

# Probleme der Kabelerwärmung bei intermittierendem Betrieb

Autor(en): **Gehret, W. / Heimgartner, J. P. / Müller, E.**

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): **67 (1976)**

Heft 6

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915142>

## **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.

# Probleme der Kabelerwärmung bei intermittierendem Betrieb

Von W. Gehret, J. P. Heimgartner, E. Müller

621.315.2.022 : 621.3.017.7

In dieser Arbeit werden die auftretenden Leitertemperaturen von Starkstromkabeln nach endlich vielen Belastungszyklen im intermittierenden Betrieb theoretisch berechnet und die erhaltenen Werte mit den Ergebnissen praktischer Erwärmungsmessungen verglichen. Es werden ferner die zulässigen Stromstärken des intermittierenden sowie des abgebrochenen intermittierenden Betriebes für vorgegebene Temperaturerhöhungen und Schaltspiele berechnet. Die Frage nach den zulässigen Leiter-Querschnittsreduktionen als Folge der intermittierenden Betriebsarten wird anhand eines praktischen Zahlenbeispiels erläutert. Messungen und Rechnungen zeigen die zentrale Bedeutung der Erwärmungszeitkonstanten als charakteristischer Grösse für bestimmte Kabelquerschnitte und Verlegeanordnungen auf.

Dans cet article, les températures atteintes par les conducteurs de câbles à courant fort à la suite d'un nombre de cycles de charge limité, en régime intermittent, sont calculées théoriquement, et les valeurs obtenues sont comparées à celles de mesures d'échauffement en pratique. Les auteurs calculent en outre les intensités de courant admissibles en régime intermittent et en régime intermittent interrompu pour des échauffements et cycles donnés. La question des réductions admissibles de la section des conducteurs selon les régimes intermittents est traitée à l'aide d'un exemple numérique de la pratique. Ces mesures et calculs montrent l'importance primordiale de la constante d'échauffement en tant que grandeur caractéristique pour des sections et des dispositions de câbles déterminées.

## 1. Einleitung

Über die Erwärmung von Kabeln in Abhängigkeit von Belastungsstrom und von den Verlegungsbedingungen sind schon zahlreiche Untersuchungen durchgeführt worden. Dies geht schon daraus hervor, dass die ältesten Arbeiten über dieses Problem bereits vor der Jahrhundertwende erschienen sind. In den letzten fünf bis zehn Jahren haben jedoch die mit dem intermittierenden Betrieb zusammenhängenden Probleme der Kabelerwärmung durch den Zwang zu gedrängter Bauweise und die Entwicklung immer wärmebeständiger Isolierstoffe erneut an Aktualität gewonnen. So wurden umfangreiche Messungen an Tdc-Leitern und -Kabeln in Bodenkanälen oder bei Verlegung unter Putz durchgeführt und in einem technischen Bericht der intermittierende Betrieb von Kabeln für den thermischen Gleichgewichtszustand behandelt.

Die vorliegende Arbeit zeigt nun die Möglichkeit auf, die bei intermittierendem Betrieb nach einer endlichen Anzahl von Heiz- und Kühlzyklen sich einstellenden Leitertemperaturen zu berechnen. Die so erhaltenen Werte werden dann mit den Ergebnissen durchgeführter Messungen verglichen. Es dürfte sich damit eine Lücke zwischen den bekannten Verhältnissen

beim Dauerbetrieb und dem Beharrungszustand bei intermittierendem Betrieb schliessen lassen. Um den Aufwand bei den Messungen nicht unnötig zu vergrössern, wurden die Untersuchungen auf bestimmte, für die Praxis wichtige Gruppierungen von Einleiterkabeln beschränkt.

Für den intermittierenden Betrieb und besonders gedrängte Kabelanhäufungen, wie sie beispielsweise in Blechkanälen in elektrischen Triebfahrzeugen bei der heutigen Bauweise vermehrt vorkommen, enthalten die Belastungstabellen des SEV, des VSM oder des VDE keine Angaben oder Vorschriften für den Reduktionsfaktor des zulässigen Belastungsstromes, da es sich hier um Spezialfälle handelt. Es wird jedoch immer ausdrücklich darauf hingewiesen, dass für grosse Kabelanhäufungen usf. die zulässigen Belastungsströme und Leitertemperaturen durch Messungen zu ermitteln sind [1; 2]<sup>1)</sup>. Für solche Fälle lässt sich aber, wie im folgenden gezeigt wird, doch aufgrund theoretischer Überlegungen bei Kenntnis der betreffenden Zeitkonstanten eine Aussage machen.

## 2. Theoretische Behandlung

### 2.1 Dauerbetrieb

Für die Erwärmung von Kabeln mit verschiedenen Querschnitten, Isolationsarten und unter verschiedenen Verlegungsbedingungen ist in Funktion der Zeit folgende Differentialgleichung gültig:

$$\Delta\vartheta(t) + \tau \frac{d}{dt} \Delta\vartheta(t) - \Delta\vartheta_E = 0 \quad (1)$$

Es bedeuten:

- $\Delta\vartheta(t)$  die Erwärmung des Kabels zur Zeit  $t$ ,
- $\Delta\vartheta_E$  die Grenzerwärmung des Kabels bzw. die zulässige Über-temperatur nach dem Erreichen des thermischen Gleichgewichts (Beharrungszustand),
- $\tau$  die Erwärmungszeitkonstante.  $\tau$  wird als konstant angenommen. An sich ist sie abhängig von Masse, spezifischer Wärme und thermischen Widerständen der Verlegungsanordnung sowie dem Temperaturkoeffizienten des Leiterwiderstandes und ist damit streng genommen eine Funktion der Temperatur. Die Erfahrung zeigt aber, dass sich diese Grössen in einem weiten Temperaturbereich so kompensieren, dass die Annahme der Konstanz von  $\tau$  gerechtfertigt ist.

