
Neubau 110-kV- Hochspannungsfreileitung Abzweig Oberelsdorf Bl. 1013

Vergleichsrechnung zur Bewertung einer alternativen Verkabelung

Stand: November 2017

Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH
Netzregion Südsachsen
Servicecenter Freiberg
Fraensteiner Straße 73
09599 Freiberg



Inhaltsverzeichnis

1.	Rahmenbedingungen	3
2.	Investitionskosten für den neuen Leitungsabschnitt als Freileitungs- und Kabelauführung	9
3.	Verlustberechnung für den neuen Leitungsabschnitt als Freileitungs- und Kabelauführung ohne Berücksichtigung der Netzauswirkungen.....	10
4.	Wirtschaftlichkeitsvergleich.....	13
4.1	Wirtschaftlichkeitsvergleich bei isolierter Betrachtung des neuen Leitungsabschnittes ohne Berücksichtigung der Netzwirkungen	14
4.2	Wirtschaftlichkeitsvergleich des neuen Leitungsabschnittes im Netzverbund.....	15
4.3	Zwischenverkabelung	17
5.	Verzeichnis über Literatur / Gesetze / Verordnungen / Vorschriften / Gutachten zum Erläuterungstext	19

1. Rahmenbedingungen

Da der Neubau der 110-kV-Freileitung Abzweig Oberelsdorf auf einer bisher nicht bestehenden Trassenführung vorgesehen ist, muss für diesen Leitungsabschnitt gemäß § 43h ENWG ein Gesamtkostenvergleich zwischen Freileitungs- und Erdkabelausführung 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 beauftragt, eine günstige und baubare Kabeltrasse zu finden sowie einen projektbezogenen Kostenansatz zu ermitteln.

Für die Kalkulation der Kosten einer Kabelausführung wurde wie bei der Freileitungsvariante eine Trasse parallel zur Autobahn A72 ausgewählt. (Abbildung 1).

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 die Autobahn A72 sowie mehrere Straßen und Gewässer gekreuzt.

Eine kürzere Trassenführung ist auch mit einem Kabel nicht möglich. Bei einer östlichen Umgehung von Penig würde z.B. im Bereich der Waldgebiete das Anlegen einer Leitungsschneise erforderlich werden, was zu erheblichen Eingriffen in das Landschaftsbild und in den Waldbestand führen würde. Außerdem würde in diesem Bereich großflächig in die bestehenden FFH-/SPA-Gebiete entlang der Zwickauer Mulde eingegriffen. Die Einschnittlage um Amerika ohne nutzbare Wege in Trassenrichtung und mit felsigen Hängen ist für eine Kabelverlegung nicht geeignet.

Im gesamten Baugebiet ist mit festen Böden der Bodenklasse 3-5 zu rechnen. 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, Drainagen, 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 offen gehalten 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 kurz gehalten werden und man ist weitgehend unabhängig von der Witterung.

Die Übertragungsleistung der Leitung Abzweig Oberelsdorf 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 ein Kabelgraben für die zwei Leerrohrsysteme mit einem Abstand von 2 m zwischen den Systemen ausgehoben (Abbildung 2).

