

# Erfahrungsbericht zum Einsatz von Erdkabeln im Höchstspannungs-Drehstrombereich

Version	Datum	Kommentar
1.00	07.10.2020	Erste Veröffentlichung

Kontakt: [presse@50hertz.com](mailto:presse@50hertz.com) [presse@amprion.net](mailto:presse@amprion.net) [presse@tennet.eu](mailto:presse@tennet.eu) [pressestelle@transnetbw.de](mailto:pressestelle@transnetbw.de)

# Inhalt

Tabellenverzeichnis .....	4
Abbildungsverzeichnis.....	5
1 Hintergrund und Zielsetzung.....	6
2 Zusammenfassung.....	7
3 Projektübersicht .....	10
4 Dialog und Akzeptanz .....	15
4.1 Eigentümerinnen (allgemein).....	15
4.2 Landwirtinnen (Eigentümerinnen, Pächterinnen und Nutzungsberechtigte).....	16
4.3 Anwohnerinnen (allgemein).....	18
4.4 Politik.....	20
4.5 Träger öffentlicher Belange (TöB) .....	20
4.6 Fazit .....	21
5 Genehmigungsverfahren und Umwelt.....	22
5.1 Erfahrungen zu Auswirkungen auf Umwelt .....	22
5.1.1 UVP-Schutzgüter.....	22
5.1.2 Artenschutz.....	23
5.1.3 Natura 2000.....	24
5.2 Raumordnung.....	25
5.3 Planfeststellung .....	26
5.4 Abwägungsprozess Freileitung – Teilerdverkabelung in Niedersachsen .....	28
5.5 Fazit .....	30
6 Bauweise und Errichtung.....	31
6.1 Offene Bauweise .....	31
6.2 Spülbohrverfahren „Horizontal Directional Drilling“ (HDD).....	36
6.3 Tunnel/Mikrotunnel .....	38
6.4 Pilotrohrvortrieb.....	40
6.5 Kabelpflug.....	41
6.6 Kabelübergabestation (KÜS) .....	42
6.7 Auswirkungen auf die Projektdauer.....	43
6.8 Fazit .....	45
7 Betrieb und Betriebssicherheit.....	46
7.1 Betrieb .....	46
7.2 Fehleranfälligkeit und Sicherheit.....	47
7.3 Fazit .....	48
8 Erdkabeltechnik.....	49

8.1	Technologie und Aufbau von Erdkabelanlagen.....	49
8.2	Wartung und Instandsetzung.....	50
8.3	Technische Parameter.....	50
8.4	Fazit .....	51
9	Systemtechnische Betrachtungen.....	52
9.1	Physikalische Effekte .....	52
9.2	Blindleistung.....	53
9.2.1	Resonanzen, Ausgleichsvorgänge und andere Besonderheiten .....	54
9.2.3	Immissionen .....	59
9.2.4	Beeinflussung von benachbarten Pipelines und anderen leitfähigen Infrastrukturen .	60
9.3	Minimale und maximale Abschnittslänge .....	61
9.4	Fazit .....	61
10	Wirtschaftlichkeit .....	63
10.1	Einflussfaktoren.....	63
10.2	Kostengegenüberstellung Freileitung / Erdkabel.....	63
10.3	Fazit .....	64
	Abkürzungsverzeichnis .....	65

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Folgenden auf die gleichzeitige Verwendung männlicher, weiblicher und diverser Sprachformen verzichtet und das generische Femininum verwendet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der bisherige Erdkabelerfahrungen der vier ÜNB.....	10
Tabelle 2: Übersicht TEV laut Verfahrensstand.....	10
Tabelle 3: Übersicht Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung nach dem EnLAG .....	11
Tabelle 4: Übersicht Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung nach dem BBPIG.....	13
Tabelle 5: Sondervorhaben mit Erdkabelanteil im 220-/380-kV-Netz der ÜNB .....	14

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel für Entnahme der Bodenproben sowie für Bodenstruktur in Löss/Sandlösslandschaft.....	18
Abbildung 2: „Warntafel“ in der Nähe von Göttingen nach der beginnenden Teilerdverkabelungsplanung der 380-kV-Neubauleitung Wahle - Mecklar (Quelle: Aufnahme eines ÜNB-Mitarbeiters, 2013).....	19
Abbildung 3: Regelgrabenprofil 380-kV-AC mit zwei Gräben und zwölf Erdkabeln (Quelle: Amprion) 31	
Abbildung 4: Offener Erdkabelgraben im Projekt Dörpen - Niederrhein (TenneT) Im Hintergrund sind die Leerrohre für die spätere Verlegung im Graben zu sehen. ....	32
Abbildung 5: Offener Graben in der Bauphase Einseitige Öffnung, Verlegung von Leerrohren, Trennung von Bodenschichten: Oberboden (A-Horizont), untere Bodenschichten (B- und C- Horizont).....	33
Abbildung 6: Rückverfüllter Erdkabelgraben nach Verlegung der Leerrohre und Wiedereinbau des Bodens .....	34
Abbildung 7: Erdkabeleinzug vom Tieflader an einer Muffengrube .....	35
Abbildung 8: Darstellung Spühlbohrverfahren HDD .....	36
Abbildung 9: Baustelleneinrichtung Spühlbohrverfahren HDD .....	37
Abbildung 10: Schematische Darstellung Kabeldiagonale Berlin (50Hertz).....	38
Abbildung 11: Erprobung der Verlegung von 380-kV-Erdkabeln mit dem Kabelpflug bei Hildesheim. 41	
Abbildung 12: Kabelübergabestation Segberg an der A31 Erdkabel verlaufen unterirdisch von links in die Anlage. Auf der rechten Seite wird die Leitung als Freileitung fortgeführt.....	42
Abbildung 13: Erste betriebliche Erfahrungen mit der Zuschaltung eines TEV-Abschnitts, gemessene Stromverläufe (sekundärseitig), Zeit in s (Quelle: Amprion).....	47
Abbildung 14: 220 kV VPE-Erdkabelfehler in Berlin-Adlershof (2008).....	48
Abbildung 15: 250-MVAr-Drosselspule für die Blindleistungskompensation (Quelle: Siemens).....	54
Abbildung 16: Beispiel für Resonanzphänomene Überspannungen durch die Zuschaltung eines Netzkuppltransformators (Quelle: Amprion) .....	55
Abbildung 17: Verschiebung von Resonanzstellen im Netz (/3/,/4/,/5/) .....	57
Abbildung 18: Spannung über den offenen Schalterpolen (L1-L1) nach Abschaltung eines teilverkabelten, kompensierten Stromkreises. (Quelle: Amprion) .....	58
Abbildung 19: Verlauf der magnetischen Flussdichte über einer Erdkabeltrasse (Quelle: Antragsunterlagen zur Planfeststellung der 380-kV-Freileitung Wahle - Mecklar, Abschnitt A) sowie unter einer gleichwertigen Freileitung (Quelle: Standard-Donauanordnung, Phasenfolge L1L2L3-L1L2L3).....	59
Abbildung 20: Kostenarten und Aufteilung für Investitionen in das Höchstspannungsnetz .....	63

# 1 Hintergrund und Zielsetzung

Der Gesetzgeber hat sowohl im Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG) als auch im Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG) für ausgewählte Höchstspannungs-Drehstromvorhaben vorgesehen, dass diese auf technisch und wirtschaftlich effizienten Teilabschnitten als Erdkabel errichtet und betrieben werden können, wenn bestimmte Voraussetzungen vorliegen. Diese Option der Teilerdverkabelungs-Abschnitte (TEV-Abschnitte) wird in den ersten gesetzlich festgelegten Pilotvorhaben bereits realisiert. In anderen Pilotvorhaben stehen die konkreten Entscheidungen über eine Teilerdverkabelung (TEV) noch aus.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) hat die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) darum gebeten, vorliegende Erfahrungen zu den Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelungen (§ 5 Abs. 3 BBPlG) in einem Sach- bzw. Erfahrungsbericht zusammen zu fassen. Der Gesetzgeber hat mit den festgelegten Höchstspannungs-Drehstrom-Pilotvorhaben für Teilerdverkabelungen eine Möglichkeit eröffnet, technische Alternativen im für die Energiewende notwendigen Netzausbau zu prüfen. Dazu gehören Fragen rund um die Genehmigungsplanung der Pilotvorhaben, aber auch zum Bau und Betrieb sowie zur Systemführung. Vor allem für letztere gilt es, einen umfassenden Erfahrungshorizont zu erlangen, um der wachsenden Komplexität und den Herausforderungen an eine sichere Systemführung gerecht zu werden.

Die bisher vorliegenden Erfahrungen bei der Planung und teilweisen Umsetzung von Teilerdverkabelungen schließen einen eher kurzen Zeitraum ein und sind deshalb noch wenig umfangreich. So beziehen sich die bisherigen Erfahrungen auf die Genehmigungsplanung sowie den Dialog vor Ort mit Betroffenen und Landeigentümerinnen im Trassenbereich. Erfahrungen aus dem Bau und dem Betrieb von TEV sind singulär vorhanden und es gilt, diese entsprechend zu bewerten.

Gleichwohl gilt es, erste Ansatzpunkte für die Diskussion der aufkommenden Fragen zu Teilerdverkabelungen zu skizzieren. Der Betrieb der Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung ist hoch komplex. Erste Erfahrungen zeigen, dass die Herausforderungen an eine sichere Systemführung einzeln gut gemeistert werden können. In der Summe wird jedoch deutlich, dass weitere Erprobungen in den festgelegten Pilotvorhaben notwendig sind. Dabei ist es nicht die Anzahl der Pilotvorhaben, sondern die vollständige Fertigstellung und Integration in den Betrieb, die die erforderlichen Erkenntnisse über einen stabilen technischen Einsatz im Interesse der Versorgungssicherheit und sicheren Systemführung liefern.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die bisherigen Erfahrungen der deutschen Übertragungsnetzbetreiber zu Auswirkungen auf Akzeptanz, Genehmigungsverfahren, Verfahrensdauer, Natur und Umwelt sowie alle technischen Aspekte (Planung, Errichtung und Betrieb der Anlagen, ihre systemische Einbindung) und die wirtschaftliche Betrachtung zusammengefasst. Die Erfahrungen basieren auf den bisher gestarteten, laufenden und abgeschlossenen Pilotvorhaben. Da bisher erst wenige Projekte im Bau bzw. im Betrieb sind, ist mit weiteren Erkenntnissen in den kommenden Jahren zu rechnen.

## **2 Zusammenfassung**

### **Erfahrungsstand Pilotvorhaben**

Die Teilerdverkabelung (TEV) im Wechselstromnetz ist immer noch technisches Neuland. Eine Begrenzung auf Pilotvorhaben ist weiterhin erforderlich, da die Auswirkungen auf das Gesamtnetz noch nicht geklärt sind, die Auswertung weiterer Erfahrungen ist dringend geboten. Bislang ist keines der Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung im vollen Systembetrieb. Einzig beim Vorhaben EnLAG Nr. 5 (Dörpen – Niederrhein) befinden sich zwei Erdkabelabschnitte im Test-Betrieb. Der Großteil der Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung ist noch in der Planungs- oder Genehmigungsphase. Die bereits gewonnenen Erfahrungen mit Erdverkabelungen im Wechselstromnetz beschränken sich daher vor allem auf diese beiden Phasen. Erkenntnisse zu den Auswirkungen von Teilerdverkabelungen auf den Betrieb des Gesamtnetzes lassen sich erst sammeln, nachdem TEV-Abschnitte in den vollständigen Systembetrieb überführt wurden. Nach derzeitigem Stand werden die gesetzlich festgeschriebenen Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung nach dem EnLAG und BBPIG in den kommenden Jahren sukzessive in Betrieb genommen, bei den EnLAG-Vorhaben vor allem ab 2022 und bei den BBPIG-Vorhaben ab 2023. Nach den gegenwärtig vorliegenden Erfahrungen ist es deshalb erforderlich, im Rahmen der bereits ausgewiesenen Pilotvorhaben in den kommenden Jahren weitere Erfahrungen zu sammeln.

### **Dialog und Akzeptanz**

Die Erfahrungen aus den laufenden Pilotvorhaben zeigen bisher: Teilerdverkabelungen sind kein Allheilmittel und tragen nicht per se zu mehr Akzeptanz bei den betroffenen und involvierten Akteurinnen bei. Vielmehr scheinen sich wahrgenommene Betroffenheiten zu verlagern – weg von Anwohnerinnen, die mitunter nicht unmittelbar an der Trasse leben, hin zu Eigentümerinnen und Bewirtschafterinnen, hier vor allem Landwirtinnen. Zugleich dominieren häufig die Anwohnerinnen (ohne eine direkte Grundstücksbetroffenheit) weiter die öffentliche Debatte und machen sich für Erdkabel stark – bis hin zur Beeinflussung kommunalpolitischer Entscheidungen. Die Fragen (u. a. Bewirtschaftung von Flächen bzw. Böden) der unmittelbar betroffenen Landwirtinnen und Eigentümerinnen rücken in den Hintergrund, sind aber für die Planung und Umsetzung wesentlich. Die Beschleunigung der Verfahren ist (bislang) ausgeblieben, vielmehr wurden zusätzliche Verfahrensschritte nötig. Die Praxis zeigt, dass die TEV-Abschnitte der Pilotvorhaben in Planung und Bau hinter den Freileitungsabschnitten hinterherhinken.

### **Planungs-, Genehmigungs- und Bauzeiten**

Planungs- und Bauzeiten dauern in den gesetzlich festgelegten Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung länger als bei Freileitungsvorhaben:

In der Planungsphase kommt es zu intensiven Diskussionen mit Behörden und Betroffenen, wie die Regelungen des EnLAGs in Verbindung mit weiteren länderspezifischen Anforderungen auszulegen sind. Die Planungs- und Genehmigungsphasen sind für TEV-Abschnitte aufwändiger und dauern nach den derzeitigen Erfahrungen daher mindestens 1–2 Jahre länger – unterliegen aber je nach Projekt und Region (abhängig von Dichte der vorhandenen Infrastruktur) starken Varianzen.

Noch größere Verzögerungen von Projekten treten ein, wenn in einem laufenden Verfahren zusätzliche Optionen für TEV-Abschnitte gesetzlich ergänzt werden. Denn es werden neue Grundlagen geschaffen, die ihrerseits weitere Alternativen ins Spiel bringen. Beispielsweise waren die Planungen für das Projekt Dörpen-Niederrhein schon weit vorangeschritten, als in 2009 die Möglichkeit der Teilerdverkabelung im EnLAG festgelegt wurde. Gleiches gilt für das EnLAG 16 Wehrendorf – Gütersloh, das 2015 in die Liste der Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung

aufgenommen wurde und sich im nordrhein-westfälischen Abschnitt bereits im Planfeststellungsverfahren befand. Durch die hierdurch notwendig gewordenen Änderungen ist es zu mehrjährigen Verzögerungen in der Genehmigungsphase gekommen. Planungen mussten von vorne begonnen werden, Teilabschnitte des Vorhabens befinden sich teilweise immer noch in der Genehmigungsphase. Durch die Änderungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen verzögern sich die bereits in der Planung befindlichen Projekte.

Planung, Bautechnik und Errichtung von Erdkabeltrassen ist grundsätzlich vielerorts möglich, stellt aber im Vergleich zu einer Freileitung eine erheblich aufwändigere, komplexere und teurere Baumaßnahme dar. Dies gilt nicht allein für die Errichtung, sondern für alle Projektphasen von der Vorplanung bis zur Inbetriebnahme.

Der offene Kabelgraben ist nach derzeitigem Erfahrungsstand die meistverbreitete Bauweise, da hier auf alle unvorhergesehenen Besonderheiten im Baugrund (Gestein, erdverlegte Leitungen etc.) schnell und effektiv reagiert werden kann. Damit sind aber auch die vergleichsweise größten Eingriffe in Landschaft und Umwelt verbunden.

Geschlossene Verfahren (Bohrungen, Tunnel etc.) sind in der Regel deutlich teurer und oft langsamer in der Umsetzung. Auf Abweichungen im Baugrund (größeres Gestein, Findlinge, stark inhomogener Baugrund) kann deutlich weniger flexibel reagiert werden, sodass solche Verfahren risikobehafteter und planungsintensiver sind. Dadurch können sie größere Auswirkungen auf Projekttermine und -kosten haben.

Insgesamt beanspruchen die umfangreichere Ausführungsplanung, Bodenuntersuchungen, Verhandlungen mit Eigentümerinnen und umfassende Beweissicherungen bei den TEV-Abschnitten in den Pilotvorhaben viel Zeit und können sich verzögernd auf die Projektdauer auswirken.

### **Betriebs- und Systemsicherheit**

Erdkabelanlagen haben eine geringere Verfügbarkeit als Freileitungen: Die Reparaturzeiten sind deutlich länger und die Folgen von Fehlern oder Schäden an den Anlagen besitzen viel umfassendere Auswirkungen. Darüber hinaus steigt mit zunehmendem Anteil an Teilerdverkabelung in einem Stromkreis (technischem Abschnitt) sowie innerhalb der Netzregion die Komplexität des Netzbetriebs und damit das Risiko für System- und Netzstabilität. Der Verkabelungsanteil innerhalb eines Stromkreises sowie innerhalb einer Netzregion unterliegt technischen (physikalischen) Restriktionen. Ist der Verkabelungsgrad unzulässig hoch, so steigt die Komplexität des Netzbetriebes und damit das Risiko, dass es zu Schäden an Betriebsmitteln in unterlagerten Netzebenen, damit auch an Kundenanlagen und -maschinen und Versorgungsstörungen bis hin zu größeren überregionalen Zwischenfällen im elektrischen System kommen kann. Die Auswirkungen eines Hybridprojektes (Freileitung und Teilerdverkabelung) auf den Systembetrieb sowie die physikalischen Effekte wurde bislang berechnet und in mehreren Studien untersucht. Allerdings befindet sich bislang kein einziges der Pilotvorhaben im vollen Systembetrieb, sodass es bislang keine praktischen Erfahrungen dafür gibt.

### **Wirtschaftlichkeit**

Die Kosten im Vergleich zur Freileitung liegen bei einer Teilerdverkabelung sowohl in Planung, Errichtung und Betrieb deutlich höher. Abhängig von den Anforderungen an die Übertragungsaufgabe, die projektspezifische Topographie und den jeweiligen Baugrund liegen die Investitionskosten in der Regel mindestens um den Faktor 6 höher. Die Berücksichtigung der Kosten über den gesamten Lebenszyklus vermindern diesen Faktor, aber auch bei günstigsten Annahmen ist ein Erdkabel immer wesentlich unwirtschaftlicher als eine Freileitung. Aus den bisherigen



Pilotvorhaben lassen sich noch keine abschließend gesicherten Erkenntnisse hinsichtlich Betrieb, Reparatur und Erneuerung ableiten.

### 3 Projektübersicht

Für diesen Bericht wurden Erfahrungen aus Planung, Genehmigung, Bau und Betrieb von Projekten mit Teilerdverkabelungsabschnitten (TEV-Abschnitten) durch die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) zusammengetragen. Es wurden die Wechselstrom-Erdkabel-Piloten des EnLAG und des BBPIG ausgewertet.

Als Sonderfall wurden die 50Hertz Projekte:

- Kabeldiagonale Berlin
- Teilerdverkabelung Adlershof an der 220-kV-Leitung Wuhlheide-Thyrow

mit in den Sachstandsbericht einbezogen.

Die in diesem Bericht zusammengetragenen Erfahrungen umfassen aktuell:

*Tabelle 1: Übersicht der bisherige Erdkabelerfahrungen der vier ÜNB*

<b>Netzbetreiber</b>	<b>Erfahrungen</b>
50Hertz	Projekt Kabeldiagonale Berlin (Sonderbauwerk Tunnel) Teilerdverkabelung Adlershof an der 220-kV-Leitung Wuhlheide-Thyrow
Amprion	Erfahrungen aus vier Pilot-Projekten (3 EnLAG und 1 BBPIG)
TenneT	Erfahrungen aus acht Pilot-Projekten (3 EnLAG und 5 BBPIG)
TransnetBW	Es liegen keine Erfahrungen zu AC-Erdkabelprojekten vor.

Ein Großteil der Pilotvorhaben ist mit Erscheinen dieses Erfahrungsberichts noch nicht abgeschlossen. Sie befinden sich noch in der Planungs-, Genehmigungs- oder Bauphase.

Weitere Erkenntnisse in den kommenden Jahren sind aus Sicht der ÜNB erforderlich, um die Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung erfolgreich abzuschließen. Es gibt noch zu wenig Erfahrung, um klare Aussagen treffen zu können. Mit einer ausreichende Anzahl von Pilotvorhaben im Systembetrieb innerhalb der nächsten Jahre ist eine erneute Auswertung der Erfahrungen sinnvoll.

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichts umfassen die bisherigen Erfahrungen der ÜNB über alle Pilotvorhaben nach dem EnLAG und BBPIG nachfolgende durchlaufene Phasen und Kilometer:

*Tabelle 2: Übersicht TEV laut Verfahrensstand*

<b>Teilerdverkabelungsabschnitte</b>	<b>Streckenlänge in Kilometern</b>	<b>Prozentualer Anteil</b>
in Planung:	69,9	47 %
genehmigt:	23,1	16 %
im Bau:	21,1	14 %
Erdkabel nicht realisiert:	18,0	12 %
im Betrieb:	16,4	11 %

Die Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung nach dem EnLAG und BBPIG haben nach derzeitigem Stand eine Gesamtlänge von insgesamt 1.108 km. Hiervon ist derzeit für 69,9 km eine Teilerdverkabelung geplant, was rund 6 % der Gesamtlänge dieser Pilotvorhaben entspricht. In Bezug auf die Gesamtlänge sind weitere 2 % (23,1 km) genehmigt, 2 % (21,1 km) im Bau und 1 % (16,4 km) in Betrieb genommen. Keine Teilerdverkabelung ist für insgesamt 88 % (973,5 km) der Gesamtlänge aller Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung vorgesehen. Die folgenden Tabellen enthalten Übersichten zu allen Vorhaben, auf denen die Erfahrungen in diesem Bericht basieren.

