Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 91 (2000)

Heft: 15

Artikel: Kühlung von Kabelkreuzungen durch Belüftungsrohre

Autor: Brakelmann, Heinrich

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855576

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Kühlung von Kabelkreuzungen durch Belüftungsrohre

Die Strombelastbarkeit von Energiekabeln wird durch die thermischen Verhältnisse in der Kabeltrasse massgeblich bestimmt. Entscheidend sind hierbei oft die «Hot Spots», die thermisch ungünstigsten Bereiche der Trasse, beispielsweise Kreuzungen mit anderen Kabeln oder mit anderen wärmeabgebenden Systemen. Im Folgenden werden Belüftungsmassnahmen untersucht, die eine selbsttätige Luftumwälzung ergeben, und eine Berechnungsmethode wird erarbeitet.

Adresse des Autors
Prof. Dr.-Ing. *Heinrich Brakelmann*
Elektrische Energieübertragung, Gerhard-Mercator-Universität, Gesamthochschule Duisburg, D-47048 Duisburg

Günstig wirkt sich in kritischen Bereichen die Wärmeabfuhr über metallene Kabelaufbauelemente aus, wie dies in [1] und [2] für Kabelkreuzungen gezeigt wurde. Allerdings reicht diese longitudinale Wärmeabfuhr nicht aus, wenn die Kabel für die normale Trasse ausgelegt sind und voll ausgelastet werden, da dann schon ausserhalb des Kreuzungsbereichs die höchstzulässige Leitertemperatur auftritt.

In solchen Situationen müssen zusätzliche Massnahmen zur Ertüchtigung der Kabeltrasse ergriffen werden, wie sie in [3] bis [5] beschrieben sind. In Frage kommen

- vergrösserte Legeabstände
- eine bereichsweise thermische Stabilisierung
- der Bau eines Schachtes [3] oder
- der Einsatz von aktiven oder passiven Kühlsystemen, zum Beispiel von «Heatpipes» [5].

Ein für Tunnel formulierter Vorschlag einer autarken Luftumwälzung [4] wird so aufgegriffen, dass im Bereich der Kabelkreuzung Rohre gelegt werden, die an den Bereichsenden zur Erdoberfläche geführt und dort offen sind, d.h. im Austausch mit der Umgebungsluft stehen. Durch die auftretenden Temperaturgradienten längs des Kabelgrabens wird eine selbständige Luftumwälzung und damit ein Kühleffekt erreicht. Es wurde eine Berechnungsmethode erarbeitet, mit der die Wirksamkeit dieser Massnahme untersucht werden kann.

Anordnung

Es wird von einer Anordnung nach Bild 1 ausgegangen: das betrachtete Kabelsystem 1 liegt in der Legetiefe h_{v1} und wird gekreuzt von einem Kabelsystem 2 in der Legetiefe h_{v2}. Zur Kühlung werden parallel zu Kabel 1 eines oder mehrere Rohre gelegt, die an den Abschnittsenden zur Erdoberfläche hochgeführt sind, was in einem gemeinsamen, im Querschnitt entsprechend vergrösserten Rohr geschehen kann. Es wird vorausgesetzt, dass der linke vertikale Rohrabschnitt an der Erdoberfläche und der rechte vertikale Rohrabschnitt in der Auslasshöhe h_z über der Erdoberfläche endet.

Kabel 1 wird als 110-kV-Einleiter-VPE-Kabel mit einem Leiterquerschnitt von 1000 mm² angenommen, dessen Adern in einer Tiefe von 1,5 m mit einem Achsabstand von 0,4 m flach verlegt sind. Es hat eine höchstzulässige Leitertemperatur von 90 °C und weist bei VDE-Standardbedingungen (spezifische Wärmewiderstände von 1,0 K·m/W für feuchten bzw. 2,5 K·m/W für ausgetrockneten Erdboden; Bodentemperatur 20 °C) eine Dauerbelastbarkeit von 1007 A (192 MVA) auf.

