parameter innerhalb dieses Planfeststellungsabschnittes gleich sind. Trotzdem erfolgt eine Aufteilung des Planfeststellungsabschnittes in technische Unterabschnitte. Basis für diese Aufteilung sind die unterschiedlichen genutzten Bauweisen und die damit einhergehenden unterschiedlichen geometrischen Anordnungen der Kabeladern, die zu relevanten Unterschieden bei den zu bewertenden magnetischen Feldern führen. Technische Abschnitte oder Unterabschnitte können räumlich unterbrochen vorliegen.

Im Planfeststellungsabschnitt NI3 wird neben der offenen Bauweise auch die geschlossene Bauweise in einer Ebene und im Dreieck angewendet, wodurch sich drei zu betrachtende Unterabschnitte ergeben. Für diese differenziert zu betrachtende Unterabschnitte werden die Immissionen separat bewertet (siehe Kapitel 5.2.1).

Die Beschreibung der Trassenverläufe der neu zu errichtenden Erdkabelanlage erfolgt von Nord nach Süd in Richtung aufsteigender Stationierung. Dementsprechend erfolgt die Nummerierung der maßgeblichen Immissionsorte und der maßgeblichen Minimierungsorte ebenfalls in Richtung aufsteigender Stationierung.

3.1 Technische Parameter

Die maßgeblichen technischen Parameter hinsichtlich der Immissionen elektrischer und magnetischer Felder sind Spannung (V) und Stromstärke (A). Die im Zuge der Vorgaben des Immissionsschutzes zu betrachtende höchste betriebliche Anlagenauslastung wird nach den LAI-Hinweisen [11] mittels einer technischen Grenze definiert.

Die Übertragungsleistung von Höchstspannungserdkabeln hängt, unabhängig davon, ob es sich um AC- oder DC-Erdkabel handelt, von verschiedenen Faktoren ab, die bei der Dimensionierung der Erdkabel zu beachten sind. Diese sind z. B. die zugehörigen Lastfaktoren, der Leiteraufbau, die Verlegetiefe, die Anordnung der Erdkabel (im Dreieck oder nebeneinander), der Abstand der Erdkabel untereinander, der Abstand zu den parallel geführten Systemen, die Anzahl der parallel geführten Systeme, die Wärmeleitfähigkeit der Isolierung und des Erdreiches sowie die Temperatur im umgebenden Erdreich. In Abbildung 2 ist der Aufbau eines typischen DC-Kabels beispielhaft dargestellt. Details zu den verwendeten Kabeln können „Teil A1 – Erläuterungsbericht“ entnommen werden.



Abbildung 2: Querschnitt eines VPE-Kabels

Geplante DC-Erdkabel

Nachfolgend werden die technischen Parameter des Neubaus der ±525-kV-Gleichstromleitungen Vorhaben Nr. 82 (Bl. 7013), Vorhaben Nr. 82a (Bl. 7014), Vorhaben Nr. 82b (Bl. 7016) und Vorhaben Nr. 82c (Bl. 7015) erläutert.

Die elektrische Feldstärke wird durch die anliegende Spannung hervorgerufen. Zur Ermittlung der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung ist daher die höchste zulässige Spannung heranzuziehen. Bei den hier betrachteten Gleichstromleitungen beträgt die Nennspannung ±525 kV mit einer maximalen Betriebsspannung von ±550 kV. Sie ist für die elektrische Feldstärke die zu Grunde zu legende höchste betriebliche Anlagenauslastung. Die Spannung liegt dabei am Innenleiter an, während der Schirm (vgl. Abbildung 2) der Bereitstellung eines definierten Erdpotenzial dient.

Vor dem Hintergrund der im Kapitel 3.1 beschriebenen Faktoren zur Übertragungsleistung beträgt die Stromtragfähigkeit der geplanten ±525-kV-DC-Erdkabel jeweils 2050 A. Der Strom fließt durch den Innenleiter (vgl. Abbildung 2), während der Schirm des Kabels höchstens vernachlässigbar geringe (Fehler-)Ströme führt.

Je System werden voraussichtlich Kabel vom Typ HVDC 525 kV P-LASER 3000Cu HDPE für die beiden Pole und ein Kabel vom Typ 3000Cu DMR-XLPE 66 kV für den DMR oder vergleichbare Kabeltypen zum Einsatz kommen.

Die Verlegung der Erdkabelanlagen erfolgt im Regelfall nach der in Abbildung 3 dargestellten Systemanordnung. Die verschiedenen Kabelsysteme bzw. Vorhaben haben zueinander einen Abstand ΔS_S. Dieser kann sich vom Abstand zwischen den Kabeladern desselben Systems ΔS_C unterscheiden. Die Verlegetiefe h gibt den Abstand zwischen Kabelmittelpunkt und Erdoberfläche an, wobei die Mindestüberdeckung den Abstand zwischen der oberen Kante des Schutzrohres zur Erdoberfläche angibt und somit etwas geringer ist.

Bei einzelnen geschlossenen Querungen können statt in der dargestellten geometrischen Anordnung in einer Ebene auch andere geometrische Anordnungen (beispielsweise Dreieck) gewählt werden, bei der sich die Verlegetiefe der einzelnen Kabel unterscheidet.

Die Erdkabel werden vorrangig innerhalb von Kabelschutzrohren verlegt. Die Mindestüberdeckung von Schutzrohroberkante bis zur Geländeoberkante beträgt im Regelgraben der offenen Bauweise ca. 1,40 m. Für die Verlegetiefe h ergibt sich damit unter konservativen Annahmen ein Wert von 1,5 m.

Weitere technische Angaben zu der geplanten Erdkabelanlage wie Details zur Verlegung der Kabelsysteme oder weiterer Anlagenteile, sofern vorhanden, finden sich in „Teil C – Trassierungstechnischer Teil.

