

Hoch- und Höchstspannungskabel

Effiziente Kabelanordnung im Doppelmantelrohr

Die Verfasser stellen eine Anlagenkonzeption vor, bei der sich Hoch- oder Höchstspannungskabel innerhalb eines Doppelmantelrohrs befinden [1]. Besondere Zielsetzungen dieser Variante sind höchste Übertragungsleistungen bei minimalem Trassenbedarf, geringstmögliche thermische und magnetische Beeinflussung sowie die Möglichkeit, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit des Systems durch Wärmerückgewinnung und geothermische Energiegewinnung zu maximieren.

Bei dem Prinzip des Phase Splittings werden bei einem Kabeldoppelsystem sowohl die Kabelanordnung als auch die Phasenfolge so optimiert, dass eine weitgehende Kompensation des Magnetfelds eintritt [2]. Ein Beispiel ist in *Bild 1* zu sehen: Hier sind innerhalb eines thermisch stabilisierten Bereichs sechs Kabeladern in einem symmetrischen Sechseck angeordnet. Die beiden Kabelsysteme liegen jeweils in einem symmetrischen Dreieck und erzeugen – wenn sie mit Drehstrom beaufschlagt werden – ein rotierendes Drehfeld. Bei Beaufschlagung beider Systeme mit der gleichen Phasenfolge ist das Drehfeld des zweiten Kabelsystems gegenüber dem Drehfeld des ersten Kabelsystems aus räumlichen Gründen um 180° nachlaufend – ihm entgegengesetzt. Damit findet eine weitgehende Auslöschung des resultierenden Drehfelds statt.

In [2] wird gezeigt, wie Realisierungen der Anordnung nach *Bild 1* in offener Bauweise ausgeführt werden können. Möglich ist es allerdings auch, solche

Phase-Splitting-Anordnungen in Leitungskanälen unterzubringen, so dass geschlossene oder halboffene Bohrverfahren zum Einsatz kommen können. Aufgrund der zusätzlichen Möglichkeiten einer intensiven Kühlung erscheint es interessant, solche Leitungskanäle als Doppelmantelrohre auszuführen, wie dies schematisch in *Bild 2* dargestellt ist. In diesem Beispiel wird ein vollständiger Kühlkreislauf mit Vorlauf des Kühlwassers im innenliegenden Kühlrohr und Wasser-rücklauf im Spalt des Doppelmantelrohrs bei optimaler thermischer Schirmung der Kabelsysteme erreicht. An Hotspots kann mit einer solchen Anordnung auch abschnittsweise eine autarke Eigenkühlung durch den Thermosyphoneffekt realisiert werden [11].

In einen solchen Leitungskanal werden zunächst die sieben Kunststoffrohre, im Verbund mit Abstandshaltern und Einziehschlitten, eingefahren. Der Zwischenraum zwischen diesem Rohrbündel und dem Doppelmantelrohr wird

anschließend mit hochwärmeleitfähigem Material – zum Beispiel Cable-Cem [4,5] – verfüllt, so dass das System eine inhärente thermische Stabilisierung und optimale Wärmeübergänge zum umgebenden Boden und zu den Kühlbereichen aufweist. Zuletzt werden die Kabeladern eingezogen. Zur weiteren Verbesserung der Wärmeübergänge besteht prinzipiell auch die Möglichkeit, die Luftspalte in den Einziehröhren mit hochwärmeleitfähigem Material zu füllen.

Eine alternative Ausführung ist in *Bild 3* dargestellt, bei der vier Kabelsysteme in zwei Doppelmantelrohren untergebracht sind. Hier wurde auf die inneren Kühlrohre verzichtet: Der Spalt des linken Doppelmantelrohrs dient zum Wasser-vorlauf und der des rechten zum Wasser-rücklauf. Wie in diesem Aufsatz gezeigt wird, ist auch hier eine sehr gute Kühlwirkung gegeben. Beachtlich ist der geringe Platzbedarf einer solchen viersystemigen Kabeltrasse.

Die Doppelmantelrohre können im Bohrverfahren (geschlossene Bauweise) oder in halboffener Bauweise – oder auch im offenen Kabelgraben – in den Boden eingebracht werden [6]. Inzwischen gibt es für die geschlossene und die halboffene Bauweise moderne, gesteuerte Bohrverfahren, die Abschnittslängen von > 1 000 m ermöglichen. Bestehende Infrastrukturen wie der Untergrund von Straßen können ohne Betriebsstörungen genutzt werden, um Kabelanlagen praktisch ohne zusätzlichen Trassenbedarf realisieren zu können – ohne maßgebliche Beeinträchtigungen des Straßenverkehrs und der Bevölkerung.

Als besonderer Vorteil dieser Varianten ist der hohe Schutz gegen mechanische Beeinträchtigungen hervorzuheben. Die halboffene Bauweise reduziert die Lege-