Tabelle 3: Übersicht Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung nach dem EnLAG (Stand Oktober 2020)

Vorhaben Nr.	Vorhaben	TEV-Abschnitte	Länge (km)	Status / bisherige Erfahrungen	IBN	ÜNB
<a href="#">EnLAG 2</a>	<b>Ganderkesee - St. Hülfe</b> Teil des Vorhabens Ganderkesee - Wehrendorf		<b>61</b>	<b>genehmigt</b>	<b>2023</b>	<b>TenneT</b>
		UW Ganderkesee - KÜA Ganderkesee-Süd	3,8	genehmigt	2023	TenneT
		KÜA Havekost - KÜA Klein Henstedter Heide	3,1	genehmigt	2023	TenneT
		Erdkabelabschnitt Rüssen - Aldorf	4,6	genehmigt (Umplanung zur Freileitung)	-	TenneT
		KÜA Dickel-West - UW St. Hülfe	5,9	genehmigt	2023	TenneT
<a href="#">EnLAG 4</a>	<b>Altenfeld - Redwitz</b> Teil des Vorhabens Lauchstädt - Redwitz		<b>56</b>	<b>Erdkabel nicht realisiert</b>	<b>2017</b>	<b>50Hertz</b>
		Teilerdverkabelung im 3. Abschnitt Altenfeld - Redwitz	7,5	Erdkabel nicht realisiert	-	50Hertz
<a href="#">EnLAG 5</a>	<b>Dörpen West - Niederrhein</b>		<b>181</b>	<b>in Planung / Bau / Betrieb</b>	<b>2023</b>	<b>Amprion</b>
		Pkt. Legden Süd - Pkt. Asbeck	5,3	in Planung	2023	Amprion
		Pkt. Borken Süd – Pkt. Norvelen	3,2	im Betrieb (Test-Betrieb)	2018	Amprion
		Wesel - Pkt. Bredenwinkel	3,6	im Betrieb (Test-Betrieb)	2016	Amprion
		KÜA Dankern - KÜA Segberg	3,1	im Bau	2020	TenneT
<a href="#">EnLAG 6</a>	<b>Wahle - Mecklar</b>		<b>221</b>	<b>in Planung / genehmigt / im Bau</b>	<b>2024</b>	<b>TenneT</b>
		KÜA Nord (Lesse) - KÜA Süd (Sillium)	13,0	im Bau	2021	TenneT
		KÜA Erzhausen - SA Erzhausen	2,2	in Planung	2021	TenneT
		KÜA Hetjershausen - KÜA Olenhusen	5,7	genehmigt	2021	TenneT
<a href="#">EnLAG 14</a>	<b>Rheinquerung im Abschnitt Wesel</b> Teil des Vorhabens Niederrhein - Ufort - Osterath		<b>11</b>	<b>in Planung</b>	<b>2024</b>	<b>Amprion</b>
		Untersuchungsraum Rheinquerung	5-10	in Planung	2024	Amprion

<a href="#">EnLAG 16</a>	Wehrendorf - Gütersloh	70	in Planung	2026	Amprion
	TEV im Genehmigungsabschnitt Wehrendorf - Lüstringen	3-7	in Planung	2026	Amprion
	TEV im Genehmigungsabschnitt Lüstringen - Landesgrenze NI/NW	6-12	in Planung	2026	Amprion
	TEV im Genehmigungsabschnitt Landesgrenze - Hesseln	4	in Planung	2026	Amprion
	in Planung	25,5 - 40,5	43 %		
	genehmigt	23,1	25 %		
	im Bau	16,1	17 %		
	Erdkabel nicht realisiert	7,5	8 %		
	im Betrieb	6,8	7 %		
	Gesamtstrecke Piloterfahrungen Teilerdverkabelung	94	100 %		
	Gesamtstrecke der Pilotvorhaben	600			

Tabelle 4: Übersicht Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung nach dem BBPIG (Stand Oktober 2020)

Vorhaben Nr.	Vorhaben	TEV-Abschnitte	Länge (km)	Status / bisherige Erfahrungen	IBN	ÜNB
<a href="#">BBPIG 6</a>	<b>Conneforde - Cloppenburg - Merzen</b>		<b>128</b>	<b>in Planung</b>	<b>2026</b>	<b>TenneT</b>
		KÜA Kayhauserfeld - KÜA Harbern	10,5	Erdkabel nicht realisiert (Realisierung als Freileitung)	- <sup>1</sup>	TenneT
		KÜA Beverbruch - UW Garrel-Ost	3,8	in Planung	2025	TenneT
<a href="#">BBPIG 7</a>	<b>Stade - Sottrum - Grafschaft Hoya - Landesbergen</b>		<b>157</b>	<b>in Planung</b>	<b>2026</b>	<b>TenneT</b>
		UW Sottrum Nord - KÜA Sottrum Süd	4,6	in Planung (Variante geplant, wird nicht beantragt)	- <sup>1</sup>	TenneT
		KÜA Verden Nord - KÜA Verden Süd	4,0	in Planung	2026	TenneT
		UW Mehringen - KÜA Mehringen Süd	1,9	in Planung	2025	TenneT
		KÜA Wietzen Nord - KÜA Wietzen Süd	1,7	in Planung (Variante geplant, wird nicht beantragt)	- <sup>1</sup>	TenneT
		KÜA Pennigsehl Nord - KÜA Pennigsehl Süd	2,8	in Planung (Variante geplant, wird nicht beantragt)	- <sup>1</sup>	TenneT
<a href="#">BBPIG 31</a>	<b>Wilhelmshaven - Conneforde</b>		<b>30</b>	<b>in Betrieb</b>	<b>2020</b>	<b>TenneT</b>
		Kraftwerksanschluss ENGIE Wilhelmshaven	4,5	in Betrieb	2020	TenneT
		KÜA Sanderahm - KÜA Vorwerk	1,7	in Betrieb	2020	TenneT
		KÜA Bockhorn - KÜA Osterforde	3,4	in Betrieb	2020	TenneT
<a href="#">BBPIG 34</a>	<b>Emden Ost - Conneforde</b>		<b>61</b>	<b>im Bau</b>	<b>2023</b>	<b>TenneT</b>
		KÜA Strackholt - KÜA Strackholt-Ost	2,4	im Bau	2021	TenneT
		KÜA Bredehorn - KÜA Bredehorn-Ost	2,6	im Bau	2021	TenneT
<a href="#">BBPIG 42</a>	<b>Kreis Segeberg - Lübeck - Siems - Göhl</b>		<b>132</b>	<b>in Planung</b>	<b>2027</b>	<b>TenneT</b>
		UW Kreis Segeberg - KÜA Henstedt-Ulzburg West	4,4	in Planung	2025	TenneT
		KÜA Kisdorf West - KÜA Kisdorf Ost	3,2	in Planung	2025	TenneT
		KÜA Oldenburger Bruch-Süd - UW Göhl	3,0	in Planung	2027	TenneT
		in Planung	29,4	54 %		
		genehmigt	-	-		
		im Bau	5,0	9 %		
		Erdkabel nicht realisiert	10,5	19 %		
		im Betrieb	9,6	18 %		
		Gesamtstrecke Piloterfahrungen Teilerdverkabelung	54,5	100 %		
		Gesamtstrecke der Pilotvorhaben	508			

<sup>1</sup> Inbetriebnahme als Freileitung erwartet

Tabelle 5: Sondervorhaben mit Erdkabelanteil im 220-/380-kV-Netz der ÜNB (Stand Oktober 2020)

Vorhaben Nr.	Vorhaben	TEV-Abschnitte	Länge (km)	Status	IBN	ÜNB
- <sup>2</sup>	380-kV-Kabeldiagonale Berlin (Marzahn - Teufelsbruch)	Marzahn - Friedrichshain Friedrichshain - Mitte Mitte - Charlottenburg - Endmast 9 Reuter - Teufelsbruch	27,6	in Betrieb	2000 1998 1978 1994	50Hertz
- <sup>2</sup>	380-kV-Kabeldiagonale Berlin	UW Mitte - Endmast 9	6,7	in Betrieb	1978 Neubau bis 2028	50Hertz
- <sup>2</sup>	220-kV-Leitung Wuhlheide - Thyrow		41	in Betrieb	Erneuerung in 2009	50Hertz
		Teilerdverkabelung Adlershof	1,8	in Betrieb	2009	50Hertz
		Erdkabel in Planung:	-			
		genehmigt	-			
		Erdkabel im Bau	-			
		Erdkabel nicht realisiert	-			
		Erdkabel im Betrieb:	36,1			

<sup>2</sup>Vorhaben weder EnLAG noch BBPIG

## 4 Dialog und Akzeptanz

Die vielfach öffentlich und politisch formulierte Forderung nach mehr Teilerdverkabelung auf der Höchstspannungsebene ist gekoppelt an die Erwartung nach Akzeptanz und Beschleunigung. Die bisherigen Erfahrungen aus dem Dialog mit verschiedenen Akteurinnen entlang der Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung zeigen, dass Akzeptanz von Erdkabeln von zwei Seiten zu betrachten ist: einmal im Hinblick auf das Vorhaben insgesamt und einmal mit Blick auf die Bauphase bzw. die sichtbaren Baustellen vor Ort.

Bislang wurde deutlich, dass sich die Aufmerksamkeit und das Interesse unter den Anspruchsgruppen verschieben: Anwohnerinnen lehnen Erdkabel tendenziell weniger ab als Freileitungen, da bei Teilerdverkabelung weniger optische Beeinträchtigung ihrer Umgebung wahrgenommen und weniger Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch vermutet werden. Dagegen fühlen sich Landwirtinnen, Försterinnen und Grundstückseigentümerinnen weitaus stärker betroffen und befürchten zahlreiche negative Auswirkungen auf ihre Böden, speziell auf landwirtschaftliche Erträge.

Die Erfahrungen aus dem Dialog vor Ort zeigen aber auch, dass Anwohnerinnen, die mitunter nicht unmittelbar an der Trasse leben, sich auf die Grundsatzdiskussion Freileitung vs. Erdkabel konzentrieren, indem sie eine häufig medial wiedergespiegelte Debatte führen. Themen der Landwirtinnen und Eigentümerinnen, die sich stärker auf die Bauphase beziehen, rücken dadurch in den Hintergrund. Und es geht um notwendige weitere Flächen, etwa für die Kabelübergabestationen (KÜS), die für andere Nutzungen nicht mehr zur Verfügung stehen.

Hinzu kommt die Diskussion über die Länge des TEV-Abschnittes. Technische, rechtliche und betriebliche Aspekte werden in der öffentlichen und politischen Argumentation bislang zu wenig berücksichtigt.

Der Dialog mit den Eigentümerinnen ist bei Erdkabeln in Summe komplexer als bei Freileitungen, denn für die notwendigen Bodenuntersuchungen über die gesamte Trassenlänge ist allein die Zahl der entsprechenden Grundstücke (und damit i. d. R. auch der Eigentümerinnen) deutlich höher als bei punktuellen Maststandorten. Sollen rechtliche Wege möglichst wenig beschritten werden, so die bisherige Erfahrung im Vorhaben Raesfeld, ist ein umfassender und intensiver Dialog mit den Eigentümerinnen und Nutzungsberechtigten (Pächterinnen) unabdingbar. Teils sind es schwierige Gespräche bei der Trassenfindung und langwierige Verhandlungen mit den Eigentümerinnen, Landwirtinnen und ihren Verbänden. Die Erfahrungen aus Raesfeld sind jedoch nicht repräsentativ und nicht übertragbar auf andere Piloten, wie die Erfahrungen inzwischen zeigen.

### 4.1 Eigentümerinnen (allgemein)

Entgegen der allgemeinen Annahme gibt es viele Eigentümerinnen, die Freileitungen aufgrund des geringeren Eingriffs in den Boden bevorzugen.

Sind Eigentümerinnen entlang einer bestehenden Freileitung im Nah- und Sichtbereich betroffen, scheint sich deren Akzeptanz durch eine Teilerdverkabelung nicht grundsätzlich zu verändern. Vielmehr verlangen jene Anspruchsgruppen eine andere Trassenvariante, die komplett außerhalb ihres Einzugsbereichs liegt. Denn im Vergleich zur Freileitung befürchten die Eigentümerinnen umfangreichere Eingriffe in „ihren Grund und Boden“. Beispielsweise lehnen Eigentümerinnen

Teilerdverkabelungen auf ihren Grundstücken ab, da dort keine weitere Bebauung (Siedlung, Gewerbe etc.) möglich ist.

Eine Teilerdverkabelung führt also zu anderen Betroffenheiten, Konflikte verschieben sich von Anwohnerinnen zu Eigentümerinnen oder Nutzungsberechtigten, werden aber durch die Teilerdverkabelung weder gelöst noch vermindert. Vor allem verändern sich Intensität und Inhalt des Dialogs mit den betroffenen Eigentümerinnen: durch die lineare (Kabel) statt punktuelle (Mast) Ausführung und den damit verbundenen umfassenderen Eingriff in den Boden werden durch die Teilerdverkabelung stärkere Betroffenheiten bei Grundstückseigentümerinnen ausgelöst.

Der Planungskompromiss, der durch einen TEV-Abschnitt in der Genehmigungsphase erreicht werden kann (gefordert von einzelnen sichtbetroffenen oder weiterer weg lebenden Anwohnerinnen), führt nicht selten zu Befürchtungen und Protest bei den Eigentümerinnen und Nutzungsberechtigten. Die Konsequenz, so die bisherigen Erfahrungen aus den Projekten EnLAG16 und BBPIG6, kann die Verweigerung der Betretungserlaubnis ihrer Flächen und Grundstücke sein und so eine teils große Verfahrensverzögerung nach sich ziehen. Diese Erlaubnis ist jedoch unbedingt schon deutlich vor Beginn des Verfahrens notwendig, um Voruntersuchungen für die Detailplanung durchführen zu können (Baugrunduntersuchung, Kampfmittelsondierung, Archäologie). Entsprechende rechtliche Schritte für umfangreiche Duldungsverfügungen führen zu Verzögerungen bei der Erstellung der Planfeststellungsunterlagen, dem Beginn des formellen Verfahrens durch Einreichung der Planfeststellungsunterlagen und später dann bei bauvorbereitenden Maßnahmen sowie im konkreten Bauablauf. Das Vorliegen eines Planfeststellungsbeschlusses ist keineswegs eine Garantie dafür, dass der Vorhabenträger von seinem öffentlichen Baurecht auch Gebrauch machen kann, da es auch dann noch zu Widerständen vor Ort kommen kann, die weitere rechtliche Maßnahmen erfordern.

## **4.2 Landwirtinnen (Eigentümerinnen, Pächterinnen und Nutzungsberechtigte)**

Für Landwirtinnen steht der Schutz ihrer Böden im Mittelpunkt. Deshalb bevorzugen sie häufig eine Freileitung gegenüber einem Erdkabel.

Ein großer Teil der für Teilerdverkabelung infrage kommenden Flächen sind landwirtschaftliche Nutzflächen. Ein Beispiel: Im Vorhaben Raesfeld werden rund 90 % der Flächen landwirtschaftlich genutzt. Gleichwohl hängt die konkrete Verteilung immer von konkreten räumlichen Gegebenheiten ab. Aufgrund der fehlenden Betriebserfahrungen auf vergleichbaren Flächen sind die Eigentümerinnen bzw. deren Bewirtschafterinnen sehr sensibel gegenüber Eingriffen in die Bodenstruktur. Sie sind besorgt über mögliche Auswirkungen auf Quantität und Qualität des Ernteertrages, insbesondere durch die durch Erdkabel befürchtete Bodenerwärmung. Folglich ist den betroffenen Eigentümerinnen der Bodenschutz während der Bau- und Betriebsphase besonders wichtig – das gilt im Übrigen auch schon für Probebohrungen. Ein intensiver Austausch mit den Betroffenen und eine umfassende Information vor Ort sind erforderlich. Die Erfahrungen aus dem Dialog mit Landwirtinnen, Eigentümerinnen im Vorhaben Raesfeld zeigen, dass es sinnvoll und wichtig ist, einerseits deren Befürchtungen Landwirtinnen (u. a. Ertragsausfall im Trassenverlauf, ungleiche Bestandsentwicklung, Abreifung, erhöhter Schädlingsdruck sowie erhöhtes Aufkommen Ackerwildkräuter und massive Verringerung des Bodenwassers) systematisch zu thematisieren. Andererseits werden Ertragsseinbußen während der Bauzeit ausgeglichen.

Erste Erfahrungen der landwirtschaftlichen Nutzung in Raesfeld lassen vermuten, dass es zu keinen darüber hinausgehenden Ertragsausfällen und wesentlichen Bodenveränderungen kommen wird. Ziel des projektspezifischen Bodenschutzkonzeptes ist die möglichst uneingeschränkte Nutzung der vorwiegend landwirtschaftlich genutzten Flächen nach der Baumaßnahme. Den Erfolg dieser



bodenschonenden Bauweise bestätigen ertragskundliche Messungen verschiedener gängiger landwirtschaftlicher Kulturen auf Erdkabeltrassen sowie auf experimentellen Versuchsflächen. Insgesamt verdeutlichen die Versuche, dass ein Anbau von regulären Feldfrüchten im Bereich der Erdkabeltrassen ohne weitere Einschränkungen möglich ist, solange sie durch ihr Wurzelwerk und dessen Struktur die Schutzrohranlage nicht gefährden. Durch die bisherigen Erhebungen ergaben sich keine Hinweise auf mögliche Ertragssteigerungen oder -einbußen. Detailliertere Untersuchungen werden momentan in Raesfeld auf den Amprion Erdkabel-Pilotstrecken durch die Landwirtschaftskammer NRW durchgeführt und ausgewertet. Allerdings gilt „Ein Jahr ist kein Jahr“. Ob es zu einer Ertragsminderung im Vergleich zu unbeeinflussten Standorten durch eine Erdkabeltrasse kommt, werden erst die Folgejahre zeigen. Neben dem Erdkabel spielen auch weitere standortspezifische Faktoren eine Rolle (Bodenverhältnisse, Klima). Im Frühjahr/Sommer 2019 gab es sehr geringe Niederschläge, sodass es in der Folge zu Trockenstress und Maisbeulenbrand kam. Derzeit sind daher noch keine validen Aussagen zu den konkreten Auswirkungen des Erdkabels möglich. Erste Zwischenergebnisse zeigen jedoch, dass die Erträge insgesamt regionsüblich sind, geringfügige Unterschiede können an hydrologischer Variabilität oder Bodenüberhöhungen liegen: letztere haben auch die Einsaat beeinflusst. Daher gilt es, die weiteren Ergebnisse abzuwarten und diese auszuwerten. Es ist notwendig, die Technik zu erproben, um die Versorgungssicherheit uneingeschränkt zu gewährleisten. Wichtig ist aber auch, dass die mit der Teilerdverkabelung verbundenen Auswirkungen auf die einzelnen Schutzgüter und Belange (insbesondere Boden, Tier und Pflanzen, Landwirtschaft) fachwissenschaftlich noch nicht hinreichend untersucht sind und deshalb belastbare, einer Zulassungsentscheidung zugrunde zu legende Auswirkungsprognosen erschweren.

Bezüglich der von Landwirtinnen und Pächterinnen häufig befürchteten Bodenerwärmung durch Erdkabel zeigen die bisherigen Ergebnisse, dass die Temperatur oberhalb der Erdkabel schnell abnimmt und in den oberen Bodenschichten auch bei dauerhafter maximaler Auslastung kaum Temperaturunterschiede zu messen sind. Die jahreszeitlichen und wetterbedingten Temperaturschwankungen beeinflussen die Bodenschichten deutlich stärker als die Wärmeemissionen des Erdkabels. Durch die Verwendung von geeigneten Bettungsmaterialien findet zudem eine ideale Wärmeableitung statt. Entsprechende Modellierungen zeigen, dass die Wärmezonen und die entsprechende Ausbreitung im Boden räumlich begrenzt und im Oberboden, selbst unter ungünstigen Bedingungen, nur gering ausgeprägt sind. Das bestätigt bisher auch das Amprion-Temperatur-Versuchsfeld in Raesfeld, das zusammen mit der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg angelegt wurde und die Temperaturschwankungen in unterschiedlichen Bodentiefen konstant überwacht. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass auch betriebsbedingte Änderungen der Bodenfeuchte über dem Erdkabel nach derzeitigem Stand ausgeschlossen werden können.

#### **Details zur Amprion Teilerdverkabelung in Raesfeld/Borken**

Zwei Stromkreise mit zwei Erdkabeln je Phase, d. h. sechs Erdkabel je Stromkreis; jeder Stromkreis ist separat in einem Graben installiert

Erdkabel mit 380-kV Nennspannung (umgangssprachlich „380-kV-Erdkabel“)

Legetiefe der Erdkabel etwa 1,9 m; Grabensohllentiefe 2,15 m

Achsabstände je Graben: drei Erdkabel mit 0,6 m; Abstand zu den zweiten 3 Erdkabeln 2,1 m; Abstand der in der Trasse innenliegenden Erdkabelschutzrohre zum Nachbargraben 9,65 m (alle Angaben sind Abstände Achse–Achse)

Bodenbeschaffenheit: tonig, schluffig, sandig; in Raesfeld schnell und oft wechselnd, in Borken etwas homogener

Raesfeld: Schutzstreifenbreite 22,6 m; Baubedarfsfläche 41,5 m

Borken: Schutzstreifenbreite 22,6 m; Baubedarfsfläche 45,0 m

**Phasen des Amprion Pilotprojekts 380-kV-Erdkabel Raesfeld:**

Planungsphase 2012-2014, Ausführungsphase/Bau 2014/2015, Probetrieb Erdkabel seit 2016

Rekultivierung/Monitoringphase (Bodenökologie/thermische Auswirkungen und Ertragskunde/pflanzenbauliche Versuche) seit 2015; Versuch über Bewirtschaftungsperioden 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021



Abbildung 1: Beispiel für Entnahme der Bodenproben sowie für Bodenstruktur in Löss/Sandlösslandschaft

Gespräche mit Landwirtinnen, etwa im Vorhaben EnLAG16 Abschnitt NRW, haben gezeigt, dass eine weitere Sorge ist, dass die notwendigen Standorte der Kabelübergabestationen (KÜS) bzw. der damit einhergehende Flächenbedarf i. d. R. dauerhaft ist. Klar ist, dass die Fläche, auf der die KÜS errichtet wird, der landwirtschaftlichen Nutzung komplett entzogen wird – die Sorgen der Betroffenen sind also berechtigt. Flächenkonkurrenz und abnehmende Flächenverfügbarkeit führen hier also zu einem Konflikt mit Landwirtinnen. Dies gilt insbesondere in dichter besiedelten Gebieten, die von kommunaler Entwicklung (Ausweisung Siedlungs- und Gewerbegebiete) und weiterem Infrastrukturausbau geprägt sind. Landwirtinnen empfinden sich häufig als „Verliererinnen“ in der Gesamtdebatte.

### 4.3 Anwohnerinnen (allgemein)

Anwohnerinnen sprechen sich meistens für Erdkabel aus, da sie damit für sich die visuelle Wirkung einer Freileitung ausschließen können. Gleichwohl greifen unmittelbar an der Trasse lebende Anwohnerinnen Themen wie elektrische und magnetische Felder (EMF) nach wie vor auf und lehnen deshalb Erdkabel ebenfalls ab.

Aus Sicht der Anwohnerinnen bietet eine Teilerdverkabelung die Chance, eine visuelle Beeinträchtigung des Landschaftsbildes zu vermeiden. Besonders kritische Anwohnerinnen bringen ihr Interesse an einer Teilerdverkabelung sehr zeitig und wortstark in der frühen Öffentlichkeitsbeteiligung zu Netzausbauvorhaben in die Debatte ein, sind dabei öffentlich sehr präsent und wirken auf die politische Diskussion ein.

*Fokus: Umgang mit EMF-Themen bei Erdkabelvorhaben*

Häufige Gründe für eine Teilerdverkabelung und gegen eine Freileitung, die von Anwohnerinnen mit Sichtbeziehung zur Trasse eingebracht werden, sind die visuelle Wirkung auf das Landschaftsbild sowie EMF, wobei letzteres als Konfliktthema häufig bestehen bleibt. Angesichts dieser Situation ist es bei jeglicher technischer Ausprägung notwendig, die Anwohnerinnen frühzeitig, noch vor dem formellen Verfahren, zu beteiligen, gleichwohl auch transparent zu erläutern, wie die eingebrachten Hinweise geprüft und entlang welcher Kriterien, u. a. Schutzgut Mensch, in die Planungen integriert werden können. Visualisierungen, Gespräche mit externen Fachleuten und Sachverständigen können dabei helfen, das Thema EMF zu versachlichen (u. a. so umgesetzt bei den Vorhaben Kabeldiagonale Berlin und Freileitung Bertikow - Pasewalk).

Angesichts der tendenziell größeren Siedlungsnähe (EnLAG/BBPlG Kriterien) wird das EMF-Gesundheitsthema bei Erdkabelvorhaben mindestens gleich, wenn nicht sogar intensiver als bei Freileitungsvorhaben behandelt: siehe auch Abbildung 2 zur geplanten 380-kV-Teilerdverkabelung in Wahle - Mecklar, Nähe Göttingen – aufgestellt durch eine Initiative der Anwohnerinnen.



Abbildung 2 „Warntafel“ in der Nähe von Göttingen nach der beginnenden Teilerdverkabelungsplanung der 380-kV-Neubauleitung Wahle - Mecklar (Quelle: Aufnahme eines ÜNB-Mitarbeiters, 2013)

Erfahrungen zeigen, dass in dicht besiedelten Gebieten niedrigschwellige, für alle Interessierten offenstehende Informationsangebote eine gute Möglichkeit bieten, vor Ort über die Baumaßnahmen etc. zu informieren. Aber auch das Abstimmen, Regeln und Bekanntgeben von größeren Straßensperrungen oder intensivem LKW-Verkehr sind rund um Erdkabel- oder Tunnelbaustellen (Schacht) zur Deeskalation noch wichtiger als bei Freileitungen. Die Erfahrung, etwa aus dem Dialog zur Berliner Kabeldiagonale, zeigt: Anwohnerinnen haben oft keine konkreten Vorstellungen von Baustelleneinrichtung und Bauablauf. Oft setzen sich beängstigende Szenarien (in den Köpfen) durch. Neben der Besichtigung von bereits realisierten Baustellen (während und nach dem Bau) sind hier Visualisierungen des Bauablaufs sinnvoll (als Erklärvideo oder als VR-Simulation). Diese Erfahrungen greifen die ÜNB in ihrem Dialog mit Anwohnerinnen auf: 50Hertz plant bspw. für die Bauphase der Berliner Kabeldiagonale (Tunnel) einen umfassenden Baustellendialog. Bei TenneT gehört dies ebenfalls zum festen Bestandteil in den Vorhaben.

#### **4.4 Politik**

Eine klare oder gar einheitliche Positionierung auf Seiten der Politikerinnen zeichnet sich derzeit nicht ab. Je nach Konstellation ergeben sich unterschiedliche Präferenzen.

Die bisherigen Erfahrungen in den Pilotvorhaben zeigen, dass versucht wird die Forderung nach dem Bau einer neuen Höchstspannungsleitungen als Erdkabel auf lokaler Ebene häufig über politische Beziehung durchzusetzen – parallel zum offiziellen Verfahrensweg. Denn allzu oft bestand in den laufenden Pilotvorhaben der Anspruch und der Druck aus Teilen der Bevölkerung, dass Politik „das regeln“ soll, wenn der Vorhabenträger dies nicht im Sinne der Anwohnerinnen tut, die sich für einen TEV-Abschnitt einsetzen. Außer Acht gelassen werden dabei häufig der geltende Rechtsrahmen, technische Notwendigkeiten sowie die Möglichkeiten für die formelle Beteiligung, die das Genehmigungsverfahren für alle Betroffenen bietet. Auf lokaler Ebene setzen sich Politikerinnen häufig im Sinne ihrer Wähler für den öffentlich lautstark geforderten höheren Erdkabelanteil ein und üben Druck auf andere politische Ebenen (Landtag, Bundestag, Bundesministerien) sowie auch auf Genehmigungsbehörden und Vorhabenträger aus.