Kabel 2 ist ein 10-kV-Einleiter-VPE-Kabel mit einem Leiterquerschnitt von 500 mm², dessen Adern in einer Tiefe von 1,0 m gebündelt verlegt sind. Die Belastbarkeit dieses Kabels ergibt sich für zyklische Last (Belastungsgrad $m = 0{,}7$; Verlustfaktor $\mu = 0{,}553$) zu 723,4 A (12,5 MVA) bei einem Gesamtverlustbelag von $P_2' = 86{,}3$ W/m. Es wird vor-

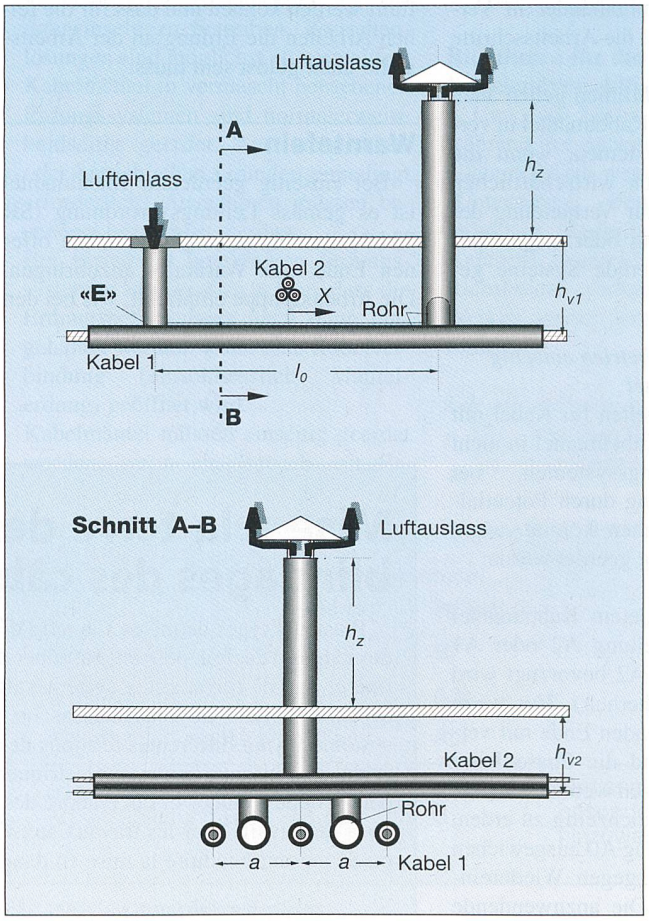

Bild 1 Hochspannungkabelanlage im Bereich einer Kabelkreuzung, mit zwei belüfteten Kühlrohren parallel zu Kabel 1
Kabel 1: 110-kV-Einleiter-VPE-Kabel; Kupferleiterquerschnitt 1000 mm²
Kabel 2: 10-kV-Einleiter-VPE-Kabel; Kupferleiterquerschnitt 500 mm²

ausgesetzt, dass Kabel 2 im zeitlichen Mittel nur 60% dieses Verlustbelags abgibt. Da der charakteristische Durchmesser des Tageslastzyklus mit rund 20 cm erheblich kleiner ist als der Abstand zwischen den Kabelsystemen [3, 6], «sieht» Kabel 1 nur den Konstantanteil des Verlustbelags von Kabel 2, mithin

$$\bar{P}_2 = 0{,}6 \cdot \mu \cdot 86{,}3\ \text{W/m} = 28{,}6\ \text{W/m} \qquad (1)$$

Der aus diesem Verlustbelag folgende Anstieg $\Delta\Theta_{1,2}$ der Oberflächentemperatur von Kabel 1 ist in Bild 2 wiedergegeben; er beträgt maximal rund 18 K. Diese Zusatzerwärmung bewirkt durch die Temperaturabhängigkeit der ohmschen Verluste eine Vergrösserung des Verlustbelags von Kabel 1, so dass bei Volllast des Kabelsystems 1 (1007 A) seine Leitertemperaturen im Kreuzungsbereich (bei Vernachlässigung longitudinaler Wärmeflüsse) auf etwa 115 °C ansteigt, was zur Zerstörung des Kabels führen kann. Zur Einhaltung der höchstzulässigen Leitertemperatur von 90 °C erzwingt die Kabelkreuzung eine Belastbarkeitsreduktion von Kabel 1 um rund 10%.

