

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 50 (1972)

Heft: 9

Artikel: Kräfte und Deformationen an armierten Kabeln unter Zug

Autor: Wiedmer, Martin

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-874675>

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: 30.03.2025

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

Zusammenfassung. Die Berechnung der Kräfte und Deformationen an armierten Weitspannkabeln ergibt als wichtigste Grössen die Flächenpressung des Kabelkörpers und die Schlaghöhe der Armierung. Daraus folgt eine Erklärung des Mechanismus, der zur sogenannten Wirbelbildung führt, die seinerzeit Anlass dieser Untersuchungen war. Zum Schluss wird die Dimensionierung der Armierung kurz besprochen.

Forces et déformations dans les câbles armés sous tension

Résumé. Le calcul des forces et déformations dans les câbles armés à grande portée donne comme valeurs les plus importantes la pression exercée sur le corps du câble par l'armure et le pas de celle-ci. L'auteur présente une explication du mécanisme provoquant la déformation dite par torsion qui a été, à l'époque, à l'origine de ces études. Pour terminer son article, il traite succinctement les dimensions à donner à l'armure.

Cavi armati sospesi, forze di trazione e di deformazione

Riassunto. I valori più importanti per il calcolo di cavi aerei a campate lunghe sono la pressione esercitata sull'anima del cavo e il passo di cordatura dell'armatura. Ne risulta una spiegazione del meccanismo che provoca la deformazione cosiddetta a torsione che fu all'origine di questo esame. Da ultimo si discute brevemente il dimensionamento dell'armatura.

1. Einleitung

Bei Weitspannungen von Telephonkabeln über unwegsame Hindernisse, wie etwa Tobel in den Bergen, werden seit langem freihängende, selbsttragende Kabel mit einer Stahldrahtarmierung verwendet¹. An diesen Weitspannkabeln sind in den letzten Jahren häufig Fehler aufgetreten, deren Ursachen vorerst nicht klar und vor allem nicht quantitativ zu erfassen waren. Als äusserlich sichtbare Fehler sind etwa zu nennen:

- Ausgesprungene Armaturredrähte
- Bitumenausquetschungen
- Verdrehungen
- Einschnürungen
- Wirbel- oder Spiralenbildungen.

Vor allem bei den drei letztgenannten Veränderungen treten am Kabel unter der Armierung Querschnittverformungen auf, die zusammen mit der durch die Zugkräfte bedingten Verlängerung des Kabels Fehler in den Aderisolationen verursachen, die zu Betriebsstörungen führen können.

Die Verlängerung des Kabels darf zufolge eingehender Untersuchungen 1% nicht übersteigen. Diese enge Einschränkung verlangt einen einigermaßen genauen Einblick in die Zusammenhänge zwischen Beanspruchung und Deformationen des armierten Kabels, die zu beleuchten Zweck dieses Artikels ist.

2. Die Deformationen des Kabels

Die Armierungsdrähte, genauer deren Mittellinien, bilden Schraubenlinien um den Kabelkörper. Denkt man sich eine solche auf eine Ebene abgewickelt, so erhält man ein rechtwinkliges Dreieck. Seine Hypotenuse entspricht der Länge L eines Armierungsdrahtes, die grosse Kathete der Länge l des Kabels, und die kleine Kathete ist gleich der Summe der abgewickelten Kabelumfänge (Fig. 1).

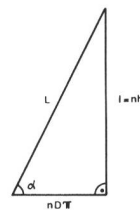


Fig. 1

Abgewinkelte Schraubenlinie eines Armierungsdrahtes

- $l = nh$ = Kabellänge
- n = Anzahl Umgänge der Armierung
- h = Schlaghöhe der Armierung
- D = Kabeldurchmesser über die Mitte der Armierungsdrähte
- α = Steigungswinkel der Armierung
- L = Länge der Armierungsdrähte

