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: 89 (1998)

Heft: 25

Artikel: Kabel mit vollständig integrierter Zwangskühlung

Autor: Rasquin, Werner

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902155

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: 24.08.2025

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

Grosse Übertragungsleistungen können die Installation einer Zwangskühlung des Kabels erforderlich werden lassen. Die Installation von gewöhnlichen Kühlsystemen ist häufig aufwendig und mit einem grossen Platzbedarf im Kabelgraben verbunden. Der vorliegende Beitrag stellt ein Kabel mit vollständig integrierter Zwangskühlung vor, das den Transport grosser Leistungen bei geringem Platzbedarf und daher kleinen Grabenquerschnitten erlaubt.

Kabel mit vollständig integrierter Zwangskühlung

■ Werner Rasquin

Wird beim Entwurf eines Kabels erkannt, dass bei natürlicher Kühlung vorgegebene oder zulässige Grenztemperaturen überschritten werden, so ist entweder die angestrebte Übertragungsleistung herabzusetzen oder aber eine der denkbaren Zwangskühlungsarten einzuführen. Scheidet die Herabsetzung der Übertragungsleistung aus, so bleibt nur der Übergang zur Zwangskühlung. Wird von einer Tieftemperaturkühlung abgesehen, dann ist Wasser das am häufigsten eingesetzte Kühlmittel. Mit Wasser als Kühlmittel können fast alle Zwangskühlungsaufgaben der Kabeltechnik gelöst werden. Bis heute sind folgende, in Bild 1 skizzierte Grundkühlarten mit Wasser bekannt:

- Lateralkühlung (Bild 1a): Parallel zu den gegenüber natürlich gekühlten Kabeln unveränderten Kabeladern K werden wasserdurchströmte Kühlrohre KR verlegt, die dem Kabel Verlustwärme entziehen. Die aufgenommene Wärme wird anschliessend in einer Kühlstation KSt an die Umgebungsluft abgeführt [1].
- Oberflächenkühlung (Bild 1b): Die einzelne Kabelader K liegt entweder in einem wasserdurchströmten Trog oder Rohr KR. Das Wasser entzieht dem Kabel Verlustwärme, die in einer Kühlstation KSt an die Umgebungsluft abgegeben wird [2].
- Kabel mit innerer Wasserkühlung (Bild 1c): Das Kühlwasser fliesst durch ein Kühlrohr im Leiter der einzelnen Kabelader K und nimmt dort einen grossen Teil der Verlustwärme auf, um diese durch Rückführungsrohre R zur Kühlstation KSt strömen zu lassen [3].
- Kabel mit Bündelkühlung (Bild 1d): Das Kühlwasser durchströmt Kühlrohre, die auf den Metallmantel der einzelnen Kabelader verseilt worden sind, um dem Kabel Verlustwärme zu entziehen, die über Rückführungsrohre R an die Kühlstation KSt und dort an die Umgebungsluft übergeben wird [4–7].

Alle diese Kühlarten weisen neben speziellen Vorteilen auch Nachteile auf. Nachteilig ist beispielsweise, dass in den meisten Fällen neben den Kabeladern zusätzlich noch Kühlwasser- oder Kühlwasserrückführungs-Rohre erforderlich sind, so dass ein grösserer Querschnitt des Kabelgrabens nötig wird.

Im folgenden soll daher ein Vorschlag zur Wasserkühlung gemacht werden, bei dem keine Kühlwasserrohre ausserhalb der Kabeladern benötigt werden. Werden Kühlrohre auf den Metallmantel der Kabeladern eines Kabels mit innerer Wasserkühlung gebracht, dann kann in jeder Ader des Kabels das Kühlwasser hin- und zurücktransportiert werden, ohne dass zusätzliche Kühlwasser- oder Kühlwasserrückführungs-Rohre erforderlich sind. Die Kühlwasserrohre bilden

Adresse des Autors
Prof. Dr.-Ing. *Werner Rasquin*, Fachbereich Elektrotechnik, Gerhard-Mercator-Universität
D-47048 Duisburg

