

Erdkabel

im 380-kV-Drehstromnetz



Das Netzgebiet von TenneT

Das Netzgebiet von TenneT in Deutschland reicht von der Nordsee bis zu den Alpen, von der dänischen bis zur österreichischen Landesgrenze.

Die Energiewende stellt das Stromnetz vor neue Herausforderungen: Bislang konventionell erzeugte Energie und fossile Energieträger werden abgelöst durch eine erneuerbare Energieerzeugung, die z.T. kleinteilig vor Ort entsteht und nur volatil verfügbar ist. Im Stromnetz werden hohe Mengen an Windenergie über weite Strecken vom Norden Deutschlands in die Verbrauchszentren im Süden und Westen des Landes transportieren. Deshalb investiert TenneT mehr als je zuvor in die Ertüchtigung bestehender Stromleitungen und den Bau neuer Leitungen. Hierfür stehen grundsätzlich zwei Technologien zur Verfügung: Freileitungen und Erdkabel. Darüber hinaus muss zwischen Wechselstrom (AC – Alternating Current) und Gleichstrom (DC – Direct Current) unterschieden werden. Dies gilt insbesondere, wenn Erdkabel zum Einsatz kommen sollen.

Erdkabel stellen eine Alternative zur für Drehstromverbindungen festgelegten Regeltechnologie der Freileitungen dar, sofern dies vom Gesetzgeber vorgesehen und im Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG) oder Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG) festgeschrieben ist. Gleichstromverbindungen sollen laut BBPlG vorrangig als Erdkabel verlegt werden. Demgegenüber sieht der Gesetzgeber für Drehstromverbindungen in Einzelfällen die Prüfung einer abschnittswisen Teilerdverkabelung vor.

Gleich- oder Drehstrom (Wechselstrom)*

Gleichstromverbindungen werden eingesetzt, um elektrische Energie verlustarm über weite Strecken von Punkt zu Punkt zu übertragen. Insbesondere für den zunehmenden Nord-Süd-Transport bietet sich die Gleichstromtechnik an und wird so auch zu einer Entlastung des bestehenden Drehstromnetzes beitragen. Der Einsatz von Erdkabeln in der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) ist weltweit gut erprobt.

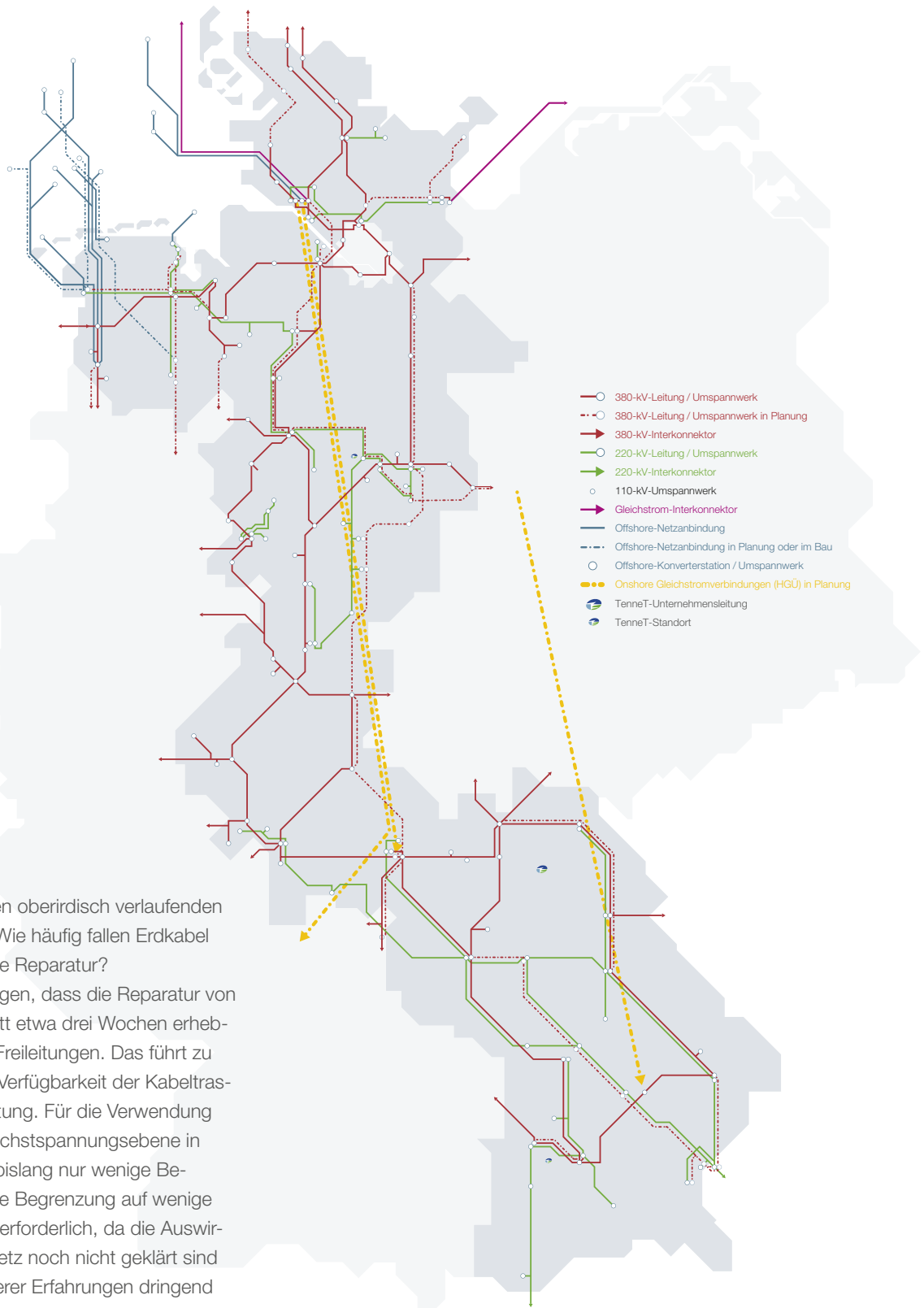
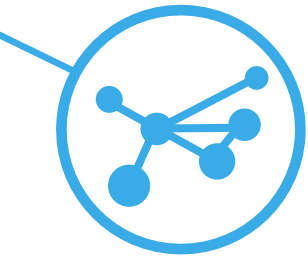
Ein Beispiel hierfür ist die rund 65 Kilometer lange HGÜ-Erdkabelverbindung zwischen Frankreich und Spanien mit einer Spannung von 320 Kilovolt (kV). In Deutschland werden Offshore-Windparks vorwiegend per HGÜ über See- und Erdkabel angebunden. TenneT hat zu diesem Zweck mehrere tausend Kilometer in der Nordsee installiert und auch an Land bereits mehr als 1.000 Kilometer HGÜ-Erdkabel in Schleswig-Holstein und Niedersachsen unterirdisch verlegt. Diese Erfahrungen werden auch in die Planungen und den Bau der großen Onshore-Verbindungen einfließen.

