

# Kabeltrassen mit zwangsbelüfteten Rohren : Steigerung des Wirkungsgrades in der Energieübertragung

Autor(en): **Brakelmann, Heinrich**

Objektyp: **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): **90 (1999)**

Heft 15

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-901961>

## **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.

# Kabeltrassen mit zwangsbelüfteten Rohren

## Steigerung des Wirkungsgrades in der Energieübertragung

Die Kühlung einer Kabeltrasse mit Luft kann auch über grössere Kühlabschnittslängen sehr wirkungsvoll sein, wenn Ventilatoren zur Unterstützung der natürlichen Luftumwälzung eingesetzt werden. Die Vorteile luftgekühlter Kabel liegen nicht nur in einer höheren Belastbarkeit, sondern auch in einer thermischen Entlastung des Bodens sowie in der Möglichkeit, die Verlustwärme des Kabels zu nutzen und damit letztlich den Wirkungsgrad der Energieübertragung zu erhöhen.

Thermisch ungünstige Bereiche in Kabeltrassen wie beispielsweise Kreuzungen mit anderen Kabeln, Strassenunterquerungen oder Häufungsbereiche bei Schaltstationen können die Leistungsfähigkeit des gesamten Stromnetzes einschränken. In [1] wurde nachgewiesen, dass die natürliche Luftumwälzung in im Kabelgraben verlegten Rohren zu einer wirksamen Kühlung der Kabel und damit zu einer Ertüchtigung der kritischen Bereiche führen kann, falls die Rohrenden

im Austausch mit der Umgebungsluft stehen und eine Kühlabschnittslänge von 30 bis 50 m nicht überschritten wird. Dieser Kühlmechanismus beruht auf den im Kabelgraben unweigerlich auftretenden Temperaturgradienten.

Im folgenden soll nun von einer forcierten Luftumwälzung in Kühlrohren ausgegangen werden. Es soll untersucht werden, inwieweit mit solchen Massnahmen Steigerungen der Kabelbelastbarkeiten auch bei grösseren Kühlabschnittslän-

gen möglich werden. Hierbei gibt es einige vielversprechende Aspekte:

- relativ einfache und kostengünstige Realisierbarkeit
- Senken und Nutzbarmachen der Übertragungsverluste
- gegebenenfalls autarker Betrieb der Anlage [2]
- thermische Entlastung des Bodens, Vermeidung von Bodenaustrocknung
- Einsparen einer thermischen Stabilisierung des Grabens
- Sicherstellen grosser Überlastbarkeiten

### Untersuchte Anordnung

Betrachtet wird ein 110-kV-Einleiter-VPE-Kabelsystem mit einem Kupferleiterquerschnitt von  $1000 \text{ mm}^2$ , dessen Adern in einer Tiefe von 1,5 m verlegt sind, und zwar entweder gebündelt oder aber in einer Einebenenordnung mit einem Achsabstand von 0,4 m. Das ungekühlte Kabelsystem weist unter den genannten Randbedingungen und Standard-Bodenbedingungen [3] Dauerbelastbarkeiten von 1026 A (195,5 MVA) bei Einebenenordnung und 884 A (168,4 MVA) bei gebündelter Anordnung auf.

Für das flachverlegte Kabel wird von einer Anordnung nach Bild 1 ausgegangen. In einem Kühlabschnitt der Länge  $l_0$  liegt in der Legetiefe  $h_v$  das betrachtete Kabelsystem. Zur thermischen Ertüchtigung seien parallel zu den Kabeladern vier (bzw. zwei) Kühlrohre gelegt (Ausendurchmesser 150 mm oder 200 mm, Wanddicke: 10 mm), die an den Abschnittsenden hoch zur Erdoberfläche geführt sind, was nach Bild 1 auch in einem gemeinsamen Rohr geschehen kann. In dieser Abbildung ist der linke vertikale Rohrabschnitt bis zur Erdoberfläche und der rechte vertikale Rohrabschnitt bis zu einer Auslasshöhe  $h_z$  über der Erdoberfläche geführt.

Dem umgebenden Grabenbereich werden spezifische Wärmewiderstände von  $1,0 \text{ K}^*\text{m}/\text{W}$  für feuchten Erdboden und von  $2,5 \text{ K}^*\text{m}/\text{W}$  für ausgetrockneten Erd-

