

**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:** 75 (1984)

**Heft:** 5

**Artikel:** Eigenkühlung : eine neue Kühlart von Kabeln

**Autor:** Hülsken, G. / Rasquin, W.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-904369>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 06.10.2024

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

# Eigenkühlung – eine neue Kühlart von Kabeln

G. Hülsken und W. Rasquin

*In einer umfangreichen rechnerischen Untersuchung wird gezeigt, dass Kabel, die für eine innere Wasserkühlung vorgesehen sind, auch ohne Kühlstationen und ohne Umwälzpumpen Leistungen übertragen können, die grösser als diejenigen bei natürlicher Kühlung sind, falls Gefällstrecken oder vertikale Steilstrecken in der Kabelanlage vorkommen. Da in einem derartigen Fall das Kabel die über die natürliche Kühlung hinausreichende Zusatzkühlung ohne Zwangsmassnahmen aus eigenem Vermögen heraus bewerkstelligt, wird diese Kühlung Eigenkühlung genannt.*

*Des calculs détaillés montrent que des câbles prévus pour refroidissement interne à eau peuvent transmettre de plus grandes puissances que ceux à refroidissement naturel, cela sans nécessiter des postes de refroidissement, ni des circulateurs, à condition qu'il y ait des parcours en pente ou verticaux. Il s'agit d'un autorefroidissement, suppléant au refroidissement naturel.*

## 1. Einleitung

Während des Betriebes von Kabeln entstehende Verluste müssen abgeführt werden, sollen die Temperaturen in den Kabeln unter den zulässigen Grenzen bleiben, bei denen die Isoliermaterialien gerade noch ihr Isoliervermögen über längere Zeit (beispielsweise über 40 Jahre) gewährleisten können. Im einfachsten Fall strömt die Verlustwärme aufgrund eines sich natürlich ausbildenden Temperaturgradienten radial durch die einzelnen Kabelaufbauelemente über das Erdreich an die Erdoberfläche, um schliesslich in die Atmosphäre überzutreten. Da dieser Vorgang ohne Zusatzmassnahmen abläuft, wird er allgemein natürliche Kühlung genannt.

Können die im Kabel entstehenden Verluste nicht mehr alleine durch die sich natürlich ausbildende Wärmeströmung fortgeleitet werden, sind nach bisherigen Vorstellungen in jedem Fall Zwangsmassnahmen erforderlich, d.h., die Verluste müssen über umgepumpte und rückgekühlte Kühlmedien teilweise oder vollständig abgeführt werden.

Der unmittelbare Übergang von der natürlichen Kühlung zur Zwangskühlung ist jedoch nicht erforderlich. Anhand eines Kabels, das für eine innere Wasserkühlung vorgesehen ist, wird im folgenden erläutert, dass es neben der natürlichen Kühlung und der Zwangskühlung noch eine dritte Kühlart, nämlich die Eigenkühlung, gibt.

## 2. Betrachtete Kabel

Um die folgenden Berechnungsergebnisse mit bekannten Belastbarkeiten von möglichst vielen bereits im Einsatz befindlichen Kabeln vergleichen zu können, wurden einerseits die 110-kV-Spannungsebene und andererseits ein nicht ungewöhnlich grosser Leiterquerschnitt von 1600 mm<sup>2</sup> ausgewählt, der bei realisierten Anlagen

schon mehrfach übertroffen worden ist [1]. Die Kabeldaten sind in Tabelle I aufgeführt. Das Kabel A ist ein herkömmliches 110-kV-Öl-Papier-Kabel mit einem Leiter-Hohlkanal von 12 mm Durchmesser für die Isolieröl-Speisung, also ein Kabel mit natürlicher Kühlung. Die Kabel B und C besitzen bei demselben Leiterquerschnitt wie Kabel A für eine Leiterkühlung im Inneren des Leiters Kühlrohre aus Edelstahl, während die Isolieröl-Speisung vom Kabelmantel her erfolgt. Der Kühlrohrdurchmesser des Kabels B ist bereits in einem Kabel verwirklicht worden [2...5]; vom Kühlrohrdurchmesser des Kabels C steht aufgrund ausführlicher Laborversuche fest, dass er in einem entsprechenden Kabel realisiert werden kann.

In Tabelle II sind diejenigen Leistungen zusammengestellt, die die Kabel nach Tabelle I bei natürlicher Kühlung und Dauerlast übertragen können. Dabei werden folgende Fälle unterschieden:

*Spalte 3 der Tabelle II:* Der Boden darf nicht so weit erwärmt werden, dass er an irgendeiner Stelle austrocknet, d.h., die Oberflächentemperatur des Kabels darf gemäss [6] bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C die Boden-Grenztemperatur von 35 °C nicht übersteigen.

*Spalte 4 der Tabelle II:* Der Boden darf austrocknen, d.h., die bestimmten Temperaturen sind entweder die zulässige Leitertemperatur oder die zulässige Temperatur des Korrosionsschutzes (Tab. I).

*Spalte 5 der Tabelle II:* Der Kabelgraben wird mit einem thermisch stabilisierten Rückfüllmaterial versehen, das gemäss [6] selbst bei einer vollständigen Austrocknung einen vergleichsweise kleinen spezifischen thermischen Widerstand von 1,2 m · K/W beibehält.

Aus Gründen hoher Betriebssicherheit wurde davon abgesehen, noch

### Adresse der Autoren

Prof. Dr.-Ing. Werner Rasquin,  
Universität-Gesamthochschule Duisburg,  
Fachgebiet Elektrische Energieübertragung,  
Postfach 10 16 29, D-4100 Duisburg 1.