Verhalten im vermaschten Drehstromnetz

Anders als HGÜ-Punkt-zu-Punkt-Verbindungen ist das Drehstromnetz eng „vermascht“. Das heißt, jeder Netzknoten (Umspannwerk und/oder Schaltanlage) ist mit mehreren anderen Netzknoten verbunden. Die einzelnen Leitungen sind die Verbindungsstränge und über die Netzknoten somit auch mit mehreren anderen Leitungen verknüpft. Dieses eng vermaschte Netz mit den vielfachen Wechselwirkungen der einzelnen Netzkomponenten ist die Grundlage für die hohe Zuverlässigkeit unserer Stromversorgung.

Bislang gibt es nur wenige Erfahrungswerte, wie sich Erdkabelabschnitte in diesem Zusammenspiel verhalten, insbesondere was Störungen und ihre Behebung betrifft. Daher hat der Gesetzgeber 2009 im Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG) und Ende 2015 sowie 2021 im Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG) Pilotprojekte für Teilerdverkabelungen im 380-kV-Drehstrombereich festgelegt.

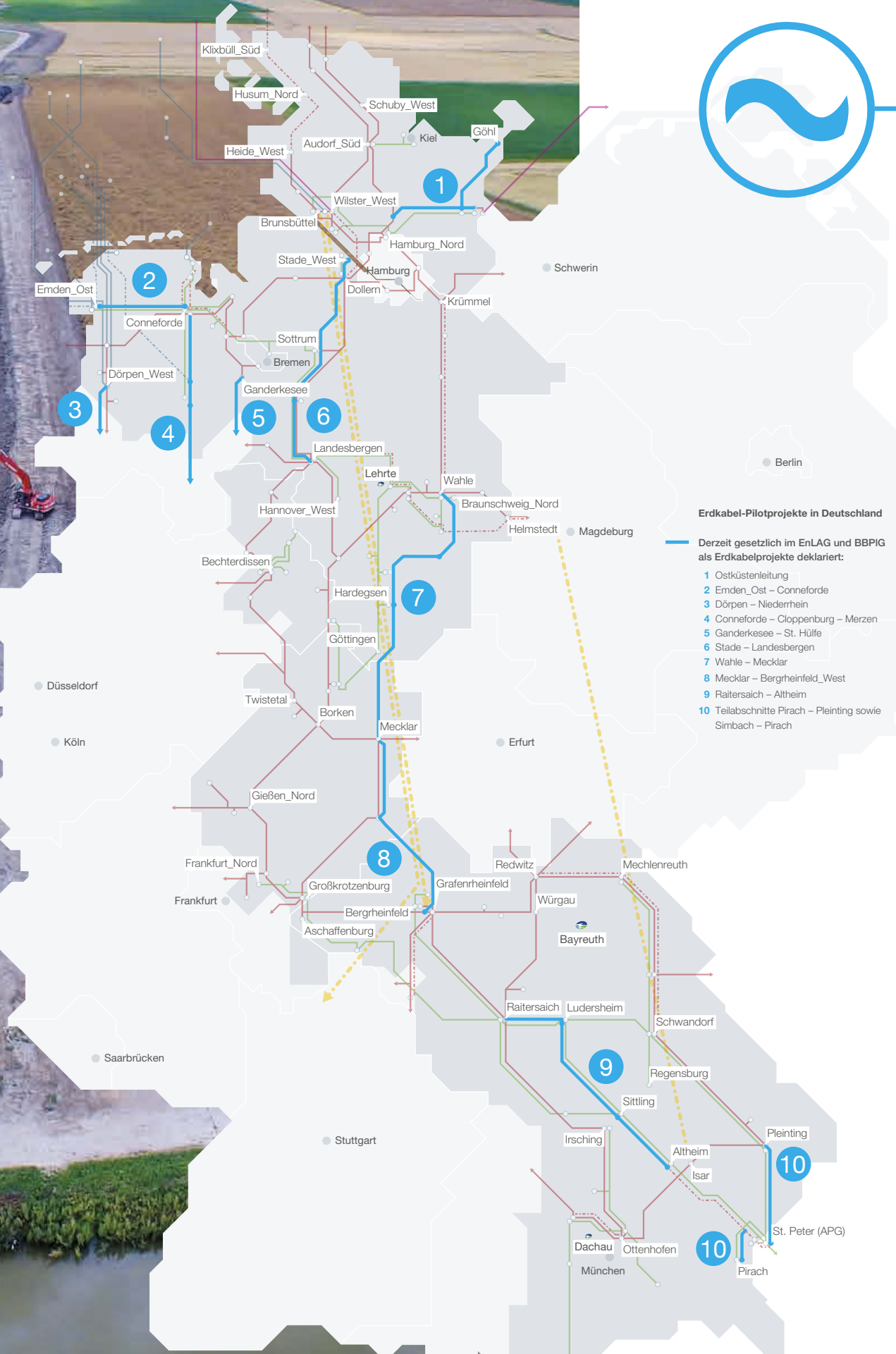
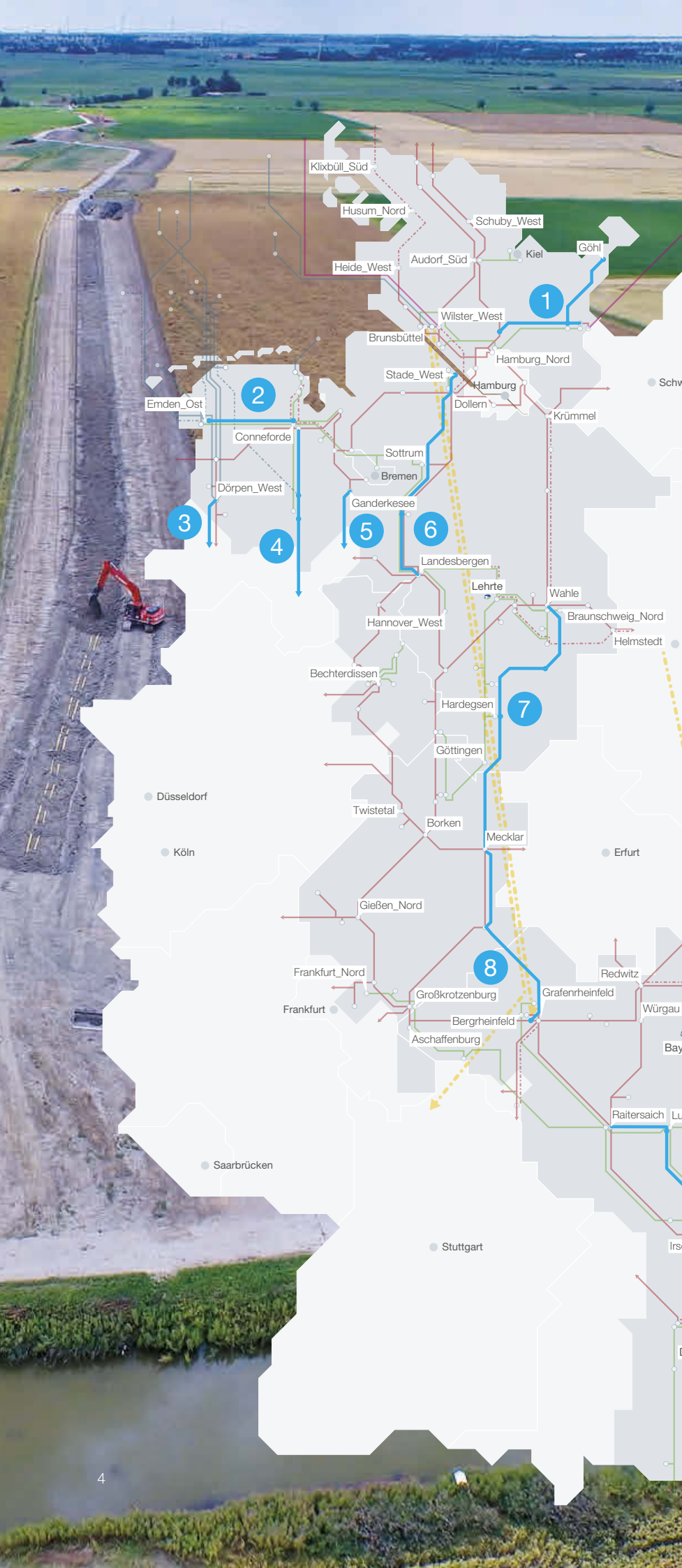
Ein Ziel dieser Pilotprojekte ist es, praktische Erfahrung zu sammeln, wie sich Erdkabel im Drehstromnetz auf das elektrische Übertragungssystem auswirken, um damit mehr Planungssicherheit für zukünftige Projekte zu gewinnen. Wie verhalten sich Erdkabel langfristig