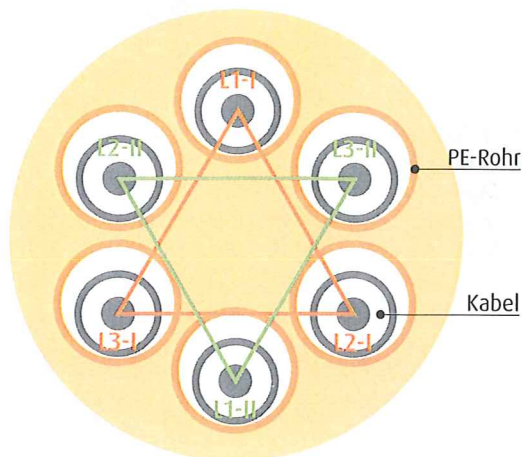
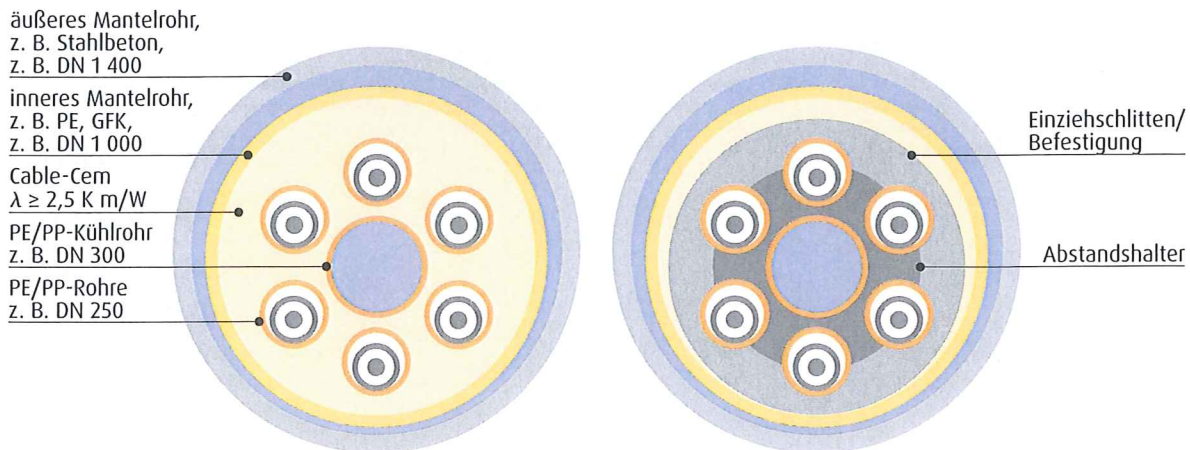


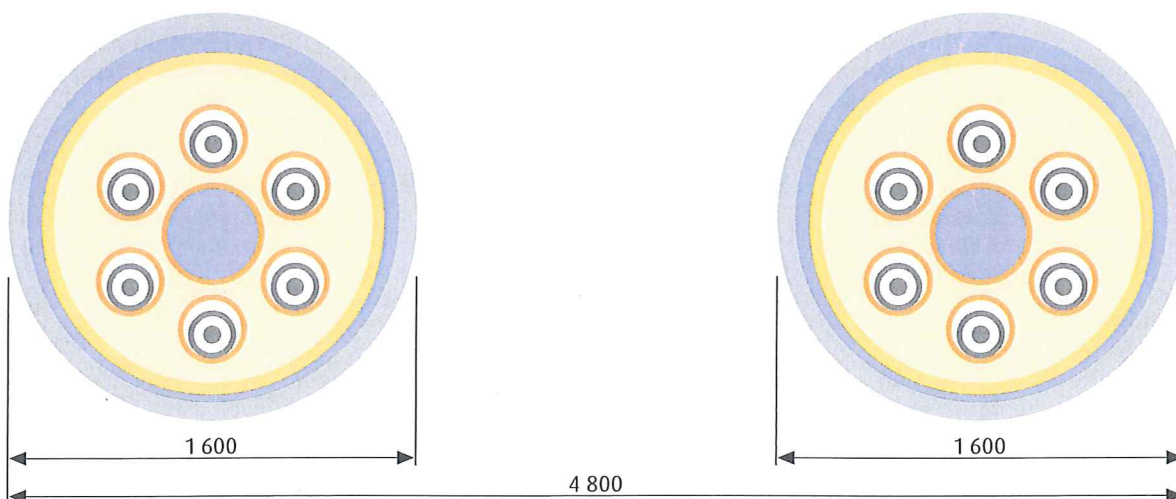
Bild 1. Prinzip des Phase Splitting: zwei im Sechseck angeordnete Kabelsysteme in PE-Rohren

42009.1



42009.2

Bild 2. Zwei Kabelsysteme im Doppelmantelrohr mit zwei Kühlbereichen (Wasservorlauf: innen; Wasserrücklauf im Spalt des Doppelmantelrohrs), Darstellung rechts: mit Abstandshaltern und Schlitzen zum Einziehen des Rohrbündels



42009.3

Bild 3. Zwei Doppelmantelrohre mit vier Kabelsystemen

kosten im Vergleich zur geschlossenen Bauweise auf rund 50 bis 60 %. Gegenüber dem offenen Kabelgraben bietet sie Vorteile hinsichtlich:

- der hohen Arbeitsgeschwindigkeit (rund 80 bis 100 m/d),
- der verringerten Aushubmenge (zwei Gräben mit nur ≈ 1 m Breite),
- der mit dem offenen Graben möglicherweise vergleichbaren oder sogar geringeren Kosten, vor allem dann, wenn aufwendige Oberflächen wiederhergestellt werden müssen
- Kosten- und Zeitersparnissen sowie eines geringeren Eingriffs in die

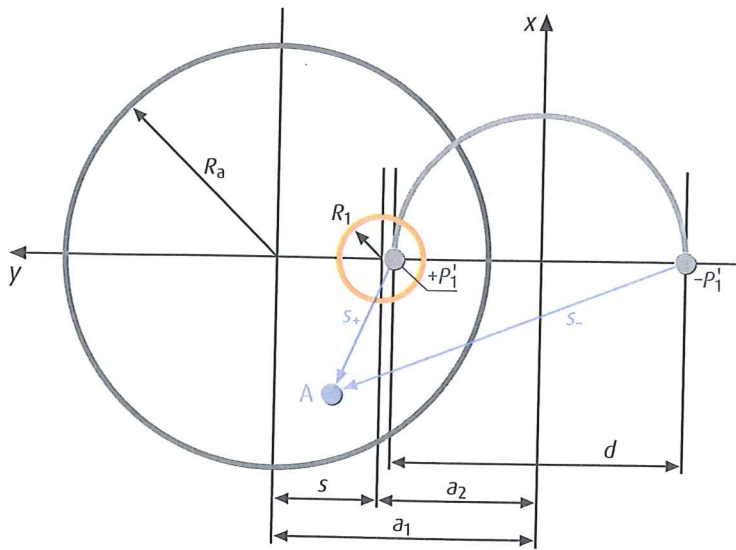
Bodenstruktur, da keine zusätzliche thermische Stabilisierung benötigt wird.