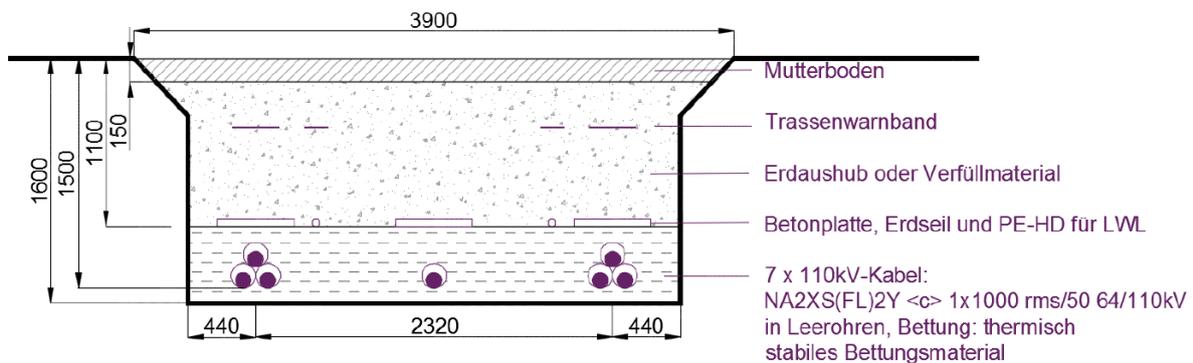


Abbildung 2: Querschnitt Kabelgraben

Aufgrund der langen Ausfalldauer von Kabeln im Störfall soll zur Herstellung einer kurzfristigen Wiederverfügbarkeit der Kabelverbindung zwischen den beiden Hochspannungs-Kabelsystemen ein siebentes Kabel eingebaut werden. Dieses soll im Fall einer Störung an einem der sechs anderen Einleiterkabel dessen Funktion übernehmen und die erforderliche Versorgungssicherheit gewährleisten.

Um dies zu realisieren müssen die Freiluftanlagen an den Enden der Kabelverbindung so gestaltet werden, dass das siebente Kabel mit wenig Aufwand mit jedem Anschluss der anderen sechs Kabel verbunden werden kann. Weiterhin muss für diesen Fall die Cross-Bonding-Anlage aufgelöst und jedes der Kabel beidseitig geerdet werden. Die neue Verschaltung der Kabelschirme erfolgt in den Cross-Bonding-Kästen. Das Reservekabel wird zwischen den beiden Kabelsystemen im Graben eingeordnet.

Für jeden Leiter ist ein Leerrohr vom Typ Rauguard HV 160 x 6,2 oder vergleichbar vorgesehen, für die Horizontalbohrungen vom Typ Rauguard HV 180 x 10,7. 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 1,6 m.

Die Bettung der Leerrohre erfolgt in einem thermisch stabilem 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 ausgetrocknete 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 und das Erdseil über den Kabelsystemen verlegt. Nach dem lagenweisen Verfüllen und Verdichten wird der abgelagerte Mutterboden aufgezogen und der restliche Aushub entsorgt.

Querungen von Autobahn, Bundes-, Staats- und Kreisstraßen sowie Gewässerquerungen werden als gesteuerte Horizontalbohrspülung ausgeführt. 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.

Wege niedrigerer Kategorie werden im offenen Tiefbau gequert.

Die gesamte Breite der Baustelle wird mit 18,5m angenommen. Hierbei sind Lagerflächen für den Aushub und lastfreie Streifen eingeschlossen.

Da durch das Gewicht der Kabeltrommeln nur bestimmte Kabellängen im Straßenverkehr transportiert werden können, müssen diese ca. alle 800 m durch Muffen verbunden werden. Alle Muffengruben befinden sich im freien Gelände. In jeder Muffengrube müssen je 3 Muffen pro Kabelsystem und eine Muffe des Reservekabels angeordnet 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.

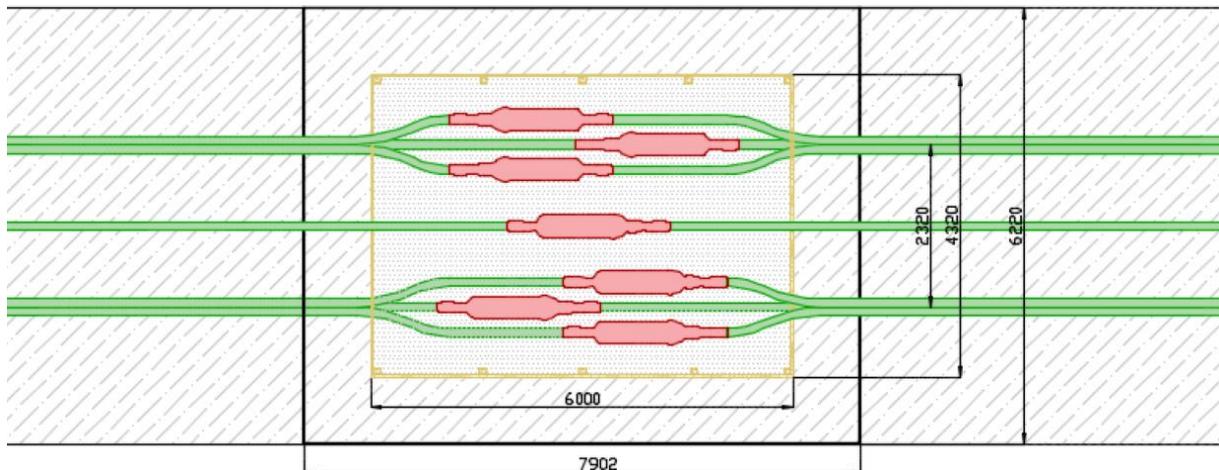


Abbildung 3: Anordnung der Muffengrube

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.