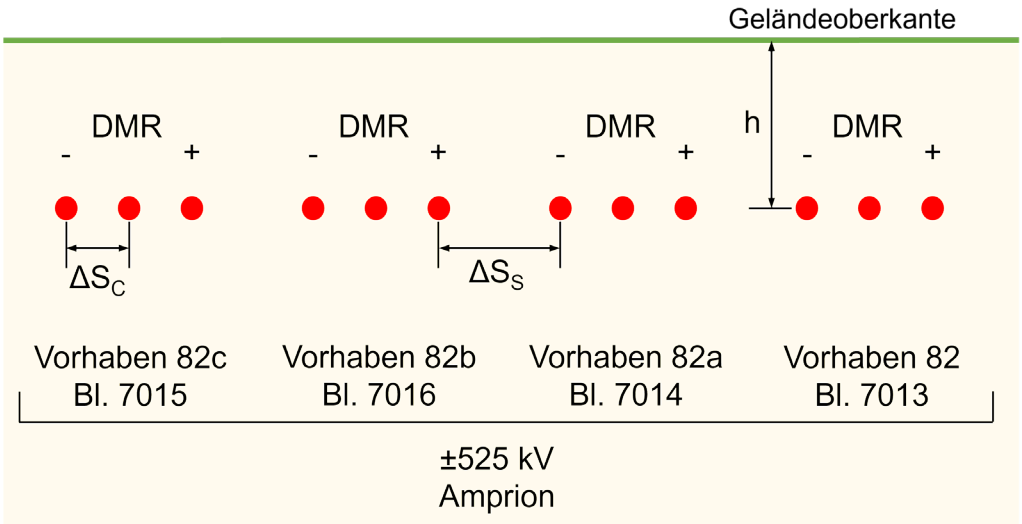


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Grabenprofils im Regelfall mit Blick in Richtung aufsteigender Stationierungslinien.

3.1.1 Zu berücksichtigende bestehende Anlagen

Über die Kabelsysteme des Rhein-Main-Link hinaus liegen im Planfeststellungsabschnitt NI3 keine weiteren zu berücksichtigenden bestehenden Höchstspannungsgleichstromanlagen vor.

3.2 Betriebsarten

Bei den HGÜ-Systemen des Rhein-Main-Link handelt es sich um Bipol-Systeme mit metallischem Rückleiter. Dies bedeutet, dass jeder Konverter auf der DC-Seite über folgende Anschlüsse verfügt: Pluspol, Minuspol, dedizierter metallischer Rückleiter (DMR).

Für den Betrieb der HGÜ-Systeme ist zu berücksichtigen, dass dieser auf fünf unterschiedliche Arten (Betriebsarten, Abkürzung „BA“) möglich ist, wobei der asymmetrische bipolare Betrieb (BA2) den Regelbetrieb darstellt:

- Symmetrischer bipolarer Betrieb (nachfolgend BA1)

  In dieser Betriebsart ist der Strom, der durch den Pluspol fließt, gleich dem Strom des Minuspols. Auf diese Weise liegt der Strom durch den DMR (auch dedizierte galvanische Rückleitung genannt) nahe bei „Null“.

- Asymmetrischer bipolarer Betrieb (nachfolgend BA2)

  Der asymmetrische bipolare Betrieb beschreibt den Regelbetrieb. In dieser Betriebsart ist der Strom, der durch den Pluspol fließt, ein anderer als der Strom des Minuspols, was zu einem Strom ungleich "Null" durch den DMR führt.

- Monopolarer Betrieb mit dedizierter galvanischer Rückleitung (nachfolgend BA3)

  Wird ein Pol an beiden Konvertern vollständig außer Betrieb genommen (z. B. zu Wartungszwecken), kann der Betrieb des verbleibenden Pols trotzdem weiter aufrechterhalten werden (Monopolarer Betrieb). In dieser Betriebsart fließt der Strom des verbleibenden Pols (z. B. Pluspol) vollständig über den DMR zurück.

- STATCOM-Betrieb (nachfolgend BA8)

  In dieser Betriebsart wird keine Leistungsübertragung genutzt. Somit tritt kein Stromfluss in den Polkabeln auf.

- Starrer bipolarer Betrieb (nachfolgend BA9)

  In dieser Betriebsart ist der DMR physikalisch getrennt. Somit ist der Strom, der durch den Pluspol fließt, gleich dem Strom des Minuspols.

Da alle vier Systeme aus zwei Polen (sowie einem DMR) aufgebaut sind, ist grundsätzlich der bipolare Betrieb vorgesehen. Typischerweise ergibt sich im Betrieb eine gewisse Asymmetrie der Ströme, weshalb der asymmetrische bipolaren Betrieb (BA2) den Regelbetrieb darstellt. Sind die Beträge der Ströme gleich groß, ergibt sich der symmetrische bipolare Betrieb (BA1). Darüber hinaus ist auch der sogenannte monopolare Betrieb (BA3) möglich. Die monopolare Betriebsart ist z. B. für den Fall von Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten von den Konvertern vorgesehen.

Diese Maßnahmen sind betrieblich notwendig und erfordern eine (Teil-)Abschaltung der Konverter. Da es sich um ein bipolares HGÜ-System mit DMR handelt, erfolgen die jährlichen Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten polweise, sodass eine vollständige Abschaltung des HGÜ-Systems nicht erforderlich ist. Während der Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten erfolgt der Weiterbetrieb der HGÜ-Systeme z. B. in BA3. Darüber hinaus sind der STATCOM-Betrieb (BA8) und der starre bipolare Betrieb (BA9) möglich. Die Betriebsarten BA1 und BA9 ermöglichen die höchste betriebliche Anlagenauslastung.

Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung der System- und Polanordnung mit Blick in Richtung aufsteigender Stationierungslinien. Die technischen Parameter der Systemanordnung sind in Tabelle 2 aufgeführt. Das emittierte magnetische Feld der Erdkabelanlage hängt von der Betriebsart ab. Die Auswirkungen der Nutzung der verschiedenen Betriebsarten auf das zu bewertende magnetische Feld werden in Kapitel 5.2.3 dargestellt und bewertet.