im Zusammenspiel mit den oberirdisch verlaufenden Freileitungsabschnitten? Wie häufig fallen Erdkabel aus? Wie lange dauert ihre Reparatur? Bisherige Erfahrungen zeigen, dass die Reparatur von Kabelfehlern mit im Schnitt etwa drei Wochen erheblich länger dauert als bei Freileitungen. Das führt zu einer deutlich geringeren Verfügbarkeit der Kabeltrasse im Vergleich zur Freileitung. Für die Verwendung von Erdkabeln auf der Höchstspannungsebene in Drehstromtechnik liegen bislang nur wenige Betriebserfahrungen vor. Eine Begrenzung auf wenige Pilotprojekte ist weiterhin erforderlich, da die Auswirkungen auf das Gesamtnetz noch nicht geklärt sind und die Auswertung weiterer Erfahrungen dringend geboten ist. Und dies alles mit dem Ziel und klaren Auftrag, eine stabile und zuverlässige Stromversorgung zu gewährleisten.

Im Folgenden werden wichtige Netzkomponenten und typische Betriebszustände in der Netzföhrung näher beleuchtet, um mögliche Auswirkungen der Erdverkabelung im Höchstspannungs-Drehstromnetz vorzustellen.

* Wechselstrom und Drehstrom: Im Haushalt und für kleinere Leistungen wird Einphasen-Wechselstrom verwendet. Zur Übertragung großer Energiemengen wird dreiphasiger Wechselstrom genutzt, der als Drehstrom bezeichnet wird. In dieser Broschüre wird daher nachfolgend ausschließlich die Bezeichnung Drehstrom verwendet.



Erdkabel-Pilotprojekte in Deutschland

Derzeit gesetzlich im EnLAG und BBPlG als Erdkabelprojekte deklariert:

- 1 Ostküstenleitung
- 2 Emden_Ost – Conneforde
- 3 Dörpen – Niederrhein
- 4 Conneforde – Cloppenburg – Merzen
- 5 Ganderkesee – St. Hülfe
- 6 Stade – Landesbergen
- 7 Walle – Mecklar
- 8 Mecklar – Bergheinfeld_West
- 9 Raitersaich – Altheim
- 10 Teilabschnitte Pirach – Pleinting sowie Simbach – Pirach

Drehstrom-Erdkabel

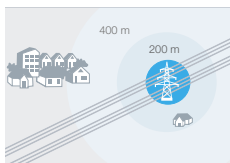
Gesetzliche Vorgaben für den Einsatz

Der Einsatz von Erdkabeln im 380-kV-Drehstrombereich ist zunächst von den rechtlichen Rahmenbedingungen für das jeweilige Projekt abhängig. Sehen diese eine Erdverkabelungsoption vor, wird bei jedem Projekt im Einzelfall und am konkreten Ort analysiert, welche Option die bessere ist. Am Ende entscheidet darüber die jeweilige Genehmigungsbehörde.

Im Rahmen des Energieleitungsausbaugesetzes (EnLAG) wurden 2009 deutschlandweit vier Pilotprojekte für den 380-kV-Drehstrombereich definiert.

Im Rahmen dieser Pilotprojekte kann der Einsatz von Erdkabeln überprüft werden, wenn die gesetzlich geltenden Mindestabstände von 200 bzw. 400 Metern zu Wohngebäuden (§§ 34, 35 Baugesetzbuch) beim Bau von Freileitungen nicht eingehalten werden können.

