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: 70 (1979)

Heft: 13

Artikel: Erhöhung der Belastbarkeit konventioneller Kabel : Erfolge und Probleme

Autor: Wanser, G. / Wiznerowicz, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905394

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

Erhöhung der Belastbarkeit konventioneller Kabel – Erfolge und Probleme

von G. Wanser und F. Wiznerowicz

621.315.2:621.311.1;

Mit Kabeln sind immer grössere Leistungen zu übertragen. Die dafür zurzeit getroffenen Massnahmen werden referiert und vergleichend gegenübergestellt. Aufgrund der Berichte und Diskussionsbeiträge der CIGRE 1978 ergibt sich, dass eine Weiterentwicklung der bekannten Kabeltypen aus technischen und wirtschaftlichen Gründen die in den nächsten Jahren zu erwartenden Probleme optimal lösen kann. Neue Kabeltypen werden erst bei sehr grossen Übertragungsleistungen benötigt.

Des puissances de plus en plus grandes sont transportées par câbles. Les dispositions prises actuellement dans ce but sont indiquées et comparées. Selon les rapports et discussions à la Session de 1978 de la CIGRE, la poursuite du développement des types de câbles connus permettra de résoudre d'une façon optimale les problèmes qui se poseront ces prochaines années. De nouveaux types de câbles ne seront nécessaires que pour de très grandes puissances à transporter.

1. Einleitung

Die zunehmende Leistungsdichte in den Ballungszentren der Industrieländer bringt es mit sich, dass mit Kabeln immer grössere Leistungen übertragen werden müssen. Für Verteilerkabel, mehr jedoch noch für Übertragungskabel werden seit langem Überlegungen zur Erhöhung ihrer Belastbarkeit angestellt [1; 2; 3]. Probleme der Hochleistungsübertragung mit Kabeln wurden auf der Internationalen Hochspannungskonferenz 1978 (CIGRE) eingehend diskutiert. Die dort vorgelegten Berichte und Diskussionsbeiträge erlauben es, den Stand der Technik und der Entwicklung auf diesem Gebiet zusammenfassend und vergleichend darzustellen.

Fig. 1 zeigt die Möglichkeiten zur Erhöhung der Strombelastbarkeit. Der Übertragungsstrom lässt sich demnach vergrössern, wenn man den kapazitiven Ladestrom verringert, die zulässige Betriebstemperatur erhöht, die Wärmeabfuhr verbessert und/oder die Verluste in den Leitern und im Dielektrikum vermindert. Während die erstgenannten beiden Massnahmen die Anwendung neuer Isolierstoffe oder gar neuer Kabelbauarten erfordern, lassen sich die beiden anderen Massnahmen auch bei den heute eingeführten Kabeln anwenden und ermöglichen Problemlösungen in kleinen Schritten.

In den folgenden Abschnitten werden vor allem Massnahmen zur Verringerung und Abführung der Verluste bei Drehstromkabeln behandelt.

2. Verminderung der Verluste

Verluste treten im Kabel durch Stromwärme in den Leitern und als dielektrische Verluste in der Isolierung auf. Die Stromwärme im Innenleiter lässt sich entscheidend durch Tiefkühlung dieses Leiters verringern. Hierfür werden neue Kabeltypen, tiefgekühlte und Supraleiterkabel, entwickelt. Die Stromwärmeverluste im konzentrischen Schirm oder Kabelmantel sowie die dielektrischen Verluste lassen sich auch bei konventionellen Kabeln beeinflussen.

2.1 Verminderung der Verluste im Dielektrikum

Die Verluste im Dielektrikum sind proportional zur Kabelkapazität und damit zur Dielektrizitätszahl ε_r, zum Verlust-

