

Hochspannungskabel für die Gotthard-Traktion

Autor(en): **Dumermuth, Markus**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **73/74 (1919)**

Heft 16

PDF erstellt am: **05.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-35702>

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 Ausdrücke 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.

INHALT: Hochspannungskabel für die Gotthard-Traktion. — Kleine Wohnhäuser der Architekten Haller, Ulrich & Pfister in Zürich. — James Watt. — Ausbau von Wasserkraften in Grossbritannien. — Zeichnerische Normen des S. I. A. — Miscellanea: Verband Deutscher Architekten- und Ingenieur-Vereine. Verein Deutscher Ingenieure. Eisenbahn-Hochbrücke bei Hochdorn. Technische Hochschule München.

Die Elektrifizierung der Rhätischen Bahn. Direkte Eisenbahnverbindung Grenoble-Nizza. Direktor der Städtischen Strassenbahn Zürich. — Konkurrenzen: Neubau der Schweizerischen Volksbank in Zürich. — Korrespondenz. — Literatur. — Vereinsnachrichten: Zürcher Ingenieur- und Architekten-Verein. Gesellschaft ehemaliger Studierender der E. T. H.: Stellenvermittlung.

Band 74. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 16.

Hochspannungskabel für die Gotthard-Traktion.

Von Dr. Markus Dumermuth, Bern, Ing. bei der Generaldirektion der S. B. B. (Obertelegrapheninspektion).

Die Kraftübertragung der elektrifizierten Gotthard-Linie zwischen Kraftwerken und Unterwerken wird mit Einphasen-Wechselstrom von 60 000 V Spannung mit geradem Mittelpunkt erfolgen. Auf der Bergstrecke dienen dazu Einleiter-Kabel für 30 000 V mit geteertem Bleimantel.

Auf die Ausschreibung der Schweiz. Bundesbahnen im Februar 1918 über diese Kabel reichten die verschiedenen Firmen Offerten ein, die bezüglich der Bauart wesentlich voneinander abwichen. Die Leitfähigkeit der Kabel war vorgeschrieben mit 100, 120 bzw. 135 mm² Kupferquerschnitt; ebenso war verlangt, dass die Leiter aus Seilen von mindestens 19 Drähten bestehen sollten. Die Offerten lauteten nun teils auf Kupferseile von 19, teils von 37, teils von noch mehr Drähten. Endlich offerierte eine Firma einen künstlich mittels Einbaus einer Hanf- oder Juteseele vergrösserten Leiterdurchmesser; das Seil sollte dadurch nicht eine volle Kreisfläche, sondern einen Kreisring als Querschnitt erhalten. — Die Abmessung des Dielektrikums, d. h. die Dicke der Isolierschicht, ebenso die Wahl des Isoliermaterials war freigestellt. In der Folge offerierten die verschiedenen Firmen Isolierschichtdicken von 12 mm bis hinauf zu 17 mm; als Isoliermaterial wurde durchwegs imprägniertes Papier vorgesehen. In der endgültigen Ausführung werden nun die Kabel mit 12,5, 13,1 und 14 mm dicker Papierschicht gebaut.

Gleichwertiges Isoliermaterial vorausgesetzt ist nun aber die Güte, d. h. Sicherheit gegen Durchschlag eines Hochspannungskabels nicht nur von der Dicke der Isolierschicht, sondern auch vom Leiterdurchmesser abhängig. Im wesentlichen muss dafür gesorgt werden, dass die Beanspruchung des Dielektrikums (des Isoliermaterials) in gewissen Grenzen bleibt.

Diese Tatsachen veranlassen mich, über die Beanspruchung des Dielektrikums Studien anzustellen, um so gewisse Gesichtspunkte zu bekommen, die bei künftigen Ausschreibungen von Hochspannungskabeln bezüglich deren Bauart wegleitend sein können. Da die einschlägigen Verhältnisse im allgemeinen nur wenig bekannt sind, heute aber doch gesteigertem Interesse begegnen, sollen die Ergebnisse dieser Untersuchungen hiermit einem weitem Kreise bekannt gegeben werden. Anregung dazu gab auch ein kürzlich in der „Schweiz. Bauzeitung“ von Prof. W. Kummer veröffentlichter Aufsatz „Unterirdische und oberirdische Wechselstrom-Höchstleistungskabel“.

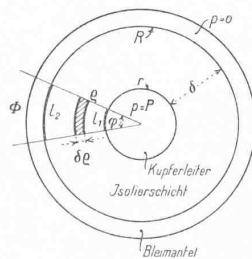


Abb. 1. Kabelquerschnitt.

