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: 71 (1980)

Heft: 13

Artikel: Berechnung der Belastbarkeit integralgekühlter Einleiter-Energiekabel

Autor: Mainka, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905265

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: 07.01.2026

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

Berechnung der Belastbarkeit integralgekühlter Einleiter-Energiekabel

Von G. Mainka

621.315.21:017.72;

Die bekannten mathematischen Grundlagen und Berechnungsformeln für zwangsgekühlte Kabelanlagen werden für integralgekühlte Einleiter-Energiekabel bis zur expliziten Angabe der Belastbarkeit erweitert. Dabei geht die thermische Kopplung der Kabel miteinander und mit der Umgebung in die Rechnung ein.

Les bases mathématiques et formules de calcul applicables à des installations de câbles à refroidissement forcé sont étendues aux câbles unipolaires de transport d'énergie électrique intégralement refroidis, avec indication explicite de la charge admissible, compte tenu du couplage thermique des câbles entre eux et avec l'entourage.

1. Einleitung

Im Jahr 1968 veröffentlichten *Flamand* und *Terramorsi* einen grundlegenden Aufsatz über die Berechnung der Belastbarkeit zwangsgekühlter Kabel für Dauerlast [1]. Bei Berücksichtigung der thermischen Kopplung der Kabel des Systems untereinander und mit der Umgebung führen alle bisher bekannten Formeln für die Berechnung der Belastbarkeit von integralgekühlten erdverlegten Einleiter-Energiekabeln nur auf eine implizite Angabe der Belastbarkeit. Um ein schnelles und sicheres Rechnen zu ermöglichen, werden diese Formeln bis zur expliziten Angabe der Belastbarkeit erweitert. Dabei ist es notwendig, für die einzelnen Aufbauelemente der Kabel und Kühlrohre unterschiedliche kritische Temperaturen in einfacher Weise berücksichtigen zu können.

Solche Berechnungsformeln wurden für indirekt gekühlte Einleiterkabel bereits nach [2] und für leitergekühlte Einleiterkabel nach [3] angegeben. Um einen Vergleich zu erleichtern, werden Formeln, Text und Bilder an [2; 3] soweit wie möglich angeglichen. Für die Berechnung der Belastbarkeitswerte der Kabel wurden diese Formeln bereits benutzt, und zwar für indirekt gekühlte Kabel gemäss [4] und für leitergekühlte Kabel gemäss [5].

2. Anlagen- und Aufbauelemente

Beispiele integralgekühlter erdverlegter Kabelanlagen [6...9] seien nach Fig. 1 mit dem Querschnitt der Anordnung der Anlagenelemente vorgestellt. Die integral gekühlten Kabel und gegebenenfalls vorhandene laterale Kühlrohre erhalten laufende Nummern.

Die linearen Netzwerke nach Fig. 2 enthalten die Wärmewiderstände pro Länge und die Aufbauelemente der Anordnung, die aus einem Kabel und dem zugehörigen integralen Kühlrohr besteht, sowie die Aufbauelemente eines gegebenenfalls eingesetzten lateralen Kühlrohres. Die Berechnung der Wärmewiderstände T_1, T_2, T_{3b}, T_{6b} und $T_{5\alpha}$ erfolgt nach [10], diejenige von F_{1b}, F_{2b} und $F_{1\alpha}$ nach [11]. Die nach Fig. 2 numerierten Aufbauelemente und Flächen von Aufbauelementen werden im folgenden nur noch als Schichten bezeichnet.

Die Nummern der Anlagenelemente und Schichten bilden Angelpunkte aller weiteren Erörterungen. Um Übersichtlichkeit, Eindeutigkeit und Verallgemeinerungsfähigkeit der Formeln für beliebige Anordnungen der Anlagenelemente zu erreichen, werden diese im allgemeinen durch Buchstaben bezeichneten Nummern, die meist als Indizes dienen, nur nach Tabelle I verwendet. Die b werden also nur für die Kabel mit dem jeweiligen integralen Kühlrohr und die α nur für die gegebenenfalls vorhandenen lateralen Kühlrohre, die *i, j, k, t* aber für alle Anlagenelemente, d.h. für alle Kabel und gegebenenfalls vorhandenen lateralen Kühlrohre verwendet. Wenn z.B. über den Index b summiert wird, dann läuft b über alle Kabelnummern b, oder wenn über i summiert wird, dann läuft i über alle Anlagennummern i.