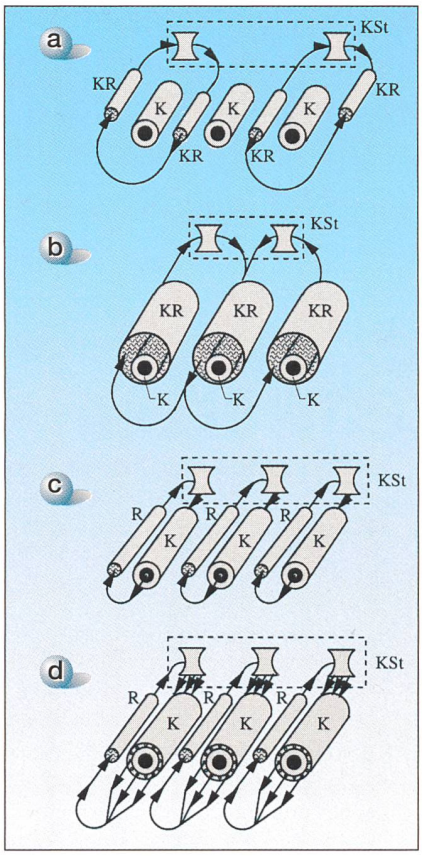

Bild 1 Skizze zu den einzelnen Kühlarten

eine Einheit mit der Kabelader, sind also vollständig integriert. Darüber hinaus ergibt sich der zusätzliche Vorteil der Doppelkühlung sowohl des Leiters als auch des Kabelmantels.

Welche Auswirkungen diese Doppelkühlung haben kann, soll im folgenden dargestellt werden. Die Berechnungen wurden für den Dauerlastfall durchgeführt. Sie berücksichtigen alle thermischen Widerstände des Systems, also auch die Kopplungswiderstände zwischen den Kühlrohren, sowie die Wärmekapazität des Kühlwassers. Darüber hinaus werden die Temperaturabhängigkeiten der elektrischen Leiterwiderstände und der thermischen Widerstände der Grabenfüllungen erfasst.

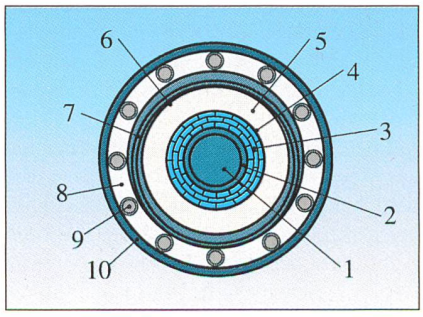

Bild 2 Querschnitt durch eine Kabelader mit Doppelkühlung

1: Wasser, 2: Edelstahlrohr, 3: Leiter, 4: Leiterglättung, 5: elektrische Isolierung, 6: Aderabschirmung, 7: Metall-Wellmantel, 8: Korrosionsschutz, 9: Edelstahl-Kühlrohre, 10: Kunststoffmantel

Betriebsarten eines Kabels mit vollständig integrierten Kühlrohren

Bild 2 zeigt einen Querschnitt durch ein Kabel, das für die Doppelkühlung ausgelegt ist. Dabei ist die vorgestellte Konstruktion nur eine von vielen denkbaren.

Wasser (1) durchströmt ein Edelstahlrohr (2) im aus Formdrähten aufgebauten Leiter (3) in Vorwärtsrichtung. Auf dem Leiter sitzt eine Leiterglättung (4), die mit der elektrischen Isolierung (5) innigen Kontakt hat. Auf der Isolierung liegt aussen eine Aderabschirmung (6) und darauf wiederum ein Metall-Wellmantel (7). Dann folgt der Korrosionsschutz (8), in den Edelstahl-Kühlrohre (9) eingebettet sind, durch die das Kühlwasser nach seiner Umkehr vom Kabelende zum Kabelanfang zurückfliesst. Die Ader wird nach aussen hin mit einem Kunststoffmantel (10) abgeschlossen.

Das Besondere an dieser Kabelkonstruktion ist, dass alle notwendigen Kühlrohre in die jeweilige Kabelader integriert sind. Von aussen ist der Ader also nicht anzusehen, dass sie einen geschlossenen Kühlwasserkreislauf enthält.

Wie das Kühlwasser ohne getrennte Wasserendverschlüsse aus dem auf Hochspannungspotential liegenden Leiterkühlrohr auf Erdpotential und dann in die Mantelkühlrohre gebracht werden kann, soll an anderer Stelle dargestellt werden.

Ein solches Kabel mit Doppelkühlung stellt ein vieldimensionales Optimierungsproblem dar: so kann beispielsweise der Leiterquerschnitt gegen den Kühlrohrdurchmesser im Leiter, aber auch gegen den Aderdurchmesser ausgespielt werden.