Werden für die 380-kV-Kabel Einzugsrohre mit einer Nennweite von zum Beispiel DN 250 bei einem Achsabstand von ≈ 400 mm verwendet, so wird das Doppelmantelrohr einen Außendurchmesser von ≈ 1600 mm haben. Werden zwei Mantelrohre im Bohrpressverfahren nebeneinander in den Boden eingebracht, so muss der lichte Abstand zwischen ihnen mindestens gleich dem Rohrdurchmesser sein. Für vier Kabelsysteme in zwei Mantelrohren ergeben

sich damit Anordnungen wie in *Bild 3* mit einer Grabenbreite (Sohle) von ≈ 5 m.

Berechnung des Übertragungsvermögens

Nachfolgend soll das Übertragungsvermögen von 380-kV-Kabeln für eine Anordnung von sechs Kabeladern innerhalb eines Doppelmantelrohrs wie in *Bild 3* mit und ohne Zwangskühlung berechnet werden. Hierzu wird von einer vorgegebenen Wassertemperatur im Querschnitt ausgegangen; zur Bestimmung der Strombelastbarkeit sei dies die höchste Wassertemperatur $\theta_{w,max}$, die im konkreten Fall



42009.4

Bild 4. Zur Berechnung eines Kabels mit dem Radius R_1 mit dem Verlustleistungsbelag P_1' innerhalb einer Isotherme mit dem Radius R_a (= innere Oberfläche des Doppelmantelrohrs)

durch eine übergeordnete Berechnung der Strömungs- und Kühlverhältnisse des Wasserkreislaufs und der Wärmeabgabe des Doppelmantelrohrs an die Umgebung ermittelt werden muss [12]. Damit kann die innere Oberfläche des Doppelmantelrohrs näherungsweise als Isotherme ($\Theta_{w,max}$) aufgefasst werden.

Wärmewiderstände und Erwärmungen innerhalb des Mantelrohrs

Im Folgenden werden die Erwärmungen innerhalb eines Mantelrohrs, dessen innere Oberfläche den Radius R_1 aufweist, bestimmt, die durch ein Kabel mit dem Verlustbelag P_1' hervorgerufen werden. Hierzu werden nach Bild 4 die Kabeloberfläche mit dem Radius R_1 und das Mantelrohr mit dem Radius R_a als Isothermen aufgefasst. Das wärmeleitungsbestimmte Strömungsfeld kann mit dem Spiegelungsverfahren entsprechend Bild 4 analysiert werden.

Nach [3] werden die Isothermenbedingungen mit folgenden Beziehungen erfüllt:

$$a_1 = \frac{R_a^2 - R_1^2 + s^2}{2 \cdot s} \tag{1a}$$

$$a_2 = \frac{R_a^2 - R_1^2 - s^2}{2 \cdot s} \tag{1b}$$

$$d = 2 \cdot \sqrt{a_1^2 - R_a^2}$$

$$= \frac{\sqrt{[s^2 - (R_a^2 + R_1^2)]^2 - 4 \cdot R_a^2 \cdot R_1^2}}{s} \tag{2}$$

Der äußere Zylinder weist die Erwärmung $\Delta\Theta_{20}$ auf [11]:

$$\Delta\Theta_{20} = \frac{P_1'}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{\frac{d}{2} + a_1 - R_a}{\frac{d}{2} - a_1 + R_a} \tag{3}$$

die als Bezugsgröße für alle Erwärmungen innerhalb der Anordnung gilt. Der Koppelwärmewiderstandsbelag $T_{1,i}$ des Kabels 1 mit einem anderen Kabel i innerhalb des äußeren Zylinders, das zu den beiden Wärmequellen $\pm P_1'$ in Bild 1 die Abstände s_{i+} und s_{i-} hat, berechnet sich laut [11] zu

$$T_{1,i}' = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \left[\frac{s_{i-}}{s_{i+}} \cdot \frac{\frac{d}{2} + a_1 - R_a}{\frac{d}{2} - a_1 + R_a} \right] \tag{4}$$

Geben – bei symmetrischer Auslastung – alle sechs Kabeladern innerhalb des Mantelrohrs dieselbe Verlustleistung P' ab, so folgt die Erwärmung zum Beispiel der Kabelader 1 bezüglich der äußeren Isotherme zu

$$\Delta\Theta_1 = P_1' \cdot \sum_{i=1}^6 T_{1,i}' = P_1' \cdot T_{1,ges}' \tag{5}$$

Bestimmen der Strombelastbarkeit

Sind die übrigen Wärmewiderstandsbeläge des Kabels und der Rohre bekannt und ist die höchste Wassertemperatur $\Delta\Theta_{w,max}$ vorgegeben, so folgt die Strombe-

lastbarkeit jedes der beiden Kabelsysteme aus [7–10]:

$$I = \sqrt{\frac{1}{R_{90}'}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta\Theta_{zul} - \Delta\Theta_D - \Delta\Theta_{w,max}}{T_1' + (1 + \lambda_1) \cdot (T_3' + T_{1,ges}' + T_R' + T_{DMR}')}} \tag{6}$$

In Gl. (6) sind:

$\Delta\Theta_{zul}$ höchstzulässige Leitertemperatur (VPE-Kabel: 90 °C),

$\Delta\Theta_{w,max}$ Wassertemperatur im betrachteten Querschnitt,

T_1' Wärmewiderstandsbelag der elektrischen Isolierung,

T_3' Wärmewiderstandsbelag des Korrosionsschutzes,

$T_{1,ges}'$ Gesamtwärmewiderstandsbelag nach Gl. (9) zwischen Kabelrohr 1 und Doppelmantelrohr,

T_R' Wärmewiderstandsbelag zwischen Kabel und Kabelrohr einschließlich Luftschicht beziehungsweise Füllung,

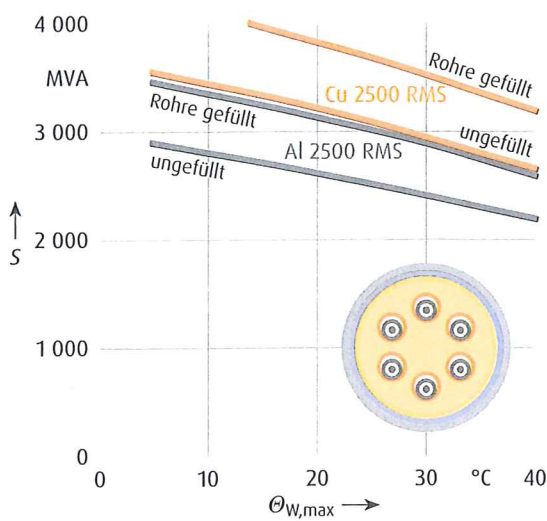
T_{DMR}' Wärmewiderstandsbelag der Wand des Doppelmantelrohrs.