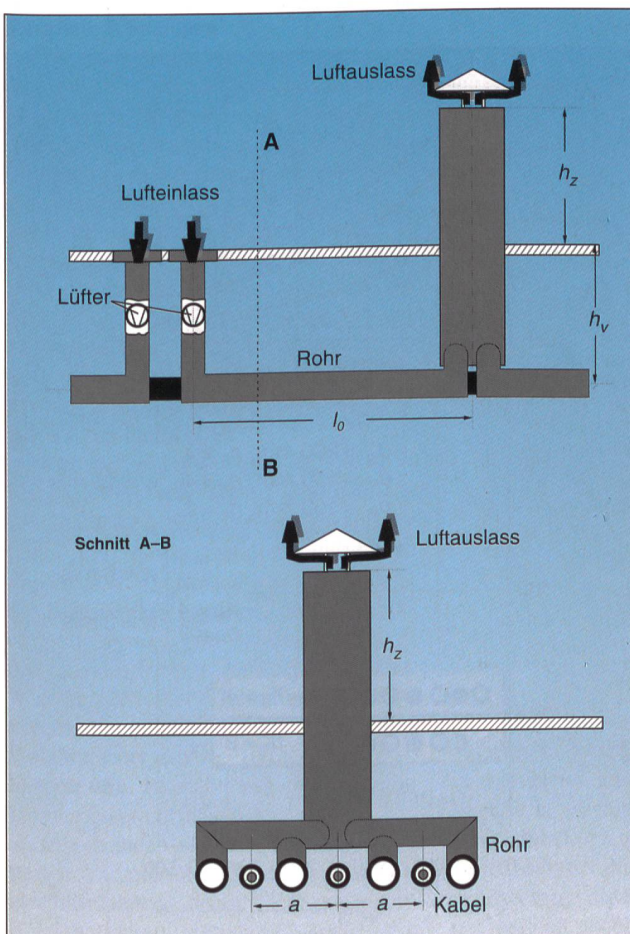


Bild 1 110-kV-VPE-Kabel ( $1000\text{-mm}^2$ -Kupferleiter) in Einebenenordnung mit vier belüfteten Kühlrohren

Oben: Seitenansicht, unten: vertikale Schnittebene A - B. Weitere Erläuterungen im Text.

#### Adresse des Autors

Prof. Dr.-Ing. Heinrich Brakelmann  
 Fachbereich Elektrotechnik, Gerhard-Mercator-Universität, D-47048 Duisburg

boden zugeordnet. Die Umgebungstemperatur des thermisch ungestörten Bodens beträgt maximal 20 °C [1], im Jahresmittel hingegen 11 °C. [1]

### Berechnungsmethode

Es wird davon ausgegangen, dass mit Hilfe von Lüftern in den einzelnen Kühlrohren oder auch im gemeinsamen Luft-einlassrohr eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit der Luft erzwungen wird. Legt man nach [2] über kurze Strecken im Bereich der Lüfter sogenannte Induktionsleiter (mehradrige Niederspannungskabel), die zu einer Schleife zusammengeschaltet werden, parallel zum 110-kV-Kabelsystem aus, so kann eine solche Schleife die für den Lüfterbetrieb erforderliche Leistung aus dem 110-kV-System beziehen, so dass ein autarker Betrieb des Kühlsystems möglich wird. Die Intensität der Luftströmung ist dann abhängig vom momentanen Laststrom im 110-kV-System. Alternativ kann eine Fremdversorgung vorgesehen werden, mit der zu jeder Zeit eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit vorgegeben werden kann.

Diese Strömung ist dadurch gekennzeichnet, dass die in einem Rohr mit konstanter Geschwindigkeit bewegte Luft längs der Trasse um eine Temperaturspanne  $\Delta\Theta$  erwärmt wird, so dass der linken vertikalen Luftsäule mit der Eintrittstemperatur  $\Theta_{\text{ein}}$  die rechte Luftsäule mit der Temperatur  $\Theta_{\text{aus}} = \Theta_{\text{ein}} + \Delta\Theta$  gegenübersteht.

Die von den Lüftern bewirkte Druckdifferenz  $\Delta p$  bewirkt eine Strömung der Luft mit der Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p \cdot d_i}{l_{\text{ges}} \cdot \rho(\bar{\Theta}) \cdot \lambda}} \quad (1)$$

wobei die Rohrlänge  $l_{\text{ges}} = l_0 + 2h_v + h_z$  ist,  $d_i$  lichter Rohrdurchmesser,  $\rho(\bar{\Theta})$  Dichte der Luft,  $\bar{\Theta}$  Lufttemperatur (Mittelwert für die Gesamtlänge) und  $\lambda$  Reibungsbeiwert der Luftströmung.

Die Bestimmung der Kabelbelastbarkeit erfolgt iterativ. Hierzu müssen bei vorgegebenem Laststrom die längs der Strecke von der Luftströmung aufgenommenen sowie die von den Kabeln und den Kühlrohren an die Umgebung abgegebenen Wärmeleistungen und die ortsabhängigen Temperaturverteilungen berücksichtigt werden. Ähnlich wie bei dem in [4, 5] beschriebenen Verfahren für die indirekte Wasserkühlung wird hierzu der betrachtete Trassenabschnitt in eine hinreichend grosse Anzahl von Unterabschnitten unterteilt. Für jeden dieser Abschnitte wird eine thermische Feld-

berechnung des Trassenquerschnitts vorgenommen. Eingangsgrößen sind dabei die Lufttemperaturen in allen Kühlrohren und die (temperaturabhängigen) Kabelverluste. Als Ergebnis erhält man nicht nur die Temperaturen im Trassenquerschnitt, sondern auch die Leitertemperaturen aller Kabeladern sowie die von den Kühlrohren aufgenommenen Verlustleistungsbeläge. Dieses Feldberechnungsverfahren basiert auf der Ersatzquellenmethode; es berücksichtigt die nicht-lineare Wärmeleitung des Bodens, die durch die partielle Bodenaustrocknung verursacht wird. [4, 6]

Zur Ermittlung der temperaturabhängigen Kenngrößen der Luftströmung, beispielsweise der durch Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung bestimmten Wärmeübergangswiderstände der Kühlrohre, der von der Luftdichte abhängigen spezifischen Wärmekapazität  $c_L$  der Luftsäule oder auch des Reibungsbeiwerts  $\lambda$ , sei auf die Literatur [7–9] verwiesen.