Dipl.-Ing. G. Hülsken war zur Zeit der Erarbeitung der Berechnungsunterlagen wissenschaftlicher Assistent im Fachgebiet Elektrische Energieübertragung der Universität-Gesamthochschule Duisburg.

Tabelle I

Kabel		A	B	C
<b>Leiter</b>				
Lichter Durchmesser des Leiter-Hohlkanals	mm	12	55,1	70,3
Aussendurchmesser des Kühlrohrs	mm	-	60,3	76,1
Leiter-Füllfaktor		0,85	0,85	0,85
Maximal zulässige Temperatur	°C	90	90	90
Dicke der Leiterglättung	mm	0,5	0,5	0,5
<b>Elektrische Isolierung</b>				
Dielektrizitätszahl		3,6	3,6	3,6
Dielektrischer Verlustfaktor		0,0025	0,0025	0,0025
Dicke	mm	10	10	10
Spez. thermischer Widerstand	m · K/W	5	5	5
Dicke des elektrischen Schirms	mm	0,5	0,5	0,5
<b>Metallmantel</b>				
Material		Blei	Aluminium	Aluminium
Dicke	mm	4	10*)	10*)
Verlustfaktor		0,1	0,1	0,1
<b>Korrosionsschutz</b>				
Dicke	mm	5	5	5
Spez. thermischer Widerstand	m · K/W	6	6	6
Zulässige Temperatur	°C	80	80	80
<b>Kabelgraben</b>				
Spez. thermischer Widerstand des feuchten Bodens	m · K/W	1	1	1
des ausgetrockneten Bodens	m · K/W	2,5	2,5	2,5
der feuchten Graben-Rückfüllung	m · K/W	1	1	1
der ausgetrockneten Rückfüllung	m · K/W	1,2	1,2	1,2
Umgebungstemperatur	°C	20	20	20
Austrocknungstemperatur	°C	35	35	35
<b>Verlegetiefe</b>				
Kabel und Kühlrohr	mm	1200**)	1200**)	1200**)
Achsabstand				
Kabel und Kühlrohr	mm	400**)	400**)	400**)

\*) Materialdicke plus Welltiefe des Wellmantels  
 \*\*) werden in Abschnitt 4 verändert

Bei natürlicher Kühlung und Dauerlast erreichbare Belastbarkeiten der Kabel nach Tabelle I

Tabelle II

1	2	3	4	5
Kabel	Lichter Leiter-Hohlkanal-Durchmesser	Belastbarkeit ohne zugestandene Bodenaustrocknung	Belastbarkeit mit zugestander Bodenaustrocknung	Belastbarkeit mit thermisch stabilisierter Grabenrückfüllung
	mm	MVA	MVA	MVA
A	12	165	235	293
B	55,1	169	248	309
C	70,3	167	249	311

günstigere thermische Eigenschaften der Kabel-Graben-Rückfüllung anzusetzen, obwohl bei der Wahl von Magerbeton der spezifische thermische Widerstand auch im vollständig ausgetrockneten Zustand bei 0,6 m · K/W gehalten werden kann [7].

Aus Tabelle II können folgende Gegebenheiten abgelesen werden:

- Wird bei natürlicher Kühlung keine Bodenaustrocknung zugestan-

den, dann ist es hinsichtlich der Belastbarkeit nahezu gleichgültig, welcher Leiter-Hohlkanal-Durchmesser gewählt wird (Spalte 3).

- Wird bei natürlicher Kühlung Bodenaustrocknung zugestanden, dann steigen die übertragbaren Leistungen wesentlich an, und eine Vergrößerung des Leiter-Hohlkanal-Durchmessers wirkt sich, wenn auch nur sehr wenig, so doch schon erkennbar aus (Spalte 4).

- Wird bei natürlicher Kühlung der Kabelgraben mit thermisch stabilisiertem Rückfüllmaterial aufgefüllt, dann steigt die Belastbarkeit nochmals deutlich an, aber der Einfluss des Leiter-Hohlkanal-Durchmessers ist immer noch gering (Spalte 5).

Für alle weiteren Betrachtungen werden die beiden Kabel B und C, und zwar bei zugestandener Bodenaustrocknung, als Vergleichskabel angesehen. Da ihre bei natürlicher Kühlung ermittelten Belastbarkeiten als «Basisleistungen» herangezogen werden sollen, sich diese jedoch nur unwesentlich unterscheiden, wird für alle folgenden Überlegungen eine gerundete Basisleistung von 250 MVA angesetzt. Nur gegen Ende der Ausführungen werden auch tiefer verlegte Kabel betrachtet, die demzufolge kleinere Basisleistungen besitzen.

