Die Übertragung sehr hoher Leistungen über Starkstromkabel

Autor(en): **Heumann, H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **69 (1978)**

Heft 4

PDF erstellt am: **23.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-914845

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die Übertragung sehr hoher Leistungen über Starkstromkabel

Von H. Heumann

621.315.21 : 621.3.05;

Durch Zwangskühlung können die Übertragungsleistungen von Kabeln wesentlich gesteigert werden. Drei Arten der Zwangskühlung, die ungefähre Grenze der übertragbaren Leistung sowie einige wesentliche Vor- und Nachteile werden dargestellt und beschrieben. Auf die Probleme, die insbesondere auch bei den Garnituren mit wachsender Effektivität der Kühlung auftreten, wird hingewiesen und damit die Erfahrung belegt, dass man bisher die jeweils mögliche schwächste Kühlung verwendet hat, mit der die gewünschte Leistung gerade noch zu übertragen ist. Angaben zu den spezifischen Kosten werden gemacht und ein wirtschaftliches Minimum bei etwa $^2/_3$ der Grenzlast erläutert.

Les puissances transportées par câbles peuvent être considérablement augmentées par refroidissement forcé. L'auteur décrit trois modes de refroidissement, la limite approximative de la puissance qui peut être transportée ainsi que quelques avantages et inconvénients importants. Il mentionne notamment les problèmes que pose l'efficacité grandissante du refroidissement en ce qui concerne les garnitures, ce qui explique le fait qu'on utilise généralement le refroidissement le plus faible permettant encore de transporter la puissance requise. Des indications sont données au sujet des coûts spécifiques; un minimum économique est obtenu aux deux tiers de la charge limite.

1. Einleitung

In den letzten etwa 80 Jahren folgten die Betriebsspannungen der Kabel den Übertragungsspannungen der Freileitungen mit einem zeitlichen Nachlauf von etwa 5...20 Jahren. Dabei waren höhere Spannungen ein Mittel, mehr Leistung bei geringeren spezifischen Kosten über die Kabel zu übertragen. Fig. 1 zeigt Kabelkosten pro km und Jahr bezogen auf die Übertragungsleistung. Dabei sind wie in [1][1]) 300.– DM pro 100 kg Kupfer, 9,5 % als Amortisationssatz für die Kabelanlage und 13,2 % für die Kühlstationen bei Zwangskühlung zugrunde gelegt sowie das allgemeine Kostenniveau von 1974. Man erkennt, dass die Kosten bei wachsenden Übertragungsleistungen geringer werden, und dass die verschiedenen Leistungsbereiche etwa aneinander anschliessen.

Im Laufe der technischen Entwicklung der Starkstromkabel mussten – meist beim Übergang von 10 kV auf 20 kV bzw. von 60 kV auf 110 kV Betriebsspannung – neue Lösungen bei der Ausführung der Isolierung für die jeweils höhere Spannung gefunden werden [2]. Heute werden Spannungen von 380 bis 550 kV sicher beherrscht, und schon seit etwa 15 Jahren wird anhand von Versuchskabeln gezeigt, dass Kabel sehr hoher Zuverlässigkeit für 760 kV und selbst 1100 kV gefertigt werden können [3]. Da wirtschaftliche Vorteile auf diesen Spannungsebenen trotz der hohen Kosten für die übrigen Netzkomponenten wie Transformatoren und Schalter in der Regel nur bei reinen Freileitungsnetzen interessant sind, werden in Zukunft Kabel bei Spannungen von z. B. 400 kV *mehr Strom* zu übertragen haben, wenn man höhere Leistungen erreichen will.

2. Grenzen der Übertragungsleistung und ihre Steigerungsmöglichkeiten

Aus diesem Grund werden schon heute immer grössere Leiterquerschnitte in Kabeln verwendet. Man kann aber absehen, dass Leiterquerschnitte von etwa 2500 mm² ein vorläufig sinnvoller Endpunkt sein werden, da sonst die Kabel zu grosse Durchmesser erhalten und auch zu schwer werden, so dass sie weder in der Fabrik noch zur Baustelle transportiert werden können. Eine weitere Grenze ist erreicht, wenn die Verlustleistung mehr als etwa 70 W/m Kabel beträgt, da die Wärme grösserer Verluste aus dem Kabel nicht mehr in den umgebenden Erdboden abzufliessen vermag.

In Fig. 2 ist versucht, diese Grenzen, ihre Bedeutung für die Übertragungsleistungen und die technischen Möglichkeiten, zu wesentlich höheren Transportenergien zu kommen, anschaulich darzustellen.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Die drei Grenzen: Betriebsspannung 400 kV, Leiterquerschnitt 2500 mm² und natürliche Wärmeabfuhr nur etwa 70 W/m, ergeben eine Übertragungsleistung von maximal etwa 600 MVA. Eine weitere Steigerung dieser Leistung ist möglich bei *Zwangskühlung* oder bei *kleineren Verlusten* im Leiter, z. B. bei Kabeln mit Supraleitern.

Fig. 3 gibt die ungefähren Einsatzbereiche verschiedener Kabelbauarten an. Z. B. können mit Ölkabeln mit direkter äusserer Kühlung etwa 1000...2500 MVA übertragen werden. Diese Leistungen gelten nur angenähert, da sie je nach den Gegebenheiten der jeweiligen Kabelanlage variieren können. Erwähnt ist auch ein Kabel, dessen Leiter und Dielektrikum mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden. Hierdurch werden die Verluste im Leiter auf einen Zehntel derjenigen bei Zimmertemperatur herabgesetzt und ziemlich hohe Übertragungsleistungen erreicht. Da aber dieser Kabeltyp unwirtschaftlich erscheint, soll er hier nicht weiter behandelt werden.