Laufende Nummern und Indizes — Tabelle I

Kabel	b	i, j, k, t
Kühlrohre	α	
Schichten	T	

3. Koeffizienten

Der Wärmewiderstand pro Länge zwischen Anlagenelement *i* und *k* mit $i \neq k$ ist nach *Kennelly* gemäss [10]

$$g_{ik} = \left[\varrho_E/(4\pi)\right] \ln \left\{\left[(y_i - y_k)^2 + (z_i + z_k)^2\right] / \left[(y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2\right]\right\} \quad (1)$$

mit ϱ_E dem isotropen spezifischen Wärmewiderstand des Bodens, y_i und z_i den räumlichen Koordinaten der Mittelachsen des Anlagenelementes *i* sowie y_k und z_k solchen der Mittelachse des Anlagenelementes *k* im translatorischen Koordinatensystem nach Fig. 3. Dieses Koordinatensystem besteht aus der y-Achse, die in der Erdoberfläche senkrecht zu den parallelen Achsen der Anlagenelemente liegt, und der z-Achse, die senkrecht zur Erdoberfläche verläuft.

Der Erdbodenwärmewiderstand des Anlagenelementes *i* pro Länge beträgt nach [10]

$$g_{ii} = \left[\varrho_E/(2\pi)\right] \ln \left[2\,|z_i|/D_i + \sqrt{(2\,z_i/D_i)^2 - 1}\,\right] \quad (2)$$

mit D_i dem äusseren Durchmesser des Anlagenelementes *i*. Die Formeln nach Gl. (1) und (2) sind als Näherungslösungen zu betrachten. Genauer können diese Koeffizienten aber etwa nach [12] bestimmt werden.

Der Koeffizient

$$Q_i = c\,S_i \quad (3)$$

$$\text{mit } S_i = f_i\,v_i \quad (4)$$

ist ein Mass für die kalorischen Eigenschaften des Kühlmittelstromes des Anlagenelementes *i*, mit *c* der Wärmekapazität des Kühlmittels pro Volumenelement, S_i der Volumenströmung, f_i dem lichten Querschnitt des Hohlleiters des Kabels bzw. des gegebenenfalls vorhandenen lateralen Kühlrohres und v_i der Kühlmittelgeschwindigkeit.

Fig. 4a, b und f bringen drei Beispiele zu Fig. 1a für die hydraulische Schaltung der integralen Kühlströme 1 bis 3, Fig. 4c und e zwei Beispiele zu Fig. 1c für die hydraulische Schaltung der Kühlströme 1 bis 6 und Fig. 4d ein Beispiel zu

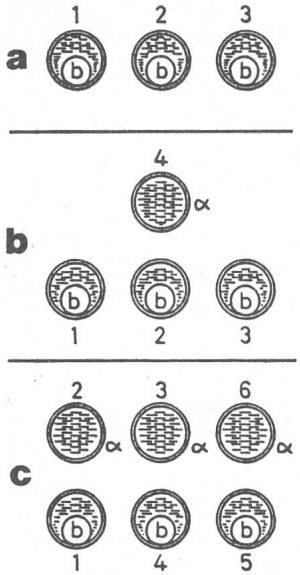

Fig. 1 Querschnitte integralgekühlter Kabelanlagen mit den integralgekühlten Kabeln b und den lateralen Kühlrohren α

a System ohne laterales Kühlrohr
b System mit einem lateralen Kühlrohr
c System mit drei lateralen Kühlrohren

Fig. 1b für die hydraulische Schaltung der Kühlströme 1 bis 4. Wenn das Kühlmittel in Richtung der x-Achse gemäss Fig. 4g strömt, dann erhält v_i ein positives und umgekehrt ein negatives Vorzeichen, wie in Fig. 4a bis f angedeutet wird. v_i ist also als gerichtete Grösse in Gl. (4) einzusetzen. Der Betrag von v_i wird etwa nach [11; 13; 14] berechnet.

