

Beschleunigter Netzausbau durch Minimaltrassen-Kabellösungen

Heinrich Brakelmann, Lorenz J. Jarass und Carsten Wolff

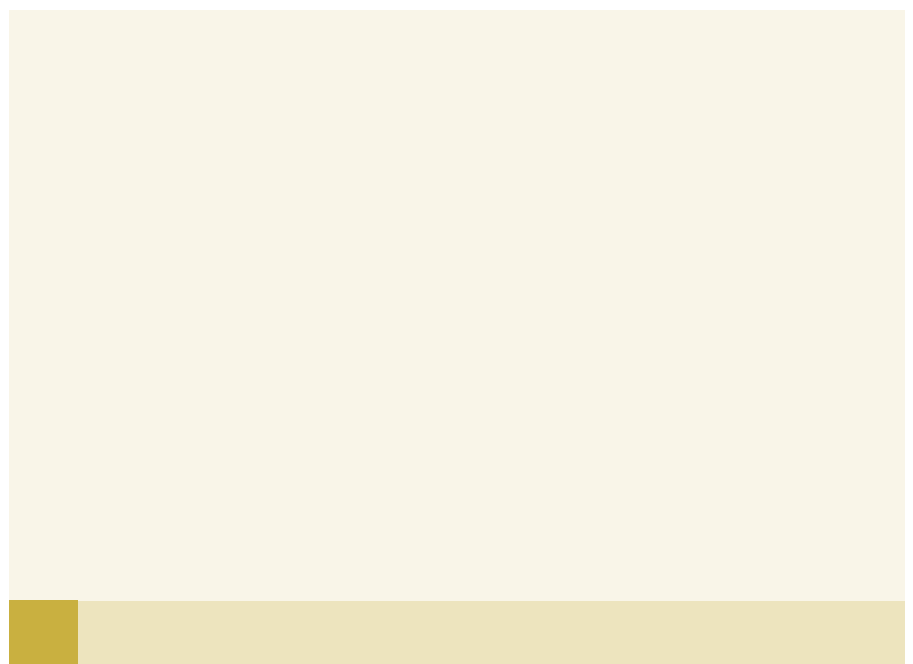
Die Bundesnetzagentur und nicht zuletzt der Koalitionsvertrag der neuen Bundesregierung setzen auf eine Beschleunigung beim Ausbau des Stromübertragungsnetzes in Deutschland. Um Bürgerinteressen stärker zu berücksichtigen, soll der Ausbau verstärkt über Erdverkabelung erfolgen. Dabei stehen kostengünstige Konzepte im Mittelpunkt. Im Beitrag werden Minimaltrassen-Kabellösungen im Drehstromnetz erläutert. Sie reduzieren Umweltbelastungen, Installationsdauer und Kosten bei gleichzeitig erhöhter Zuverlässigkeit und ermöglichen dadurch eine Beschleunigung des Netzausbaus.

Das europäische 380-kV-Verbundnetz ist überwiegend mit Freileitungstrassen realisiert. Je nach Wahl des Aluminium-Seilquerschnitts lassen sich so bei Viererbündeln Leistungen von 1.800 MVA bis mehr als 2.500 MVA übertragen. Die Mastabmessungen liegen bei 55 m bis 80 m Höhe und 23 m bis 34 m Breite, der erforderliche Freileitungsschutzstreifen hat eine Breite von rund 80 m (in Waldgebieten bis zu 110 m) [1].

Netzentwicklungsplan und Bundesbedarfsplangesetz beschreiben die technischen und zeitlichen Rahmenbedingungen des geplanten Neubaus leistungsstarker Nord-Süd-Verbindungen in Gleichstromtechnik und der Verstärkung vieler 380-kV-Drehstromleitungen. Gleichstromtrassen sollen vorzugsweise als Kabelanlagen errichtet werden, fünf der geplanten Drehstromtrassen sind Pilotvorhaben für die Verkabelung.