Tabelle 2: Technische Parameter bei der Verlegung im Regelgrabenprofil. Abstände werden dabei jeweils von der Erdkabelachse angegeben.

Technische Parameter	**System**	**Wert**
Maximal zulässige Betriebsspannung U	Bl. 7013, Bl. 7014, Bl. 7016, Bl. 7015	±550 kV
Maximaler betrieblicher Dauerstrom I_d	Bl. 7013, Bl. 7014, Bl. 7016, Bl. 7015	2050 A
Frequenz f	Bl. 7013, Bl. 7014, Bl. 7016, Bl. 7015	0 Hz
Tiefe des Erdkabelsystems h	Bl. 7013, Bl. 7014, Bl. 7016, Bl. 7015	ca. 1,50 m
Abstand ΔS_C zwischen Kabeladern eines Systems	Bl. 7013, Bl. 7014, Bl. 7016, Bl. 7015	0,75 m
Abstand ΔS_S zwischen benachbarten Kabelsystemen	Bl. 7013, Bl. 7014, Bl. 7016, Bl. 7015	5,00 m

Bei der Betriebsart BA1 ist der in Kapitel 2.1.2 beschriebene Effekt der gegenseitigen Feldkompensation oberhalb der Erdoberfläche minimal, was dort zu entsprechend hohen magnetischen Feldstärken führt. Daher wird diese Betriebsart als Basis für die nachfolgenden immissionsschutzrechtlichen Betrachtungen zu Grunde gelegt. Die Auswirkungen der anderen Betriebsarten auf die Immissionen werden in Kapitel 5.2.3 genauer dargestellt.

4 Ermittlung

Gemäß § 5 der 26. BImSchV [5] sind für die Ermittlung der elektrischen Feldstärken und magnetischen Flussdichten keine Messungen erforderlich, wenn die Einhaltung der Grenzwerte durch Berechnungsverfahren festgestellt werden kann. Entsprechend wurden an den maßgeblichen Immissionsorten Berechnungen nach folgender Methodik durchgeführt.

4.1 Methodik

Statische elektrische und magnetische Felder lassen sich mit den Gleichungen der klassischen Elektrodynamik sicher berechnen [7, 12, 13]. Anwendung finden diese Gleichungen in der Software *WinField* (auch als EFC-400 bezeichnet) der FGEU mbH [14]. Zur Berechnung der elektrischen Feldstärke ist die Methode der Spiegelladung implementiert [7, 12, 13, 14], für die Berechnung der magnetischen Flussdichte wird das Ampère'sche Gesetz ausgewertet [7, 14]. Die verwendeten Methoden entsprechen damit den in der DIN EN 50413 spezifizierten Anforderungen [15].

Der geplante Neubau der ±525kV-Höchstspannungsgleichstromleitung wird mit den Parametern nach Kapitel 3.1 digital modelliert. Aus dem digitalen Modell der Antragstrasse kann mittels *WinField* für beliebige Koordinaten die magnetische Flussdichte berechnet werden. Dabei finden Gebäude, Gestein und Bewuchs keine Berücksichtigung, da das magnetische Feld dadurch höchstens vernachlässigbar verzerrt wird.

Nach der 26. BImSchV sind die elektrischen und magnetischen Felder bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung zu bestimmen (siehe. Kapitel 2.2.1). Für die Bestimmung der Immissionen durch die Gleichstromleitung werden die in Kapitel 3.1 aufgeführten Stromstärken und die in Kapitel 3.2 ermittelte Verteilung der Ströme im Kabelgraben zugrunde gelegt.

Ebenso werden, sofern vorhanden, sämtliche in der Nähe liegende Gleichstromanlagen bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung mitbetrachtet.

Die Bewertung der Immissionen erfolgt in einer Höhe von 0,2 m über Erdbodenoberkante (vgl. LAI-Hinweise III.2.4). Für die Immissionsbetrachtungen wird die Betriebsart BA1 angewendet (näheres ist in Kapitel 3.2 beschrieben). Eine Einordnung des Einflusses der Betriebsarten und eine Bestimmung des theoretisch möglichen maximalen Feldwertes für alle Betriebsarten findet in Kapitel 5.2.3 statt.

4.2 Maßgebliche Immissionsorte

Gemäß 26. BImSchV sind die elektrischen und magnetischen Felder von Hochspannungsgleichstromleitungen in ihrem Einwirkungsbereich im Sinne der LAI-Hinweise [11] an Orten, die zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, zu ermitteln. Eine Definition des Einwirkungsbereichs und welche Orte zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen zählen, enthalten die LAI-Hinweise [11].

Nach Nummer II.3a.2 der LAI-Hinweise gilt als Einwirkungsbereich einer Gleichstromanlage der Bereich von 1 m um das Erdkabel. Orte, die dem dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen dienen und im Einwirkungsbereich der Anlage liegen, gelten als maßgebliche Immissionsorte. Der vorübergehende Aufenthalt setzt dabei nur „eine gewisse Verweildauer“ einer einzelnen Person voraus. So zählen zu diesen Orten des vorübergehenden Aufenthalts nach Nummer II.3.2 der LAI-Hinweise außerdem auch beispielsweise Gänge, Flure, Treppenräume, Toiletten, Vorratsräume sowie Abstellräume, Heiz-, Kessel- oder Maschinenräume, Räume, die nur zur Lagerung von Waren oder Aufbewahrung von Gegenständen dienen, und Garagen. Auch Orte, an denen sich zwar ständig Menschen aufhalten, die Verweildauer des einzelnen aber in der Regel gering ist, wie beispielsweise Bahnsteige und Bushaltestellen, dienen dem vorübergehenden Aufenthalt.