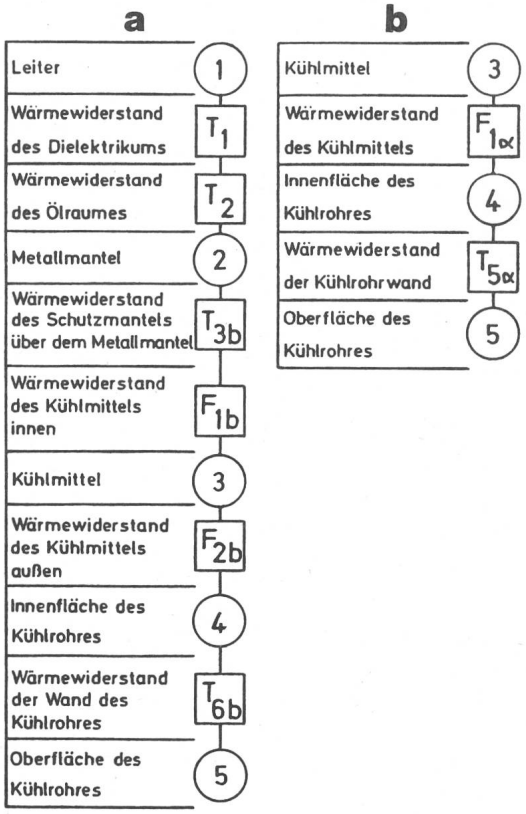

Fig. 2 Wärmewiderstände pro Länge sowie Nummern von Aufbauelementen und Flächen

a Einleiter-Ölkabel im integralen Kühlrohr
b Laterales Kühlrohr

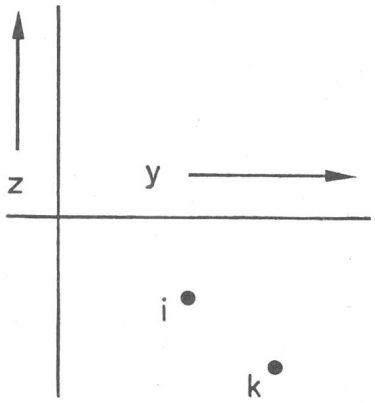

Fig. 3 Translatorisches Koordinationssystem

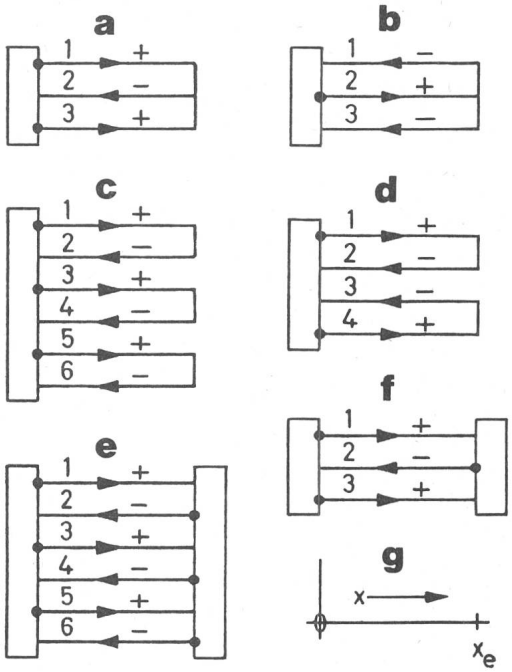

Fig. 4 Beispiele für hydraulische Schaltungen der Kühlstationen und Anlagenelemente

● Ort des Einlasses des Kühlmittels
► Strömungsrichtung des Kühlmittels

Die x-Achse, die nach Fig. 4g parallel zu den Anlagenelementen verläuft, bildet mit dem translatorischen Koordinatensystem nach Fig. 3 ein rechtwinkliges räumliches Koordinatensystem.