Physikalische Grundlagen.

In Abbildung 1 ist ein Kabelquerschnitt ersichtlich. Der Kupferleiter habe den Durchmesser *d* und den Radius *r*, das Dielektrikum die Stärke *δ* und der Bleimantel den innern Durchmesser *D* und den Radius *R*. Es bedeutet gleichzeitig *r* den innern und *R* den äussern Radius der Isolierschicht, gemäss dem Zusammenhang *R* = *r* + *δ*. Der Kupferleiter werde an das Potential *P*, der Bleimantel an Erde (*p* = 0) gelegt; es herrsche also zwischen Leiter und Erde der Spannungsunterschied *P*.

¹⁾ Band LXXIII, S. 213 (10. Mai 1919) sowie S. 235 (17. Mai 1919) und S. 293 (21. Juni 1919).

Vom kreisrunden Kupferleiter aus strahlt ein elektrisches Feld nach allen Richtungen gleichmässig radial durch das Dielektrikum hindurch zum Bleimantel. Wir betrachten einen Sektor vom Öffnungswinkel *φ*; dieser schneide vom Umfang des Kupferleiters die Bogenlänge *l*₁, vom Umfang des Bleimantels (Innenseite) die Bogenlänge *l*₂ ab. Der Sektor wird von innen nach aussen radial durchströmt von einem elektrischen Kraftfluss, den wir mit *Φ* bezeichnen wollen. Der durch das kleine Umfangstück *l*₁ = *r* · *φ* im ganzen strömende Flux *Φ* ist gleich stark wie der das grosse Umfangstück *l*₂ = *R* · *φ* durchsetzende Flux. Infolgedessen ist die spezifische Beanspruchung, d. h. Beanspruchung der Längen-, bzw. Flächeneinheit (wir betrachten dafür ein Kabelstück von der Längeneinheit) der innersten Isolierschicht erheblich grösser als die Beanspruchung der äussersten Schicht. Die Beanspruchungen verhalten sich umgekehrt wie die Radien.

Zur Beurteilung der elektrischen Festigkeit eines Kabels ist es daher vor allem erforderlich, die Beanspruchung der innersten Isolierschicht zu kennen.

Mathematische Berechnung der elektrischen Feldstärke.

Wir betrachten auf dem oben erwähnten Sektor (vergl. Abb. 1) einen Ausschnitt vom Radius *ρ* und der unendlich kleinen Dicke *δρ*. Der dieses Segment durchsetzende, für jeden Radius gleiche Flux kann nun wie folgt ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} \Phi &= \text{Feldstärke} \times \text{Umfangstück} \\ &= \text{Potentialgefälle} \times \text{Öffnungswinkel des Sektors} \times \text{Radius} \\ &= \text{Differentialquotient von Potential nach Radius} \times \varphi \times \rho, \end{aligned}$$

also

$$\Phi = -\frac{\partial P}{\partial \rho} \cdot \varphi \cdot \rho \dots \dots \dots (1)$$

daraus weiter

$$-\partial P = \frac{\Phi}{\varphi} \cdot \frac{\partial \rho}{\rho} \dots \dots \dots (2)$$

Dies integriert von der innersten bis zur äussersten Isolierschicht, also vom Radius *r* mit dem Potential *P* bis zum Radius *R* mit dem Potential *p* = 0, ergibt:

$$\int_P^0 -\partial P = \frac{\Phi}{\varphi} \int_r^R \frac{\partial \rho}{\rho} \dots \dots \dots (3)$$

$$[-P]_P^0 = \frac{\Phi}{\varphi} [\text{lognat } \rho]_r^R \dots \dots \dots (4)$$

$$P = \frac{\Phi}{\varphi} (\text{lognat } R - \text{lognat } r) \dots \dots \dots (5)$$

$$P = \frac{\Phi}{\varphi} \text{lognat } \frac{R}{r} \dots \dots \dots (6)$$

Wir führen nun den Begriff ein: „Beanspruchung der innersten Schicht“ = *B_i* und verstehen darunter das durch die dort herrschende elektrische Feldstärke erzeugte Spannungsgefälle pro mm Isolierschicht. Unter Verwendung von Gleichung (1) können wir für die innerste Isolierschicht mit dem Radius *r* bei Betrachtung des gleichen Sektors (Abbildung 1) für den Flux *Φ* folgendes setzen:

$$\Phi = B_i \cdot \varphi \cdot r \dots \dots \dots (7)$$

dies in Gleichung (6) eingesetzt ergibt:

$$P = B_i \cdot r \cdot \text{lognat } \frac{R}{r} \dots \dots \dots (8)$$

Mit dieser Gleichung lässt sich für eine gegebene zulässige Beanspruchung des Dielektrikums und für gegebene Abmessungen des Leiters und Isolierschichtdicke die zulässige Betriebsspannung des Kabels berechnen.