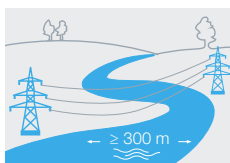
Mit Änderung des Bundesbedarfsplangesetzes (BBPlG) vom 21. Dezember 2015 und der Novelle vom 01.03.2021 wurden zusätzliche Pilotprojekte festgelegt sowie weitere Kriterien eingeführt, die die Optionen für den abschnittswisen Erdkabeleinsatz erweitern.



- Weniger als 400 Meter Abstand zur nächsten geschlossenen Siedlungslage (Innenbereich)
- Weniger als 200 Meter Abstand zu Wohngebäuden im Außenbereich



- Beeinträchtigung des Artenschutzes und Erdverkabelung stellt verträgliche Alternative dar
- Erhebliche Beeinträchtigungen der Schutz- und Erhaltungsziele von Flora-Fauna-Habitaten (FFH), Vogelschutz- und Natura2000-Gebieten



- Querung einer Bundeswasserstraße mit mindestens 300 m Breite

Die Kriterien aus dem Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG) sowie zum Teil bundeslandspezifische Vorgaben müssen erfüllt sein, damit eine Prüfung der Teilerdverkabelung möglich ist. Die Erfüllung der Kriterien bedeutet noch keine finale Aussage zur

Vorzugswürdigkeit einer Erdkabeltrasse gegenüber einer raumverträglichen Freileitung. In die Planung werden zusätzlich netztechnische, planerische, wirtschaftliche und bautechnische Kriterien abgewogen.

Freileitung und Erdkabel sicher verbinden

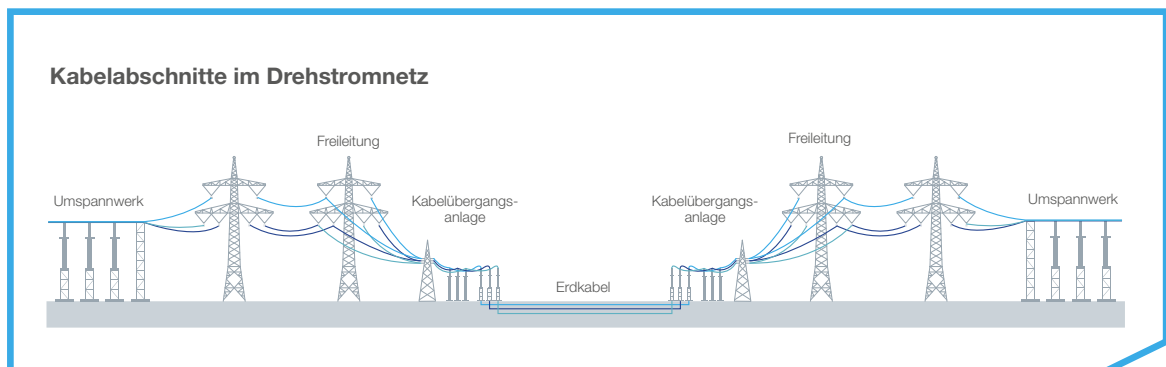


Zwischen einem Erdkabel- und einem Freileitungsabschnitt werden Übergangsbauwerke, sogenannte „Kabelübergangsanlagen“, benötigt. Diese enthalten alle technischen Komponenten, um den Übergang von Freileitungen auf Erdkabel und umgekehrt zu ermöglichen. Darum werden für jeden Erdkabelabschnitt grundsätzlich zwei Kabelübergangsanlagen benötigt. Je nach projektspezifischen Anforderungen und Gegebenheiten vor Ort nehmen Kabelübergangsanlagen etwa einen Flächenbedarf von von ca. 50 x 65 m bis zu ca. 125 x 85 m in Anspruch.

Je nach Länge oder Anzahl der Kabelstrecken sind in der Kabelübergangsanlage sogenannte Kompen-

sationsspulen notwendig, um die Blindleistung auszugleichen.

Im Betrieb von Kabelübergangsanlagen werden die gesetzlichen Grenzwerte für elektrische und magnetische Felder bereits am Anlagenzaun deutlich unterschritten. Weil Leitungen und Spulen auch Geräusche verursachen können, muss TenneT die Richtwerte der TA-Lärm (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm) einhalten, die für Gewerbe- und Industrieanlagen gemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz gelten. Weitere Informationen erhalten Sie in unserer Broschüre „Kabelübergangsanlagen: Die Verbindung zwischen Freileitung und Erdkabel“.



Die Erdkabelstrecke der 380-kV-Drehstrom-Leitung ist nur ein Teilabschnitt des gesamten Leitungsbauvorhabens. Die Abschnittslängen variieren und sind abhängig von den jeweiligen Planungen und Genehmigungen.