Gleichzeitig sind auf Landes- und Bundesebene aber auch Politiker aktiv, die eine Erdverkabelung ablehnen, da sich sonst die Kosten, der zeitliche Rahmen sowie die systemische Komplexität der Energiewende und des dazugehörigen Netzausbaus weiter erhöhen. Dies geschieht jedoch weitaus weniger medial und öffentlich wirksam bzw. lautstark.

In ländlich geprägten Regionen wiederum unterstützt die Lokalpolitik durchaus Forderungen der ortsansässigen Landwirtinnen gegen Erdkabel. Teilweise sind Gemeinden deshalb aber auch gespalten, da sich Anwohnerinnen und Landwirtinnen häufig in ihren Interessen gegenüberstehen. Für die Lokalpolitik ist es schwierig, eine klare Position zu beziehen. Wie auch bei Freileitungen zeigen die Erfahrungen aus dem Dialog vor Ort, bspw. im Vorhaben Wahle - Mecklar, dass Bürgermeisterinnen, aber auch Politikerinnen auf Kreis- und Landesebene, frühzeitig über die technischen, rechtlichen und umweltfachlichen Parameter der Entscheidungsfindung zur Teilerdverkabelung nicht nur informiert werden wollen. Es sollte auch mit ihnen ausgelotet werden, welche Form der Öffentlichkeitsbeteiligung und des Dialogs für ihre Gemeinde, die Einwohnerinnen und Landwirtinnen und alle anderen Akteurinnen plausibel und hilfreich sind, damit der rechtliche Rahmen verbindlich eingehalten werden kann. Die Erfahrung aus allen Leitungsvorhaben zeigt, dass Vertrauen in das Verfahren und damit auch die notwendige Verfahrensakzeptanz an das Einhalten geltenden Rechts geknüpft sind.

#### **4.5 Träger öffentlicher Belange (TÖB)**

Jene Träger öffentlicher Belange (TÖB) aus den Bereichen Boden- und Wasserschutz sowie Forst sehen zahlreiche Konfliktpunkte bei Teilerdverkabelungen. Dagegen betrachten Vogelschutzverbände Erdkabel als optimale Möglichkeit, Naturschutzkonflikte in diesem Bereich aufzulösen. Für Naturschutzverbände mit einem breiten Themenspektrum bleibt das Dilemma der minimalen Beeinträchtigung des Naturraums auch bei Teilerdverkabelungen bestehen.

Eine differenzierte Betrachtung der TÖBs (Umwelt, Forst, Gemeinden und Infrastruktur u. a.) ist erforderlich, und der bisherige Austausch zu Teilerdverkabelungen verdeutlicht Konfliktpunkte: Während Naturschutzverbände mit dem Schwerpunkt Vogelschutz sich i. d. R. für Teilerdverkabelung aussprechen, sehen andere Akteurinnen, und vor allem Verbände wie der Forst, darin einen größeren Nachteil. Auch die Themen Boden- und Wasserschutz führen bei diesen Verbänden und TÖBs zu einer kritischen Position gegenüber Teilerdverkabelungen. So wurden beim Vorhaben EnLAG

5 (NDS) mit den zuletzt genannten Akteurinnen zu Themen wie Lagerung der Bodenschichten diskutiert. Erfahrungen daraus zeigen, dass eine frühzeitige kritisch-konstruktive Fachdebatte zu diesem Thema wichtige Hinweise für die spätere Bauphase liefern kann.

Zahlreiche Gemeindeverwaltungen befürchten durch die zunehmende Flächenkonkurrenz im kommunalen Bereich durch den Bau von Erdkabeln, dass sie bei der Entwicklung von bspw. Gewerbeflächen oder Siedlungsgebieten eingeschränkt werden.

#### **4.6 Fazit**

Die Erfahrungen aus den laufenden Pilotvorhaben zeigen bisher: Teilerdverkabelungen sind kein Allheilmittel und tragen nicht per se zu mehr Akzeptanz bei den betroffenen und involvierten Akteurinnen bei. Vielmehr scheinen sich wahrgenommene Betroffenheiten zu verlagern – weg von Anwohnerinnen, die mitunter nicht unmittelbar an der Trasse leben, hin zu Eigentümerinnen, hier vor allem Landwirtinnen. Zugleich dominieren häufig die Anwohnenden (ohne eine direkte Grundstücksbetroffenheit) weiter die öffentliche Debatte, formulieren über eine starke mediale Präsenz ihre Positionen und Interessen. Für eine abschließende Bilanz zur Akzeptanz bei Anrainern sind die bisherigen Erfahrungen aus den Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung der ÜNB noch nicht umfassend genug. Gleichwohl zeigen sie, dass Erdkabel zu einer größeren Akzeptanz in der breiten Öffentlichkeit führen können, jedoch nicht bei allen Anspruchsgruppen, schon gar nicht bei unmittelbar betroffenen Grundstückseigentümerinnen und Landwirtinnen. Die Beschleunigung der Verfahren mit Teilerdverkabelung, ist (bislang) ausgeblieben. Vielmehr wurden zusätzliche Verfahrensschritte und ein intensiver Dialog nötig. Die Praxis zeigt, dass die Abschnitte für Teilerdverkabelung der Pilotvorhaben in Planung und Bau hinter den Abschnitten für Freileitungen hinterherhinken.

## **5 Genehmigungsverfahren und Umwelt**

### **5.1 Erfahrungen zu Auswirkungen auf Umwelt**

Erfahrungen aus den Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung haben gezeigt, dass die Planung und Genehmigung von TEV-Abschnitten grundsätzlich umfangreicher und komplexer sind als bei einer Freileitung.

Im Gegensatz zur Freileitung müssen nicht nur einzelne Maststandorte und Überspannungen von Flächen geplant werden. Stattdessen erfolgt ein durchgehender Eingriff in die Grundstücksflächen und Böden entlang der Trasse auf einer Breite von zunächst 45 m bis zu 60 m. Hinzukommen außerdem zahlreiche Querungen von vorhandener Infrastruktur, Gewässern und sensiblen Flächen in offener und geschlossener Bauweise. Betroffen von diesen Eingriffen sind Schutzgüter aller Art.

In der Bauphase von Erdkabeln kommt es zu einem wesentlich größeren Eingriff in die UVP-Schutzgüter, die lokale Artenvielfalt und Natura 2000 Gebiete. Andererseits kann die Teilerdverkabelung kritische Eingriffe und damit verbundene Konflikte verhindern oder abmildern. Diese Auswirkungen/Eingriffe sind vor bzw. im Genehmigungsverfahren zu prüfen, darzulegen und abzuwägen.

#### **5.1.1 UVP-Schutzgüter**

Bei der Planung von Höchstspannungsfreileitungen sind insbesondere die Schutzgüter Menschen, Pflanzen und Tiere sowie Landschaft zu betrachten. Bei Erdverkabelung sind zusätzlich zu diesen Schutzgütern die Schutzgüter Boden und Wasser von besonderer Relevanz, weil der Eingriff dort deutlich größer ist. Weiter unterscheiden sich Freileitungen und Erdkabel besonders in den bau- und anlagenbedingten Beeinträchtigungen.

Während beim Erdkabel die baubedingten Wirkungen i. d. R. am schwerwiegendsten ausfallen, rücken diese bei der Freileitung eher in den Hintergrund. Bei Freileitungen überwiegen wiederum die dauerhaften bzw. anlagebedingten Auswirkungen durch die Verlegung oberirdischer Leitungen in Form von Flächeninanspruchnahme und Sichtbarkeit der Masten auf die Schutzgüter Menschen, Pflanzen und Tiere. Gleiches gilt jedoch auch für die Standorte der Kabelübergabestationen (KÜS), welche an den Start- und Endpunkten errichtet werden müssen. Die Auswirkungen dieser Anlagen sind bei TEV-Abschnitten ebenfalls zu berücksichtigen.

Die Wirkfaktoren und die Auswirkungen auf die Schutzgüter des UVPG durch Drehstrom-Erdkabel werden in mehreren Veröffentlichungen ausführlich jenen von Freileitungen schutzgutbezogen und schutzgutübergreifend gegenübergestellt. Diese Einstufungen werden durch die Erfahrungen aus den aktuellen Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung bestätigt.

Durch den Einsatz von geschlossenen Verlegeverfahren können Umweltauswirkungen gerade bei besonders sensiblen Schutzgütern/Schutzgebieten (z. B. FFH-Gebieten) minimiert werden. Die damit verbundenen Mehrkosten in Bezug auf die zu gewährleistende technische und wirtschaftliche Effizienz (vgl. § 4 Abs. 2 BBPlG) müssen vertretbar sein.

Die Auswirkungen auf UVP-Schutzgüter werden als Teil der Abwägung zwischen Erdkabel und Freileitung im Genehmigungsverfahren berücksichtigt. Eine Teilerdverkabelung kann hier helfen, Konflikte und Auswirkungen zu reduzieren. Im Verfahren müssen Mehraufwände für diese Abwägung eingeplant werden.

### 5.1.2 Artenschutz

Ebenso wie bei der schutzgutbezogenen Betrachtung ist bei der artenschutzrechtlichen Betrachtung zwischen den bau-, anlage- und betriebsbedingten Beeinträchtigungen zu differenzieren.

Baubedingte Beeinträchtigungen entstehen bei der Errichtung von Freileitung oder Erdkabel und bestehen u. a. durch temporäre Flächeninanspruchnahme, Bodenaushub, -abtrag, -einbau, -verdichtung sowie durch das Entfernen von Gehölzen und die Grundwasserhaltung. Dies kann ggf. zu einer temporären oder dauerhaften Beschädigung von Fortpflanzungs- und Ruhestätten, im ungünstigsten Fall auch zu einer Tötung von Tieren führen. Lärm- und Lichtemissionen durch Baustellenflächen, Bauverkehr und Baumaschinen können streng geschützte Arten während der Fortpflanzungs-, Aufzucht-, Mauser-, Überwinterungs- und Wanderungszeiten stören.

Insbesondere die Zerschneidung von Waldgebieten spielt bei beiden Bauklassen für den Artenschutz eine Rolle. Dabei ist ggf. zu prüfen, ob mit dem Entfernen aller Gehölze im Schutzstreifen des Erdkabels bzw. im reduzierten Baufeld (ohne Bodenlagerflächen) oder alternativ mit dem Erhalt der Gehölze bei Freileitungsbauweise, artenschutzrechtliche Konflikte im Einzelfall zu vermeiden sind. Bei Waldschneisen über Erdkabeln ist zu beachten, dass keine tiefwurzelnden Pflanzen über der Leitung angepflanzt werden dürfen. Die Waldfunktion dieser Flächen geht nach Auffassung einiger Bundesländer, wie z.B. Niedersachsen, damit verloren und muss kompensiert werden. Unter Freileitungen besteht lediglich eine Höhenbeschränkung der nachwachsenden Bäume. Die Waldfunktion bleibt hier erhalten.

Anlagenbedingte Beeinträchtigungen wie Flächeninanspruchnahme, die Versiegelung und Teilversiegelung entstehen unabhängig von der Ausführung als Freileitung oder Erdkabel. Je nach Bauklasse wird jedoch dauerhaft unterschiedlich viel Fläche in Anspruch genommen. Dieser Flächenbedarf kann Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen durch eine potenzielle Zerstörung von Fortpflanzungs- und Ruhestätten bzw. von Standorten geschützter Pflanzenarten zur Folge haben.

Im Vergleich zum Erdkabel besitzt die Freileitung durch die Leiterseile (anlagenbedingte Zerschneidung des Luftraumes) sowie die Sichtbarkeit der Masten einen Nachteil. Diese sind als die wesentlichsten Wirkfaktoren für die Avifauna zu nennen, da sie zum einen eine erhöhte Gefährdung für kollisionsgefährdete Vogelarten mit sich bringen. Zum anderen können sie Lebensräume von Vogelarten, die auf vertikale Strukturen empfindlich reagieren, ggf. erheblich beeinträchtigen. Die Masten begünstigen zudem die Prädation durch Greifvögel durch erhöhte Sitzgelegenheiten. Bei einem Erdkabel können diese Konflikte ebenfalls durch die Kabelübergabestationen entstehen. Da diese aber punktuelle Eingriffe darstellen und keine Zerschneidung des Luftraums stattfindet, ist eine geringere Eingriffsintensität zu erwarten.

Betriebsbedingte Auswirkungen bestehen in erster Linie durch das Freihalten von tiefwurzelnden Gehölzen im Schutzstreifen beim Erdkabel sowie die Aufwuchsbeschränkung bei der Freileitung. Welche die eingriffsextensivere Alternative darstellt, ist im Einzelfall zu prüfen und sollte von Faktoren vor Ort, wie Vorkommen relevanter Tier- und Pflanzenarten, Waldzusammensetzung, Altersstruktur, Querungslänge, abhängig gemacht werden.

Weitere betriebsbedingte Auswirkungen sind eher zu vernachlässigen. Die Lärmemissionen bei Freileitungen sind so geringfügig, dass sie keine relevanten Auswirkungen auf die Tiere haben. Auch die Entstehung von elektrischen bzw. magnetischen Feldern im Bereich der Leitungen hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Tiere. Ebenso liegen die Wärmeemissionen durch das Erdkabel hinsichtlich artenschutzrechtlicher Belange unterhalb der Relevanzschwelle.

### 5.1.3 Natura 2000

Nach § 34 Abs. 1 BNatSchG sind Projekte vor ihrer Zulassung oder Durchführung einzeln oder im Zusammenwirken mit anderen Projekten oder Plänen auf ihre Verträglichkeit mit den Erhaltungszielen eines Gebietes von gemeinschaftlicher Bedeutung zu überprüfen.

Ob ein Natura-2000-Gebiet erheblich beeinträchtigt wird, ergibt sich aus den vorhabenbezogenen Wirkfaktoren und aus den Schutz- und Erhaltungszielen des jeweiligen Schutzgebietes.

Zu prüfen ist, ob die Wirkfaktoren zu Veränderungen führen, die zu erheblichen Beeinträchtigungen in Bezug auf die Schutz- und Erhaltungsziele führen. Diese Abschätzung erfolgt für jeden der Wirkfaktoren. Eine Beeinträchtigung ist demnach nicht alleine an die räumliche Nähe zum Vorhaben gebunden, die Nähe bedingt auch nicht in jedem Fall zwingend eine Beeinträchtigung. Viele der Wirkfaktoren stellen nur eine Beeinträchtigung für bestimmte Arten und/oder Lebensraumtypen dar. Werden diese von den einschlägigen Schutz- und Erhaltungszielen nicht erfasst, so liegt auch keine erhebliche Beeinträchtigung des Gebietes im Sinne des § 34 BNatSchG vor.

Aufgrund der Diversität der Schutz- und Erhaltungsziele, welche für das jeweilige Natura-2000-Gebiet festgesetzt wurde, lassen sich pauschale Aussagen nur schwer ableiten. Ob mit der Errichtung einer Freileitung oder dem Bau eines TEV-Abschnitts die Beeinträchtigung der Schutz- und Erhaltungsziele vermieden werden kann, ist jeweils im Einzelfall zu prüfen.

Durch TEV-Abschnitte lässt sich beispielsweise die Beeinträchtigung von kollisionsgefährdeten Vogelarten vermeiden, da auf überirdische Masten und Leitungen verzichtet werden kann. Im Gegenzug sind baubedingte Umweltauswirkungen einer Erdkabelbaustelle erheblich größer, da durch die entsprechende Bauzeit bzw. die umfangreichen Erdbewegungen die Beeinträchtigungen entsprechend schwerwiegend ausfallen und die Schutz- und Erhaltungsziele beeinträchtigt werden können. Demnach ist zu prüfen, ob und wie durch die Bauphase und den Betrieb die Schutz- und Erhaltungsziele des Natura-2000-Gebietes negativ beeinträchtigt werden.

Bei FFH-Gebieten, deren Schutz sich auf Waldbereiche beziehen, kann sich die Teilerdverkabelung ebenso als nachteilig erweisen, sofern keine Unterquerung in geschlossener Bauweise (HDD) möglich ist. Beim Bau einer Freileitung können in der Regel die Waldbereiche erhalten bleiben, wenn lediglich eine Aufwuchsbeschränkung besteht. In bestimmten Fällen kommt ggf. eine Überspannung von Waldbereichen in Frage.



## 5.2 Raumordnung

Die Raumordnung nach Raumordnungsgesetz des Bundes (ROG) ist die erste Stufe des meist zweistufigen Genehmigungsprozesses für Leitungsbauvorhaben. Ziel ist die Festlegung eines Planungskorridors für das Vorhaben, der auf Basis einer Raumanalyse und Variantenprüfung ermittelt und genehmigt wird. Innerhalb dieses Planungskorridors erfolgt anschließend die Planung der Antragstrasse für das Planfeststellungsverfahren (Verwaltungsverfahrensgesetz), die zweite Stufe des Genehmigungsverfahrens.

Die Erfahrungen aus den Pilotvorhaben zeigen, dass die Option von Teilerdverkabelungsbereits im Stadium der Raumordnung starken Einfluss auf die Planung und Findung des Trassenkorridors und damit auch den Verlauf des Genehmigungsverfahrens nimmt.

Ein Raumordnungsverfahren (ROV) mit der Option auf Teilerdverkabelung ist komplexer und aufwändiger, da bei der Korridorfindung und der von der Raumordnungsbehörde vorzunehmenden Abwägung (einschließlich Prüfung von Alternativen) bereits eine Prüfung der Realisierbarkeit des Erdkabels durchgeführt werden muss. Dies erfordert frühzeitige Detailplanungen und die Untersuchung möglicher Auswirkungen (z. B. bautechnische Aspekte, Immissionen, Sondergutachten). Bei einer reinen Freileitungsplanung ist die Realisierbarkeit in einem Planungskorridor einfacher zu planen und zu prüfen.

Die bisherigen Erdkabel-Pilotvorhaben zeigen, dass bereits in der Raumplanung Trassenverläufe detailliert untersucht werden müssen. In potenziellen TEV-Abschnitte sind intensive Untersuchungen, Planungen und Vorarbeiten zum Teil auf einzelnen Grundstücken erforderlich.

Ein Beispiel dafür sind Baugrunduntersuchungen. TEV-Abschnitte sind vom Baugrund wesentlich stärker betroffen als Freileitungen. Die Realisierbarkeit kann ohne Voruntersuchung nicht sichergestellt werden. Für einen TEV-Abschnitt sind Probebohrungen (z. T. in sehr geringen Abständen von unter 100 m) notwendig, welche die Betretung mehrerer zusammenhängender Flurstücke im Vorfeld erfordert. Einzelne, nicht vorhandene Betretungsrechte behindern die Gesamtplanung stärker als bei Freileitungen. Durch die Vorarbeiten kann es schon sehr früh zum Konflikt mit Betroffenen kommen. Eigentümerinnen äußern ihren Unmut häufig dadurch, dass sie Vorhabenträger bzw. Dienstleistern das Betreten des Grundstücks verweigern, wodurch die für die Detailplanung notwendigen Voruntersuchungen erschwert werden. Dies führt bis hin zu Duldungsverfahren für Vorarbeiten nach § 44 EnWG bereits zu einem Zeitpunkt, an dem weder ein Trassenkorridor noch eine Variante feststehen.

Im Ergebnis führt dies zu deutlich umfangreicheren Planungen bzw. Doppelplanungen für zahlreiche Varianten auf Seiten der Vorhabenträger und deren Dienstleister.

Im Verfahren selbst führen die Erdkabeloptionen und damit einhergehende (Detail-)Planungen zu umfangreicheren Diskussionen, einem längeren Abwägungsprozess sowie umfangreichere Verfahrensunterlagen mit Mehraufwand für Behörden und Verfahrensbeteiligten.

Da die Prüfung, Abwägung und Genehmigung von TEV-Abschnitten bei Vorhabenträgern wie auch bei Genehmigungsbehörden im Unterschied zu Freileitungsplanungen bislang noch weniger geübte Praxis ist, kommt es auch in den einzelnen Verfahrensschritten bei allen Beteiligten zu Mehraufwand.

Unbestimmte Rechtsbegriffe und Auslösekriterien für eine Entscheidung über eine Teilerdverkabelung (z. B. ...“technisch und wirtschaftlich effizienten Teilabschnitte“ gemäß EnLAG § 2 Abs. 2 S. 2 und § 4 Abs. 2 BBPlG) erschweren zudem die Erarbeitung von planerischen Varianten. Viele Behörden (insbesondere TöB), Verbände, Politikerinnen und Bürgerinnen setzen die Auslösekriterien für eine Prüfung der Erdkabeloption mit einem Verkabelungsgebot gleich. Dieses

wird teilweise durch Landesrecht (z. B. Niedersachsen: Ziel der Raumordnung sind 400 m Abstand zwischen Innenbereich und Leitungssachse) noch verschärft. Der 200-m-Abstand (Grundsatz der Raumordnung) ist in Niedersachsen als abwägungsrelevanter Grundsatz der Raumordnung entsprechend im Verfahren zu prüfen. In anderen Bundesländern sind andere oder bisher auch keine Festlegungen erfolgt. Bereits in der Variantenprüfung werden so Planungen und Detaildiskussionen zu Abständen einzelner Wohngebäude erforderlich.

Dies erfordert einen erheblichen Zeitaufwand und ist mit den entsprechenden intensiven Diskussionen, sowohl in der Öffentlichkeit, als auch mit den TöB und Genehmigungsbehörden verbunden, da der 200-m-Grundsatz in Niedersachsen von der Öffentlichkeit und einzelnen TöB als "Verkabelungsautomatismus" interpretiert wird. Die entsprechende Diskussion benötigt ihre Zeit und verzögert die Verfahren.

Die Zahl der möglichen Betroffenen ist in der Phase der Raumordnung noch sehr hoch, da der konkrete Trassenverlauf zu diesem Zeitpunkt noch nicht feststeht und mehrere sogenannte großräumige Varianten in Betracht gezogen werden. Vom Bau der 3 km langen Trasse im Vorhaben EnLAG Nr. 5 im Abschnitt 1 waren schlussendlich 21 Eigentümerinnen betroffen. Beteiligt haben sich im Verfahren aber mehrere hundert. Die dadurch mit allen Beteiligten zu führenden umfangreicheren Diskussionen zu Varianten, Erdkabeloptionen und Detailplanungen führen dazu, dass für die Phase der Raumordnung mehr Zeit benötigt wird.

Abhilfe für ein geordnetes und planbares Durchlaufen der ROV bei Erdkabeloptionen kann ein methodisches Vorgehen schaffen. Das abgestimmte Vorgehen in Niedersachsen durch die mittlerweile vorliegende „Arbeitshilfe zur Teilerdverkabelung im Drehstromnetz in Niedersachsen“ ist möglich und hilfreich.

Die Diskussion des 200-m-Grundsatzes in Niedersachsen bleibt jedoch nach wie vor, insbesondere da dieser ein abwägungsrelevanter Grundsatz ist und dieser in der Öffentlichkeit sowie von einzelnen TöB als "Verkabelungsautomatismus" interpretiert wird. Auch hier benötigt die Diskussion ihre Zeit und verzögert die Verfahren.

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung grundsätzlich mehr Zeit für Planung und Genehmigung benötigen. Insbesondere die komplexen Variantenprüfungen, die stetige Diskussion um Verkabelungsanteile, die durch unbestimmte Rechtsbegriffe erst ermöglicht werden, sowie die Findung der KÜS-Standorte führen zu einem erheblichen Argumentationsaufwand. Bestehende Regelungen zu Auslösekriterien erweisen sich als hilfreich, die Tendenz zur Übergewichtung des 200-m-Grundsatzes in den Verfahren ist jedoch erkennbar. Die erforderliche (bau-) technische Vorplanung/Prüfung zur Realisierbarkeit von TEV-Abschnitten erhöht die Aufwände ebenfalls. Insgesamt führen diese Umstände zu erheblichen Zeitverzögerungen bereits im ROV.

### **5.3 Planfeststellung**

Im Genehmigungsprozess schließt die Planfeststellung an die Raumordnung an. Der aus mehreren Varianten festgelegte Trassenkorridor der Raumordnung ist Gegenstand der Planfeststellung, welcher sich mit Einreichung der Planunterlage durch den Vorhabenträger auf den eigentlichen Leitungsverlauf konkretisiert.