3. Zwangskühlung

Mit der Zwangskühlung der Kabel wird die Grenze beseitigt, die sich bei natürlicher Wärmeabfuhr ergibt. Theoretisch könnten beliebig grosse Verlustleistungen aus dem Kabel abgeleitet werden. In der Praxis sind jedoch die abführbaren

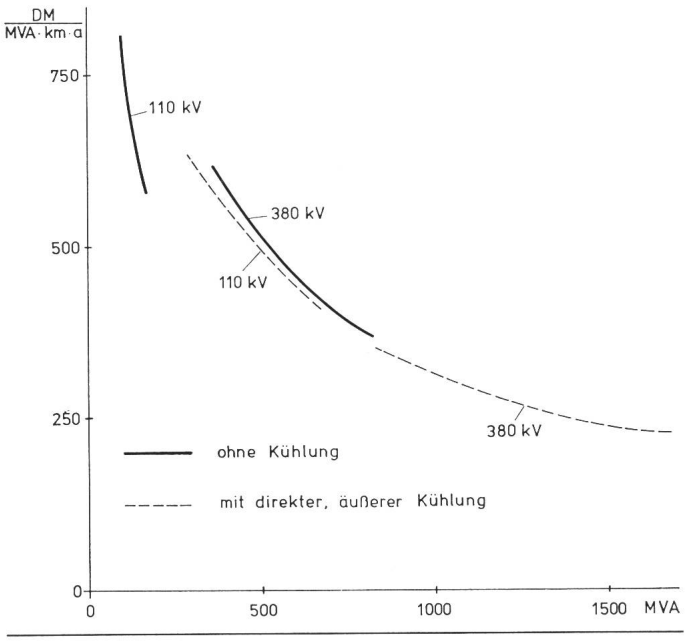


Fig. 1 Spezifische Übertragungskosten in Abhängigkeit von der übertragenen Leistung

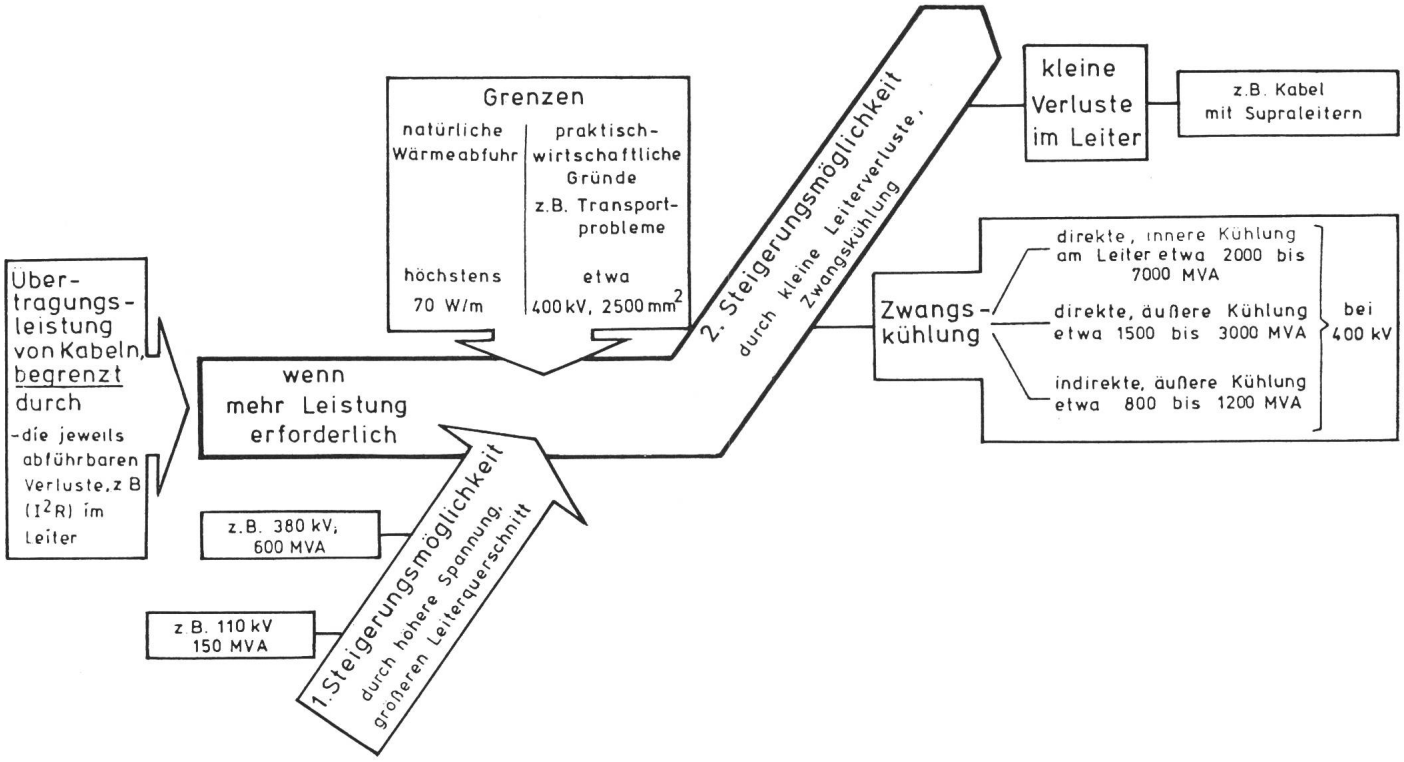


Fig. 2 Darstellung von Grenzen und Steigerungsmöglichkeiten der Übertragungsleistungen von Höchstspannungskabeln

Verluste begrenzt, da sie über kilometerlange Rohre Wärmeaustauschern zugeführt werden müssen; damit ergeben sich etwa die Übertragungsleistungen, die in den Fig. 2...4 jeweils angegeben sind.