Die Bundesnetzagentur fordert in ihrer aktuellen Bestätigung des Netzentwicklungsplans die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) auf, sich im 2019 vorzulegenden überarbeiteten Netzentwicklungsplan 2030 „deutlicher als bislang zum künftigen Ausbaukonzept zu äußern und einen Vorschlag zu unterbreiten, in welchem Maße der zunehmende Transportbedarf durch Ausbau des Wechselstromnetzes, durch neue HGÜ bzw. durch Erhöhung der Leitungsauslastung mittels neuer Technologien und höherer Risikobereitschaft im Netzbetrieb bewältigt werden soll“ [2].

Im Folgenden werden Maßnahmen zur Aufwandsverminderung bei Kabellösungen im Drehstromnetz beschrieben, die der Beschleunigung des Netzausbaus dienen. Maßnahmen für das zukünftige Gleichstromnetz werden in einem späteren Beitrag erläutert.



(n-1)-Sicherheit durch vier Kabelsysteme

Alle Leitungen des Verbundsystems müssen so ausgelegt sein, dass das (n-1)-Kriterium eingehalten wird, also auch nach Ausfall eines Betriebsmittels die Versorgung der Stromverbraucher weiterhin gesichert ist [3]. Dabei müssen sowohl Fehler auf der eigenen Trasse wie auch die beim Ausfall von benachbarten Leitungen zu übernehmenden Übertragungsleistungen berücksichtigt werden.

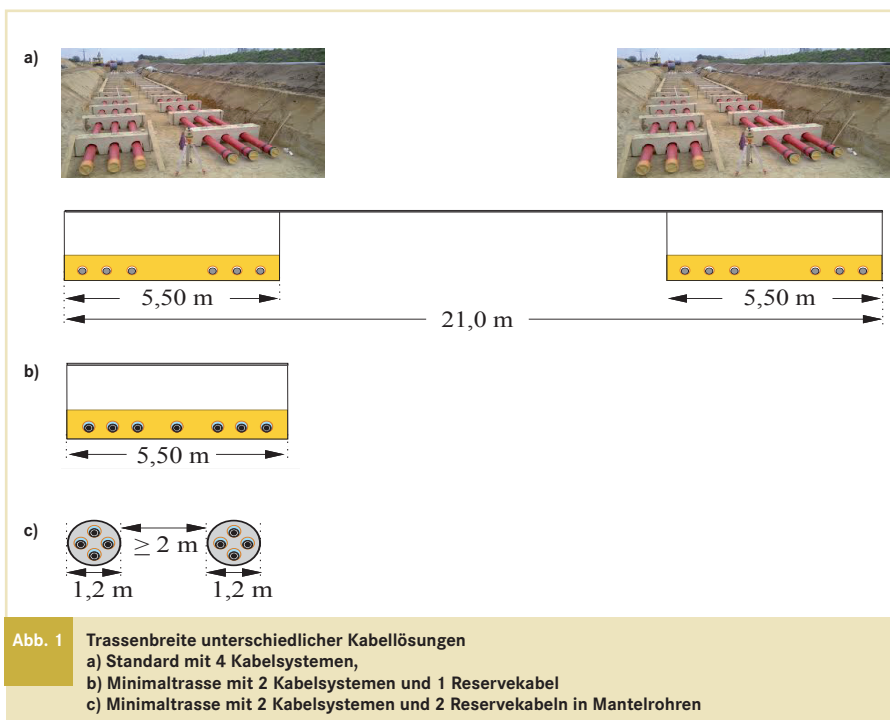
Werden Teilverkabelungen von Höchstspannungsleitungen erforderlich, so werden derzeit zur Sicherstellung dieses (n-1)-Kriteriums für die Teilverkabelung von zwei Freileitungssystemen vier Kabelsysteme geplant, und zwar mit zwei Gräben in Einebenenordnung, mit mehr als 40 m Trassenbreite in der Bauphase und mehr als 20 m im Betrieb [4].