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.

Da das Kabel nicht entlang von nutzbaren Straßen verlegt werden kann, müssen Baustraßen entlang der Kabeltrasse eingerichtet werden. Zum Transport der Kabeltrommeln muss ein Teil dieser Baustraßen für ein Fahrzeuggewicht bis 40 t geeignet sein. 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 des bei MITNETZ Strom verwendeten Standardkabels vom Typ NA2XS(FL)2Y 1x1000 rms/50 64/110kV -FO geeignet.

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 vorherzusagen. Dies ermöglicht eine höhere Ausnutzung der Übertragungsleistung des Kabels. Das Kabel ist mit einer leitfähigen Beschichtung versehen, die die Kontrolle des Kabels ermöglicht.

Abgeschlossen werden die Kabelanlagen mit Freiluftendverschlüssen mit Verbundisolator. An den Endmasten werden diese auf einer speziellen Masttraverse montiert, im Umspannwerk auf Kabelendverschlussgerüsten.

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 Blindleistungskompensationsspulen und Erdschlusslöschspulen erforderlich, um die Betriebsweise des Netzes mit Resonanz-Sternpunktterdung beibehalten zu können.

Der Ladestrom pro Kabel beträgt $I_L=4,23$ A/km. Für die Gesamtlänge ergibt das $I_L=74,9$ A oder als Ladeleistung pro System $Q=14,65$ Mvar. Ohne Kompensation würde im Erdschlussfall ein Reststrom von $I_E=224$ A fließen. Dieser Wert übersteigt

den Maximalwert von 130 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 die Kompensation von ca. 20 Mvar Blindleistung erforderlich.

Zur Begrenzung des Erdschlussreststroms sind drei Erdschlussdrosseln 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 6,000 Millionen € veranschlagt (Tabelle 1):

Tabelle 1: Investitionskosten der Freileitung

Kostenposition	Kostenkalkulation in €
Planung und Projektierung	137.914
Material	1.980.430
Errichtung der Masten einschl. Fundamente	2.845.709
Beseilung	498.663
Baustraßen	537.256
Gesamtsumme	5.999.972

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

Der Restwert nach 40 Jahren wird mit 2,3 Mio € angesetzt.

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 Trassierungskosten, 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 entlang der Autobahn A72 zwischen Limbach und Oberelsdorf gewählt, die 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.

Zur Aufteilung der Kosten einer erforderlichen Änderung der Sternpunkterdung des Netzes bei Überschreitung der Löschgrenze durch den Kabelzubau wird daher ein Zuschlag aufgenommen.

Die Kostenschätzung für die Kabelanlage beläuft sich auf ca. 27,134 Millionen Euro (Tabelle 2). Der Restwert der Kabelanlage nach 40 Jahren wird mit 200 T€ veranschlagt.

Tabelle 2: Investitionskosten der Kabelanlage

Kostenposition	Kostenkalkulation in €
Trassierung, Bauvorbereitung	464.894
Baustraßen	839.665
Tiefbau, Leerrohranlage	12.163.540
Kabel und Montage	8.525.894
Übergang Freileitung	750.000
Kompensation	1.290.000
Zuschlag Drainage/ Fels/ Zufahrten	100.000
Zuschlag Netzumstellung	3.000.000
Gesamtsumme	27.133.993

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 Leitwertbelag. Der Leitwertbelag von Freileitungen ist witterungsabhängig. Bei 110-kV-Freileitungen kann man mit einem mittleren Wert

von 50 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 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 ²
n_s	Stück	parallele Drehstromsysteme	2	2
f	Hertz	Frequenz	50	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	Leitwertsbelag (Verluste im Dielektrikum)	50	69
R'	m Ω /km	Widerstandsbelag	109	28
S	MVA	übertragene Scheinleistung		142,5
l	km	Leitungslänge	16	18
U	kV	Netznominalspannung		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 $P_{VU} = 605 \text{ W/km}$.