$\Delta\Theta_b$ ist die Leitererwärmung aufgrund der dielektrischen Verluste [7–10].

Strombelastbarkeiten bei Zwangskühlung

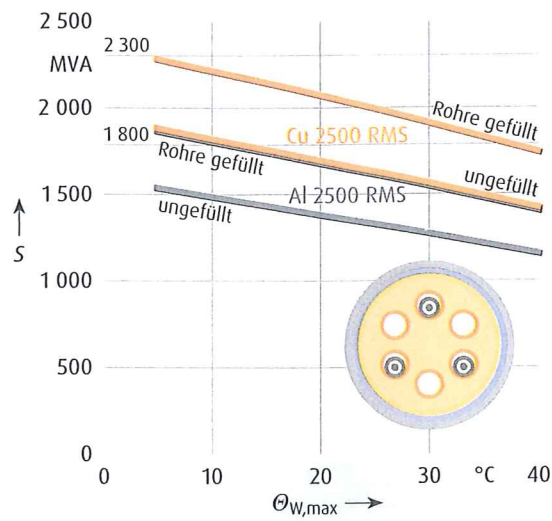
Es wird von einer Anordnung nach Bild 3 ausgegangen. Das Kühlwasser tritt am Trassenanfang mit einer Temperatur $\Theta_{w,ein}$ in den Spalt des linken Doppelmantelrohrs ein, strömt dort bis zum Kühlabschnittsende, wo es umgelenkt und im Spalt des rechten Doppelmantelrohrs zurück zur Kühlstation geführt wird. Seine höchste Temperatur $\Delta\Theta_{w,max}$ wird es bei normalen Betriebsbedingungen am Rohranfang, unmittelbar vor Wiedereintritt in die Kühlstation haben. Für diesen Querschnitt und diese Wassertemperatur werden die nachfolgenden Berechnungen, wie beschrieben, vorgenommen.

Die Ergebnisse sind in Bild 5 zusammengestellt. Ausgegangen wird von VPE-isolierten 380-kV-Einleiterkabeln mit einem Leiterquerschnitt von 2500 mm², ausgeführt als Segmentleiter, wahlweise aus Kupfer oder aus Aluminium. Die Kabel liegen in PE-Rohren (DN 250) mit einem Achsabstand von 400 mm zueinander. Das Doppelmantelrohr hat einen Innendurchmesser von 1500 mm. Die



42009.5

Bild 5. Übertragungsleistung S eines 380-kV-VPE-Kabeldoppelsystems im Doppelmantelrohr als Funktion der höchsten Wassertemperatur $\Theta_{w,max}$



42009.6

Bild 6. Übertragungsleistung S eines 380-kV-VPE-Kabelsystems im Doppelmantelrohr zum Beispiel im $(n - 1)$ -Betrieb als Funktion der höchsten Wassertemperatur $\Theta_{w,max}$

Zwischenräume zwischen den PE-Rohren und dem Doppelmantelrohr sind mit hochwärmeleitfähigem Material mit $\lambda = 2,5 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$ verfüllt [4]. Wahlweise sind auch die Luftspalte zwischen Kabeln und PE-Rohren mit diesem Material ausgefüllt. In Bild 6 sind die entsprechenden Übertragungsleistungen für nur ein Kabelsystem zu sehen.

Bild 5 und 6 ist Folgendes zu entnehmen:

- Die heute maximal für 380-kV-Zwischenverkabelungen für ein Kabeldoppelsystem geforderten Übertragungsleistungen von $\approx 2\,300 \text{ MVA}$ können für Kabel im Doppelmantelrohr auch mit Aluminiumleitern erreicht werden. Erforderlich ist hierfür die Einhaltung einer höchsten Wassertemperatur von $< 30^\circ\text{C}$ bei PE-Rohren mit Luftspalt und von $< 40^\circ\text{C}$ bei gefüllten PE-Rohren. Mit diesen Bedingungen sind aufgrund des großen Kühlwasserquerschnitts große Kühlabschnittslängen beziehungsweise sehr niedrige Strömungsgeschwindigkeiten möglich.
- Für 380-kV-Kabel mit Kupferleitern ($2\,500 \text{ mm}^2$) sind extrem große Übertragungsleistungen von $3\,500 \text{ MVA}$ und mehr erreichbar. Eine geringere Übertragungsleistung von zum Beispiel $2\,300 \text{ MVA}$ erfordert schätzungsweise einen Kupferleiterquerschnitt von nur $\approx 1\,000 \text{ mm}^2$.
- Das Verfüllen der PE-Rohre mit hochwärmeleitfähigem Material ($\lambda = 2,5 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$) [4] ermöglicht Belastbarkeitssteigerungen um $\approx 20\%$.

- Bei Betrieb nur eines Kabelsystems (Bild 6) kann eine Übertragungsleistung von zum Beispiel $1\,800 \text{ MVA}$ auf Dauer bei Kabeln mit Kupferleitern übertragen werden. Bei Kabeln mit Aluminiumleitern gelingt dies dann, wenn die PE-Rohre verfüllt sind und eine Kühlwassertemperatur von $\approx 10^\circ\text{C}$ eingehalten wird – gegebenenfalls mit Einschränkung der Kühlabschnittslänge.