Die Zwangskühlung bei Kabeln kann im wesentlichen auf einem der folgenden drei Wege erreicht werden:

- *indirekte,* äussere Kühlung,
- *direkte,* äussere Kühlung,
- direkte, *innere* Kühlung vom Leiter her.

Die letzte Kühlart ist die wirkungsvollste, da sie die Verlustwärme dort abführt, wo die Verluste entstehen, nämlich am Leiter; allerdings ist die Kühlung vom Leiter her auch die technisch aufwendigste.

Diese drei wichtigsten Arten der Zwangskühlung sind in Fig. 4 dargestellt, wobei das Aufbauprinzip, die ungefähre Grenze der Übertragungsleistung sowie einige wesentliche Vor- und Nachteile stichwortartig aufgeführt sind. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass bei allen Arten der Zwangskühlung der Einfluss aus der Kabelumgebung geringer ist als bei natürlicher Wärmeabgabe eines Kabels; diese Unabhängigkeit steigt von der indirekten, über die direkte bis zur Kühlung vom Leiter her an. Mit wachsender möglicher Übertragungsleistung, also in der oben genannten Reihenfolge, wird die Verkopplung von Kabel und Kühlsystem enger und damit wächst die Möglichkeit, dass Störungen aus dem Kühlsystem auf das Kabel übergreifen. Verglichen mit der Zwangskühlung ist bei natürlicher Kühlung die Überlastungsfähigkeit grösser, eine Reserve, die für die Praxis des Netzbetriebes Vorteile bringen kann. Fällt die Kühlung aus, so ist die zulässige Überlast bei direkter, äusserer Kühlung wegen der grossen Wärmekapazität des Wassers noch relativ hoch, bei der Kühlung vom Leiter her muss dagegen schon nach wenigen Minuten ohne Kühlung der Strom drastisch verringert werden; für die indirekte Kühlung kann eine mässige Überlastfähigkeit angenommen werden. Wie noch dargelegt wird, sind bei der Auswahl der Kühlart auch die Probleme an den Garnituren zu beachten.

Dies alles hat zur Folge, dass man im allgemeinen – und die bisherige Anwendung beweist es – die jeweils schwächste Kühlungsart vorsieht, bei der die gewünschte Leistung gerade noch übertragen werden kann.

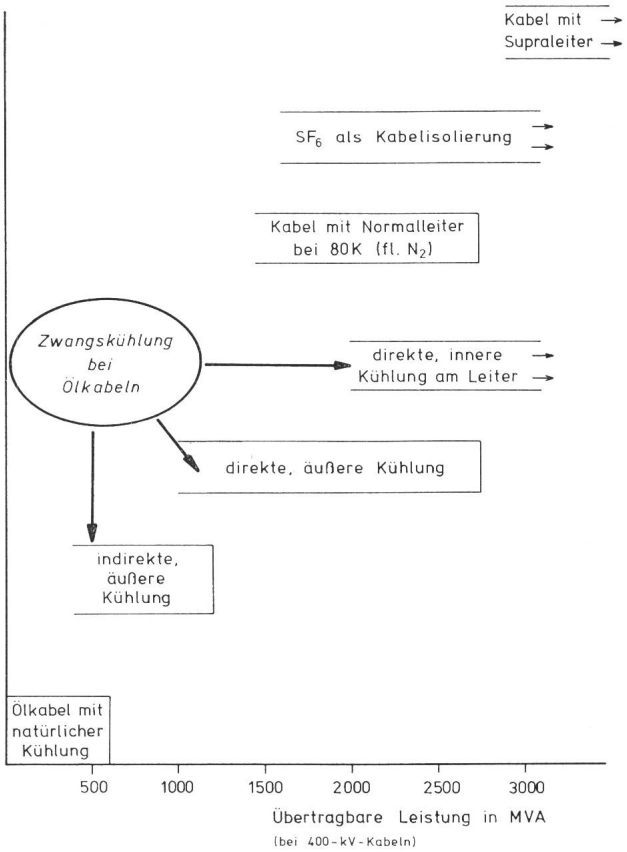


Fig. 3 Technisch bestimmte Einsatzbereiche verschiedener Kabelbauarten

4. Indirekte, äussere Kühlung

Wie Fig. 4 zeigt, werden bei dieser Art der Zwangskühlung 4 Rohre, z.B. aus hochdichtem PE (Polyäthylen) parallel zu den Kabeladern verlegt, meist in Material eingebettet, dessen spezifischer Wärmewiderstand stabil ist, d.h. auch bei Austrocknung niedrig bleibt. Damit werden einerseits Kabeladern und Rohre in ihrer gegenseitigen Lage fixiert und anderseits wird eine definierte Grösse der Wärmeableitung, unabhängig vom zufälligen Feuchtegehalt der Betonumhüllung, erreicht. Wie die Kennzeichnung als «indirekte» Kühlung aussagt, fliesst ein Teil der Wärme vom Kabel über den Magerbeton ab, der zwischen Kabel und Kühlrohr liegt. Damit wird einerseits die Menge der abführbaren Verlustleistung begrenzt; anderseits sind Kabel und Kühlrohre räumlich getrennt und können bei wechselnder Last unabhängig voneinander auf die resultierenden mechanischen Kräfte reagieren. Auch ist die Kühlung der Garnituren, wenn überhaupt nötig, einfacher als bei der direkten, äusseren Kühlung.