Ferner folgt aus Gleichung (8):

$$B_i = \frac{P}{r} \cdot \frac{1}{\text{lognat } \frac{R}{r}} \dots \dots \dots (9)$$

oder auch

$$B_i = \frac{P}{d/2} \cdot \frac{1}{\lognat \frac{D}{d}} \dots \dots \dots (10)$$

In Worten und im praktischen Masssystem ausgedrückt heisst dies:

Die Beanspruchung der innersten Isolierschicht (Volt pro mm) ist gleich der Spannungsdifferenz (Volt) zwischen Leiter und Bleimantel, geteilt durch den Radius des Leiters in mm mal dem natürlichen Logarithmus des Verhältnisses des Aussendurchmessers zum Innendurchmesser der Isolierschicht.

Indem wir in Gleichung (1) $q = R$ setzen, erhalten wir unter Verwendung von Gleichung (6) analog die Beanspruchung der äussersten Isolierschicht:

$$B_a = \frac{P}{R} \frac{1}{\lognat \frac{R}{r}} \dots \dots \dots (11)$$

Sie ist, wie schon oben gesagt, im umgekehrten Verhältnis der Radien kleiner als die Beanspruchung der innersten Schicht B_i . Ist R von r sehr verschieden, so folgt daraus eine sehr ungleiche Beanspruchung der Isolierschichten, also eine sehr ungleiche Ausnutzung des Isoliermaterials. Dies ist unter Umständen von sehr grosser wirtschaftlicher Bedeutung. Kleine Leiterdurchmesser sind bei Hochspannungskabeln im allgemeinen, weil unwirtschaftlich, zu vermeiden.

Berechnung der Beanspruchung der innersten Papierschicht der Gotthardkabel.

Im folgenden behandeln wir im besondern die Uebertragungs-Hochspannungskabel für die Gotthard-Traktion, deren Leiter aus Kupfer und deren Isolierschicht aus imprägniertem Papier besteht. Wir berechnen zunächst die Beanspruchung der innersten Papierschicht B_i für die Kabel-Abmessungen, wie sie von den verschiedenen Firmen offeriert, dann, wie sie tatsächlich ausgeführt worden sind; endlich berechnen wir sie für eine grössere Reihe der verschiedensten Kupferdurchmesser und Papierschicht-Stärken und ziehen aus den gewonnenen Kurvenbildern weitergehende Schlüsse, um die eingangs erwähnten Gesichtspunkte für künftige Vergebungen von Hochspannungskabeln zu gewinnen.

Es bedeutet in den Tabellen I und II: d_{cu} der Durchmesser des Kupferleiters; δ die Dicke der Isolier-Papierschicht; D der Kabeldurchmesser über Isolation; B_i die Beanspruchung der innersten Papierschicht.

Die verschiedenen Bauarten unterscheiden sich also zum Teil nicht unerheblich hinsichtlich der Beanspruchung der innersten Papierschicht. Die ausgeführten Kabel sind etwas günstiger als die Mehrzahl der offerierten; bei annähernd gleichen Preisen weisen sie aber doch Verschiedenheiten in dieser Beanspruchung bis nahezu 10% auf.

Unter der Voraussetzung eines gleichen Verfahrens zur Imprägnierung geben die obenstehenden Tabellen einen Anhaltspunkt für die Beurteilung des Sicherheitsfaktors der Kabel gegen Durchschlag.

Hochspannungs-Wechselstrom-Kabel für die Gotthard-Traktion.

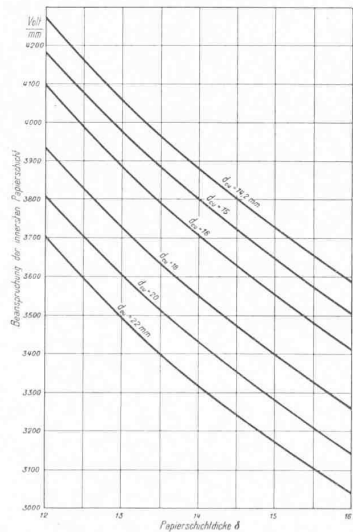


Abb. 2. Beanspruchung der innersten Papierschicht für gegebene Kupferseildurchmesser von 14,2 bis 22 mm und für die Papierschichtdicken von 12 bis 16 mm.