Nach Systematik der 26. BImSchVVwV (Nummer 2.6.) werden, falls vorhanden, Kabel-Kabel-Übergabestationen, Tunnel- und weitere Nebenbauwerke als Teil der Erdkabelanlage betrachtet. Für diese gilt nach LAI-Hinweisen ein Einwirkungsbereich von 1 m um das Erdkabel.

Zur vorliegenden Leitungsplanung ist festzuhalten, dass bei der Trassierung der Leitungsführung die Meidung von Siedlungsflächen als ein wichtiges Kriterium im Rahmen der raumplanerischen Vorgaben berücksichtigt wurde.

Da die Überdeckung der Erdkabel durchgehend mehr als ca. 1,5 m (ca. 1,4 m bis Schutzrohroberkante) beträgt und somit immer größer ist als der in den LAI-Hinweisen [11] angegebene Einwirkungsbereich, befinden sich keine Orte zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen im Einwirkungsbereich der Erdkabel. Somit sind keine maßgeblichen Immissionsorte vorhanden.

Die oberirdischen Anlagenteile der KKÜS liegen in einem eingezäunten Bereich, in dem der Zutritt für unbefugte Personen ausgeschlossen ist. Der Abstand zum Anlagenzaun beträgt mehr als 1 m, sodass im Bereich der KKÜS keine maßgeblichen Immissionsorte vorhanden sind.

4.3 Maßgebliche Minimierungsorte

Nach 26. BImSchVVwV sieht die Umsetzung des Minimierungsgebots zunächst eine Vorprüfung vor (siehe Kapitel 2.2.2). Sie dient der Feststellung, ob überhaupt Minimierungsmaßnahmen durchzuführen sind. Dies ist gemäß Nummer 3.2.1 der 26. BImSchVVwV der Fall, wenn es sich um einen Neubau oder eine wesentliche Änderung handelt und sich mindestens ein maßgeblicher Minimierungsort im Einwirkungsbereich der Gleichstrom- oder Niederfrequenzanlage befindet.

Bei dem Projekt Rhein-Main-Link handelt es sich um einen Neubau im Sinne der 26. BImSchVVwV. Dementsprechend ist zu prüfen, ob maßgebliche Minimierungsorte vorliegen.

Als maßgebliche Minimierungsorte gelten Gebäude, Gebäudeteile oder Grundstücke, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, insbesondere Wohnungen, Krankenhäuser, Schulen, Kindergärten, Kinderhorte, Spielplätze oder ähnlichen Einrichtungen.

Befindet sich auf einem Grundstück ein Gebäude, das dem nicht nur vorübergehenden Aufenthalt dient, so wird die Minimierung vorrangig für diesen Ort durchgeführt.

Der Einwirkungsbereich einer Anlage im Sinne der Betrachtung für die Minimierungsvorschrift unterscheidet sich vom Einwirkungsbereich für die Betrachtung von Immissionsorten nach LAI (vgl. Kapitel 4.2). Für die Minimierungsvorschrift ist der Einwirkungsbereich der Bereich, in dem die Anlage signifikant von den natürlichen und mittleren anthropogen bedingten Immissionen abhebende elektrische oder magnetische Felder verursacht, unabhängig davon, ob die Immissionen tatsächlich schädliche Umwelteinwirkungen auslösen. Die 26. BImSchVVwV trifft hierzu in Nummer 3.2.1.2 Festlegungen über konservative Pauschalwerte für verschiedene Anlagentypen. Der Einwirkungsbereich gem. der 26. BImSchVVwV von DC-Erdkabeln mit einer Nennspannung >500 kV entspricht dem Bereich von je 20 m von der Bodenprojektion der äußersten Kabel der Anlage. Der gesamte Planfeststellungsabschnitt NI3 wurde auf maßgebliche Minimierungsorte überprüft. Dabei wurden aus dem amtlichen Kataster (ALKIS) Gebäude und Flächen, die für den nicht nur vorübergehenden Aufenthalt vorgesehen sind, ermittelt, sowie Luftbilder ausgewertet. Damit wird die tatsächliche Nutzung in die Bewertung einbezogen.

Die im Planfeststellungsabschnitt NI3 identifizierten maßgeblichen Minimierungsorte sind in Tabelle 3 aufgeführt und in „Teil E1.3.2 – Lagepläne EMF“ kartografisch dargestellt. In Unterlage E1.3.2 ist der Einwirkungsbereich gemäß 26. BImSchVVwV hellblau gekennzeichnet. Der Nachweis einer Minimierung kann dabei am Bewertungsabstand erfolgen. Dieser Bewertungsabstand ist in Unterlage E1.3.2 dunkelblau gekennzeichnet.

Tabelle 3: Maßgebliche Minimierungsorte im Bereich der ±525-kV-Höchstspannungsgleichstromerdkabel des Planfeststellungsabschnittes NI3

Lfd. Nr.	Minimierungsort	Nutzungsart	Stationierung
1	Apelern, Flur 6, FlSt. 3/6	Wohnbaufläche	S-P1-167_0+700 bis S-P1-167_0+750
2	Bad Münder, Flur 16, FlSt. 68/10	Wohnbaufläche	S-P1-181_0+850 bis S-P1-181_0+950

Ebenso wurde der Bereich der Kabel-Kabelübergabestationen Vahlbruch 1 und Vahlbruch 2 auf maßgebliche Minimierungsorte überprüft. Kabelübergabestationen werden gem. Ziffer 2.6 der 26. BImSchVVwV als Teil der Erdkabelanlage angesehen. Im 20 m breiten Streifen um die Gleichstromkabel befinden sich keine Orte zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen, sodass in diesem Bereich keine maßgeblichen Minimierungsorte liegen.