Strombelastbarkeit bei natürlicher Kühlung

Wird die Kabelanlage nach Bild 3 über längere Zeit ohne Zwangskühlung betrieben, so ergeben sich die in Bild 7 gezeigten stationären Übertragungsleistungen. Dabei betreffen die beiden Blöcke 1 und 2 den Fall, dass beide Kabeldoppelsysteme in Betrieb sind, während bei den Blöcken 3 und 4 dies nur für ein Kabeldoppelsystem der Fall ist. Zudem unterscheiden sich die Blöcke 1 und 2 beziehungsweise 3 und 4 durch das Füllmaterial im Doppelmantelrohr mit einer Wärmeleitfähigkeit von $1,0 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$ (zum Beispiel Magerbeton, Bentonite) beziehungsweise von $2,5 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$ (hochwärmeleitfähiges Rückfüllmaterial). Der angenommene Belastungsgrad beträgt $m = 0,85$.

Aus Bild 7 ergeben sich die nachstehenden Folgerungen:

- Für 380-kV-Kabel mit Kupferleitern ($2\,500 \text{ mm}^2$) sind auch ohne Zwangskühlung sehr große Übertragungsleistungen bis zu $\approx 4\,000 \text{ MVA}$

erreichbar. Für eine geringere Übertragungsleistung von zum Beispiel $2\,300 \text{ MVA}$ können auch Kabel mit Aluminiumleitern von $\approx 2\,200 \text{ mm}^2$ Querschnitt eingesetzt werden.

- Im gestörten Betrieb – ein Kabeldoppelsystem fällt aus – kann das verbleibende Doppelsystem auch ohne Zwangskühlung Leistungen bis zu $\approx 2\,300 \text{ MVA}$ übertragen.

Damit sind mit den diskutierten Phase-Splitting-Anordnungen im Doppelmantelrohr Auslegungsmöglichkeiten von 380-kV-Zwischenverkabelungen gegeben, bei denen die im ungestörten Betrieb üblicherweise geforderten Übertragungsleistungen auch ohne Kühlung beherrscht werden. Auch bei Ausfall eines Kabels beziehungsweise eines Kabeldoppelsystems kann bei entsprechender Dimensionierung die geforderte $(n - 1)$ -Leistung (zum Beispiel bis zu $\approx 2\,300 \text{ MVA}$) noch ohne Kühlung auf Dauer übertragen werden. Auch relativ geringe Überschreitungen der in Bild 7 dargestellten Übertragungsleistungen um zum Beispiel 10 bis 20 % bedeuten ein nur allmähliches Steigen der Leitertemperaturen, so dass einerseits hinreichend Zeit (Tage bis Wochen) für den $(n - 1)$ -Betrieb und andererseits auch hinreichend viel Zeit für die Inbetriebnahme der Kühlsysteme bleibt, falls diese zuvor im Standbyzustand waren. Mit voller Wirkung der Kühlanlage sind die in Bild 5 genannten Leistungen und bei Ausfall eines weiteren Kabels (im $(n - 2)$ -Fall) die Leistungen nach Bild 6 auf Dauer sicher übertragbar.

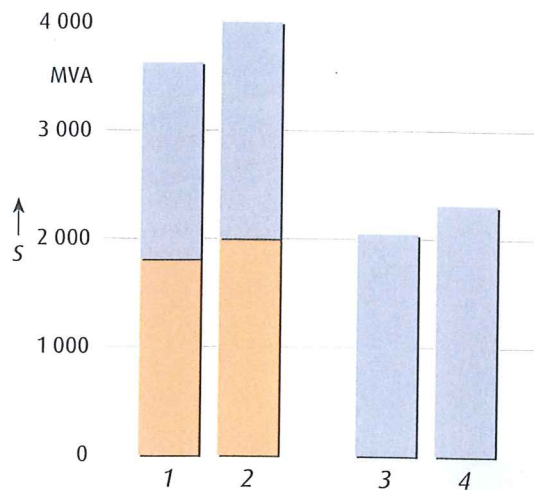


Bild 7. Belastbarkeit von Kabeln in einer Anordnung nach Bild 3 ohne Kühlung 380-kV-VPE-Kabel mit Kupfer-Segmentleitern 2500 mm² 1 + 2: beide Kabel-doppelsysteme; 3 + 4: nur ein Doppelsystem m = 0,85; Wärmeleitfähigkeiten: 1+3: 1,0/1,0; 2+4: 1,0/2,5

42009.7

Kostenschätzung		
Element	Einzelkosten	Gesamtkosten
4 Kabelsysteme einschließlich Garnituren, Einziehen, Montage	1000 €/m	4000 €/m
Leerrohre einschließlich Montage	25 €/m	300 €/m
Doppelmantelrohr, 1,6 m Außendurchmesser, halboffene Bauweise	1500 €/m	3000 €/m
Schlitten/Halterungen	50 €/m	100 €/m
Füllung mit Cable-Cem (1,0 m ³ /m je DMR)	320 €/m ³	640 €/m ³
Kühlanlage	200 €/m	200 €/m
Summe		8240 €/m

Tafel 1. Kostenschätzung einer Kabelanlage mit zwei Doppelmantelrohren entsprechend Bild 3

Wird nur ein Kabeldoppelsystem in einem Doppelmantelrohr mit autarkem Kühlkreislauf nach Bild 2 eingesetzt, so ergeben sich die folgenden Möglichkeiten:

- mit Zwangskühlung Übertragungsleistungen im Normalbetrieb für Kabel mit Kupferleitern (2500 mm²) bis zu ≈ 4000 MVA und mit Al-Leitern bis zu ≈ 3000 MVA
- mit Zwangskühlung Übertragungsleistungen im (n - 1)-Betrieb (nur ein Kabelsystem) für Kabel mit Kupferleitern von 1800 bis 2300 MVA
- ohne Zwangskühlung stationäre Übertragungsleistungen des Kabel-doppelsystems für Kabel mit Kupferleitern bis zu ≈ 2300 MVA

Zu beachten ist, dass zeitbegrenzte Übertragungsleistungen mit einer Dauer von wenigen Stunden bis Tage (für ein Redispatch im Netz) weitaus höher liegen. Damit könnte für Zwischenverkabelun-

gen mit Übertragungsleistungen bis zu ≈ 2300 MVA bei entsprechender Netzführung auch der Einsatz eines einzigen Doppelmantelrohrs mit zwei Kabelsystemen den Anforderungen entsprechen.