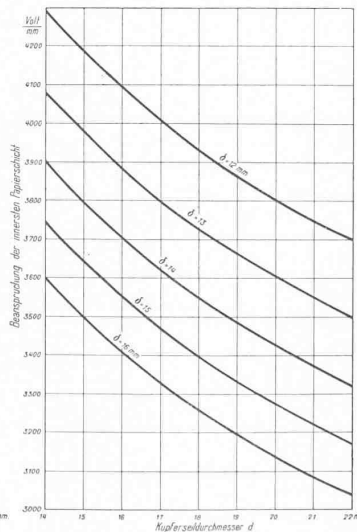


Abb. 3. Beanspruchung der innersten Papierschicht für gegebene Papierschichtdicken von 12 bis 16 mm und für die Kupferseildurchmesser von 14 bis 22 mm.

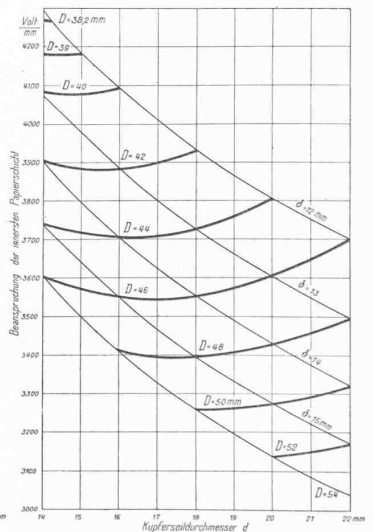


Abb. 4. Beanspruchung der innersten Papierschicht für gegebene Kabeldurchmesser von 38,2 bis 54 mm über Isolation (für Kupferseildurchmesser von 14 bis 22 mm und Papierschichtdicken von 12 bis 16 mm).

Tab. I. Beanspruchung der offerierten Kabel für 30 000 Volt.

Offerte	Querschnitt	d_{cu}	δ	D	B_i
Nr.	mm ²	mm	mm	mm	Volt pro mm
1	120	14,2	12	38,2	4265
2	120	14,2	15	44,2	3720
3	120	14,2	17	48,2	3455
4	135	15	12	39	4185
5	135	17	12	41	4010

Tab. II. Beanspruchung der ausgeführten Kabel von 30 000 Volt.

Ausführung	Querschnitt	d_{cu}	δ	D	B_i
Nr.	mm ²	mm	mm	mm	Volt pro mm
1	120	14,2	12,5	39,2	4160
2	120	14,2	13,1	40,4	4040
3	135	15	12,5	40	3075
4	135	15	13,1	41,2	3960
5	135	15	14	43	3800

Die elektrische Papierbeanspruchung in Abhängigkeit von Leiterdurchmesser und Papierschichtdicke.

Die Beanspruchung der innersten Papierschicht wurde zunächst für alle Leiterquerschnitte von 14,2 bis 22 mm Kupferseildurchmesser und für alle Papierschichtdicken von 12 bis 16 mm berechnet und auf den Kurventafeln Abbildungen 2 bis 4 graphisch aufgetragen. Ferner wurde die Rechnung erweitert auf alle Leiterquerschnitte von 2 bis 50 mm Seildurchmesser und alle Papierschichtdicken von 4 bis 28 mm und dies in den Tafeln Abbildung 5 bis 7 wiedergegeben. Es sind dargestellt:

In Abbildung 2 und 5 die Beanspruchung B_i der innersten Schicht (als Ordinaten) für gegebene Kupferseildurchmesser d_{cu} (als Parameter) in Abhängigkeit von der Papierschichtdicke δ (als Abszissen).

In Abbildungen 3 und 6 die Beanspruchung B_i der innersten Schicht für gegebene Papierschichtdicken δ in Abhängigkeit von den Kupferseildurchmessern d_{cu} .

In Abbildungen 4 bis 7 die Beanspruchung B_i der innersten Schicht für gegebene Kabeldurchmesser D über Isolation in Abhängigkeit von den Kupferseildurchmessern d_{cu} .

