

---

# **110-kV-Hochspannungsleitung Crossen - Herlasgrün, Bl. 1100**

## **3. BA Mast 60 bis Mast 127n**

### **Vergleichsrechnung zur Bewertung einer alternativen Verkabelung**

Stand: August 2021

---

Auftraggeber: Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH  
Netzregion Süd-Sachsen  
Frauensteiner Straße 73  
09599 Freiberg



---

Bearbeiter: SPIE SAG GmbH  
CeGIT, Servicebüro Cottbus  
Annahofer Graben 1-3  
03099 Kolkwitz



## Inhaltsverzeichnis

1.	Rahmenbedingungen.....	3
2.	Investitionskosten für die Freileitungs- und Kabelausführung des Leitungsabschnittes auf neuer Trasse .....	10
3.	Verlustberechnung für den neuen Leitungsabschnitt als Freileitungs- und Kabelausführung ohne Berücksichtigung der Netzauswirkungen .....	11
4.	Wirtschaftlichkeitsvergleich .....	14
4.1	Wirtschaftlichkeitsvergleich bei isolierter Betrachtung des neuen Leitungsabschnittes ohne Berücksichtigung der Netzwirkungen .....	15
4.2	Wirtschaftlichkeitsvergleich des neuen Leitungsabschnittes im Netzverbund	16
5.	Verzeichnis über Literatur / Gesetze / Verordnungen / Vorschriften / Gutachten zum Erläuterungstext .....	18

## 1. Rahmenbedingungen

Da der Neubau des 3. Bauabschnitts der 110-kV-Leitung Crossen - Herlasgrün auf einer bisher nicht bestehenden Trassenführung vorgesehen ist, muss für diesen Leitungsabschnitt gemäß §43h EnWG ein Gesamtkostenvergleich zwischen Freileitungs- und Erdkabelauführung angestellt werden.

Hochspannungsleitungen auf neuen Trassen mit einer Nennspannung von 110 Kilovolt oder weniger sind als Erdkabel auszuführen, soweit die Gesamtkosten für Errichtung und Betrieb des Erdkabels die Gesamtkosten der technisch vergleichbaren Freileitung den Faktor 2,75 nicht überschreiten und naturschutzfachliche Belange nicht entgegenstehen.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zum Vergleich Kabel/Freileitung variieren je nach zugrunde gelegten Annahmen meist stark. Um für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Kabelanlage von einem realistischen Kostenansatz ausgehen zu können, wurde durch MITNETZ STROM eine Fachfirma mit Erfahrung im Bau von 110-kV-Kabeln beauftragt, eine günstige und baubare Kabeltrasse zu finden sowie einen projektbezogenen Kostenansatz zu ermitteln.

Für die Kalkulation der Kosten einer Kabelauführung wurde eine der Freileitungsvariante vergleichbare Trasse ausgewählt (Abbildung 1). Geplante Bohrungen sind in der Abbildung violett gekennzeichnet.

Die vergleichbare Kabeltrasse ist ca. 18 km lang und folgt weitgehend dem Verlauf der geplanten Freileitung, wobei topographische und ökologische Besonderheiten bei der Kabelführung berücksichtigt werden müssen.

Die Trasse verläuft überwiegend auf landwirtschaftlicher Nutzfläche. Es werden eine Bahnstrecke sowie mehrere Straßen und Gewässer gekreuzt.

Die Länge der Kabelanlage beruht auf dem aktuellen Planungsstand der Kabeltrasse. Da noch keine Genehmigung vorliegt, sind Trassenänderungen mit entsprechend höheren Kosten möglich. Im Gegensatz dazu kann bei der Freileitung von einem raumgeordneten Korridor ausgegangen werden.

Im gesamten Baugebiet ist mit festen Böden der Bodenklasse 3-5 zu rechnen. Teilweise muss von felsigen Böden bis Bodenklasse 7 ausgegangen werden. Der Mehraufwand für einen Anteil nichtbindiger oder felsiger Böden wird bei der Kalkulation durch einen Zuschlag berücksichtigt.

Für die Kostenkalkulation wurden bestehende Anlagen Dritter, wie Ver- und Entsorgungsleitungen, usw., die zu Trassenkonflikten und damit zu erhöhtem Kostenaufwand führen können, nicht ermittelt. Der erforderliche Aufwand wird wie auch Zulagen für befestigte Oberflächen durch einen Zuschlag berücksichtigt.



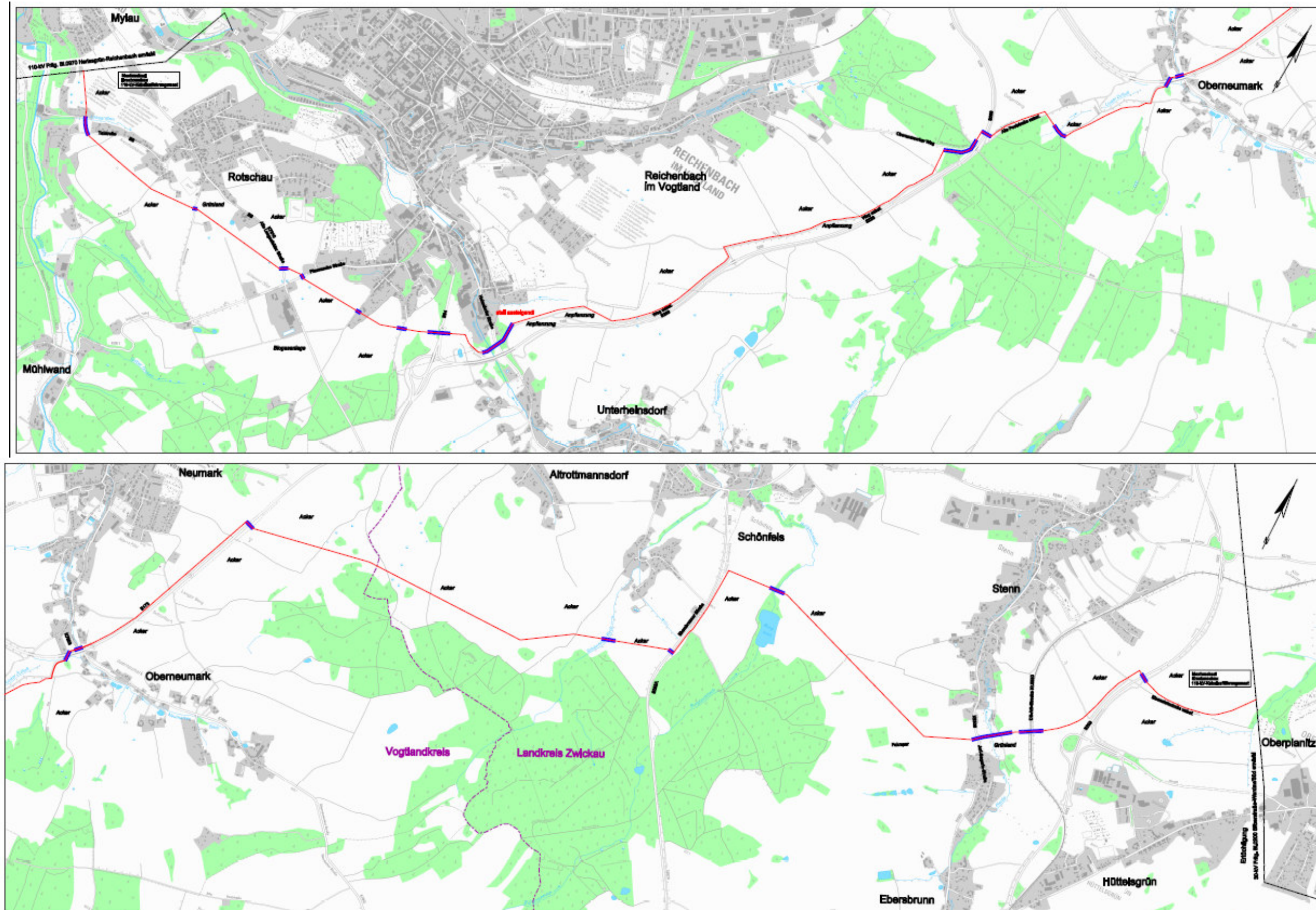


Abbildung 1:  
Verlauf der  
Kabeltrasse



Für das Doppelkabel soll eine Leerrohrtrasse errichtet werden. Das hat den Vorteil, dass die Tiefbauarbeiten zeitlich unabhängig von der Kabelinstallation erfolgen können. Erfolgt die Kabellegung direkt im Erdboden, muss der gesamte Abschnitt vom Beginn der Tiefbauarbeiten bis zur Verlegung offengehalten werden. Wegen der erforderlichen Tiefe des Grabens ist Verbau oder Anböschung notwendig.

Die Bauarbeiten zur Kabelverlegung ziehen sich über eine längere Zeit auf der gesamten Leitungstrasse hin. Ungünstige Witterung mit Regenfällen und starker Nässe kann die Vorbereitungen unbrauchbar machen. Bei der Verlegung einer Leerrohranlage können die Bauabschnitte kurzgehalten werden und man ist weitgehend unabhängig von der Witterung.

Die Übertragungsleistung der Leitung muss 142,5 MVA bei Nennbetrieb betragen. Durch die hohe Wärmeabgabe der Kabel kann es zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Leitungssysteme kommen, wodurch die Übertragungsleistung des Kabels zu stark verringert wird. Zudem muss ein entsprechender Abstand zwischen den Systemen eingehalten werden, um im Störfall ohne Abschaltung des zweiten Systems gefahrlos Reparaturarbeiten am Kabel durchführen zu können.

Gemäß Richtlinie des Netzbetreibers wird daher ein Kabelgraben für die zwei Leerrohrsysteme mit einem Abstand von ca. 2 m zwischen den Systemen vorgesehen (Abbildung 2).

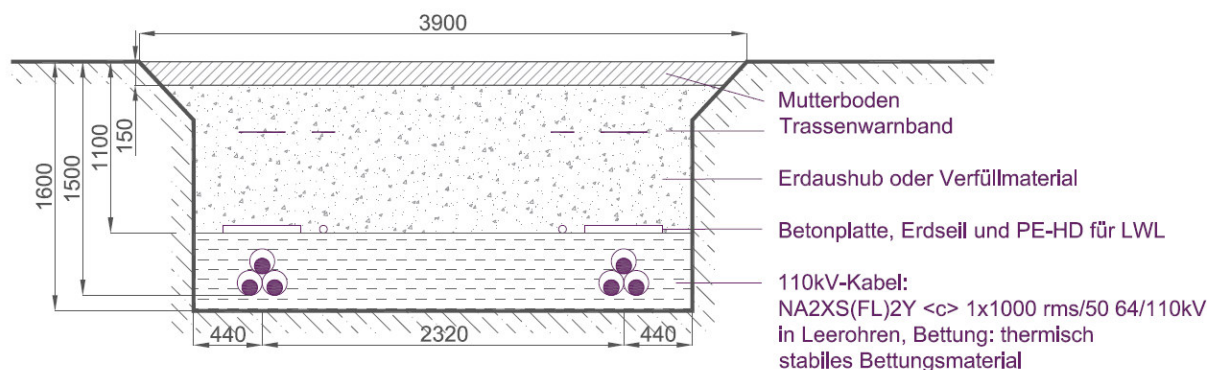


Abbildung 2: Querschnitt Kabelgraben

Für jeden Leiter ist ein Leerrohr vom Typ Raugard HV DN 160 x 6,2 oder vergleichbar vorgesehen, für die Horizontalbohrungen Raugard HV DN 180 x 16,4. Dieses Rohr wurde speziell für hochbelastete Kabelanlagen entwickelt und hält im Gegensatz zum normalen PE-Rohr auch erhöhten Wärmebeanspruchungen stand. Durch seine spezielle Innenbeschichtung werden die Zugkräfte beim Einzug der Kabel reduziert. Zusätzlich werden ein Leerrohr PE HD 50 SDR 17 für Datenkabel und zwei Erdseile verlegt. Die Rohranlage wird über die gesamte Strecke durchgängig fertiggestellt und erst zur Kabelinstallation an den Muffenstandorten geöffnet. Die Grabentiefe beträgt ca. 1,6 m.

Die Bettung der Leerrohre erfolgt in einem thermisch stabilen Bettungsmaterial, wie z.B. RSS Flüssigboden. Dieses behält seinen thermischen Leitwert auch bei Erwärmung durch die im Kabel entstehende Verlustleistung bei und erhöht somit die Übertragungsleistung der Kabelanlage. Für die Dimensionierung wird ein Wärmeleitwert von  $\lambda E = 1,0 \text{ W/(Km)}$  sowohl für den unbelasteten Erdboden als auch für die Rohrbettung angenommen.

Der Erdaushub wird getrennt vom Mutterboden seitlich abgelegt. Wenn der Aushub zum Wiedereinbau geeignet ist, muss er gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG zum Verfüllen verwendet werden.

Nach der Herstellung des Kabelgrabens erfolgt die Verlegung des Leerrohrpaketes mit nachfolgender Umhüllung mit Bettungsmaterial. Dieses wird in fließfähiger Konsistenz eingebracht, wobei ein Aufschwimmen der Leerrohre durch geeignete Maßnahmen zu verhindern ist. Das Leerrohr sollte allseitig von einer mindestens 10 cm starken Schicht Bettungsmaterial umgeben sein.

Ist das Bettungsmaterial abgetrocknet, werden eine Lage Betonplatten sowie das Leerrohr für das Steuerkabel, die Erdseile und Warnband über den Kabelsystemen verlegt. Nach dem lagenweisen Verfüllen und Verdichten wird der abgelagerte Mutterboden aufgezogen und der restliche Aushub entsorgt.

Der zum Wiedereinbau bestimmte Aushub muss alle 500 t auf Verunreinigungen beprobt werden. Die Kalkulation geht davon aus, dass die maximale Verunreinigung der LAGA Einbauklasse Z1 entspricht und kein unbelasteter Boden geliefert werden muss.

Querungen von Bahnstrecken, Bundes-, Staats- und Kreisstraßen sowie Gewässerquerungen werden als gesteuerte Horizontalspülbohrung geplant. Dabei muss der Abstand der Kabelsysteme zueinander vergrößert werden, wenn die Überdeckung der Kabel größer und damit die Wärmeabgabe erschwert wird. Der Abstand der Systeme sollte dann mindestens 2 m zueinander betragen. In die Bohrungen werden die entsprechende Anzahl Leerrohre eingezogen. Im Bereich der Bohrungen sind zwei zusätzliche Leerrohre DN50 für die Erdseile vorzusehen, die in der restlichen Trasse direkt im Erdreich liegen.

Straßen und Wege niedrigerer Kategorie werden im offenen Tiefbau gequert.

Eine von der Bahn geforderte Pressbohrung für die Querung der Bahnstrecke wird in der Kalkulation durch einen Zuschlag berücksichtigt.

Die gesamte Breite der Baustelle mit Kabelgraben, lastfreien Streifen, Baustraße und Aushublagerfläche wird mit 18,5 m angenommen.

Eine längere Kabelverbindung setzt sich aus mehreren Teilabschnitten zusammen. Grund dafür ist, dass transportierbare Maße und Gewichte der Kabel eingehalten werden müssen und dass beim Einzug von Kabeln in Leerrohranlagen die maximale Zugkraft des Kabels nicht überschritten werden darf. Beides begrenzt die maximale Länge der Kabelabschnitte. Die Anzahl der Abschnitte muss durch drei teilbar sein, da ein sog. Cross-Bonding System installiert wird. Aus dem gleichen Grund müssen je drei aufeinander folgende Abschnitte gleich lang sein. Diese Einschränkungen führen

im vorliegenden Fall für die Budgetplanung auf eine Kabellänge von 852 m pro Abschnitt und 20 Muffenstandorte.

Alle Muffengruben befinden sich im freien Gelände. In jeder Muffengrube müssen 6 Muffen installiert werden.

Die in Abbildung 3 gezeigte Anordnung stellt dabei die Mindestanforderung bezüglich des Platzbedarfes bei den Muffenmontagen dar. Wenn es die räumlichen Gegebenheiten zulassen, sollte mehr Platz zwischen den Systemen vorgesehen werden, z.B. 2,5 – 3 m.

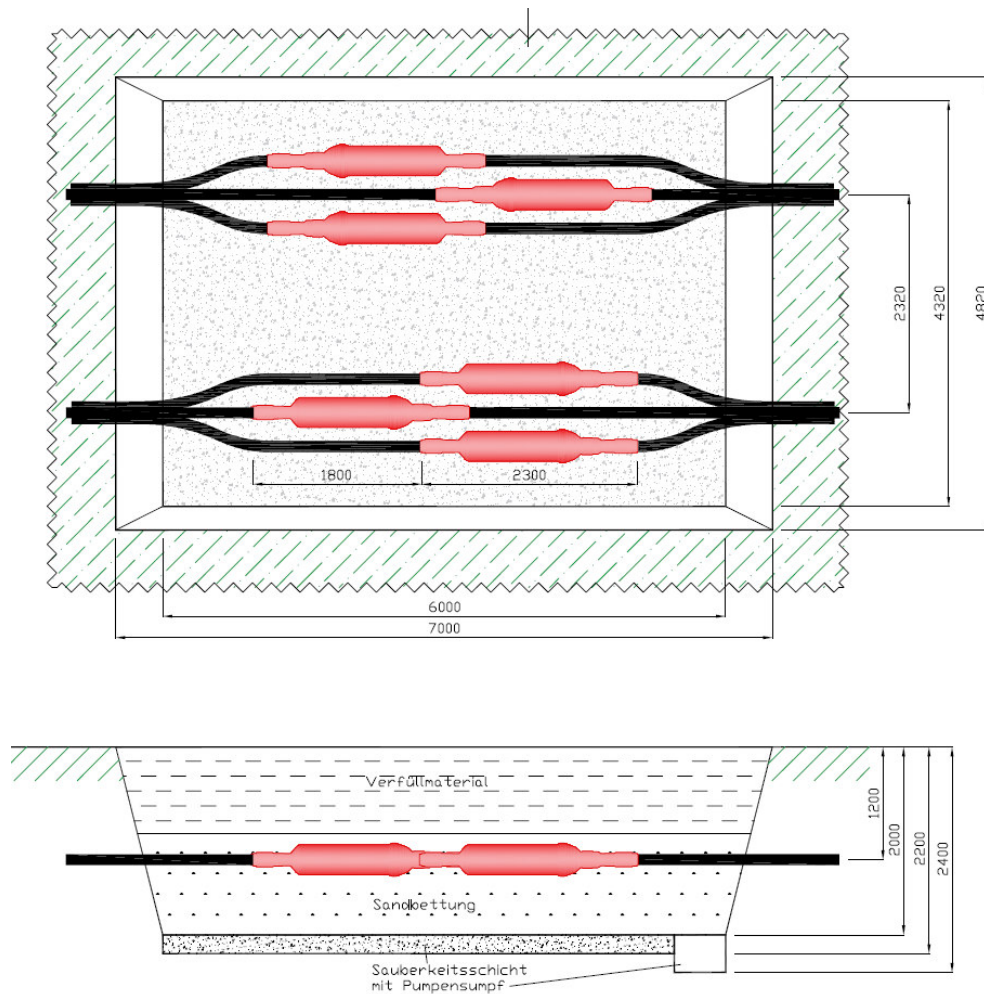


Abbildung 3: Anordnung der Muffengrube

Muffen stellen einen deutlichen Schwachpunkt für eine Kabelverbindung dar. An die Montagebedingungen werden daher besondere Anforderungen gestellt. Für den Zeitraum der Montage ist die Muffengrube deshalb komplett einzuhausen (Abbildung 4). Die Einhausung wird nach der Montage entfernt und die Grube wird im gleichen Verfahren wie die übrige Kabeltrasse verfüllt.



Abbildung 4: Beispiel Einhausung Muffengrube

Zur Vermeidung zu hoher Schirmverluste wird Cross-Bonding eingesetzt. Dabei werden die Kabelschirme in den Muffen nicht verbunden, sondern mittels Koaxialkabel in spezielle Cross-Bonding-Boxen geführt, wo die Schirme zyklisch vertauscht werden. Dadurch kann die Schirmspannung über die gesamte Kabellänge nahezu kompensiert werden. An jedem Muffenstandort muss für jedes Kabelsystem je eine Cross-Bonding-Box bzw. Link - Box installiert werden. Das kann in bodenbündigen Betontrögen oder -schächten oder in oberirdischen Schränken erfolgen. Bei oberirdischer Montage ist ggf. ein Anfahrerschutz vorzusehen. An jeder Muffengrube ist eine Erdungsanlage zu errichten. Zu den Boxen muss jederzeit der Zugang gewährleistet sein.

Da das Kabel nicht entlang von nutzbaren Straßen verlegt werden kann, müssen Baustraßen entlang der Kabeltrasse eingerichtet werden. Zum Transport der Kabeltrommeln und der Bohrtechnik für Horizontalspülbohrungen muss ein Teil dieser Baustraßen für ein Fahrzeuggewicht bis 40 t geeignet sein.

Die übrigen Baustraßen müssen für ein Fahrzeuggewicht von 12 t ausgelegt sein und werden benötigt für alle Muffenstandorte an denen für die Kabellegung die Kabelwinde positioniert wird. Weiterhin werden die Straßen dieser Kategorie für alle Baufahrzeuge zur Erstellung der Muffengruben sowie der Zielgruben von Bohrungen genutzt. Die hierfür genutzten Fahrzeuge müssen entsprechend ausgewählt werden und dürfen die zulässige Last nicht überschreiten.

Für die Kalkulation wurden 5211 m Baustraße der Kategorie bis 12 t und 3072 m Baustraße der Kategorie bis 40 t berücksichtigt.

Um das Bodengefüge und die landwirtschaftliche Nutzung der Flächen nicht über Gebühr zu beeinträchtigen, wird für den Wegebau mineralisches Material auf einer Vliesunterlage aufgebracht. Nach Abschluss der Kabelverlegearbeiten werden die Baustraßen wieder zurückgebaut und die Oberfläche wird wieder hergestellt.



Ob die vor Ort vorhandenen Straßen und Wege für die erforderlichen Zufahrten zur Baustelle genutzt werden können, konnte im Rahmen der Kostenkalkulation nicht geprüft werden. Ein gegebenenfalls erforderlicher Wegeausbau und Wegeinstandsetzungen nach Beendigung der Bauarbeiten werden daher über einen Zuschlag berücksichtigt.

Die Ausführung der 110-kV Kabelverbindung erfolgt mit einem VPE-isolierten Kunststoffkabel mit Aluminiumleiter und Kupferdrahtschirm. Die Dimensionierung der Kabel erfolgte gemäß IEC 60287 Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses und Part 2-1: Thermal resistance.

Um eine der Freileitung vergleichbare Leistung über die Kabel transportieren zu können, sind zwei Kabelsysteme vom Typ NA2XS(FL)2Y 1x1000 rms/50 64/110kV - FO erforderlich.

Zur Kontrolle der Leitertemperatur sind im Kabelschirm LWL-Fasern integriert, über die mittels Prognoseverfahren auf die Leitertemperatur rückgeschlossen werden kann. Moderne Analyseverfahren erlauben darüber hinaus mit Hilfe der Messwerte die Temperaturentwicklung der Kabel in den nächsten Stunden zu berechnen. Dies ermöglicht eine höhere Ausnutzung der Übertragungsleistung des Kabels. Der äußere Kabelmantel ist mit einer leitfähigen Beschichtung versehen, die die Kontrolle des Kabels vor der Inbetriebsetzung und eine regelmäßige Wartung ermöglicht.

Abgeschlossen werden die Kabelanlagen mit Freiluftendverschlüssen mit Verbundisolator. An den Endmasten werden diese auf einer speziellen Masttraverse montiert. Um die Kabel vor transienten Überspannungen zu schützen, werden neben den Endverschlüssen auf den Masten Überspannungsableiter installiert.

Mit wachsendem Kabelanteil nimmt auch der Anteil der kapazitiven Blindleistung des Netzes zu. Durch physikalische Effekte im Isolationsmaterial entsteht bei Kabeln ein Blindleistungsstrom, der den nutzbaren Anteil der übertragenen Leistung reduziert. Beim Zubau von Kabelstrecken mit ihren wesentlich höheren Kapazitätsbelägen werden im Netz Anschaffungs- und Betriebskosten von Blindleistungskompensationsspulen und Erdschlusslöschspulen erforderlich, um die Betriebsweise des Netzes mit Resonanz-Sternpunktterdung beibehalten zu können und die Übertragungsfähigkeit des Netzes zu erhalten. Die Verluste dieser Spulen machen einen Teil der durch die Kabel erzielten Verlusteinsparung wieder zunichte.

Der Ladestrom pro Kabel beträgt  $I'_L = 5,5 \text{ A/km}$ . Für die Gesamtlänge ergibt das  $I_L = 98,5 \text{ A}$  pro Leiter oder als Ladeleistung pro System  $Q = 18,7 \text{ Mvar}$ . Ohne Kompensation würde im Erdschlussfall ein Strom von  $I_E = 263 \text{ A}$  fließen. Dieser Wert übersteigt den zulässigen Maximalwert von  $130 \text{ A}$  im Hochspannungsnetz deutlich, was die Installation von Löschspulen erforderlich macht. Im Zusammenhang mit den restlichen Betriebsmitteln im Netz und der Lastsituation macht sich zudem eine Kompensation des Ladestroms erforderlich.

Zur Kompensation sind somit eine Ladestromdrossel inkl. zusätzlichem Schaltfeld sowie drei Erdschlussdrosseln zu errichten.

## **2. Investitionskosten für die Freileitungs- und Kabelausführung des Leitungsabschnittes auf neuer Trasse**

Die Investitionskosten für den Freileitungsabschnitt auf neuer Trasse werden mit ca. 7,776 Millionen € veranschlagt und beinhalten im Wesentlichen die Kostenpositionen nach Tabelle 1.

*Tabelle 1: Investitionskosten der Freileitung*

<b>Kostenposition</b>	<b>Kostenkalkulation in €</b>
Planung, Projektierung, Bauvorbereitung	43.278
Freileitungsmaterial	654.876
Errichtung der Masten einschließlich Fundamente	3.787.382
Beseilung	620.988
Korrosionsschutz, Mastsignierung	384.815
Wegebau, Gerüstbau, Sonstiges	2.284.641
<b>Gesamtsumme</b>	<b>7.775.980</b>

Nicht enthalten sind Kosten für das Genehmigungsverfahren und Gutachten, für Entschädigungsleistungen und Flurschadenregulierungen sowie Kosten für Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen.

Die Investitionskosten für die Kabelanlage setzen sich hauptsächlich zusammen aus den Kosten für das Kabel, einschließlich Zubehör (Muffen, Endverschlüsse, Gerüste, Überspannungsschutz, usw.), den Montagekosten, den Kosten für die Leerrohranlage, den Projektierungskosten, den Tiefbaukosten, den Kosten für Kabelendmasten und Kompensationseinrichtungen.

Die Tiefbaukosten sind stark abhängig vom Trassenverlauf, der Gelände- und Bodenbeschaffenheit, dem erforderlichen Aufbruch, erforderlichen Bohrungen, dem Aufwand für Oberflächenwiederherstellung, usw.

Die Kosten für die Kabelanlage werden zusätzlich von der Wahl der Hersteller beeinflusst.

Um aussagekräftige Angaben zu den Tiefbaukosten zu erhalten, wurde eine Fachfirma für die Verlegung von 110-kV-Kabel mit der Findung einer möglichen Trasse und einer Kostenschätzung für die Kabelverlegung beauftragt.

Da eine Trassierung entlang vorhandener Wege nicht möglich war, wurde für das Kabel eine Trassenführung gewählt, die sich an der raumgeordneten Trasse der Freileitung orientiert und die entsprechenden Tiefbauarbeiten in der erforderlichen Breite zulässt. Die vom beauftragten Unternehmen vorgeschlagene Trasse hat eine Länge von ca. 18 km.

Nicht erfasste Kosten für Kreuzungen von Anlagen Dritter, befestigte Oberflächen, nichtbindige oder felsige Böden, Ausbau und Instandsetzung von Zufahrten, usw. werden durch einen Zuschlag berücksichtigt.

Bei Überschreitung der Löschgrenze im Netz durch den Einsatz von Kabel sind Maßnahmen zur Umstellung der Sternpunkterdung oder zur Netztrennung erforderlich. Die Kosten beider Alternativen sind enorm hoch. Daher wird empfohlen, diese Kosten im Rahmen der Langfristplanung auf mehrere Netzausbauprojekte zu verteilen.

Dies ist vorliegend noch nicht erfolgt, wird aber bei Erreichen der Löschgrenze zu erheblichen Kosten führen, die weitere Kabelprojekte auf neuen Trassen verhindern.

Die Kostenschätzung für die Kabelanlage beläuft sich auf ca. 33,537 Millionen Euro (Tabelle 2).

*Tabelle 2: Investitionskosten der Kabelanlage*

<b>Kostenposition</b>	<b>Kostenkalkulation in €</b>
Planung, Projektierung, Bauvorbereitung	504.094
Baustraßen	1.892.784
Tiefbau, Leerrohranlage	20.994.993
Kabel und Montage	9.191.490
Übergang Freileitung	423.000
Kompensation	511.000
Zuschlag Oberflächen, Zufahrten, Pressbohrung	20.000
<b>Gesamtsumme</b>	<b>33.537.361</b>

### **3. Verlustberechnung für den neuen Leitungsabschnitt als Freileitungs- und Kabelausführung ohne Berücksichtigung der Netzauswirkungen**

Die beim Betrieb der Leitung entstehenden Verluste unterscheidet man in

- spannungsabhängige Verluste
- stromabhängige Verluste
- Kompensationsverluste.

Spannungsabhängige Verluste entstehen, sobald die Leitung unter Spannung steht. Sie fallen im Betrieb der Leitung ständig und in gleichbleibender Höhe an und werden durch die „Durchlässigkeit“ der Isolierung verursacht. Der Kennwert für diese Durchlässigkeit ist der Leitwertbelag. Der Leitwertbelag von Freileitungen ist

witterungsabhängig. Bei 110-kV-Freileitungen kann man mit einem mittleren Wert von 50 nS/km rechnen. Der Leitwertbelag ist bei Kabeln aufgrund der kompakten Bauweise des Kabels größer als bei Freileitungen. Demzufolge sind bei sonst gleichen Bedingungen die spannungsabhängigen Verluste von Kabeln größer als die von Freileitungen.

Stromabhängige Verluste sind lastabhängig und werden durch den ohmschen Widerstand der Leitungen verursacht. Die stromabhängigen Verluste von Kabeln sind bei sonst gleichen Bedingungen geringer als die von Freileitungen. Dies ist dadurch begründet, dass die Verluste des Kabels wegen der schlechteren Abfuhr der Verlustwärme zwangsläufig klein gehalten werden müssen, was durch einen vergleichsweise großen Leiterquerschnitt erreicht wird.

Die stromabhängigen Verluste variieren in Abhängigkeit von der zeitlichen Schwankung des Stromflusses. Die auf Basis der Maximalleistung berechneten stromabhängigen Verluste sind deshalb bei der Berechnung der Verlustkosten durch einen Faktor  $< 1$ , den Arbeitsverlustfaktor  $\vartheta$  zu relativieren.

Kompensationsverluste werden durch die zur Begrenzung des Blindstroms und des Erdschlussreststroms im Netz erforderlichen Blindleistungskompensationsspulen und Erdschlusslöschspulen verursacht.

Beim Zubau einer Freileitung ist der Kompensationsbedarf zu vernachlässigen. Beim Zubau von Kabel macht sich aufgrund der wesentlich höheren Kapazitätsbeläge die Kompensation von Blindleistung und Erdschlussstrom erforderlich.

In Tabelle 3 sind die für die Berechnung zugrunde gelegten Parameter zusammengestellt.

Tabelle 3: Kenngrößen für Betriebsparameter von Freileitung und Kabel

Parameter	Einheit	Bezeichnung	Freileitung Al/St 265/35	Kabel 1000 mm <sup>2</sup>
$n_s$	Stück	parallele Drehstromsysteme		2
$f$	Hertz	Frequenz		50
$C_L$	nF/km	Kapazitätsbelag	8	220
$Q_c$	kvar/km	Ladeleistung	30	836
$\tan \delta$	-	Tangens des Verlustwinkels für VPE	-	0,001
$G'$	nS/km	Leitwertbelag (Verluste im Dielektrikum)	50	69
$R'$	mΩ/km	Widerstandsbelag	109	28
$S$	MVA	übertragene Scheinleistung		142,5
$l$	km	Leitungslänge	17,5	17,9
$U$	kV	Netznominalspannung		110
$k_l$	€/kWh	Verlustkosten (Stand: 08/2021)		0,048565
$r$	-	Rentenbarwertfaktor bei 40 Jahren Nutzungsdauer und Zinssatz 4,442%		18,55



Die spannungsabhängigen Verluste je km Leitung berechnen sich aus:

$$P_{VU} = G' \times U^2 / 1000$$

Damit erhält man für einen Stromkreis der 110-kV-Freileitung spannungsabhängige Verluste von  $P_{VU} = 605 \text{ W/km}$ .

Für das 110-kV-Kabel mit  $1000 \text{ mm}^2$  ergeben sich  $834,9 \text{ W/km}$  spannungsabhängige Verluste.

Die gesamten spannungsabhängigen Verluste ergeben sich wie folgt:

$$P_{VU} = n_s \times G' \times l \times U^2 / 1000000$$

Damit ergeben sich die folgenden spannungsabhängigen Verluste:

**Freileitung:**  $P_{VU} = 21,2 \text{ kW}$

**Kabel:**  $P_{VU} = 29,9 \text{ kW}$

Stromabhängige Verluste  $P_{VI}$  hängen vom zeitlichen Verlauf der Übertragungsleistung ab. Für die Berechnung der stromabhängigen Verluste je km Leitungslänge gilt bei Vernachlässigung des Ladestroms:

$$P_{VI} = 1/U^2 \times R' \times S^2$$

Die gesamten stromabhängigen Verluste der Leitungsabschnitte ergeben sich daraus wie folgt:

$$P_{VI} = 1/n_s \times R' \times l \times S^2 / U^2$$

Damit ergeben sich die folgenden stromabhängigen Verluste:

**Freileitung:**  $P_{VI} = 1600,6 \text{ kW}$

**Kabel:**  $P_{VI} = 420,6 \text{ kW}$

Die Kompensationsverluste in der Kabelanlage  $P_{VK}$  fallen während der gesamten Betriebsdauer der Spulen an und berechnen sich nach der Beziehung:

$$P_{VK} = n_s \times (1-g) \times k \times Q_c \times l$$

Die Güte der Kompensationsspule  $g$  wird mit  $0,9985$  angesetzt. Der Kompensationsgrad  $k$  beträgt  $1$ .

Damit ergeben sich Kompensationsverluste für das Kabel von  $P_{VK} = 44,9 \text{ kW}$ .

Tabelle 4 stellt die Verluste von Freileitungs- und Kabelausführung gegenüber.

*Tabelle 4: Verluste bei Freileitungs- und Kabelbetrieb (in kW)*

	<b>spannungs- abhängige Verluste</b>	<b>stromabhängige Verluste</b>	<b>Kompensations- verluste</b>	<b>Gesamtverluste</b>
<b>Freileitung:</b>	21,2	1600,6	-	1621,8
<b>Kabel:</b>	29,9	420,6	44,9	495,4

Die berechneten Werte ergeben sich bei einer isolierten Betrachtung des einzelnen Freileitungsabschnittes im Vergleich zu einer Kabelausführung ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Netzwirkungen.

#### 4. Wirtschaftlichkeitsvergleich

Die vergleichende Wirtschaftlichkeitsberechnung der Leitungsprojekte wird nach der Barwertmethode durchgeführt. Dabei werden die im Betrachtungszeitraum entstandenen Investitions- und Betriebskosten auf den Zeitpunkt der Investitionsentscheidung abgezinst und aufsummiert.

Die Betriebskosten bestehen zum größten Teil aus den Verlustkosten. Daneben fallen beim Betrieb der Freileitung Aufwendungen für Trassenfreihaltung, Inspektion und Mastbeschichtung an. Bei Kabeln entstehen zusätzlich Kosten für Inspektion und Wartung der Cross-Bonding-Kästen. Diese Kosten spielen jedoch eine untergeordnete Rolle und sind bei der Gesamtkostenbetrachtung zu vernachlässigen.

Die auf den Stichtag abgezinsten Kosten werden als Barwert bezeichnet.

Zur Ermittlung des Barwertes der Betriebskosten werden die Verlustkosten  $k_l$  und der Rentenbarwertfaktor  $r$  herangezogen.

Die Strompreise für Mehr- und Mindermengen auf der Grundlage monatlicher Marktpreise beliefen sich nach Angaben des BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. mit Stand August 2021 auf 0,048565 €/kWh.

Dieser Wert wird für den Wirtschaftlichkeitsvergleich zur Berechnung der Verlustkosten  $k_l$  herangezogen.

Der zur Berechnung des Barwertes verwendete Barwertfaktor wird durch die Betrachtungsdauer und den WACC-Zinssatz bestimmt.

Als Betrachtungszeitraum für die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Leitungsverbindungen wird die technische Lebensdauer der Anlagen angesetzt. Die Lebensdauer von Kabel und Freileitung unterscheiden sich jedoch deutlich. Während

bei Kabeln mit einer Lebensdauer von 40 Jahren gerechnet wird, geht man bei Freileitungen von einer Lebensdauer von 80 Jahren aus.

Bei einem Betrachtungszeitraum über die Lebensdauer der Freileitung müsste der Austausch der kompletten Kabelanlage berücksichtigt werden, wobei Rückbaukosten, erneute Investitionskosten und Tiefbaukosten für das Kabel anfallen. Bei der Freileitung sind in diesem Zeitraum lediglich die Leiterseile zu tauschen.

Um aussagefähige Vergleichswerte zu erhalten, wird in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die Lebensdauer des Kabels angesetzt.

Der WACC-Zinssatz (Weighted Average Cost of Capital) ergibt sich als gewichtetes Mittel der Eigen- und Fremdkapitalkosten. Der dem Vorhabenträger für das regulierte Netz von der Bundesnetzagentur zugestandene WACC-Zinssatz beläuft sich auf 4,442%.

#### **4.1 Wirtschaftlichkeitsvergleich bei isolierter Betrachtung des neuen Leitungsabschnittes ohne Berücksichtigung der Netzwirkungen**

Spannungsabhängige Verluste  $P_{VU}$  fallen ständig an und werden deshalb in voller Höhe über das ganze Jahr bewertet.

Die jährlichen Kosten der spannungsabhängigen Verluste  $K_{PVU}$  berechnen sich nach:

$$K_{PVU} = 8760/1000 \times k_i \times P_{VU}$$

Die stromabhängigen Verluste sind abhängig vom zeitlichen Verlauf der übertragenen Leistung. Die berechneten stromabhängigen Verluste stellen daher einen Wert bei dauerhafter maximaler Anlagenauslastung dar.

Zur Bewertung der Verlustarbeit ist bei der Berechnung der stromabhängigen Verlustkosten deshalb der Arbeitsverlustfaktor  $\vartheta$  heranzuziehen. Dieser ist abhängig von der jährlichen Verluststundenzahl. Der Arbeitsverlustfaktor für das Leitungssystem des Vorhabenträgers beträgt 0,11.

Die jährlichen Kosten der stromabhängigen Verluste  $K_{PVI}$  werden berechnet, indem die bei maximaler Übertragungsleistung auftretenden Verluste mit dem Arbeitsverlustfaktor  $\vartheta$  multipliziert werden.

$$K_{PVI} = 8760/1000 \times k_i \times \vartheta \times P_{VI}$$

Die Berechnung der jährlichen Verlustkosten ergibt folgende Werte (Tabelle 5):

*Tabelle 5: Verlustkosten bei Freileitungs- und Kabelbetrieb (in T€/Jahr); für  $k_i = 0,048565$  €/kWh*

	<b>Verlustkosten pro Jahr</b>
<b>Freileitung:</b>	83,9
<b>Kabel:</b>	51,5

Zur Ermittlung der Barwerte der Betriebskosten sind diese mit dem Rentenbarwertfaktor  $r$  zu multiplizieren.

Die Investitionskosten sowie die berechneten Barwerte der Verlustkosten und der Gesamtkosten für einen Zinssatz von 4,442% und einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren sind in Tabelle 6 gegenübergestellt.

Tabelle 6: Vergleich der Gesamtkosten für Freileitung und Kabel in T€ (gerundet); für  $k_i = 0,048565 \text{ €/kWh}$

Anlage	Investitionskosten	Barwerte der Verlustkosten	Barwerte der Gesamtkosten	Verhältnis der Barwerte Kabel : Freileitung
Freileitung	7776	1557	9333	3,69
Kabel	33537	956	34493	

Eine Verkabelung des Leitungsabschnittes auf neuer Trasse ist bei isolierter Betrachtung des geplanten Leitungsabschnittes ca. **3,69-fach** teurer als eine Freileitung.

#### 4.2 Wirtschaftlichkeitsvergleich des neuen Leitungsabschnittes im Netzverbund

Für einen Vergleich der Verluste bei Einsatz eines Kabels anstelle einer Freileitung im Netz genügt es nicht, nur die Verluste auf der betreffenden Leitung zu vergleichen. Um die Gesamtverluste des Netzes zu betrachten, müssen auch die Verluste der übrigen Leitungen des Netzes einbezogen werden. Ebenso sind Verluste von Transformatoren und Kompensationsspulen zu berücksichtigen. Die Netzverluste werden dabei durch den Leistungsfluss bestimmt. Der Leistungsfluss im Netz richtet sich nach den Spannungen der Einspeiseknoten und den Impedanzen der Leitungen.

Da das Kabel andere physikalische Eigenschaften hat als eine Freileitung, ergeben sich im Netz unterschiedliche Leistungsflüsse, Spannungen sowie Netzverluste. Insbesondere wird durch den Kabeleinsatz eine erhebliche Änderung der Blindleistungsflüsse hervorgerufen. Dem Verlustrückgang auf dem Kabelabschnitt stehen die Netzverluste gegenüber, die durch den vom Kabel bedingten Blindleistungsfluss verursacht werden.

Bei Einbindung eines Kabelabschnittes in ein vermaschtes, überwiegend aus Freileitungen bestehendes Netz übernimmt das Kabel wegen der unterschiedlichen Impedanz mehr Last als es eine adäquate Freileitung tun würde. Auch wenn das Kabel an sich geringere Verluste verursacht, werden die dem Kabel vor- und nachgelagerten Freileitungsabschnitte höher belastet und erzeugen dadurch höhere Verluste als in einem homogenen Freileitungsnetz.



Die geringeren stromabhängigen Verluste eines Kabels machen sich in einem Freileitungsnetz daher kaum bemerkbar. Die Gesamtverluste im Netz können dadurch sogar steigen.

## **5. Verzeichnis über Literatur / Gesetze / Verordnungen / Vorschriften / Gutachten zum Erläuterungstext**

1. Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), das zuletzt durch Artikel 84 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist
2. Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 16. Juli 2021 (BGBl. I S. 3026) geändert worden ist
3. VDE-AR-N 4202 Anwendungsregel: Vorgehensweise bei der Integration von Kabeln in 110-kV-Hochspannungsfreileitungsnetze, Ausgabedatum: 2015-04, VDE-Art-Nr.: 0200011
4. <https://www.bdew.de/energie/mehr-mindermengenabrechnung-strom>, abgerufen am 17.05.2021
5. Oswald, Bernd R.: Gutachten zur Bewertung einer alternativen Verkabelung der geplanten 110-kV-Hochspannungsfreileitungen Baumstraße-Lüstringen und Pkt. Belm-Powe (2006)
6. Hofmann, L. / Oswald, B.R.: Gutachten zum Vergleich Erdkabel – Freileitung im 110-kV-Hochspannungsbereich im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft und Europaangelegenheiten des Bundeslandes Brandenburg, Potsdam, 2010
7. Hofmann, L. / Oswald, B.R.: Gutachten zum wirtschaftlichen Vergleich von Kabeln, Freileitungen und Freileitungen mit Zwischenverkabelung im 110-kV-Hochspannungsbereich im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft und Europaangelegenheiten des Bundeslandes Brandenburg, Potsdam, 2011
8. NEW-Grid Management Consult GmbH: Gutachten Neubau der 110-kV-Hochspannungsfreileitung Abzweig Oberelsdorf, Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Freileitung vs. Kabel, Erfurt, 23.10.2019