Mit indirekter, äusserer Kühlung wird zurzeit ein 400-kV-Kabel bei den Stadtwerken Wien ausgeführt. Fig. 5 zeigt einen Grabenabschnitt mit den Kabeladern und den 4 Rohren für das Kühlwasser.

Kabeltyp	NÖKLD2Y 231/400 kV
Leiterquerschnitt	$3 \times 1 \times 1200$ mm² Cu
	12 mm Hohlkanal
Millikenleiter	6 Segmente, ⌀ 47 mm
Isolierung	23,6 mm, ⌀ 97 mm
Aluminiummantel, gewellt	3,4 mm dick
PE-Aussenmantel	4,8 mm dick, ⌀ 130 mm
Masse pro m	25 kg
Übertragungsleistung	ca. 1030 MVA

4 Rohre aus hochdichtem PE (lichte Weite 82 mm, Wanddicke 14 mm) führen die Verlustleistung des Kabels von ca. 130 W/m ab. Die relativ dicken Aluminiummäntel sind ca. alle 300 m elektrisch ausgekreuzt (cross bonding), um die Verluste in ihnen gering zu halten. Die Verlegung und die Montage dieses Kabels haben begonnen; die Anlage soll 1979 in Betrieb genommen werden.

5. Direkte, äussere Kühlung

Aus Fig. 4 ist zu entnehmen, dass bei dieser Kühlart die Kabel direkt vom Kühlwasser umflossen werden, sei es in offenen Trögen (oberer Teil der Skizze) oder in geschlossenen Rohren (unterer Teil der Skizze). Die Kühlwirkung ist beträchtlich. In den Trögen oder Rohren können sich die Kabeladern entsprechend der Ausdehnung oder Zusammenziehung bei wechselnder Last in komplizierter Weise bewegen [4; 5]. Es muss beachtet werden, dass weder die Kühlrohre durch das sich aufbäumende Kabel beschädigt werden, noch umgekehrt die langsam wechselnde Schlängelung des Kabels im Rohr zu einer mechanischen Überbeanspruchung des Aluminiummantels führt. Die Literatur [4; 9] gibt dazu eine Fülle von Versuchsergebnissen und Hinweisen.

Die hohe Übertragungsleistung bei direkter, äusserer Kühlung erfordert im allgemeinen auch bei Muffen und Endverschlüssen eine Zwangskühlung, für die es verschiedene Möglichkeiten gibt, z.B.

– Oszillieren des Öls im Hohlkanal und damit Abfuhr der Verlustleistung aus den Garnituren in den Kabelleiter und dann radial über die Isolierung und die Mäntel in das Kühlwasser;

– Kühlung über Wassermäntel um die Muffe oder über Wasserrohre, die mit dem Muffengehäuse Wärmekontakt haben;

– Umwälzen des Öls im Endverschluss und äussere, getrennte Wärmeabfuhr über einen Wärmeaustauscher.

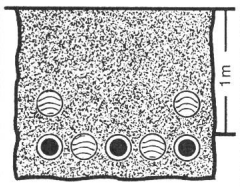
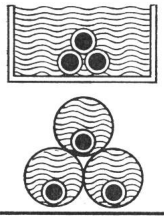
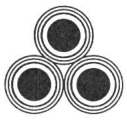
Aufbau	Übertragungsleistung	einige wesentliche Vorteile	einige wesentliche Nachteile
Indirekte Kühlung			
	bis ca. 1500 MVA	Kabel vom Kühlsystem völlig getrennt Kabel fest gebettet, dadurch Muffen von Krafteinwirkungen entlastet Technik erprobt	nur mäßige Erhöhung der Übertragungsleistung etwa das 1,5...1,7fache eines ungekühlten Systems
Direkte Kühlung			
	bis ca. 2500 MVA	Kabel noch vom Kühlsystem getrennt hohe Übertragungsleistungen Technik erprobt	Kabel kann sich im Kühlsystem bewegen Art und Aufbau des Kühlsystems wirken auf Konstruktion des Kabels und seine Montage
Kühlung vom Leiter her			
	bis ca. 5000 MVA	höchste Übertragungsleistungen bei Kühlung mit Wasser	unlöslicher Zusammenhang Kabel – Kühlung Aufwand zum Potentialabbau im Kühlmittel noch Entwicklungsarbeiten zu leisten, insbesondere für die Garnituren

Fig. 4 Arten der Zwangskühlung bei 400-kV-Kabeln

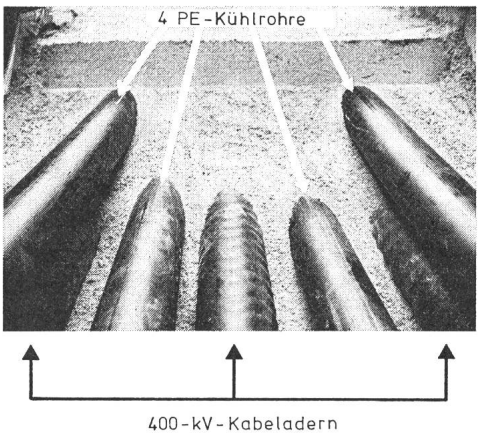


Fig. 5 400-kV-Kabel mit indirekter, äusserer Kühlung

In allen Fällen sind eine Reihe von Randbedingungen zu beachten; z.B. dass in den Muffen das Aussengehäuse wegen «cross bonding» mit Hilfe eines Isolierringes elektrisch aufgeteilt ist. Auch müssen die Muffen mechanisch festgelegt und der Übergang vom starren Muffengehäuse zum flexiblen Kabel passend ausgeführt sein. Auch ohne auf Details einzugehen, dürfte es verständlich sein, dass die höhere Kühleffektivität mit höherem technischem Aufwand erkauft wird, der seinerseits keine Störanfälligkeit bringen darf.