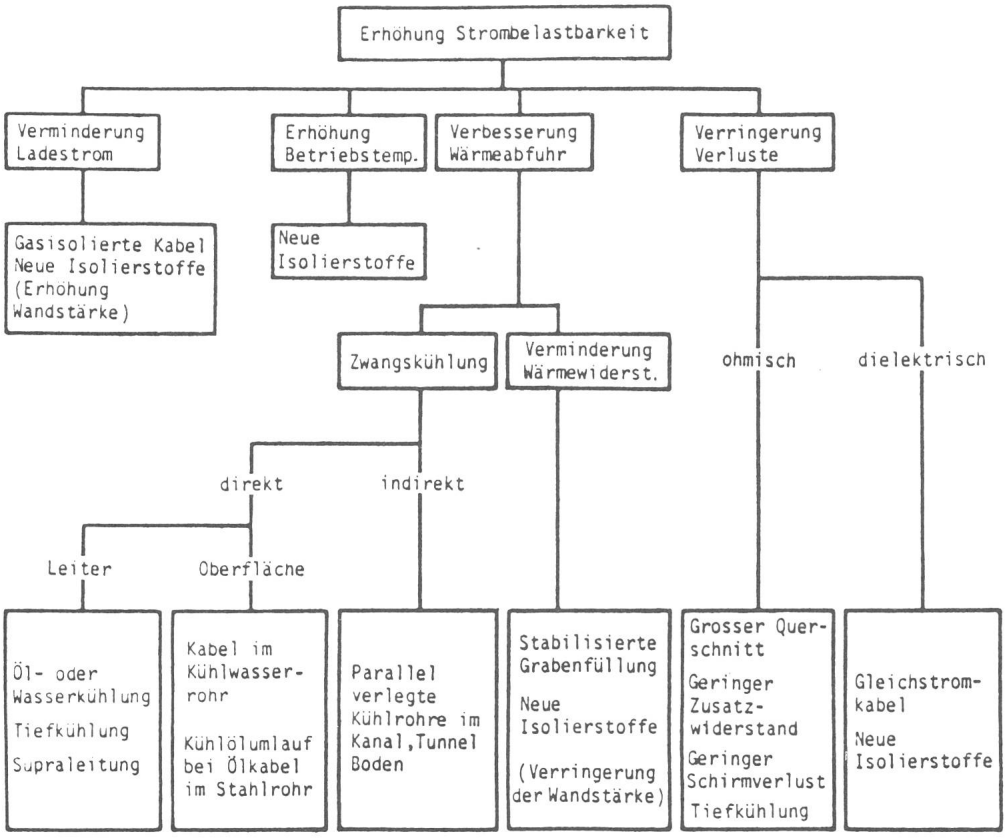

Fig. 1
Möglichkeiten zur Erhöhung der Strombelastbarkeit [4]

faktor $\tan\delta$ und zum Quadrat der Spannung U. Das Produkt $\varepsilon_r \tan\delta$ wird wegen der erwähnten Proportionalität auch Verlustziffer genannt. Eine typische Abhängigkeit ist in Fig. 2 dargestellt. Sie lässt erkennen, dass bei einer Spannung von etwa 1100 kV nur noch die dielektrischen Verluste durch die natürliche Kühlung eines erdverlegten Kabels abgeführt werden können. Zur Ableitung der Verluste im Leiter und Schirm ist eine Zwangskühlung nicht zu umgehen.

Zur Verminderung der dielektrischen Verluste sind seit längerer Zeit Kunststoff-Folien und kunststoffbeschichtetes Papier als verbesserter Isolierstoff ölimprägnierter Kabel im Gespräch. Die Verlustziffer lässt sich damit gegenüber dem Öl-Papier-Dielektrikum auf ein Drittel bis ein Zehntel verringern. Trotzdem wurde auch bei Versuchskabeln für 750 kV das Öl-Papier-Dielektrikum angewandt, weil dieses auch den sonstigen Anforderungen an einen Kabelisolierstoff am besten entspricht: die mechanischen Eigenschaften, die Imprägnierbarkeit und die Verträglichkeit mit Öl, die elektrische Festigkeit, die guten und wohlbekannten Alterungseigenschaften und nicht zuletzt auch die guten Bezugsmöglichkeiten zu einem angemessenen Preis. Für die Zukunft erscheinen weitere Entwicklungen an Papier-Folien-Laminaten aber trotzdem aussichtsreich [5].

Die Auswirkung einer niedrigen Verlustziffer auf die Kabelbelastbarkeit bei natürlicher Kabelkühlung ist aus der untersten Kurve in Fig. 3 erkennbar. Es zeigt sich, dass beim 750-kV-Kabel die übertragbare Leistung dadurch derartig steigt, dass man unter Umständen auf eine indirekte Kabelkühlung verzichten kann (*Arkell* [15]).

Eine kleinere Dielektrizitätszahl ε_r verringert neben den dielektrischen Verlusten auch die Kosten für die Blindleistungskompensation (*Lawson* [15]). Dieser Vorteil bleibt auch dann erhalten, wenn die dielektrische Verlustleistung die übertragbare Leistung kaum oder gar nicht beeinflusst, nämlich bei Anwendung der direkten Zwangskühlung (obere Kurven in Fig. 3) und bei Spannungen bis etwa 750 kV (Fig. 4).