Aus dem berechneten Wert des am Ort  $x$  aufgenommenen Verlustleistungsbelags  $P'_R(x)$  eines Rohres kann dann die Erwärmung  $\Delta\Theta_L(x)$  der Luft längs des betrachteten Unterabschnitts der Länge  $\Delta x$  bestimmt werden:

$$\Delta\Theta_L(x) = P'_R(x) \cdot \Delta x / \left[ v \cdot \frac{\pi}{4} d_i^2 \cdot \rho \cdot c_L \right] \quad (2)$$

Mit dieser Formel kann in einem iterativen Verfahren die Lufttemperatur in allen folgenden Trassenabschnitten ermittelt werden.

$$\Theta_L(x+\Delta x) = \Theta_L(x) + \Delta\Theta_L(x) \quad (3)$$

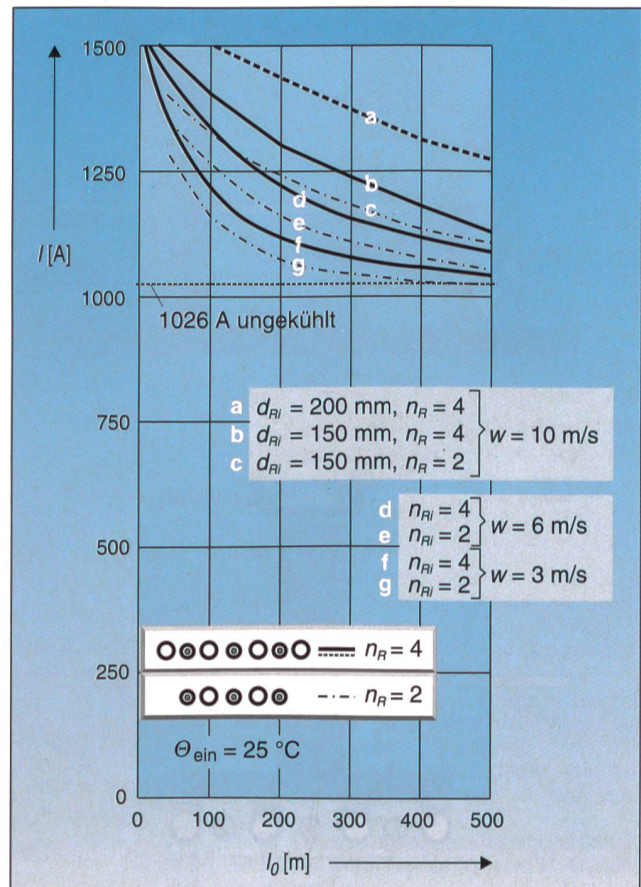
Am Abschnittsende erhält man die Luftaustrittstemperatur  $\Theta_{L,\text{aus}}$  sowie die maximalen Leitertemperaturen der Kabeladern. Dieser Rechenablauf wird bei Variation des Laststromes so lange wiederholt, bis in einer der Kabeladern gerade die höchstzulässige Leitertemperatur erreicht wird.

### Ergebnisse

Die beschriebene Berechnungsmethode und die im folgenden angegebenen Ergebnisse gehen von Dauerlastverhältnissen und damit auch von gleichbleibenden Randbedingungen aus. Dies ist gegenüber den tatsächlichen Verhältnissen in der betrachteten Anlage eine grobe Näherung, denn die von den Kühlrohren angesaugte Umgebungsluft ist jahres- und tageszeitlichen Veränderungen unterworfen. [1] Für Deutschland weist die Lufttemperatur einen Jahresmittelwert von 11 °C sowie Extremwerte ihres Tagesmittelwertes von 19 °C und 3 °C auf. In Abhängigkeit der Austauschverhältnisse an der Erdoberfläche, der Bodenei-

**Bild 2** Kabelbelastbarkeit (110-kV-VPE-Kabel) als Funktion der Kühlabschnittslänge  $l_0$

Kupferleiterquerschnitt 1000 mm<sup>2</sup>; Verlegetiefe 1,5 m. Achsabstand 0,4 m, Strömungsgeschwindigkeit  $w$ , Rohrlinnendurchmesser  $d_{Ri}$ , Kühlrohranzahl  $n_{Ri}$ , Luft-Eintrittstemperatur  $\Theta_{\text{ein}} = 25$  °C, Belastbarkeit des ungekühlten Kabels: 1026 A. Anordnung nach Bild 1



genschaften und der Tiefe des Kabelgrabens folgt die Bodentemperatur diesen Schwankungen mehr oder weniger abgeschwächt und zeitverzögert. Als Maximum wird Belastbarkeitsberechnungen oft 20°C zugrunde gelegt [3], der zeitliche Mittelwert im Kabelgraben ist in Deutschland ebenfalls bei etwa 11°C anzusetzen.