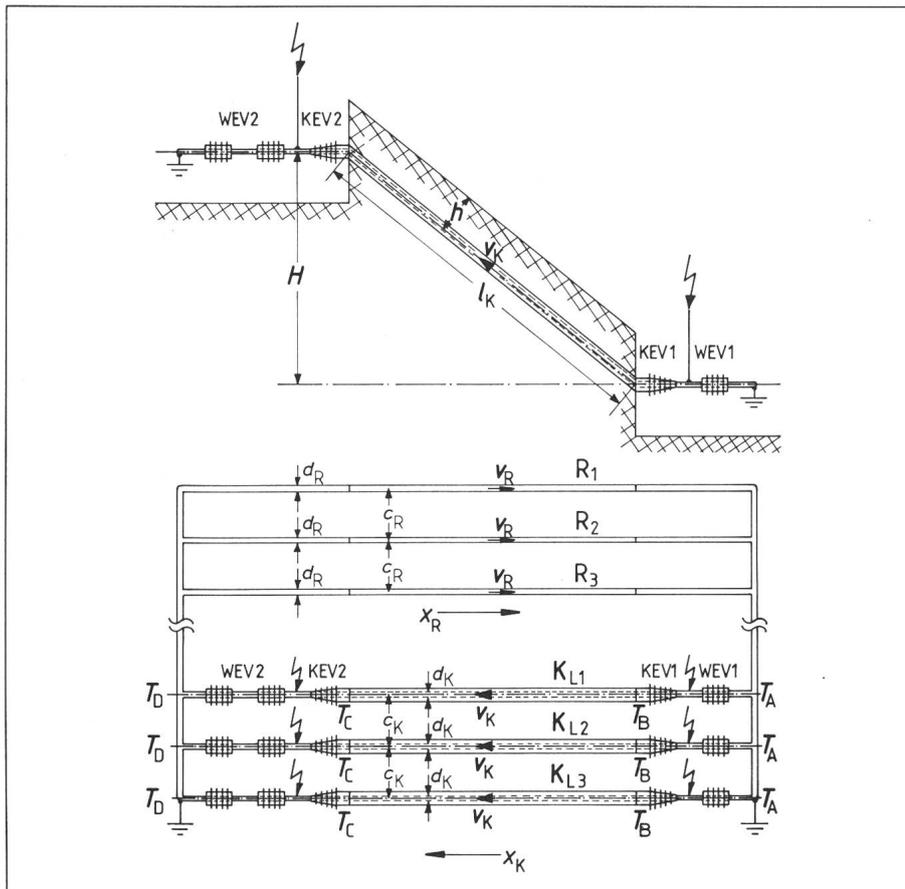
### 3. Eigenkühlung

In [8] und [9] ist bereits gezeigt worden, dass Kabel mit innerer Wasserkühlung auch ohne Pumpen betrieben werden können. In beiden Arbeiten ist aber vorausgesetzt worden, dass Kühlstationen in die Kühlwasserkreisläufe eingebaut waren.

Auf diese Kühlstationen soll nunmehr ebenfalls verzichtet werden. Ein solcher Verzicht gefährdet das System so lange nicht, wie die Kühlwasser-Rückführungsrohre für eine hinreichende Kühlung des Wassers sorgen und das Wasser, ähnlich wie in [8] beschrieben, aufgrund der unterschiedlichen Wichte von warmem und kaltem Wasser in steigenden und fallenden Rohren angetrieben wird.

Da beim Fortfall von Kühlstationen keine örtlich begrenzte Kühlung unmittelbar hinter einem Wasserendverschluss einen abrupten Temperatursturz des Kühlwassers herbeiführt, können vertikal stehende Wasserendverschlüsse und die dazugehörenden kalten, abwärts durchflossenen Kühlwasser-Rückführungsrohr-Teillängen nicht wie in [8] zum Antrieb des Kühlwassers ausgenutzt werden. Um den eventuell sogar bremsenden Einfluss der Wasserendverschlüsse besonders bei kleinen Übertragungsleistungen mit Sicherheit auszuschließen und um den Wasserantrieb allein durch das Kabel hervorgerufen, werden für die folgenden Überlegungen alle Wasserendverschlüsse horizontal montiert (Fig. 1).

Somit muss nach Höhendifferenzen gesucht werden, die für den Eigenan-



**Fig. 1** Kabel mit Kühlrohr im Leiter und Kühlwasser-Rückführungsrohre in einer Gefäll-Trasse  
Die Endverschlüsse sind alle horizontal montiert. Die Spannungspfeile kennzeichnen die elektrischen Anschlussstellen.

Oben: Seitenansicht der Anlage

$H$  Höhendifferenz zwischen Kabelanfang und Kabelende

$l_K$  Länge einer Kabelader

$h$  Verlegetiefe der Kabeladern und der Kühlwasser-Rückführungsrohre

$v_K$  Strömungsgeschwindigkeit des Kühlwassers im Kabel

KEV Kabelendverschluss

WEV Wasserendverschluss (am Ende des Kabels sind jeweils zwei Wasserendverschlüsse montiert)

Unten: Draufsicht auf die Anlage

$d_R$  Hohlkanaldurchmesser der Kühlwasser-Rückführungsrohre

$c_R$  Achsabstand der Kühlwasser-Rückführungsrohre

$v_R$  Geschwindigkeit des Wassers in den Rückführungsrohren

$x_R$  Ortskoordinate der Rückführungsrohre

$d_K$  lichter Durchmesser des Kühlrohres im Kabel

$c_K$  Aderachsabstand

$v_K$  Wassergeschwindigkeit im Kabel

$x_K$  Ortskoordinate des Kabels

$T_A$  Wassertemperatur am Einlauf in den Wasserendverschluss WEV1

$T_B$  Wassertemperatur am Kabeleinlauf

$T_C$  Wassertemperatur am Kabelausslauf

$T_D$  Wassertemperatur am Auslauf des Wasserendverschlusses WEV2

trieb des Wassers unbedingt erforderlich sind. Da aber in fast allen Fällen die geographischen Gegebenheiten ein Gefälle für die Kabeltrasse ausweisen, scheint zumindest für eine erste Überlegung die Annahme einer schräg liegenden Kabelanlage durchaus gerechtfertigt. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass die Kühlwasser-Rückführungsrohre von den Kabeladern thermisch entkoppelt sind, d.h., sie liegen entweder in einem gesonderten Graben, oder eine thermische Isolations-

schicht sorgt für die Entkopplung.

Mit diesen Voraussetzungen wurde für die in Figur 1 dargestellte Anordnung ein Berechnungsprogramm entwickelt, das für eine zunächst beliebig gewählte Umwälzgeschwindigkeit des Kühlwassers unter Beachtung aller kabeltechnisch relevanten Temperaturgrenzen in dicht aufeinanderfolgenden Trassenquerschnitten das gesamte thermische Feld innerhalb und ausserhalb der Kabeladern ermittelt. Dann wird überprüft, ob das damit berech-

nete Temperaturprofil des Kühlwassers für die angenommene Umwälzgeschwindigkeit ausreicht. Ist dies nicht der Fall, wird eine veränderte Umwälzgeschwindigkeit gewählt und das Programm erneut durchlaufen. Erst wenn das Temperaturprofil und die daraus abgeleitete Antriebskraft eine Wassergeschwindigkeit ergeben, die mit der angenommenen übereinstimmt, wird die Berechnung abgebrochen.

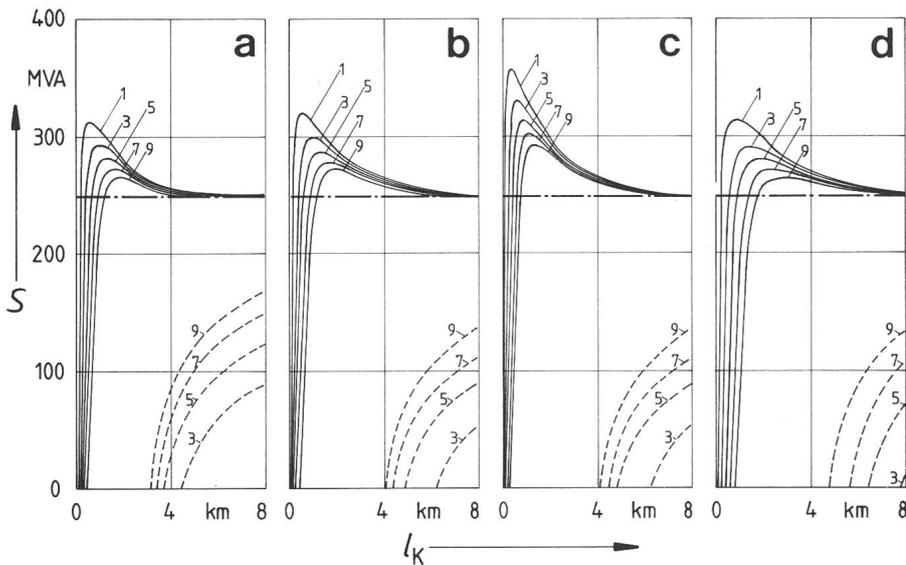
Die Ergebnisse derartiger Berechnungen zeigen, dass durch die in den Rückführungsrohren stattfindende Kühlung und die damit verbundene Wichtezunahme des Wassers Umlaufströmungen erzeugt werden. Dadurch sind spürbare Steigerungen der Übertragungsleistung über die Basisleistung hinaus möglich.

In Figur 2 sind die ohne Pumpen und ohne Kühlstationen übertragbaren Leistungen in Abhängigkeit von der Kabellänge bei einer unveränderten Höhendifferenz von 40 m zwischen Kabelanfang und Kabelende aufgetragen. Zu jeder Kennlinie gehört eine andere, bei 20 °C gemessene, elektrische Leitfähigkeit des Kühlwassers. Mehrere Besonderheiten können aus dieser Figur abgeleitet werden:

- Ein Verkürzen der Systemlänge schränkt die Kühlwirkung der Kühlwasser-Rückführungsrohre ein. Die zusätzlich anfallende Verlustleistung der Wasserendverschlüsse kann nicht mehr ganz abgeführt werden, so dass die Übertragungsleistung unter die Basisleistung gesenkt werden muss. Die Mindestlänge, bei der gerade die Basisleistung übertragen werden kann, wächst daher mit zunehmender elektrischer Leitfähigkeit des Kühlwassers.

- Zu grossen Systemlängen hin wird die Umlaufgeschwindigkeit des Kühlwassers (bei der angenommenen konstanten Höhendifferenz) immer kleiner, so dass im Kabel nur eine Teillänge gekühlt wird, d.h., es kann nur noch die Basisleistung übertragen werden.

- Ausserdem besteht bei kleinen Übertragungsleistungen (geringfügige Erwärmung des Kühlwassers im Kabel) und grossen Systemlängen die Gefahr, dass die Umlaufgeschwindigkeiten des Kühlwassers sehr klein werden und damit der Einlauf-Wasserendverschluss WEV1 (siehe Fig. 1) das Kühlwasser über 90 °C erwärmt, womit die Kabelisolierung gefährdet würde. Es muss also eine Mindestübertragungsleistung (gestrichelte Kennlinien in Fig. 2) gefordert werden, um für



**Fig. 2 Übertragbare Leistungen  $S$  in Abhängigkeit von der Kabellänge  $l_K$  bei schräg liegenden Kabeln mit einer Höhendifferenz  $H$  zwischen Anfang und Ende von 40 m (durchgezogene Kennlinien)**

Parameter: Elektrische Leitfähigkeit des Kühlwassers in  $\mu\text{S/cm}$  bei  $20^\circ\text{C}$ .