Aus Gl. (1) folgt für den Aufheizvorgang:

$$\Delta\vartheta_h(t) = \Delta\vartheta_E \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (2)$$

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

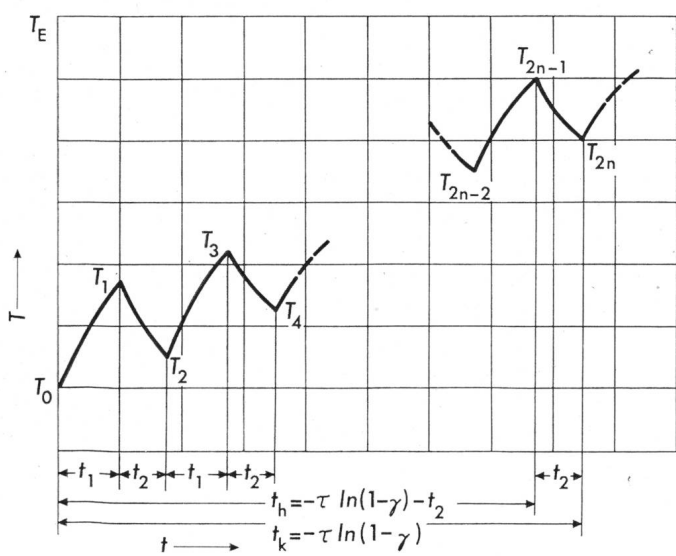


Fig. 1 Schematische Darstellung der Zerlegung des intermittierenden Betriebes in  $n$  Heiz- und  $n$  Kühl-schritte ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )  
 $t_1$  Einschaltzeit (Aufheizung);  $t_2$  Ausschaltzeit (Abkühlung)  
 $T$  Temperatur  $t$  Zeit  
 $\tau$  Zeitkonstante  $\gamma$  Annäherungsgrad an den Beharrungszustand (s. Abschnitt 2.4)

sowie für den Abkühlvorgang

$$\Delta\vartheta_k(t) = \Delta\vartheta_E e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

Grenzbedingungen:

Für  $t \rightarrow \infty$  ergeben die Gl. (2) und (3):

$$\Delta\vartheta_h = \Delta\vartheta_E \text{ und } \Delta\vartheta_k = 0$$

Für  $t \rightarrow 0$  ergeben die Gl. (2) und (3):

$$\Delta\vartheta_h = 0 \text{ und } \Delta\vartheta_k = \Delta\vartheta_E$$

## 2.2 Intermittierender Betrieb

Zur Berechnung des intermittierenden Betriebes wurden die Heiz-Kühl-Zyklen in einzelne Schritte zerlegt, was graphisch in Fig. 1 dargestellt ist. Das sukzessive Anwenden der Gl. (2) und (3) ergibt die folgende Reihe:

$$\begin{aligned} T_0 &= T_0 \\ T_1 &= (T_E - T_0) \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right) + T_0 \\ T_2 &= (T_1 - T_0) e^{-\frac{t_2}{\tau}} + T_0 \\ T_3 &= (T_E - T_2) \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right) + T_2 \\ T_4 &= (T_3 - T_0) e^{-\frac{t_2}{\tau}} + T_0 \\ T_5 &= (T_E - T_4) \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right) + T_4 \\ &\vdots \\ T_{2n-1} &= (T_E - T_{2n-2}) \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right) + T_{2n-2} \\ T_{2n} &= (T_{2n-1} - T_0) e^{-\frac{t_2}{\tau}} + T_0 \end{aligned} \quad (4)$$

Daraus ergeben sich Rekursionsformeln:

a) für die Temperatur nach  $n$  Heizintervallen:

$$T_{2n-1} - T_0 = \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right) \Delta\vartheta_E + e^{-\frac{t_1+t_2}{\tau}} (T_{2n-3} - T_0) \quad (5)$$

b) für die Temperatur nach  $n$  Kühlintervallen:

$$T_{2n} - T_0 = e^{-\frac{t_2}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right) \Delta\vartheta_E + e^{-\frac{t_1+t_2}{\tau}} (T_{2n-2} - T_0) \quad (6)$$

Die Auswertung der Gl. (5) und (6) führt schliesslich auf

$$\begin{aligned} T_{2n-1} - T_0 &= \Delta\vartheta_h(n) = \\ &= \Delta\vartheta_E \frac{1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{\tau}}} \left(1 - e^{-n \frac{t_1+t_2}{\tau}}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} T_{2n} - T_0 &= \Delta\vartheta_k(n) = \\ &= \Delta\vartheta_E \frac{1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{\tau}}} e^{-\frac{t_2}{\tau}} \left(1 - e^{-n \frac{t_1+t_2}{\tau}}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

Aus der Beziehung (7) folgt die Gl. (2) durch Bildung des Grenzüberganges  $n = 1$  und  $t_2 \rightarrow 0$ . Aus der Beziehung (8) folgt aus dem Grenzübergang  $n = 1$  und  $t_1 \rightarrow 0$ , dass  $\Delta\vartheta_k(t) \equiv 0$  ist, was gemäss Herleitung und Definitionen in Fig. 1 richtig ist. Um aus Gl. (8) die Beziehung (3) zu erhalten, muss zuerst aufgeheizt werden, d. h., es ist der Grenzübergang  $n = 1$  und  $t_1 \rightarrow \infty$  durchzuführen.

## 2.3 Beharrungszustand

Der Beharrungszustand für den intermittierenden Betrieb folgt aus den Grenzübergängen  $n \rightarrow \infty$ :

$$\Delta\vartheta_h = \frac{1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{\tau}}} \Delta\vartheta_E \quad (9)$$

$$\Delta\vartheta_k = e^{-\frac{t_2}{\tau}} \frac{1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{\tau}}} \Delta\vartheta_E \quad (10)$$

In der Praxis wird stets mit sehr guter Näherung die Beziehung

$$\Delta\vartheta = C I^2 \quad (11)$$

gelten. ( $I$  ist die Stromstärke des Belastungsstromes,  $C$  eine Konstante.) Diese Beziehung ist für beliebige Kabelquerschnitte und Kombinationen gültig, wobei die Grösse von  $C$  von der Erwärmungszeitkonstanten  $\tau$ , vom Kabelquerschnitt und von der Verlegungsart abhängt.