Um die Abhängigkeit von B_i vom Kupferseildurchmesser leicht mit deren Abhängigkeit von der Papierschichtdicke zu vergleichen, wurde der Masstab für letztere genau doppelt so gross gewählt wie für den Kupferseildurchmesser, da jeder mm Zuwachs der Schichtdicke den Kabeldurchmesser doppelt so stark vergrössert, wie jeder mm Zuwachs des Kupferseildurchmessers.

Im ersten Bereich bewegt sich die Beanspruchung des Dielektrikums zwischen etwa $4300 V$ pro mm und $3000 V$ pro mm , und im erweiterten Bereich zwischen etwa 2000 und $11000 V$ pro mm . Es zeigt sich, dass im Bereiche $d_{cu} = 14$ bis 16 und $\delta = 12$ bis $14 mm$ jeder mm Zuwachs an Kupferseildurchmesser die Beanspruchung des Dielektrikums um etwa $90 V$ pro mm und jeder mm Zuwachs an Papierschichtdicke diese Beanspruchung um etwa $180 V$ pro mm vermindert. Je $2 mm$ mehr an Kupferdurchmesser und jeder mm mehr an Isolierschicht vermindert also die Beanspruchung des Dielektrikums um etwa 5% .

Besonders interessant zeigen sich die wechselseitigen Beziehungen zwischen Kupferseildurchmesser, Papierschichtdicke und Beanspruchung des Dielektrikums durch die Kurvenscharen in den Abbildungen 4 und 7. Für gegebene Aussen-Kabeldurchmesser gibt es je einen bestimmten günstigsten Kupferseildurchmesser, für den die Beanspruchung des Dielektrikums den niedrigsten Wert hat.

Berechnung der elektrisch günstigsten Konstruktion.

Wir stellen uns im folgenden die Aufgabe: Berechnung des Kupferdurchmessers bei gegebenem Gesamtdurchmesser über Isolation, für den die Beanspruchung B_i ein Minimum ist. Wir bezeichnen die massgebenden Grössen mit folgenden Buchstaben: Kupferdurchmesser $d = 2r$; Durchmesser über Isolation $D = 2R$; Beanspruchung der innersten Schicht wie bisher $= B_i$; $P =$ Betriebsspannung des Kabels.

Es war oben (Gleichung 8):

$$P = B_i \cdot r \cdot \log \frac{R}{r}; \text{ dies differenziert:}$$

$$0 = \partial B_i \cdot r \cdot \log \frac{R}{r} + B_i \log \frac{R}{r} \partial r - B_i \cdot \frac{1}{\left(\frac{R}{r}\right)^2} \cdot \frac{R}{r^2} \cdot \partial r \quad (12)$$

$$0 = r \cdot \log \frac{R}{r} \cdot \frac{\partial B_i}{\partial r} + B_i \cdot \log \frac{R}{r} - B_i \quad (13)$$

$$\frac{\partial B_i}{\partial r} \cdot r \cdot \log \frac{R}{r} = B_i - B_i \cdot \log \frac{R}{r} \quad (14)$$

$$\frac{\partial B_i}{\partial r} = \frac{B_i - B_i \cdot \log \frac{R}{r}}{r \cdot \log \frac{R}{r}} = 0 \text{ (Minimumsbedingung)} \quad (15)$$

$$B_i = B_i \cdot \log \frac{R}{r} \quad (16)$$

$$\log \frac{R}{r} = 1 \quad (17)$$

daraus

$$\frac{R}{r} = e = 2,718 \quad (18)$$

ebenso

$$\frac{D}{d} = e = 2,718 \quad (19)$$

Zur Isolierschichtdicke δ ergeben sich daraus folgende Beziehungen (vergl. den Kabelquerschnitt Abbildung 1):

$$\frac{\delta}{r} = e - 1 = 1,718 \quad (20)$$

$$\frac{\delta}{R} = \frac{e - 1}{e} = \frac{1,718}{2,718} \quad (21)$$

Aus diesen Zusammenhängen ergibt sich, dass zu einem bestimmten Kupferdurchmesser eine bestimmte Isolationschichtdicke gehört, für die das Dielektrikum am geringsten beansprucht wird. Es gibt also in analoger Weise eine günstigste Schichtdicke; dies wird durch die strichpunktierten Kurvenscharen in Abbildung 5 dargestellt. Es folgt daraus: Für gegebene äussere Abmessungen gibt es in jedem Falle eine in elektrischer Beziehung günstigste Konstruktion.

Minimalbetrag der Beanspruchung des Dielektrikums.