Eine vollständige Beschreibung des thermischen Verhaltens dieser Anlage würde daher die Berücksichtigung der zeitabhängigen und nichtlinearen Feldverhältnisse erfordern. Unterschiedliche jahres- und tageszeitliche Entwicklungen der Kabelbelastung, der Aussenlufttemperatur und der Bodentemperaturen müssten untersucht werden. Hierauf soll im folgenden jedoch verzichtet werden. Vielmehr soll eine Abschätzung der Möglichkeiten einer solchen Anlage zur sicheren Seite hin vorgenommen werden, indem beispielsweise die auftretende Höchstlast des Kabels zeitgleich mit den höchstmöglichen Aussenluft- und Bodentemperaturen betrachtet wird und zusätzlich vorausgesetzt wird, dass diese ungünstigen Verhältnisse lange Zeit anstehen, die Kabelumgebung also nicht durch die vorangegangenen Kühlphasen vorgekühlt in die Höchstlastsituation eintritt.

**Parallele Kühlrohre**

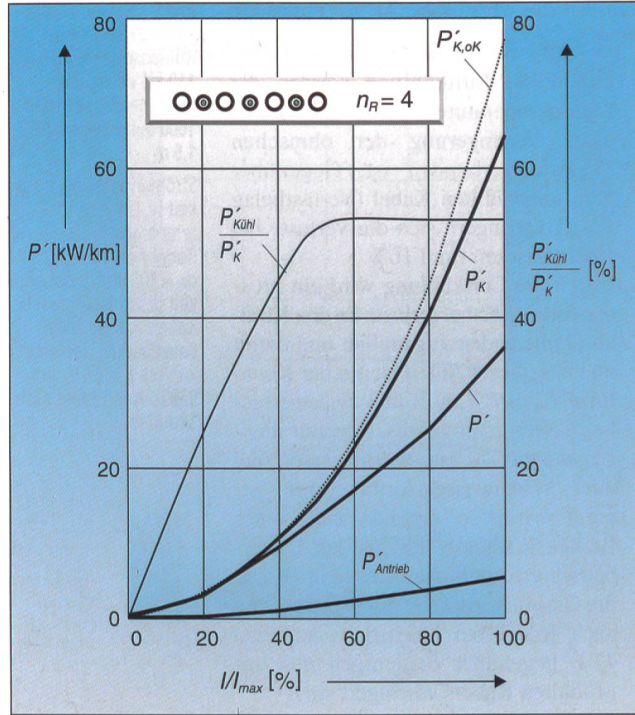
Für die getroffenen Voraussetzungen und eine Anordnung nach Bild 1 sind in Bild 2 die Kabelbelastbarkeiten als Funktion der Kühlabschnittslänge  $l_0$  mit der Strömungsgeschwindigkeit als Parameter wiedergegeben, wobei eine dauernd gegebene Lufteintrittstemperatur von 25°C vorausgesetzt wird. Bei einem Rohrendurchmesser von 150 mm, der den unteren sechs Kennlinien zugrunde liegt, ergeben sich selbst für diese hohe Lufteintrittstemperatur spürbare Belastbarkeitssteigerungen bei Kühlabschnittslängen von einigen 100 m.

Wird bei einem Abstand der 110-kV-Kabelmuffen von 400 m die Kühlabschnittslänge  $l_0$  ebenso gross gewählt, so kann bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 10 m/s und vier Kühlrohren die Belastbarkeit noch um rund 16% gesteigert werden (im Jahresmittel liegt diese Belastbarkeit wesentlich höher). Wie die gestrichelte Kennlinie für einen vergrößerten Rohrendurchmesser von 200 mm (vier Rohre, 10 m/s) ausweist, hängen die Belastbarkeiten sehr vom Durchmesser der Kühlrohre ab.

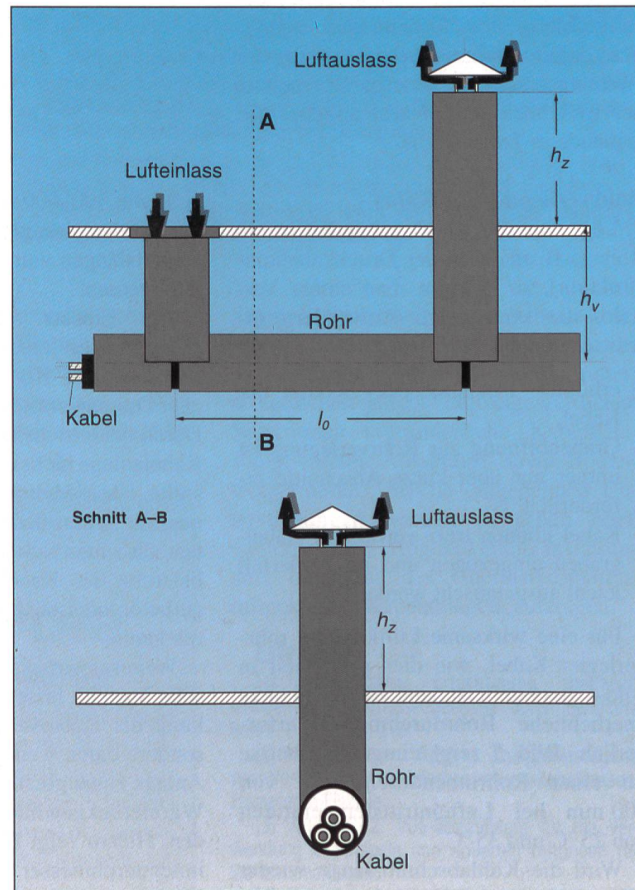
Zu erwähnen ist, dass bei der diskutierten Variante (Muffenabstand = Kühlabschnittslänge) neben den genannten Belastbarkeitssteigerungen auch das