Magnetfelder

In Bild 8 ist die horizontale Verteilung der magnetischen Induktion B der Kabelanlagen nach Bild 2 und 3 an der Erdoberfläche dargestellt. Dabei liegt der blauen Kennlinie eine für den (n - 1)-Netzbetrieb denkbare Höchstlast von 2 × 3450 A (2 × 2271 MVA) zugrunde. Die graue Kennlinie berücksichtigt die Höchstlast im Normalbetrieb mit 60 % dieses Stroms. Die Legetiefe ist in diesem Beispiel niedrig gewählt, so dass die oberen Kabeladern der Anordnung in nur 1,50 m Tiefe liegen.

Nach Bild 8 wird der Grenzwert von 100 μT direkt oberhalb der Kabelanlage

selbst bei Höchstlast im (n - 1)-Betrieb mit ≈ 34 μT weit unterschritten. Bei Höchstlast im Normalbetrieb liegt die höchste magnetische Induktion an der Erdoberfläche bei ≈ 20 μT. Eine Größe von 1,0 μT (Vorsorgewert zum Beispiel in der Schweiz) wird in einem Abstand von ≈ 4,2 m neben der äußeren rechten Kabelader eingehalten.

Zusammenfassende Folgerung ist, dass mit den vorgeschlagenen Phase-Splitting-Anordnungen die Magnetfelder in Kabelnähe ohne zusätzliche Schirmungsmaßnahmen im Vergleich zu konventionellen Kabelanlagen sehr stark herabgesetzt werden können.

Strömungsverhältnisse

An dieser Stelle sollen kurz die Kühl- und Strömungsverhältnisse diskutiert werden. Wird die gesamte Verlustleistung der Kabel P'ges vom Kühlwasser aufgenommen, so ergibt sich eine Erwärmung je Längeneinheit von

$$\Theta'_w = \frac{P'_{ges}}{w \cdot C'_w} \quad (7)$$

mit

w Strömungsgeschwindigkeit des Wassers,

C'_w Wärmekapazitätsbelag des Wassers: C'_w = A · γ_w · c_w

A Strömungsquerschnitt,

γ_w Dichte des Wassers (≈ 1000 kg/m³) und

c_w spezifische Wärme des Wassers (≈ 4186 Ws/(kg · K)).

So folgt beispielsweise für eine geringe Strömungsgeschwindigkeit von w = 0,3 m/s und für den Höchstwert des Verlustbelags nach Abschnitt 6 von ≈ 196 W/m des Kabeldoppelsystems eine Erwärmung des Kühlwassers längs des Doppelmantelrohrs um nur ΔΘ'_w = 0,6 K/km. Die Druckdifferenz Δp lässt sich (zum Beispiel [9]) schätzen über

$$p = \frac{w^2 \cdot \gamma \cdot \lambda \cdot l}{2 \cdot d_h} \quad (8)$$

mit dem hydraulischen Ersatzdurchmesser d_h ≈ 4A/O mit

O benetzte Oberfläche

λ Reibungsbeiwert der Strömung (hier: λ ≈ 0,030).

Sie beträgt längenbezogen für Hin- und Rücklauf zusammen (Faktor 2) bei einer

Strömungsgeschwindigkeit von 0,3 m/s nur $\Delta p' = 0,27$ bar/km.

Für eine Kühlabschnittslänge von beispielsweise 5 km Länge bedeutet dies bei Höchstlast der Kabel bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,3 m/s eine erforderliche Druckdifferenz von 1,3 bar sowie eine Erwärmung des Kühlwassers um ≈ 6 K.

Ist die Kühlstation in der Mitte der Kabelstrecke installiert, so bedeutet dies, dass mit den obenstehenden Parametern bei einer Kühlstation eine Trassenlänge von 10 km überbrückt werden kann.

Wärmerückgewinnung und Gewinnung geothermischer Energie

Die Kapselung des Kabeldoppelsystems im Doppelmantelrohr nach *Bild 2* und *3* durch strömendes Kühlwasser ermöglicht es, die Kabelverluste nahezu vollständig im Kühlkreislauf aufzunehmen und in der Kühlstation abzuführen. Befinden sich Wärmeabnehmer in Trassennähe, so ist durch Wärmepumpenbetrieb der Kühlstation, das heißt Anhebung des Temperaturniveaus, eine Wärmerückgewinnung möglich. Darüber hinaus kann das Doppelmantelrohr über seine große Kontaktfläche mit dem umgebenden Erdreich diesem Wärme entziehen und somit geothermische Energie gewinnen. Der Nutzen beider Maßnahmen soll im Folgenden diskutiert werden.