Ein Beispiel für die Anwendung der direkten, äusseren Kühlung sind die Kabel im Severntunnel in England [6]:

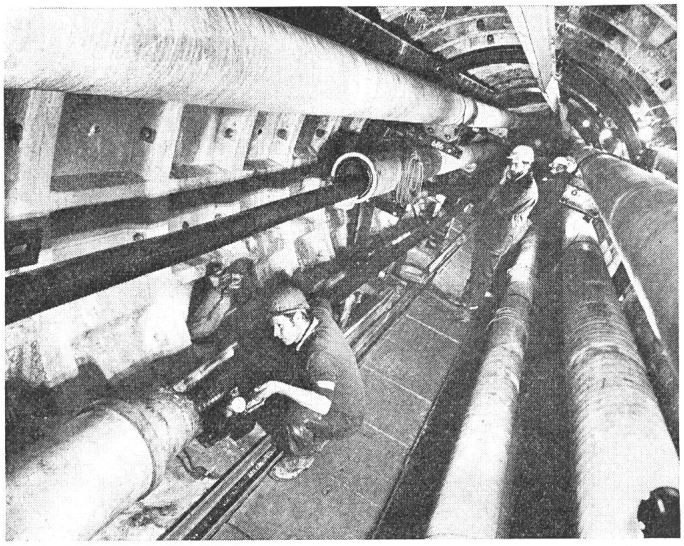


Fig. 6 2 Systeme 400-kV-Kabel mit direkter, äusserer Kühlung im Severntunnel
(Bild BICC Power Cables Ltd. Erith-Werk)

Kabeltyp	ÖKLD2Y 231/400 kV
Leiterquerschnitt	$3 \times 1 \times 2600$ mm² Cu, Hohlkanal 25 mm
Millikenleiter	6 Segmente, ⌀ 69 mm
Isolierung	20 mm
Aluminiummantel, gewellt	2,4 mm dick
PE-Aussenmantel	3,4 mm dick
Übertragungsleistung	ca. 2600 MVA

Diese Leistung wird allerdings nur für wenige Tage im Jahr erwartet und ist dann nur für 7,5 h zugelassen. In diesen Fällen wird im Leiter eine Temperatur von 100 °C erreicht. Fig. 6 gibt einen Einblick in den Tunnel und lässt 4 Kühlrohre sowie 2 Kabelstücke erkennen.

Eine weitere Kabelanlage mit direkter, äusserer Kühlung ist das 380-kV-Kabel, das in den letzten Jahren in Berlin erstellt wurde [7].

Kabeltyp	NÖKLDE2Y 231/400 kV
Leiterquerschnitt	$3 \times 1 \times 1200$ mm² Cu, 22 mm Hohlkanal
selbsttragender Hohlleiter	⌀ 46 mm
Isolierung	25 mm, ⌀ 96 mm
Aluminiummantel, gewellt	3 mm dick
PE-Mantel	4 mm dick, ⌀ 137 mm
Masse pro m	28 kg
Übertragungsleistung	ca. 1120 MVA

Bei dieser Anlage liegen die Kabeladern in Asbestzementrohren. Auch hier wird crossbonding verwendet. Das Wasser unter 6 bar Überdruck führt 160 W/m ab. Diese Anlage wird in Kürze eingeschaltet werden.

Die direkte Kühlung ist aber auch für weniger hohe Betriebsspannungen von Interesse. Seit September 1976 ist z. B. eine Anlage bei 30 kV mit folgenden Daten in Betrieb:

Kabeltyp	N2XSY 18/30 kV
Leiterquerschnitt	$3 \times 1 \times 400$ mm² Cu
Isolierung VPE	8,0 mm; ⌀ 42 mm
PE-Mantel	2,5 mm dick, ⌀ 52 mm
Masse pro m	5,2 kg
Übertragungsleistung	72 MVA

Die Kabeladern befinden sich in Rohren aus hochdichtem PE. Es wurden bei der Rohrinstallation weitgehend handelsübliche, standardisierte Fittings verwendet. Bei Vollast müssen ca. 170 W/m Verlustleistung pro Ader «weggekühlt» werden.

6. Direkte, innere Kühlung vom Leiter her

Wie erwähnt, ist es zweckmässig, die Verlustwärme, die im Kabelleiter entsteht, auch am Leiter abzuführen. Da bei Ölkabeln für Spannungen von 110 kV und höher stets im Leiter ein Kanal für das ab- und zufliessende Öl vorhanden ist – um bei Lastwechseln immer einen Öl-Überdruck in der Isolierung zu haben – lag es nahe, diesen Ölkanal zusätzlich zum Umlauf des Öls und damit zur Kühlung auszunützen [8]. Unter direkter, innerer Kühlung versteht man also das Umwälzen eines Kühlmittels durch den Hohlkanal des Leiters, wobei die abgeführte Verlustleistung mit Wärmeaustauschern in passenden Abständen an die Umgebung abgeführt wird. Analog der direkten, äusseren Kühlung tritt also das Problem auf, Verlustleistung in einem Kühlmittel über eine möglichst lange Strecke abzuleiten. Dies hat zur Folge, dass wegen des Strömungswiderstandes wesentlich grössere Durchmesser für den Ölkanal gewählt werden müssen, als man sie bei üblichen Ölkabeln verwendet [8]. Weiter lässt sich erkennen, dass u. a. die Viskosität und die spezifische Wärme des Kühlmittels für die praktische Dimensionierung des Hohlkanals bestimmend sind; übliches Ölkabelöl erweist sich als unzweckmässig. Es sind daher sehr dünnflüssige Isolieröle [8; 9] oder Wasser [10; 11] als Kühlmittel vorgeschlagen worden. Unabhängig vom Kühlmittel werden bei der Verlegung und Montage der innen gekühlten Kabel keine Kühlrohre benötigt. Dies erleichtert die Arbeiten, die andererseits auf die grossen Durchmesser und das hohe Gewicht Rücksicht nehmen müssen. Muffen und Endverschlüsse haben relativ einfache Konstruktionen; die Kühlaggregate müssen sehr leistungsfähig und ausserordentlich zuverlässig sein.