Für die weiteren Rechnungen werden noch die Koeffizienten gemäss Gl. (5) bis (11a) benötigt. Sie sind nach Tafel I indiziert und teils aus kalorischen und elektrischen Grössen gebildet. Die L mit Indizes nach Gl. (5) und (6) haben die physikalische Einheit einer Länge und sind Produkte aus Wärmewiderständen pro Länge und aus Q_i, dem Mass für die kalorischen Eigenschaften des jeweiligen Kühlmittelstromes. Die A und B mit Indizes nach Gl. (7) bis (11a) treten unabhängig von der künstlichen Kühlung auch bei natürlich gekühlten Kabeln auf. A hat die physikalische Einheit einer Temperatur. B sind Produkte aus dem elektrischen Wirkwiderstand R des Leiters und aus Wärmewiderständen pro Länge und haben die physikalische Einheit einer Temperatur pro Quadrat des Belastungsstromes. Diese Koeffizienten lassen eine einfache Form der weiteren Rechnungen zu.

Funktionswerte Tabelle II

T	t_1	t_2	t_3	t_4
1	1	1	1	1
2	0	1	1	1
3	0	0	1	1
4	0	0	0	1
5	0	0	0	0

$$L_{bTi} = \left[\delta_{bi}\,(t_3\,F_{2b} + t_4\,T_{6b}) + g_{bi}\right] Q_i \tag{5}$$

$$L_{\alpha Ti} = \left[\delta_{\alpha i}\,(t_3\,F_{1\alpha} + t_4\,T_{5\alpha}) + g_{\alpha i}\right] Q_i \tag{6}$$

$$A_{k5} = \theta_u + W_d \sum_b g_{kb} \tag{7}$$

$$A_{bT} = W_d \left[t_1\,(T_1/2 + T_2) + t_2\,(T_{3b} + F_{1b}) + + t_3\,F_{2b} + t_4\,T_{6b}\right] + A_{b5} \tag{8}$$

$$A_{\alpha T} = A_{\alpha 5} \tag{9}$$

$$B_{k5} = R \sum_b g_{kb}\,(1 + \lambda_b) \tag{10}$$

$$B_{bT} = R \left\{t_1\,(T_1 + T_2) + (1 + \lambda_b)\left[t_2\,(T_{3b} + F_{1b}) + + t_3\,F_{2b} + t_4\,T_{6b}\right]\right\} + B_{b5} \tag{11}$$

$$B_{\alpha T} = B_{\alpha 5} \tag{11a}$$

In diesen Gleichungen bedeuten δ_{ki} das Kroneckersche Delta mit $\delta_{ki} = 1$ für $k = i$ und $\delta_{ki} = 0$ für $k \neq i$, θ_u die Umgebungstemperatur des Erdbodens, W_d die dielektrischen Verluste eines Kabels pro Länge, t_1, t_2, t_3, t_4 Funktionen des Index T mit den festen Werten nach Tabelle II, R der elektrische Wirkwiderstand eines Kabelleiters pro Länge sowie λ_b den Quotienten aus den elektrischen Verlusten des Metallmantels und des Leiters des Kabels b. W_d, R und λ_b werden nach [10] berechnet.

Zur physikalischen Erklärung von Gl. (5) wird diese in die beiden Gleichungen

$$L_{bTb}/Q_b = t_3\,F_{2b} + t_4\,T_{6b} + g_{bb} \tag{5a}$$

und

$$L_{bTi}/Q_i = g_{bi} \quad \text{mit } b \neq i \tag{5b}$$

zerlegt. Man sieht, dass Gl. (5a) auf den Wärmewiderstand pro Länge zwischen der Schicht bT und der Umgebung und Gl. (5b) auf den Wärmewiderstand pro Länge nach *Kennelly* zwischen den Anlagenelementen b und i führt. Für Gl. (6) gilt entsprechendes. $(A_{kT} + B_{kT}\,I^2)$ mit I der Strombelastbarkeit des Kabelsystems ist die Temperatur der Schicht kT, die durch die Umgebungstemperatur θ_u und Kabelverluste erzeugt wird. Die Aufspaltung in die Anteile A_{kT} und $B_{kT}\,I^2$ ist notwendig, um später explizit auf I zugreifen zu können.

Für die folgenden Rechnungen wird vorausgesetzt, dass die Koeffizienten nach Gl. (1) bis (11a) konstant und damit unabhängig von x sind. Eine Abweichung davon würde allen Rechenaufwand, der bis zur Angabe der Belastbarkeit notwendig ist, wesentlich steigern.