Aus Fig. 2 und Fig. 4 kann man folgern, dass die Verminderung der Verlustziffer nur bei Kabeln mit Spannungen ab 750 kV eine nennenswerte Auswirkung auf die übertragbare

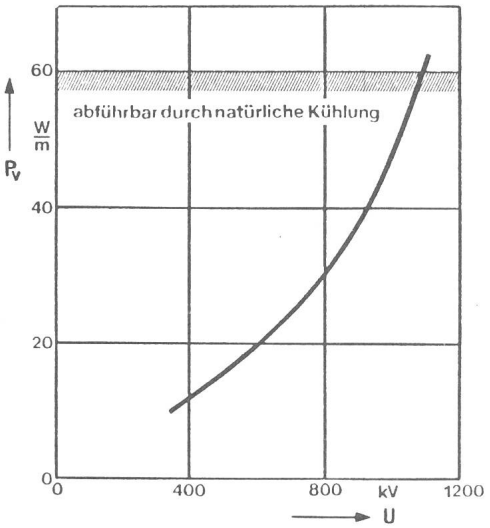

Fig. 2 **Dielektrische Verlustleistung P_v von Ölkabeln in Abhängigkeit von der Spannung U bei einem Leiterquerschnitt von 2000 mm² und einer Verlustziffer $\varepsilon_r \cdot \tan\delta = 6 \cdot 10^{-3}$ [5]**

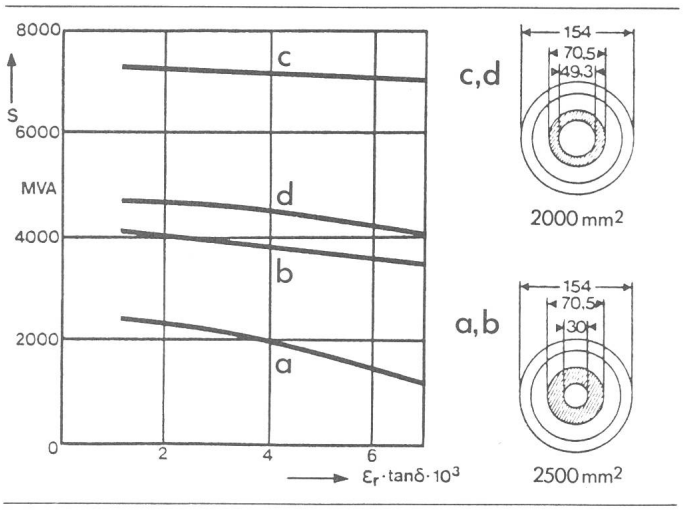

Fig. 3 **Übertragbare Leistung S mit 750-kV-Ölkabeln in Abhängigkeit von der Verlustziffer $\varepsilon_r \cdot \tan\delta$ [5]**

a Natürliche Kühlung
b Indirekte äussere Kühlung: $l = 10$ km
c Öl-Leiterkühlung: $l = 1$ km
d Öl-Leiterkühlung: $l = 2$ km
l Abstand der Kühlstationen

Leistung hat. Es ist jedoch umstritten, ob aus wirtschaftlicher Sicht überhaupt ein Bedarf für diese Kabel besteht. So kommen die Verfasser einer Studie [6] zu dem Ergebnis, dass auch beim Achtfachen der Last von 1970, also wahrscheinlich später als im Jahr 2000, die Übertragungsaufgaben im Verbundnetz mit 420 kV wirtschaftlich gelöst werden können. Eine höhere Spannung wäre erst dann zweckmässig, wenn die deutsche Elektrizitätswirtschaft entgegen ihrem Konzept gezwungen wäre, die Kraftwerke entfernt von den Verbrauchsräumen zu konzentrieren. Eine solche Konzentration hielt man auch bei der Diskussion über die Zukunft der elektrischen Leistungsübertragung nicht für wahrscheinlich [7]. In Brasilien, Grossbritannien und Italien sieht man allerdings Kabel für 750 kV und sogar in der Zukunft 1100 kV als notwendig an [5; 8]. In diesen Ländern und in Japan [4] wird die Entwicklung neuer Isolierstoffe für Ölkabel vorangetrieben.

Eine niedrige Dielektrizitätszahl und einen kleinen Verlustfaktor weisen vor allem Kabel mit Feststoffisolierungen auf. Erfahrungen liegen in Frankreich bis zu einer Spannung von 225 kV vor [9]. Die höhere Strombelastbarkeit wegen der geringen dielektrischen Verluste und des kleinen Blindleistungsbedarfes wird als einer der wesentlichen Vorteile dieses Kabeltypes angegeben (*Schwab* [15]).

2.2 Verminderung der Verluste im Mantel

Weitaus stärker als die dielektrischen Verluste fallen die Stromwärmeverluste im Mantel ins Gewicht. Dies zeigt Fig. 5 für 380-kV-Ölkabel. Die Verluste im äusseren koaxialen Leiter (Schirm- oder Mantelverluste genannt) stellen bei den für Hochleistungskabel üblichen grossen Querschnitten den grössten Anteil dar.