**Bild 3** Anteil  $P'_{Kühl}/P'_K$  der vom Kühlsystem abgeführten an den gesamten Verlusten (rechte Achse) und verschiedene Verlustbeläge (linke Achse)

$P'_{K,oK}$  Verlustbelag des ungekühlten Kabelsystems (77 kW/km),  $P'_K$  Verlustbelag des gekühlten Kabelsystems bei  $I_{max} = 1020$  A,  $P'_{Antrieb}$  Verlustbelag des Lüftungssystems (Antriebsleistung),  $P'$  Verlustbelag des Gesamtsystems bei Nutzung von  $P'_{Kühl}$  als Funktion des Laststroms ( $I_{max} = 1020$  A), Kühlabschnittslänge  $l_0 = 400$  m, optimierte Strömungsgeschwindigkeit mit  $w_{max} = w(I_{max}) = 10$  m/s,  $\theta_{ein} = 11^\circ\text{C}$



**Bild 4** Hochspannungskabelanlage mit gebündelt im Kühlrohr verlegtem 110-kV-VPE-Kabel (1000-mm<sup>2</sup>-Kupferleiter). Weitere Erläuterungen im Text



«Hot spot»-Problem erhöhter Muffentemperaturen gelöst wird, da sich die Muffen in diesem Fall immer in einem Kühlrohrbereich mit der niedrigen Lufteintrittstemperatur befinden und damit intensiver als die Kabeladern im Lufteintrittsbereich gekühlt werden.

Zwei wesentliche Vorteile zwangsgekühlter Kabelanlagen verdeutlicht Bild 3 für eine Kühlabschnittslänge von 400 m, für vier Kühlrohre und eine maximale Strömungsgeschwindigkeit der Luft von 10 m/s. In diesem Beispiel wird für die Lufteintrittstemperatur der

Jahresmittelwert von 11 °C zugrunde gelegt.

- Durch die Luftkühlung werden die Leitertemperaturen gesenkt, was mit einer Verringerung der ohmschen Verluste verbunden ist. Gegenüber dem ungekühlten Kabel (Verlustbelag  $P'_{K,oK}$ ) verringern sich die Verluste bei Höchstlast um rund 16%.
- Durch die Luftkühlung wird ein grosser Teil der Kabelverluste an den Kühlabschnittsenden zugänglich und damit nutzbar (dieser Anteil ist mit der Kennlinie  $P'_{Kühl}/P'_K$  in Bild 3 wiedergegeben). Setzt man voraus, dass nur diese Leistung  $P'_{Kühl}$  zur Wärmeversorgung oder Warmwasser-Aufbereitung genutzt wird, so ergeben sich unter Berücksichtigung der für den Lüfterbetrieb erforderlichen Leistung  $P'_{Antrieb}$  die Gesamtverluste  $P'$  des Systems, die nach Bild 3 bei Höchstlast auf etwa 47% gegenüber denjenigen des ungekühlten Kabels verringert sind.

Die beschriebene Massnahme der Luftkühlung von Kabelgräben ermöglicht damit spürbare Verbesserungen des Wirkungsgrades der Energieübertragung bei gleichzeitigem Wärmeangebot für Gebäude in Trassennähe.

### Rohrverlegung der Kabel

Legt man die Kabel gebündelt in ein Rohr (z.B. in Form der Druckkabelkonstruktion), so gewinnt man einige Vorteile, die von vielen Anwendern erwünscht sind:

- erhöhter mechanischer Schutz der Kabel,
- Grabenöffnung zur Rohrverlegung ist immer nur über kurze Abschnitte erforderlich.
- Kabel können trotz verfülltem Kabelgraben eingezogen und im Fehlerfall leicht ausgetauscht werden.

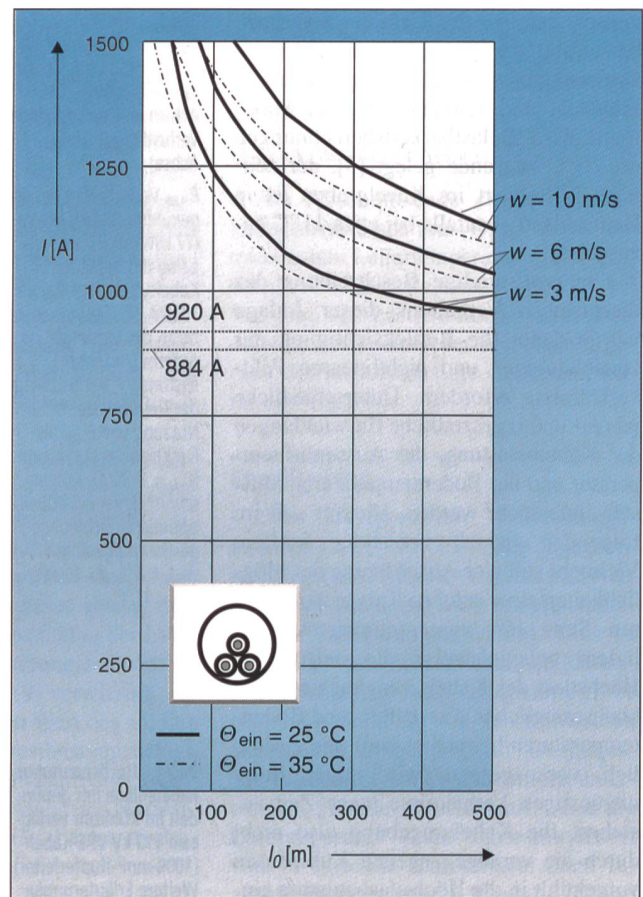
Für eine wirksame Luftkühlung rohrrerlegter Kabel, wie dies prinzipiell in Bild 4 dargestellt ist, sind allerdings nicht unerhebliche Rohrdurchmesser erforderlich. Bild 5 zeigt einige Ergebnisse für einen Rohrdurchmesser von 300 mm bei Luft Eintrittstemperaturen von 25 °C und 35 °C.