4. Differentialgleichungen

Das Differentialgleichungssystem für die Temperatur θ_{k3} des strömenden Kühlmittels des integralen oder des lateralen Kühlrohres k als Funktion von x nach Fig. 4g lautet für den thermisch eingeschwungenen Zustand

$$\theta_{k3} = A_{k3} + B_{k3}\,I^2 - \sum_i L_{k3i}\,\dot{\theta}_{i3} \tag{12}$$

mit $\dot{\theta}_{i3} = d\theta_{i3}/dx$ dem Differentialquotienten von θ_{i3} nach x. Die Verlustleistung der Volumenströmung S_i ist

$$J_i = -\,Q_i\,\dot{\theta}_{i3} \tag{13}$$

Der negative Wert von J_i ist die Kühlleistung, die das Kühlmittel pro Länge liefert.

Mit Hilfe der Ausführungen des letzten Kapitels, der Gl. (13) und des Formelwerkes von [10] erkennt man, dass θ_{k3} gemäss Gl. (12) durch die Umgebungstemperatur, die Kabelverluste und die Verluste J_i bestimmt wird. Gl. (12) stellt ein System von inhomogenen linearen Differentialgleichungen erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten dar. In bekannter Weise erhält man nach z.B. [15] die Lösung zu

$$\theta_{k3} = A_{k3} + B_{k3}\,I^2 - \sum_i K_{ki}\,P_i \exp\,(h_i\,x) \tag{14}$$

wobei die h_i aus der Determinante

$$|L_{k3i}\,h_t + \delta_{ki}| = 0 \tag{15}$$

und die K_{it} aus den Gleichungssystemen

$$\sum_i \left\{L_{k3i}\,h_t + \delta_{ki}\right\} K_{it} = 0 \tag{16}$$

zu bestimmen sind. Da die Aufgabe besteht, einen explizierten Zugriff zu I zu ermöglichen, müssen die Integrationskonstanten P_t nach

$$P_t = G_t + H_t\,I^2 \tag{17}$$

in die Integrationskonstanten G_t und H_t aufgespalten werden, die mit Hilfe der Randbedingungen berechenbar sind.

Von der Praxis her gesehen, sind hier nur zwei Randbedingungstypen interessant. In der einen werden

$$\theta_{k3} = \theta_{k31} \quad \text{bei } x = x_1 \tag{18}$$

vorgegeben, nämlich die Temperatur θ_{k31} des Kühlmittels des Anlagenelements k am Ort x_1 des Einlasses und in der anderen

$$\theta_{v3} = \Big(\sum_w S_w\,\theta_{w3}\Big)/B_0 \quad \text{bei } x = x_2 \tag{19}$$

$$\text{mit } B_0 = \sum_w S_w$$

nämlich die Gleichheit der Temperatur θ_{v3} mit dem über die Volumenströme S_w gewogenen Mittelwert der Temperaturen θ_{w3} der Anlagenelemente w am Ort x_2 des hydraulischen Zusammenschlusses der Anlagenelemente v und w. Hierbei sind v die Nummer des gerade betrachteten Anlagenelementes, das seinen Kühlmittelstrom von diesem Zusammenschluss fortführt, und w die Nummern aller der Anlagenelemente, die ihren Kühlmittelstrom an diesen Zusammenschluss heranführen. Ein solcher Zusammenschluss befindet sich im allgemeinen nur an der ungekühlten Seite einer einseitig gekühlten Strecke und soll gemäss Voraussetzung eine gute Mischung der Volumenströme S_w bewirken. Falls nur ein Anlagenelement w seinen Kühlmittelstrom heranführt, reduziert sich Gl. (19) offensichtlich auf $\theta_{v3} = \theta_{w3}$.