Gestrichelte Kennlinien: Mindestleistung, um Erwärmung des Einlauf-Wasserendverschlusses WEV1 unter der maximal zulässigen Temperatur zu halten. Parameter wie oben.

Strichpunktierte Kennlinie: Basisleistung (250 MVA). Verlegetiefe und Achsabstand nach Tabelle 1.

a: Hohlkanal im Kabel 55,1 mm, zugestandene Bodenaustrocknung im Kabelgraben, Hohlkanal im Rückführrohr 55,1 mm, zugestandene Bodenaustrocknung im Rohrgraben.

b: Wie a, jedoch Hohlkanal im Rückführrohr 70,3 mm.

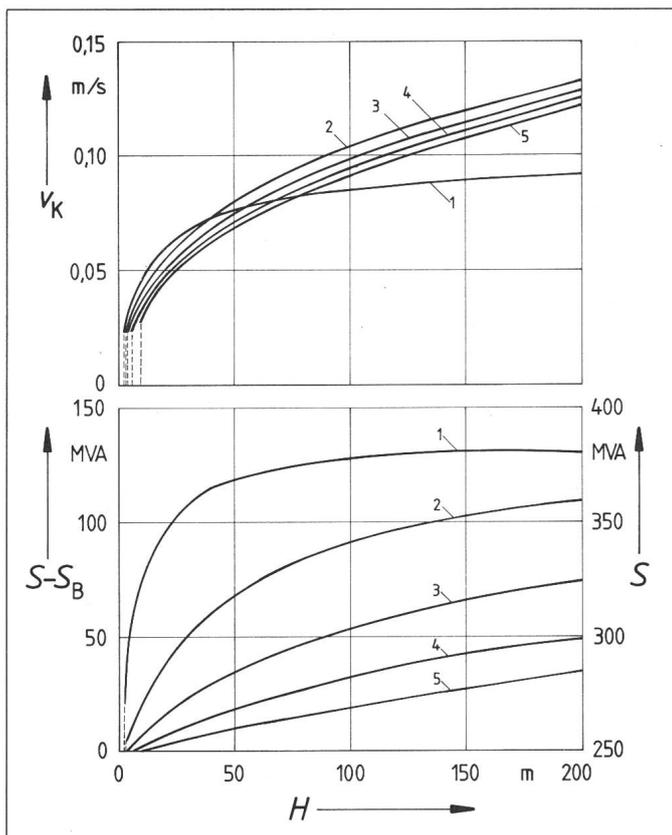
c: Wie b, jedoch thermisch stabilisierter Rohrgraben.

d: Wie b, jedoch Hohlkanal im Kabel 70,3 mm.

einen hinreichend grossen Wasserdurchsatz zu sorgen.

- Die grössten Übertragungsleistungen werden erzielt, falls den Kühlwasser-Rückführrohren beson-

ders günstige Wärmeabfuhrbedingungen eingeräumt werden. Siehe dazu Figur 2c im Vergleich zu Figur 2d. Obwohl in Figur 2d das Kabel einen grösseren Kühlmittelhohlkanal besitzt, rei-



**Fig. 4 Strömungsgeschwindigkeit  $v_K$  des Kühlwassers im Kabel und Leistungsüberhöhung ( $S-S_B$ ) durch die Eigenkühlung in Abhängigkeit von der Höhendifferenz  $H$  der Anlage**

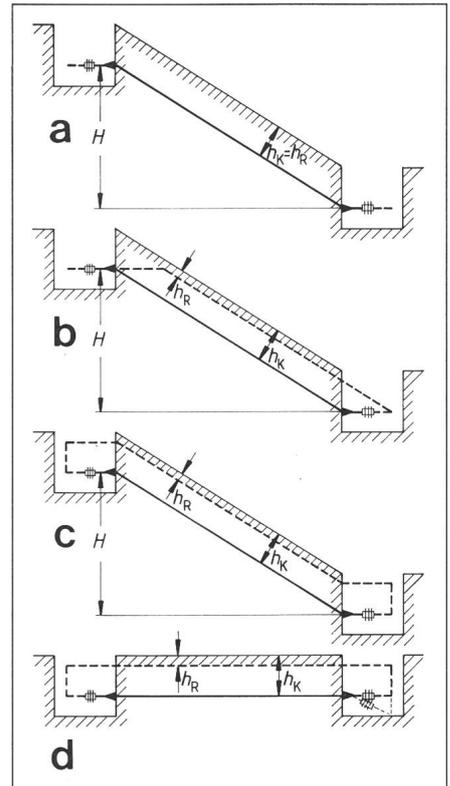
Anordnung nach Figur 3b.

Elektrische Leitfähigkeit des Kühlwassers  $1 \mu\text{S/cm}$  bei  $20^\circ\text{C}$ .

Kabel: Hohlkanaldurchmesser 55,1 mm, Verlegetiefe 1200 mm, Aderachsabstand 400 mm, zugestandene Bodenaustrocknung.

Rohr: Hohlkanaldurchmesser 82,5 mm, Verlegetiefe 600 mm, Achsabstand 600 mm, thermisch stabilisierter Graben.

Parameter der Kennlinien: Kabellänge in km.