Die Bedingungsgleichung (18) in Gl. (8) eingesetzt gibt

$$P = (B_i)_{\min} \cdot r \quad (22)$$

daraus

$$(B_i)_{\min} = \frac{P}{r} \quad (23)$$

In Worten: Der bei gegebenem Kabeldurchmesser über Isolation durch günstigste Abmessung erreichbare Minimalwert der Beanspruchung der innersten Schicht ist gleich der Betriebsspannung geteilt durch den Halbmesser des Leiters.

Die durch die Gl. (23) dargestellte Minimumkurve ist in Abb. 7 aufgetragen; sie ist eine gleichseitige Hyperbel.

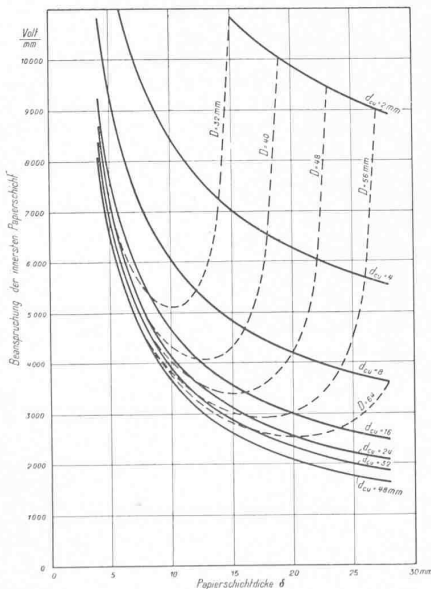


Abb. 5. Beanspruchung der innersten Papierschicht für gegebene Kupferseildurchmesser von 2 bis 48 mm bzw. für gegebene Kabeldurchmesser von 32 bis 64 mm über Isolation und für die Papierschichtdicken von 4 bis 28 mm.

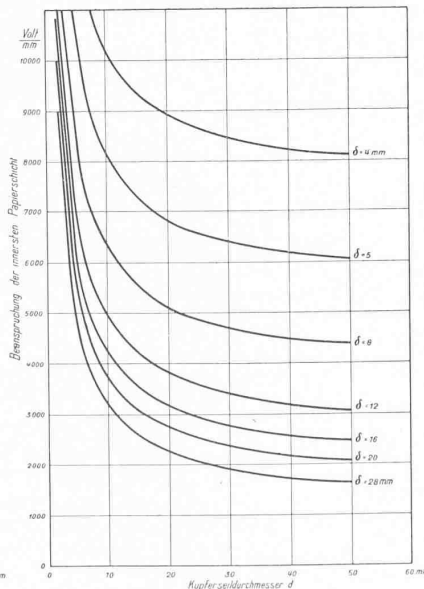


Abb. 6. Beanspruchung der innersten Papierschicht für gegebene Papierschichtdicken von 4 bis 28 mm und für die Kupferseildurchmesser von 2 bis 50 mm. (NB. Die zweitoberste Kurve für $\delta = 5,5$, nicht für $\delta = 5$.)

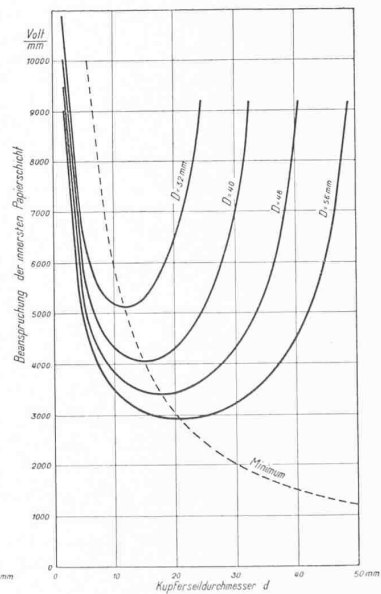


Abb. 7. Beanspruchung der innersten Papierschicht für gegebene Kabeldurchmesser von 32 bis 56 mm über Isolation (für Kupferseildurchmesser von 2 bis 48 mm und Papierschichtdicken von 4 bis 27 mm).

Aktuelle Beispiele zur Berechnung der elektrisch günstigsten Bauart.