Zur Verringerung dieser Verluste trägt das bekannte Auskreuzen der Kabelmäntel bei. Es dient zur Verminderung der induzierten Ströme in den metallischen Mänteln und damit zur Erhöhung der Belastbarkeit. Bei einer in Japan entwickelten Variante (Fig. 6) werden die Mäntel an den Auskreuzmuffen zum Teil nicht direkt, sondern über Sättigungsdrosseln ver-

bunden. Ihr Scheinwiderstand vermindert den Mantelstrom weiter. Die Impedanz liegt im Normalbetrieb bei 1 Ω und ermöglicht eine Steigerung der Belastbarkeit um 10 % gegenüber dem üblichen Auskreuzen. Im Fehlerfall sinkt der Scheinwiderstand – z.B. bei einem Kurzschlußstrom von 25 kA auf weniger als 0,01 Ω – und sorgt für einen ausreichenden Reduktionsfaktor. Ähnliche Einrichtungen wurden auch in der Schweiz vorgeschlagen.

3. Abführung der Verluste

Neben den Massnahmen zur Verringerung der Verluste wird auch die Zwangskühlung der Kabel stetig weiterentwikkelt. Die Zwangskühlung von aussen wird bereits relativ häufig angewandt. Die direkte Kühlung des Leiters wird mehr und mehr beachtet [11].

3.1 Indirekte Kühlung

Bei der indirekten Kühlung wird die Verlustleistung durch parallel zum Kabel verlegte Kühlwasserrohre abgeführt. Die Wirksamkeit der Kühlung wird durch einen Vergleich der beiden unteren Kurven in Fig. 3 am Beispiel des 750-kV-Kabels gezeigt. *Arkell* [15] war allerdings der Meinung, dass die Kurve für die indirekte Kühlung in Fig. 3 um etwa 15 % zu hoch liegt.

Das Verfahren hat die Vorteile, dass der Kabelaufbau wie bei der natürlichen Kühlung erhalten bleibt, dass die Technik relativ anspruchslos ist und nur geringe Wartungs- und Betriebskosten verursacht, dass ein Ausfall der Kühlung nur eine Leistungsverminderung, aber kein Abschalten erfordert und dass die Kühlung selbst in schon fertige Trassen nachträglich eingebaut werden kann. Die indirekte Kabelkühlung wird in Japan und Grossbritannien bevorzugt angewandt [4; 12].

Bei der Kabelkonstruktion ist darauf zu achten, dass der thermische Widerstand des Kabels bei der indirekten Kühlung eine grössere Bedeutung hat als bei der natürlichen Kühlung [12], bei der die Wärmeableitung weit stärker durch den Wärmewiderstand des Erdbodens beeinflusst wird.

Der Wärmewiderstand R_{th} eines konzentrischen Kabels errechnet sich zu

$$R_{th} = \frac{1}{2\pi} \cdot \varrho_{th} \cdot \ln \frac{D}{d}$$

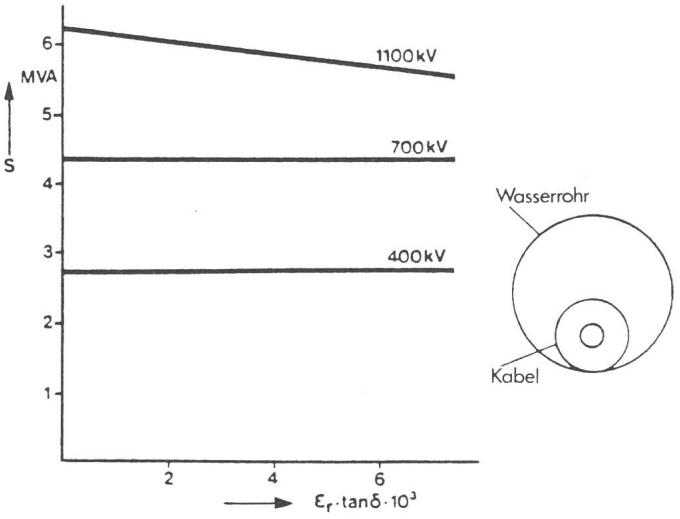

Fig. 4 Übertragbare Leistung S von Ölkabeln bei einem Leiterquerschnitt von 2500 mm² und Zwangskühlung von aussen in Abhängigkeit von der Verlustziffer [15]