Es gilt also für Dauerbetrieb

$$C_d = \frac{\Delta\vartheta_E}{I_d^2} \quad (12)$$

und für die Temperaturerhöhung  $\Delta\vartheta_h$  eines intermittierenden Betriebes mit der Stromstärke  $I_d$  des Dauerbetriebes

$$C_i = \frac{\Delta\vartheta_h}{I_d^2} \quad (13)$$

Entsprechend gilt für die zulässige Stromstärke  $I_i$  eines intermittierenden Betriebes, welche zu der maximal zulässigen Temperaturerhöhung  $\Delta\vartheta_E$  führt, der Zusammenhang

$$C_i = \frac{\Delta\vartheta_E}{I_i^2} \quad (14)$$

Bei gleichen Stromstärken  $I_i = I_d$  des intermittierenden und des Dauerbetriebes gibt Gl. (9) die Temperaturerhöhung  $\Delta\vartheta_h$  des intermittierenden Betriebes in Funktion der Schaltzeiten  $t_1$  und  $t_2$ , der Zeitkonstanten  $\tau$  sowie der Enderwärmung  $\Delta\vartheta_E$  bei Dauerbetrieb.

Aus den Gl. (9), (13), (14) ergibt sich schliesslich bei gleichen Erwärmungen  $\Delta\vartheta_h = \Delta\vartheta_E$  des intermittierenden und des Dauerbetriebes eine Darstellung für die zulässige Stromstärke  $I_i$  des intermittierenden Betriebes in Funktion der Schaltzeiten, der Zeitkonstanten und der Stromstärke  $I_d$  des Dauerbetriebes:

$$I_i = I_d \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}}} \quad (15)$$

Man sieht, dass sich nach Ermittlung der Zeitkonstanten  $\tau$  bei gegebener Spieldauer « $t_1 + t_2$ » das Verhältnis  $I_i/I_d$  sofort berechnen lässt. Ferner ist leicht zu erkennen, dass sich für die Praxis uninteressante Quotienten

$$\frac{I_i}{I_d} \leq 1,05$$

ergeben, wenn die Verhältnisse

$$\frac{\text{Spieldauer}}{\text{Zeitkonstante}} = \frac{t_1 + t_2}{\tau} \geq 4,6$$

und

$$\frac{\text{Heizzeit}}{\text{Zeitkonstante}} = \frac{t_1}{\tau} \geq 2,3$$

sind. Man betrachte dazu auch Fig. 2, in welcher die Beziehung (15) graphisch dargestellt ist.

### 2.4 Endliche Anzahl Zyklen

Schliesslich lässt sich jetzt die Frage nach der Anzahl der Heiz-Kühl-Zyklen bzw. der erforderlichen Zeit für eine beliebige Annäherung an den Beharrungszustand beantworten. Ferner kann die zulässige Stromstärke für den abgebrochenen intermittierenden Betrieb berechnet werden.

Setzt man

$$\frac{\Delta\vartheta_h(n)}{\Delta\vartheta_h} = \gamma \quad (16)$$

so folgt mit den Gl. (7) und (9) für eine Annäherung von  $\gamma$  an den Beharrungszustand:

a) die Anzahl der dazu notwendigen Heizzyklen (gleich der Anzahl der dazu notwendigen Kühlzyklen) zu:

$$n_h = \frac{\tau}{t_1 + t_2} \ln \frac{1}{1 - \gamma} \quad (17)$$

b) die dazu aufzuwendende Heiz- und Kühlzeit zu:

$$t_h = (n_h - 1)(t_1 + t_2) + t_1 = \tau \ln \left( \frac{1}{1 - \gamma} \right) - t_2 \quad (18)$$

Zur Illustration der Beziehungen (17) und (18) s. Tabelle I. Darin ist in der Kolonne Zeitaufwand in % die Annäherung  $\gamma = 99,99\%$  dem Beharrungszustand gleichgesetzt worden (100% Zeitaufwand). Die übrigen Annäherungen wurden unter Vernachlässigung von  $t_2$  in der Kolonne  $t_h$  in Relation dazu bestimmt.

Dauert der intermittierende Betrieb nur während  $n$  Zyklen, so gilt entsprechend den Gl. (13) und (14):

$$C_i = \frac{\Delta\vartheta_h(n)}{I_d^2} = \frac{\Delta\vartheta_E}{I_i'^2} \quad (19)$$

und die zulässige Stromstärke  $I_i'$  des abgebrochenen intermittierenden Betriebes berechnet sich gemäss den Gl. (9) und (19) zu

$$\frac{I_i'}{I_d} = \sqrt{\frac{\Delta\vartheta_E}{\Delta\vartheta_h(n)}} = \kappa \sqrt{\frac{\Delta\vartheta_E}{\Delta\vartheta_h}} = \kappa \frac{I_i}{I_d} \quad (20)$$

wobei

$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-n \frac{t_1 + t_2}{\tau}}}} \quad (21)$$

ist. Tabelle II zeigt einige Werte von  $\kappa$  für gegebene Verhältnisse Spieldauer zu Zeitkonstante  $\frac{t_1 + t_2}{\tau}$  und gegebene Anzahl  $n$  Zyklen.

### 3. Messanordnung und Messergebnisse

Die Messanordnung (Fig. 3) wurde so gewählt, dass die praktischen Verhältnisse, wie sie beim Verlegen der Kabel auf einer Traverse und bei Anhäufungen in offenen oder gedeckten Blechkanälen vorkommen, möglichst getreu wiedergegeben wurden. Für die Bestimmung der Leitertemperaturen wurden Fe-Konstantan-Thermoelemente benutzt und durch einen entsprechenden Einschnitt in die Isolierhülle auf der Leiteroberfläche angebracht. Durch eine Längsführung [3] der Thermoelemente wurde die radiale Wärmeabfuhr durch den Einschnitt verhindert. Die Registrierung des Temperaturverlaufs über die ganze Messdauer besorgte ein Mehrfachschreiber.