1 Kabelendverschluss

Mit **Kabelendverschlüssen** werden die Freileitungsseile über die Rohrschienen mit den unterirdisch verlegten Kabeln verbunden. Isolatoren sorgen hierbei für den notwendigen Abstand, um elektrische Überschläge zu vermeiden. Im Inneren des Isolators befinden sich sogenannte Feldsteuerelemente aus elastischen Gummiverkstoffen. Der äußere Isolator besteht aus glasfaserverstärktem Epoxidharz mit Silikonkautschukschirmen.

2 Blindleistungskompensation

Abhängig von der Länge des Kabelabschnitts und der Beschaffenheit des angrenzenden Stromnetzes muss ggf. eine Kompensation der kapazitiven Blindleistung erfolgen. Dies ist erforderlich, um die Übertragungsverluste zu minimieren und das Netz sicher betreiben zu können. Hierzu werden an den Blindleistungsbedarf angepasste Kompensationsspulen mit der Kabelanlage verschaltet. Für die Spule wird in der Regel ein zusätz-

liches Schaltfeld errichtet. Die Gesamtanlage braucht dementsprechend mehr Platz als eine einfache Kabelübergangsanlage.

3 Überspannungsschutz

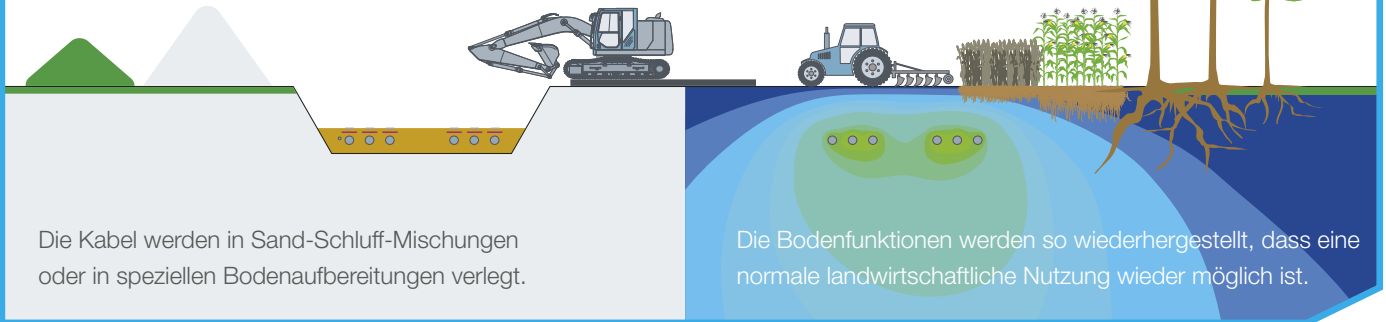
Bei Gewitter werden atmosphärische Überspannungen infolge eines Blitzeinschlags mit Ableitern begrenzt. Dies sichert die Langlebigkeit der Kabelanlage. Darüber hinaus leiten Blitzschutzmasten in der Nähe der Kabeldurchführungen die Blitzeinschläge direkt in die Erdungsanlage ab.

4 Portal

Als Portal wird ein Metallgerüst bezeichnet, das das Ende einer Freileitung und den Eingang zur Kabelübergangsanlage darstellt. Das Portal ist somit das höchste Element einer Kabelübergangsanlage. Die gebündelten Freileitungsseile werden am Portal einzeln angehängt und weiter in die Schaltfelder geführt.



Schematische Darstellung für Erdkabel in offener Bauweise und Regelprofil: exemplarische Erwärmung des Erdbodens in der Umgebung der Kabel.



Die Kabel werden in Sand-Schluff-Mischungen oder in speziellen Bodenaufbereitungen verlegt.

Die Bodenfunktionen werden so wiederhergestellt, dass eine normale landwirtschaftliche Nutzung wieder möglich ist.



Drehstrom-Erdkabel im Profil

Üblicherweise erfordert die unterirdische Stromübertragung mit Kabeln eine Systemverdoppelung. Das heißt, zwei Freileitungssysteme mit sechs Bündelleiterseilen gehen in vier Kabelsysteme mit insgesamt zwölf einzelnen Kabelsträngen über. Während der Tiefbauarbeiten kann die benötigte Trassenbreite bei vier Kabelsystemen 40 bis 50 Meter betragen. Grundsätzlich werden die Kabel parallel nebeneinander gelegt, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu gewährleisten. Zur Verkürzung der Bauzeit werden zunächst Leerrohre verlegt und nach Rückverfüllung der Erdschichten die Kabel eingezogen. Um eine landwirtschaftliche Nutzung des Geländes über dem Kabelgraben zu ermöglichen, beträgt die Verlegetiefe rund 1,60 Meter. Nach Bauabschluss beträgt die Grabenbreite inklusive des Schutzstreifens 20 bis 30 Meter. Dieser Bereich muss während des gesamten Betriebs von tiefwurzeln den Gehölzen freigehalten werden. Neben dieser offenen Bauweise können je nach Abschnitt und topografischen Voraussetzungen vor Ort auch andere Verfahren wie die geschlossene Verlegeweise (Horizontalspülbohrverfahren) zum Einsatz kommen.