Ein zielgerichtetes Planfeststellungsverfahren (PFV) erfordert von Beginn an klare Kriterien, da eine umfangreiche Detailplanung (Trassenverlauf, direkte Betroffenheit, Auswirkungen auf Betroffene, Schutzgüter) durchgeführt wird. Der Umfang der einzureichenden und abzuwägenden Unterlagen ist für TEV-Abschnitte umfangreicher. „Erdkabel-Grundsatzdiskussionen“ im Verfahren haben eine

Verzögerungswirkung, da Varianten, Alternativplanungen und Änderungen das erneute Durchlaufen der „Planungsspirale“ erfordern.

Es besteht keine abschließende Planungssicherheit aus der Raumordnung bzgl. der festgelegten TEV-Abschnitte. So kann die Behörde auch nach Prüfung der Engstellen im Raumordnungsverfahren im PFV zusätzliche TEV-Abschnitte anweisen.

Die Kriterien zur Auslösung einer Prüfung einer Teilerdverkabelung in einem Trassenbereich sind zwar gesetzlich fixiert, die Anwendung in der Praxis für Behörden, Vorhabenträger und Betroffene ist jedoch sehr schwierig. Bereits der Aufwand zur Prüfung der Auslösekriterien (200 m / 400 m Puffer vs. Bau in Bestandstrassen etc.) ist ausgesprochen komplex (u. a. detaillierte Betrachtung einzelner Sichtbeziehungen). Hier sind intensive Gespräche mit der Planfeststellungsbehörde zu führen bevor Klarheit über die weitere Planung herrscht.

Es kommt in fast allen Vorhaben zur Kollision von Verfahren, inkl. rechtlicher Rahmenbedingungen, mit der Politik und Öffentlichkeit. Das Ergebnis ist für alle Beteiligten oft nicht vorhersehbar.

**EnLAG 2, Ganderkesee - Wehrendorf:**

Im Planfeststellungsverfahren des TenneT-Abschnitts von Ganderkesee nach St. Hülfe sind 7 mögliche Erdkabelabschnitte auf 66 km identifiziert und in 2 Varianten (2 oder 7 Erdkabelabschnitte) geplant worden. Nach einer komplexen Abwägung durch die zuständige Behörde wurden 4 Abschnitte planfestgestellt. Im Ergebnis bedeutete dies, eine erneute Planung einer Mischvariante und weitere Planänderungen nach Beschluss, um die Trasse bauen zu können.

Eine weiteres Problem besteht bei der Trassenfindung im Planfeststellungsverfahren (PFV) durch die vermehrten Zwangspunkte bei einer Teilerdverkabelung. Die für jeden TEV-Abschnitt erforderlichen Kabelübergabestationen (KÜS) und deren mögliche Standorte sind begrenzt, räumlich stark fixiert und erfordern einen Flächenerwerb. Dies ist häufig, insbesondere bei den Grundstückseigentümerinnen, umstritten. Der frühzeitige Kauf der Grundstücke gestaltet sich als schwierig. Auch daher sind die Standorte vermehrt Bestandteil der Planfeststellung (zwecks enteignungsrechtlicher Vorwirkung). Die notwendige Enteignung entsprechender Anlagegrundstücke ist bis dato noch nicht umgesetzt worden.

**EnLAG 16, Hesseln (NRW) - Landesgrenze (NRW/NDS):**

Für voraussichtlich 4 km Teilerdverkabelung wurden 11 KÜS-Standorte für 2 KÜS hinsichtlich ihrer Erreichbarkeit mit Schwerlastverkehr und Flächenbedarf entsprechend der Größe der Anlage geprüft. Die Topographie der Region, diverse Schutzgüter sowie die Bodenbeschaffenheiten stellen eine große Herausforderung für die Planung und Umsetzung des Erdkabelabschnitts sowie der KÜS dar.

Die 11 Vorschläge für Standorte einer KÜS haben sich aus dem Planungsdialog Borgholzhausen ergeben ([www.planungsdialog-borgholzhausen.de](http://www.planungsdialog-borgholzhausen.de)). Allerdings zeigt sich auch hier, dass es einen deutlichen Konflikt zwischen den Erdkabelbefürworterinnen aus Anwohnerinnen und der Bürgerinitiative auf der einen Seite sowie den Freileitungsbefürworterinnen aus Grundstückseigentümerinnen und Landwirtinnen auf der anderen Seite gibt. Diejenigen, die eine Teilerdverkabelung fordern, möchten jedoch keine der dazugehörigen KÜS in Sichtweite haben.

Das Projekt befindet sich in der Vorbereitung des Planfeststellungsverfahrens (geplante Einreichung 2020).

Für Erdkabelabschnitte sind die Planung und der Antrag auf Planfeststellung sehr viel umfangreicher. Beispiele hierfür sind:

- Auswirkungen auf die Schutzgüter
- Bauablauf, Schutzmaßnahmen im Bau
- Baulogistik, Wegekonzept, Straßennutzung (Tiefbau verlangt ein Vielfaches an Transporten zur Erdkabel-Baustelle vs. Baustelle für einen Freileitungsmast)
- Umfang und erhöhte Anforderungen bei den Nebenbestimmungen durch den größeren Eingriff
- Umfangreiche Sonderuntersuchungen (Baulärbetrachtung, EG Wasserrahmenrichtlinie, Prüfung von Zuwegungen, archäologische Prospektionen)

Bei Sonderbauwerken (größere Querungen von Infrastruktur, Tunnel, Bohrungen) sind neben der Planfeststellung zusätzliche erforderliche Genehmigungen gesondert zu beantragen oder in das Verfahren zu integrieren. Es gelten hier zusätzliche Nebenbestimmungen/Auflagen aus den jeweiligen fachrechtlichen Anforderungen.

Die Erfahrungen zeigen, dass aufgrund von Umfang und Detailgrad der frühzeitig durchgeführten Planungen bei TEV-Abschnitten Planänderungen vor und nach dem Planfeststellungsbeschluss den Regelfall darstellen. Je nach Umfang erfordern diese Änderungen die erneute Beteiligung der direkt Betroffenen oder sogar der Öffentlichkeit.

Auch in laufenden Genehmigungsverfahren ergehen Prüfaufträge für potenzielle Erdkabelvarianten, deren Erstellung insgesamt deutlich mehr Zeit benötigt als die Prüfung einer reinen Freileitungsvariante. Hierdurch ergibt sich eine längere Verfahrensdauer der Genehmigungsverfahren in bereits laufenden Projekten.

#### **5.4 Abwägungsprozess Freileitung – Teilerdverkabelung in Niedersachsen**

Grundsätzlich sind Teilerdverkabelungen in den gesetzlich festgelegten Pilotvorhaben als Alternative zu einer Freileitung in Abschnitten möglich, wenn gewisse Voraussetzungen („Auslösekriterien“) bestehen und ein Erdkabel in einem Abschnitt nach der Abwägung im Planungs- und Zulassungsverfahren die bessere Alternative darstellt.

Die bisherigen Pilotvorhaben zur Teilerdverkabelung für Leitungen zur Höchstspannungs-Drehstrom-Übertragung sind zu unterschiedlichen Zeitpunkten planfestgestellt worden bzw. befinden sich gegenwärtig in unterschiedlichen Planungsphasen. Daher haben sich im Zeitverlauf seit Einführung der Teilerdverkabelung die entsprechenden Kriterien weiterentwickelt, sodass diese nicht 1 : 1 auf alle Projekte übertragbar sind. Nachfolgend werden die Erfahrungen aus der derzeitigen Praxis bei Vorhaben im Land Niedersachsen erläutert.

Die Planungen und erste Abwägungen zu Erdkabeln/Freileitungen erfolgen bei den Vorhabenträgern bereits während der Raumanalyse der möglichen Trassenkorridore vor dem ROV und ziehen sich bis zur Einreichung der finalen Planfeststellungsunterlagen hin.

Die Vorhabenträger orientieren sich an Arbeitshilfen zur Teilerdverkabelung, die gemeinsam mit den zuständigen Behörden entwickelt wurden (Arbeitshilfe zur Teilerdverkabelung im Drehstromnetz in Niedersachsen, 2017).

Beim Vorliegen der Auslösekriterien gemäß EnLAG/BBPIG wird in den sogenannten Engstellensteckbriefen dezidiert die Möglichkeit der Teilerdverkabelung geprüft (vgl. u. a. EnLAG Nr. 16 und BBPIG Nr. 6). Für jedes Vorhaben sind folglich aufgrund der örtlichen Gegebenheiten und insbesondere der Landesgesetzgebung unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen.

Insbesondere Abstandsvorgaben der jeweiligen Landesplanung weisen hierbei eine unterschiedliche Qualität auf. Während die 200 m Abstände zu Wohngebäuden im Außenbereich in Niedersachsen als

sogenannter Grundsatz der Raumordnung definiert sind, gelten die Abstände von 400 m zum Innenbereich (jeweils in ihrer konkreten Ausgestaltung gem. LROP) in Niedersachsen als Ziel der Raumordnung. Grundsätze und Ziele der Raumordnung unterscheiden sich in ihrer Bindungswirkung.

Grundsätze der Raumordnung sind in Abwägungs- oder Ermessensentscheidungen zu berücksichtigen. Sie können damit (bei entsprechender Begründung) in einem Abwägungsvorgang gegenüber anderen Grundsätzen oder gegenüber abwägungsrelevanten Fachbelangen auch unterliegen. Ziele der Raumordnung – hier die 400-m Abstände zum Wohnen im Innenbereich – sind hingegen abschließend abgewogene Festlegungen und daher strikt zu beachten. Sie können nur durch ein Zielabweichungsverfahren überwunden werden, sofern nicht bereits die gesetzlichen formulierten Ausnahmetatbestände greifen. Die Beachtungspflicht stellt hierbei im Vergleich zu der Berücksichtigungspflicht die strengere Form der Bindungswirkung dar. Damit hat eine Unterschreitung des 400-m-Abstands in der durchzuführenden Prüfung ein besonderes Gewicht. Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass auch für die 200-m-Abstandsvorgabe behördlicherseits eine Überwindung im Rahmen der Abwägung nur in Ausnahmefällen in Betracht kommt. Selbst wenn nur ein Gebäude derart betroffen ist, geht eine behördliche Tendenz zu einer Teilerdverkabelung. Diese Tendenz kann in der Abwägung zumeist nur bei Vorliegen überwiegender anderer atypischer Gründe überwunden werden.

Darüber hinaus ist bei der Planung von Leitungstrassen ferner der Grundsatz der Raumordnung zu berücksichtigen, die sogenannte Vorbelastung und die Möglichkeiten der Bündelung mit vorhandener technischer Infrastruktur zu berücksichtigen. Bei der Weiterentwicklung des Leitungstrassennetzes hat die Nutzung vorhandener, für den Aus- und Neubau geeigneter Leitungstrassen und Leitungstrassenkorridore Vorrang vor der Festlegung neuer Leitungstrassen und Leitungstrassenkorridore (Ziel der Raumordnung).

Vom Vorhabenträger wird in jedem Einzelfall eine Abwägung insbesondere zwischen den Schutzgütern gemäß UVPG und den regional- und landesplanerischen Vorgaben ausgearbeitet. Sowohl die Prüfung auf einen potenziellen TEV-Abschnitt, als auch der entsprechende Variantenvergleich erfordern somit einen erheblich umfangreicheren Planungsaufwand, als es bei einer reinen Freileitungsplanung der Fall ist. Auch müssen diese Planungen im Wesentlichen bereits in der Phase der Raumordnung erfolgen, da die Option Erdkabel die Entscheidung für einen Trassenkorridor maßgeblich beeinflussen kann, aber vorab auch immer auf technische Realisierbarkeit geprüft werden muss. Zudem endet das ROV mit einer gutachterlichen Stellungnahme der zuständigen Behörde (landesplanerische Feststellung als Ergebnis des ROV), welche sich zumeist bereits für eine Bauweise ausspricht. Gleichwohl wurden in der Regel nicht alle Belange in einer Untersuchungstiefe betrachtet, die der späteren Planfeststellung entspricht. Zwar ist es möglich, von dieser Stellungnahme abzuweichen. Insoweit entfaltet das Ergebnis des ROV keine strikte Bindungswirkung, da dieses nach § 4 Abs. 1 Satz 1 ROG als sonstiges Erfordernis der Raumordnung in die Abwägungs- oder Ermessensentscheidung des nachfolgenden Planfeststellungsverfahrens lediglich einzustellen ist. Doch es ist zu befürchten, dass dies den Begründungsaufwand im Planfeststellungsverfahren deutlich erhöhen wird und sich so zeitlich negativ auf die Erstellung der Planunterlagen auswirkt. Daraus folgt die Notwendigkeit der Durchführung vertiefter und aufwändiger Variantenvergleiche.

Im Antrag auf Planfeststellung legt der Vorhabenträger das Ergebnis seiner Planung und Abwägung zu den TEV-Abschnitten dar. Erst zu diesem Zeitpunkt stehen der beantragte Trassenverlauf, Abstände zu Wohnbebauung und weitere der relevanten Abwägungskriterien in einer detaillierten Planungstiefe fest. Die finale Entscheidung, ob in einem Abschnitt eine Teilerdverkabelung planfestgestellt wird, ist dann von der behördlichen Abwägung im Zulassungsverfahren

(einschließlich fachplanerischer Alternativenprüfung) abhängig. Sie steht damit erst fest, wenn der Planfeststellungsbeschluss bestandskräftig ist.

Für alle Verfahrensbeteiligten gilt damit, dass sich die Entscheidung zwischen Freileitung und Teilerdverkabelung von der Raumanalyse bis zum Planfeststellungsbeschluss zieht. Planung und Genehmigungsverfahren werden nach den bisherigen Erfahrungen in den Pilotvorhaben dadurch umfangreicher und länger.

Derzeit werden Bautechnik und der spätere Betrieb von TEV-Abschnitten bei der Abwägung auf Behördenseite noch nicht so stark berücksichtigt wie andere Genehmigungs- und Planungskriterien, da bisher hier nur wenige bzw. keine Erfahrungen vorliegen. Dies gilt, obwohl derartige Umstände bei der Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Effizienz eines Erdkabelabschnittes von hoher Bedeutung sind. Diesem Kriterium wird im Genehmigungsverfahren noch kein hinreichendes Gewicht beigemessen. Die methodischen Vorgehensweisen zur Abwägung und der Entscheidungsfindung pro/contra TEV-Abschnitt werden sich daher auch in Zukunft noch mit jedem Projekt weiterentwickeln.

## **5.5 Fazit**

In den Pilotvorhaben des EnLAG und BBPIG sind Teilerdverkabelungen als zusätzliche Option vorgesehen, um zu erproben, ob in bestimmten Bereichen eine Teilerdverkabelung Konflikte mit Umwelt, Mensch und Infrastruktur sinnvoll vermeiden oder entschärfen kann. Als Bestandteil der Genehmigungsverfahren erfordert die Planung und Abwägung dieser Option zusätzliche Aufwände und Zeit, die zukünftig eingeplant werden müssen.

Je länger die Diskussion geführt wird und je später fest steht, ob ein Erdkabel für einen Abschnitt eine Planungsoption ist, desto stärker kommt es zu Mehraufwänden bei allen Beteiligten, zu Verzögerungen und Schleifen im Verfahren.

Klare und sinnvolle Auslösekriterien für die Option einer Teilerdverkabelung sind in den Verfahren hilfreich, damit eine Abwägung zwischen Bauweise gegenüber Systemsicherheit, technisch-wirtschaftlichen Aspekten und alternativen Trassenverläufen schneller getroffen werden kann.

Insgesamt sind Regeln für TEV-Abschnitte eine entscheidende Voraussetzung für Planungssicherheit in den Genehmigungsverfahren. Sie sind daher in den Pilotvorhaben mit den Ländern, Genehmigungsbehörden und Vorhabenträgern weiterzuentwickeln.

## 6 Bauweise und Errichtung

Erdkabel können in verschiedenen Techniken verlegt werden. Ob offen oder geschlossen gebaut wird, ist unter anderem abhängig von den jeweiligen Boden- und Grundwasserverhältnissen sowie den landschaftlichen Gegebenheiten – wenn etwa Flüsse oder Autobahnen gekreuzt werden müssen. Darüber hinaus werden bei der Wahl des Bauverfahrens immer auch umweltrechtliche Aspekte berücksichtigt. Erdverkabelung als Teil einer Stromleitung benötigen eine sogenannte Kabelübergangsstation (KÜS).

### 6.1 Offene Bauweise

Der offene Kabelgraben ist derzeit das Standardbauverfahren. Die Verlegung der Kabel erfolgen in diesem Verfahren vergleichsweise kosteneffizient, schnell und reduziert die Projektrisiken. Die baulichen Eingriffe in Natur und Umwelt sind jedoch am größten aufgrund der Grabendimensionen und des damit verbundenen umfangreichen Bodeneingriffs.

Die Grabendimensionierung wird im Folgenden am Beispiel des Erdkabelabschnitts Borken der Verbindung Dörpen West - Niederrhein dargestellt. Der Trassenabschnitt ist so ausgelegt, dass jeder der beiden Stromkreise eine dauerhaft anstehende elektrische Leistung von jeweils 1.800 MVA übertragen kann. Die Breite des Schutzstreifens der Trasse ist von der konkreten Bauweise abhängig. Im Regelgrabenprofil beträgt die Breite der Baubedarfsfläche etwa 45 m. Der Schutzstreifen hat eine Breite von etwa 23 m, auf dem die Erdkabelanlagen zugänglich und frei von tiefwurzelndem Bewuchs zu halten sind.

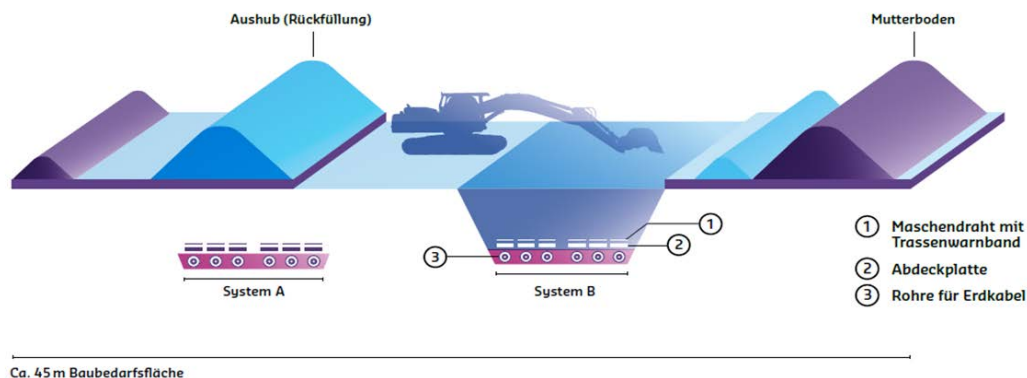


Abbildung 3: Regelgrabenprofil 380-kV-AC mit zwei Gräben und zwölf Erdkabeln (Quelle: Amprion)

Die Baumaßnahme umfasst:

1. Baustelleneinrichtung und Errichtung von Zuwegungen,
2. Tiefbauarbeiten,
  - a. Schichtweiser Aushub der beiden Gräben (zwei parallele Gräben für System A und System B)
  - b. Verlegung von Leerrohren (zwölf Rohre in zwei parallelen Gräben)
  - c. Rückverfüllung der Gräben
3. Kabelzug der zwölf 380-kV-Erdkabel in die Leerrohre,
4. Montage der Muffen (Verbindung der zwölf Erdkabel zur nächsten Sektion) bzw. Verbindung an die Endverschlüsse in die Kabelübergabestationen (KÜS).

Für die Bauausführung werden zunächst die notwendigen Baustraßen und Zufahrten in den Baustellenbereich erstellt und die Bauflächen eingerichtet. Vor Beginn der Arbeiten erfolgt eine

Beweissicherung mit den Eigentümerinnen und die Übergabe der Flächen an die Baufirma. Ertragsausfälle und Flurschäden gegenüber den Pächterinnen/Eigentümerinnen trägt der Vorhabenträger.

Der Aushub der Erdkabelgräben erfolgt mit Baggern. In den ausgewiesenen Baubedarfsflächen wird zunächst der Oberboden abgetragen und bis zur späteren Wiederherstellung in Mieten getrennt vom übrigen Bodenaushub vor Ort gelagert und gesichert. Weitere Schichten werden abgetragen und separat gelagert, um in der ursprünglichen Schichtung wieder eingebaut werden zu können. Der Erdkabelgraben wird bis auf eine Tiefe von 1,5 – 2,0 m ausgehoben.



*Abbildung 4: Offener Erdkabelgraben im Projekt Dörpen - Niederrhein (TenneT)  
Im Hintergrund sind die Leerrohre für die spätere Verlegung im Graben zu sehen.*

Wenn erforderlich, erfolgt eine Grundwasserabsenkung längs der Erdkabeltrasse. Um den Platzbedarf zu reduzieren, wird in der Regel nur ein Graben gleichzeitig geöffnet. Die gegenüberliegende Seite wird als Lagerfläche für Materialien und als Zwischenlager für den geeigneten Bodenaushub genutzt, der zum Wiederverfüllen des Erdkabelgrabens benötigt wird. Der Erdkabelgraben ist in der Regel je nach Standfestigkeit des Bodens und der Verlegetiefe abzuböschten.



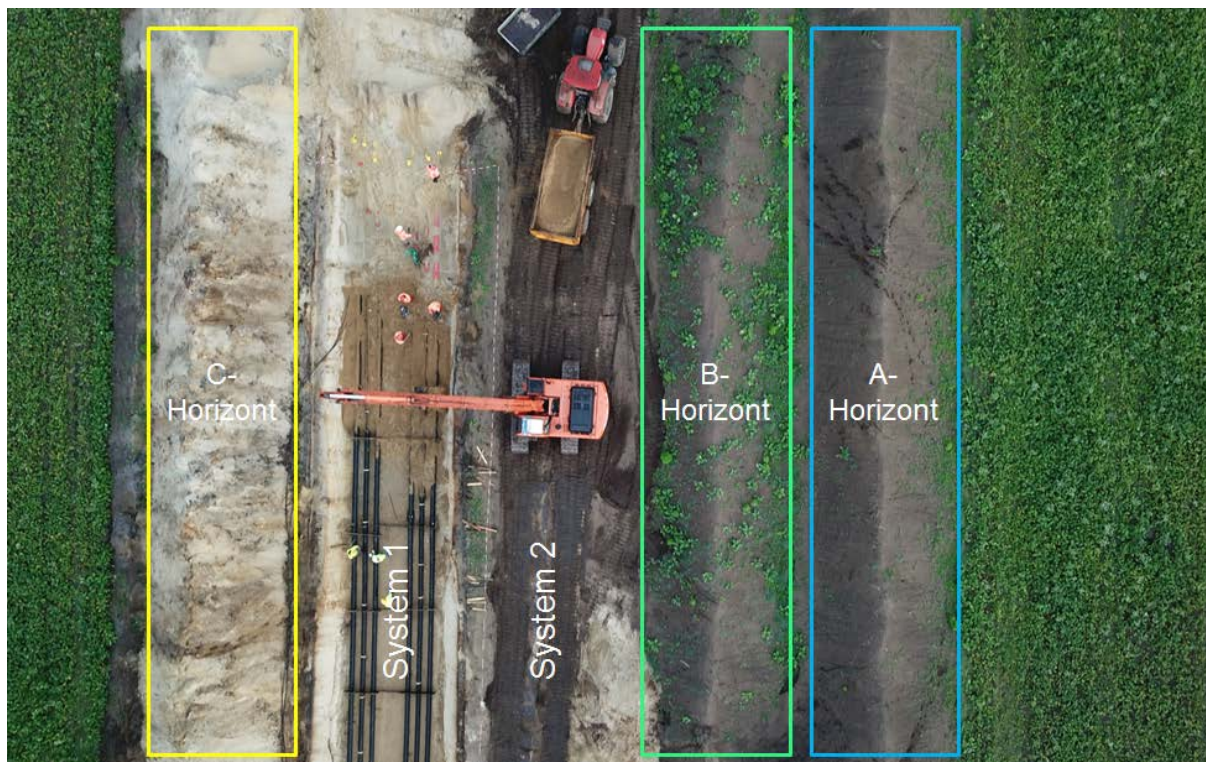


Abbildung 5: Offener Graben in der Bauphase  
 Einseitige Öffnung, Verlegung von Leerrohren, Trennung von Bodenschichten: Oberboden (A-Horizont), untere Bodenschichten (B- und C-Horizont)

Anschließend werden die Schutzrohre für die ersten beiden Erdkabelanlagen des ersten Stromkreises auf einer Seite der Baustraße in den Graben eingebracht. Die Erfahrung zeigt, dass die Bettung der Erdkabelschutzrohre aus Sanden oder aus zeitweise fließfähigem, selbstverdichtendem Verfüllbaustoff (ZFSV) bestehen kann. Der ZFSV kann bei geeigneten Böden aus dem lokalen Bodenaushub hergestellt oder komplett angefahren werden, genauso wie der Bettungssand. Oberhalb der so geformten Rohrleitungszone werden querschnittsschwächere Schutzrohre für Begleitleitungen sowie Trassenschutzelemente eingebracht. Anschließend wird der Erdkabelgraben verfüllt und das Erdkabelsystem des zweiten Stromkreises gebaut. Das eingefüllte Erdreich wird dabei schonend eingebracht, wobei ein späteres Setzen des eingefüllten Bodens berücksichtigt wird (bodenschonende Bauweise). Zum Abschluss der Tiefbaumaßnahmen wird die Baubedarfsfläche wieder in den ursprünglichen Zustand versetzt. Gekappte Drainagen werden fachgerecht wieder verbunden – ein besonderes Anliegen der Landwirtinnen. Nach Fertigstellung der Tiefbauarbeiten erfolgt eine Überprüfung der Flächen durch die Eigentümerinnen/Pächterinnen, Vorhabenträger und Baufirma. Bei erfolgreicher Abnahme wird die Fläche zurück an die Eigentümerinnen gegeben. Aufgrund des Eingriffs und der Bodensetzung kann es in den ersten Ernten nach der Baumaßnahme zu Ertragseinbußen kommen. Diese werden vom Vorhabenträger übernommen und den Bewirtschafterinnen erstattet.