Zur thermischen Entlastung dieses kritischen Bereichs seien parallel zu den Kabeln Kühlrohre gelegt. Um bei ausreichendem Kühleffekt den anlagentechnischen Aufwand möglichst gering zu halten, wurde aus der Vielzahl möglicher Varianten unterschiedlicher Zahlen und Legegeometrien von Kühlrohren eine Anordnung nach Bild 1 gewählt, bei der zwei Kühlrohre symmetrisch zwischen die Kabeladern gelegt werden.

Berechnung

Im untersuchten Bereich erwärmen die verlustbehafteten Kabelsysteme ihre Umgebung und damit auch die Luft in den benachbarten Kühlrohren. Wird durch eine Störung der Symmetrie, z.B. durch Windeinwirkung am linken Lufteinlass, die Luftsäule eines Kühlrohres in Bewegung gesetzt und damit erwärmte Luft in das rechte senkrechte Rohrende geschoben, so stehen sich links und rechts des Abschnitts zwei senkrechte Luftsäulen unterschiedlicher Temperatur und damit unterschiedlicher Dichte gegenüber. Der Schwerkraftunterschied führt zu einer Verstärkung der eingeleiteten Luftbewegung, bis schliesslich eine stationäre Luftumwälzung erreicht wird. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass die in einem Rohr mit konstanter Geschwindigkeit bewegte Luft längs des Kühlabschnitts um eine Temperaturspanne $\Delta\Theta$ erwärmt wird, so dass der linken vertikalen Luftsäule mit der Eintrittstemperatur Θ_{ein} die rechte Luftsäule mit der Temperatur $\Theta_{aus} = \Theta_{ein} + \Delta\Theta$ gegenübersteht. Die entstehenden Dichte- bzw. Gewichtsunterschiede der Luftsäulen und die hierdurch bewirkte Druckdifferenz können nach [7] und [8] berechnet werden. Für diese Druckdifferenz massgebend ist die Längendifferenz der vertikalen Luftsäulen und damit die Auslasshöhe h_z über Erdniveau (Bild 1).

Diese Druckdifferenz bewirkt eine Strömung der Luft mit einer nach [9] berechenbaren Geschwindigkeit, wobei der Reibungsbeiwert γ der Luftströmung nach [10] mit dem dort tabellierten Materialfaktor f_M oder aber, mit nur geringfügig abweichenden Ergebnissen, nach [11] bestimmt werden kann.

Somit kann die Strömungsgeschwindigkeit der Luft in den Kühlrohren ermittelt werden, wenn sowohl die Lufteintritts- als auch die Luftaustrittstemperatur vorgegeben werden. Allerdings sind zu Beginn der Berechnung weder diese Temperaturen noch die längs der Strecke von der strömenden Luft aufgenommenen Wärmemengen oder ihre Temperaturverteilung bekannt, so dass iterativ gerechnet werden muss.

Prinzipiell werden sich Verteilungen der Leitertemperatur Θ_L ergeben, wie sie in Bild 2 wiedergegeben sind: im Bereich des Lufteintritts wird die Leitertemperatur auf ihren niedrigsten Wert gekühlt. Links und rechts ausserhalb des gekühlten Bereichs der Länge l_0 wird sich die Leitertemperatur mit zunehmendem Abstand der im sonstigen Trassenbereich herrschenden höchstzulässigen Temperatur $\Theta_{L,max}$ anpassen. Nach [1, 2] gehorchen diese Übergangsbereiche der Differentialgleichung (2)

$$\theta_L - \frac{1}{\alpha^2}\, d^2\theta_L / dx^2 = \theta_{L,U}(x) \qquad (2)$$

wobei der Ausbreitungskoeffizient α von den transversalen (inneren und äusseren) Wärmewiderstandsbelägen des Kabels, dem longitudinalen Wärmewiderstandsbelag des Kabelleiters und vom temperatur- und ortsabhängigen Leiterverlustbelag abhängt. Das Lösungsverfahren zu Formel (2) ist ausführlich in [1, 2] beschrieben.