Um aber die Ausführungen nicht zu stark auszuweiten, soll in den folgenden Ausführungen nur ein einziges Kabel,

Aufbauelement	Grösse	Einheit	Zahlenwert
Leiter Kühlrohr (Edelstahl)	lichter Durchmesser	mm	25
	Wandstärke	mm	1,5
Leiter (Kupfer)	Querschnitt	mm^2	1600
	Füllfaktor	–	0,85
	Aussendurchmesser	mm	56,4
	zulässige Temperatur	K	363
Leiterglättung	Dicke	mm	2
Isolierung (VPE)	Dicke	mm	28
	Permitivität	–	2,3
	Verlustfaktor	–	0,0004
	spez. therm. Widerstand	m×K/W	3,6
Aluminium-Wellmantel	Wandstärke	mm	2,0
	Wellhöhe	mm	11,0
Mantel-Kühlrohre (Edelstahl)	lichter Durchmesser	mm	10,0
	Wandstärke	mm	1,0
	Anzahl	–	12
Korrosionsschutz	Dicke	mm	5
	spez. therm. Widerstand	m×K/W	6
Ader	Durchmesser	mm	178
Wasser-Endverschluss (Porzellan)	lichter Durchmesser	mm	20,0
	Länge	mm	3000
Kühlwasser	elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	10,0
Maximaler Druck	im Leiterrohr	bar	40
	in den Mantelrohren	bar	40
Kabelgraben	Umgebungstemperatur	K	288
	Austrocknungstemperatur	K	303
Boden feucht	spez. therm. Widerstand	m×K/W	1,0
Boden trocken	spez. therm. Widerstand	m×K/W	2,5
Boden therm. stabilisiert	spez. therm. Widerstand	m×K/W	1,2
Legung	Legetiefe	mm	1700
	Ader-Achs-Abstand	mm	400

Tabelle I Eigenschaften des 400-kV-VPE-Kabels

nämlich ein 400-kV-VPE-Kabel (siehe Tabelle I) untersucht werden. Ausschliesslich zwei Parameter – die Kühlbetriebsart und die Kühlabschnittslänge *l* – sollen verändert werden. Grundsätzlich sind folgende sechs Kühlbetriebsarten (siehe dazu die einphasige Darstellung aus Bild 3) denkbar:

1. *Natürliche Kühlung:* Die Verlustleistungen müssen im Kabel radial nach aussen und dann über das Erdreich an die Luft abgeführt werden.
2. *Bündelkühlung:* Das Kühlwasser durchströmt nur die Bündelrohre auf dem Metallmantel des Kabels. Das erwärmte Kühlwasser müsste dabei entweder ganz oder teilweise über Rückführungsrohre zurückgeführt werden.
3. *Leiterkühlung:* Das Kühlwasser tritt am Kabelanfang in das Leiterkühlrohr ein und verlässt dieses erwärmt am Kabelende. Das erwärmte Kühlwasser muss auch in diesem Fall über Rückführungsrohre zurückgeführt werden.
4. *Doppelkühlung mit nur einer Kühlstation vorne:* Nur am Anfang, wo das Kühlwasser in das Leiterkühlrohr eintreten soll, wird das Wasser in einer Kühlstation heruntergekühlt. Das Kühlwasser erwärmt sich im Leiterkühlrohr und wird danach über die Bündelrohre vom Ende des Kabels zu dessen Anfang zurückgeführt.
5. *Doppelkühlung mit nur einer Kühlstation hinten:* Nur am Ende des Kabels, wo das im Leiterkühlrohr erwärmte Wasser das Kabel verlässt, wird das Wasser in einer Kühlstation heruntergekühlt, um danach durch die Bündelrohre an den Kabelanfang zurückzuströmen. Es tritt also am Kabelanfang mit erhöhter Temperatur in das Leiterkühlrohr ein.
6. *Doppelkühlung mit je einer Kühlstation vorne und hinten:* Nicht nur am Anfang, sondern auch am Ende des Kühlabschnitts wird das Wasser jeweils in einer Kühlstation heruntergekühlt.