Schutz der Landschaft

Erdkabelbaustellen sind immer auch ein Eingriff in Boden und Landschaftsbild. Um ihre Auswirkungen zu minimieren, müssen die Baufirmen strenge Vorgaben einhalten. TenneT stellt dies durch eine naturschutzfachliche, bodenkundliche und archäologische Baubegleitung sicher.

Schutz des Bodens

Wird Strom mittels Erdkabel übertragen, entsteht Wärme. Während diese bei Freileitungen einfach in die umgebende Luft abgegeben wird, muss beim Erdkabel das umgebende Erdreich die Wärme abführen. Durch die Wärme kann der Boden um die Kabel herum austrocknen. Ausgetrocknete Bereiche können die Wärmeleitfähigkeit des Bodens verschlechtern. Deshalb werden in kritischen Bereichen thermisch stabile Bettungsmaterialien eingesetzt. Je nach Bodenbeschaffenheit muss einer Austrocknung des Bodens vorgebeugt werden. Dies wird bei Bedarf durch ein thermisches Bettungsmaterial gewährleistet. Auch Auswirkungen auf eventuell vorhandene Drainagesysteme werden in der Planung berücksichtigt. Während der Bauphase wird der Mutterboden stets getrennt vom restlichen Aushub gelagert, um den Graben nach Abschluss der Arbeiten wieder ordnungsgemäß zu verfüllen.

Elektrische und magnetische Felder

Wird Strom über Erdkabel oder Freileitungen übertragen, entstehen elektrische und magnetische Felder. Bei Erdkabeln werden die elektrischen Felder durch den Kabelschirm der einzelnen Kabel und das umgebende Erdreich abgeschirmt. Durch die spezielle Anordnung und Verlegetiefe der Erdkabel wird sichergestellt, dass die geltenden Grenzwerte für das magnetische Feld deutlich unterschritten werden. Beim Betrieb mit Erdkabeln nimmt das Magnetfeld mit zunehmendem seitlichen Abstand zur Trasse im Vergleich zu Freileitungen sogar stärker ab.

Temperaturkontrolle

Grundsätzlich sind die Kabelanlagen so dimensioniert, dass die für die Kabel festgelegten maximal zulässigen Temperaturen nicht überschritten werden. Ein Temperatur-Monitoringsystem wird eingesetzt, um die tatsächliche Auslastung einer Kabeltrasse darzustellen. Durch Temperaturmessung können sogenannte Hotspots entlang der Trasse identifiziert werden. Sind diese identifiziert, kann durch eine Anpassung der Betriebsströme eine vorschnelle temperaturbedingte Alterung der Kabel vermieden werden. Darüber hinaus kann das Monitoring-System bei niedrigen Umgebungstemperaturen eine temporär höhere Übertragungsleistung ermöglichen, ohne die zulässigen Grenztemperaturen zu überschreiten.

Muffen und Muffengruben

Höchstspannungskabel können aus Transportgründen in der Regel nur in Teilstücken von rund 1.000 Metern Länge zur Kabeltrasse geliefert werden. Dies liegt zum einen am Gewicht der Kabeltrommeln und zum anderen an der begrenzten Gesamthöhe des Transports mit Blick auf die Unterquerung von Brücken. Daher müssen die Kabelstränge regelmäßig mit Kabelmuffen verbunden werden. Diese sind ebenfalls direkt erdverlegt und so untereinander verschachtelt, dass auch im Muffenabschnitt die normale Kabelgrabenbreite nicht überschritten wird.

Die Kabelschirme sind in regelmäßigen Abständen untereinander ausgekreuzt, um die Übertragungsverluste zu minimieren (sog. Cross-Bonding). Hierzu sind Cross-Bonding-Kästen in der Nähe der Muffen installiert, die für den Service von oben stets zugänglich bleiben müssen. Diese Cross-Bonding-Kästen, die in der Regel mit Anfahrtschutzbügeln gesichert werden, sind nach Abschluss der Bauarbeiten der einzige sichtbare Teil der Kabelgräben.