**Fig. 3 Unterschiedliche Anlagenkonzepte**

Zur Vereinfachung wurde am Kabelauslauf nur ein Wasserendverschluss angedeutet.

a: Anlage mit Gefälle und gleicher Verlegetiefe von Kabeln und Rückführrohren (wie Fig. 1).

b: Anlage mit Gefälle, aber Rückführrohre besitzen eine kleinere Verlegetiefe als die Kabel, jedoch keine zusätzlichen Steilstrecken.

c: wie b, jedoch mit zusätzlichen Steilstrecken.

d: Anlage ohne Gefälle, aber mit Steilstrecken. (Um den Wasserkreislauf zu starten, kann der Einlauf-Wasserendverschluss geneigt werden.)

chen die Höchstleistungen nicht an diejenigen von Figur 2c heran, da bei der letztgenannten Anlage der Graben der Rückführrohre thermisch stabilisiert ist.

Diese Besonderheit lässt vermuten, dass die Eigenkühlung durch gezielte Massnahmen bezüglich der Kühlwasser-Rückführrohre weiter verbessert werden kann. Daher werden im folgenden abgewandelte Anlagenkonzepte untersucht.

#### 4. Veränderungen im Anlagenkonzept

Wird die bisher betrachtete Anlage (Fig. 3a) dadurch verändert, dass die Kühlwasser-Rückführrohre einen noch grösseren lichten Durchmesser erhalten, weniger tief und in einem grösseren Achsabstand als die Kabeladern verlegt werden (Fig. 3b), dann stellen sich tatsächlich wirksamere Eigenkühlungen ein.

In Figur 4 ist angenommen worden,

Gefällstrecke nach Figur 3a (Fig. 2c)		Gefällstrecke nach Figur 3b (Fig. 4)			
Systemlänge	Leistung	Systemlänge	Leistung	Verhältnis Leistungen	Verhältnis Leistungsüberhöhung
m	MVA	m	MVA	-	-
1000	334	1000	365	1,093	1,369
2000	298	2000	310	1,040	1,250
3000	277	3000	280	1,011	1,111
4000	264	4000	266	1,008	1,143
5000	257	5000	258	1,004	1,143

dass die Kühlwasser-Rückführungsrohre einen lichten Durchmesser von 82,5 mm, eine Wandstärke von 3,2 mm und eine Dicke des Korrosionsschutzes von 3 mm aufweisen. Ausserdem wird angenommen, dass die elektrische Leitfähigkeit des Kühlwassers 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bei 20 °C betrage, eine Leitfähigkeitsgrenze, die im Betrieb ohne

Schwierigkeiten eingehalten werden kann [5; 10]. Damit können die Ergebnisse aus Figur 4 bei einer Höhendifferenz von 40 m zwischen Kabelanfang und Kabelende mit der oberen Kennlinie aus Figur 2c verglichen werden. Tabelle III gibt einen Überblick über diesen Vergleich. Aus dieser Betrachtung folgt unmittelbar, wie wichtig es

ist, auf einem möglichst kurzen Wegstück das Kühlwasser innerhalb der Rückführungsrohre abzukühlen. Dies bedeutet:

- Die Rückführungsrohre sollten im Vergleich zum Kabel einen möglichst grossen lichten Durchmesser besitzen, um einerseits in den Rückführungsrohren die Kühlwassergeschwindigkeit gegenüber derjenigen im Kabel herabzusetzen, und um andererseits den äusseren Wärmewiderstand der Rückführungsrohre klein halten zu können.

- Der äussere Wärmewiderstand der Kühlwasser-Rückführungsrohre sollte darüber hinaus durch entsprechende Eigenschaften des Korrosionsschutzes, durch geringe Verlegetiefe und grossen Achsabstand der Rückführungsrohre sowie durch geeignete Materialauswahl der Grabenrückfüllung so weit wie möglich gesenkt werden.

Werden gemäss Figur 3c am Anfang und am Ende des Kabels zusätzlich Steilstrecken durch die vertikalen Überbrückungen der unterschiedlichen Verlegetiefen von Kabel und Rückführungsrohr eingeführt, dann sind noch weitere Leistungsüberhöhungen möglich, wie Figur 5 erkennen lässt. Gegenüber Kennlinie 1 (ohne zusätzliche Steilstrecken) werden die Leistungsüberhöhungen durch die Ausnutzung unterschiedlich grosser Steilstrecken bei jedem Gefälle der Trasse spürbar vergrössert.

Dieses Ergebnis wirft die Frage auf, ob nicht Steilstrecken am Anfang und am Ende der Trasse allein ausreichen, um einen Kühlwasserkreislauf anzufachen. Daher werden abschliessend noch Kabelanlagen ohne Gefälle der Trasse, aber mit Steilstrecken an den Enden gemäss Figur 3d betrachtet.

Die berechneten, grösstmöglichen Übertragungsleistungen sind in Figur 6 in Abhängigkeit von der Kabellänge dargestellt. Dabei wurden, um bei einer gleichbleibenden Verlegetiefe der Rückführungsrohre von 200 mm unterschiedlich grosse Steilstrecken zu erhalten, die Verlegetiefen der Kabel verändert. Bei Kennlinie 1 ist die Kabel-Verlegetiefe wie bisher 1200 mm, bei Kennlinie 2: 2000 mm und bei Kennlinie 3: 3000 mm.