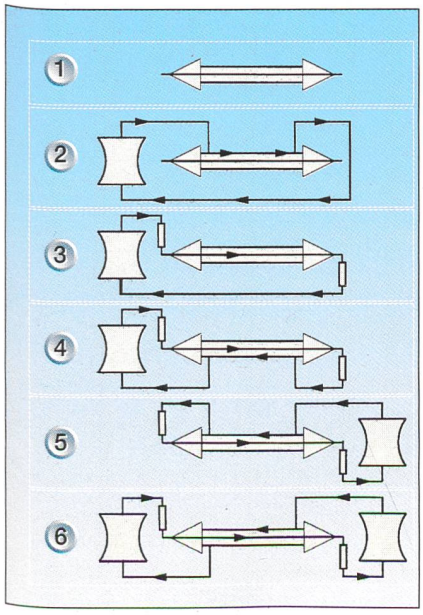

Bild 3 Mögliche Betriebsarten des Kabels mit vollständig integrierter Kühlung (Erläuterungen im Text)

Kennlinie 1	natürliche Kühlung
Kennlinie 2	Bündelkühlung (Rückführungsrohr erforderlich)
Kennlinie 3	Leiterkühlung (Rückführungsrohr erforderlich)
Kennlinie 4	Doppelkühlung mit einer Kühlstation am Anfang des Kabels
Kennlinie 5	Doppelkühlung mit einer Kühlstation am Ende des Kabels
Kennlinie 6	Doppelkühlung mit je einer Kühlstation am Anfang und am Ende des Kabels

Tabelle II Bedeutung der Kennlinien in allen Abbildungen

Bei diesen Betriebsarten sind zusätzlich noch drei unterschiedliche thermische Bedingungen des Kabelgrabens zu berücksichtigen:

- Im normal verfüllten Kabelgraben wird keine Bodenaustrocknung zugestanden,
- im normal verfüllten Kabelgraben wird partielle Bodenaustrocknung zugelassen und
- in dem mit thermisch stabilisierten Rückfüllmaterial (Material, das trotz vollständiger Austrocknung seinen thermischen Widerstand nicht oder nur geringfügig ändert, z.B. Magerbeton) versehenen Kabelgraben wird partielle Bodenaustrocknung toleriert.

Berechnungsergebnisse ohne zugestandene Bodenaustrocknung

Die Berechnungsergebnisse für diesen Betriebsfall sind in Bild 4 dargestellt. Dieser Abbildung kann entnommen werden, dass je nach Wahl der Parameter eine andere Rangfolge der unterschiedlichen Kühlarten hinsichtlich des Übertragungsvermögens auftritt:

1. Bis zu Kühlabschnittslängen von etwa 2 km sind mit allen Betriebsarten der Zwangskühlung sehr grosse Leistungssteigerungen gegenüber der natürlichen Kühlung (Kennlinie 1) zu erzielen. Bei grossen Kühlabschnittslängen verlieren sich die Auswirkungen der Zwangskühlung, und die maximale Übertragungsleistung nähert sich der Kennlinie für die natürliche Kühlung an. Vorsicht ist allerdings bei der Doppelkühlung geboten, da durch die thermische Kopplung des Kühlwassers (grosse Kabelabschnittslängen) längs der Kabelachse ein Temperaturmaximum auftreten kann. Daher können die Kennlinien 4, 5 und 6 unter die Kennlinie 1 sinken.

2. Die Leiterkühlung (Kennlinie 3) ist wegen des grösseren Temperaturgradienten zwischen Kühlmittel und Wärmequelle (Leiter) wirkungsvoller als die Bündelkühlung (Kennlinie 2). Der Unterschied ist aber bei fast allen Kühlabschnittslängen relativ klein.

3. Nur unterhalb einer Kühlabschnittslänge von etwa 1 km übertrifft das Kabel mit Doppelkühlung und nur einer Kühlstation am Kabelanfang (Kennlinie 4) die Kabel mit Bündel- oder Leiterkühlung. Dies wird durch die Rückleitung erwärmten Kühlwassers durch die Mantelröhrchen und der damit einhergehenden Verminderung der Wärmeabfuhr verursacht.

4. Da die Erwärmung des Kühlwassers in den Mantelröhrchen geringer ausfällt als im Leiter, ist die Doppelkühlung mit Kühlstation am Leiterende bis zu einer Kühlabschnittslänge von etwa 3 km den Kabeln mit Bündel- und Leiterkühlung überlegen.