Für die nachfolgenden Betrachtungen zur Minimierung (Kapitel 5.3) wird im Sinne einer vollumfänglichen Bewertung angenommen, dass für alle Unterabschnitte bzw. Bauweisen (vgl. Kapitel 3) ein maßgeblicher Minimierungsort vorliegt. Die Minimierungsdiskussion ist in Kapitel 5.3 zu finden.

5 Ergebnisse

Die Bewertung erfolgt entsprechend der immissionsschutzrechtlichen Vorgaben für das magnetische Feld. Zunächst werden die Ergebnisse im Hinblick auf den einzuhaltenden Grenzwert unter Berücksichtigung von Immissionsbeiträgen anderer Anlagen dargelegt. Es folgen Aussagen zur Beachtung des Gebots zur Vermeidung erheblicher Belästigungen oder Schäden. Danach wird die Bewertung im Hinblick auf die Beachtung des Minimierungsgebots dargelegt.

5.1 Anforderungen zum Schutz

Im Einwirkungsbereich der geplanten DC-Erdkabel des Rhein-Main-Link im Planfeststellungsabschnitt NI3 liegen keine maßgeblichen Immissionsorte gem. den LAI-Hinweisen [11].

Damit erfüllen die geplanten Gleichstromanlagen die Anforderungen gem. § 3a der 26. BImSchV.

5.2 Immissionsbetrachtungen

5.2.1 DC-Erdkabel

Da, wie unter 4.2 ausgeführt, im Bereich der DC-Erdkabel des Rhein-Main-Link alle Orte, die zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, außerhalb der definierten Abstände gem. den LAI-Hinweisen liegen, wurden entsprechend keine maßgeblichen Immissionsorte im Bereich der Antragstrasse festgestellt, sodass keine Berechnungen zum Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte gem. § 3a der 26. BImSchV gefordert sind. Dennoch wurden für jeden technischen Abschnitt (TA) und jeden zugehörigen Unterabschnitt (jede im TA geplante Verlegegeometrie) Berechnungen der magnetischen Flussdichte durchgeführt, deren Ergebnisse (siehe Tabelle 4) in „Teil F1 – Fachbeitrag Umwelt“ eingeflossen sind. Diese sog. Immissionsbetrachtungen erfolgten an repräsentativen Orten direkt oberhalb der DC-Erdkabeltrasse, die am ehesten dem dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen dienen (siehe Teil E1.1). Diese Orte werden im Folgenden „Betrachtungsorte“ genannt. Dadurch wird eine Abschätzung der auftretenden Felder in den technischen Unterabschnitten ermöglicht.

Bei der Berechnung werden vereinfachende Annahmen getroffen, die zu einer konservativen Bewertung der Immissionen führen. So wird durchgehend eine Überdeckung der DC-Erdkabel von 1,5 m angenommen. Insbesondere in Bereichen der geschlossenen Bauweise ist die Überdeckung jedoch üblicherweise deutlich größer als die auf diese Weise angenommene Mindestüberdeckung. Außerdem wurde die Betriebsart BA1 (vgl. Kapitel 3.2) der Berechnung zugrunde gelegt, welche den Fall der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung darstellt, auch wenn diese nicht den Regelbetrieb darstellt.

Mit zunehmendem Abstand zur Trasse nehmen die Werte der magnetischen Flussdichte stark ab.

Über den gesamten Verlauf der DC-Erdkabel des Abschnitts NI3 beträgt die maximale prognostizierte magnetische Flussdichte für die Gleichstromanlagen 242 µT (vgl. Kapitel 5.2.3). Dies entspricht einer Grenzwertausschöpfung von 48,4 %, sodass der Grenzwert unter Berücksichtigung aller relevanter Gleichstromanlagen sicher eingehalten wird.

Tabelle 4: Feldimmissionen an den Betrachtungsorten der DC-Erdkabel in 0,2 m über Geländeoberkante (GOK). Das elektrische Feld wird durch Kabelschirm und Erdreich vollständig abgeschirmt und ist daher nicht zu betrachten.

Unter-abschnitt	Betrachtungsort (Stationierung)	Magnetisches Feld bei 0 Hz		Teil E1.1 Immissions-betrachtung Nr.
		Magnetische Flussdichte	Grenzwert-ausschöpfung	
Vier Systeme in Parallellage, offene Bauweise				
1.1	ca. SP219_0+350	163 µT	32,6 %	1
Vier Systeme in Parallellage, geschlossene Bauweisen: Anordnung in einer Ebene				
1.2	ca. SP156_0+700	242 µT	48,4 %	2
Vier Systeme in Parallellage, geschlossene Bauweise: Anordnung im Dreieck				
1.3	ca. SP181_0+900	168 µT	33,6 %	3

5.2.2 Vermeidung erheblicher Belästigungen oder Schäden

Bei der Frage nach erheblichen Belästigungen oder Schäden geht es um den Effekt der sogenannten Funkenentladung durch Aufladung von metallischen Gegenständen im elektrischen Feld unter einer Höchstspannungsfreileitung. Das elektrische Feld von DC-Erdkabeln wird durch Kabelschirm und Erdreich vollständig abgeschirmt. Daher sind erhebliche Belästigungen oder Schäden durch Funkenentladungen über DC-Erdkabelanlagen auszuschließen.

5.2.3 Einordnung des Einflusses der Betriebsarten auf die magnetischen Felder und Ermittlung des Maximalwertes der magnetischen Flussdichte

Der vorangehenden detaillierteren Betrachtung der magnetischen Flussdichte für die geplante Erdkabelanlage im Planfeststellungsabschnitt NI3 liegt die Betriebsart BA1 der Anlage zugrunde, da diese den Fall der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung ermöglicht. In Kapitel 3.2 sind darüberhinausgehend weitere mögliche Betriebsarten dargestellt. Im Folgenden wird nun der Einfluss der Betriebsarten auf das magnetische Feld eingeordnet, indem die magnetische Flussdichte ohne Kompensation zur sicheren Seite abgeschätzt wird. Daraus wird die theoretische maximale Flussdichte hergeleitet, die bei der geplanten Erdkabelanlage im Planfeststellungsabschnitt NI3 auftreten kann.