*Abbildung 6: Rückverfüllter Erdkabelgraben nach Verlegung der Leerrohre und Wiedereinbau des Bodens*

Nach Herstellung der Erdkabelschutzrohranlage verbleiben die Muffengruben und der Anschlussbereich in den Kabelübergabestationen (KÜS) geöffnet. Die Muffengruben werden so ausgestattet, dass die wärmebedingte Ausdehnung der Erdkabel vor den eigentlichen Muffen abgefangen wird, um Druck- oder Zugbelastungen auf die Muffen selbst unbedingt zu vermeiden. Die Umgebung der Muffengruben bzw. der Bereiche vor den Endverschlüssen und der Zuwegung werden, je nach Kabelzugkonzept, für Schwerlastverkehr hergerichtet. Auf speziellen Tiefladern werden die Kabelspulen über geeignete Wege zu den Muffenstandorten bzw. zu den KÜS transportiert. Die Abstände zwischen den Muffenstandorten sind abhängig von der elektrotechnischen Auslegung des Erdungskonzepts, den herstellerabhängig produzierbaren Einzellängen sowie dem Transportkonzept der Kabelspulen zur Baustelle. Erdkabel­längen von bis zu 1.100 m zwischen zwei Muffen wurden bereits erfolgreich installiert.



*Abbildung 7: Erdkabeleinzug vom Tieflader an einer Muffengrube*

Nachdem die Erdkabel eingezogen sind, beginnt die Muffen- bzw. Endverschlussmontage. Die Kabelendverschlussgerüste werden vor Beginn der Endverschlussmontage mit einem Montagehilfsgerüst inkl. einer Zeltplane eingehaust, damit die Montage sauber und witterungsunabhängig erfolgen kann. Auch die Muffenbereiche werden vor Montagebeginn witterungsbeständig eingehaust. Nach Abschluss der Baumaßnahmen bleiben die Ausleitungen der Schirmauskreuzung in ober- oder unterflur angeordneten Schränken bzw. Schächten sichtbar.

## 6.2 Spülbohrverfahren „Horizontal Directional Drilling“ (HDD)

Müssen Hindernisse wie andere Infrastrukturen, Flüsse oder schwieriges Gelände gequert werden, kommen geschlossene Bauverfahren zum Einsatz. Das Spülbohrverfahren (Horizontal Directional Drilling, kurz: HDD) ist über größere Längen einsetzbar. Dabei wird der entsprechende Abschnitt in einer größeren Verlegetiefe unterbohrt. So wird eine Öffnung des Bodens an der Oberfläche vermieden. Die größere Legetiefe wirkt sich allerdings negativ auf die Stromtragfähigkeit der Erdkabelanlage aus. Um den Übertragungsanspruch der Erdkabelanlage gewährleisten zu können, sind entsprechende Achsabstände zwischen den Bohrungen notwendig. Außerdem ist dieses Bauverfahren weniger genau, sodass größere Bohrtoleranzen zu berücksichtigen sind. Dadurch sind insgesamt deutlich breitere Trassen erforderlich, gleichwohl weniger sichtbar. Amprion hat diese Technik in den Projekten der Diele-Niederrhein Verbindung (Borken und zukünftig Legden) und in ALEGrO eingesetzt.

Im HDD-Verfahren bohrt eine Horizontalspülbohranlage für jedes der zwölf Erdkabel unterirdische parallele Bohrungen, die mehrere hundert Meter lang sein können. Im Rückzug wird ein Schutzrohr eingezogen, welches später das Erdkabel aufnehmen kann.

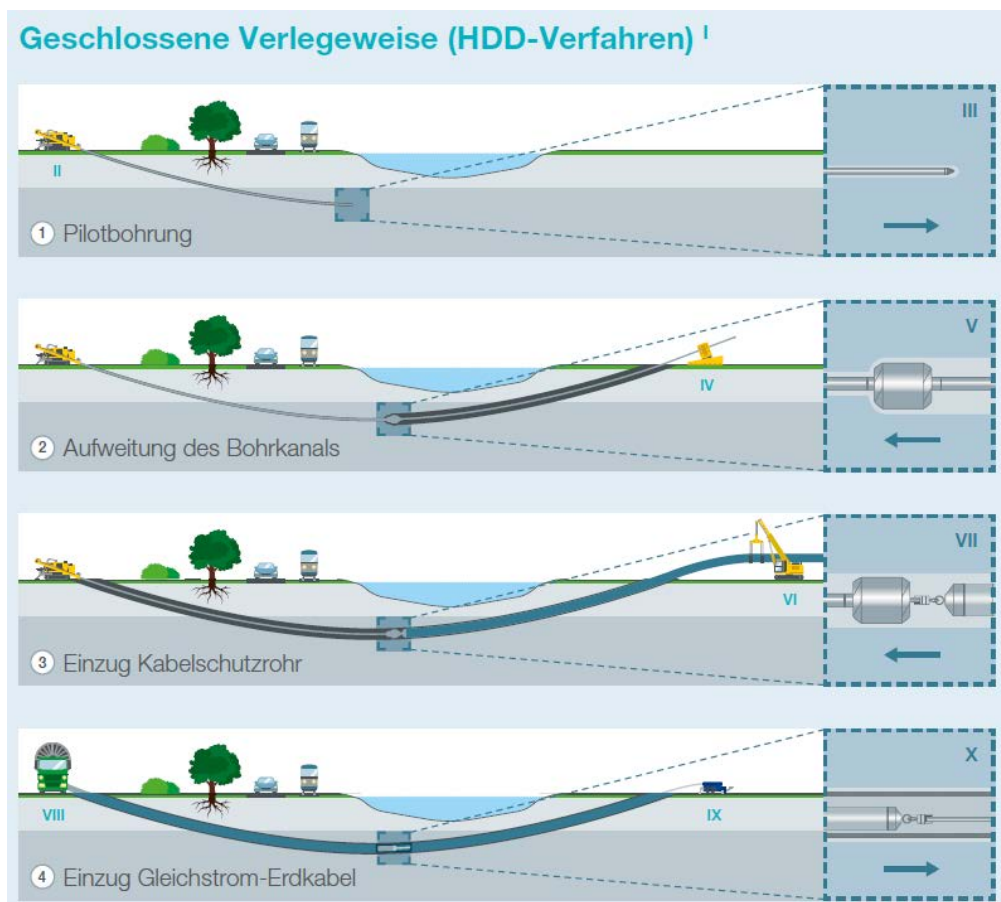


Abbildung 8: Darstellung Spülbohrverfahren HDD

In der Regel wird sowohl am Anfang als auch am Ende der gewünschten Bohrung eine Grube ausgehoben. Die Horizontalspülbohranlage bohrt dann mit einem Bohrkopf eine Pilotbohrung in Richtung Zielgrube. Der Bohrkopf ist mit dem Bohrstrang verschraubt, der von der Horizontalspülbohranlage in das Erdreich getrieben wird und eine gewisse Flexibilität aufweist. Da das Bohrgestänge einen geringeren Durchmesser aufweist als der Bohrkopf, bleibt um das Bohrgestänge herum ein ringförmiger Raum frei. Durch das Gestänge wird eine Bentonit-Bohrspüllösung zum Bohrkopf gepumpt, wo sie austritt und das Bohrklein durch den Ringraum

ausspült. Sie dient neben dem Ausräumen durch die speziellen Eigenschaften von Bentonit der Stabilisierung des Bohrkanals, zum Kühlen des Bohrkopfes und als Schmiermittel.



Abbildung 9: Baustelleneinrichtung Spülbohrverfahren HDD

Durch den Druck der Flüssigkeit wird der Freiraum gestützt. Dafür ist aber erforderlich, dass das umgebende Erdreich dem Druck auch standhalten kann. Ansonsten verteilt sich das Benonit im Untergrund oder wird zur Oberfläche ausgeblasen. Zum Aufbau des Gegendrucks sind daher größere Legetiefen als bei offener Bauweise notwendig. Eine oberflächennahe Legung der Schutzrohre ist mit diesem Verfahren nicht möglich. Durch die Flexibilität des Gestänges und die Steuerbarkeit des Bohrkopfes lässt sich die Richtung der Bohrung verändern, sodass Kurven in horizontaler und vertikaler Richtung fahrbar sind. Die Bohrung beginnt anfangs schräg nach unten in das Erdreich gerichtet und verläuft dann in leichtem Bogen zum Ziel, wo sie schräg nach oben wieder zutage tritt. Hat der Bohrkopf die Zielgrube erreicht, wird er gegen einen sogenannten Räumler ausgetauscht. Der Räumler hat einen größeren Durchmesser als der Bohrkopf und weitet beim Zurückziehen die Pilotbohrung auf und verdichtet gleichzeitig die Bohrungswände. Für weitere Aufweitungsschritte kann ein Bohrstrang erneut an den Räumler angehängt werden. Abschließend können Schutzrohre in den Bohrkanal eingezogen werden.

Bei HDD Bohrverfahren sind größere Legetiefen notwendig sowie vergrößerte Achsabstände der einzelnen Kabelstränge zu berücksichtigen: Die größeren Legetiefen beeinflussen die Stromtragfähigkeiten der Erdkabelanlage, sodass ab gewissen Überdeckungen bzw. Baugrundverhältnissen die geforderten Übertragungsleistungen nicht mehr realisierbar sind. Die größeren Legeabstände verbreitern die Trasse gegenüber der offenen Bauweise und beeinflussen die Auslegung des Schirmerdungssystems, sodass hier bei größeren Bohrlängen unzulässig hohe Schirmspannungen auftreten und damit die Erdkabelanlage beschädigen können.

### 6.3 Tunnel/Mikrotunnel

Beide, Tunnel und Mikrotunnel, sind eine sehr aufwändige, komplexe und teure Sonderbaumaßnahme für spezielle Szenarien. Tunnel ermöglichen die Installation von leistungsstarken Stromkreisen auf geringem Raum. Es sind baugrundabhängig große Längen auffahrbar (bis ca. 1.200 m als Mikrotunnel). Die Kosten für die Tunnelbauweise sind allerdings sehr hoch. Es sind in Abständen Schachtbauwerke erforderlich, um größere Strecken zu realisieren (Mikrotunnelbau) und um stets die Arbeitssicherheit gewährleisten zu können.

#### Tunnel

Die **380-kV-Kabeldiagonale Berlin** (50Hertz) ist eine zum größten Teil in TEV-Abschnitten ausgeführte Höchstspannungsleitung durch das Stadtgebiet von Berlin. Die Erfahrungen aus diesem Vorhaben sind nur eingeschränkt auf andere Projekte übertragbar – sie sind bei den TEV-Abschnitten in den Pilotvorhaben eine Ausnahme. Gleichwohl zeigen sie die Besonderheiten bei der Tunnelbauweise im dicht besiedelten Raum auf.<sup>2</sup>

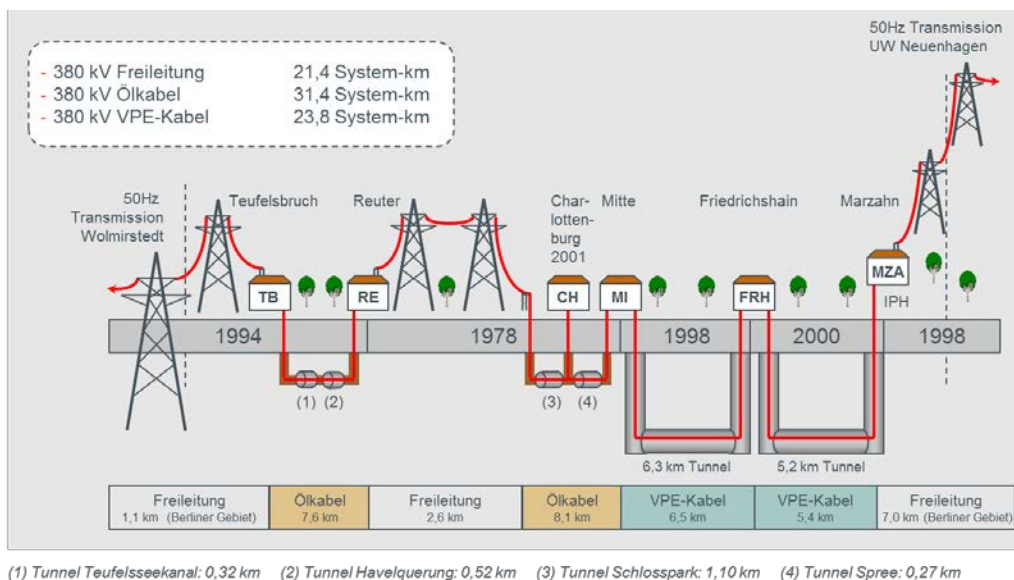


Abbildung 10: Schematische Darstellung Kabeldiagonale Berlin (50Hertz)

Für den Betrieb sind übertragungsleistungsabhängig Lüftungsanlagen erforderlich, die das System komplexer machen. Der Aufwand und die Komplexität der Projektierung, die Kosten sowie die Zeit für die Umsetzung sind insgesamt bei dieser Bauform mit Abstand am höchsten (gilt auch für den Mikrotunnel).

<sup>2</sup> Die Kabeldiagonale verläuft vom Nordwesten durch die Mitte der Stadt und verlässt diese ostwärts. Der erste Abschnitt vom Umspannwerk (UW) Reuter zum UW Mitte wurde 1978 als weltweit erste große 380-kV-Kabelverbindung in Betrieb genommen. Im Anschluss an die 2,6 km lange Freileitung vom UW Reuter zur Stadtautobahn an der Rudolf-Wissell-Brücke verläuft eine 8,1 km lange Kabelstrecke zum UW Mitte. Von dort führt ein 6,3 km langes VPE-isoliertes 400-kV-Kabel durch einen begehbaren Tunnel, der in bis zu 30 m Tiefe verlegt und zur Inspektion mit einer Einschienen-Hängebahn versehen ist, zum UW Friedrichshain. Dieses ging 1998 in Betrieb. Vom UW Friedrichshain führt ein 5,4 km langes VPE-isoliertes 400-kV-Kabel durch einen ebenfalls begeh- und befahrbaren Tunnel zum UW Marzahn. Dieses Kabel ging 2000 in Betrieb.

## **Mikrotunnel**

Der Mikrotunnelbau ermöglicht die Installation von leistungsstarken Stromkreisen auf geringstem Raum. Es sind baugrundabhängig derzeit Längen von bis ca. 800–1.200 m als Mikrotunnel am Stück realisierbar. Es sind in Abständen Schachtbauwerke baulich erforderlich, um größere Strecken zu realisieren und um die Arbeitssicherheit gewährleisten zu können. Für den Betrieb sind übertragungsleistungsabhängig Lüftungsanlagen erforderlich, die das System komplexer machen. Der Aufwand und die Komplexität der Projektierung, die Kosten sowie die Zeit für die Umsetzung sind insgesamt bei dieser Bauform mit Abstand am höchsten. Amprion baut bzw. projektiert Mikrotunnel im Projekt ALEGrO, einem Projekt der Diele-Niederrhein Verbindung (Legden), und prüft den Einsatz in einem Projekt der Verbindung Wesel-Utfort (Rheinquerung).

Im Bereich langer Vortriebsstrecken hat sich der Mikrotunnelbau in den vergangenen Jahrzehnten als Bauverfahren im Mittel- und Großrohrbereich durchgesetzt. Bei dem Verfahren handelt es sich um ein gesteuertes, einstufiges Verfahren. Der Bodenabbau erfolgt unter Verwendung einer Vortriebsmaschine, die aus einer Startgrube heraus aufgeföhren wird. Die Förderung des Abraumes erfolgt durch Zugabe von Wasser mittels Pumpen und Schlauchleitungen. Für die anschließende Separierung der flüssigen und festen Phase sind entsprechende Flächen an der Geländeoberfläche erforderlich. Alternativen zu dieser Nassförderung sind der stückige Abbau und die Förderung mittels Loren.

Der Vortriebsmaschine folgt der eigentliche Rohrstrang, der aus Stahlbetonrohren besteht, die in einem Rohrwerk vorgefertigt und zur Baustelle transportiert werden. Richtungsänderungen werden durch einen hydraulisch schwenkbaren Steuerkopf erzielt, wobei die Kurvenradien stark eingeschränkt sind. Die Vortriebskraft wird mit einer in der Startgrube installierten hydraulischen Presseneinrichtung aufgebracht, was die Vortriebslänge in Abhängigkeit der geologischen Verhältnisse begrenzt. Bei längeren Tunnelstrecken können Zwischengruben gebaut werden, von denen der Rohrstrang für den Folgeabschnitt eingebracht werden kann. Die Bergung der Vortriebsmaschine erfolgt im Regelfall am Zielpunkt mittels einer Berge- oder Zielgrube. Die Baustelleneinrichtung einer Vortriebsbaustelle beansprucht für Anlagen zur Energieerzeugung, Rohrlager, Mannschafts- und Werkstattcontainer, Portalkran sowie ein Zwischenlager für den Aushub großen Flächenbedarf.

Startgruben erfordern durch den Einbau von Presswiderlagern und diverser Technik einen hohen Raumbedarf. Je nach Baugrund wird der Baugrubenverbau für Start- und Zielgruben mit überschnittenen Bohrpfahlwänden, mit Spundwänden oder – bei umgebendem Festgestein – mit einer Spritzbetonauskleidung hergestellt. Die Baugruben werden mit Stahlbetonsohlen versehen. In Bereichen drückenden Grundwassers müssen diese Betonsohlen druckwasserdicht ausgeführt werden. Die konkrete technische Gestaltung der Start- und Zielgruben erfolgt bei der Ausführungsplanung. Im Bereich der begehbaren Rohrquerschnitte wird vor der Rückverfüllung der Start- und Zielgruben ein Schachtbauwerk errichtet, sodass der Zugang für den Reparaturfall erhalten bleibt. Die Schachtbauwerke werden aus Stahlbeton errichtet. Die Einstiege in die Schachtbauwerke werden mit Einstiegsöffnungen sowie mit Treppen oder Leitern und Steigschutzeinrichtung, z. B. Fallschutzschiene, ausgerüstet.

Die Kabelinstallation erfolgt in Tunnelbauwerken auf Stahlgerüsten, die mit Kabelsätteln versehen sind. Auf den Kabelsätteln werden die Erdkabel kurzschlussfest angeschellt.

## 6.4 Pilotrohrvortrieb

Der Pilotrohrvortrieb gehört ebenfalls zu den geschlossenen Verfahren. Er besitzt eine höhere Präzision und ist oberflächennah möglich. Allerdings sind nur deutlich kürzere, gradlinige Vortriebe umsetzbar. Amprion hat diese Technik auf einem Projekt der Diele-Niederrhein Verbindung (Raesfeld) sowie in ALEGrO eingesetzt.

Der Pilotrohrvortrieb hat sich für kurze Vortriebslängen etabliert. Er wird in einem 3-stufigen Verfahren hergestellt. Mit der ersten Stufe, der sogenannten Pilotierung, wird ein Steuerkopf aus der Startgrube heraus mit anschraubbaren Pilotstangen in gerader Linie durch das Erdreich in die Zielgrube gepresst. Die zweite Stufe beinhaltet das Aufweiten der Bohrung, wobei nun temporär ein Stahlrohr eingebracht wird, über dem der anfallende Boden mit Hilfe von Förderschnecken in die Startgrube transportiert wird. Mit der letzten Aufweitstufe wird gleichzeitig ein Mantelrohr aus Steinzeugrohr eingebaut. Nach Einbringen der Steinzeugrohre können die Erdkabelschutzrohre eingezogen werden. Je nach Anforderung wird ggf. der Raum zwischen Steinzeugvortriebsrohr und Erdkabelschutzrohr verfüllt. Für jedes Erdkabelschutzrohr wird meist ein einzelner Pilotrohrvortrieb angesetzt. Die Startgrube ist dazu zu verbauen und mit einem Widerlager zu versehen, das die Presskräfte aufnehmen kann.

### *Exkurs: E-Power-Pipe-Verfahren*

Als weitere, oberflächennah einsetzbare Technik kann das E-Power-Pipe-Verfahren betrachtet werden. Es handelt sich dabei um eine Kombination aus Mikrotunnelbau (insbesondere der Bohrkopf), Pilotrohrvortrieb (Stützung des Bohrlochs) und HDD (Flüssigförderung des Bohrkleins und Schutzrohrrückzug). Mit diesem Verfahren sind oberflächennahe Vortriebe mit hoher Präzision über größere Distanzen (angestrebt werden 1.200 m) möglich. Allerdings ist dafür ein annähernd gradliniger Trassenverlauf notwendig. Die Kosten und Bauzeiten (baugrundabhängig) für dieses Verfahren sind deutlich höher als für den offenen Leitungsgraben, sodass es sich nur für Bereiche mit besonderen Restriktionen (Umweltschutz, Archäologie) empfiehlt.

Das E-Power-Pipe Verfahren wurde von Amprion in einem Projekt der Diele-Niederrhein Verbindung (Borken), von TenneT in einem Pilotvorhaben, sowie in einem Anlagenprojekt (Bacharach/Rheinböllen) eingesetzt.



## 6.5 Kabelpflug

Als weiteres alternatives Verlegeverfahren wird derzeit das Einpflügen von 380-kV-Erdkabeln in Schutzrohren erprobt. Diese Technologie wird bislang erfolgreich im Bereich von Telekommunikations- und Mittelspannungskabeln eingesetzt. Die für eine 380-kV-Leitung erforderlichen Erdkabel plus Schutzrohr stellen die Anbieter von Kabelpflug-Verfahren vor neue Herausforderungen aufgrund von Querschnitten und Gewichten. Bei diesem Verfahren können vergleichsweise große Strecken pro Tag verlegt werden. Der Verlauf der Abschnitte (lange Strecken ohne querende Infrastruktur, Kurvenradien), Bodenbeschaffenheit und weitere Faktoren bestimmen hierbei die Vor- und Nachteile gegenüber der offenen Bauweise. Erfahrungen aus den Kabelpflug-Piloten fließen in die Planung zukünftiger Trassen mit ein. Im Übrigen wird das Verfahren aus Gründen der Vollständigkeit genannt, ist aber bisher noch nicht für den Regelbetrieb geeignet.



Abbildung 11: Erprobung der Verlegung von 380-kV-Erdkabeln mit dem Kabelpflug bei Hildesheim

## 6.6 Kabelübergabestation (KÜS)

Kabelübergabestationen (KÜS) sind der Übergangspunkt vom Erdkabel zur Freileitung und damit für jeden TEV-Abschnitt zu planen, genehmigen und errichten. Je nach netztechnischer Anforderung und Bedarf an zusätzlichen Komponenten fallen Typ, Größe und Emissionen der Anlage unterschiedlich aus. Grundstücke, auf der KÜS errichtet werden können, müssen sich an der Leitungsachse sowie an den Anfangs- und Endbereichen des TEV-Abschnitts befinden. Das Grundstück muss topographisch geeignet sein, alle Installationen wie Sammelschienen sowie alle weiteren elektrischen Betriebsmittel aufzunehmen.

Die **technischen Eigenschaften** der KÜS ergeben sich durch die technischen Eigenschaften der verwendeten Betriebsmittel: Freileitung, Hochspannungsgeräte (Trennschalter, Wandler, Erdkabelendverschluss, Erdkabel). Es können eine maximale Betriebsspannung von 420 kV sowie ein maximaler Betriebsstrom in Höhe von 4.000 A zu Grunde gelegt werden.

Die Ausstattung einer KÜS ist vom Anwendungsfall abhängig. Für die Zwischenverkabelungen des Übertragungsnetzes muss der Übergang von einem in Freileitungstechnik realisierten Abschnitt auf Erdkabelsysteme möglich sein. Dazu sind Sammelschienen notwendig, damit jede Phase eines Freileitungssystems mit zwei Erdkabeln verbunden werden kann. Für den Übergang sind ferner Überspannungsableiter notwendig, die aus Richtung der Freileitung einlaufende Überspannungen vor dem Erdkabelsystem abgeleiten. Zu Mess- und Schutzzwecken sind Strom- und Spannungswandler notwendig sowie die dazugehörigen Schutzgeräte und nachrichtentechnischen Einrichtungen zur Übertragung der Signale.