Im vorliegenden Beispiel beträgt der Längs-Wärmewiderstandsbelag des Leiters von Kabel 1 $T_{L1}' = 2{,}53$ K/(Wm), und der Ausbreitungskoeffizient ergibt sich zu $\alpha_1 = 0{,}839 \cdot (1/\text{m})$. Die allgemeine Lösung der Formel (2) ist (3)

$$\theta_L(x) = \theta_C + A \sinh(\alpha x) + B \cosh(\alpha x) \qquad (3)$$

woraus sich beispielsweise für den linken Übergangsbereich ($x \leq 0$ m) die Funktion (4)

$$\theta_L(x) = \theta_{L,max} - (\theta_{L,max} - \theta_E)\, e^{\alpha x} \quad \text{mit } x \leq 0\,\text{m} \qquad (4)$$

ergibt (Bild 2).

Im luftgekühlten Bereich l_0 soll der longitudinale Wärmefluss über den Leiter von Kabel 1 zur Vereinfachung der Berechnung gegenüber dem longitudinalen Wärmefluss des Kühlmediums vernachlässigt werden. Dies ist eine Näherung auf der sicheren Seite und erfasst den Fall, dass das betrachtete gekreuzte 110-kV-Kabel einen geringen Leiterquerschnitt aufweist. Der Wärmefluss längs der Leiter wird nur dahingehend berücksichtigt, dass im Laufe der iterativen Berechnung die auf den Punkt niedrigster Leitertemperatur (Punkt E in Bild 2) von

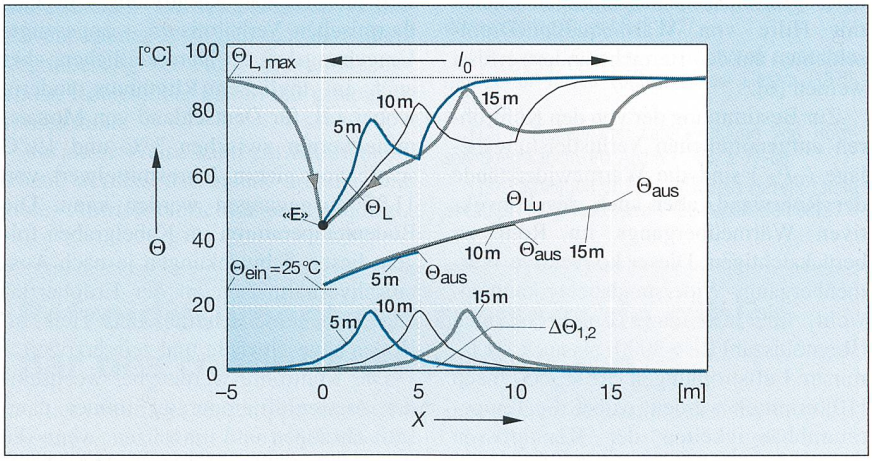

Bild 2 Temperaturverteilungen im Kreuzungsbereich für eine Anordnung nach Bild 1 mit

Θ_L Leitertemperatur (mittlere Ader von Kabel 1)
Θ_{Lu} Lufttemperatur
$\Theta_{1,2}$ Erwärmung von Kabel 1 durch das kreuzende Kabel 2

Lufteintrittstemperatur Θ_{ein} = 25 °C; Auslasshöhe h_z = 0 m; Kennlinien-Parameter sind die Kühlabschnittslängen l_0 = 15 m; 10 m; 5 m; zwei Parallelrohre (d_i = 100 mm; d_a = 120 mm); Laststromkabel 1: 1007 A (Belastungsgrad m = 1,0); Laststromkabel 2: 560 A (Belastungsgrad m = 0,75)

beiden Seiten über die Leiter zufliessenden Leistungen von den Kabeln zusätzlich nach aussen abgegeben werden müssen und teils der Umgebung, teils aber auch der einströmenden Kühlluft zugeführt werden. Im Beispiel der Bilder 1 und 2 weist die einströmende Luft daher am Punkt E ($x=0$) eine gegenüber der Eintrittstemperatur $\Theta_{ein} = 25\,°C$ etwas erhöhte Temperatur Θ_E auf.