Das gesamthaft zu bewertende magnetische Feld ergibt sich aus der Überlagerung der jeweils durch die Ströme in den einzelnen Leitern (aller Systeme) hervorgerufenen Magnetfelder. Ausgehend von zunächst einem Einzelleiter ergibt sich bei einem weiteren Leiter mit gleicher Polarität (gleiche Richtung des Stromflusses) eine konstruktive Überlagerung der Magnetfelder, während ein Leiter mit entgegengesetzter Polarität ein kompensierendes magnetisches Feld

erzeugt. Die Stärke dieser Einflüsse auf das insgesamt vorhandene magnetische Feld hängt von der Entfernung zwischen den Einzeladern ab.

In jedem der vier Systeme gilt, dass die Summe aller Ströme Null sein muss. D.h., dass je System genauso viel Strom von Nord nach Süd wie von Süd nach Nord fließt. Beispielhaft sind im symmetrischen bipolaren Betrieb (BA1) die Beträge der Ströme in Plus- und Minuspol gleich groß. Bei anderen Betriebsarten ist zusätzlich noch der Stromfluss im DMR zu beachten, der den asymmetrischen Stromfluss in Plus-/Minuspol ausgleicht.

Die Verlegetiefe der Teilleiter beträgt für alle Bauweisen im mindestens 1,5 m. System- und Polanordnung sind über den gesamten Querschnitt gleichartig angeordnet mit abwechselnder Polanordnung (siehe Abbildung 3). Eine systemübergreifende direkte Parallellage gleicher Pole, was zu einer konstruktiven Überlagerung der magnetischen Felder führen würde, ist daher für alle Betriebsarten ausgeschlossen.

In den Betriebsarten BA1 und BA9 (siehe Kapitel 3.2) fließen in Plus- bzw. Minuspol gleichgroße Ströme. Daher addiert sich der Strom im DMR zu null. Somit ist die Entfernung zwischen den Polen besonders groß und folglich die Kompensation des magnetischen Felds gering. In BA2 und BA3 fließen in Plus- bzw. Minuspol verschiedengroße Ströme. Daher ergibt sich im DMR ein von Null verschiedener Strom; in BA3 fließt im DMR der gesamte Rückstrom, während in einem Pol kein Strom fließt. Somit ergibt sich in BA3 der geringste Abstand der feldverursachenden Ströme und damit die günstigste Feldüberlagerung. In BA2 ergibt sich eine Kompensation zwischen BA1/ BA9 und BA3. In BA8 wird kein Strom übertragen – somit gehen in BA8 keine magnetischen Felder von der Erdkabelanlage aus. Für die höchste betriebliche Anlagenauslastung unter ungünstigsten Betriebsbedingungen sind daher die symmetrischen Betriebsarten BA1 bzw. BA9 zu betrachten.

Eine maximal konservative, theoretische Betrachtung ergibt sich bei vollständiger Vernachlässigung kompensierender Effekte. Dazu wird das zu bewertende magnetische Feld betrachtet, dass von einem einzelnen Pol mit maximalem Stromfluss hervorgerufen wird. Auf dieser Grundlage kann eine maximale magnetische Flussdichte von 242 µT bestimmt werden. Dies entspricht einer maximalen Grenzwertauslastung von 48,4 %. Damit werden die Anforderungen aus § 3a der 26. BImSchV, unabhängig von der Betriebsart auch in diesem theoretischen Maximalfall sicher eingehalten. Nach gleicher Systematik gilt diese Aussage auch unabhängig von den Abständen der Kabeladern und der Systeme. Auch für andere Kabelanordnungen, wie beispielsweise eine Dreiecksanordnung der Kabel wie sie vereinzelt bei geschlossenen Querungen vorkommen kann, behält die Schlussfolgerung ihre Gültigkeit.

5.3 Anforderungen zur Vorsorge

Die Anforderungen zur Vorsorge an Niederfrequenz- oder Gleichstromanlagen ergeben sich aus dem in § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV beschriebenen Minimierungsgebot.

5.3.1 Minimierungsgebot

Zur Vorsorge sind gem. § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV elektrische und magnetische Felder nach dem Stand der Technik unter Berücksichtigung von Gegebenheiten im Einwirkungsbereich und der Verhältnismäßigkeit zu reduzieren.

5.3.2 Minimierungsmaßnahmen

Bei Gleichstrom-Erdkabelanlagen hat die Prüfung des Minimierungspotentials innerhalb des Einwirkungsbereichs auf Basis der in Nr. 5.1.2 der 26. BImSchVVwV aufgeführten technischen Möglichkeiten zu erfolgen und gliedert sich in folgende Maßnahmen:

- Minimieren der Kabelabstände (Nr. 5.1.2.1), durch Verringerung der Abstände der einzelnen Kabel eines Systems
- Optimieren der Polanordnung (Nr. 5.1.2.2), durch Veränderung der Polfolge der einzelnen Kabel
- Optimieren der Verlegetiefe (Nr. 5.1.2.3), durch Erhöhung der Grabentiefe der Erdkabelanlage

5.3.3 Maßnahmenbewertung

Bei der Maßnahmenbewertung ist gem. Nr. 3.1 der 26. BImSchVVwV insbesondere die Verhältnismäßigkeit der technischen Möglichkeiten zur Minimierung zu bewerten. Dabei einbezogen wird zum Beispiel die Wirksamkeit der Maßnahmen, die Auswirkung auf die Gesamtimmission an den maßgeblichen Minimierungsorten, die zu erreichende Immissionsreduzierung an den maßgeblichen Minimierungsorten, die Investitions- und Betriebskosten der Maßnahmen sowie die Auswirkungen auf die Wartung und Verfügbarkeit der Anlagen. Zudem sind die Auswirkungen auf andere Schutzgüter zu berücksichtigen. Eine Maßnahme wird generell so weit angewendet, wie sie mit vertretbarem wirtschaftlichem Aufwand und Nutzen umgesetzt werden kann.