Nachteilige Folgen dieses Konzepts sind die Beeinträchtigung großer Boden- und Oberflächenbereiche, ein relativ langsamer Baufortschritt sowie eine vergleichsweise erhöhte Ausfallwahrscheinlichkeit aufgrund der großen Anzahl von Kabeln und Garnituren. Eine solche Kabeltrasse ist sehr aufwändig und in engeren Trassenbereichen häufig gar nicht zu realisieren.

Abb. 1 zeigt einen Vergleich der Trassenbreite bei vier Kabelsystemen mit den anschließend erläuterten Minimaltrassen-Kabellösungen mit nur zwei Kabelsystemen.

Fortschritte in der Kabeltechnologie

Bereits bis 2015 wurden weltweit insgesamt 4.691 km Höchstspannungskabel verlegt [5], davon



- 1.940 km mit einer Spannung von 220 kV bis 235 kV;
- 1.073 km mit einer Spannung von 245 kV bis 345 kV;
- 1.678 km mit einer Spannung von 380 kV bis 500 kV.

Die Tabelle präsentiert die zulässige Übertragungsleistung von zwei 380-kV-Kabelsystemen im Normalbetrieb, also ohne Kühlung im Netzstörfall. Die erste Spalte zeigt die zulässige Übertragungsleistung für eine Einebenenordnung in einem Graben mit einem Reservekabel, die zweite und dritte Spalte für

eine Einebenenordnung in zwei Gräben mit zwei Reservekabeln, die vierte Spalte für eine Verlegung im Mantelrohr.

Bei den Höchstspannungskabeln besteht zurzeit die Tendenz, verlustarme Leiter mit Querschnitten von mehr als 2.500 mm² zu verwenden, meist mit isolierten Kupfer- bzw. Aluminiumdrähten. So wurden bereits 380-kV-Kabel mit 3.500 mm²-Aluminiumleitern mit isolierten Drähten im Amsterdamer Nordring eingesetzt, und Öl-Papierisolierte Höchstspannungskabel sind auch schon mit 3.200 mm²-Kupferleitern im Einsatz. Deshalb

wird in der Tabelle die Übertragungsleistung sowohl für die üblichen Querschnitte bis 2.500 mm² als auch für Querschnitte von 3.200 mm² und von 3.500 mm² dargestellt.

Aus der Tabelle lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Kupferleiter mit einem Querschnitt von 3.500 mm² ermöglichen je nach Verlegeart eine Übertragungsleistung von bis zu 3.846 MVA (siehe Zeile 2c, dritte Spalte).
- Aluminiumleiter mit einem Querschnitt von 3.500 mm² haben eine ähnlich hohe Übertragungsleistung wie Kupferleiter mit 2.500 mm² (Zeile 1c versus Zeile 2a), sind aber deutlich kostengünstiger.
- Eine Verlegung in zwei getrennten Gräben hat nur eine rund 3 % höhere Übertragungsleistung gegenüber einer Verlegung in einem gemeinsamen Graben (Spalte 2 versus Spalte 1).
- Hingegen ermöglicht der Einsatz eines hochwärmeleitfähigen Stabilisierungsmaterials (z.B. Powercrete [6]) eine Erhöhung der Übertragungsleistung um etwa ein Zehntel (Spalte 3 versus Spalte 2).

Durch Kühlung kann die Übertragungsleistung fast verdoppelt werden [9]

Wassergekühlte Kabel können auch im offenen Graben verlegt werden. Die Kabelanordnungen selbst nehmen nur wenig Einfluss auf die Kabelbelastbarkeit, die in erster Linie von der maximal auftretenden Kühlwassertemperatur abhängt, und beeinflussen eher Anlagenparameter wie Kühlabschnittslänge, erforderliche Kühlwassereintrittstemperatur und Strömungsgeschwindigkeit. Teilverkabelungen mit Trassenlängen von 10 km und mehr sind mit einer Kühlstation beherrschbar.