Beispiel zu den Gl. (17) und (18)

Tabelle I

Annäherung $\gamma$ %	Anzahl Heizzyklen $n_h$	Zeitaufwand $t_h$	Zeitaufwand %
99,99	$9,2 \frac{\tau}{t_1 + t_2}$	$9,2 \tau - t_2$	100
99,9	$6,9 \frac{\tau}{t_1 + t_2}$	$6,9 \tau - t_2$	75
99	$4,6 \frac{\tau}{t_1 + t_2}$	$4,6 \tau - t_2$	50
95	$3,0 \frac{\tau}{t_1 + t_2}$	$3,0 \tau - t_2$	33

Werte von  $\kappa$

Tabelle II

$\frac{t_1 + t_2}{\tau}$ $n$	0,1	0,3	0,5	1	1,5	2
1	3,242	1,964	1,593	1,258	1,135	1,075
2	2,349	1,489	1,258	1,075		
3	1,964	1,298	1,135			
4	1,742	1,196	1,075			
5	1,593	1,135	1,044			
6	1,489	1,095				
8	1,348	1,049				
10	1,258			$\kappa < 1,04$		
12	1,196					
15	1,135					
20	1,075					
25	1,044					

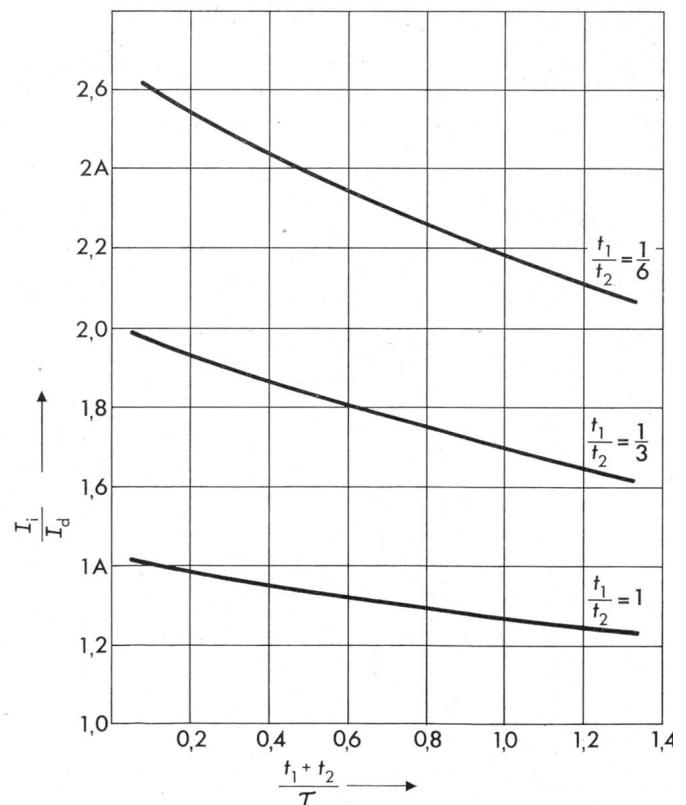


Fig. 2 Abhängigkeit des Stromverhältnisses  $I_i/I_d$  vom Verhältnis der Spieldauer  $t_1 + t_2$  zur Zeitkonstante  $\tau$  für verschiedene Ein/Aus-Verhältnisse  $t_1/t_2$

Kabeltyp	Querschnitt mm <sup>2</sup>	Isolationsart	Kabelanordnung	Gemessen von	Zeitkonstante $\tau$ min
T-Draht	4 × 10	PVC	Bergmannrohr, auf Putz	SEV <sup>1)</sup>	7
T-Draht	4 × 10		Bergmannrohr, unter Putz	SEV	8
T-Leiter	10		Einzel auf Traverse	H+S <sup>2)</sup>	4
T-Seil	16		Frei in Luft	SEV	6
Tdc-Seil	95		Frei in Luft	SEV	17
Tdc	4 × 16		Stahlpanzerrohr, auf Putz	SEV	27
Tdc	4 × 16		Stahlpanzerrohr, unter Putz	SEV	23
T-Seil	4 × 35		Stahlpanzerrohr, auf Putz	SEV	28
T-Seil	4 × 35		Stahlpanzerrohr, unter Putz	SEV	20
T-Leiter	240		Einzel auf Traverse	H+S	30
Giwog	16	Butylkautschuk mit Glasfaser-Umflechtung	1 Einleiter auf Traverse	H+S	6
	16		4+3 Einleiter auf Traverse	H+S	16
	16		4+4 Einleiter im offenen Kanal	H+S	25
	16		4+4 Einleiter im geschlossenen Kanal	H+S	32
	35		1 Einleiter auf Traverse	H+S	7,5
	35		4+3 Einleiter auf Traverse	H+S	21
	35		4+4 Einleiter im offenen Kanal	H+S	30
	35		4+4 Einleiter im geschlossenen Kanal	H+S	36
	50		1 Einleiter auf Traverse	H+S	10
	50		4+3 Einleiter auf Traverse	H+S	17
	50		4+4 Einleiter im offenen Kanal	H+S	33
	50		4+4 Einleiter im geschlossenen Kanal	H+S	45
	95		1 Einleiter auf Traverse	H+S	12
	95		4+3 Einleiter auf Traverse	H+S	35
	95		4+4 Einleiter im offenen Kanal	H+S	42
	95		4+4 Einleiter im geschlossenen Kanal	H+S	52
	185		1 Einleiter auf Traverse	H+S	24
	185		4+3 Einleiter auf Traverse	H+S	60
	185		4+4 Einleiter im offenen Kanal	H+S	75
	185		4+4 Einleiter im geschlossenen Kanal	H+S	100
XLPE	25	Vernetztes Polyäthylen	1 Einleiter auf Traverse	H+S	6,5
XLPE	25		4+4 Einleiter im geschlossenen Kanal	H+S	34
XLPE	95		1 Einleiter auf Traverse	H+S	14
XLPE	95		4+4 Einleiter im geschlossenen Kanal	H+S	57

<sup>1)</sup> Schweiz. Elektrotechnischer Verein, Zürich. <sup>2)</sup> Huber+Suhner AG, Pfäffikon.

Aus den registrierten Temperaturverläufen des Dauerbetriebes wurden die Temperaturzeitkonstanten  $\tau$  für den jeweiligen Kabelquerschnitt und die jeweilige Kabelanordnung in bekannter Weise aus den Gl. (2) und (3) ermittelt, indem für  $t/\tau = 1$  die Zeit bei

$$\frac{\Delta\vartheta_h(t)}{\Delta\vartheta_E} = 1 - e^{-1} = 0,632$$

bzw.

$$\frac{\Delta\vartheta_k(t)}{\Delta\vartheta_E} = e^{-1} = 0,368$$

bestimmt wurde.