Drehstrom im Betrieb

Übertragungsfähigkeit von Erdkabeln geringer als bei Freileitungen

Damit eine ausreichende Übertragungsfähigkeit sichergestellt werden kann, müssen üblicherweise in einem Stromkreis zwei Erdkabelsysteme je Abschnitt parallel geschaltet werden. Nur so kann eine zu einem Freileitungsabschnitt vergleichbare Menge an Strom fließen. Welche Auswirkungen eine Teilerdverkabelung auf die maximale Übertragungsfähigkeit des Gesamtnetzes einer Leitung hat, muss projektspezifisch geprüft werden. Ein wesentlicher Einflussfaktor ist u. a. die thermische Überlastfähigkeit eines Erdkabels, d. h. wie viel Strom und damit auch Temperatur kann ein Kabel „ertragen“. Diese Überlastfähigkeit kann sich je nach Verlegebedingungen und Vorbelastung eines Erdkabels unterscheiden. Grundsätzlich ist eine deutlich geringere und weniger flexible maximale Übertragungsfähigkeit von Erdkabeln im Vergleich zu Freileitungen anzunehmen.

Im Vergleich einer identisch langen Freileitungstrasse mit einem Abschnitt, der aus Freileitung und Erdkabel besteht, entsteht ein wesentlicher Nachteil: Bei der gemischten Bauweise kommt es zu einer ungleichen Auslastung der Leitungstrassen. Dieses Problem lässt sich nur durch kostenintensive Ausgleichssysteme lösen.

Je länger ein Abschnitt, desto mehr Risiko für Überspannungen

Mit der Länge der Kabelabschnitte im Übertragungsnetz wächst zudem die Wahrscheinlichkeit von Schäden an Netzkomponenten durch Überspannungen.

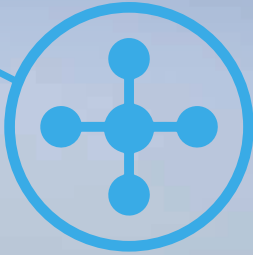
Die Konsequenz: Aussagen über Erdkabelabschnitte und deren Länge sind erst nach individueller Berechnung und Überprüfung für jeden Abschnitt und Netzknoten möglich. Insbesondere, da es sich bei Erdkabelanlagen um hochkomplexe Betriebsmittel handelt. Sie müssen in Planung, Bau und Betrieb anderen Anforderungen als Freileitungen gerecht werden.

Die Verfügbarkeit eines Erdkabelabschnitts ist im Vergleich zur Freileitung geringer

Grundsätzlich sind Erdkabelanlagen wartungsarm. Weltweite Untersuchungen weisen eine geringere Fehleranfälligkeit von Erdkabelanlagen auf, denn sie sind – anders als Freileitungen – nicht empfänglich für extern verursachte Schäden durch z. B. Sturm, Blitzeinschläge oder in Leitungen hineinwachsende Bäume. Kommt es jedoch zu einem Fehler, wie einer Beschädigung des Erdkabels oder elektrischen Problemen, ist die Reparatur deutlich kostspieliger und zeitaufwändig. Erste Erfahrungen der Netzbetreiber mit Erdkabelabschnitten im Betrieb zeigen, dass die Verfügbarkeit eines Erdkabelabschnittes daher geringer ist als die einer Freileitungstrasse. Eine zunehmende Anzahl der Erdkabel im Drehstromnetz wirkt sich daher negativ auf die Versorgungssicherheit mit Strom aus.

Die Zukunft

TenneT wird die Erfahrungen aus den Pilotprojekten nutzen, um die Möglichkeiten der Erdverkabelung mit der Versorgungssicherheit in Einklang zu bringen.



TenneT ist ein führender europäischer Netzbetreiber, der sich für eine sichere und zuverlässige Stromversorgung einsetzt – 24 Stunden am Tag, 365 Tage im Jahr. Wir gestalten die Energiewende für eine nachhaltige Energiezukunft. Als erster grenzüberschreitender Übertragungsnetzbetreiber planen, bauen und betreiben wir ein fast 24.000 km langes Hoch- und Höchstspannungsnetz in den Niederlanden und Deutschland und sind einer der größten Investoren in nationale und internationale Stromnetze, an Land und auf See. Jeden Tag geben unsere 5.700 Mitarbeiter ihr Bestes und sorgen mit Verantwortung, Mut und Vernetzung dafür, dass sich mehr als 42 Millionen Endverbraucher auf eine stabile Stromversorgung verlassen können.

Lighting the way ahead together.

TenneT TSO GmbH
Bernecker Straße 70
95448 Bayreuth
Deutschland

Telefon +49 921 50740-0
Fax +49 921 50740-4095

E-Mail info@tennet.eu
Twitter@TenneT_DE
Instagram@tennet_de
www.tennet.eu

© TenneT TSO GmbH - September 2021

Nichts aus dieser Ausgabe darf ohne ausdrückliche Zustimmung der TenneT TSO GmbH vervielfältigt oder auf irgendeine andere Weise veröffentlicht werden. Aus dem Inhalt des vorliegenden Dokuments können keine Rechte abgeleitet werden.