Die Anwendung der Optimierungsmaßnahmen aus Kapitel 5.3.2 kann jedoch nicht unabhängig voneinander erfolgen. Eine Änderung der Verlegetiefe hat beispielsweise gleichzeitig Auswirkungen auf die inneren Polabstände. Auch die Wirksamkeit der Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Reduktion von magnetischen Feldern ist unterschiedlich. Zudem kann eine Maßnahme zwar technisch umsetzbar sein, aber nachteilige Wirkungen auf andere Schutzgüter haben. All diese Abhängigkeiten sind bei der Festlegung von Optimierungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Bei der Planung der Polanordnung ist dem betrieblichen Belang einer zügigen und sicheren Entstörung der Kabelanlage sehr hohe Priorität einzuräumen. Dies wird durch die Polanordnung Minus – DMR – Plus (vgl. Abbildung 3) erreicht. Eine Optimierung der Polanordnung mit einer benachbarten Anordnung der Pole Plus und Minus würde zu deutlich erhöhten betrieblichen Einschränkungen und – aufgrund der Nähe – zu einer verstärkten gegenseitigen Erwärmung führen. Zur systemübergreifenden Optimierung wird die Polanordnung in den benachbarten Systemen alternierend fortgesetzt. Da sich auf diese Weise bei

benachbarten Systemen jeweils Pole mit entgegengesetzter Polarität direkt nebeneinander befinden, ergibt sich systemübergreifend die bestmögliche Kompensation.

Um einen sicheren Betrieb der Kabelanlage zu gewährleisten, ist eine ausreichende Wärmeabfuhr an das umgebende Erdreich sicherzustellen. Mit zunehmender Überdeckung nimmt die Wärmeabfuhr ab und die gegenseitige Erwärmung der Pole zu. Bei einer größeren Überdeckung sind daher größere Abstände zwischen den einzelnen Kabeln notwendig.

Daher wurde zur Minimierung der magnetischen Flussdichte über dem Erdboden die betrieblich maximal vertretbare Überdeckung gewählt. In Abhängigkeit dieser Überdeckung wurde sodann der minimal mögliche Polabstand ermittelt und zur Reduktion der magnetischen Flussdichte über dem Erdboden festgelegt.

In Bereichen, in denen aus planerischen Gründen eine größere Verlegetiefe zu wählen ist, kompensiert die größere Verlegetiefe den ungünstigen Effekt der größeren Polabstände deutlich, sodass in diesen Bereichen eine weitere Optimierung der Polabstände nur von eingeschränktem Nutzen wäre.

Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge und verknüpften Auswirkungen wurde bereits bei der Planung immer diejenige Kombination von Kabelabständen, Polanordnung und Verlegetiefe gewählt, die unter den zu berücksichtigenden betrieblichen, privatrechtlichen und naturschutzfachlich Belangen eine wirksame Reduktion der magnetischen Flussdichte erreicht.

Eine individuelle Prüfung an maßgeblichen Minimierungsorten erfolgt nicht, da diese Zielvorgabe (für Orte direkt über den Erdkabeln) auch für alle anderen Orte im Einwirkungsbereich (und darüber hinaus) zu den geringstmöglichen magnetischen Feldern führt (streng monotone Abnahme der Immissionen außerhalb des Einwirkungsbereichs; siehe Kapitel 5.2.1).

6 Angaben zur Qualität

Alle diesem Immissionsschutzbericht zugrundeliegenden Berechnungen wurden sorgfältig und gewissenhaft durchgeführt. Der Berechnungsfehler der verwendeten Software *WinField* beträgt gemäß Herstellerzertifikat der FGEU mbH in Unterlage E1.2 maximal 1,4 %. Die verwendete Software ist konform zu DIN EN 50413.

7 Fazit

Die Amprion GmbH plant den Bau und Betrieb der ±525-kV-Höchstspannungsleitungen des Rhein-Main-Link in HGÜ-Technik im Abschnitt NI3. Die durch den Rhein-Main-Link hervorgerufenen Immissionen magnetischer Felder wurden in den vorherigen Kapiteln dieser Unterlage geprüft.

Die Bewertung erfolgte gemäß den immissionsschutzrechtlichen Vorgaben der 26. BImSchV und 26. BImSchVVwV. Wie in Kapitel 5.1 dargelegt, werden die Anforderungen an Gleichstromanlagen gem. § 3a der 26. BImSchV sicher eingehalten. Es liegen keine Orte zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen im Einwirkungsbereich der Anlage gemäß den LAI-Hinweisen [11].

Um die in den einzelnen Unterabschnitten auftretenden Werte der magnetischen Flussdichte einordnen zu können, wurden Betrachtungsorte gewählt. Der höchste Wert für die magnetische Flussdichte, der an einem Betrachtungsort ermittelt wurde, beträgt 242 µT ermittelt (siehe Kapitel 5.2.1). Dieser Wert liegt deutlich unterhalb des in der 26. BImSchV vorgegebenen Grenzwerts von 500 µT für die magnetische Flussdichte bei 0 Hz [5]. Das elektrische Feld wird durch den Kabelmantel und das Erdreich vollständig abgeschirmt und ist daher nicht zu betrachten. Die ermittelten Feldwerte gelten für die Betrachtungsorte im jeweiligen Einwirkungsbereich. Ausgehend von diesem Abstand nehmen die Felder streng monoton ab.