5. Werden bei der Doppelkühlung vorne und hinten Kühlstationen eingesetzt (Kennlinie 6), dann werden bei diesem Betrieb für alle Kühlabschnittslängen bis zu 6 km die grössten Übertragungsleistungen erzielt.

Berechnungsergebnisse mit zugestandener Bodenaustrocknung

Die in Bild 5 dargestellten Berechnungsergebnisse lassen für diesen Betriebsfall folgende Schlüsse zu.

1. Alle Übertragungsleistungen sind spürbar grösser als diejenigen aus Bild 4.

2. Bis zu einer Kühlabschnittslänge von etwa 3 km ist das Kabel mit Doppelkühlung und der Kühlstation am Ende des Kühlabschnitts (Kennlinie 5) dem Kabel mit Bündelkühlung und dem mit Leiterkühlung überlegen.

3. Das Kabel mit Doppelkühlung und je einer Kühlstation am Anfang und am Ende des Kühlabschnitts übertrifft bis zu einer Kühlabschnittslänge von rund 6 km alle anderen Kabel.

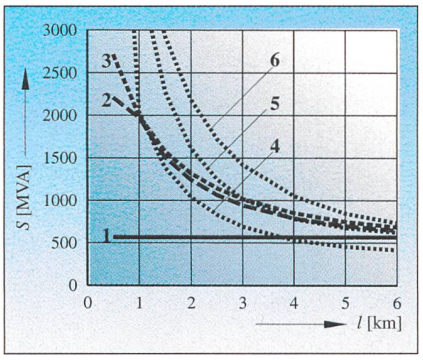

Bild 4 Maximale Übertragungsleistung *S* der Kabel ohne Bodenaustrocknung als Funktion der Kühlabschnittslänge *l*

Numerierung der Kennlinien siehe Bild 3 und Tab. II

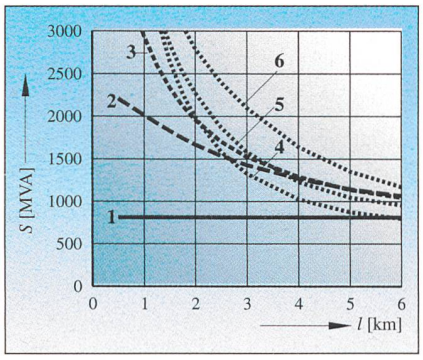

Bild 5 Maximale Übertragungsleistung *S* der Kabel mit partieller Bodenaustrocknung im normal verfüllten Kabelgraben als Funktion der Kühlabschnittslänge *l*

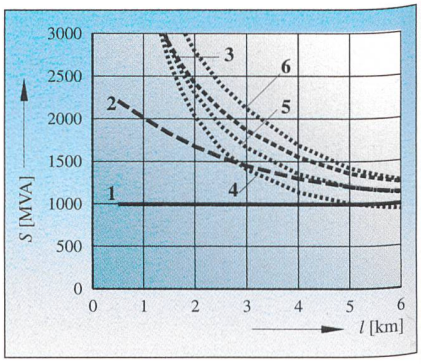

Bild 6 Maximale Übertragungsleistung *S* der Kabel mit partieller Bodenaustrocknung im thermisch stabilisierten Kabelgraben als Funktion der Kühlabschnittslänge *l*

Berechnungsergebnisse bei thermisch stabilisierten Kabelgräben

Die Berechnungsergebnisse für diesen Betriebsfall sind in Bild 6 dargestellt:

1. Insbesondere das Kabel mit Leiterkühlung (Kennlinie 3) profitiert von der thermischen Stabilisierung des Kabelgrabens.
2. Nur das Kabel mit Doppelkühlung und je einer Kühlstation am Anfang und am Ende des Kühlabschnitts ist bis zu einer Kühlabschnittslänge von rund 6 km noch besser als das Kabel mit nur innerer Leiterkühlung.