Abbildung 12: Kabelübergabestation Segberg an der A31  
Erdkabel verlaufen unterirdisch von links in die Anlage. Auf der rechten Seite wird die Leitung als Freileitung fortgeführt.

Wenn das Netzkonzept die Installation von Drosseln zur Einhaltung aller Betriebsparameter vorsieht, steigt der Platzbedarf an. Drosseln dienen der Blindleistungskompensation und Spannungsbegrenzung der Erdkabelanlage.

Der Bau einer KÜS ist abhängig vom Anwendungsfall sowie von den örtlichen Gegebenheiten, d. h. vor allem vom vorhandenen Freileitungsmasttyp und dessen Beseilung bzw. Stromkreisanordnung an der Übergabestelle.

Der **Flächenbedarf** ist abhängig von der Ausführungsform und dem Anschluss der KÜS an die Stammstrecke) Darüber hinaus benötigen ggf. Drosselspulen in der KÜS weitere Flächen. Auch Eingrünung und Zuwegungen beeinflussen die Abmessungen der KÜS. Eine Standard-KÜS ohne Drosseln hat die Maße 60 m\*100 m, eine KÜS mit drei Drosselspulen hat die Standard-Maße 120 m\*160 m. Der spezifische Flächenbedarf kann davon abweichen.

KÜS-Flächen müssen erworben werden. Diese sind nicht nur kaum verfügbar, sondern werden von konkurrierender Seite nachgefragt: kommunale Entwicklung, Landwirtschaft und verschiedenen Infrastrukturen. Hinzu kommt, dass die KÜS technische Zwangspunkte darstellen, die in ihrer Positionierung nur eingeschränkt flexibel sind. Dies gilt insbesondere bei Ersatzneubauprojekten, die weitestgehend für die Freileitungsanteile Bestandstrassen nutzen.

## **6.7 Auswirkungen auf die Projektdauer**

Spezifische Faktoren, die mit der jeweiligen Bauweise verbunden sind, etwa die Ausführungsplanung, der Koordinierungsaufwand oder auch Bodenschutzkonzepte, wirken sich auf die gesamte Projektdauer aus. Dazu zählen auch ein umfassendes Monitoring und Beweissicherungen bei den laufenden Vorhaben. Die stärkere Mitnutzung bzw. Beeinträchtigung der betroffenen Flächen wirkt ebenfalls maßgeblich auf die Verhandlungen mit Eigentümerinnen und Bewirtschafterinnen und damit auf die Projektdauer aus.

Für Erdkabelabschnitte ist eine deutlich aufwändigere Ausführungsplanung erforderlich. Sie nimmt deutlich mehr Zeit in Anspruch – vor allem durch erhöhte Anforderungen, Komplexität, Abhängigkeiten im Tiefbau und der Bau- und Kabellogistik. Während bei einer Freileitung die Wahl der Standorte von Masten einer gewissen Flexibilität unterliegen und die Mastbaustellen in der Bauphase relativ einfach erschlossen werden können, muss ein Erdkabel als zusammenhängende Linieninfrastruktur geplant und errichtet werden. Die Erdbewegungen im Tiefbau, Querungen anderer Infrastruktur, hohe Anzahl an (Sonder-)Transporten von und zur Baustelle übersteigen den Aufwand in Planung und Ausführung gegenüber einer Freileitung deutlich.

Die Ausführungsplanung muss zudem zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt, der Vorbereitungsphase des Planfeststellungsverfahrens, teilweise sogar im Raumordnungsverfahren, erfolgen. Nur so kann im Genehmigungsverfahren die Realisierbarkeit des Erdkabelabschnitts dargelegt und alle genehmigungsrelevanten Aspekte berücksichtigt werden. Verschiedene Projekterfahrungen, u. a. die der Kabeldiagonale Berlin, zeigen, dass die frühzeitige Integration der Expertise von Planungs- und Ingenieurbüros die Projektdauer reduzieren kann.

Neben zusätzlichen Ingenieurleistungen, werden zusätzliche Voruntersuchungen und Gutachten notwendig: Umweltgutachten, Baugrund- und Bodenuntersuchungen, Fachbeitrag Archäologie / Denkmalschutz, UVS und abschließend die Eingriffsbewertung gemäß BNatschG (LBP) sind in Verbindung mit einer fortgeschrittenen bautechnischen Ausführungsplanung frühzeitig zu erstellen. Die Tatsache, dass umfangreiche Vorarbeiten bereits in frühen Phasen der Genehmigungsverfahren erfolgen müssen, führt zu Konflikten und Schleifen im Verfahren, wie im Kapitel 5 bereits dargelegt. Beide Faktoren führen dazu, dass bei Vorhaben mit Erdkabelanteil in der Planungsphase nicht mit

Beschleunigung zu rechnen ist. Etwa zeigen die Erfahrungen aus dem Vorhaben Nr. 5 (EnLAG), dass der Koordinationsaufwand und die Bauzeit des 3-km-Erdkabelabschnittes den Aufwand für 30 km Freileitung deutlich übertrafen.

Der Bau von Erdkabelabschnitten ist störanfälliger als der Bau einer Freileitung. Letztere kann flexibler (Mast für Mast) gebaut werden. Die Erfahrung zeigt, dass Baumaschinen (z. B. HDD) teils nur begrenzt verfügbar sind. Auch die erhöhte Zahl an Absprachen mit Eigentümerinnen bei der Wiederherstellung der Flächen erfordern Sonderregelungen, so wie auch viele andere Einzelthemen – all diese wirken sich verzögernd aus (siehe Kapitel 4).

Für Erdkabelabschnitte sind **Bodenschutzkonzepte und -überwachung** notwendig, die sich auf die Leitfäden und Handlungsempfehlungen der Länder und das Rahmenpapier der Bundesnetzagentur stützen. Wie sich der Umfang der damit verbundenen Arbeitsschritte auf die Gesamtdauer des Vorhabens auswirkt, unterscheidet sich je Pilotvorhaben. Der Boden liegt teilweise lange offen. Dadurch werden zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich. Wasserhaltung und die grundsätzliche Sorge der Eigentümerinnen gilt es zu berücksichtigen.

Beispielsweise zeigen die Erfahrungen aus dem Vorhaben Kabeldiagonale Berlin, dass sich umfassender Bodenschutz nicht zwangsläufig negativ auf die Projektdauer auswirkt: Im Rahmen der Genehmigungsplanung wurden umfangreiche Baugrunduntersuchungen durchgeführt (im Fall der Kabeldiagonale waren es Bohrungen im Abstand von 100 m). Aus diesen Baugrunduntersuchungen wurden, neben dem eigentlichen Baugrundgutachten, Setzungsprognosen entlang der Tunneltrasse sowie hydrogeologische und abfalltechnische Berichte erstellt. Bei bestehenden Gebäuden wurden die Gründungen bei den Eigentümerinnen bzw. aus den Archiven der Bezirke abgefragt. Zu Beginn der Baumaßnahme wurde eine geodätische und bautechnische Beweissicherung durchgeführt. Im Zuge der Bauausführung wurde eine geotechnische Baubegleitung gebunden. Alle erforderlichen Abläufe bei Aushub, Lagerung, Deklaration sowie Bodenabfuhr wurden im Rahmen des Planungsprozesses eng mit der Abfallbehörde abgestimmt.

Die Erfahrung etwa im Vorhaben Raesfeld zeigt, dass teilweise aufwändige, zeitintensive **Monitoring-Projekte** sowie Beweissicherungsmaßnahmen nötig sind (bspw. landwirtschaftliche Feldversuche, Untersuchungen der Bodenparameter vor und nach der Baumaßnahme, Bodentemperaturmonitoring, landwirtschaftliche Beweissicherungsverfahren). Je nach Bodenbeschaffenheit ist von der Auflage erneuter Monitoring-Projekte auszugehen. Speziell bei der Tunnelbauweise, so erfahren bei der Kabeldiagonale Berlin, entstehen bspw. durch die Ausarbeitung von Alarm- und Warnwertkonzepten, Langzeitbeobachtung von Bauwerken Monitoring-Szenarien im Rahmen der Bauausführung. Gerade die Beweissicherung der Trasse auf Grundstücken, Straßen (Beweissicherung von Mehrfamilienhäusern, Akzeptanz von Gutachtern) wirkt sich auf die Projektlaufzeit aus, sind jedoch in den acht Jahren Bauzeit beinhaltet.

Unabhängig von der Bauweise sind bei TEV-Abschnitten viele Eigentümerinnen betroffen – das **Verhandeln von Dienstbarkeiten** ist ein Schlüsselement der Planungen. Die Erfahrungen zeigen, dass es immer wieder dazu kommt, dass Eigentümerinnen ein Betretungsverbot für notwendige Baugrunduntersuchungen erteilen. Die Betretungsrechte müssen dann zwangsweise erwirkt werden, was zu Zeitaufwand für die Vorbereitung und Durchführung von Duldungsverfahren führt. Finden die Baugrunduntersuchungen jedoch nicht statt, kann nur eine unvollständige bzw. weniger konkrete und detaillierte Bauausführungsplanung erstellt werden, was die Auswahl des passenden Bauverfahrens erschwert. Diese Planung ist aber die Basis für die Dienstbarkeitsverträge, sodass sich die nötigen Gespräche zur Einholung von Dienstbarkeiten verzögern. Am Ende erschwert dies den Bauablauf, da Grundstücke, für die noch keine Dienstbarkeit vorliegt, von einer Baufirma nicht betreten werden dürfen. Im Idealfall wären also alle betroffenen Grundstücke bereits vor

Planfeststellungsbeschluss durch eine eingetragene Dienstbarkeit freigegeben. Die bisherige Erfahrung zeigt, dass dies bei Erdkabelabschnitten eher nicht der Fall ist (vgl. Kapitel 4).

. Die Anzahl der geführten Verhandlungen bei Erdkabelvorhaben übersteigt die Anzahl bei Freileitungsvorhaben. Zahlreiche Vorgespräche bei Landwirtschaftsverbänden und intensive Verhandlungen über die Höhe von Entschädigungssätzen führen zu einem finanziellen Mehraufwand sowie einer Verzögerung der Projekte. Insgesamt sind die Flurstücke durch die Teilerdverkabelung stärker betroffen, und in den Verhandlungen mit den Flächeneigentümer ist ein höherer Betreuungsaufwand festzustellen.

## **6.8 Fazit**

Planung, Bautechnik und Errichtung von Erdkabeltrassen sind vielerorts möglich, stellen aber im Vergleich zu einer Freileitung eine erheblich aufwändigere, komplexere und teurere Baumaßnahme dar. Der offene Leitungsgraben ist nach derzeitigem Erfahrungsstand die Vorzugsbauweise.

Geschlossene Verfahren sind in einigen Bereichen erforderlich in der Regel aber deutlich teurer und oft langsamer in der Umsetzung.

Insgesamt erfordern eine umfangreichere Ausführungsplanung, Voruntersuchungen und der, im Vergleich zur Freileitung, sehr viel höhere Aufwand für die Errichtung unabhängig vom Bauverfahren mehr Zeit und Aufwand für die Realisierung von TEV-Abschnitten.

## 7 Betrieb und Betriebssicherheit

### 7.1 Betrieb

Um die notwendige Übertragungsfähigkeit im Übertragungsnetz zu erreichen, müssen in der Regel in einem Stromkreis zwei Erdkabelsysteme je TEV-Abschnitt parallel geschaltet werden. Die Auswirkungen des TEV-Abschnitts auf die maximale Übertragungsfähigkeit im n-0 und n-1 Fall im Gesamtnetz müssen die ÜNB im Einzelfall prüfen; die Auswirkungen hängen u. a. von der thermischen Überlastfähigkeit der Erdkabel ab. Diese ist v. a. von den jeweiligen Verlegebedingungen und der Vorbelastung des Erdkabels abhängig. Prinzipiell ist aber von einer deutlich geringeren und weniger flexiblen Überlastfähigkeit von Erdkabeln im Vergleich zu Freileitungen auszugehen.

Vergleicht man bei einer Parallelführung von gleichlangen Trassen eine ‚Freileitung‘ mit einer gemischten Bauweise ‚Freileitung/Erdkabel‘, ergibt sich aufgrund des geringeren Wechselstromwiderstands (Impedanz) bei der gemischten Bauweise eine Verschiebung der Lastflüsse. Die beiden Leitungstrassen werden somit unsymmetrisch ausgelastet. Dies lässt sich nur durch den Einbau zusätzlicher teurer Betriebsmittel wie Flexible AC Transmission Systems (FACTS) oder Phasenschiebertransformatoren (Phase Shifting Transformer, PST) vermeiden

Die Netzführung wird durch die zunehmende Erdverkabelung im 380-kV-Übertragungsnetz und die Kompensation der verkabelten Stromkreise wegen möglicher transients Ausgleichsvorgänge und Resonanzphänomene (siehe Abschnitt 9) deutlich komplexer und aufwändiger. Unter Umständen müssen grundsätzliche Empfehlungen zur Vermeidung von Schaltheandlungen abgeleitet werden, die zu einer erhöhten und möglicherweise unzulässigen Beanspruchung von Betriebsmitteln führen.

Die nachstehende Abbildung 13 zeigt erste praktische Erfahrungen mit der Inbetriebnahme eines TEV-Abschnitts (Dörpen West- Niederrhein ). Zu Testzwecken wurde hierbei eine Sonderschaltung eingerichtet und die beiden ersten TEV-Abschnitte der parallelen Stromkreise an einem Ende miteinander verbunden (siehe Abbildung 13). Die beiden TEV-Abschnitte sind durch die Sonderschaltung in Reihe geschaltet und an dem nicht zugeschalteten Ende offen. Bei der Zuschaltung (geringe anstehende Netzkurzschlussleistung) kam es zu einer deutlichen Anregung der 7. harmonischen Schwingung mit der Folge unzulässiger Oberschwingungspegel. In den unten dargestellten Stromverläufen sind diese Oberschwingungen deutlich als der 50-Hertz-Grundschwingung überlagerte Rippel zu erkennen.

Die Problematik der Oberschwingungen wird in Kapitel 9 weiter beschrieben.

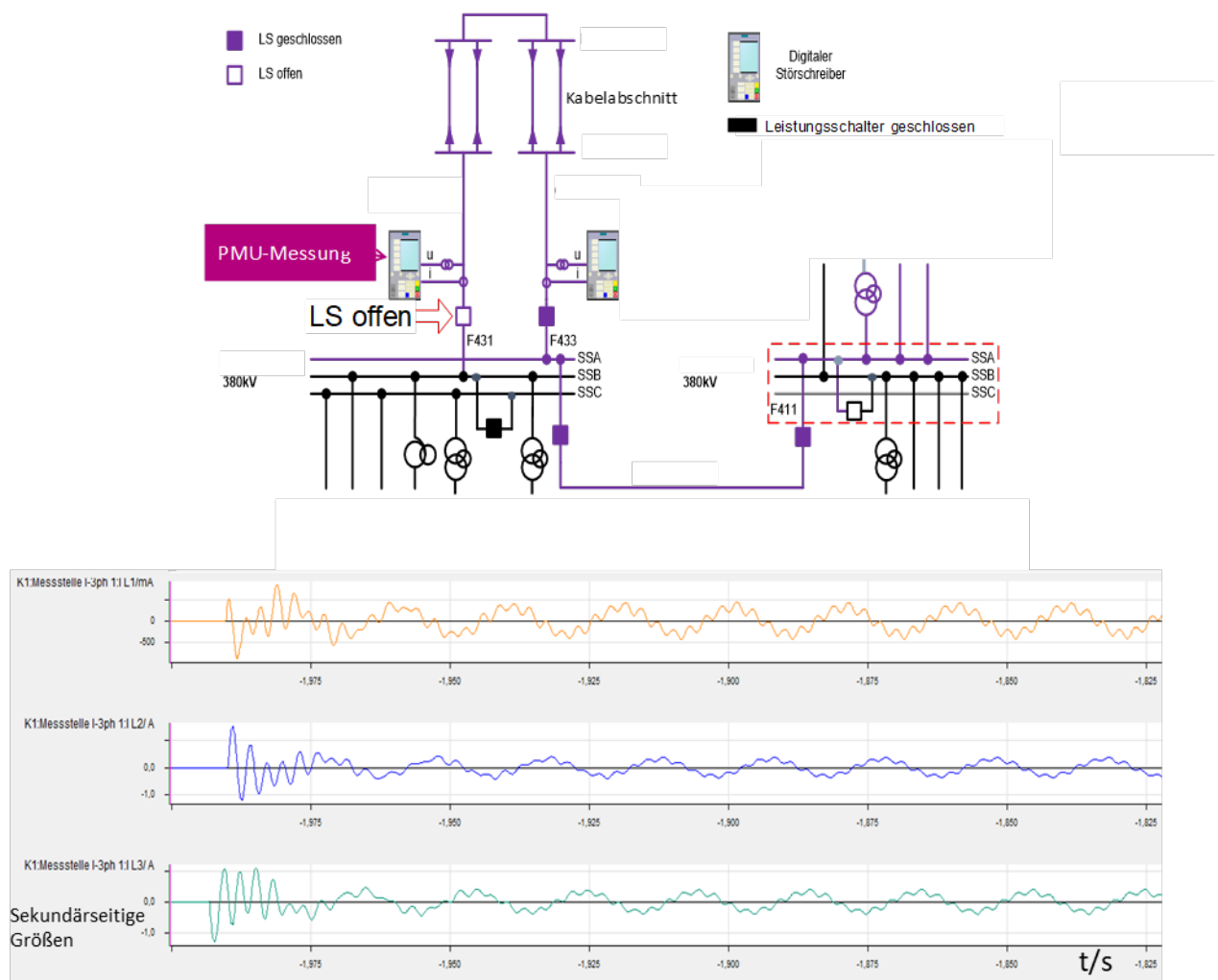


Abbildung 13: Erste betriebliche Erfahrungen mit der Zuschaltung eines TEV-Abschnitts, gemessene Stromverläufe (sekundärseitig), Zeit in s (Quelle: Amprion)

## 7.2 Fehleranfälligkeit und Sicherheit

Erdkabelanlagen sind, das zeigen weltweite Erhebungen z. B. von Cigré, statistisch weniger fehleranfällig als Freileitungssysteme, z. B. gegenüber Störungen durch Blitzeinschläge, durch Sturm, durch umherfliegende, in der Landwirtschaft verwendete Planen oder durch in die Freileitung wachsende Bäume. Sollte jedoch ein Fehler auftreten, etwa durch äußere Beschädigung des Erdkabels oder einen inneren Fehler durch dielektrischen Durchschlag, ist die Fehlerbeseitigung nicht nur komplexer und teurer, sondern sie dauert auch deutlich länger. Die statistische Verfügbarkeit einer Erdkabelanlage ist deshalb insgesamt geringer als die eines Freileitungssystems.

Beispiele aus dem Betrieb der Berliner Kabeldiagonale verdeutlichen die zeitlichen und finanziellen Auswirkungen: 2006 wurde eine ungeeignete Montage eines Teilentladungssensors im Muffenkörper identifiziert, gefolgt vom Durchschlag einer weiteren Muffe aufgrund transientser Ausgleichsvorgänge. Die Reparatur, Prüfung und Wiederinbetriebnahme des Erdkabels dauerte rund 25 Tage. Der Zwischenfall machte eine Untersuchung und Sanierung weiterer Muffen erforderlich, was zusätzliche Aufwände verursachte. Bei einem weiteren Kabelfehler an der Erdkabelanlage am UW Marzahn konnte 2009 nach einem Anlagenbrand die Erdkabelanlage 10 Monate nicht betrieben werden.

Das Beispiel der 220-kV-Verkabelung in Berlin-Adlershof verdeutlicht, wie gravierend die Auswirkungen der auftretenden Fehler für Anwohnerinnen und die Straßennutzung sein können. So führten 2008 wahrscheinlich Montagefehler an zwei Systemen zu einer Ausfallzeit von rund 18 Monaten. Durch umherfliegende Teile der Kabelendverschlüsse wurden parkende Autos verschmutzt und Gebäude beschädigt (siehe Abbildung 14). Zur Wiederinbetriebnahme hat man die Erdkabelanlage runderneuert und alle identischen Kabelendverschlüsse eingehaust.

Die Erfahrungen aus den geschilderten Beispielen lassen sich nicht auf andere Teilerdverkabelungen übertragen, denn das Berliner Kabeldiagonalen-Projekt weist in vielerlei Hinsicht Besonderheiten auf.



*Abbildung 14: 220 kV VPE-Erdkabelfehler in Berlin-Adlershof (2008)*

### **7.3 Fazit**

Erdkabelanlagen zeigen in bestimmten Situationen im Vergleich zu Freileitungen ein verändertes Betriebsverhalten. Da bisher alle zum Betrieb erforderlichen Anlagen und Systeme auf Freileitungen optimiert wurden, ergibt sich für den Betrieb von TEV-Abschnitten ein Anpassungsbedarf bei sehr vielen unterschiedlichen Aspekten, z. B. Impedanz, Überlastfähigkeit, transientes Verhalten oder die Fehlerbehandlung.



## 8 Erdkabeltechnik

### 8.1 Technologie und Aufbau von Erdkabelanlagen

Die Erdkabeltechnologie für Wechselspannungsanwendungen im Höchstspannungsnetz ist grundsätzlich schon seit einigen Jahren verfügbar und in Betrieb. Die eigentliche Herausforderung stellt die Integration langer Erdkabelanlagen ins vermaschte Verbundnetz auf Höchstspannungsebene dar.

Bei der Projektierung einer Erdkabelanlage müssen die ÜNB sorgsam auf alle Parameter (z. B. Übertragungsfähigkeit/Strombelastbarkeit, Schirm- bzw. Mantelspannungen, Erdungssystem) achten. Neben den Erfordernissen aus dem Netzbetrieb sind dabei auch die baulichen Besonderheiten der Trassenführung zu berücksichtigen, etwa eine Parallelführung mit anderen Infrastrukturen, die Ausführung in den jeweiligen Bauformen (z. B. bei Kreuzungen) sowie der Baugrund. Allesamt können erhebliche Restriktionen verursachen.

Stand der Technik sind Erdkabelsysteme mit Isoliersystemen aus vernetztem Polyethylen (VPE). Diese wurden seit den 1970er Jahren zuerst in niedrigeren Spannungsebenen verbaut und dann bis zum Einsatz in der Höchstspannungsebene weiterentwickelt. VPE zeichnet sich im Vergleich zu früher verwendeten Isolierstoffen durch höhere zulässige Betriebstemperaturen und damit durch vergleichsweise höhere Strombelastbarkeiten aus. Das Erdkabel selbst besteht aus dem Leiter aus Kupfer oder Aluminium, der den Übertragungsstrom führt. Darauf wird das Isoliersystem zur Beherrschung der anliegenden Spannung aufgebracht. Es besteht aus einer inneren Leitschicht, der eigentlichen Isolierung, sowie der äußeren Leitschicht. Bei in Deutschland eingesetzten Höchstspannungskabeln sind darüber meist ein Kupferdrahtschirm zum Führen kapazitiver Lade- und möglicher Kurzschlussströme sowie eine dünne Aluminiumfolie aufgebracht, die das Eindringen von Wasser in die Erdkabelkonstruktion verhindert. Abgeschlossen wird die Erdkabelkonstruktion durch einen äußeren Kunststoffmantel aus Polyethylen, der als Korrosions- und mechanischer Schutz dient.

Einzelne Kabellängen werden durch Muffen miteinander verbunden. Diese bestehen aus vorgefertigten und geprüften Feldsteuerelementen aus Kunststoffen. Sie sind so konstruiert, dass die Übergänge sowohl zwischen den Erdkabeln als auch von den Erdkabeln zum Feldsteuerelement elektrisch sicher beherrscht werden können. Außerdem werden die Kupferdrahtschirme so ausgeführt und mit den Schirmen der jeweils anschließenden Kabellängen des Drehstromsystems derart verbunden, dass die in den Kabelschirmen insgesamt induzierten Ströme möglichst gering bleiben. Dies ist das sogenannte Cross-Bonding.

Nach außen hin verfügen Muffen genauso wie die Erdkabelkonstruktion über einen Korrosionsschutz, der das Eindringen von Wasser verhindert und die Muffe im Erdreich mechanisch schützt. Die „Linkboxen“, in denen die Schirmverbindungen für das Cross-Bonding konkret ausgeführt sind, müssen als dauerhafte Einrichtungen jederzeit zugänglich sein.

Die idealen Muffenstandorte hängen von den Abschnittslängen der Erdkabel ab und werden iterativ berechnet. Werden die Erdkabelstrecken und -längen im Laufe des Verfahrens angepasst, ist ggf. eine Umplanung von Muffenstandorten und in der Folge von Wegekonzepten, Arbeitsflächen und Logistik notwendig.