Man geht unter Verwendung von Gl. (17) mit Gl. (14) in die Randbedingungen nach Gl. (18) und/oder (19) ein und erhält für G_t und H_t einen Satz von Bestimmungsgleichungen, die für beliebige I und daher auch getrennt voneinander für die Summanden mit und ohne I^2 als Faktor gelten. Dieser Satz ist ein vollständiges lineares Gleichungssystem mit G_t und H_t als zu bestimmende Unbekannte. Für Gl. (18) lauten diese Bestimmungsgleichungen

$$A_{k3} - \theta_{k31} = \sum_t K_{kt} G_t \exp(h_t x_1) \tag{20}$$

$$B_{k3} = \sum_t K_{kt} H_t \exp(h_t x_1) \tag{21}$$

und für Gl. (19)

$$B_0 A_{v3} - \sum_w S_w A_{w3} = \\ = \sum_t \left\{ B_0 K_{vt} - \sum_w S_w K_{wt} \right\} G_t \exp(h_t x_2) \tag{22}$$

$$B_0 B_{v3} - \sum_w S_w B_{w3} = \\ = \sum_t \left\{ B_0 K_{vt} - \sum_w S_w K_{wt} \right\} H_t \exp(h_t x_2) \tag{23}$$

Falls zu w nur ein Anlagenelement gehört, reduzieren sich Gl. (22) und (23) auf (22a) und (23a):

$$A_{v3} - A_{w3} = \sum_t (K_{vt} - K_{wt}) G_t \exp(h_t x_2) \tag{22a}$$

$$B_{v3} - B_{w3} = \sum_t (K_{vt} - K_{wt}) H_t \exp(h_t x_2) \tag{23a}$$

Es folgen drei Beispiele für die Aufstellung des vollständigen Gleichungssystems zur Bestimmung der G_t und H_t. Für die Anordnung nach Fig. 1a und 4a werden Gl. (20) und (21) mit $x_1 = 0$ für $k = 1$ und $k = 3$ sowie Gl. (22) und (23) mit $x_2 = x_e$ für $v = 2$ angesetzt, wobei w über 1 und 3 läuft. Hier wird offensichtlich $B_0 = S_1 + S_3$. Für Fig. 1b und 4d werden Gl. (20) und (21) mit $x_1 = 0$ für $k = 1$ und $k = 4$ sowie Gl. (22a) und (23a) mit $x_2 = x_e$ sowohl für $v = 2$ und $w = 1$ als auch für $v = 3$ und $w = 4$ angesetzt. Für Fig. 1a und 4f werden Gl. (20) und (21) mit $x_1 = 0$ für $k = 1$ und $k = 3$ sowie mit $x_2 = x_e$ für $k = 2$ angesetzt.

Die jetzt bekannten G_t und H_t werden über Gl. (17) in Gl. (14) eingetragen. Mit der Ableitung dieser Gl. (14) nach x geht man in Gl. (12) ein. Letztere Gleichung wird ausserdem von θ_{k3} auf θ_{kT}, die Temperatur der Schicht kT, erweitert und lautet dann

$$\theta_{kT} = E_{kT} + F_{kT} I^2 \tag{24}$$

mit

$$E_{kT} = A_{kT} + \sum_{i,t} L_{kTi} K_{it} G_t h_t \exp(h_t x) \tag{25}$$

$$F_{kT} = B_{kT} + \sum_{i,t} L_{kTi} K_{it} H_t h_t \exp(h_t x) \tag{26}$$

5. Berechnung der Belastbarkeit

Die Belastbarkeit der integralgekühlten Kabelanlage ist nun so zu bestimmen, dass keine kritische Temperatur $(\theta_{kY})_K$ der Schichten kY überschritten, dass aber eine dieser Temperaturen an mindestens einer Stelle erreicht wird. Der Index Y schliesst ein lokales Zusammentreffen mit einer Randbedingung nach Gl. (18) aus, denn hier ist die Temperatur der Schicht kT mit $T = 3$ lokal für x_1 bereits festgelegt. Im übrigen sind aber die Indizes T und Y identisch.

Gl. (24) führt zur Definition der lokalen Belastbarkeit I_{kY} der Schicht kY als einer Funktion von x gemäss

$$I_{kY} = \sqrt{\left[(\theta_{kY})_K - E_{kY}\right] / F_{kY}} \tag{27}$$

I_{kY} wird für alle Schichten kY aller Anlagenelemente berechnet, wobei für unterschiedliche Schichten gleiche oder unterschiedliche Temperaturen $(\theta_{kY})_K$ festgelegt werden können.