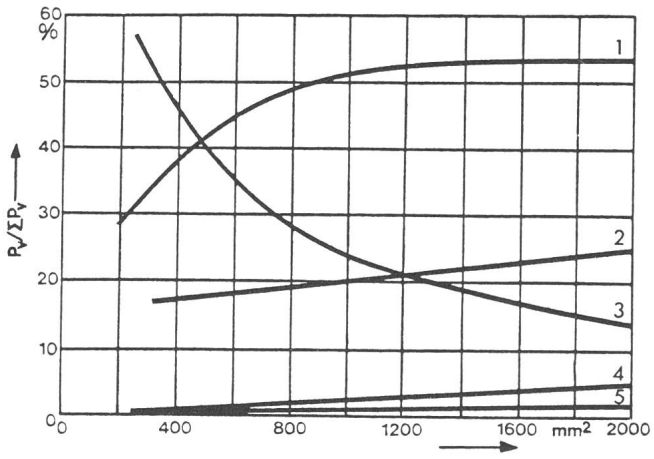

Fig. 5 Anteil der einzelnen Verlustkomponenten P_v an der gesamten Verlustleistung ΣP_v bei 380-kV-Ölkabeln in Abhängigkeit vom Leiterquerschnitt [10]

1 Schirmverluste
2 Dielektrische Verluste
3 Gleichstromverluste
4 Skin-Effekt-Verluste
5 Proximity-Effekt-Verluste

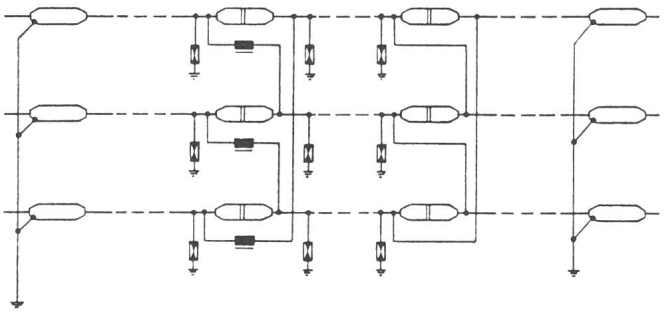

Fig. 6 Auskreuzen der Kabelmäntel mit Unterdrückung des Schirmstromes durch Sättigungsdrosseln [3]

mit ϱ_{th} spezifischer Wärmewiderstand der Isolierung, D Durchmesser über Isolierung, d Durchmesser über innerer Leitschicht. Ersetzt man in der Gleichung den Ausdruck $\ln D/d$ mit Hilfe der bekannten Beziehung zwischen der Feldstärke an der inneren Leitschicht E und der Spannung zwischen Innen- und Aussenleiter U_0

$$E = \frac{2\,U_0}{d \cdot \ln D/d}$$

so erhält man

$$R_{th} = \frac{1}{\pi} \cdot \varrho_{th} \frac{U_0}{E \cdot d}$$

Bei festliegenden Werten für ϱ_{th} und U_0 ist damit der Wärmewiderstand indirekt proportional zu $(E \cdot d)$. Durch Erhöhung der maximalen Feldstärke lässt sich also R_{th} verringern bzw. die Belastbarkeit erhöhen. Jedoch steigen dabei die dielektrischen Verluste P_d, da sie proportional zu $(E \cdot d)$ sind. Dies folgt aus

$$P_d = \text{const}_1 \cdot U_0^2 \cdot \frac{1}{\ln D/d} = \text{const}_2 \cdot U_0\, E \cdot d$$

Bei Hochspannungskabeln ist daher zu prüfen, ob eine durch Erhöhung der maximalen Feldstärke möglich erscheinende Steigerung der Strombelastbarkeit durch die zusätzlichen dielektrischen Verluste zunichte gemacht wird. Fig. 7

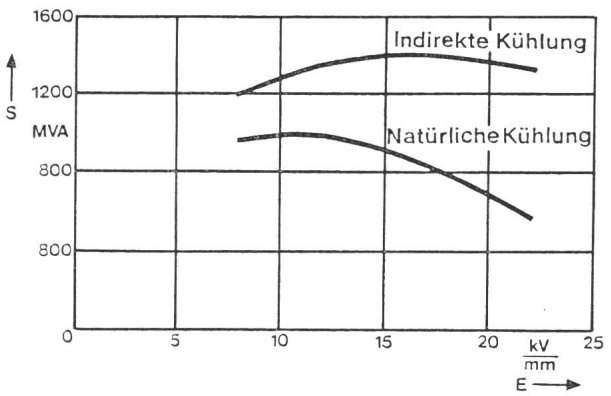

Fig. 7 Übertragbare Leistung S eines 400-kV-Kabels in Abhängigkeit von der maximalen Feldstärke E bei natürlicher und indirekter Kühlung [12]

Leiter: Querschnitt 2000 mm², Temperatur 85 °C
Erdboden: spez. Wärmewiderstand 1,5 km/W, Temperatur 15 °C
Kabel: Verlustfaktor tan δ = 0,0024,
Dielektrizitätszahl ε_r = 3,5

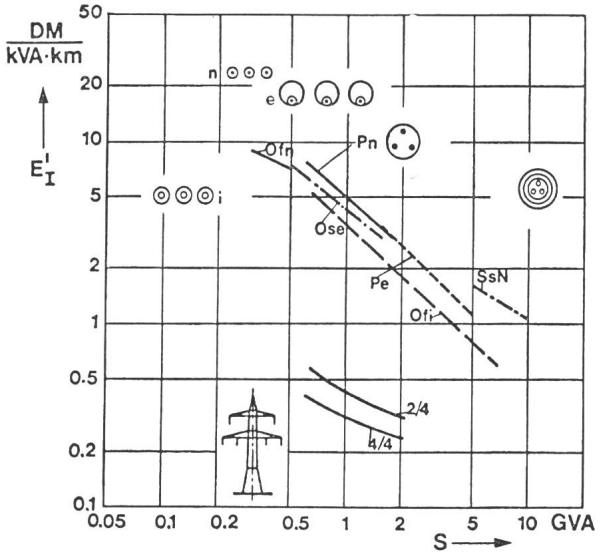

Fig. 8 Relative Gesamtinvestitionen für Kabel und Freileitungen bei 380-kV-Drehstrom [13]

Kabel:	Kühlung:
P SF_6-Rohrleiter	n natürlich
O Öl	e Wasserkühlung, aussen
S Supraleiter	i Wasserkühlung, innen
N Niob	Leitung:
f flexibel	Anzahl Stromkreise/
s halbflexibel	Teilleiter des Bündels

zeigt die Auswirkung der maximalen Feldstärke E auf die Belastbarkeit eines 400-kV-Kabels bei natürlicher und indirekter Kühlung. Es zeigt sich, dass die Kurve bei indirekter Kühlung weitaus flacher verläuft und ihr Maximum bei höherer Feldstärke erreicht, als dies bei natürlicher Kühlung der Fall ist.

Je schärfer von aussen zwangsgekühlt wird, d.h. je mehr der Wärmewiderstand des Kabels allein die Belastbarkeit bestimmt, desto stärker muss auch die Kühlung der Muffen beachtet werden. Diese haben im allgemeinen einen höheren Wärmewiderstand als das Kabel selbst [12]. Zur Muffenkühlung werden heute drei Möglichkeiten geboten (*Ball* [15]):

– Besonders geführte Kühlwasserrohre und Wärmebrücken zwischen Kühlwasserrohr und Muffengehäuse verhindern, dass die Temperatur in der Muffe um mehr als 5 K von der Temperatur des Kabelleiters abweicht. Da der Kühlwasserkreislauf vorhanden ist, entsteht zusätzlicher Aufwand nur durch die speziellen Kühlrohre und die Wärmebrücken. Dieser ist jedoch sehr hoch.

– Ölzirkulation oder -oszillieren im Hohlleiter ermöglicht ebenfalls eine gute Wärmeabfuhr aus der Muffe und ist erheblich kostengünstiger. Probleme entstehen allerdings bei Kabelstrecken mit mehreren Ölsektionen. Hier werden für jede Sektion Pumpen und Steuereinrichtungen benötigt, so dass die Wartungskosten ansteigen.

– Als neue Lösung des Problems werden Wärmerohre (heat pipe) im zentralen Ölkanal genannt. Sie leiten die Wärme aus der Muffe in die kühleren Kabelleiter ab. Das System wird zurzeit für Muffen (*Ball* [15]) und in ähnlicher Weise auch für Endverschlüsse (*Tempelaar* [15]) entwickelt.

3.2 Direkte Kühlung von aussen

Bei der direkten Kabelkühlung von aussen wird das Kabel innerhalb eines Kühlwasserrohres verlegt. Die prinzipielle Anordnung und die übertragbare Leistung sind der Fig. 4 zu entnehmen. Gegenüber der natürlichen Kühlung lässt sich die übertragbare Leistung etwa verdoppeln. Der Wärmewiderstand der Kabelisolierung und die Probleme der Garniturenkühlung fallen noch stärker ins Gewicht als bei der indirekten Kühlung, die Verlustziffer der Isolierung hat nur bei sehr hoher Spannung einen Einfluss auf die Belastbarkeit.