Aus Figur 6 kann abgelesen werden, wie leistungsfähig bei Trassen ohne Gefälle und kleinen Systemlängen die Eigenkühlung ist, so dass sogar die aufgrund der grösseren Verlegetiefen der Kabel bewirkten Verminderungen der Basisleistung durch die Vergrösserung der Steilstrecken bei der Lei-

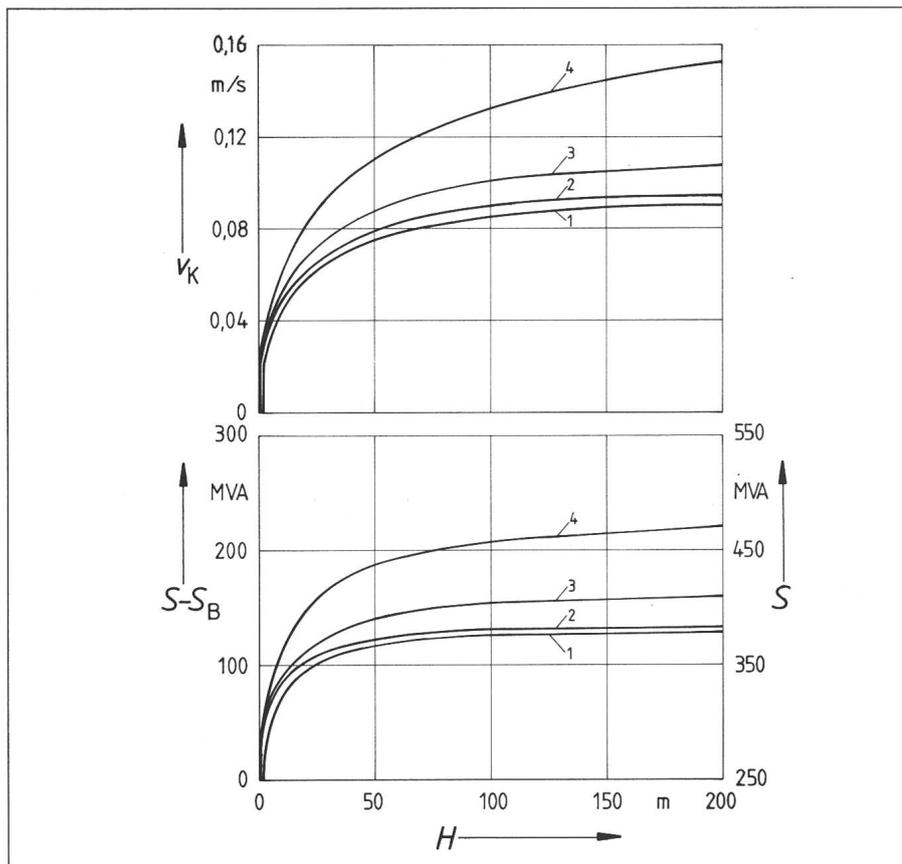


Fig. 5 Kühlwassergeschwindigkeit  $v_K$  in einem 1 km langen Kabel und dessen Leistungsüberhöhung ( $S-S_B$ ) in Abhängigkeit von der Höhendifferenz  $H$  zwischen Kabelanfang und Kabelende

Kabel: Hohlkanaldurchmesser 55,1 mm, Verlegetiefe 1200 mm, Aderachsabstand 400 mm, zugestandene Bodenaustrocknung.

Rohr: Hohlkanaldurchmesser 82,5 mm, Achsabstand 600 mm, thermisch stabilisierter Graben.

Anordnung nach Figur 3c.

Elektrische Leitfähigkeit des Kühlwassers 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bei 20 °C.

- 1: Rohrverlegetiefe 1200 mm, zusätzliche Steilstrecke 0 mm
- 2: Rohrverlegetiefe 600 mm, zusätzliche Steilstrecke 600 mm
- 3: Rohrverlegetiefe 400 mm, zusätzliche Steilstrecke 800 mm
- 4: Rohrverlegetiefe 200 mm, zusätzliche Steilstrecke 1000 mm

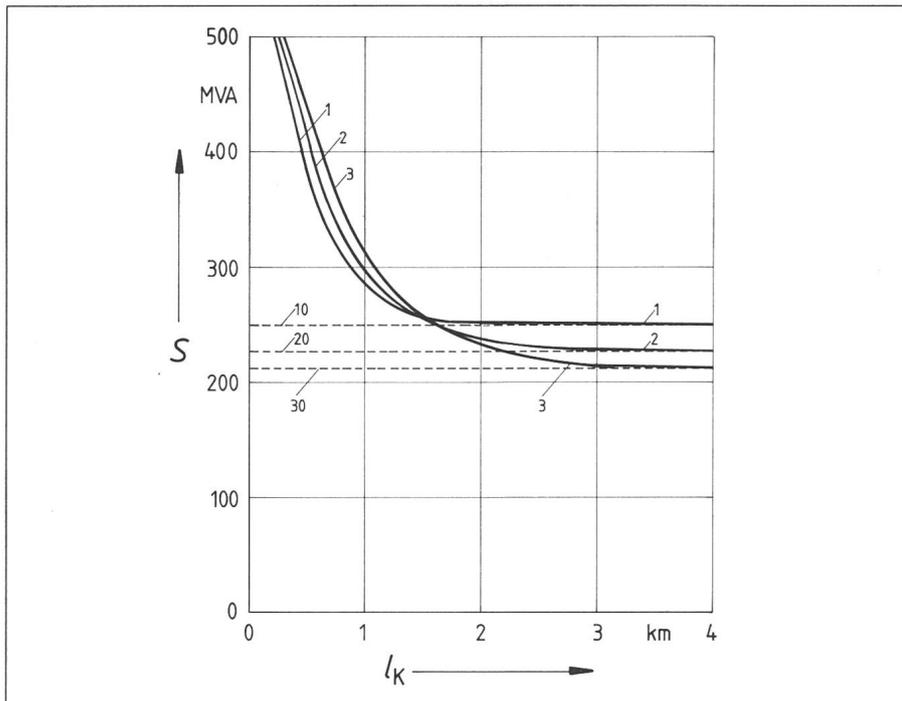


Fig. 6 Übertragungsleistung  $S$  von Kabeln ohne Gefälle, aber mit Steilstrecken, in Abhängigkeit von der Kabellänge  $l_K$