Diese Ergebnisse sind in Tabelle III zusammengestellt.

Man erkennt, dass die grossen Kabelquerschnitte recht grosse Zeitkonstanten von 30 bis 100 min haben. Wie zu erwarten war, weisen Kabel im Stahlrohr unter Putz kleinere Zeitkonstanten auf als die auf Putz verlegten (Tdc 4 × 16 mm<sup>2</sup> und 4 × 35 mm<sup>2</sup>). Bemerkenswert sind auch die typischen Unterschiede der Zeitkonstanten beim offenen und geschlossenen Blechkanal.

Als wichtigstes Ergebnis dieser Arbeit ist der Vergleich zwischen Rechnung und Messung für den intermittierenden Betrieb anzusehen, wobei einige typische Fälle herausgegriffen seien. So zeigt Fig. 4, dass für  $t_1 = t_2 = 5$  min das Verhältnis  $\Delta\vartheta_h/\Delta\vartheta_E$  gemäss Rechnung und Messung recht schön übereinstimmt. Das gleiche gilt z. B. auch für Fig. 5, bei der die Ergebnisse an einem mit Butylkautschuk isolierten Kabel (Typ Giwog der SBB) mit 16 mm<sup>2</sup> Querschnitt für verschiedene Belastungsströme bei gleicher Temperaturerhöhung dargestellt sind.

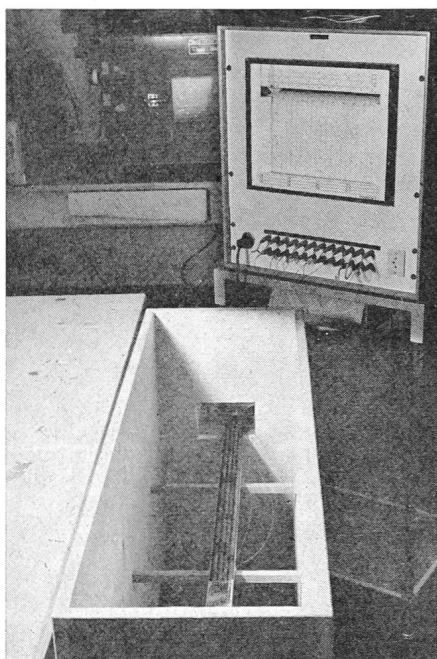


Fig. 3  
Ansicht der Messanordnung. Vorn die Kabelanordnung Giwog, 4 + 4 im offenen Blechkanal, dahinter der 12fach-Punktschreiber für die Temperaturregistrierung

In den Tabellen IVa und IVb ist der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Belastungsströmen von Einleiterkabeln verschiedener Querschnitte für eine Erwärmungstemperatur von  $\Delta\vartheta_E \approx 50^\circ\text{C}$  dargestellt. Für diese Erwärmungstemperatur wurde das Verhältnis des Dauerstromes zum intermittierenden Strom aus Gl. (15) für verschiedene Spieldauern berechnet und durch Messung ermittelt.

Es ergeben sich für PVC und die beiden wärmebeständige Isolierstoffe Butylkautschuk und XLPE sehr befriedigende Übereinstimmungen zwischen Rechnung und Messung, vor allem auch für eine endliche Anzahl Heiz-Kühl-Zyklen (Fig. 6a...6d).

Zum Schluss sei erwähnt, dass bei allen Messungen die Zeitkonstante  $\tau$  für die jeweilige Kabelart und Kabelanordnung

Vergleich der gemessenen und berechneten Belastungsströme von Giwog- und XLPE-Kabeln (16, 25 und 50 mm<sup>2</sup>) für  $\Delta\vartheta \approx 50^\circ\text{C}$  für Dauerbetrieb und intermittierenden Betrieb bei verschiedenen Spieldauern und Verlegungsarten

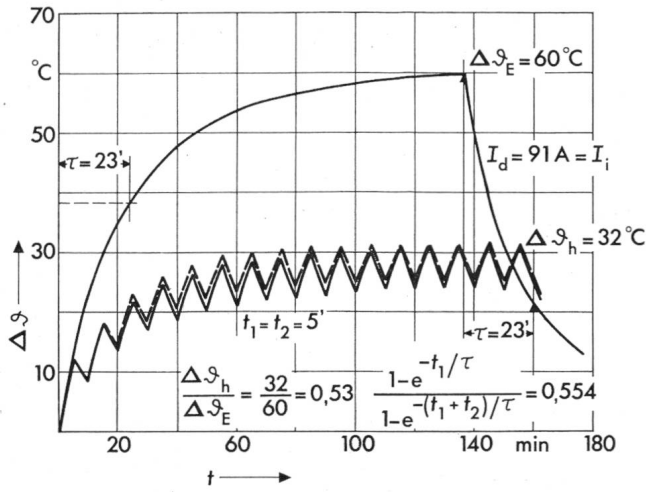
Tabelle IVa

Isolationsart Kabeltyp	Butylkautschuk Giwog	Butylkautschuk Giwog						Vernetztes Polyäthylen XLP			Butylkautschuk Giwog		
		16	16	16	16	16	16	25	25	25	50	50	50
Querschnitt	mm <sup>2</sup>												
Anordnung		1 Einleiter auf Traverse			4+4 Einleiter im geschlossenen Kanal			4+4 Einleiter im geschlossenen Kanal			4+4 Einleiter im geschlossenen Kanal		
Zeitkonstante $\tau$	min	6	6	32	32	32	32	34	34	34	50	50	50
Schaltspiel $t = t_1 + t_2$	min	15	15	15	15	30	75	15	15	30	30	30	60
Einschaltdauer $t_1$	min	5	10	2	5	10	50	2	5	10	4	10	20
$t_1/\tau$		0,832	1,667	0,063	0,156	0,312	1,563	0,059	0,147	0,294	0,080	0,200	0,400
$t/\tau$		2,500	2,500	0,469	0,469	0,937	2,344	0,441	0,441	0,882	0,600	0,600	1,200
Meßstrom für intermittierenden Betrieb	$I_i$ A	167	139	132	89	83	58	175	115	105	290	190	175
Temperaturerhöhung bei intermittierendem Betrieb	$\Delta\vartheta_h$ °C	53,0	53,0	54,5	53,5	54,0	52,0	44,0	42,5	44,0	44,5	43,5	43,5
Dauerstrom für $\Delta\vartheta_h$	$I_d$ A	135	135	56	55	56	54	73	72	73	118	116	116
Berechnetes Verhältnis $\frac{I_i}{I_d} = \sqrt{\frac{1 - e^{-t/\tau}}{1 - e^{-t_1/\tau}}}$		1,274	1,064	2,485	1,609	1,506	1,069	2,499	1,615	1,517	2,422	1,578	1,456
Gemessenes Verhältnis $I_i/I_d$		1,25	1,03	2,36	1,62	1,48	1,07	2,40	1,60	1,44	2,46	1,64	1,51