Aus Kapitel 5.3 lässt sich die Umsetzung des Minimierungsgebots entnehmen. Für die ±525-kV-DC-Erdkabel wurden bereits bei der Planung alle technischen Möglichkeiten gemäß 26. BImSchVVwV geprüft und immer diejenige Kombination von Kabelabständen, Polanordnung und Verlegetiefe gewählt, die im Sinne der Verhältnismäßigkeit unter vertretbarem wirtschaftlichem Aufwand und Nutzen sowie Auswirkungen auf Wartung und Verfügbarkeit der Anlagen zu den geringsten magnetischen Feldern oberhalb der Erdkabel führen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass alle immissionsschutzrechtlichen Vorgaben für elektrische und magnetische Felder eingehalten werden.

Amprion GmbH
Netzprojekte
Immissionsmanagement Leitungen

Jonathan Wulff
Digital unterschrieben von Jonathan Wulff
Datum: 2026.08.14 10:27:23 +02'00'

i.A. Jonathan Wulff
Fachlich verantwortlich

Oliver Sanders
Digital unterschrieben von Oliver Sanders
Datum: 2026.08.14 11:05:42 +02'00'

i.A. Oliver Sanders
Leitung Portfoliobearbeitung
Immissionsmanagement Leitungen

A Verzeichnisse

A.1 Literaturverzeichnis

[1] *Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz (NABEG),* das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 8. Mai 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 151) geändert worden ist, 2011.

[2] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, „Bestätigung des Netzentwicklungsplans Strom für die Zieljahre 2037/45," März 2024. [Online]. Available: https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2024-03/NEP_2037_2045_Bestaetigung.pdf. [Zugriff am 03 02 2026].

[3] *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG),* in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 1. Juni 2026 (BGBl. 2026 I Nr. 163) geändert worden ist.

[4] *4. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV),* in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Mai 2017 (BGBl. I S. 1440), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 12. Oktober 2022 (BGBl. I S. 1799) geändert worden ist, 2013.

[5] *26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV),* vom 14. August 2013 (BGBl. I S. 3266).

[6] Strahlenschutzkommission, „Anforderungen an Sachverständige für die Bestimmung der Exposition gegenüber elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern," Verabschiedet in der 188. Sitzung der Strahlenschutzkommission, 2004.

[7] J. D. Jackson, Klassische Elektrodynamik, 5 Hrsg., Berlin: Walter de Gruyter, 2002.

[8] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, „ICNIRP Guidlines on limits of exposure to static magnetic fields," *Health Physics,* Bd. 96, Nr. 4, pp. 504 - 514, 2009.

[9] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, „ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz - 100 kHz)," *Health Physics,* Bd. 99, Nr. 6, pp. 818-836, 2010.

[10] *Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV (26. BImSchVVwV),* vom 26. Februar 2016 (BAnz AT 03.03.2016 B5).

[11] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (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, 2014.

[12] D. Oeding und B. R. Oswald, Elektrische Kraftwerke und Netze, 7. Hrsg., Heidelberg: Springer, 2013.

[13] P. Bauhofer, Handbuch für Hochspannungsleitungen: niederfrequente elektromagnetische Felder und deren wirksame Reduktion, Wien: Verband d. Elektrizitätswerke Österreichs, 1994.

[14] Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie - FGEU mbH, Benutzerhandbuch WinField (R) - Magnetic and Electric Field Calculation, Berlin, 2019.

[15] Deutsche Institut für Normung e. V. (DIN), *DIN EN 50413 (VDE 0848-1): Grundnorm zu Mess- und Berechnungsverfahren der Exposition von Personen in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz); Deutsche Fassung EN 50413:2020,* Berlin: VDE Verlag GmbH.

[16] Electric Power Research Institute, EPRI Transmission Line Reference Book - 345 kV and above - Second Edition, 1982.

[17] Deutsche Institut für Normung e. V. (DIN), *DIN EN 50160: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen,* Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2020.

[18] *Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG),* vom 23. Juli 2013 (BGBl. I S. 2543; 2014 I S. 148, 271), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 16. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 239) geändert worden ist, 2013.

[19] *Energiewirtschaftsgesetz - EnWG,* das zuletzt durch Artikel 41 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 323) geändert worden ist, 2005.

A.2 Abbildungen

Abbildung 1: Schematische Darstellung des horizontalen Verlaufs des Betrags der magnetischen Flussdichte in 0,2 m Höhe oberhalb der Geländeoberkante 10
Abbildung 2: Querschnitt eines VPE-Kabels 14
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Grabenprofils im Regelfall mit Blick in Richtung aufsteigender Stationierungslinien. 15

A.3 Tabellen

Tabelle 1: Grenzwerte für 0-Hz-Anlagen 11
Tabelle 2: Technische Parameter bei der Verlegung im Regelgrabenprofil. Abstände werden dabei jeweils von der Erdkabelachse angegeben. 17
Tabelle 3: Maßgebliche Minimierungsorte im Bereich der ±525-kV-Höchstspannungsgleichstromerdkabel des Planfeststellungsabschnittes NI3 20
Tabelle 4: Feldimmissionen an den Betrachtungsorten der DC-Erdkabel in 0,2 m über Geländeoberkante (GOK). Das elektrische Feld wird durch Kabelschirm und Erdreich vollständig abgeschirmt und ist daher nicht zu betrachten. 22

A.4 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
Abs.	Absatz
A	Ampere
Anl.	(technische) Anlage
BE-Fläche	Baustelleneinrichtungsfläche
BGBl.	Bundesgesetzblatt
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Eine Verordnung zur Durchführung des BImSchG
bzw.	beziehungsweise
bzgl.	bezüglich
ca.	zirka
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EN	Europäische Norm
GW	Gigawatt
GOK	Geländeoberkante
HDD	Horizontal Directional Drilling
FNN	Forum Netztechnik / Netzbetrieb
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
i. S.	im Sinne
i. V. m.	in Verbindung mit

Abkürzung	Bedeutung
Lfd.	Laufend(e)
Nr. / Nrn.	Nummer / Nummern
Pkt.	Punkt
S.	Satz
TA	technischer Abschnitt
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel