
Neubau 110-kV-Hochspannungsleitung Großräschen – Altdöbern, Bl. 6805

Vergleichsrechnung zur Bewertung einer alternativen Verkabelung

Festgestellt

Cottbus
....., den

Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe
Brandenburg

– Siegel –

.....
Im Auftrag

Stand: Dezember 2017

Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH
Netzregion Brandenburg
Servicecenter Klein-Gaglow
Annahofen Graben 1-3
03099 Kolkwitz



MITNETZ
STROM

Inhaltsverzeichnis

1.	Rahmenbedingungen.....	3
2.	Investitionskosten für den neuen Leitungsabschnitt als Freileitungs- und Kabelauführung.....	11
3.	Verlustberechnung für den neuen Leitungsabschnitt als Freileitungs- und Kabelauführung ohne Berücksichtigung der Netzauswirkungen	13
4.	Wirtschaftlichkeitsvergleich	15
4.1	Wirtschaftlichkeitsvergleich bei isolierter Betrachtung des neuen Leitungsabschnittes ohne Berücksichtigung der Netzwirkungen	17
4.2	Wirtschaftlichkeitsvergleich des neuen Leitungsabschnittes im Netzverbund	18
5.	Verzeichnis über Literatur / Gesetze / Verordnungen / Vorschriften / Gutachten zum Erläuterungstext.....	20

1. Rahmenbedingungen

Die envia Mitteldeutsche Energie AG (enviaM) plant den Neubau der 110-kV-Freileitung Großräschen – Altdöbern.

Der Verlauf der neuen Leitung soll mit der bereits bestehenden Freileitung Ragow - Großräschen gebündelt werden. Insofern wird für die Neubauleitung ein bereits bestehender Trassenkorridor genutzt.

Da es sich gleichzeitig aber um eine neue, bisher nicht bestehende Leitung handelt, soll hier, um möglichen diesbezüglichen Forderungen zu begegnen, ein Kostenvergleich mit einer Kabelvariante erfolgen.

Gemäß § 43h EnWG sind Hochspannungsleitungen auf neuen Trassen mit einer Nennspannung von 110 Kilovolt oder weniger 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.

Um die erforderliche hohe Übertragungsleistung der Leitung gewährleisten zu können, müssen pro Stromkreis zwei parallele Kabelsysteme, d.h. insgesamt 4 Kabelsysteme installiert werden.

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 beauftragt, eine baubare Kabeltrasse zu finden sowie einen projektbezogenen Kostenansatz zu ermitteln.

Da im Waldgebiet keine nutzbaren Wege in entsprechender Richtung zwischen Großräschen und Altdöbern vorhanden sind, die als Baustraße genutzt werden könnten und geringere Eingriffe in das Waldgebiet ermöglichen würden, hat man sich entschieden, das Kabel parallel zum Schutzstreifen der bestehenden 110-kV-Freileitung Ragow – Großräschen zu planen.

Die Kabelausführung ist somit ebenso wie die Freileitungsvariante mit der Verbreiterung der vorhandenen Leitungsschneise im Wald verbunden. Mit der vorgesehenen Trassenführung können die erforderlichen Beeinträchtigungen im bestehenden Waldgebiet um Großräschen minimiert und die Baukosten reduziert werden (Abbildung 1).

Die Kabeltrasse ist ca. 4,3 km lang und verläuft überwiegend auf forstwirtschaftlicher Nutzfläche. Im Leitungsverlauf werden die Landesstraße L53, die Bahnstrecke 6193 zwischen Lübbenau und Senftenberg, einige Waldwege sowie der Bach Kzschischoka als Gewässer II. Ordnung gekreuzt.

Vor dem Umspannwerk Großräschen quert die Kabeltrasse das FFH-Gebiet „Binnendünenkomplex Woschkow“.

Die vorgesehene Trassenführung stellt die kürzest mögliche Verbindung zwischen den beiden Umspannwerken dar.

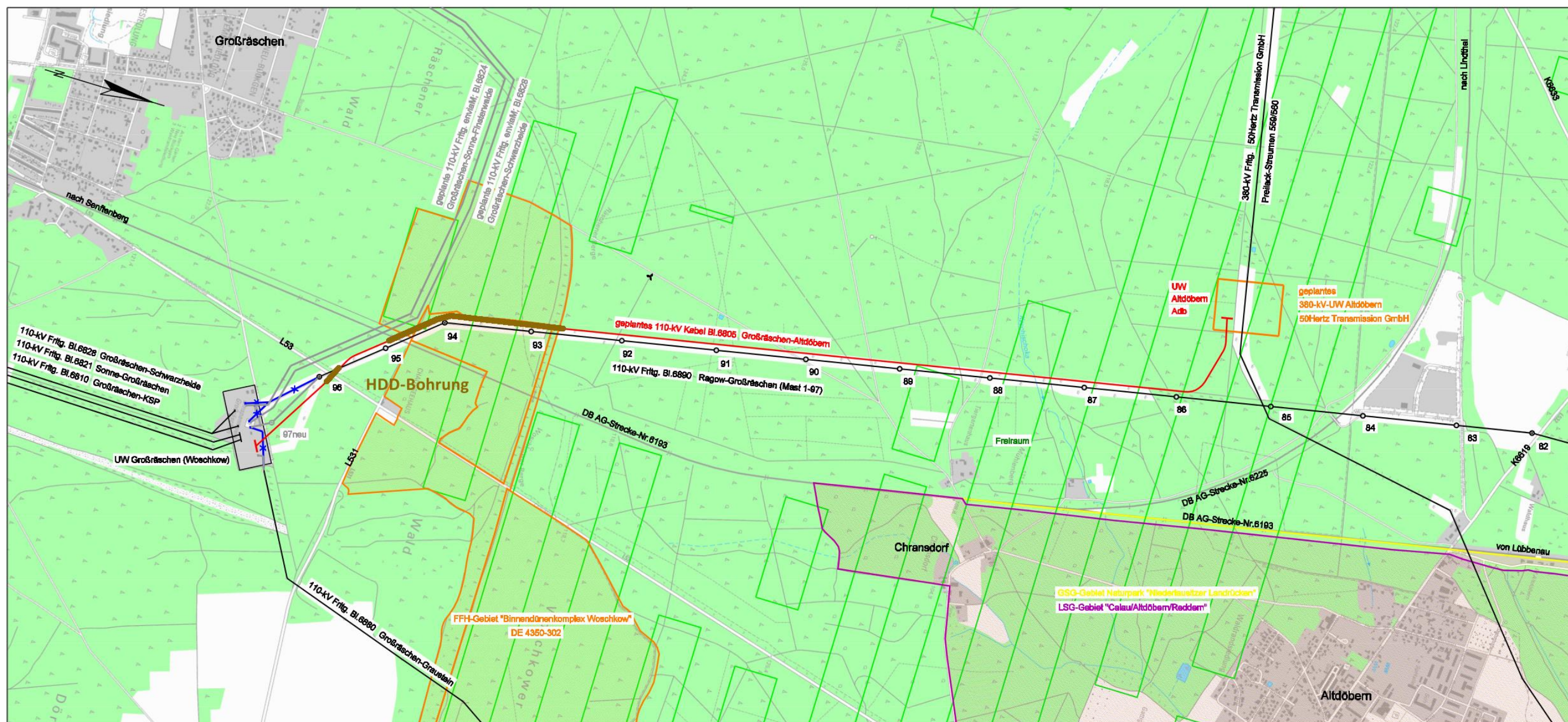


Abbildung 1: Verlauf der Kabeltrasse

Parallel zu jeder Kabelanlage wird ein Kupfer-Erdseil mit 70 mm² Querschnitt eingebaut. Dieses übernimmt Nullströme, sorgt für den Abbau atmosphärischer Überspannungen, unterstützt den Potentialausgleich der angrenzenden Umspannwerke und sorgt für einen geringen Erdungswiderstand an den Muffenstandorten. Das nichtisolierte Erdseil wird außer bei den Durchörterungen direkt im Erdreich verlegt.

Zusätzlich werden zwei Leerrohre PE HD 50 SDR 17 für Datenkabel installiert. Die Rohranlage wird über die gesamte Strecke durchgängig fertiggestellt und erst zur Kabelinstallation an den Muffenstandorten geöffnet.

Der Erdaushub wird getrennt vom Mutterboden seitlich abgelegt. Wenn der Aushub zum Wiedereinbau geeignet ist, muss er gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) zum Verfüllen verwendet werden. Die Bettung der Leerrohre erfolgt in thermisch stabilem Bettungsmaterial z.B. RSS Flüssigboden®. Dieses behält seinen geringen Wärmewiderstand auch bei Erwärmung durch die im Kabel entstehende Verlustleistung bei und erhöht somit die Übertragungsleistung der Kabelanlage. Ohne den Einsatz thermostabiler Bettungsmaterialien wird der geforderte Nennstrom der Kabel nicht erreicht.

Das thermisch stabile Bettungsmaterial wird in fließfähiger Konsistenz eingebracht, wobei ein Aufschwimmen der Leerrohre durch geeignete Maßnahmen zu verhindern ist. Die Leerrohranlage soll allseitig von mindestens 20 cm Bettungsmaterial umgeben sein.

Ist das Bettungsmaterial abgetrocknet, werden eine Lage Betonplatten sowie die Leerrohre für das Steuerkabel, das Erdseil und Warnband über den Kabelsystemen verlegt.

Nach dem lagenweisen Verfüllen und Verdichten des Grabens wird der abgelagerte Mutterboden aufgezogen und der restliche Aushub entsorgt.

Der zum Wiedereinbau bestimmte Aushub muss alle 500t auf Kontamination untersucht werden. Die Kalkulation geht davon aus, dass die maximale Verunreinigung der LAGA Einbauklasse Z1 entspricht und der vorhandene Aushub wieder eingebaut werden kann.

Die erforderlichen Querungen der Landstraße L53, der Bahnstrecke und des FFH-Gebietes werden als gesteuerte Horizontalbohrspülung ausgeführt. Damit können Tiefbauarbeiten im Schutzgebiet und Straßensperrungen vermieden werden.

Für die Bohrungen müssen die Leiter- und Systemabstände im Vorfeld anhand der durch Bodensondierungen ermittelten Wärmewiderstände des Bodens noch festgelegt werden. In die Bohrungen werden die entsprechende Anzahl Leerrohre eingezogen. Dabei sind zwei zusätzliche Leerrohre DN50 für die Erdseile vorzusehen, die in der restlichen Trasse direkt im Erdreich liegen. Für die Bahnquerung können aufgrund einer eventuell erforderlichen Pressbohrung höhere Kosten entstehen.

Straßen und Wege niedrigerer Kategorie werden im offenen Tiefbau gequert.

Die gesamte Breite der Baustelle wird ca. 15,5 m betragen. Hierbei sind Lagerflächen für den Aushub und lastfreie Streifen eingeschlossen.

Ein großer Anteil der Trasse führt über mit Bäumen und Strauchwerk bewachsenes Gelände. Diese Flächen sind vor Beginn der Baumaßnahme zu roden und von Wurzeln zu räumen. Wie in Abbildung 2 dargestellt ist, sind die Flächen über den

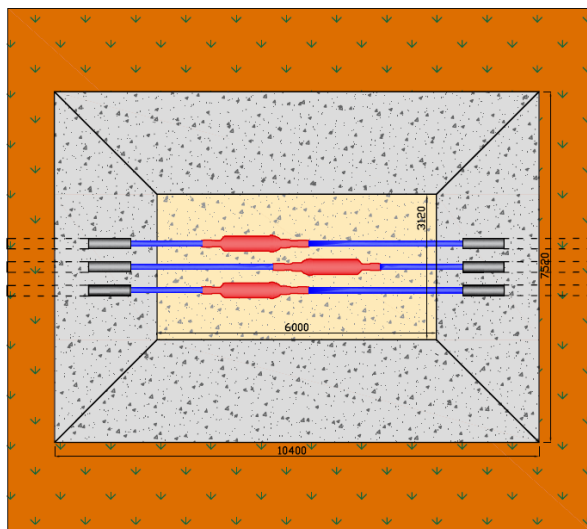
Kabelsystemen dauerhaft von tiefwurzelnden Bewuchs freizuhalten, um die Zugänglichkeit zu gewährleisten und Leerrohre und Kabel vor Beschädigungen durch Wurzeln zu schützen.

Da die Kabel nur bis zu einem bestimmten Gewicht auf der Straße transportiert werden können und bei der Kabelverlegung eine maximale Zugkraft eingehalten werden muss, werden die einzelnen Kabel aus mehreren Teillängen zusammengesetzt.

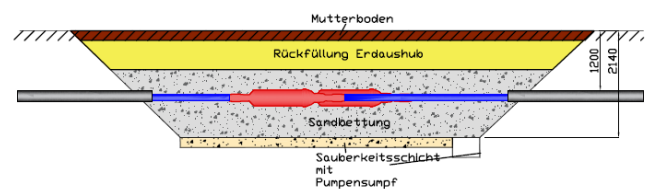
Die Anzahl dieser Abschnitte muss durch drei teilbar sein, da ein sog. Cross-bonding-System installiert wird. Aus dem gleichen Grund müssen je drei aufeinander folgende Abschnitte gleich lang sein. Diese Einschränkungen ergeben im vorliegenden Fall für die Budgetplanung eine Kabellänge von 737 m je Abschnitt und 5 Muffenstandorte mit je 4 Muffengruben.

Alle Muffengruben befinden sich im freien Gelände. In jeder Muffengrube müssen je 3 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 vorgesehen werden.



Draufsicht



Längsschnitt

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. 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 bestimmten Verbindungsmuffen 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. An jeder Muffengrube ist eine Erdungsanlage zu errichten.

Für die Cross-bonding-Boxen und Link-Boxen muss ständiger Zugang unabhängig von z.B. Witterung oder Bepflanzungszustand bei landwirtschaftlich genutzten Flächen gewährleistet werden.

Da das Kabel nicht entlang von nutzbaren Straßen verlegt werden kann, müssen Baustraßen entlang der Kabeltrasse eingerichtet werden. Dabei werden bei der Planung der Baustraßen zwei Kategorien unterschieden. Die erste Kategorie mit einer Breite von 3 m wird für Zufahrten zu Muffenstandorten und Baugruben für Fahrzeuge bis zu 12 t Last benötigt. Zum Transport der Kabeltrommeln und der Bohrtechnik muss die zweite Kategorie der Baustraßen für ein Fahrzeuggewicht bis 60 t geeignet sein und eine Breite von 5 m aufweisen.

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. Für die Kalkulation werden 1113 m Baustraße der Kategorie 1 und 1631 m Baustraße der Kategorie 2 berücksichtigt.

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 einbezogen.

Die Ausführung der 110-kV Kabelverbindung erfolgt mit einem VPE-isolierten Kunststoffkabel mit mehrdrähtigem Kupferleiter und Kupferdrahtschirm. Die beiden Freileitungsstromkreise müssen jeweils für 3400 A dimensioniert werden. Um eine vergleichbare Übertragungsleistung zu erreichen, müssen wegen der geringeren Übertragungsleistung von Kabeln statt zwei Freileitungssystemen vier parallele Kabelsysteme mit jeweils 1700 A installiert werden. Jeweils zwei Kabelsysteme werden als eine Kabelanlage parallel geschaltet. Diese hohe Beanspruchung kann nur durch die strikte Einhaltung entsprechender Parameter erfüllt werden. Dazu gehört eine Temperaturüberwachung des Kabels, um beschleunigte Alterung oder temperaturbedingten Ausfall zu vermeiden.

Wegen der hohen Wärmeentwicklung durch die notwendige hohe Übertragungsleistung ist eine gebündelte schmale Verlegung der Kabelsysteme nicht möglich. Deshalb werden die Einzelleiter eines Systems nebeneinander mit einem Abstand von 0,5 m geplant. Der Abstand zwischen den Systemen beträgt 2 m (Abbildung 2).

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 für die Leitung Großräschen – Altdöbern vier Kabelsysteme vom Typ N2XS(FL)2Y <c> 1x2500 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. Für die erforderliche Mess- und Auswertungs- Hard- und Software wird in der Kalkulation eine Pauschale berechnet.

Der äußere Kabelmantel ist mit einer leitfähigen Beschichtung versehen, die die Kontrolle der Kabel vor der Inbetriebsetzung und zur regelmäßigen Wartung ermöglicht.

Als Muffen kommen einteilige Aufziehmuffen mit Schrumpfschlauchgehäuse zum Einsatz (Abbildung 5). Zum Auskreuzen der Kabelschirme werden diese aus den Muffen herausgeführt und in Cross-bonding- oder Link-Boxen angeschlossen. Die Verbindung zwischen Muffen und Boxen erfolgt mittels zweier Einleiter- oder einem Koaxialkabel.



Abbildung 5: 110-kV-Kabelmuffe

Abgeschlossen werden die Kabelanlagen mit Freiluftendverschlüssen mit Verbundisolator. Im Umspannwerk werden diese auf Kabelendverschlussgerüsten montiert (Abbildung 6).



Abbildung 6: 110kV-Kabelendverschlüsse mit Überspannungsableiter auf Endverschlussgerüst

Um die Kabel vor transienten Überspannungen zu schützen, werden neben den Endverschlüssen Überspannungsableiter installiert, die das Kabel beidseitig vor Wanderwellen mit hoher Amplitude schützen.

Beim Zubau von Kabelstrecken mit ihren wesentlich höheren Kapazitätsbelägen werden im Netz Anschaffungs- und Betriebskosten von Blindleistungskompensationsdrosseln und Erdschlusslöschspulen erforderlich, um

die Betriebsweise des Netzes mit Resonanz-Sternpunktterdung beibehalten zu können.

Der Ladestrom pro Kabel mit 2500 mm² beträgt $I'_L=7,46$ A/km. Für die Gesamtlänge ergibt das $I_L=65,6$ A pro Leiter oder als Ladeleistung pro Doppelsystem $Q = 25$ Mvar. Ohne Kompensation (Löschspule) würde im Erdschlussfall ein durch die betrachtete Kabelanlage verursachter zusätzlicher Erdschlussreststrom von $I_E = 160$ A fließen. Dieser Wert übersteigt den Maximalwert von 132 A im Hochspannungsnetz, was die Installation von Löschspulen erforderlich macht.

Im Zusammenhang mit den restlichen Betriebsmitteln im Netz und der Lastsituation macht sich zudem die Kompensation von ca. 12,8 Mvar Blindleistung erforderlich.

Zur Begrenzung des Erdschlussreststroms sind zwei Erdschlusssspulen mit je 6,3 Mvar zu errichten. Zur Kompensation der Blindleistung ist eine Ladestromdrossel inkl. zusätzlichem Schaltfeld einzuplanen.

2. Investitionskosten für den neuen Leitungsabschnitt als Freileitungs- und Kabelausführung

Die Investitionskosten für den Freileitungsabschnitt auf neuer Trasse werden mit 4,166 Millionen € veranschlagt (Tabelle 1):

Tabelle 1: Investitionskosten der Freileitung

Kostenposition	Kostenkalkulation in €
Trassierung, Bauvorbereitung	137.377
Material	1.422.672
Montage	1.560.022
Sonstige Leistungen	1.045.470
Summe	4.165.541

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

Der Restwert der Freileitungen nach 40 Jahren wird mit 2,5 Mio € angesetzt.

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

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.

Die Kabeltrasse verläuft auf annähernd gleicher Trasse wie die vergleichbare Freileitung parallel zur bestehenden 110-kV-Freileitung Ragow – Großräschen und hat wie die Freileitung eine Länge von ca. 4,3 km.

Nicht erfasste Kosten für Kreuzungen von Anlagen Dritter, befestigte Oberflächen, Drainagen, nichtbindige oder felsige Böden, Ausbau und Instandsetzung von Zufahrten, spezielle Bohrverfahren, Mess- und Auswertetechnik, 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. In der vorliegenden Kalkulation wurden diese anteiligen Kosten mit einem Aufschlag berücksichtigt.

Die Kostenschätzung für die Kabelanlage beläuft sich auf ca. 29,245 Millionen Euro (Tabelle 2). Der Restwert der Kabelanlage nach 40 Jahren wird mit 2,5 Mio € veranschlagt.

Tabelle 2: Investitionskosten der Kabelanlage

Kostenposition	Kostenkalkulation in €
Trassierung, Bauvorbereitung	413.310
Baustraßen	601.047
Rodungen	227.875
Tiefbau, Leerrohranlage	10.017.805
Kabel und Montage	15.024.227
Übergang Freileitung	750.000
Kompensation	510.500
Zuschlag Zufahrten/ Pressbohrung/ Drainage/ Fremdanlagen/ Mess- und Auswertetechnik	200.000
Zuschlag Netzumstellung	1.500.000
Summe	29.244.764

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 gleich bleibender Höhe an und werden durch die „Durchlässigkeit“ der Isolierung verursacht. Der Kennwert für diese Durchlässigkeit ist der Leitwertsbelag. Der Leitwertsbelag von Freileitungen ist witterungsabhängig. Bei 110-kV-Freileitungen kann man mit einem mittleren Wert von 40 nS/km rechnen. Der Leitwertsbelag 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 ϑ zu relativieren.

Kompensationsverluste werden durch die zur Begrenzung des kapazitiven Blindstroms im Netz erforderlichen Blindleistungskompensationsdrosseln und Erdschlusslöschspulen verursacht.

Beim Zubau einer Freileitung ist der Kompensationsbedarf im Vergleich zum Kabel bis zu 60 mal geringer und ist daher 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 2x3x2 550/71 TAL/Stalum	Kabel N2XS(FL)2Y 1x2500 rms/50 64/110kV
n_s	Stück	parallele Drehstromsysteme	2	4
f	Hertz	Frequenz	50	50
C_L	nF/km	Kapazitätsbelag	17	220
Q_c	kvar/km	Ladeleistung	65	836
$\tan \delta$	-	Tangens des Verlustwinkels für VPE	-	0,001
G'	nS/km	Leitwertsbelag (Verluste im Dielektrikum)	40	69
R'	mΩ/km	Widerstandsbelag	50	5
S	MVA	übertragene Scheinleistung	647,8	647,8
l	km	Leitungslänge	4,3	4,3
U	kV	Netzennspannung	110	110
r	-	Rentenbarwertfaktor bei 40 Jahren Nutzungsdauer und Zinssatz 4,396%		18,68

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 $P_{VU} = 484 \text{ W/km}$.

Für das 110-kV-Kabel mit 2500 mm² ergeben sich 834,9 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: $P_{VU} = 4,2 \text{ kW}$

Kabel: $P_{VU} = 14,4 \text{ kW}$

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:

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

Damit errechnen sich die folgenden stromabhängigen Verluste:

Freileitung: $P_{VI} = 3728,2 \text{ kW}$

Kabel: $P_{VI} = 186,4 \text{ kW}$

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

$$P_{VK} = n_S \times (1-g) \times k \times Q_c \times I$$

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

Damit ergeben sich Kompensationsverluste für das

Kabel von $P_{VK} = 21,6 \text{ kW}$.

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

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

	Freileitung	Kabel
spannungsabhängige Verluste	4,2	14,4
stromabhängige Verluste	3728,2	186,4
Kompensationsverluste	-	21,6
Summe Verluste	3732,4	222,4

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, wobei die Restwerte der Anlage berücksichtigt werden.

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. für das Jahr 2016 auf etwa 0,03 €/kWh.

Vom Vorhabenträger wird die Beschaffung der Netzverluste öffentlich ausgeschrieben. Der erzielte Preis wird auf der Internetseite des Vorhabenträgers veröffentlicht. Er liegt für das Jahr 2016 bei 3,6 ct/kWh. Von einem Preisanstieg ist derzeit nicht auszugehen. Die reinen Erzeugerpreise sind eher im Rückgang begriffen.

Die Kosten zur Deckung der Verluste (Verlustkosten) k_l werden für den Wirtschaftlichkeitsvergleich daher mit 0,04 €/kWh berechnet.

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, wobei die verbleibenden Restwerte der Anlagen in die Wirtschaftlichkeitsberechnung einbezogen werden.

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 4,396%.

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 ϑ 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 ϑ multipliziert werden.

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

Kompensationsverluste fallen in gleichmäßiger Höhe an, sobald die Kompensationsspulen eingeschaltet sind. Sie werden berechnet nach:

$$K_{PVK} = 8760/1000 \times K_I \times P_{VK}$$

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

Tabelle 5: Verlustkosten bei Freileitungs- und Kabeleinsatz (in T€/Jahr)
für $k_I = 0,04 \text{ €/kWh}$

	Verlustkosten pro Jahr	
	Freileitung	Kabel
Spannungsabhängige Verluste:	1,5	5,1
Stromabhängige Verluste:	143,7	7,2
Kompensationsverluste:	-	7,6
Gesamt:	145,2	19,9

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 4,396% und einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren sind unter Berücksichtigung des Restwertes in Tabelle 6 gegenübergestellt.

Tabelle 6: Vergleich der Gesamtkosten für Freileitung und Kabel in T€ (gerundet)
für $k_i = 0,04 \text{ €/kWh}$

Anlage	Investitionskosten	Barwerte der Verlustkosten	Barwerte der Gesamtkosten	Barwerte des Restwertes	Verhältnis der Barwerte Kabel : Freileitung
Freileitung	4166	2711	6877	447	4,54
Kabel	29245	371	29616	447	

Eine Verkabelung des Leitungsabschnittes auf neuer Trasse wäre bei isolierter Betrachtung des geplanten Leitungsabschnittes ca. 4,5-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 Änderungen des Leistungsflusses, der Spannungen sowie der 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.

Da sich die geringeren Verluste des Kabelabschnittes im betrachteten Freileitungsnetz nicht bemerkbar machen, können diese im weiteren Vergleich unberücksichtigt bleiben. Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich sind somit die Investitionskosten der Leitungsprojekte ausschlaggebend.

Die Investitionskosten sowie die berechneten Barwerte der Gesamtkosten sind unter Berücksichtigung des Restwertes für einen Zinssatz von 4,396% und einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren in Tabelle 7 gegenübergestellt.

Tabelle 7: Vergleich der Gesamtkosten für Freileitung und Kabel in T€ (gerundet)

Anlage	Investitions- kosten	Barwerte des Restwertes	Barwerte der Gesamtkosten	Verhältnis der Barwerte Kabel : Freileitung
Freileitung	4166	447	3719	
Kabel	29245	447	28798	7,74

Eine Verkabelung des Leitungsabschnittes auf neuer Trasse ist demnach **7,7-fach** teurer als eine Freileitung.

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 2 Absatz 6 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist
2. Oswald, Bernd R.: Gutachten zur Bewertung einer alternativen Verkabelung der geplanten 110-kV-Hochspannungsfreileitungen Baumstraße-Lüstringen und Pkt. Belm-Powe (2006)
3. 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
4. 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
5. Oswald, Bernd R.: Verlust- und Verlustenergieabschätzung für das 380-kV-Leitungsbauvorhaben Wahle – Mecklar in der Ausführung als Freileitung oder Drehstromkabelsystem (2007)
6. Obkircher, Clemens.: Ausbaugrenzen gelöscht betriebener Netze, Dissertation, Technische Universität Graz, 2008
7. Jarass, L. / Obermair, G. / Voigt, W. : Windenergie : Zuverlässige Integration in die Energieversorgung (Springer Verlag, 2. Auflage, 2009)
8. <https://www.mitnetz-strom.de/Unternehmen/ZahlenFakten/Netzdaten>, abgerufen am 15.11.2017