Für diese Minimaltrassen-Kabellösungen mit weniger als 20 m Trassenbreite in der Bauphase und weniger als 10 m Trassenbreite im Betrieb ist nur weniger als die Hälfte der Trassenbreiten von Standard-Kabellösungen erforderlich.

Grabenlose Verlegung der Kabel in Mantelrohren oder im Leitungsgang

Noch geringere Trassenbreiten können durch Verlegung als Mantelrohrkonstruktion er-

Tab.: Übertragungsleistung von zwei 380-kV-Kabelsystemen im Normalbetrieb

Trassenbreite [m]	5,5	10,5	>4,4
Stabilisierung des Bodens [W/(K*m)]	1,0	1,0	3,5
Leiter	[MVA]	[MVA]	[MVA]
(1a) Al 2.500 RMS	2.242	2.312	2.550
(1b) Al 3.200 VO	2.598	2.688	2.968
(1c) Al 3.500 VO	2.714	2.802	3.108
(2a) Cu 2.500 RMS	2.742	2.826	3.116
(2a) Cu 3.200 VO	3.228	3.330	3.690
(2a) Cu 3.500 VO	3.358	3.465	3.846

RMS = runder, mehrdrähtiger Segmentleiter (Drähte nicht isoliert)
 VO = runder, mehrdrähtiger Segmentleiter, verlustoptimiert

zielt werden. Nach Einbringen des Mantelrohres (aus Stahl oder Kunststoff) werden drei Kunststoffrohre eingezogen und der Zwischenraum mit hochwärmeleitfähigem Material (z.B. CableCem [7]) verfüllt, um anschließend die Kabel einzuziehen. Für die Kühlung werden die drei Kunststoffrohre mit Wasser gefüllt. Neben der konventionellen Bauweise – Aushub eines schmalen Kabelgrabens und Legung der Mantelrohre – bieten sich vor allem die modernen Bohrverfahren an: Das halboffene PipeExpress-Verfahren für ländliche Bereiche, das geschlossene Pipe-Direct-Verfahren für urbane Siedlungsgebiete oder für Kunststoff-Mantelrohre das neue E-Power-Pipe-Verfahren [8]. Die Arbeitsgeschwindigkeiten dieser Bohrpressverfahren sind mit mehr als 100 m am Tag extrem hoch. Eine Alternative dafür ist die Installation im Leitungsgang mit vielfältigen Vorteilen hinsichtlich des Betriebs und der Sicherheit gegen mechanische Einwirkungen.

(n-1)-Sicherheit durch zwei Kabelsysteme und Kühlung im Netzstörfall [9]

Die Kabelanlage wird grundsätzlich so ausgelegt, dass der (n-1)-sicher zu übertragende Strom im Normalbetrieb von den beiden Kabelsystemen ohne die Kühlung dauerhaft übertragen werden kann. Nur im Netzstörfall werden die Kabel gekühlt, wodurch ihre Übertragungsleistung deutlich erhöht wird und die weitere Stromübertragung unterbrechungsfrei gesichert ist. Deshalb sind für die Zwischenverkabelung von zwei Freileitungssystemen nicht vier, sondern nur zwei Kabelsysteme erforderlich.

Hierzu werden die Kabel in Kunststoffrohre eingezogen, die anschließend mit Wasser gefüllt werden und miteinander geschlossene Kühlkreisläufe bilden, die mit einer Kühlstation verbunden sind. Die Zwangskühlung der Anlage erlaubt es jedem Kabelsystem, dauerhaft den Nennstrom zu führen. Die thermische Trägheit der Kabel und die dadurch mögliche stärkere Belastbarkeit für einige Stunden sorgen dafür, dass das (n-1)-Kriterium auch dann eingehalten wird, falls die Notbetriebskühlung nicht sofort eingesetzt werden kann.