Zur Erläuterung der praktischen Verwertung der vorstehenden Ergebnisse führe ich die folgenden Beispiele für die gegebene Betriebsspannung von 30000 V an:

1. Die Beanspruchung B_i soll 4000 V pro mm betragen; aus Gl. (23) folgt $r = 7,5$ mm; hieraus und aus Gl. (18) folgt $R = 7,5 \cdot e = 20,4$ mm; daraus die Isolierschichtdicke $\delta = 12,9$ mm. Jede Verminderung oder Verstärkung von δ hätte eine höhere Beanspruchung des Dielektrikums zur Folge, bei gleichbleibendem Durchmesser über Isolation $D = 2R = 40,8$ mm.

2. Es sei gegeben $D = 40$ mm; dann würde die elektrisch günstigste Bauart sein $d = 2r = 14,7$ und $\delta = 12,7$ mm; B_i würde etwa 4070 V pro mm betragen; die tatsächliche Ausführung hat (Tab. II, Nr. 3): $d = 15$; $\delta = 12,5$ mm; $B_i = 4075$ V pro mm.

3. Es sei gegeben $D = 42$ mm; die elektrisch günstigste Bauart würde sein $d = 15,5$; $\delta = 13,3$ mm; $B_i = 3880$ V pro mm; die tatsächliche Ausführung (Tab. II etwa das Mittel aus Nr. 4 und 5) hat $d = 15$; $\delta = 13,5$ mm; $B_i = 3885$ V pro mm.

Die tatsächlichen Ausführungen der Beispiele (2) und (3) stellen also je nahezu das Optimum der Bauart für ihre bezüglichen Aussen-Abmessungen dar. Von Interesse ist indessen, dass im Beispiel (3) durch Verminderung des Leiterdurchmessers um 0,5 mm, d. h. Verminderung der Leitfähigkeit um 6 %, trotz Vermehrung der Isolierschichtdicke um 0,2 mm, d. h. 1,5 %, die Beanspruchung des Dielektrikums um 0,1 % erhöht, d. h. die Konstruktion etwas verschlechtert worden ist.

Es braucht wohl nicht weiter ausgeführt zu werden, dass die Berechnung der Abmessungen für jede beliebige andere Betriebsspannung und zulässige B_i nach obigem Beispiel (1) leicht ermittelbar ist.

Steigerung der wirtschaftl. Leistungsfähigkeit der Kabel.

Für den Kabelbesteller ist aber neben einer elektrisch günstigen Konstruktion (inbezug auf geringe Beanspruchung des Dielektrikums) vor allem eine möglichst grosse elektrische Leistungsfähigkeit (Leitfähigkeit) von Interesse. Der Kabelpreis ist im wesentlichen durch den Aussendurchmesser bedingt, und bei gleichbleibenden Aussendimensionen bleibt er angenähert der gleiche, wenn etwas weniger Kupfer und mehr Isoliermaterial oder mehr Kupfer und weniger Isoliermaterial verwendet wird. Um ein Kabel mit möglichst grosser Leistungsfähigkeit bei gegebenen Aussendimensionen und Kosten zu erhalten, wird man daher in der Regel einem Kabel mit grösserer Leitfähigkeit den Vorzug geben, und man wird dagegen aus wirtschaftlichen Gründen eine unbedeutende Erhöhung der dielektrischen Beanspruchung über das erreichbare Minimum gerne in Kauf nehmen.

Beispiel der Steigerung der Wirtschaftlichkeit.

Dies werde an folgendem Beispiel erläutert: Die Kabelkonstruktion der Ausführungen Nr. 4 und 5 (vergl. Tab. II) hat einen Aussendurchmesser von durchschnittlich 42 mm; der Kupferdurchmesser beträgt 15 mm und die Papierschichtdicke 13,5 mm. Würde nun der Kupferdurchmesser auf 18 mm erhöht und die Isolerdicke gleichzeitig auf 12 mm vermindert, so würde der Aussendurchmesser gleich bleiben und die Kabelkosten würden sich annähernd wie folgt verändern: An Kupfer würden statt 1200 kg etwa 1700 kg pro km, also 500 kg mehr, an getränktem Papier etwa 100 kg pro km weniger gebraucht; das würde zu den vertraglichen Kriegspreisen einen Mehraufwand von etwa 7 % bedingen. Alle andern Kosten für Bleimantel, Jutelage, Kanäle, Grabarbeiten, Montage würden unverändert bleiben.