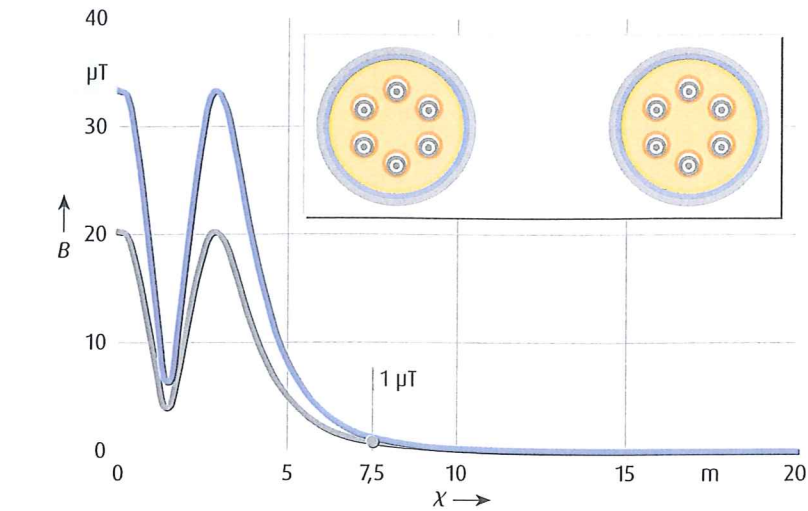
Es wird von zwei Doppelmantelrohren mit vier Kabelsystemen nach *Bild 3* ausgegangen. Die $(n - 1)$ -gesicherte Leistung beträgt 2 271 MVA (3 450 A), das heißt, es kann von einer Höchstlast im ungestörten Betrieb von 2 070 A je Kabeldoppelsystem ausgegangen werden. Dies entspricht einem Höchstwert der Stromwärmeverluste von ≈ 67 W/m je Kabeldoppelsystem.

Werden diese Verluste noch mit einem Arbeitsverlustfaktor (= Verlustmittelwert) von 0,30 gewichtet und die dauernd anstehenden dielektrischen Verluste der Kabel hinzugerechnet, so ergibt sich ein Zeitmittelwert des Kabelverlustbelags je Doppelmantelrohr von

$$P'_{ges} = (0,30 \cdot 67 + 21) \text{ W/m} = 41 \text{ W/m} \quad (9).$$

Werden hiervon 75 % genutzt, so liefern die Kabel im Mittel einen Leistungsbelag von ≈ 31 W/m.

Das Doppelmantelrohr mit einer Wanddicke von 100 mm entzieht dem Boden bei $\lambda = 1,50$ W/(K · m) in Abhängigkeit von der mittleren Kühlwassertemperatur Θ_w die folgenden Leistungen:



42009.8

Bild 8. Horizontale Verteilung der magnetischen Induktion B der Kabelanlagen nach *Bild 3* an der Erdoberfläche; $h = 1,50$ m (obere Kabeladern); $s_c = 0,40$ m blau: $2 \cdot 3450$ A; grau: $0,6 \cdot 2 \cdot 3450$ A = $2 \cdot 2070$ A

$\Theta_w = 10,0$ °C	26,4 W/m
7,5 °C	40,0 W/m
5,0 °C	52,8 W/m.

Wird dem Boden eine Leistung von 30 W/m entzogen, die im Zeitmittel zur Hälfte genutzt wird, so beträgt die mittlere geothermisch gewonnene Leistung je Doppelmantelrohr ≈ 15 W/m. Insgesamt beträgt dann die an der Kühlstation verfügbare, mittlere gewonnene Leistung $P_q = 46$ W/m. Wird diese Leistung mit der Kühlanlage auf eine höhere Nutztemperatur gehoben (Wärmepumpe), so ist hierfür bei einer angenommenen Leistungsziffer von 4,0 eine elektrische Leistung von $\approx 15,3$ W/m erforderlich. Insgesamt steht dem Wärmeabnehmer eine mittlere Leistung von 61,3 W/m zur Verfügung. Für zwei Doppelmantelrohre nach *Bild 3* mit vier Kabelsystemen bedeutet dies einen insgesamt an der Kühlstation verfügbaren thermischen Leistungsbelag von 123 kW/km.

Werden als Beispiel Einfamilienhäuser mit 150 m² Wohnfläche und einem mittleren Wärmebedarf von jeweils 1,5 kW betrachtet, so bedeutet dies, dass eine Kabelanlage nach *Bild 3* entlang einer Trassenlänge von 1 km rund 82 Häuser thermisch versorgen könnte. Bei langfristiger Abschaltung aller Kabel ginge diese Zahl allerdings auf rund 27 Häuser zurück. Für diesen Fall wie auch zur Deckung des thermischen Spitzenbedarfs müssen Zusatzeinrichtungen, wie Erdwärmespeicher, vorgesehen werden.

Mit einem internen Zinssatz von $p = 5$ %, Kosten je kWh von $K'_v = 0,065$ €/kWh und einer Teuerungsrate der Energiekosten von $t_v = 2$ % ergibt sich im Beispiel über 30 Jahre gerechnet (Barwertfaktor von 19,75) ein mit zwei Doppelmantelrohren gewonnener Energieertrag von 1,035 Mio. €/km.

Kostenschätzung

Im Folgenden sollen für die zuvor diskutierte Kabelanlage mit vier 380-kV-Kabelsystemen ($4 \times 3 \times 1 \times 2$ 500 RMS Al) in zwei Doppelmantelrohren und einer $(n - 1)$ -gesicherten Leistung von 2 271 MVA (3 450 A) die Kosten grob geschätzt werden. Die Kosten werden mit der typischen Auslegung einer Enlag-Trasse mit zwei Kabelgräben mit jeweils ≈ 8 m Breite verglichen, bei der die Grabenkosten insgesamt – zum Beispiel mit Leerrohren – nach heutigen Erfahrungen auf ≈ 2000 €/m geschätzt werden können. Hierbei werden vier 380-kV-VPE-Kabelsysteme mit Kupfer-Segmentleitern ($4 \times 3 \times 1 \times 2$ 500 RMS Cu) eingesetzt. Damit ergibt sich für den offenen Kabelgraben ohne Kühlung eine Gesamtsumme – ohne Übergangs- und Sonderbauwerke – von 8 400 €/m.

Dies wird verglichen mit einer Kabelanlage mit zwei Doppelmantelrohren entsprechend *Bild 3*, wobei aufgrund der möglichen Zwangskühlung auf 380-kV-VPE-Kabel mit Aluminiumleitern ($4 \times 3 \times 1 \times 2$ 500 RMS Al) übergegangen werden kann. Es wird von zwei Doppelmantelrohren mit einem Außendurchmesser von $\approx 1,6$ m ausgegangen, die

mit einem lichten Abstand von 2 m zueinander in halboffener Bauweise gelegt werden (*Tafel 1*) [6].