Innere Kühlung mit Isolieröl: Fig. 7 zeigt ein derartiges Kabel für 400 kV [9]:

Kabeltyp	ÖKLD2Y 231/400 kV
Leiterquerschnitt	$3 \times 1 \times 2000$ mm² Cu, 58 mm Hohlkanal
Millikenleiter	12 Segmente über einer Stützspirale
⌀ über Leiter	81 mm
Isolierung	22,3 mm
Bleimantel	4,3 mm dick
PE-Mantel	3,6 mm dick
Masse pro m	41 kg
Aussendurchmesser	ca. 143 mm
Übertragungsleistung	ca. 2200 MVA
maximaler Abstand der Kühlaggregate	ca. 1,4 km

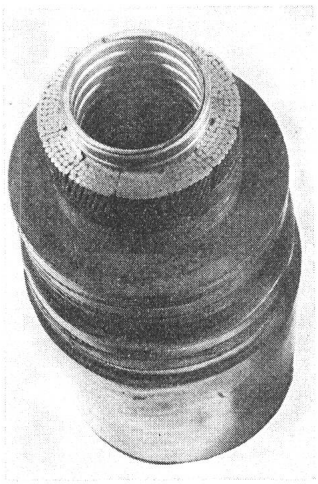


Fig. 7
400-kV-Kabel mit innerer, direkter Kühlung
(Bild BICC Power Cables Ltd. Erith-Werk)

Innere Kühlung mit Wasser: Die Kühlung mit Wasser im Kabelleiter hat Vorteile, da die Viskosität des Wassers niedrig und seine spezifische Wärme besonders hoch sind. Es lassen sich dann grosse Kühlstrecken, d.h. Abstände zwischen den Wärmeaustauschern erreichen, nach [9] etwa doppelt so lange Abstände wie bei Isolieröl als Kühlmittel, während [10] sogar etwa 3...4mal grössere Kühlstrecken angibt.

Das System mit Wasserkühlung und die damit zusammenhängenden Probleme bei der Entwicklung sind in der Literatur eingehend beschrieben worden [1; 10; 11]. Einige dieser Probleme sind

– Fertigung von biegbaren Rohren mit 80...120 mm Durchmesser, die bei Drücken bis 50 bar dauernd einwandfrei dicht sind und auch in jahrzehntelangem Betrieb keine Korrosion oder Erosion durch das strömende Wasser aufweisen [12; 13];

– Leiter, bestehend aus einem gepressten Aluminiumrohr, zusätzlichen trapezförmigen Drähten oder einem 2. Aluminiumrohr [12];

– Papierisolierungen geeignet aufgebaut bei Durchmessern zwischen etwa 80 und 160 mm;

– Muffen für die genannten Abmessungen und mit einwandfreier Abdichtung gegen das Kühlwasser;

– Überführung des Kühlwassers von Hochspannung auf das Erdpotential und umgekehrt [14]

– ggf. Sperrmuffen, um zu hohe Drücke im Wasserkreislauf oder im Isolieröl zu vermeiden.

Wenn diese Probleme und die damit zusammenhängenden Fertigungsfragen für die Kabelpraxis ausreichend gelöst sind und die erforderliche Betriebssicherheit erreicht und bewiesen ist, kann die Kühlung mit Wasser im Leiter eine wirtschaftlich günstige Kabelkonstruktion werden. Einzelheiten, insbesondere im Zusammenhang mit möglichen zukünftigen (1990 und später) Netzgestaltungen können [15] entnommen werden. Fig. 8 zeigt einen möglichen Querschnitt. Es gelten folgende Daten:

Kabeltyp	ÖKLDE2Y 64/110 kV
Leiterquerschnitt	$3 \times 1 \times 2200$ mm² Al
Durchmesser des Kühlkanals	30,5 mm
Leiterdurchmesser	64 mm
Aussendurchmesser	129 mm
Übertragungsleistung max.	600 MVA
bei Kühlstationsabstand	2 km
Druckdifferenz im Kanal	30 bar

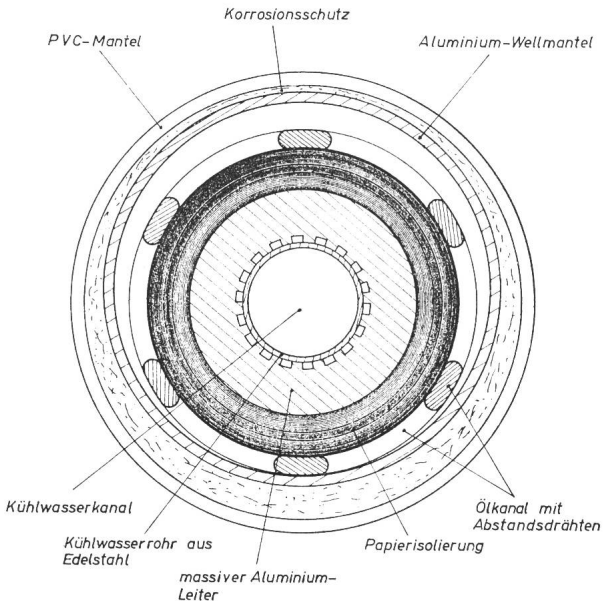


Fig. 8 Querschnitt eines 110-kV-Kabels mit innerer Wasserkühlung (Bild Felten & Guilleaume AG, Köln-Mülheim)