Dieses Kühlverfahren wurde bisher nicht nur für Ölkabel, sondern auch für ein normales 225-kV-PE-Kabel angewandt (*Royere* [15]). Über eine 2100 m lange Strecke in den Pyrenäen werden bei einem Leiterquerschnitt von 630 mm² Al 890 A (345 MVA) im Sommer und 1100 A (430 MVA) im Winter übertragen. Probleme bei diesem Kühlverfahren entstehen durch die thermomechanische Bewegung des Kabels im Kühlwasserrohr und bei der Abdichtung zwischen Kabel und Rohr am Ende der Kabelstrecke [3]. Auch die Druckfestigkeit und die Kosten der Rohrkrümmer sind noch nicht ganz zufriedenstellend.

3.3 Direkte Kühlung des Leiters

Die direkte Leiterkühlung mit einem Kabelkanal im Inneren des Leiters führt die Verluste von derjenigen Stelle ab, an der sie hauptsächlich entstehen. Tatsächlich ermöglicht sie die grösste Leistungssteigerung aller Kühlverfahren und bringt die Belastbarkeit konventioneller Kabel in den Bereich der gasisolierten Kabel. Fig. 3 zeigt diese Leistungssteigerung und lässt gleichzeitig den grossen Einfluss des Abstandes zwischen den Kühlstationen erkennen.

Wenn der Leiter mit Wasser gekühlt wird [13], lassen sich auch 400-kV-Kabel in den Leistungsbereich von 2 bis 7 GVA bringen. Ein Vorteil der Leiterkühlung ist die geringe Breite des Kabelgrabens: Bei drei nebeneinander verlegten 400-kV-Kabeln reicht für den genannten Leistungsbereich eine Breite von 2 m aus.

4. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Der Kostenanteil des Kühlsystems an den Gesamtkosten der Kabelanlage ist erheblich. Für eine Kabelstrecke wird bei 350 kV und 1200 MVA ein Kostenanteil der indirekten Kühlung von knapp 20 % angegeben [8]. Rein wirtschaftliche Argumente dürften daher wohl kaum für die Zwangskühlung sprechen. Soll jedoch die Übertragungsleistung der Kabel stark gesteigert werden, so bietet sich beim derzeitigen Stand der Technik auch aus wirtschaftlichen Gründen die Zwangskühlung an. Aus einer umfassenden Studie [14] ergibt sich, dass bei Wechselstromkabeln im Leistungsbereich von 100 bis 7000 MVA das Ölkabel die geringsten spezifischen Investitionen erfordert (Fig. 8). Das Ölkabel mit wassergekühltem Leiter ist den anderen Kabeln in wirtschaftlicher Hinsicht überlegen, aber natürlich erheblich teurer als die Freileitung. Auch bei höherer Spannung ändert sich diese Relation prinzipiell nicht.

Etwas kostengünstiger als Drehstromkabel liegen schon ab etwa 400 MW die Gleichstromkabel [14], deren Verwendung daher wohl zunehmen wird. Hier liegt im Bereich von 400 bis 1900 MW das natürlich gekühlte, gasisolierte Kabel günstiger als das Ölkabel mit direkter Wasserkühlung.

Bei den ganz hohen Leistungen um 10 GVA sind aus technischen und wirtschaftlichen Gründen gasisolierte Kabel und Supraleiterkabel in der Entwicklung. Welche Bauart sich durchsetzen wird, kann heute noch nicht beurteilt werden (*Flugum* [15]). Zurzeit wird jedoch die Steigerung der Übertragungsleistung noch eher durch Weiterentwicklung konventioneller Kabel und durch Zwangskühlung angestrebt als durch neue Kabeltypen.

Literatur

[1] *G. Wanser:* Energiekabel in Gegenwart und Zukunft. Elektrizitätswirtsch. 76(1977)5, S. 97...105.

[2] *G. Wanser* und *F. Wiznerowicz:* Cigré 1978. Aktuelle Kabelfragen auf der Internationalen Hochspannungskonferenz. Elektrizitätswirtsch. 77(1978)26, S. 912...919.

[3] *H. Heumann:* Die Übertragung sehr hoher Leistungen über Starkstromkabel. Bull. SEV/VSE 69(1978)4, S. 162...167.

[4] *T. Watanabe* et *H. Tsuda:* Developpement technique et exploitation des câbles sousterrains pour le transport de grandes puissances au Japon. Rapport Cigré No. 21-03, 1978.

[5] *E. Occhini* e.a.: Réseaux de transport à 750 et 1100 kV avec câbles à huile fluide. Type de construction et essais. Rapport Cigré No. 21-08, 1978.

[6] *H.-G. Busch* a.o.: Aspects de l'avenir du transport à très haute tension en courant altérnatif en Allemagne R.F. Analyses sur modèle. Rapport Cigré 31-13, 1978.