Hieraus lässt sich eine Gesamtsumme der Kabelanlage von 8 240 €/m errechnen, die erstaunlicherweise günstiger ist als die verglichene konventionelle Kabeltrasse mit offener Bauweise. Können zudem die beschriebenen Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung und der geothermischen Energiegewinnung genutzt werden, so reduzieren sich diese Kosten durch den kapitalisierten Energiegewinn. Zusätzlichen Aufwendungen für die Einrichtungen einer solchen geothermischen, wärmerückgewinnenden Energiequelle sind den Einsparungen an Einrichtungen zur Gebäudebeheizung gegenüberzustellen.

Fazit

Aus den vorangegangenen Ausführungen lassen sich die folgenden Vorteile der beschriebenen Ausführung von Kabelanlagen mit Doppelmantelrohren ableiten:

- Es werden während der Bauphase nur zwei schmale Kabelgräben (≈ 1 m Breite) für den Aushub benötigt.
- Bei halboffener Bauweise können die Kosten geringer sein als bei konventioneller Bauweise im offenen Kabelgraben. Die Arbeitsgeschwindigkeit beim Einrichten der Kabeltrasse ist mit bis zu ≈ 100 m/d sehr hoch.
- Die Doppelmantelrohre bieten den Kabeln einen sehr guten mechanischen Schutz.
- Aufgrund dessen darf die Trasse auch in Kabelnähe beliebig bepflanzt werden. Eine landwirtschaftliche Nutzung oberhalb der Kabel wird nicht beeinträchtigt.
- Kabelfehler können durch Austausch einer Kabellänge von den Muffenstellen her beseitigt werden.
- In sensiblen Gebieten können die Doppelmantelrohre im geschlossenen Bohrverfahren (in nahezu beliebiger Tiefe) unter Nutzung von Infrastruktur wie Straßen, Wegen, Gleiskörpern, das heißt gegebenen-

falls ohne zusätzlichen Trassenbedarf, eingebracht werden.

- Durch die Möglichkeit der Zwangskühlung sind auf Dauer extreme Übertragungsleistungen möglich.
- Die Zwangskühlung bietet zudem die nachhaltige Möglichkeit der Wärmerückgewinnung und der geothermischen Energiegewinnung.
- Durch die Phase-Splitting-Anordnung der Kabel im Doppelmantelrohr wird das Magnetfeld in Trassennähe spürbar herabgesetzt.

Noch nicht berücksichtigt wurden hier die weiteren Möglichkeiten einer Power-Tubes-Auslegung, bei der durch Berücksichtigung von Reserveadern und deren schneller Umschaltbarkeit an den Übergangsportalen zur Freileitung die Verfügbarkeit der Kabelanlagen weiter verbessert werden kann.

Die beschriebene Auslegung von Kabelanlagen in Doppelmantelrohren bietet somit umweltschonende, nachhaltige Varianten zum Netzausbau mit minimalem Trassenbedarf.

Literatur

[1] Brakelmann, H.; Stein, D.; Stein, R.: Energiekabel mit Kühlung. Deutsche Patentanmeldung 10 2012 100 917.1.

[2] Brakelmann, H. Teilverkabelungen im voralpinen und alpinen Raum. Studie im Auftrag der APG, Wien, 2012, www.salzburg.gv.at/20006bek/380kVLeitung/UVE-C/01_UVE-FB%20Techn%20Alternative.

[3] Philippow, E.: Grundlagen der Elektrotechnik. Hüthig-Verlag, Heidelberg, 1989.

[4] Brakelmann, H.; Böing, R.; Dietrich, J.; May, H.-P.: Powercrete und Cable-Cem – technische und wirtschaftliche Perspektiven. ew Jg. 110 (2011), H. 15-16, S. 64 – 71.

[5] Brakelmann, H.; May, H.-P.: A new backfill material with an extremely high thermal conductivity. Jicable, Versailles/ Frankreich, Juni 2011, Paper no. 0060.

[6] Brakelmann, H.; Stein, D.; Stein, R.; Wasch, V.: Power-Tubes – Innovatives Kabel- und Installationssystem. ew Jg. 110 (2011), H. 25-26, S. 74 – 81.

[7] IEC 60287: Calculation of the continuous current rating of cables (100% load factor). Amendment 3 to IEC-publ. 60287, Cigré-Report, Mai 2009.

[8] Heinhold, L.; Stubbe, R.: Kabel und Leitungen für Starkstrom. Siemens AG, Berlin/München, 1969.

[9] Brakelmann, H.: Belastbarkeiten der Energiekabel – Berechnungsmethoden und Parameteranalysen. VDE-Verlag, 1985.

[10] Anders, G. J.: Rating of electric power cables. IEEE Press, New York/USA, 1997.

[11] Brakelmann, H.: Kabel im Doppelmantelrohr. Interne Studie der nkt cables GmbH, Köln/Rheinberg, August 2013.

[12] Brakelmann, H.: Energietechnik programmiert. VDE-Verlag, 1989.



Prof. Dr.-Ing. habil. Heinrich Brakelmann, Professor im Fachgebiet Energietransport und -speicherung, Universität Duisburg-Essen, Duisburg



Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Stein, Geschäftsführer, Prof. Dr.-Ing. D. Stein & Partner GmbH, Bochum



Dr. rer. nat. Volker Wasch, Leiter Entwicklung Kabelsysteme, nkt cables GmbH, Köln

>> heinrich.brakelmann@uni-due.de
volker.waschk@nktcables.com

>> www.ets.uni-due.de
www.nktcables.de

42009

Anzeige

Newsletter
”WASSERSTOFF, BRENNSTOFFZELLE + ELEKTROMOBILITÄT”



Nachrichten, Informationen, Meinungen und Märkte – Woche für Woche aktuell und auf den Punkt!

Abonnieren Sie den Online-Newsletter ”WASSERSTOFF, BRENNSTOFFZELLE + ELEKTROMOBILITÄT” unter <http://www.energie.de/bsznewsletter> und behalten Sie die Branche im Blick!