Dabei würde sich die dielektrische Beanspruchung des Isoliermaterials von etwa 3885 auf etwa 3930 V pro mm, d. h. um nur rd. 1 % erhöhen. Da dem Seildurchmesser

von 15 mm ein Leiterquerschnitt von 135 mm² und einem Seildurchmesser von 18 mm ein solcher von 193 mm² entspricht, so würde dadurch der Querschnitt um 58 mm² vermehrt. Durch diese Modifikation würde also die Leitfähigkeit des Kabels um etwa 44 % gesteigert. Das heisst: würden für die Kabelkosten nur 7 % mehr aufgewendet, so würde die Leistungsfähigkeit um volle 44 % erhöht. Die Wirtschaftlichkeit (der „ökonomische Wirkungsgrad“) der Kabelanlage könnte also mit relativ geringen Mitteln ganz wesentlich erhöht werden.

Ich füge hier bei, dass die Vergrösserung des Kupfer-Querschnittes nicht nur den Vorteil geringern Spannungs- und Effektverlustes in der Leitung, sondern auch den einer grösseren Unempfindlichkeit gegen Stromstösse infolge geringerer Erwärmung zur Folge hätte; nach bisherigen Erfahrungen dürfte dies für die Lebensdauer der Kabel nur von günstigem Einfluss sein. Dies ist indessen nur dann von Bedeutung, wenn es sich in späterer Zeit als wünschbar erweisen sollte, die Kabel wesentlich stärker zu beanspruchen, als dies heute vorgesehen ist.

Die Beanspruchung des Dielektrikums beträgt bei den für den Gotthard bis jetzt gelieferten 30000 V-Kabeln nach Vorstehendem also nur etwa 4000 V pro mm; diese ist verhältnismässig gering im Vergleich zu anderswo üblichen Beanspruchungen; man geht sonst oft bis zu 5000 V pro mm. Wollte man diese letztere Beanspruchung zulassen, dann könnte die Papierschichtdicke auf 9,5 mm herabgesetzt werden und die Kabel würden mit gleichen Kupferdurchmessern von 15 mm (135 mm² Querschnitt) über der Isolation nur 34 mm stark werden. Die Kosten würden dadurch nicht unwesentlich vermindert und die Wirtschaftlichkeit wiederum erhöht.

Im Interesse der Sicherheit der ganzen Anlage möchte ich indessen empfehlen, von diesem zweiten Mittel nur in gewissen Grenzen Gebrauch zu machen. Von entscheidender Bedeutung ist hierbei das von den Fabrikanten verwendete Imprägnierverfahren und die Qualität der Imprägniermasse. Der Besteller lässt den Fabrikanten im übrigen bezüglich der Bauart mit Vorteil freie Wahl. Wesentlich ist, dass den nach den Erfahrungen der Praxis gestellten Prüfbedingungen in allen Teilen Genüge geleistet wird und dass der Fabrikant alle Gewähr bietet für sorgfältige, gewissenhafte Herstellung, wodurch die Voraussetzungen für ein dauernd zuverlässiges Arbeiten der Kabel-Anlage geschaffen werden.

Zum Schlusse erwähne ich noch, dass es unter Umständen angezeigt ist, den Kupferdurchmesser künstlich zu vergrössern durch Einbau einer Hanf- oder Juteseele, oder Aluminiumdraht zu verwenden, um die Beanspruchung des Dielektrikums zu vermindern; doch muss darüber von Fall zu Fall an Hand der Preise entschieden werden.

Inhaltsübersicht.

Es wird gezeigt, dass zur Beurteilung der elektrischen Festigkeit eines Hochspannungskabels ausser der Qualität des Isoliermaterials vor allem die Kenntnis der Beanspruchung der innersten Isolierschicht erforderlich ist. Die Abhängigkeit dieser Beanspruchung von Betriebsspannung, Leiterdurchmesser und Isolierschichtdicke wird rechnerisch dargelegt und die bezüglichen Zahlenwerte für die offerierten und ausgeführten 30000 V-Einleiterkabel für den Gotthard-Tunnel wiedergegeben. Für weite Bereiche wurden diese Zusammenhänge berechnet und die Ergebnisse in Kurventafeln graphisch dargestellt. Für gegebene äussere Kabeldurchmesser gibt es in jedem Falle eine in elektrischer Beziehung günstigste Konstruktion bezüglich Abmessung von Leiterdurchmesser und Isolierschichtdicke. Die Formeln für Berechnung dieser Grössen und des erreichbaren Minimalwertes der dielektrischen Beanspruchung werden abgeleitet. Es wird gezeigt, dass die Wirtschaftlichkeit (der ökonomische Wirkungsgrad) der Kabelanlage mit einfachen Mitteln je nach Bedarf wesentlich gesteigert werden kann.