Die ÜNB schließen die Erdkabelsysteme in KÜS oder in Umspann- bzw. Schaltanlagen an Freileitungssysteme an. Als Übergang von den feststoffisolierten Erdkabelsystemen auf luftisolierte Technik dienen auf Stahlgerüsten montierte Endverschlüsse. In der Nähe der Endverschlüsse sind, je nach Anlagenkonzept, zusätzlich Überspannungsableiter zur Begrenzung temporärer

Überspannungen und Strom- und Spannungswandler für Messungen zur Überwachung der Erdkabelanlage sowie für die Schutztechnik notwendig.

Die zu übertragende Leistung bestimmt die Auslegung der Erdkabelanlage. Abhängig von der Legetiefe, den Baugrundverhältnissen sowie den betrieblichen Anforderungen im Schadensfall wählen die ÜNB die Abstände der Erdkabel zueinander so, dass die höchstzulässige Betriebstemperatur der Erdkabel am Leiter nicht überschritten wird. Bei Teilerdverkabelungen im vermaschten Verbundnetz werden meist zwei Erdkabelsysteme je Freileitungsphase eingesetzt, um die notwendige elektrische Leistung engpassfrei übertragen zu können.

## **8.2 Wartung und Instandsetzung**

Erdkabelanlagen sind wartungsarm. Gemäß den Anforderungen der jeweiligen Instandhaltungsplanung bestimmen die Wartungsingenieure die Integrität des Außenmantels durch eine Mantelspannungsprüfung. In den Cross-Bonding-Boxen überprüfen sie auch die dort verbauten Mantelspannungsbegrenzer. Außerdem unterziehen sie alle zugänglichen Elemente einer Sichtprüfung auf Beschädigung oder Korrosion.

Mit zunehmendem Anteil an Teilerdverkabelung sind Drosseln zur Blindleistungskompensation der entsprechenden Stromkreise notwendig. Dadurch entsteht zusätzlicher Wartungsaufwand, der mit dem Aufwand zur Wartung von Transformatoren vergleichbar ist.

Im Schadensfall messen die Instandhaltungsteams den Fehlerort ein, legen die fehlerhafte Stelle in einer Tiefbaumaßnahme frei und reparieren den Fehler. Dazu kann ein Stück des Erdkabels aus einer dafür vorgesehenen Überlänge nachgezogen und die fehlerhafte Stelle durch eine Muffe überbrückt werden. Wenn die Beschädigung zu groß ist, müssen zwei Muffen mit einem neuen Kabel-Zwischenstück installiert werden.

## **8.3 Technische Parameter**

Bestimmend für die Abmessungen der Erdkabelanlage sind die thermische Auslegung, bauliche Anforderungen sowie betriebliche Belange: Die Achsabstände der Kabeladern innerhalb eines Stromkreises werden durch die thermische Belastbarkeit bestimmt. An der inneren Leitschicht als wärmster Stelle des Isoliersystems darf die höchstzulässige Betriebstemperatur des Isoliermaterials nicht überschritten werden. Diese wird für jedes Erdkabel unter Berücksichtigung der Legetiefe, des Einflusses der benachbarten Erdkabel sowie aller anderen Umgebungsbedingungen für das Regelgrabenprofil sowie in Kreuzungsbereichen berechnet. Die dort anliegende Temperatur wird über alle Aufbauelemente der Erdkabel, der Erdkabelschutzrohre sowie der umgebenden Bettung abgebaut, sodass die Temperaturen im umgebenden Erdreich deutlich geringer sind als die höchstzulässige Grenztemperatur des Isoliermediums. Die ÜNB wählen die Abstände zum benachbarten Stromkreis so, dass sie mögliche Fehler gefahrlos reparieren können, ohne das benachbarte, intakte System abschalten zu müssen. Sie können auch Aspekte der Baustellenlogistik in die Auslegung einbeziehen.

Die elektrischen Betriebsparameter von Erdkabeln sind abhängig von Leitermaterial und -querschnitt, den Materialeigenschaften der Isolierung und deren Dicke sowie von der Legeanordnung. Aufgrund der Feststoffisolierung wird die anliegende Spannung auf sehr viel geringeren Abständen beherrscht als bei (luftisolierten) Freileitungen. Durch den kompakten Aufbau eines Erdkabels wird allerdings auch der elektrische Kapazitätsbelag deutlich erhöht. Dadurch ergeben sich bei der Verbindung von Erdkabel- und Freileitungsabschnitten Wechselwirkungen. Diese sind in Kapitel 9 beschrieben.

## **8.4 Fazit**

Erdkabelanlagen sind technisch komplexe Betriebsmittel, die sorgsam ausgelegt werden müssen. Die Planungen der ÜNB werden dabei nicht nur durch rein hochspannungstechnische Aspekte bestimmt, sondern auch durch die Bautechnik zur Installation. Insgesamt nimmt die Planung des Bauprojekts einen erheblichen Anteil am Gesamtprojekt ein, insbesondere, wenn anspruchsvolle Querungen mit aufwändigen Bauverfahren umzusetzen sind. Erdkabelvorhaben sind deutlich aufwändiger als Freileitungsvorhaben, weil die gesamte Trasse – und nicht nur punktuelle (Mast-)Standorte wie bei Freileitungen – bautechnisch zu erkunden, zu planen und zu bauen ist.

## 9 Systemtechnische Betrachtungen

Erdkabel im Höchstspannungsbereich sind zwar kein technisches Neuland. Ihre Integration in das Übertragungsnetz stellt jedoch enorme Herausforderungen an das Betriebsverhalten und die Systemsicherheit. Durch teilverkabelte Stromkreise im Höchstspannungs-Verbundnetz entsteht ein erhöhter Kompensationsbedarf für Blindleistung schwingungsfähiger Strukturen. Dies führt bei Schalthandlungen oder Netzfehlern im Vergleich zu Freileitungen zu höherer Spannungsbeanspruchung der Betriebsmittel. Diese Spannungsbeanspruchungen sind grundsätzlich beherrschbar, erfordern aber komplexe und bisher kaum erprobte Gegenmaßnahmen. Dies können zum Beispiel Einschaltvorwiderstände an Leistungsschaltern oder zusätzliche Filter sein. Jede Gegenmaßnahme wirkt jedoch ihrerseits auf das Netz zurück und erhöht die Komplexität und Fehleranfälligkeit. Für ein sicheres Netz- und Systemverhalten müssen das robuste Zusammenspiel aller Einzelkomponenten sichergestellt und unzulässige Wechselwirkungen untereinander vermieden werden. Vor der Umsetzung geeigneter Gegenmaßnahmen sind umfangreiche und komplexe Systemstudien notwendig und es muss – zunächst mit Hilfe der vorgesehenen Pilotstrecken – Erfahrung aufgebaut werden.

Als kritisch ist anzusehen, dass sich mit zunehmendem Verkabelungsgrad die Netzresonanzfrequenzen insgesamt weiträumig in einen niedrigeren Frequenzbereich verschieben und damit die Wahrscheinlichkeit von Schäden an Betriebsmitteln im Höchstspannungsnetz oder unterlagerten Netzebenen sowie Kundenanlagen steigt.

Die wesentlichen systemtechnischen Auswirkungen der Teilerdverkabelung werden nachfolgend beschrieben.

### 9.1 Physikalische Effekte

Durch Teilerdverkabelungen werden charakteristische elektrische Eigenschaften der Stromkreise und auch ganzer Teile des eng vermaschten Wechselstromnetzes wesentlich verändert. Dabei spielt nicht nur das Verhältnis von Vorhabenslänge oder Länge des jeweiligen Genehmigungsabschnitts zum Anteil der Teilerdverkabelung eine Rolle, sondern auch der Anteil der Teilerdverkabelung innerhalb eines Stromkreises zwischen zwei Leistungsschaltern (in der Regel in Umspannanlagen). Die sich daraus ergebenden technischen Abschnitte sind nicht deckungsgleich mit den genehmigungsrechtlichen Abschnitten, was in der öffentlichen und politischen Diskussion ausgeblendet wird. Zudem beeinflussen sich Vorhaben (Bestand und Neubau) innerhalb einer Netzregion gegenseitig, weil Freileitung und Erdkabel elektrotechnisch unterschiedliche, schlecht verträgliche Eigenschaften haben. Deshalb gilt auch hier: Je höher der Anteil von Teilerdverkabelung insgesamt innerhalb einer Netzregion, desto anfälliger ist das Gesamtsystem für mögliche physikalische Effekte, die zu Schäden an Betriebsmitteln bei Kunden und in unterlagerten Netzen sowie zu einem Risiko für die Netz- und Systemstabilität auf der Höchstspannungsebene führen können. Hier gilt es Risiken zu vermeiden, um dem gesetzlichen Auftrag der Systemstabilität und Versorgungssicherheit gerecht zu werden.

Vereinfacht dargestellt: Das Netz verhält sich wie eine Brücke. Je kürzer eine Brücke, desto stabiler und weniger anfälliger ist sie, wenn Menschen im Gleichschritt darüber marschieren. Je länger eine Brücke, desto anfälliger ist sie: Wenn Menschen im Gleichschritt darüber gehen, schwingt sich die Brücke auf bis hin zu einem möglichen Zusammenbruch, da sie instabiler wird. Ähnlich verhält sich das Netz mit zunehmendem Grad an Teilerdverkabelung. Dies lässt sich physikalisch berechnen und belegen und ist projektspezifisch sowie mit Blick auf die jeweilige Netzregion durchzuführen.

Technisch dargestellt: Der Kapazitätsbelag von 380-kV-Erdkabeln ist ca. 15 bis 20-mal höher als der von 380-kV-Freileitungen, während der Induktivitätsbelag geringer ist. Erdkabel wirken deshalb hauptsächlich wie Kondensatoren: Beim Betrieb von 380-kV-Erdkabeln fließen hohe kapazitive Ladeströme, die ohne Gegenmaßnahmen das Übertragungsvermögen von Wirkleistung einschränken und sowohl transient als auch stationär (Ferranti-Effekt) unzulässige Spannungsüberhöhungen verursachen würden. Die kapazitiven Ladeströme werden deshalb mittels Drosselspulen kompensiert.

Die Kabelkapazitäten bilden zusammen mit den Drosselspulen und den weiteren Netzbetriebsmitteln Reihen- und Parallelschwingkreise. Die resultierenden Netzresonanzfrequenzen sind u. a. abhängig von der Schaltungstopologie, der Netzkurzschlussleistung und der Kabellänge und unterscheiden sich für jeden Netzknoten. Diese Schwingkreise können durch Zu- und Abschaltung eines Stromkreises oder Transformators oder bei Netzfehlern (z. B. Kurzschlüsse) angeregt werden und hohe, u. U. unzulässige Spannungs- und Strombeanspruchungen an Betriebsmitteln und unterlagerten Kundenanschlüssen verursachen (vgl. Beispiel Brücke).

Für jedes technische Einzelproblem gibt es jeweils eine technische Lösung. Allerdings verschieben sich die Probleme dadurch nur in einen anderen Bereich, statt gesamthaft gelöst zu werden. Das Netz wird durch die zunehmende Zahl technischer Komponenten, die zunehmende technische Komplexität und veränderte Resonanzbedingungen anfälliger für Störungen, die zu vermeiden sind im Sinne der Risikominimierung und mit Blick auf Netz- und Systemstabilität.

## 9.2 Blindleistung

Erdkabel sind kapazitiv wirkende Betriebsmittel und erzeugen dadurch eine hohe Ladeblindleistung. Diese muss entsprechend durch Drosseln kompensiert werden, damit über die Verbindung ausreichend Wirkleistung übertragen werden kann. Um unzulässige Wechselwirkungen in den Netzen und unterlagerten Kundenanlagen zu vermeiden, muss jederzeit das richtige Verhältnis zwischen Lade- und Drosselleistungen eingehalten werden. Hierfür ist für wenige Dutzend Kilometer Kabellänge eine KÜS oder ein Netzknoten mit ggf. schaltbaren Drosseln auszustatten.

Das folgende Beispiel verdeutlicht die Problematik der hohen Ladeleistung:

Ausgangslage ist eine 100 km lange 380-kV-Freileitung, bestehend aus zwei Stromkreisen. Je Stromkreis werden für jeden TEV-Abschnitt zwei parallel geschaltete Drehstromkabelsysteme benötigt.

Die Ladeleistung der Freileitung ohne Teilerdverkabelung beträgt ca. 150 MVar (2 Stromkreise).

Die Ladeleistung eines 10 km langen 380-kV-TEV-Abschnittes (2 Stromkreise, 4 Drehstromkabelsysteme insgesamt) alleine beträgt ca. 500 MVar. Dies entspricht etwa vier kleineren (120-MVar-) oder zwei großen (250-MVar-)Drosselspulen, siehe Abbildung 15.

Bei einem längeren, z. B. 80 km langen TEV-Abschnitt (wiederum bestehend aus zwei mal zwei parallelen Erdkabelsystemen) wären etwa alle 13 km zwei solcher 250 MVar Drosselspulen zu installieren. Hierfür müssten eigens Standorte gefunden, erschlossen und dort (oberirdische) Anlagen errichtet werden mit Kabelendverschlüssen, luftisolierten Leiterverbindungen, Schaltgeräten, Wandlern, Eigenbedarfsanlage sowie sonstiger Infrastruktur.

In Abhängigkeit von der Kabellänge und -anordnung können bzw. müssen die Kompensationsspulen also teilweise im Umspannwerk oder/und auch entlang der Stromtrasse, in den KÜS bzw. an zusätzlichen Anlagenstandorten dazwischen positioniert werden.

In allen Fällen muss für Kompensationsanlagen zusätzlicher Platz vorgesehen werden, und die Anlagen müssen z. T. brand- und schallgeschützt aufgestellt werden.



Abbildung 15: 250-MVar-Drosselspule für die Blindleistungskompensation (Quelle: Siemens)

### 9.2.1 Resonanzen, Ausgleichsvorgänge und andere Besonderheiten

Bei der Zuschaltung teilverkabelter kompensierter Stromkreise treten sowohl transiente als auch stationäre Überspannungen auf. Die Höhe der Überspannungen wird durch verschiedene Faktoren wie z. B. die Lage und Länge der Erdkabel- und Freileitungsabschnitte sowie die anstehende Netzkurzschlussleistung an der Zuschaltstelle bestimmt. Ein weiteres kritisches Phänomen sind ausbleibende Nulldurchgänge im Strom, die zu Problemen in Leistungsschaltern führen können (/1/,/2/).

Im Folgenden werden Beispiele konkreter Phänomene genannt, die durch teilerdverkabelte, kompensierte Stromkreise entstehen können.

#### Resonanzen mit unterlagerten Netzen

Resonanzphänomene sind u. a. bei einer fehlerbedingten Trennung eines teilerdverkabelten Stromkreises vom Verbundnetz dann möglich, wenn dieser über einen Transformatorabgang mit einem unterlagerten Verteilnetz verbunden bleibt. Die Kabelkapazitäten und Induktivitäten des Transformators und z. B. Asynchronmaschinen in einem Mittelspannungs-Werksnetz bilden dann einen Serienresonanzkreis mit einer Resonanzfrequenz  $f_R < 50$  Hz. Beim Auslaufen der Motoren können deshalb hohe Spannungen, Ströme und Drehmomente entstehen, die die Maschinen und andere Verbraucher gefährden.

#### Zuschalten von Transformatoren

Beim Einschalten von Netzkuppeltransformatoren können durch den sogenannten Inrush-Strom Resonanzfrequenzen angeregt werden, die durch neue Erdkabelstrecken im Netz entstanden bzw. in einen niedrigeren Frequenzbereich verschoben worden sind, siehe Abbildung 16. Diese Resonanzen durch Rushvorgänge können hohe, lang andauernde Überspannungen produzieren.

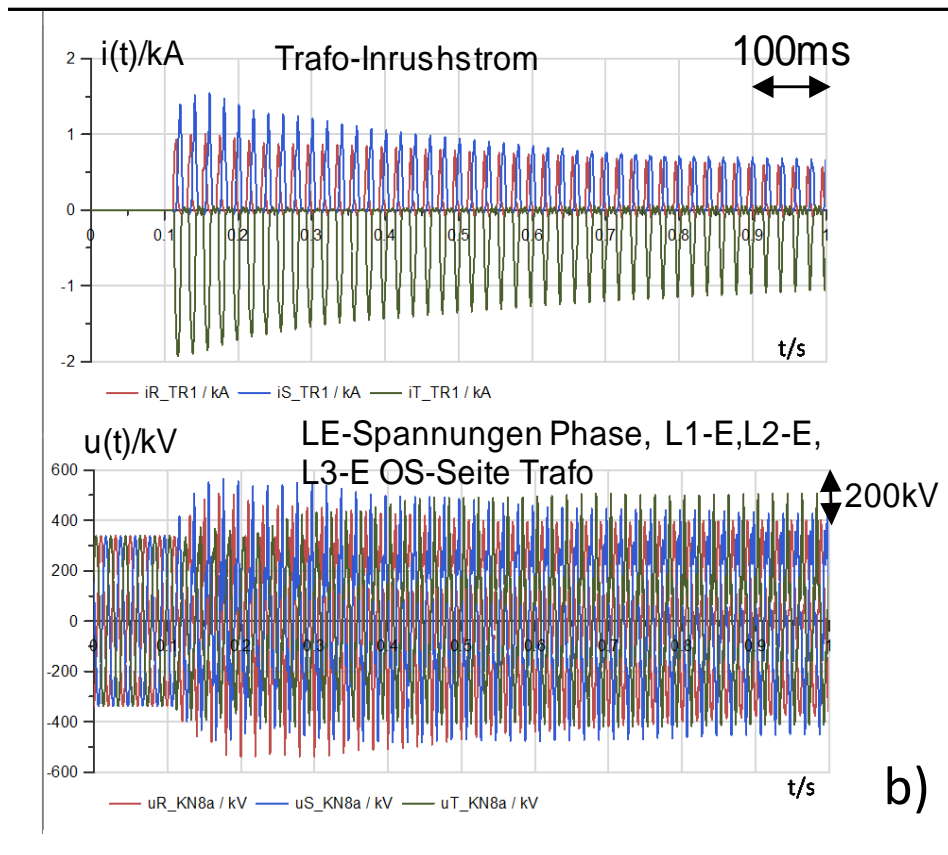
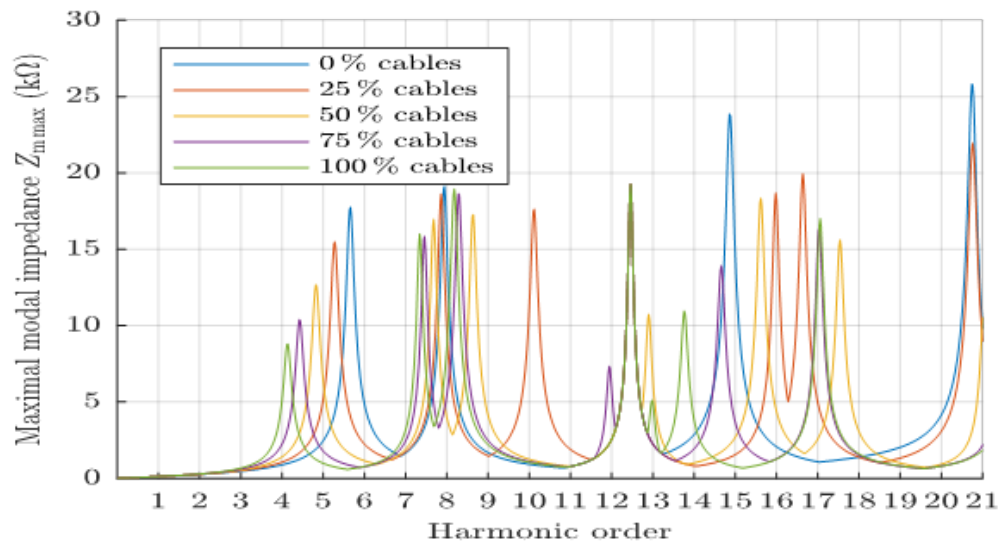
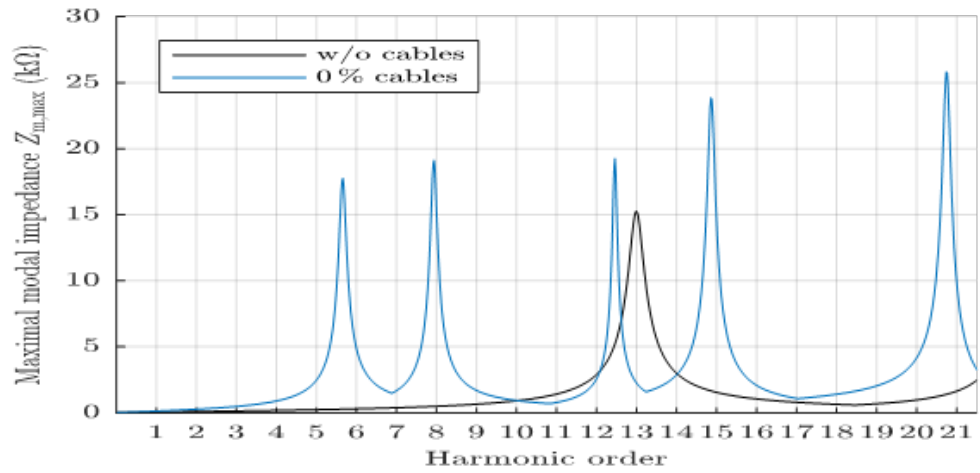
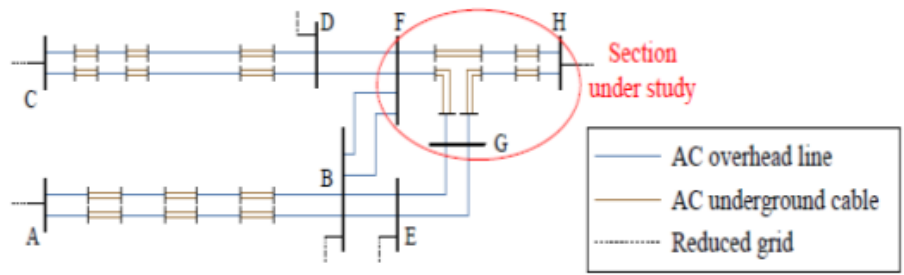


Abbildung 16: Beispiel für Resonanzphänomene Überspannungen durch die Zuschaltung eines Netzkoppeltransformators (Quelle: Amprion)

### Verschiebung der Resonanzfrequenzen in niedrigere betrieblich kritische Bereiche

Mit der zunehmenden Integration von teilverkabelten Stromkreisen in das Übertragungsnetz verschieben sich die Resonanzstellen ganzer Netzbereiche in einen niedrigeren Frequenzbereich. Zusätzlich entstehen neue Resonanzstellen die durch Schalthandlungen und Oberschwingungsquellen (z. B. Umrichter) angeregt werden können. Umrichter (z. B. HGÜ-Konverter) in nahen Netzstationen können ihrerseits durch Netzresonanzen gestört und beeinträchtigt werden. Die Wahrscheinlichkeit, eine Netzresonanz im täglichen Netzbetrieb nach Ausfallsituationen oder beim Netzwiederaufbau anzuregen, steigt somit deutlich an. Kritisch zu sehen ist insbesondere die Verschiebung von Netzresonanzstellen in einen Bereich, in welchem typische harmonische Schwingungen liegen (z. B. Harmonische der Ordnungszahl 5 oder 7). Es besteht dann die Gefahr unzulässiger Rückwirkungen auf Kundenanlagen. Nachstehende Abbildung 17 verdeutlicht, wie Resonanzstellen durch teilverkabelte Stromkreise erzeugt und verschoben werden sowie die hohe Sensitivität bzgl. Teilerdverkabelungsgrad, Netztopologie usw.