7. Übertragung von Gleichstrom

Kabel mit direkter, innerer Kühlung vom Leiter her – unabhängig davon, ob sie mit Isolieröl oder Wasser gekühlt werden – sind besonders geeignet für die Übertragung von Gleichstrom. Jede *äussere* Kühlung würde nämlich den bei Gleichspannung unerwünschten Temperaturgradienten über der Isolierung unzulässig vergrössern [9; 16] und dadurch die elektrische Feldverteilung ungünstig beeinflussen oder eine höhere Isolierwanddicke erfordern.

8. Hinweise zu den Kosten der Kabelanlage bei direkter, äusserer Kühlung

Zusätzlich zu den spezifischen Kosten von Kabeln mit natürlicher Kühlung sind in Fig. 1 auch die entsprechenden Kosten für den mittleren Fall der direkten, äusseren Zwangskühlung (dünn gestrichelte Kurvenzüge) dargestellt. Wieder sinken die spezifischen Kosten mit wachsender Übertragungsleistung; auch hat die Betriebsspannung 380 kV bei entsprechenden Leistungen eindeutige wirtschaftliche Vorteile gegenüber 110 kV. Im Leistungsbereich, für den die Zwangskühlung angewendet wird, ist sie kostengünstiger als Kabel mit natürlicher Kühlung. Bei gleichen Leistungen und 110 kV verursacht die Zwangskühlung höhere Kosten als eine ungekühlte Kabelanlage. Bei 380 kV und gleicher Übertragungsleistung sind gekühlte und ungekühlte Anlagen etwa kostengleich.

Bei weiterer Detaillierung derartiger Berechnungen [17] zeigt sich, dass es auch bei zwangsgekühlten Kabeln kostengünstiger ist, sie im allgemeinen nur mit etwa $^2/_3$ ihrer Maximallast zu betreiben, eine Erfahrung, die bei üblichen Kabeln schon lange bekannt ist. Dieses Ergebnis ist überlegungsmässig leicht zu verstehen. Bei niedrigen Leitertemperaturen und damit relativ hoher erforderlicher Kühlleistung steigen die Kosten für diese Aggregate stark an. Umgekehrt ergeben sich bei hohen Leitertemperaturen hohe Kosten für die grossen Verlustleistungen im Leiter. Es ist daher wirtschaftlicher, einen etwas grösseren Leiterquerschnitt zu verwenden, als für die vorgesehene Maximallast nötig wäre. Allerdings ist dies nur dann richtig, wenn die Grenzlast sehr häufig auftritt. Kommt diese Last nur im Störungsfall vor, so ergibt sich ein Betrieb in der Nähe des Kostenminimums mehr oder weniger von selbst.

9. Kabel mit Supraleitern

Für Leistungen über etwa 5000 MVA könnten in Zukunft Kabel mit Supraleitern interessant werden; allerdings ist noch nicht abzuschätzen, wann derartige Übertragungsleistungen über *ein* Kabelsystem in Europa benötigt werden. Entwicklungsarbeiten zu verschiedenen Varianten dieses Kabeltyps sind in [18; 19] beschrieben.

Literatur

[1] *H. Birnbreier* e.a.: Câbles à haute puissance à refroidissement intérieur ou extérieur par eau. Rapport CIGRE No 21–09 (1974).

[2] *P. V. Hunter* and *J. T. Hazell:* Development of power cables. London, Georges Newnes Ltd., 1956.

[3] *G. M. Lanfranconi, G. Maschio* and *E. Occhini:* Self-contained oil-filled cables for high power transmission in the 750–1200 kV range. IEEE Trans. PAS 93(1974)5, p. 1535...1545.

[4] *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.

[5] *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.

[6] *C. A. Arkell* a.o.: Design and construction of the 400 kV cable system for the Severn tunnel. Proc. IEE 124(1977)3, p. 303...316.

[7] *J. Krupski, G. Linke* und *E. Peschke:* Zwangskühlung von Einleiter-Ölkabeln bis 380 kV. Elektrizitätswirtsch. 74(1975)26, S. 934...941.

[8] *H. K. Beale* e.a.: Application de techniques de refroidissement forcé intense aux câbles à huile fluide et à leurs accessoires pour circuits de transport de forte puissance. Rapport CIGRE No 21–09 (1968).

[9] *C. A. Arkell, R. B. Hudson* and *J. A. Nicholson:* Development of internally oil-cooled cable systems. Proc. IEE 124(1977)3, p. 317...325.

[10] *W. Rasquin:* Grenzleistungen von Höchstspannungskabeln mit innerer Wasserkühlung. ETZ-A 95(1974)2, S. 65...68.

[11] *R. D. Steckel* und *E. Zimmermann:* Hochleistungskabel mit innerer Wasserkühlung. BBC-Nachrichten 58(1976)8, S. 321.

[12] *H. Brakelmann* und *W. Rasquin:* Leitergekühlte Hochleistungskabel mit Kühlwasserrohren aus Edelstahl. ETZ-A 97(1976)3, S. 148...152.

[13] *B. Schmidt* und *R. D. Steckel:* Korrosionsuntersuchungen an leitergekühlten Hochleistungskabeln mit Kühlwasserrohren aus Aluminium. ETZ-A 97(1976)3, S. 152...156.