Kabel: Hohlkanaldurchmesser 55,1 mm, Aderachsabstand 400 mm, zugestandene Bodenaustrocknung.

Rohr: Hohlkanaldurchmesser 82,5 mm, Verlegetiefe 200 mm, Rohrachsabstand 600 mm, thermisch stabilisierter Graben.

Anordnung nach Figur 3d.

Elektrische Leitfähigkeit des Kühlwassers  $1 \mu\text{S}/\text{cm}$  bei  $20^\circ\text{C}$ .

- 1: Kabelverlegetiefe 1200 mm
- 10: Basisleistung für Kabelverlegetiefe 1200 mm
- 2: Kabelverlegetiefe 2000 mm
- 20: Basisleistung für Kabelverlegetiefe 2000 mm
- 3: Kabelverlegetiefe 3000 mm
- 30: Basisleistung für Kabelverlegetiefe 3000 mm

stungsüberhöhung mehr als ausgeglichen werden. Es wird aber ebenfalls deutlich, dass es bei den hier betrachteten Anlagenparametern nur bis etwa 1,5 km Kabellänge sinnvoll ist, die Eigenkühlung zur Leistungsüberhöhung einzusetzen, es sei denn, mehrere Kabel werden in Reihe geschaltet, deren Kühlkreisläufe getrennt bleiben.

Bei Systemlängen oberhalb von 1,5 km kann aber der Einsatz der Eigenkühlung auch ohne Reihenschaltungen eine Bedeutung haben, falls nur eine automatische Verhinderung von «hot spots» gewünscht wird.

## 5. Folgerungen

Durch eine entsprechende Gestaltung des Anlagenkonzeptes von Kabeln, die für eine innere Wasserkühlung vorgesehen sind, kann ein automatischer, betriebsbedingter Eigenumlauf des Kühlwassers erreicht werden, so dass durch die Kühlung des Wassers in den Rückführungsrohren eine zusätzliche Kühlung, also eine Eigenkühlung des Kabels möglich wird. Um eine derartige Anlage zu optimieren, steht eine grosse Fülle von Anlagenparametern zur Verfügung, die bei den

obigen Ausführungen bei weitem nicht ausgeschöpft worden ist. So wurde beispielsweise nicht berücksichtigt, dass auch durch vertikal gestellte Wasserendverschlüsse Antriebskräfte hervorgerufen werden können. Andererseits wurden Begrenzungen durch die Wasserendverschlüsse hingenommen, ohne durch Verringerung ihres Durchflussquerschnittes und entsprechende Variation ihrer wirksamen Länge diesen Einfluss zu mindern.

Das Prinzip der Eigenkühlung eröffnet so viele Gestaltungsmöglichkeiten, dass für jeden Anwendungsfall die optimale Lösung über eine Parametervariation gesucht werden muss.

## Literatur

- [1] D.E. Williams: Natural and forced cooling of HV underground cables: UK practice. IEE Proceedings-A 129(1982)3, p. 137...161.
- [2] H. Brakelmann und W. Rasquin: Leitergekühlte Hochleistungskabel mit Kühlwasserrohren aus Edelstahl. ETZ-A 97(1976)3, S. 148...152.
- [3] C. Albrecht e. a.: Transport de grande puissance par câbles refroidis par le conducteur. Rapport CIGRE No. 21-10, 1978.
- [4] H. Gätcke und M. Henschel: Die Erprobung eines leitergekühlten Hochleistungskabels in Berlin (West). Elektrizitätswirtschaft 79(1980)21, S. 790...793.
- [5] H.J. Künisch e. a.: Essais d'un câble 110 kV à huile fluide basse pression à conducteur refroidi par eau à Berlin-Ouest. Rapport CIGRE No. 21-01, 1982.
- [6] Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen. Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln mit Nennspannungen von  $U_0/U$  bis 18/30 kV (VDE-Bestimmung). VDE 0298 Teil 2/11.79.
- [7] G.M.L.M. v. d. Wiel, P. Aukema en M. A.W. v. Schaik: De warmte-afvoerende eigenschappen van mager-beton rondom hoog spanningskabels. Kema-Studierapport. Arnhem, KEMA, 1982.
- [8] G. Hülsken: Zwangskühlung von Kabeln ohne Pumpen. Elektrizitätswirtschaft 81(1982)26, S. 931...936.
- [9] W. Rasquin, G. Hülsken und B. Harjes: Massnahmen zur Eigensicherung von Kabeln mit innerer Wasserkühlung. Elektrizitätswirtschaft 81(1982)26, S. 937...941.
- [10] H. Hayashia. o.: 22 kV internally water cooled 15 KA capacity XLPE cable. 1976 IEEE Winter Power Meeting and Tesla Symposium, paper A76 167-7.