Berechnungsergebnisse für möglichst grosse Kühlstationenabstände

Wird gefragt, welche maximalen Kühlstationenabstände l_K bei welchen Übertragungsleistungen S erzielt werden können, so verändern sich die Relationen gegenüber den obigen Fragestellungen. Dazu soll nochmals Bild 3 betrachtet werden, woraus folgende Schlüsse gezogen werden können:

1. Das Kabel mit natürlicher Kühlung (Bildzeile 1) kann bezüglich der Kühlbedingungen beliebig verlängert werden, da kein Kühlmedium umgepumpt werden muss.
2. Alle Kabel der Bildzeilen 2 bis 4 können an ihrem jeweiligen rechten Ende an ein gleich langes, gleichartiges Kabel elektrisch angeschlossen werden, das durch Spiegelung am rechten Ende des bereits liegenden Kabels gewonnen wird. Der Kühlstationenabstand wird also gleich der doppelten Kühlabschnittlänge.
3. In der Bildzeile 5 muss am linken Kabelende gespiegelt werden, um ebenfalls einen Kühlstationenabstand zu erhalten, der die doppelte Kühlabschnittslänge ausmacht.
4. Beim Kabel der Bildzeile 6 kann der Kühlstationenabstand nicht grösser als die Kühlabschnittslänge gemacht werden.

Durch diesen Zusammenhang zwischen Kühlabschnittslänge l und Kühlstationenabstand l_K ergeben sich geringfügige Verschiebungen in den Relationen zwischen Übertragungsleistung und Kühlstationenabstand gegenüber denjenigen aus den Bildern 4, 5 und 6. Auf eine gesonderte Darstellung soll aus Platzgründen jedoch verzichtet werden.

Folgerungen

Es wurde ein Kabel vorgeschlagen, in das alle notwendigen Kühlrohre jeder einzelnen Kabelader vollständig in diese integriert sind. Obwohl dieses Kabel mit Doppelkühlung in seinen Aufbauelementen noch nicht optimiert worden ist, werden schon bei vergleichsweise kleinen Kühlrohren sehr grosse Leistungssteigerungen gegenüber dem natürlich gekühlten Kabel erzielt, und zwar auch bei respektablen Kühlstationenabständen.

Die Kühlstation sollte bei dem Kabel mit Doppelkühlung zweckmässigerweise an der Stelle installiert werden, an der das erwärmte Kühlwasser aus dem Leiterkühlrohr austritt.

Somit liegt eine Kabelkonstruktion vor, die bei kleinen Grabenquerschnitten grosse bis sehr grosse Leistungen transportieren kann, Leistungen, die grösser als die zurzeit geforderten sind. Das Kabel mit Doppelkühlung reicht also weiter in die Zukunft und stellt einen Konkurrenten von supraleitenden Kabeln dar. Diesen gegenüber besitzen die Kabel mit Doppelkühlung aber folgende Vorteile:

- geringere Investitionskosten
- herkömmliche Verlegung, Montage und Reparatur
- herkömmliche Kühleinrichtungen und
- einfachere Betriebsführung

Literatur

[1] *C.A. Arkell, E.H. Ball, A.H. Barton, H.K. Beale, D.E. Williams:* The Design and Installation of Cable Systems with Separate Pipe Water Cooling. Cigré-Report 21-01 (1978).

[2] *U. Müller, E.F. Peschke:* The First 380-kV-Cable Bulk Power Transmission in Germany. Cigré-Report 21-08 (1976).

[3] *H. Birnbacher, W. Fischer, W. Rasquin:* High-Power Cables with Internal Water Cooling. Cigré-Report 21-09 Part I (1974).

[4] *H. Brakelmann, W. Rasquin:* Die Bündelkühlung. Elektrizitätswirtschaft 91(1992), S. 1387 bis 1390.

[5] *H. Brakelmann, G. Hahne, W. Rasquin:* Gasaussendruckkabel mit Bündelkühlung. Elektrizitätswirtschaft 91(1992), S. 1656–1659.

[6] *H. Brakelmann, G. Hahne, W. Rasquin:* Bündelkühlung von Einleiter-Kunststoffkabeln. Elektrizitätswirtschaft 91(1992), S.1469–1474.

[7] *H. Brakelmann, W. Rasquin:* Dimensionierung von Gasaussendruckkabeln mit Bündelkühlung. Elektrizitätswirtschaft 92(1993), S. 119–123.

Câbles à refroidissement intégré

Les grandes capacités de transmission peuvent exiger que les câbles soient pourvus d'une installation de refroidissement forcé. L'installation de systèmes de réfrigération habituels est souvent coûteuse et liée à un encombrement important dans le caniveau à câbles. L'article présente un câble comportant un refroidissement forcé complètement intégré, qui permet le transport de grandes puissances, très peu encombrant et ne nécessitant donc qu'un caniveau de petite section.