Nach Bestimmung von Θ_E wird zunächst eine Temperaturdifferenz zwischen Lufteintritt und -austritt angenommen und aus dieser die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt. Ähnlich wie bei dem in [12] beschriebenen Verfahren für die indirekte Wasserkühlung von Kabeln wird nun der betrachtete Kühlabschnitt l_0 in eine hinreichend grosse Zahl von Unterabschnitten unterteilt. Vom Abschnittsanfang (Lufttemperatur Θ_E) fortschreitend, wird für jeden Unterabschnitt eine thermische Feldberechnung des Trassenquerschnitts vorgenommen, deren vorgegebene Eingangsgrössen die Lufttemperaturen in allen Kühlrohren und die (temperaturabhängigen) Kabelverluste sind und als deren Ergebnis man

- die Temperaturen im Trassenquerschnitt, so auch die Leitertemperaturen aller Kabeladern, sowie
- die von den Kühlrohren aufgenommenen Verlustleistungsbeläge

erhält. Dieses Feldberechnungsverfahren beruht auf der Ersatzquellenmethode; es stellt Kabel und Kühlrohre durch jeweils acht Linien-Wärmequellen in ihrem Inneren dar und berücksichtigt über einen Wärmeleitpotentialansatz das nichtlineare Bodenverhalten der partiellen Bodenaustrocknung; thermisch stabilisierte Bereiche im Kabelgraben können mit Hilfe von Wärmequellen-Dipolschichten auf den Bereichsrändern erfasst werden [6].

Zur Bestimmung der von den Kühlrohren aufgenommenen Verlustleistungsbeläge ($-P_R'$) sind die Wärmewiderstände der Rohrwand, aber auch des konvektiven Wärmeübergangs im Rohr zu berücksichtigen. Dieser konvektive Wärmeübergangs-Widerstandsbelag kann sowohl für turbulente Luftströmungen (Reynoldszahl Re > 3000) als auch für laminare Luftströmungen (Re < 3000) nach [10] ermittelt werden, wobei die Temperaturabhängigkeiten der Kenngrössen von Luft, nämlich Wärmeleitfähigkeit, kinematische Zähigkeit und spezifische Wärme, in dem entwickelten Berechnungsprogramm entsprechend [8] berücksichtigt werden.

Aus dem berechneten Verlustleistungsbelag P_{Ri}' eines Rohres i kann dann die Erwärmung $\Delta\Theta_i$ (x) der Luft längs des betrachteten Unterabschnitts der Länge Δx mit (5)

$$\Delta\Theta_i(x) = P_{Ri}' \cdot \Delta x \Big/ \left[\frac{\pi}{4} d_i^2 \cdot \rho_{Lu} \cdot c_{Lu} \cdot w\right] \quad (5)$$

bestimmt werden, um im nächsten Trassenabschnitt die neuen Lufttemperaturen mit (6)

$$\Theta_i(x+\Delta x) = \Theta_i(x) + \Delta\Theta_i(x) \quad (6)$$

als Eingangsgrössen für die nächste Feldberechnung zu verwenden. Weitere Eingangsgrössen der jeweiligen Feldberechnung sind die in den Kabeladern auftretenden Verluste, die in jedem Trassenquerschnitt temperaturabhängig bestimmt werden. (Zur Berechnung aller Verluste sowie der Wärmewiderstände von Kabeln und ihrer Umgebung sei z.B. auf [13], [3] und [6] verwiesen.)

Am Abschnittsende erhält man jeweils die Temperaturdifferenz $\Delta\Theta_{ges} = \Sigma\Delta\Theta_i$ längs eines Kühlrohres, aus der erneut die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt und mit der zuvor angenommenen verglichen wird. Dieser Rechenablauf wird bis zu einer hinreichend guten Übereinstimmung von angenommener und berechneter Strömungsgeschwindigkeit wiederholt.