[7] Groupe 41: Avenir des transports et des réseaux d'énergie. Résumé des discussions. Cigré 1978.

[8] *C. Taralli, C.G. Soares* et *G.R. de Almeida:* Tendances modernes du transport sousterrain d'énergie électrique au Brésil. Rapport Cigré No. 21-04, 1978.

[9] *G. Bahder* e.a.: Mise au point de câbles extrudés pour application aux très hautes tensions dans la gamme 138-400 kV. Rapport Cigré No. 21-11, 1978.

[10] *J. Erb* a.o.: Comparison of advanced high power underground cable designs. Karlsruhe, Institut für Experimentelle Kernphysik des Kernforschungszentrums und der Universität Karlsruhe, 1975.

[11] *P. Gazzana-Priaroggia:* Rapport spécial du groupe 21 (Câbles à haute tension). Rapport Cigré No. 21-00, 1978.

[12] *C.A. Arkell* e.a.: Conception et installation de câbles à refroidissement lateral par eau. Rapport Cigré No. 21-01, 1978.

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

[14] *H. Becker* e.a.: Comparaison de différentes techniques pour le transport de grosses puissances électriques dans des zones fortement peuplées. Rapport Cigré No. 31-12, 1978.

[15] Groupe 21: Câbles à haute tension. Contributions de discussion. Cigré 1978.

Adressen der Autoren

Prof. Dr. *Gerhard Wanser*, Emil-von-Behring-Str. 32, D-3012 Langenhagen und Prof. Dr. *F. Wiznerowicz*, Vennweg 8, D-3000 Hannover 81.

Robert von Lieben 1878–1913

Technisches Museum für Industrie und Gewerbe, Wien

Robert von Lieben wurde in den Wohlstand einer geadelten Wiener Bankiersfamilie geboren (5. 9. 1878). Er war kein guter Schüler, nicht mangels Intelligenz, sondern weil er den Unterricht als Störung empfand, war er doch stets mit eigenen Problemen beschäftigt. Er besuchte das akademische Gymnasium und dann die Realschule, machte aber keine Abschlussprüfung. In dieser Zeit richtete er im väterlichen Landsitz die elektrische Beleuchtung ein. Gleich zu Beginn seines Militärdienstes verletzte er sich beim Sturz vom Pferd und wurde ausgemustert. Bei Siemens-Schuckert in Nürnberg absolvierte er darauf eine Werkstättenpraxis. Im Frühling 1899 zog er ans Institut für physikalische Chemie der Universität Göttingen zu Prof. Nernst, bei dem er Vorlesungen über Experimentalphysik hörte.

Um sich voll seinen Ideen und Erfindungen widmen zu können, richtete er sich dann in Wien ein eigenes Labor mit Werkstätte ein und sicherte sich die Mitarbeit von 3 Wissenschaftlern. Da beschäftigte er sich u.a. mit einer elektromagnetischen Kupplung für Autos, mit einem elektrolytischen Phonographen und daran anschliessend mit Problemen der Sprachwiedergabe. Daraus entstand sein Interesse am Telefon. Das ging so weit, dass er 1904 eine Telefonfabrik in Olmütz kaufte. Da ihn aber ein geregelter kaufmännischer Betrieb nicht zu fesseln vermochte, verkaufte er die Fabrik bald wieder.

Das Telefonieren auf grössere Distanzen war zu jener Zeit noch recht mangelhaft. Lieben suchte daher nach einer Möglichkeit, Telefonströme zu verstärken. Versuche mit Kathodenstrahlen, bei denen er ganze Nächte hindurch arbeitete, führten zu einem Kathodenstrahl-Relais. Sein erstes Patent aus dem Jahre 1906 betrifft diese als «Lieben-Röhre» bekannt gewordene Erfindung. Mit zwei Mitarbeitern entwickelte er die Apparatur weiter und entdeckte 1910 die Gitterwirkung, was dann zur elektronisch gesteuerten Gitterröhre führte (2. Lieben-Patent). Er machte diese Erfindung unabhängig und praktisch gleichzeitig wie der Amerikaner Lee de Forest. Er erkannte auch die grosse technische und wirtschaftliche Bedeutung seiner Entdeckung und sah einer gesicherten Zukunft entgegen. 1911 heiratete er eine erfolgreiche Schauspielerin. Aber dann stellten sich bald schwere Krankheitssymptome ein, und am 20. Februar 1913 erlag er dem heimtückischen Leiden. Bis zuletzt war er mit Prof. Nernst und dem Dichter Hugo von Hofmannsthal freundschaftlich verbunden.

Der frühe Tod dieses Mannes ist dafür verantwortlich, dass man später relativ wenig von seiner Erfinderleistung sprach. *H. Wüger*