Kühlung von Drehstromsystemen ist langjährig erprobt

Kabeldiagonale Berlin

Derartig gekühlte 380-kV-Höchstspannungskabel sind laut zuständigem ÜNB in der Kabeldiagonale Berlin „zwischen den Umspannwerken Mitte und Friedrichshain sowie zwischen Friedrichshain und Marzahn seit 1998 bzw. 2000 erfolgreich in Betrieb“ und haben sich über fast drei Jahrzehnte „grundsätzlich bewährt“ [10]. Für einen Neubau zwischen den beiden Umspannwerken Charlottenburg und Mitte plant dieser ÜNB den Einsatz von zwei wassergekühlten, kunststoffisolierten Hochleistungskabeln. Eine Kühlung von 380-kV-Kabeln ist also Stand der Technik.

Übertragungsleistung von zwei Kabelsystemen

Ungestörtes Netz

Ohne Netzstörung können die beiden Minimaltrassen-Kabelsysteme auch ohne Kühlung bei den derzeit lieferfähigen Kupferleitern mit 2.500 mm² Querschnitt eine Dauerleistung bis zu 3.116 MVA übertragen (vgl. Tabelle). Ein ÜNB geht davon aus, dass eine Leitung nicht nur zur Hälfte, sondern zu 70 % ausgelastet werden darf und dann immer noch das (n-1)-Kriterium eingehalten wird [4]. Daraus resultiert bei der maximal zulässigen Stromstärke von 3.600 A eine Übertragungsleistung einer zweiseitigen 380-kV-Leitung von 3.317 MVA (also mehr als die laut ENTSOE zulässige maximale Übertragungsleistung an einem Netzknoten von 3.150 MVA bzw. 3.000 MW [3]). Mit künftig vergrößerten Leiterquerschnitten könnte allerdings sogar dieser Wert von 3.317 MVA dauerhaft durch zwei Minimaltrassen-Kabelsysteme (noch ohne Kühlung) übertragen werden.

Störung in einem Kabelsystem

Kabel können im Gegensatz zur Freileitung im Stunden-, Tages- und sogar Wochenbereich überlastet werden, sodass das verbliebene Kabelsystem die Übertragungsleistung auch hinreichend lange übernehmen kann, bis die Kühlung in Betrieb genommen wird.

Netzstörung außerhalb der Leitung

Bei einer Netzstörung außerhalb der beiden Minimaltrassen-Kabelsysteme werden die beiden Minimaltrassen-Kabelsysteme vorübergehend bis zur Behebung der Störung zusätzlich belastet. Laut den Vorgaben eines großen ÜNB soll eine zwölfstündige Belastung mit 3.600 A (bzw. 2.369 MVA) je System mit einem Belastungsgrad von 0,8 möglich sein, und zwar bei einer Vorbelastung von 2.520 A (bzw. 1.569 MVA), ohne dass die Kabel die maximale Betriebstemperatur überschreiten [4]. Die stationäre thermische Grenzlast der Kabelanlage je Stromkreis wurde dabei auf 3.150 A (bzw. 2.073 MVA) mit einem Belastungsgrad von 0,8 festgelegt, was nach der Tabelle bei entsprechender Auslegung der Kabelanlage auch ohne Kühlung beherrschbar ist.

(n-1)-Sicherheit durch zwei Kabelsysteme und Abregelung von Wind- und Sonnenstrom im Netzstörfall [11]

Das gesetzliche Gebot der wirtschaftlichen Zumutbarkeit des Netzausbaus fordert, dass der Nutzen des Netzausbaus seine Kosten übersteigen soll, so dass seltene Übertragungsgengpässe für erneuerbare Energien hingenommen werden können, soweit nicht dadurch die Versorgung von Stromverbrauchern beeinträchtigt wird. Entsprechend lässt § 11 (2) EnWG für die Netzplanung eine Reduzierung der momentanen Einspeisung aus Onshore-Windenergie und Photovoltaik um bis zu 100 % zu, soweit die „prognostizierte jährliche Stromerzeugung“ im Verlauf des Jahres höchstens „um bis zu 3 % reduziert“ wird.