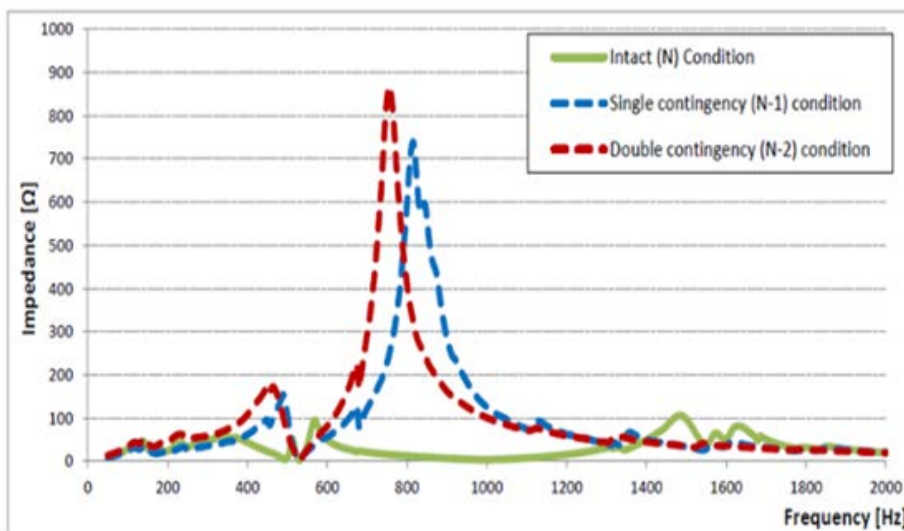
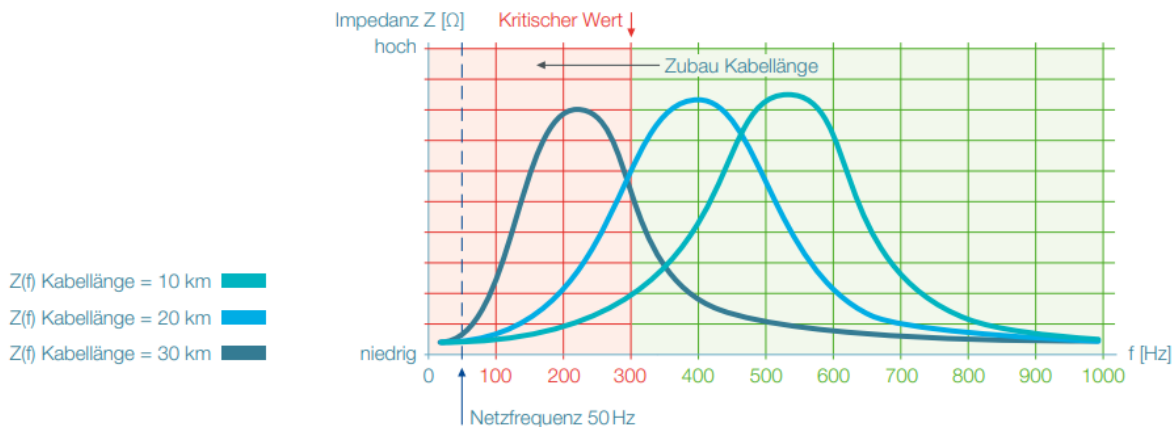


Figure 5-3 Harmonic Impedance in a Transmission Station in Ireland under Intact (N), Single Contingency (N-1) and Double Contingency (N-2) Conditions

Abbildung 17: Verschiebung von Resonanzstellen im Netz (/3/,/4/,/5/)

## Netzwiederaufbau

Technisches Neuland ist der Netzwiederaufbau mit teilverkabelten Stromkreisen nach einer Großstörung. Aufgrund der dann sehr geringen Netzkurzschlussleistung prägen sich die beschriebenen Resonanzeffekte verstärkt aus und erschweren bzw. verzögern damit den Netzwiederaufbau. Dies ist bisher noch nicht untersucht, da bislang kein einziges der Pilotvorhaben im vollen Systembetrieb ist.

## Beanspruchung der Leistungsschalter

Bei der beidseitigen Abschaltung eines kompensierten, teilverkabelten Stromkreises können auch hohe Beanspruchungen für den Leistungsschalter auftreten. Die Kabelkapazität bildet mit der Induktivität der Kompensationsdrossel einen Parallelschwingkreis, dessen Resonanzfrequenz unterhalb von 50 Hz liegt. Dadurch kommt es zu hohen Spannungen über den offenen Schalterpolen

(siehe Abbildung 18). Steigt die Spannung über den offenen Schalterpolen sehr schnell an, besteht die Gefahr von Rückzündungen und u. U. einem Schalterversagen.

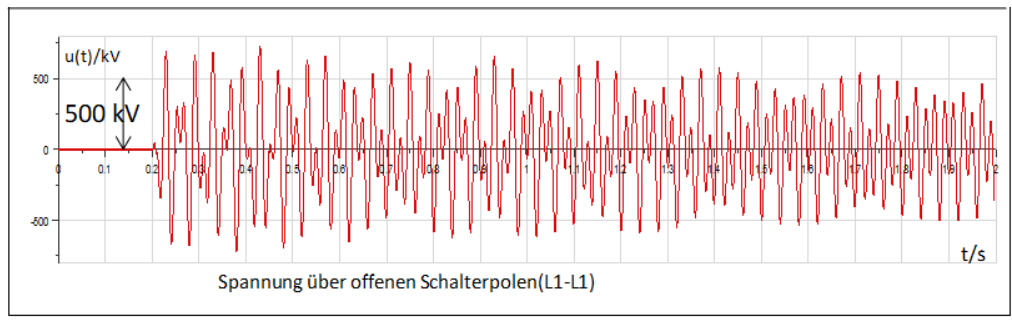


Abbildung 18: Spannung über den offenen Schalterpolen (L1-L1) nach Abschaltung eines teilverkabelten, kompensierten Stromkreises. (Quelle: Amprion)

### Teilnetzbildung

Teilnetzbildungen können zu hohen Ungleichgewichten in der Blindleistungsbilanz führen, die durch einen hohen AC-Verkabelungsgrad verschärft werden können. Es besteht in solchen Fehlersituationen die Gefahr, dass die durch die Wechselstrom-Verkabelung verursachte hohe Ladeleistung von vielen 100 MVAR in einem Teilnetz zu unzulässig hohen Spannungen – auch in unterlagerten Netzen mit Kundenanschlüssen – führt.

### Schutztechnik

Der Schutz teilerdverkabelter Stromkreise wird deutlich komplexer und erfordert ggf. Sonderschutzkonzepte, die bis jetzt noch nicht erprobt sind.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass teilerdverkabelte, kompensierte 380-kV-Stromkreise zu zahlreichen komplexen Ausgleichsvorgängen, Resonanzphänomenen und sonstigen Problemen führen können. Gleichzeitig müssen unzulässige Rückwirkungen auf Betriebsmittel und ans Netz angeschlossene Kundenanlagen sicher vermieden und die sichere Netzführung in allen Situationen (Normalbetrieb, Sonderschaltungen, Netzfehlersituationen, Netzwiederaufbau usw.) gewährleistet werden.

Die weiträumigen systemtechnischen Auswirkungen auf das Netz sind noch Gegenstand der Forschung. Bisher gibt es (weltweit) wenig Betriebserfahrung. Diese muss zunächst mit Hilfe der vorgesehenen Pilotstrecken gewonnen werden.

### Literaturverweise zu diesem Kapitel

/1/ Lösing, Vennemann, Amprion, Technische Herausforderungen bei der 380-kV-Teilverkabelung im Höchstspannungsnetz, ETG Fachtagung Netzregelung 2019. Amprion)

/2/ Mustafa Kizilcay, Pawel Malicki, Simon Papenheim, Martin Lösing, Klaus Vennemann "Influence of shunt compensated EHV transmission lines consisting of several overhead line and XLPE cable sections on system performance", Cigre 2019 (Uni Siegen und Amprion)

/3/ A. Neufeld, N. Schäkel, L. Hofmann, M. Lösing: Probabilistic Calculation of Harmonic Voltages in Transmission Grids with Varying Shares of Underground Cables (Paper Nr. 44, Cigré Symposium Aalborg 2019); Auszug aus einer Studie der Leibniz Universität Hannover und Amprion.

/4/ Broschüre Drehstrom-Erdkabel TenneT

/5/ CIGRE, Technical Brochure C4/B4: Network modelling for harmonic studies, April 2019

### 9.2.3 Immissionen

#### Elektrische und magnetische Felder (EMF)

##### *Eher Vorteilhaftes EMF-Eigenschaften von Erdkabelstrecken*

Wegen der schirmenden Eigenschaften der Erdkabel und des umgebenden Erdreichs für elektrische Felder treten an Erdkabeltrassen keine elektrischen Felder auf. Die Darlegungen und Nachweise zur Einhaltung der EMF-Anforderungen gemäß 26. BImSchV beschränken sich dort also auf die Magnetfelder.

Die räumliche Anordnung der Erdkabel führt dazu, dass die magnetische Flussdichte mit zunehmendem seitlichen Abstand von einer Erdkabeltrasse i. d. R. stärker abfällt als bei einer Freileitung, siehe Abbildung 19, die jeweils typische Verläufe im Vergleich veranschaulicht.

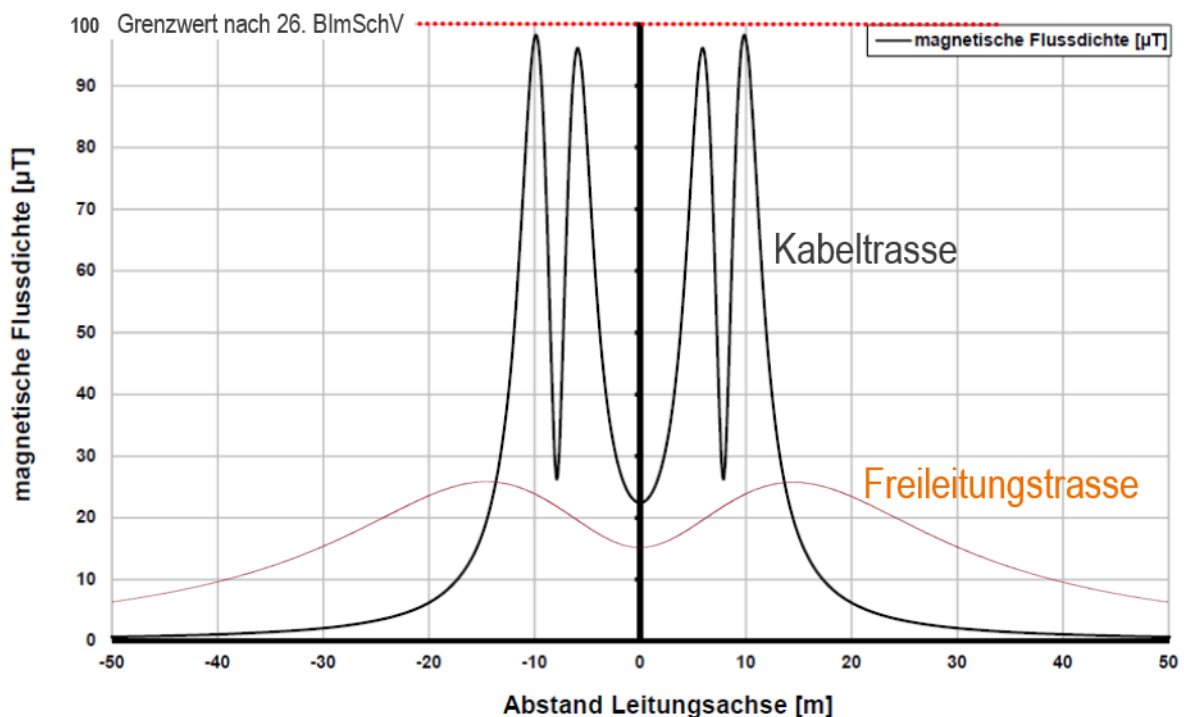


Abbildung 19: Verlauf der magnetischen Flussdichte über einer Erdkabeltrasse (Quelle: Antragsunterlagen zur Planfeststellung der 380-kV-Freileitung Wahle - Mecklar, Abschnitt A) sowie unter einer gleichwertigen Freileitung (Quelle: Standard-Donauanordnung, Phasenfolge L1L2L3-L1L2L3)

##### *Eher nachteilige EMF-Eigenschaften von Erdkabelstrecken*

Die maximalen Flussdichten an öffentlich zugänglichen Orten in unmittelbarer Nähe der Erdkabel (z. B. bodennah über einer Trasse) können deutlich über den möglichen Maximalwerten unter einer entsprechenden Freileitung liegen. Außerdem kann der Wert von 100  $\mu\text{T}$  in der Nähe einer Erdkabeltrasse eher als bei Freileitungen überschritten werden.

Erdkabelstrecken im Verbundnetz müssen i. d. R. wie Freileitungen für hohe Übertragungsströme geeignet sein. Verlegeart, Anordnung und Tiefe werden deshalb für einen Betrieb nahe an der thermischen Grenze ausgelegt. Demgegenüber verschlechtern alle theoretisch möglichen Maßnahmen zur Feldminimierung nach 26. BImSchVVwV, nämlich das Minimieren der Kabeladerabstände sowie das Optimieren von Leiteranordnung, Verlegegeometrie und Verlegetiefe, die Wärmeabfuhr im Boden. Die Übertragungskapazität würde sich dabei also vermindern. Im

Bereich von HDD-Bohrungen (z. B. bei Kreuzung oder Düker) werden darüber hinaus noch bautechnisch bedingte Mindestabstände notwendig. Möglichkeiten zur Minimierung des Magnetfeldes sind daher i. d. R. nicht gegeben.

Die in Abbildung 19 gezeigten Verläufe der magnetischen Flussdichte an einer Erdkabel- bzw. Freileitungstrasse beziehen sich auf ein aktuelles Erdkabelvorhaben von zwei (Erdkabeldoppel-)Systemen (= insgesamt 12 Adern) für 3.600 A je (Erdkabeldoppel-)System sowie eine gleichwertige Standard-Freileitung in Donauanordnung. Die gezeigten Flussdichte-Verläufe können sich durch Veränderung von Stromstärke, Verlegetiefe, Abstand der Kabeladern (z. B. ausgelöst durch die lokalen Bodeneigenschaften) bzw. die Freileitungsgeometrie und die jeweilige Höhe des Bezugspunkts u. U. erheblich verändern.

Wegen der Möglichkeit einer unmittelbaren Annäherung von Personen an in Betrieb befindlichen Höchstspannungskabeln muss insbesondere für entsprechende Betriebsbereiche (Kanal, Tunnel, Kabelendmast, Kabelübergangsstation etc.) die Einhaltung der 26. BImSchV bzw. der Arbeitsschutzvorschriften sichergestellt und ggf. unzulässige Annäherungen z. B. mittels mechanischer Barrieren eingeschränkt oder verhindert werden.

## **Lärm**

Betriebsbedingt erzeugt ein Erdkabel keine Geräuschmissionen. Dafür spielt das Thema Baulärm bei Teilerdverkabelungen eine tendenziell größere Rolle als bei Freileitungsvorhaben. Wegen der im Vergleich zu Freileitungstrassen meist umfangreicheren Bauaktivitäten (Grabenaushübe, Bohrungen, Rückverfüllung, Verdichtung über längere Strecken) werden für die Einhaltung der AVV Baulärm teilweise aufwändige Gutachten gefordert.

### **9.2.4 Beeinflussung von benachbarten Pipelines und anderen leitfähigen Infrastrukturen**

Das durch den Laststrom verursachte magnetische Feld im Bereich einer Höchstspannungsleitung ist auch maßgebend für die Höhe der Wechselspannungsbeeinflussung auf ggf. parallel verlaufende leitfähige Infrastrukturen, z. B. Rohrleitungen (Pipelines) für Gas oder Öl. Im Nahbereich der Trasse ist das Feld eines Erdkabels meist größer als das einer Freileitung, siehe Abbildung 19. Höchstspannungskabel werden also in eng gebündelten Energietrassen häufig höhere Wechselspannungsbeeinflussungen verursachen und damit die Anforderungen für einen wirksamen Sach- und Personenschutz erhöhen.

Mit steigendem Abstand zwischen Strom- und Rohrleitung fällt die magnetische Flussdichte eines Erdkabelsystems jedoch deutlich steiler ab als die einer Freileitung. Der Einfluss von Freileitungen auf Rohrleitungen wird im Fall einer Parallelführung im größerem Abstand (> 20 m) also größer als bei Erdkabeln sein.

Das Arbeitsblatt GW 22 aus dem Regelwerk des Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) behandelt allgemein die Vorgehensweise und Maßnahmen bei Beeinflussungen infolge Näherungen und Kreuzungen von durchgehend elektrisch leitenden Rohrleitungen mit Hochspannungs-Drehstromanlagen und Wechselstrom-Bahnanlagen. Diese Anforderungen gelten unabhängig davon, ob die Stromleitung als Erdkabel oder als Freileitung ausgeführt ist. Die Grenzwerte für die maximale Wechselspannungsbeeinflussung von Fremdleitungen dienen dem Personenschutz und unterscheiden nicht zwischen Erdkabel und Freileitung.

Mit der Errichtung von Kabelübergabestationen (KÜS), welche für eine Teilerdverkabelung erforderlich sind, erhöht sich allerdings der Prüfaufwand. Die Beeinflussung von kreuzenden Leitungen oder anderen Fremdanlagen im Nahbereich jeder KÜS muss zusätzlich bewertet werden.

### 9.3 Minimale und maximale Abschnittslänge

Aus elektrotechnischer Sicht ist der Verkabelungsgrad zu begrenzen, da

- unzulässige Rückwirkungen auf Betriebsmittel und Kundenanlagen durch Überspannungen oder Resonanzen sicher vermieden werden müssen,
- der sichere Netzbetrieb (Normalbetrieb, Sonderschaltungen beim Netzausbau, Netzwiederaufbau usw.) gegeben sein muss,
- eine Risikobegrenzung im Sinne der Systemstabilität entsprechend § 11 EnWG gewährleistet werden muss.

Ziel der Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung ist es, ausreichend Betriebserfahrung zu sammeln, um den Rahmen der elektrotechnischen Grenzen in der Praxis zu prüfen und zu bestätigen.

Aus technischer Sicht lässt sich aus den bisherigen Studien nicht pauschal eine „harte Grenze“ für einen Anteil an Erdverkabelung in einem Netzgebiet angeben. Für eine konkrete Pilotstrecke haben die Analysen beispielsweise ergeben, dass eine Ladeleistung von 450 MVar– 500 MVar in dem Stromkreis nicht überschritten werden sollte. Dies muss jedoch jeweils projektspezifisch für die jeweiligen Stromkreise und mit Blick auf die jeweilige Netzregion – wie zuvor umfangreich beschrieben – im Sinne der Risikominimierung berechnet werden.

Die Integration teilerdverkabelter Drehstromprojekte in das eng vermaschte Übertragungsnetz mit seinem Zweck der Versorgung der Fläche (im Gegensatz zu Gleichstromprojekten) ist technisches Neuland und bringt zahlreiche sowie komplexe technische bzw. betriebliche Herausforderungen mit sich. Zusammen mit verschiedenen Universitäten hat Amprion den Einfluss zunehmender AC-Teilerdverkabelungsanteile auf das Netzverhalten in verschiedenen Grundsatzstudien untersucht. Sie führt diese Studien auch in Zukunft weiter fort, um die technischen Risiken zu analysieren und Ansätze zu erarbeiten, diese zu minimieren.

### 9.4 Fazit

Grundsätzlich steigt mit zunehmender Teilerdverkabelung die Komplexität der Netzbetriebsführung. Bei zunehmender Wechselstromverkabelung müssen die ÜNB in jedem Einzelfall umfangreiche Untersuchungen zur notwendigen Auslegung der Betriebsmittel durchführen. Die Auslegung der Betriebsmittel ist grundsätzlich beherrschbar. Es gilt aber, die oben beschriebenen Einflüsse und Effekte projektspezifisch zu prüfen und zu bewerten, um eine Risikominimierung im Sinne der Systemstabilität entsprechend § 11 EnWG zu gewährleisten. Es gibt für jedes „Einzelproblem“ eine technische Lösung, jedoch verlagern/verschieben sich mit zunehmender Komplexität dann die „Probleme“ in andere Bereiche (z. B. verschieben sich die Resonanzstellen).

Aus technischer Sicht ist die Wechselstromverkabelung im eng vermaschten Verbundnetz immer noch technisches Neuland. Da bisher keines der Pilotvorhaben mit Teilerdverkabelung im vollen Systembetrieb ist und die Auswirkungen auf das Gesamtnetz noch nicht geklärt sind, ist weiterhin eine Begrenzung auf Pilotvorhaben und damit eine Risikominimierung im Sinne der gesetzlich festgeschriebenen Systemsicherheit und Netzstabilität dringend erforderlich.

Durch die Anforderungen der Energiewende – steigender Anteil von fluktuierenden Erzeugern und hohe zu überbrückende räumliche Distanzen zwischen Erzeugungs- und Verbrauchsschwerpunkten – steigt die Komplexität des Systems enorm. Um die Systemstabilität zu erhalten, müssen die ÜNB das Netz anpassen und weiterentwickeln. Weil weniger rotierende Massen im Netz sind, benötigen die Netzbetreiber innovative technische Lösungen zur Spannungshaltung oder lastflusstuernde Elemente. Im gleichen Atemzug werden durch den vermehrten Zubau an Leistungselektronik auch

Oberschwingungsprobleme im Netz ein wichtiges Thema. Dies gilt es zunächst weiter im Rahmen von einer begrenzten Anzahl an Pilotvorhaben zu untersuchen, bevor über eine Ausweitung der Teilerdverkabelung im eng vermaschten Wechselstromnetz nachgedacht wird.

# 10 Wirtschaftlichkeit

## 10.1 Einflussfaktoren

Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit einer Variante müssen alle Kosten berücksichtigt werden, die in der Nutzungszeit des Erdkabels anfallen würden. Die unterschiedlichen Kostenarten sind in der nachfolgenden Grafik dargestellt.



Abbildung 20: Kostenarten und Aufteilung für Investitionen in das Höchstspannungsnetz

Als maximale Nutzungszeit wird die langlebigste Komponente, der Freileitungsmast, mit ca. 100 Jahren angenommen. Falls andere Komponenten kürzere Nutzungszeiten aufweisen, werden diese entsprechend erneuert, um die Nutzungszeit der Freileitung zu erreichen. Es wird angenommen, dass sowohl bei Ausfällen als auch bei Erneuerung die Redispatchkosten entsprechend der Nichtverfügbarkeitszeit anfallen.

## 10.2 Kostengegenüberstellung Freileitung / Erdkabel

Die Kostengrundlage für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit kann aus den im NEP vermerkten Kosten übernommen werden. Die weiteren anfallenden Kosten für z. B. Redispatch wurden basierend auf heutigen Erfahrungen der ÜNB geschätzt. Um das Ergebnis zu validieren, wurde eine Variationsrechnung durchgeführt. Hierbei werden die geschätzten Kosten und Ansätze im heute vertretbaren Rahmen variiert. So sind drei Varianten entstanden:

- Niedrigere Energiekosten (nE) als auch höhere durchschnittliche Auslastung der Erdkabel mit geringeren Fehlerraten und längeren Nutzungsdauer der Erdkabel
- Heutige Energiekosten (hE)
- Größere Energiekosten (gE) als auch niedrigere durchschnittliche Auslastung der Erdkabel mit höheren Fehlerraten

Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit wurden diverse Kostenarten berücksichtigt und entsprechend auf das heutige Datum abgezinst, um den Kapitalwert zu bestimmen. Sonderbaumaßnahmen, sowie Verzögerungen, Verlängerungen in den Genehmigungsverfahren wurden hier nicht angenommen. Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine 5 km lange

Strecke, die entsprechend mit 380-kV-Erdkabel bzw. 380-kV-Freileitung für mindestens 2,6 Gigawatt realisiert wurde, ergab:

1. Die Investitionskosten sind für Erdkabel ca. Faktor 6 höher als für Freileitungen.
2. Die Erneuerungskosten sind für Erdkabel ca. Faktor 16 höher als für Freileitungen.
3. Ein Erdkabel ist immer unwirtschaftlicher als eine Freileitung (Faktor zwischen 1,5 bis 4).

### **10.3 Fazit**

TEV-Abschnitte sind nach ersten Abschätzungen und Erfahrungen sowohl in Planung, Errichtung und Betrieb erheblich teurer. Aus den bisherigen Pilotvorhaben lassen sich noch keine abschließend gesicherten Erkenntnisse hinsichtlich Betrieb, Reparatur und Erneuerung ableiten.



## Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating current (engl.), Wechselstrom
ALEGrO	Name eines Vorhabens der Amprion GmbH
AVV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift
BBPlG	Bundesbedarfsplangesetz
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BImSchVVwV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
EMF	Elektrische und magnetische Felder
EnLAG	Energieleitungsausbaugesetz
EnWG	EnergieWirtschaftsGesetz
FFH-Gebiet	Fauna-Flora-Habitat
HDD	Horizontal Directional Drilling (engl.), Spülbohrverfahren
KÜA	Kabelübergangsanlage
KÜS	Kabelübergabestation
LBP	Landschaftspflegerische Begleitplan
LROP	Landes-Raumordnungsprogramm
μT	Mikrotesla, Maßeinheit für die magnetische Flußdichte
MVA <sub>r</sub>	Mega-Var, Maßeinheit für Ladeleistung
NEP	Netzentwicklungsplan
PFB	Planfeststellungsbeschluss
PFV	Planfeststellungsverfahren
ROG	Raumordnungsgesetz des Bundes
ROV	Raumordnungsverfahren
TEV	Teilerdverkabelung
TöB	Träger öffentlicher Belange
TSO	Transmission System Operator vgl. ÜNB
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz
UVS	Umweltverträglichkeitsstudie
UW	Umspannwerk
VPE	Vernetztes Polyethylen
ZFSV	Zeitweise fließfähiger, selbstverdichtender Verfüllbaustoff