Ergebnisse

Die beschriebene Berechnungsmethode und die im Folgenden angegebenen Ergebnisse gehen von Dauerlastverhältnissen und damit auch von gleichbleibenden Randbedingungen aus. Dies ist gegenüber den tatsächlichen Verhältnissen in der betrachteten Anlage eine grobe, aber sichere Näherung. So wird sich die von den Kühlrohren – je nach thermischen Verhältnissen – angesaugte Umgebungsluft im jahreszeitlichen, aber auch im täglichen Rhythmus ändern, wobei z.B. für Deutschland von Monatsmittelwerten zwischen 3 °C und 19 °C sowie von einem Jahresmittelwert von 11 °C ausgegangen werden kann. Die Bodentemperaturen im Kabelgraben folgen diesen Schwankungen je nach Austauschverhältnissen an der Erdoberfläche, Bodeneigenschaften und Tiefe im Boden abgeschwächt und zeitverzögert.

Die Kühlrohre werden bei wechselnder Aussenlufttemperatur immer dann Luft ansaugen und umwälzen, wenn die Aussenluft kühler ist als die Umgebung der Kühlrohre im Kabelgraben, d.h. selbst wenn die Kabelsysteme nur schwach belastet sind und nur geringe Verluste abgeben, sorgt die Aussenluft für eine Kühlung des Kreuzungsbereichs, solange ihre Temperatur niedrig genug bleibt bzw. der Boden hinreichend vorgewärmt ist. Eine vollständige Beschreibung des thermischen Verhaltens dieser Anlage erfordert daher die Berücksichtigung der zeitabhängigen, dreidimensionalen und nichtlinearen Feldverhältnisse, bei der unterschiedliche Situationen der jahres- und tageszeitlichen Entwicklungen sowohl der Kabelbelastung als auch der Temperaturen von Aussenluft und Boden untersucht werden müssen.

Darauf wird jedoch hier zugunsten einer Abschätzung der Möglichkeiten einer solchen Anlage zur sicheren Seite hin verzichtet. Beispielsweise kann die Dauerbelastbarkeit des Kabels 1 als anstehende Höchstlast bei gleichzeitig konstanter Beeinflussung durch Kabel 2 zeitgleich mit den höchstmöglichen Aussenluft- und Bodentemperaturen betrachtet werden. Zusätzlich wird vorausgesetzt, dass diese ungünstigen Verhältnisse lange Zeit anstehen, die Kabelumgebung also nicht durch die vorangegangenen Kühlphasen vorgekühlt in diese Höchstlastsituation eintritt.

Für die getroffenen Voraussetzungen und die in Bild 1 gegebene Anordnung mit zwei Kühlrohren zeigt Bild 2 die im Kreuzungsbereich auftretenden Verteilungen

- der Leitertemperatur Θ_L (mittlere Kabelader),
- der Kühllufttemperaturen Θ_{Lu} sowie
- der durch das kreuzende Mittelspannungskabel an der Oberfläche von Kabel 1 bewirkten Erwärmung $\Delta\Theta_{1,2}$,

wobei eine Lufteintrittstemperatur von $\Theta_{ein} = 25\,°C$ und unterschiedliche Kühlabschnittslängen von $l_0 = 15$ m, 10 m und 5 m betrachtet werden. Die Luft verlässt in diesen Beispielen das Kühlsystem auf Erdniveau, d.h. die Auslasshöhe nach Bild 1 ist $h_z = 0$ m.

Deutlich wird, dass bei einer höchsten Lufteintrittstemperatur von 25 °C und einem Rohrinnendurchmesser von 100 mm die durch die normalen Trassenverhältnisse vorgegebene Dauerbelastbarkeit (1007 A) des Kabels 1 schon bei der Auslasshöhe $h_z = 0$ m im Kreuzungsbereich nicht zu einer unzulässigen Erwärmung des Kabels führt. Dabei reicht schon eine geringe Kühlrohrlänge von beispielsweise $l_0 = 5$ m für diese Massnahme aus.