Wird die Kühlabschnittslänge wieder zu  $l_0 = 400$  m (= Muffenabstand) gewählt, so lassen sich gegenüber dem gebündelt in Erde liegenden Kabelsystem (884 A) Belastbarkeitssteigerungen bis zu 34% erzielen.

Die Abhängigkeit der möglichen Belastbarkeitssteigerung vom Innendurchmesser des Rohres zeigt Bild 6. Deutlich wird, dass bei grösseren Rohrdurchmes-

**Bild 5** Kabelbelastbarkeit als Funktion der Kühlabschnittslänge  $l_0$ , 110-kV-VPE-Kabel, Kupferleiterquerschnitt 1000 mm<sup>2</sup>, Verlegetiefe 1,5 m

Strömungsgeschwindigkeit  $w$ , Luft eintrittstemperatur  $\theta_{ein}$ , Rohrdurchmesser  $d_{ri} = 300$  mm, Belastbarkeit des ungekühlten Kabels in Erde 884 A, Belastbarkeit des ungekühlten Kabels im Rohr 920 A. Anordnung nach Bild 4



sern von 500–600 mm erhebliche Belastbarkeitssteigerungen selbst bei Kühlabschnittslängen von einigen 1000 m möglich werden.

Der Einsatz von Rohren solcher Durchmesser erscheint nicht unrealistisch, da der Kostenanteil handelsüblicher Drainagerohre aus Beton bei solchen Durchmessern an den Gesamtkosten der Kabelanlage nicht mehr als 10% betragen sollte. Diese Mehrkosten werden gegebenenfalls schon dadurch wieder aufgehoben, dass man sich eine thermische Stabilisierung des Kabelgrabens (durch Magerbeton oder ausgesuchte Sande) ersparen kann.

Weitere wirtschaftliche und ökologische Vorteile lassen sich durch die Senkung der Kabelverluste erzielen, insbesondere dann, wenn die in einer solchen Anlage zugänglichen Kabelverluste einer Wärmerückgewinnung zugeführt werden. Hierzu zeigt Bild 7 für einen Rohrdurchmesser von 500 mm, eine Kühlabschnittslänge von  $l_0 = 1000$  m und für den Jahresmittelwert der Luft eintrittstemperatur von 11 °C die Verlustreduktion gegenüber der ungekühlten Kabelanlage, wenn die mit der Kühlluft abgeführten Kabelverluste entweder zur Hälfte (strichpunktierte Kennlinien) oder aber vollständig (durchgezogene Kennlinien) genutzt werden. Die Verluste des Ge-

samtsystems lassen sich damit bis auf 32% reduzieren.

### Folgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Luftkühlung von Kabeltrassen auch über grössere Längen sehr wirkungsvoll sein kann und interessante Vorteile bietet. Diese Vorteile liegen nicht nur in einer Steigerung der Belastbarkeiten und der Überlastbarkeiten sowie der Entschärfung von «Hot spots», sondern auch in einer thermischen Entlastung des Bodens sowie in der Möglichkeit, die Verlustwärme des Kabels zu nutzen und damit letztlich den Wirkungsgrad der Energieübertragung zu erhöhen.

Die Realisierung eines solchen Kühlsystems erscheint wenig aufwendig:

- Kühlstationen sind nicht erforderlich.
- Bei Verwendung von Induktionsleiterkabeln [2] ist ein autarker Betrieb der Anlage möglich.
- Als Rohre zur Kühlung und zur Kabelverlegung (mit den bekannten Vorteilen der Rohrverlegung) könnten preisgünstige Betonrohre verwendet werden.
- Techniken der grabenlosen Verlegung (micro-tunneling) sind in Betracht zu ziehen.

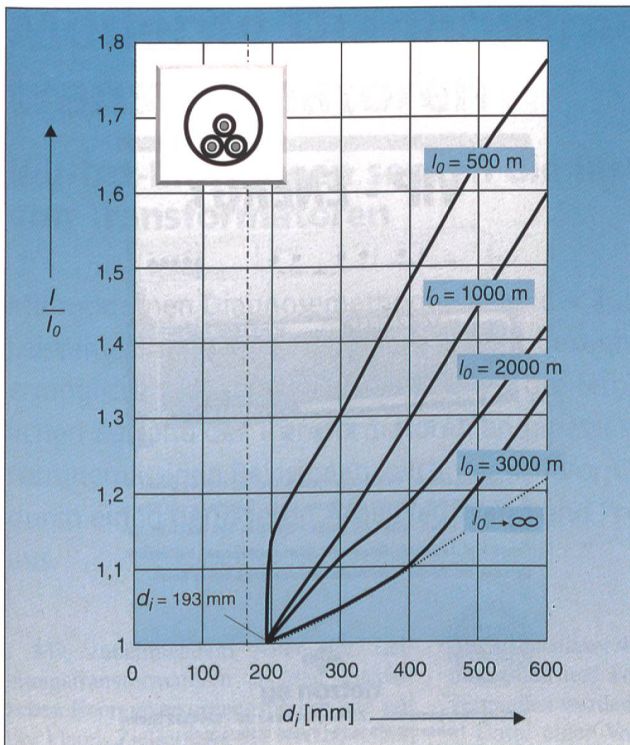


Bild 6 Kabelbelastbarkeit als Funktion des Rohrinneindurchmessers  $d_j$ , bezogen auf die Belastbarkeit des ungekühlten Kabels

Kühlabschnittslänge  $l_0$ , Strömungsgeschwindigkeit  $w = 10 \text{ m/s}$ ; Lufteintrittstemperatur  $\Theta_{\text{ein}} = 25^\circ\text{C}$ , gestrichelt: Belastbarkeit des ungekühlten Kabels im Rohr

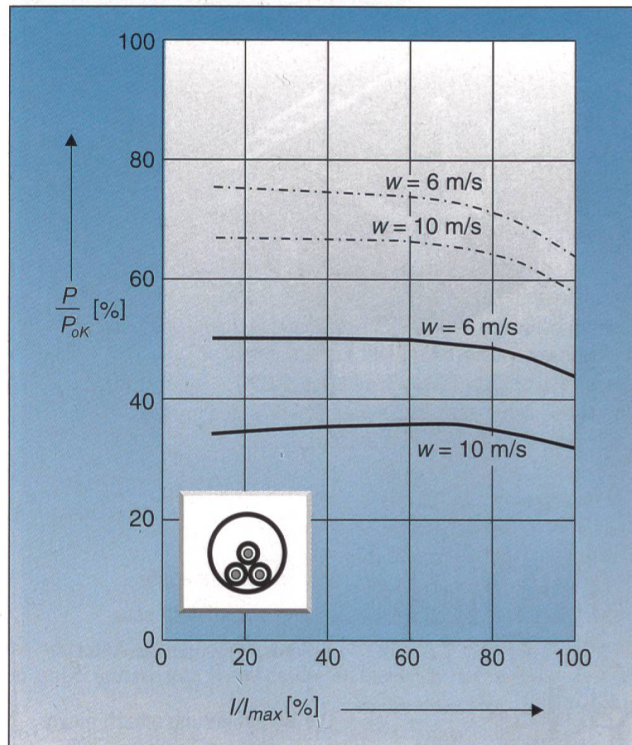


Bild 7 Verluste  $P$  des Gesamtsystems bei Wärmerückgewinnung, bezogen auf die Verluste  $P_{0K}$  des ungekühlten Kabels, als Funktion des bezogenen Laststroms ( $I_{\text{max}} = 1009 \text{ A}$  ohne Kühlung;  $P_{0K} = 73,3 \text{ kW}$ ), 110-kV-VPE-Kabel, Kupferleiterquerschnitt  $1000 \text{ mm}^2$ ; Verlegetiefe  $1,5 \text{ m}$ ; Anordnung nach Bild 4

Parameter: Strömungsgeschwindigkeit  $w$ , Kühlabschnittslänge  $l_0 = 1000 \text{ m}$ ; Rohrinneindurchmesser  $d_j = 500 \text{ mm}$ , Luft-Eintrittstemperatur  $\Theta_{\text{ein}} = 11^\circ\text{C}$ ; durchgezogene Kennlinien: vollständige Nutzung der vom Kühlsystem gelieferten Leistung  $P_{\text{kühl}}$ ; strichpunktierete Kennlinien: Nutzung von  $P_{\text{kühl}}/2$

Das Kühlsystem entzieht dem Kabelgraben auch in Schwachlastzeiten Wärme, wodurch sich Temperaturreserve für den Überlastfall oder für extreme hochsommerliche Lufttemperaturen ergeben.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden aus Gründen der Vereinfachung für die denkbar ungünstigsten Dauerlast-Randbedingungen vorgenommen. Weitergehende Betrachtungen der zeitabhän-

gigen Belastbarkeiten und Überlastbarkeiten erfordern die Berücksichtigung der nichtlinearen Feldverhältnisse in unterschiedlichen jahres- und tageszeitlichen Situationen (veränderliche Kabelbelastung, variable Aussenluft- sowie Bodentemperaturen). Solche eingehenden Untersuchungen werden sicherlich noch weitergehende Möglichkeiten, insbesondere bezüglich des Überlastverhaltens luftgekühlter Kabelanlagen, aufzeigen.