Eine pauschale Kappung aller Einspeisespitzen ermöglicht nur relativ niedrige Reduzierungen des erforderlichen Netzausbaus und damit nur eine geringe Aufwandsminderung. Hingegen gestattet eine Konzentration von Einspeisereduzierungen auf Netzstörfälle bei Teilverkabelungen eine (n-1)-gesicherte Übertragung mit nur zwei statt vier Kabelsystemen und damit einen Netzausbau mit stark verringertem Trassenbedarf und erheblich reduzierten Kosten, und zwar unter Beibehaltung der hohen Versorgungssicherheit der Verbraucher. Deshalb sollte die derzeit auf Onshore-Windenergie und Photovoltaik

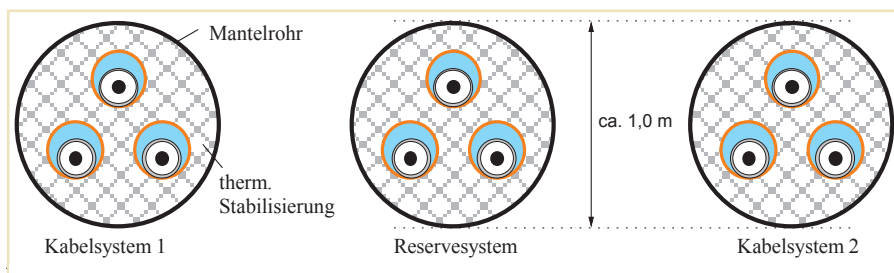


Abb. 2 Zwei Kabelsysteme mit Kühlung und ein Reservesystem (PowerTubes-Prinzip)

beschränkte 3 %-Abregelungsmöglichkeit zukünftig auch auf Offshore-Windstrom ausgeweitet werden.

Die Kabelanlage wird grundsätzlich so ausgelegt, dass der (n-1)-sicher zu übertragende Strom im Normalbetrieb von den beiden Kabelsystemen ohne Kühlung dauerhaft übertragen werden kann. Nur im Netzstörfall wird die durch erneuerbare Energien eingespeiste Leistung reduziert und durch ohnehin für Dunkelflauten erforderliche Reservekraftwerke vorübergehend ersetzt. Da die Kabel vorübergehend über Stunden, Tage oder gar Wochen – im Gegensatz zu Freileitungen – ohne Überschreitung der zulässigen Leitertemperatur erheblich überlastet werden können, ist eine Abregelung nur bei länger dauernden Netzstörungen erforderlich. Durch Einbau von Reservekabeln kann die Dauer derartiger Netzstörungen

deutlich reduziert werden. Eine Kühlung ist in keinem Fall zur Sicherstellung des (n-1)-Kriteriums erforderlich und ist deshalb – im Gegensatz zu Übertragungsleitungen ohne Abregelungsmöglichkeit – entbehrlich.

(n-1)-Sicherheit durch zwei Kabelsysteme mit Reservekabel zur Verringerung der Ausfallzeiten [12]

Ein ausgefallenes Kabel wird mit Hilfe von Trennschaltern abgeschaltet und das Reservekabel zugeschaltet. Wegen der Überlastungsfähigkeit des verbleibenden Kabelsystems wird dadurch die Übertragungsleistung nicht vermindert.

Durch ein Reservekabel wird die Verfügbarkeit gegenüber einer Auslegung ohne Reservekabel um einen Faktor von rund 50 erhöht.

Schon allein die ersparten Energiekosten können die relativ geringen Mehrkosten der Reservekabel kompensieren (vgl. Abb. 3).