Für eine Kühlabschnittslänge von l_0 = 10 m (bei denselben Rohrabmessungen) zeigt Bild 3 die Abhängigkeit der Leitertemperaturverteilungen von der Lufteintrittstemperatur Θ_{ein}. Selbst eine extreme, an heissen Sommertagen kurzzeitig auftretende Lufttemperatur von $\Theta_{ein} = 35\,°C$ würde, wenn sie dauernd anstünde, gerade zum Erreichen der höchstzulässigen

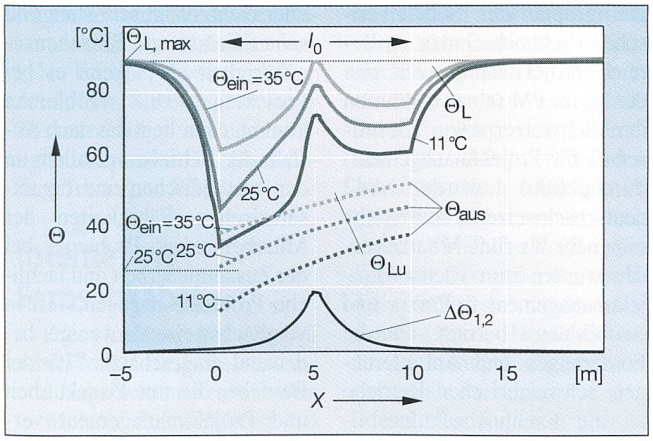

Bild 3 Temperaturverteilungen im Kreuzungsbereich für eine Anordnung nach Bild 1 für unterschiedliche Luft-Eintrittstemperaturen Θ_{ein}

Kühlabschnittslänge l_0 = 10 m; sonstige Parameter wie in Bild 2

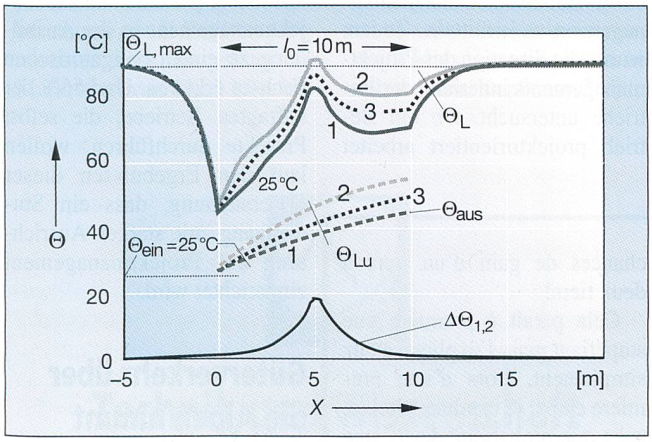

Bild 4 Temperaturverteilungen im Kreuzungsbereich für eine Anordnung nach Bild 1 für unterschiedliche Rohrinnendurchmesser d_i

1: Rohrinnendurchmesser 100 mm; 2, 3: Rohrinnendurchmesser 70 mm; 1, 2: Auslasshöhe h_z = 0 m; 3: Auslasshöhe h_z = 2,5 m; Kühlabschnittslänge l_0 = 10 m; Luft-Eintrittstemperatur Θ_{ein} = 25 °C; sonstige Parameter wie in Bild 2

Leitertemperatur im Kreuzungsbereich führen.

Legt man hingegen das Jahresmittel der Lufttemperatur als Eintrittstemperatur (Θ_{ein} = 11 °C) zugrunde, so verdeutlicht die untere Kennlinie (dick; durchgezogen) in Bild 3, wie stark der Kreuzungsbereich durch das Kühlsystem thermisch entlastet wird.

Den Einfluss des Kühlrohr-Innendurchmessers und der Luftauslasshöhe h_z soll Bild 4, wieder für eine Kühlabschnittslänge von l_0 = 10 m, verdeutlichen. Die Lufteintrittstemperatur beträgt, wie in Bild 2, Θ_{ein} = 25 °C. Wird der Kühlrohr-Innendurchmesser von 100 mm auf 70 mm verringert, überschreitet für das gewählte Beispiel die Leitertemperatur im Kreuzungsbereich geringfügig ihre höchstzulässige Grösse (Kennlinie 2). Wird für dieselben Kühlrohre die Luftauslasshöhe auf h_z = 2,5 m vergrössert, so ergibt sich die Leitertemperatur-Verteilung nach Kennlinie 3. Demnach können auch erheblich dünnere Kühlrohre als in den vorangegangenen Beispielen verwendet werden, wenn eine solche Auslasshöhe der erwärmten Luft vorgesehen werden kann.

Folgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass es zur Verstärkung thermisch kritischer Kreuzungsbereiche in Kabeltrassen wirkungsvoll ist, Kühlrohre parallel zu den Kabeln zu legen. Werden diese Kühlrohre an den Bereichsenden zur Erdoberfläche hochgeführt, so bewirkt der Temperatur- und Dichteunterschied der beiden senkrechten Luftsäulen eine Luftumwälzung, solange die Aussenlufttemperatur niedriger ist als die Rohrtemperatur in der thermisch belasteten Kabeltrasse. Selbst bei sommerlichen Lufttemperaturen ergibt sich ein spürbarer Kühleffekt, der durch Vergrösserung der Höhe des luftauslassenden Rohres über Erdniveau gesteigert werden kann.

Auf diese Weise kann ein Kühlsystem gebaut werden, das autark arbeitet und keine Antriebseinrichtungen benötigt. Dieses Kühlsystem entzieht dem Kabelgraben auch in Schwachlastzeiten Wärme, wodurch sich Temperaturreserven auch für den Überlastfall bzw. für extreme hochsommerliche Lufttemperaturen ergeben.

Die vorliegenden Untersuchungen bieten unter vereinfachenden Dauerlast-Randbedingungen die Möglichkeit, einen Anlagenentwurf auf der sicheren Seite vorzunehmen. Es ergeben sich vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich Zahl und Anordnung der Kühlrohre und ihrer Abmessungen sowie der Länge des Kühlabschnitts. Die Auslegung eines solchen Kreuzungsbereichs hat sich daher an den konkreten Vorgaben der Kabeltrasse zu orientieren.

Literatur

[1] *H. Brakelmann:* Belastbarkeitsberechnung für Kreuzungen von Kabeltrassen. etz-Archiv (1984) S. 9–16.

[2] *G. Anders, H. Brakelmann:* Cable Crossings – Derating Considerations. IEEE Trans. on Power Del. (1998). Part 1: Derivation of Derating Equations, pp. 709–714; Part 2: Example of Derivation of Derating Curves, pp. 715–720.

[3] *L. Heinhold:* Kabel und Leitungen für Starkstrom. Siemens AG, Berlin/München, 1987.

[4] *B. M. Weedy:* Thermal design of underground systems. J. Wiley & Sons, New York, 1988

[5] *Z. Iwata, S. Sakuma, M. Dam-Anderson, E. Jacobsen:* Heat pipe local cooling system. IEEE Trans. on Power Del.(1992) S. 767–775.

[6] *H. Brakelmann:* Belastbarkeiten der Energiekabel. VDE-Verlag, Berlin/Offenburg, 1985.

[7] *H. Brakelmann:* Reinforcement of Power Cables crossing Thermally Unfavourable Regions. ETEP (1999) pp. 199–202.

[8] VDI-Wärmeatlas. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.

[9] *H. Brakelmann:* Kabeltrassen mit zwangsbelüfteten Rohren. Bulletin SEV/VSE 90(1999)15, S. 19–23.

[10] *C. Ihle:* Lüftungs- und Raumheizung, Bd. 3. Werner-Verlag, Düsseldorf, 1977.

[11] Cigré, SC21: The calculation of continuous ratings for forced cooled cables. Electra (1979) S. 59–84.

[12] *H. Brakelmann:* Lateralkühlung von Hochspannungskabeln. etz-Archiv (1980) S. 77–86.

[13] Calculation of the continuous current rating of cables (100% load factor). IEC-Publikation 60287

Refroidissement des croisées de câbles par des conduits de ventilation

Les conditions thermiques sur les tracés déterminent de manière décisive la sollicitation des câbles d'énergie. A cet égard, les «hot spots», les zones les plus défavorables du tracé, comme par exemple des croisements avec d'autres câbles ou d'autres systèmes exothermiques, sont souvent déterminants. On élabore des mesures de ventilation assurant une circulation autonome de l'air et une méthode de calcul dont les résultats démontrent que pour améliorer les zones de croisement sur les tracés sensibles, il est avantageux de poser les tuyaux de refroidissement parallèlement aux câbles.