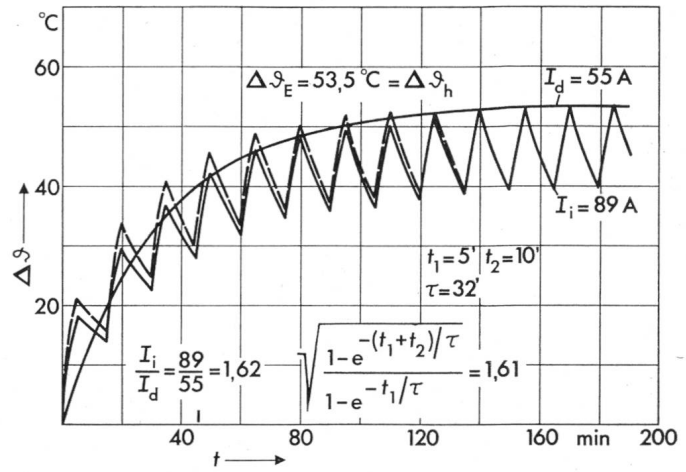
Vergleich der gemessenen und berechneten Belastungsströme von Giwog- und XLPE-Kabeln (95 mm<sup>2</sup>) für  $\Delta\vartheta \approx 50^\circ\text{C}$  für Dauerbetrieb und intermittierenden Betrieb bei verschiedenen Spieldauern und Verlegungsarten

Tabelle IVb

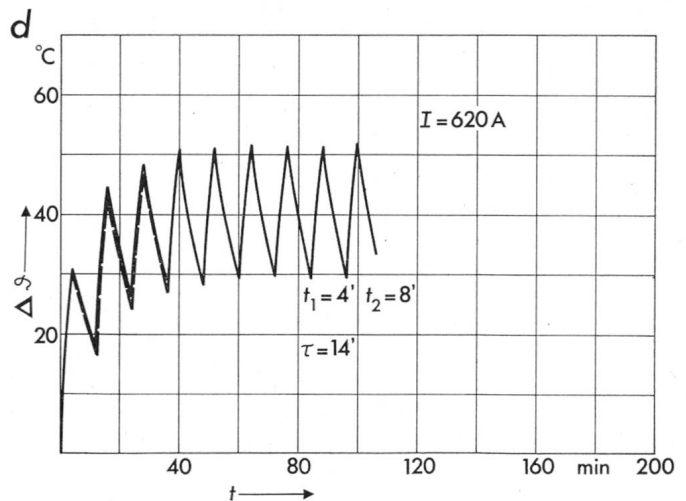
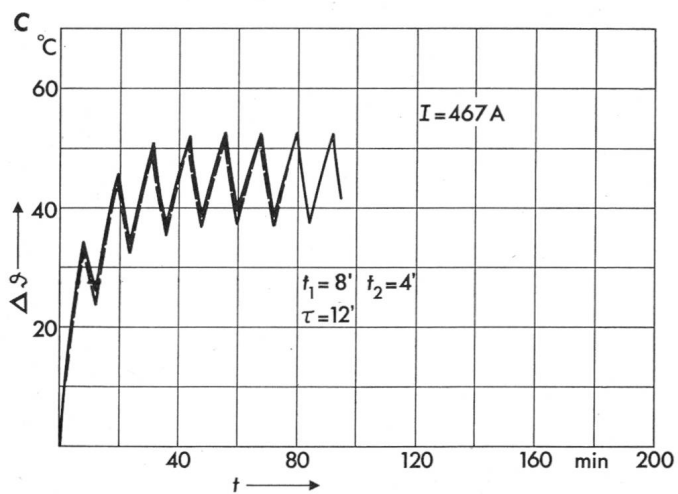
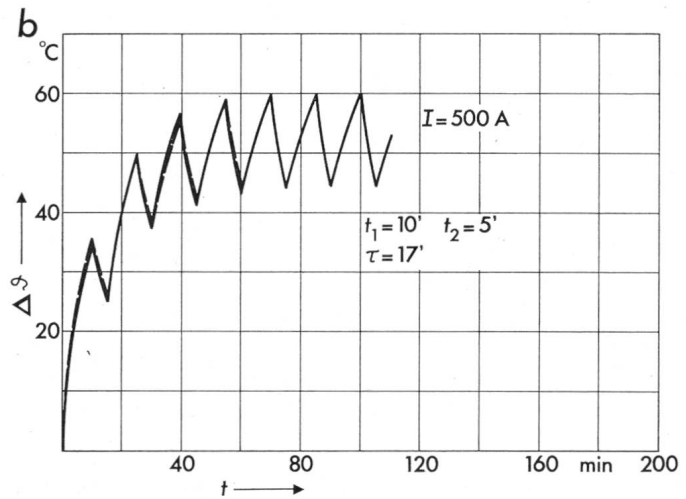
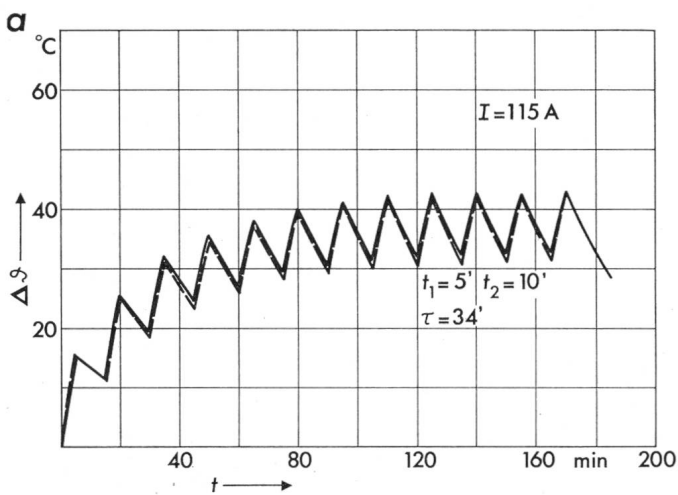
Isolationsart Kabeltyp	Butylkautschuk Giwog	Butylkautschuk Giwog						Vernetztes Polyäthylen XLPE					
		95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	
Querschnitt	mm <sup>2</sup>												
Anordnung		1 Einleiter auf Traverse			4+4 Einleiter im geschlossenen Kanal			1 Einleiter auf Traverse			4+4 Einleiter im geschloss. Kanal		
Zeitkonstante	min	12	12	12	52	52	52	52	14	14	14	57	57
Schaltspiel $t = t_1 + t_2$	min	6	12	30	30	25	50	120	6	6	12	30	30
Einschaltdauer $t_1$	min	2	4	20	4	7,5	15	40	1	2	2	4	10
$t_1/\tau$		0,167	0,333	1,667	0,077	0,144	0,289	0,768	0,071	0,143	0,143	0,070	0,175
$t/\tau$		0,500	1,000	2,500	0,577	0,481	0,962	2,308	0,429	0,429	0,857	0,526	0,526
Meßstrom für intermittierenden Betrieb	$I_i$ A	656	612	436	475	329	306	252	920	660	850	490	320
Temperaturerhöhung bei intermittierendem Betrieb	$\Delta\vartheta_h$ °C	$\approx 50,0$	50,5	53,0	48,5	50,5	50,5	53,0	52,0	54,5	55,0	57,0	52,5
Dauerstrom für $\Delta\vartheta_h$	$I_d$ A	415	415	420	192	195	195	200	420	435	435	210	205
Berechnetes Verhältnis $\frac{I_i}{I_d} = \sqrt{\frac{1 - e^{-t/\tau}}{1 - e^{-t_1/\tau}}}$		1,601	1,493	1,064	2,433	1,686	1,570	1,295	2,249	1,487	2,079	2,457	1,595
Gemessenes Verhältnis $I_i/I_d$		1,58	1,48	1,04	2,47	1,69	1,57	1,26	2,19	1,52	1,95	2,33	1,56