Bei beiden zuvor beschriebenen Typen von Kabelanlagen mit Kühlung oder mit Abregelungsmöglichkeit ist durch das Reservekabel (n-2)-Sicherheit gegeben, weil entweder während des (n-2)-Störfalls die zulässige Übertragungsleistung durch Kühlung erhöht oder die erforderliche Übertragungsleistung durch Abregelung vermindert werden kann.

Reservesystem

In Abb. 2 ist statt eines Reservekabels ein komplettes Reservesystem installiert, und zwar in einer dreiadrigen Anordnung in Mantelrohren, die mit einem Bohrpressverfahren grabenlos und beeinflussungsarm in den Boden eingebracht werden können. Beispiele einer Anordnung im Leitungsgang finden sich in [9].

Bei Ausfall eines der beiden äußeren, in Betrieb befindlichen Kabelsysteme wird dieses mit Hilfe von Trennschaltern abgeschaltet und das Reservesystem zugeschaltet. Wegen der Überlastungsfähigkeit über Stunden und Tage ist für diese Betriebssituation noch keine Kühlung erforderlich. Wird aber mit Eintritt dieses ersten Fehlers die Kühlung in Betrieb genommen, so wird auch ein während der Reparaturphase eintretender, zweiter Fehler beherrscht, da dann das verbleibende Kabelsystem noch immer die Nennleistung übertragen kann.

Bei einer Auslegung wie in Abb. 2 kann ein normales Auskreuzen der Kabelschirme (statt einer einseitigen Erdung) vorgenommen werden, und zudem bestehen beim Austauschen einer defekten Kabelader und dem Setzen von Verbindungsmuffen größere Abstände zu den in Betrieb befindlichen Kabelsystemen, so dass gegebenenfalls Abschaltungen entfallen können.

Kostenvergleich

Im Folgenden werden nun die Investitionskosten für unterschiedliche Kabellösungen dargestellt und mit Freileitungslösungen verglichen. Alle Alternativen können mindestens 1.800 MVA (n-1)-gesichert übertragen.

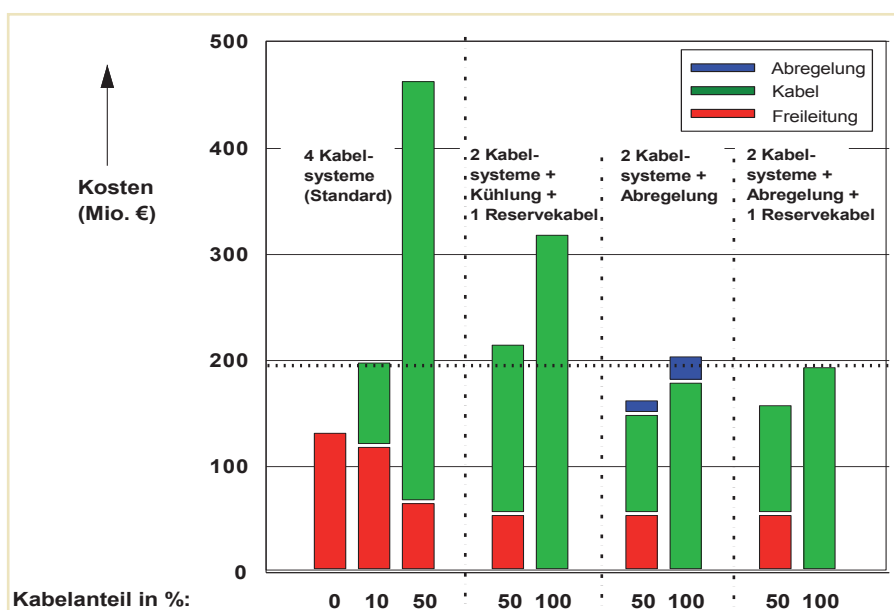


Abb. 3 Kostenvergleich von Freileitungen und Kabellösungen

Abb. 3 zeigt beispielhaft für die geplante 380-kV-Verbindung Lübeck – Göhl (Ostholsteinleitung) die Investitionskosten für unterschiedliche Kabelanteile [13]. Kapitalisierte Verlustkosten bleiben hier unberücksichtigt. Sie sind bei Kabellösungen ohne Kompensation niedriger als bei einer Freileitung, mit Kompensation können sie leicht darüber liegen.