[14] *J. Friedrich:* Endverschlüsse für leitergekühlte Hochleistungskabel. Wirkungsweise und Versuchserfahrungen. ETZ-A 98(1977)7, S. 485...487.

[15] Elektrische Hochleistungsübertragung und -verteilung in Verdichtungsräumen. Studie der Forschungsgemeinschaft für Hochspannung Mannheim-Rheinau, BMFT-ET 4042 A, Juni 1977.

[16] *W. Breilmann* und *H. W. Lücking:* Grenzleistung und Bemessung von HGÜ-Kabeln mit Leiterkühlung. ETZ-A 97(1976)7, S. 417...422.

[17] *H. Falke:* Contribution de discussion. CIGRE, Gr. 21, p. 40...41, 1974.

[18] *R. Bochenek* u.a.: Supraleitendes flexibles Hochleistungs-Gleichstromkabel. ETZ-B 26(1974)8/9, S. 215...219.

[19] *C. Bogner:* Transmission of electrical energy by superconducting cables. In: S. Foner and B. B. Schwartz: Superconducting machines and devices. Large systems applications. New York/London, Plenum Press 1974; p. 401...548.

Adresse des Autors

Dr. *Heinz Heumann,* AEG-KABEL, D-Mönchengladbach 2.

Hans Heinrich Weidmann 1851–1914

Weidmann AG:
Passbild auf der Dauerkarte zur LA 1914

Heinrich Weidmann, der Gründer des seinen Namen tragenden Unternehmens in Rapperswil, kam am 15. Dezember 1851 in Zürich als Sohn eines Metzgers und Viehhändlers zur Welt. Kaum der Schule entwachsen, musste er für den Vater Schaftransporte nach Lyon durchführen. Um Französisch zu lernen, blieb er ein Jahr dort. Nach einer kaufmännischen Lehre in einem Chemikaliengeschäft in Zürich arbeitete er nacheinander für ein Speditionsunternehmen in Venedig und für Seidenhäuser in Mailand und London. 1876 kehrte er in die Schweiz zurück, wo er in Stäfa die chemische Abteilung eines Betriebes betreute.

In Italien hatte er die Telegraphendirektoren von Mailand und Venedig kennengelernt, die ihm einige elektrotechnische Kenntnisse vermittelten. In Mailand besuchte er Chemievorlesungen, und während des Englandaufenthaltes bot sich ihm Gelegenheit, zahlreiche Industriebetriebe verschiedener Branchen zu besichtigen. Damals fasste er den Entschluss, eine eigene Kartonfabrik zu gründen.

Am 17. Januar 1877 ersteigerte er die Stadtmühle Rapperswil zum Preis von 66100 Franken und richtete darin seinen Betrieb ein. Er fand sofort Absatz für seine Produkte bei Buchbindern und in der Textilindustrie. Aber schon im ersten Jahr kam es zu argen Zwischenfällen. Zuerst richtete eine Feuersbrunst grossen Schaden an, und im Winter verstopfte sich bei einem Eisgang die Turbinenanlage, was zu einer Überschwemmung führte. Weidmann, der bei den Räumungsarbeiten tatkräftig mithalf, zog sich dabei ein hartnäckiges Gelenkleiden zu, das ihn bis an sein Lebensende quälte.

Der junge Unternehmer verstand sich gut in seinem Fach. Er verbesserte die Materialien und schuf neue Produkte. An den Landesausstellungen von 1883, 1896 und 1914 erhielt er für seine Produkte regelmässig Diplome. Neben Preßspan in Platten und Rollen stellte er aus selbstentwickelten Kunststoffen («Cornit», ein unter 200 t Druck gepresstes Gemisch von Asbest, Asphalt und Zement) Pressteile her, die vorwiegend für die Elektrobranche bestimmt waren, z. B. Schaltergriffe, Schalterkasten, Funkenlöscher, Magnetspulenkasten usw.

Weidmann musste die sich ihm stellenden Probleme ganz allein lösen. Dass ihm das in hohem Masse gelang, ist um so erstaunlicher, als er ja lediglich eine kaufmännische Lehre gemacht hatte. 1885 gründete er in Oberachern, nördlich von Offenbach, eine Fabrik zur Herstellung von Karton für die Schuhfabrikation. Er verkaufte diese dann um die Jahrhundertwende wieder und errichtete dafür in Gossau (ZH) ein Zweigunternehmen.

Weidmann war ein vertrauenerweckender, Achtung gebietender, sehr unternehmungsfreudiger Mann mit Humor. Seine knapp bemessene Freizeit verbrachte er gern im Zürcher Freundeskreis. Daher war er auf eine gewisse Mobilität angewiesen, wozu er schon früh ein Automobil anschaffte. Oft wohnte er im Haus an der Gerechtigkeitsgasse in Zürich, das ihm sein Vater hinterlassen hatte. Dort starb er auch nach einer langen Krankheit am 11. Oktober 1914.

Der unverheiratet gebliebene Weidmann verfügte in seinem Testament, dass $^1/_{10}$ seines Vermögens gemeinnützigen Zwecken, $^2/_{10}$ seinen Verwandten und $^7/_{10}$ seinen beiden Prokuristen zufalle, in der Meinung, dass diese das Geschäft in eine Aktiengesellschaft umwandeln und weiterbetreiben sollten. Als Folge des eben ausgebrochenen Krieges fielen aber die Auslandmärkte aus, und es entstanden grosse Schwierigkeiten. Erst Ing. H. Tschudi-Faud, der 1927 das Steuer in die Hand nahm, gelang es durch zähes Arbeiten und ausdauerndes Forschen, das Unternehmen zu neuer Blüte zu bringen.

H. Wüger