**Fig. 4** Leitererwärmung  $\Delta\theta$  als Funktion der Zeit  $t$  eines Tdc-Kabels  $4 \times 16 \text{ mm}^2$  verlegt in Stahlpanzerrohr unter Putz bei Dauer- bzw. intermittierendem Betrieb (Messungen des SEV)  
 $\tau$  Zeitkonstante der Anordnung  $t_2$  Ausschaltdauer  
 $t_1$  Einschaltdauer  $I$  Belastungsstrom  
 — gemessener, - - - berechneter Verlauf



**Fig. 5** Leitererwärmung  $\Delta\theta$  als Funktion der Zeit  $t$  von Giwog-Einleiter-Kabeln,  $16 \text{ mm}^2$ , flexibel, Anordnung  $4 + 4$  im geschlossenen Blechkanal bei Dauer- bzw. intermittierendem Betrieb  
 Bezeichnungen siehe Fig. 4



**Fig. 6** Leitererwärmung  $\Delta\theta$  als Funktion der Zeit  $t$   
 a XLPE-Seil, steif,  $25 \text{ mm}^2$ , Anordnung  $4 + 4$  im geschlossenen Blechkanal bei intermittierendem Betrieb  
 b Tdc-Seil, steif,  $95 \text{ mm}^2$ , frei in Luft bei intermittierendem Betrieb (Messungen des SEV)

c Giwog-Einleiter-Kabel, flexibel,  $95 \text{ mm}^2$ , frei in Luft bei intermittierendem Betrieb  
 d XLPE-Einleiter-Seil, steif,  $95 \text{ mm}^2$ , frei in Luft bei intermittierendem Betrieb

sowie für die jeweiligen Kabelquerschnitte innerhalb des hier untersuchten Temperaturbereiches mit einer Toleranzspanne von  $\pm 5\%$  als konstant gefunden wurde.

#### 4. Zahlenbeispiel

##### 4.1 Erwärmung bei konstantem Strom und gleichem Querschnitt

Für ein auf Traversen verlegtes Energiezuführungskabel des Querschnittes  $A = 4 \times 35 \text{ mm}^2$ , beispielsweise einer Krananlage, gestattet die VSM-Vorschrift 23888 für Gummikabel bei einer zulässigen Erwärmung von  $\Delta\vartheta_E = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  einen maximalen Belastungsstrom von 124 A. Ein solches 4-Leiter-Kabel auf Traversen hat eine Zeitkonstante von  $\tau = 26 \text{ min}$ . Für einen intermittierenden Betrieb mit einer Einschaltdauer  $t_1 = 1 \text{ min}$  und einer Ausschaltdauer  $t_2 = 3 \text{ min}$  folgt aus Gl. (9) eine maximale Erwärmung im Beharrungszustand von  $\Delta\vartheta_h = 9,3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ein abgebrochener intermittierender Betrieb, bei dem z. B. nach  $n = 5$  Zyklen jeweils eine längere Belastungspause folgt, gibt mit Gl. (20) eine Erwärmung von  $\Delta\vartheta_h(n = 5) = 5,0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

##### 4.2 Belastungsstrom bei konstanter Erwärmung und gleichem Querschnitt

Die gleiche Kabelanordnung gestattet, wenn man die Temperaturerhöhung von  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  ausnützen will, für den gleichen intermittierenden Betrieb nach Gl. (15) eine Belastungsstromstärke von  $I_1 = 241 \text{ A}$  und nach Gl. (20) für den nach 5 Zyklen abgebrochenen intermittierenden Betrieb eine solche von  $I_1' = 328 \text{ A}$ .