6. Schlussbemerkungen

Für den allgemeinen Fall der integralgekühlten Einleiter-Energiekabel bei Erdverlegung wurden die lokalen Belastbarkeiten für die Aufbauelemente der Anlagenelemente explizit für Dauerlast angegeben. Als Anlagenelemente werden hier die Kabel mit den integralen Kühlrohren und die gegebenenfalls vorhandenen lateralen Kühlrohre verstanden. Das absolute Minimum jener lokalen Belastbarkeiten längs der Kühlstrecke ist die zulässige Belastbarkeit der Kabelanlage. Dabei ist die thermische Kopplung aller Anlagenelemente miteinander und mit der Umgebung in der Rechnung berücksichtigt. In den Rechenformeln wurden Muffen und Endverschlüsse nicht berücksichtigt.

Diese Rechenformeln sind so angelegt, dass sie für einen Tischcomputer noch gut programmier- und rechenbar und in ihrer analytischen Gestalt noch leicht überschaubar bleiben. Die Verwendung eines Grosscomputers würde eine Verfeinerung der Formeln, die Berücksichtigung weiterer Einzelheiten und damit eine Vergrösserung der Rechengenauigkeit erlauben, was mit einer entsprechenden Erhöhung des Programmieraufwandes einhergehen müsste. Dies wurde für laterale Kühlung nach [16] bereits gezeigt.

Literatur

[1] *C.-A. Flamand* et *G. Terramorsi:* Etude du refroidissement des câbles d'énergie par circulation forcée. Rev. Gén. Electr. 72(1968)4, p. 415...429.

[2] *G. Mainka:* Berechnung der Belastbarkeit indirekt gekühlter Einleiter-Energiekabel. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 29(1979)3, S. 158...160.

[3] *G. Mainka:* Explicit calculation of the current rating of conductor-cooled single-core power cables. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, Feb. 3...8 1980, paper F 80 166–9.

[4] *G. Mainka:* Belastbarkeit indirekt gekühlter Einleiter-Energiekabel. Elektrizitätswirtsch. 76(1977)26, S. 914...918.

[5] *C. Albrecht* e.a.: Transport de grande puissance par câbles refroidis par le conducteur. Rapport CIGRE No. 21–10, 1978.

[6] *H. Ahlers, H.-J. Hilgendorff* und *H. Raupach:* Planung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Hochleistungs-Kabelanlage für 110 kV mit äusserer Wasserumlaufkühlung. Elektrizitätswirtschaft 75(1976)5, S. 93...97.

[7] *W. Hahn, U. Müller* et *E.F. Peschke:* La première liaison de câbles de grande puissance à 380 kV installée en Allemagne. Rapport CIGRE No. 21–08, 1976.

[8] *U.C. Arnaud* a.o.: Development and trials of the 400 kV integral pipe-cooled cable system. Proc. IEE 124(1977)3, p. 286...294.

[9] *G. Luoni, G. Maschio* and *W.G. Lawson:* Study of mechanical behaviour of cables in integral-pipe water-cooled systems. Proc. IEE 124(1977)3, p. 295...302.

[10] Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent (facteur de charge 100%). Publication de la CEI Nº 287, 1969.

[11] Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. Düsseldorf, VDI Verlag, 1963.

[12] *G. Luoni, A. Morello* and *H.W. Holdup:* Calculation of the external thermal resistance of buried cables through conformal transformation. Proc. IEE 119(1972)5, p. 575...586.

[13] *H. Richter:* Rohrhydraulik. Ein Handbuch zur praktischen Strömungsberechnung. 5. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York, Springer Verlag, 1971.

[14] *W. Bohl:* Technische Strömungslehre kurz und bündig. Würzburg, Vogel-Verlag, 1971.

[15] *L. Collatz:* Differentialgleichungen. 5. Auflage. Stuttgart, Teubner-Verlag, 1973.

[16] *H. Brakelmann:* Lateralkühlung von Hochspannungskabeln. ETZ-Archiv –(1980)3, p. 77...86.

Adresse des Autors

Dr. rer.nat. *Guido Mainka,* Felten & Guilleaume Carlswerk AG, Geschäftsbereich Energiekabel, Postfach 805 001, D-5000 Köln 80.