Für das 110-kV-Kabel mit 1000 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: $P_{VU} = 19,4 \text{ kW}$

Kabel: $P_{VU} = 30,1 \text{ kW}$

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 errechnen sich die folgenden stromabhängigen Verluste:

Freileitung: $P_{VI} = 1463,4 \text{ kW}$

Kabel: $P_{VI} = 422,9 \text{ kW}$

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 $P_{VK} = 45,1 \text{ kW}$.

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

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

	spannungsabhängige Verluste	stromabhängige Verluste	Kompensationsverluste	Gesamtverluste
Freileitung:	19,4	1463,4	-	1482,8
Kabel:	30,1	422,9	45,1	498,1

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 jeweils mit 0,03 und 0,05 €/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.

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

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

Tabelle 5: Verlustkosten bei Freileitungs- und Kabelbetrieb (in T€/Jahr)
für $k_i = 0,03 \text{ €/kWh}$ und $0,05 \text{ €/kWh}$

	Verlustkosten pro Jahr	
	$k_i = 0,03 \text{ €/kWh}$	$k_i = 0,05 \text{ €/kWh}$
Freileitung:	47,4	79,0
Kabel:	32,0	53,4

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 $k_i = 0,03 \text{ €/kWh}$ und $0,05 \text{ €/kWh}$

Anlage	Investitionskosten	Barwerte des Restwertes	Barwerte der Verlustkosten		Barwerte der Gesamtkosten		Verhältnis der Barwerte Kabel : Freileitung	
			0,03 €/kWh	0,05 €/kWh	0,03 €/kWh	0,05 €/kWh	0,03 €/kWh	0,05 €/kWh
Freileitung	6000	412	885	1476	6473	7064		
Kabel	27134	36	598	997	27696	28095	4,28	3,98

Eine Verkabelung des Leitungsabschnittes auf neuer Trasse wäre bei isolierter Betrachtung des geplanten Leitungsabschnittes ca. 4-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.

Der Vorhabenträger hat die Verluste der geplanten Leitung im Gesamtnetz unter den derzeit erwarteten Belastungen für den Lastfall Schwachlast mit starker Einspeisung als Kabelvariante und als vergleichbare Freileitungsvariante berechnet. Im 110-kV-Netz treten demnach mit einer Kabelvariante etwa 140 kW höhere Verluste auf als bei der Freileitungsausführung. Das begründet sich darin, dass die Freileitung mit 287 A belastet ist, das Kabel aber wegen der Impedanzverschiebung mit 347 A. Die dem Kabel vor- und nachgelagerten Freileitungsabschnitte werden deshalb ebenfalls mit 347 A statt mit 287 A belastet und haben dadurch höhere Verluste als bei einer Freileitungsvariante. Bei weiter steigender dezentraler Einspeisung wird der Effekt vermutlich noch verstärkt.

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 4,4% und einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren in Tabelle 7 gegenübergestellt.

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

Anlage	Investitionskosten	Barwerte des Restwertes	Barwerte der Gesamtkosten	Verhältnis der Barwerte Kabel : Freileitung
Freileitung	6000	412	5588	
Kabel	27134	36	27098	4,85

Eine Verkabelung des Leitungsabschnittes auf neuer Trasse ist demnach **4,85-fach** teurer als eine Freileitung.

4.3 Zwischenverkabelung

§ 43h EnWG besagt, dass eine Hochspannungsleitung auf neuer Trasse als Erdkabel auszuführen ist, 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.

Wendet man diese Vorgabe auch auf eine Zwischenverkabelung an, so sind die Kosten des zu prüfenden Erdkabelabschnitts mit denen eines technisch vergleichbaren Freileitungsabschnittes zu vergleichen.

Die in Absatz 4.2 beschriebenen Zusammenhänge hinsichtlich der Netzverluste machen sich bei einer Zwischenverkabelung noch stärker bemerkbar. Das Kabelzwischenstück hat für die Leitung die gleichen Auswirkungen wie eine Verkabelung des gesamten Leitungsabschnittes, da die Zwischenverkabelung aufgrund ihrer technischen und physikalischen Eigenschaften die Übertragungsfähigkeit der gesamten Leitung beeinflusst.