##### 4.3 Querschnitt bei konstantem Strom und höchstzulässiger Erwärmung

Bei Begrenzung der Stromstärke auf die ursprünglichen 124 A und unter Zulassung von  $\Delta\vartheta_E = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  lässt sich der Leiterquerschnitt  $A$  für die intermittierenden Betriebsarten reduzieren. Für ein  $4 \times 16\text{-mm}^2$ -Kabel auf Traversen gilt eine Zeitkonstante von  $\tau = 19 \text{ min}$ , und VSM 23888 schreibt einen Dauerstrom von 82 A vor. Wird nun das Kabel im intermittierenden Betrieb mit 124 A belastet, so ist das Stromverhältnis

#### Zahlenbeispiel

Tabelle V

Verlegeanordnung und Schaltspiel sind konstant	Dauerbetrieb	Intermittierender Betrieb	Abgebrochener intermittierender Betrieb
① $A = \text{const}$ $I = \text{const}$	$\Delta\vartheta_E = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta\vartheta_h = 9,3 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta\vartheta_h(n = 5) = 5,0 \text{ }^\circ\text{C}$
② $A = \text{const}$ $\Delta\vartheta = \text{const}$	$I_d = 124 \text{ A}$	$I_1 = 241 \text{ A}$	$I_1' = 328 \text{ A}$
③ $I = \text{const}$ $\Delta\vartheta \leq \Delta\vartheta_E$	$A = 4 \times 35 \text{ mm}^2$	$A = 4 \times 16 \text{ mm}^2$	$A = 4 \times 10 \text{ mm}^2$

$I_1/I_d = 124/82 = 1,51$  kleiner als das aus Gl. (15) für  $t_1 = 1 \text{ min}$ ,  $t_2 = 3 \text{ min}$  und  $\tau = 19 \text{ min}$  zu 1,92 berechnete Verhältnis  $I_1/I_d$ . Das  $4 \times 16\text{-mm}^2$ -Kabel ist demnach zulässig.

Der nächst kleinere Querschnitt  $A = 4 \times 10 \text{ mm}^2$  genügt aber nicht mehr, denn nach VSM 23888 ist dafür ein Dauerstrom von 60 A zulässig, und das Stromverhältnis  $I_1/I_d = 124/60 = 2,07$  ist somit grösser als das aus Gl. (20) theoretisch berechnete Verhältnis  $I_1/I_d = 1,91$  ( $\tau = 15 \text{ min}$  für  $A = 4 \times 10 \text{ mm}^2$ ).

Für den nach  $n = 5$  Zyklen abgebrochenen intermittierenden Betrieb ergibt sich für  $A = 4 \times 10 \text{ mm}^2$  analog  $I_1'/I_d = 2,07$ . Aus dem theoretischen Wert gemäss Gl. (2) von  $I_1'/I_d = \kappa I_1/I_d = 2,22$  folgt, dass für diese Betriebsart ein  $4 \times 10\text{-mm}^2$ -Kabel zulässig ist.

Die Ergebnisse für diese drei Varianten sind in Tabelle V zusammengestellt.

#### Literatur

- [1] Belastbarkeit von Bleimantelkabeln. Normblatt VSM 23888.
- [2] Regeln für Niederspannungsnetz-kabel. Publikation des SEV 3062.1967.
- [3] Technische Temperaturmessungen. VDE/VDI-Richtlinien 3511.

#### Adresse der Autoren:

Dr. W. Gehret, J. P. Heimgartner, Dr. E. Müller, Huber+Suhrer AG, Kabel-, Kautschuk-, Kunststoffwerke, 8330 Pfäffikon/ZH.

## Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

### Generalversammlung 1975 in Den Haag

Das niederländische Nationalkomitee lud die Mitglieder der CEI im Jahre 1975 nach Den Haag ein. Etwas mehr als 1000 Delegierte aus 35 Ländern folgten dem Ruf. Die Schweiz beteiligte sich mit 32 Vertretern. Wie üblich, bildeten die Verhandlungen von total 38 Comités d'Etudes und Sous-Comités, über die gesondert berichtet wurde, den Hauptteil der Geschäfte der Generalversammlung. Die Tagung wurde durch einen Festakt eröffnet, an dem die Delegierten durch den Präsidenten des holländischen Nationalkomitees, Professor J. L. Kroes, begrüsst wurden und Prinz Bernhard der Niederlande einen bemerkenswerten Vortrag über die politischen Probleme der internationalen Normung hielt.

Die holländischen Gastgeber haben aber auch versucht, den Delegierten in zahlreichen technischen Besichtigungen und allgemeinen Exkursionen einen Einblick in die Tätigkeit ihres Landes zu geben. Es ist für uns äusserst interessant und lehrreich gewesen, mit den jahrhundertalten Bemühungen bekannt zu werden, dem Meere, mit seinen ständigen Bedrohungen durch Flut und Stürme, neuen Lebensraum zu entreissen und diesen für kom-

mende Generationen zu sichern. Wir sind dem niederländischen Nationalkomitee für seine Gastfreundschaft und für die vorzügliche Organisation der Generalversammlung der CEI dankbar.

### Conseil der CEI

Die beiden Sitzungen des Conseil vom 22. und 24. September waren von 90 Delegierten aus 35 Ländern der 42 Mitgliedsnationen der CEI beschickt. Die Schweiz beteiligte sich mit drei Vertretern. Die Verhandlungen wurden von Prof. V. J. Popkov (UdSSR) geleitet und unterstützt durch die Mitglieder der Büros: R. Winckler (D) und Dr. L. Podolsky (USA), Vizepräsidenten; M. Winiger (CH), Treasurer; sowie die Altpäsidenten P. Ailleret (F) und Prof. Dr. R. Radulet (R). Das Generalsekretariat war durch C. J. Stanford, Generalsekretär, und die Ingenieure J. Blanc und A. P. Riapolov vertreten. Als Gast nahm der Generalsekretär der ISO, O. Sturen, an den Verhandlungen teil.

Nach den üblichen Eröffnungsförmlichkeiten genehmigten die Delegierten das Protokoll der Sitzungen vom 16. und 19. September 1974 in Bukarest, Dokument PV 1700/1700A/Conseil.