Die ersten drei Balken zeigen die Investitionskosten der geplanten 380-kV-Freileitung, die wegen erforderlicher Umwege mit 65 km etwas länger ist als die eine Kabellösung. Der zuständige ÜNB plant am Ende in Göhl eine Standard-Teilverkabelung mit vier Kabelsystemen und aufwändigen Kupferleitern (2.500 mm²) bei einer Trassenbreite in der Bauphase von über 40 m und im Betrieb von über 20 m. Der Kabelanteil beträgt rund 6 %. Die geschätzten Investitionskosten liegen mit 154 Mio. € zwischen den Investitionskosten von 130 Mio. € für einen Kabelanteil von 0 % (erster Balken) und knapp 200 Mio. € für einen Kabelanteil von 10 % (zweiter Balken als Bezugsgröße). Bei einem Kabelanteil von 50 % liegen die Kosten bei rund 460 Mio. €.

Der vierte bis neunte Balken beziehen sich jeweils auf eine Ausführung mit nur zwei

statt vier Kabelsystemen und einer Grabenbreite im Bau und im Betrieb von jeweils deutlich weniger als der Hälfte der Standardausführung mit vier Kabelsystemen. Hier wird mit unterschiedlichen Maßnahmen die (n-1)-gesicherte Übertragung von mindestens 1.800 MVA sichergestellt:

Der vierte und fünfte Balken zeigen die Investitionskosten, falls eine (n-1)-sichere Übertragung durch Kühlung im Netzstörfall ermöglicht wird und zur weiteren Erhöhung der Versorgungssicherheit 1 Reservekabel installiert wird. Die im vierten Balken gezeigte Ausführung mit 50 % Kabelanteil kostet mit 215 Mio. € nur wenig mehr als die im zweiten Balken gezeigte herkömmliche Ausführung mit 10 % Kabelanteil. Die im fünften Balken gezeigte Vollverkabelung ist deutlich günstiger als die im dritten Balken gezeigte herkömmliche Ausführung mit 50 % Kabelanteil.

Der sechste und siebte Balken zeigen die Investitionskosten, falls eine (n-1)-sichere Übertragung durch Abregelung der eingespeisten erneuerbaren Energien im Netzstörfall ermöglicht wird. Die im sechsten Balken dargestellte Ausführung mit 50 % Kabelanteil kostet mit 162 Mio. € deutlich weniger

als die herkömmliche Ausführung mit 10 % Kabelanteil im zweiten Balken, die im siebten Balken gezeigte Vollverkabelung kostet etwa genauso viel. Dabei sind jeweils die durch die Abregelung entstehenden Kosten für nicht übertragbare erneuerbare Energien berücksichtigt.

Der achte und neunte Balken zeigen, dass durch ein Reservekabel die Kosten noch weiter gesenkt werden können. Die Menge an abgeregelter Energie kann durch ein Reservekabel drastisch reduziert werden. Die so eingesparten Abregelungskosten überkompensieren im Regelfall die Kosten für das Reservekabel.

Prof. Dr.-Ing. habil. H. Brakelmann, BCC Cable Consulting, Rheinberg; Prof. Dr. L. J. Jarass, ATW GmbH, Wiesbaden; Dipl. Ing. C. Wolff, NKT GmbH & Co. KG, Köln mail@jarass.com

*Zu den Quellen siehe
www.Jarass.com/home/de/Energie/
Aufsaetze/
Minimaltrassen, Quellen*

ENERGIENEWS ONLINE: www.et-energie-online.de