Eine Zwischenverkabelung führt aufgrund der geringeren Impedanz und der deutlich größeren Kabelkapazität zu Änderungen des Leistungsflusses auf der Leitung und im umgebenden Netz sowie zu Spannungsänderungen an den Anschlussknoten und deren Umgebung.

Durch die geringere Impedanz des Kabelzwischenstücks werden die vor- und nachgeschalteten Freileitungsabschnitte ebenfalls stärker belastet, so dass wie unter Abschnitt 4.2 beschrieben, nicht mit geringeren Verlusten im Netz gerechnet werden kann. Dies trifft insbesondere auf eine Zwischenverkabelung innerhalb einer Freileitung zu.

Im Wirtschaftlichkeitsvergleich einer Zwischenverkabelung bleiben daher die Verlustkosten unberücksichtigt.

Während die übrigen Kosten anteilig pro km anhand der Kalkulation für die gesamte Leitung berechnet werden können, sind Kosten für Übergangsanlagen Freileitung-Kabel unter Berücksichtigung der Differenz zwischen Übergangsanlage und ursprünglich geplantem Mast in voller Höhe anzusetzen.

Für die Prüfung einer Zwischenverkabelung des Leitungsabschnittes im Bereich der Ortslage Tauscha einschließlich des Lochmühlentales wurde der Leitungsabschnitt zwischen Mast 24 und Mast 37 der Freileitung gewählt. Die beiden Masten sind durch Übergangsanlagen Kabel-Freileitung zu ersetzen. Der Kabelverlauf für diesen Abschnitt entspricht der Darstellung in Abbildung 1.

Der Freileitungsabschnitt hat eine Länge von ca. 3790 m. Das Kabel kann aufgrund der topografischen Verhältnisse im Trassenraum nicht geradlinig auf der gleichen Trasse wie eine Freileitung verlegt werden. Die technisch vergleichbare Kabeltrasse hat eine Länge von ca. 4140 m.

Die anteiligen Freileitungskosten betragen 375 €/m und damit 1,421 Mio € für den Leitungsabschnitt.

Bei anteiligen Kabelkosten ohne Übergangsanlagen von 1466 €/m ergeben sich 6,068 Mio € für eine Kabelverlegung. Hinzu kommen die zusätzlichen Kosten für den

Ersatz der Masten 24 und 37 durch zwei Übergangsanlagen von 380 T€. Somit sind 6,448 Mio € für die Zwischenverkabelung anzusetzen.

Somit wäre eine Kabellegung auf dem Leitungsabschnitt ca. 4,5-fach teurer als eine Freileitung.

Aufgrund der unterschiedlichen Lebensdauer von Freileitung und Kabel ist davon auszugehen, dass die Zwischenverkabelung nach ca. 40 Jahren ausgetauscht werden muss, wogegen bei einer Freileitung lediglich die Leiterseile gewechselt werden müssen.

Die Kosten des Wechsels der Kabelanlage entsprechen annähernd denen einer Neuverlegung. Bei Einbeziehung dieser Faktoren verschiebt sich das Kostenverhältnis noch mehr zu Ungunsten der Zwischenverkabelung. Unter Berücksichtigung des Restwertes der Anlagen ergibt sich ein Kostenfaktor von Kabel zu technisch vergleichbarer Freileitung von **4,87**.

Während man bei Freileitungen in der Bauphase mit Provisorien arbeiten kann, ist dies bei Kabeln nicht möglich. In der Zeit der erforderlichen Auswechslung der Zwischenverkabelung steht daher die gesamte Leitung zwischen Limbach und Oberelsdorf nicht zur Verfügung. Bei Störungen im umgebenden Netz wäre die Versorgungssicherheit stark beeinträchtigt.

Eine Zwischenverkabelung auf Freileitungstrassen ist daher wirtschaftlich und netztechnisch kritisch zu bewerten.

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

1. Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), das zuletzt durch Artikel 3 Absatz 4 des Gesetzes vom 04. Oktober 2013 (BGBl. I S. 3746) 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. Energieleitungsausbaugesetz vom 21. August 2009 (BGBl. I S. 2870), das zuletzt durch Artikel 14 des Gesetzes vom 22. Dezember 2016 (BGBl. I S. 3106) geändert worden ist
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>