### Literatur

- [1] H. Brakelmann: Ertüchtigung thermisch schwieriger Kabeltrassenbereiche durch belüftete Rohre. Erscheint in ETZ.
- [2] H. Brakelmann: Autarke Energieversorgung von Verbrauchern in Hochspannungskabeltrassen. Erscheint in Elektrik.
- [3] VDE 0298 T2. VDE-Bestimmung für die Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen.
- [4] H. Brakelmann: Belastbarkeiten der Energiekabel. Berlin/Offenburg: VDE-Verlag 1985.
- [5] H. Brakelmann: Energietechnik programmiert. Berlin/Offenburg: VDE-Verlag 1989.
- [6] L. Heinhold: Kabel und Leitungen für Starkstrom. Siemens AG, Berlin/München 1987.
- [7] C. Ihle: Lüftungs- und Raumheizung, Bd. 3. Düsseldorf: Werner-Verlag 1977.
- [8] VDI-Wärmeatlas. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991.
- [9] Haubrich: Belüftete Kabelkanäle für unterirdische Hochleistungsübertragung. ETZ-A (1973), S. 147-152.

## Conduits de câbles en tubes à ventilation forcée

### Meilleur rendement dans la transmission d'énergie

Le refroidissement par air d'un conduit de câble, même sur des tronçons d'une certaine envergure, peut être très efficace si des ventilateurs renforcent la circulation naturelle de l'air. Les avantages de câbles refroidis par air ne résident pas seulement dans une charge admissible plus élevée mais également dans un délestage thermique du sol et dans la possibilité de mettre à profit la déperdition de chaleur pour augmenter, en fin de compte, le rendement de la transmission d'énergie. La mise en œuvre d'un tel système de refroidissement semble simple:

- Des stations de refroidissement ne sont pas nécessaires.
- En utilisant des câbles avec conducteurs à induction [2], l'installation peut être exploitée en autarcie.
- Comme tubes pour le refroidissement et la pose des câbles (à noter les avantages connus de la pose en tubes), on peut utiliser des tubes en béton peu onéreux.
- Il est judicieux de prendre en considération des techniques de pose sans fossé (micro-tunneling).



Ist es nicht  
besser,  
wenn man  
sich  
auf die  
Mess-  
resultate  
verlassen  
kann?

Der sich verändernde  
Energiemarkt stellt neue  
Anforderungen an die Anbieter.

Die Deregulierung schafft einen  
Käufermarkt. Der Käufer will, je  
nach Einsatzzeit, die für ihn opti-  
malste Stromqualität zum jeweils  
besten Preis.

Diese Stromqualität lässt sich  
präzise messen und verlässlich  
beweisen. Mit Produkten von  
LEM Instruments.



LEM Instruments Lösungen:  
Überwachung der Versorgungs-  
qualität im elektrischen  
Verteilnetz durch tragbare oder  
festinstallierte Messsysteme.

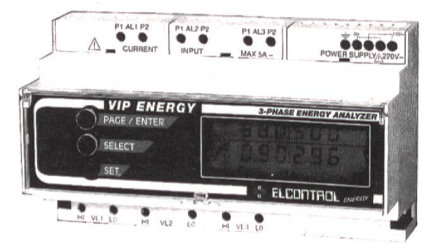
Verlässliche Messresultate?  
Fordern Sie ausführliche Unter-  
lagen an.

**LEM Instruments**  
ELMES • GOERZ • HEME • NORMA

Bahnhofstrasse 15 • CH-8808 Pfäffikon SZ  
Tel. 055-415 75 75 • Fax 055-415 75 55  
e-mail: lel@lem.com • www.lem.com



## VIP - ENERGY



Energieanalytoren VIP-Energy messen und registrieren genau: V, A, kW, kVar, kVA, cos-phi pro Phase + 3ph; Crestfaktor pro Phase; kWh, -kWh, -kVarh, -kVarh pro Phase + 3ph; max. kW, max. kVA 3ph; Datum und Tageszeit. Strom- und Spannungswandler frei wählbar. Optionen mit RS485 Schnittstellen und Ausgangs-Impuls-Relais.

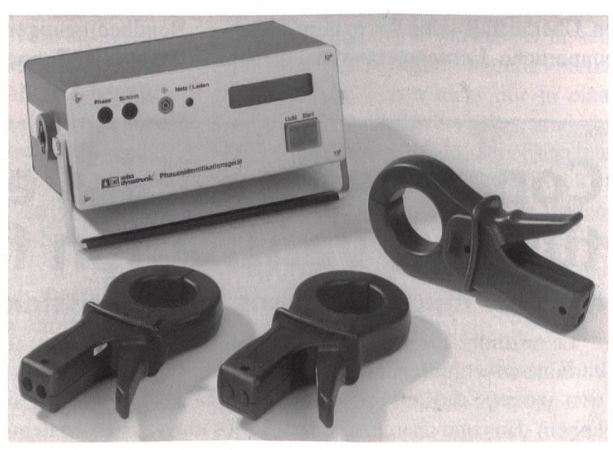


**detron ag**

Industriautomation - Zürcherstrasse 25 - CH4332 Stein  
Telefon 062-873 16 73 Telefax 062-873 22 10

## INTERSTAR

INTERSTAR AG • Alte Steinhausenstrasse 19 • 6330 Cham • Telefon 041 / 741 84 42 • Fax 041 / 741 84 66



**PIL 8 Phasenidentifikation  
für geerdete und  
kurzgeschlossene  
Mittelspannungskabel**

**INTERSTAR AG, Alte Steinhausenstrasse 19,  
6330 Cham, Telefon 041 741 84 42**