Aus Fig. 1 kann man die Beziehung

$$L^2 = n^2 (D^2 \pi^2 + h^2)$$

ablesen, aus der man durch Logarithmieren und Ableiten

$$\frac{dL}{L} = \frac{dn}{n} + \frac{\pi^2 D dD + h dh}{D^2 \pi^2 + h^2}$$

erhält. Einführen der Beziehung $\text{ctg } \alpha = \frac{D\pi}{h}$

in diese Gleichung ergibt

$$\frac{dL}{L} = \frac{dn}{n} + \frac{dD}{D} \cos^2 \alpha + \frac{dh}{h} \sin^2 \alpha \quad (1)$$

Aus dem Zusammenhang $l = nh$ folgt ferner durch Ableiten

$$\frac{dl}{l} = \frac{dn}{n} + \frac{dh}{h} \quad (2)$$

Die beiden Gleichungen (1) und (2) geben Auskunft über alle möglichen Deformationen des Kabels, natürlich unter der Voraussetzung, dass der Kabelaufbau symmetrisch bleibt. Von den darin vorkommenden Deformationen interessiert dh/h am wenigsten; durch Eliminieren erhält man schliesslich

$$\frac{dl}{l} = \frac{dL}{L} \frac{1}{\sin^2 \alpha} - \left(\frac{dn}{n} + \frac{dD}{D} \right) \text{ctg}^2 \alpha \quad (3)$$

Die Kabelverlängerung setzt sich demnach additiv zusammen aus den Beiträgen

¹ Vgl. B. Gnehm, Erfahrungen mit Weitspann-Telephonkabeln, S. 375...391 in dieser Nummer.

$$\varepsilon_L = \frac{dL}{L} \frac{1}{\sin^2 \alpha} \quad \text{durch die Dehnung der Armierungsdrähte}$$

$$\varepsilon_n = -\frac{dn}{n} \operatorname{ctg}^2 \alpha \quad \text{durch allfälliges Aufdrehen}$$

$$\varepsilon_D = -\frac{dD}{D} \operatorname{ctg}^2 \alpha \quad \text{durch Zusammenpressen infolge radialer Kräfte.}$$

Diese Deformationen müssen nun aus den wirkenden Kräften berechnet oder abgeschätzt werden. Die ausschlaggebende Rolle des Steigungswinkels α , der möglichst gross sein sollte, damit die Gesamtverlängerung klein bleibt, ist jedoch schon hier ersichtlich.

3. Die auf das Kabel wirkenden Kräfte

Da das blosse Kabel ohne Armierung nur sehr kleine Zugkräfte aufnehmen kann, wird im folgenden gerechnet, als ob die ganze Last von der Armierung allein getragen würde. Dieses Vorgehen ist gerechtfertigt, wenn man bedenkt, dass bei einem armierten Kabel für beispielsweise 6 t Zugkraft die Bruchlast des blossen Kabels nur 300 kg, das heisst 5% der Zugkraft, betragen kann. Zudem liegt die so bedingte Abweichung auf der sicheren Seite, da man um diese einigen Prozente stärker dimensionieren wird.

Die von aussen auf das Kabel wirkende axiale Zugkraft erzeugt in der Armierung

- ein Torsionsmoment, infolge der schraubenförmigen Anordnung der Drähte, welches das Kabel aufzudrehen versucht,
- Zugkräfte in den Drähten, die eine Verlängerung des Kabels bewirken und
- radial gerichtete Einpresskräfte, die ebenfalls eine Kabelverlängerung erzeugen.

3.1 Das Torsionsmoment

Mit den Bezeichnungen der *Figur 2* erhält man für das Torsionsmoment

$$M = K'' k \frac{D}{2} \quad \text{wobei } k = \text{Zahl der Armierungsdrähte}$$

$$\text{und } K'' = \frac{Z}{k} \operatorname{ctg} \alpha$$

Das Torsionsmoment berechnet sich somit zu

$$M = Z \frac{D}{2} \operatorname{ctg} \alpha = Z \frac{\pi D^2}{2h} \quad (4)$$

und ergibt recht beträchtliche Werte, wie folgendes Beispiel zeigt. Mit den Annahmen

$$Z = 6 \text{ t}$$

$$D = 5 \text{ cm}$$

$$h = 30 \text{ cm} \text{ wird } M = 79 \text{ mkg}$$

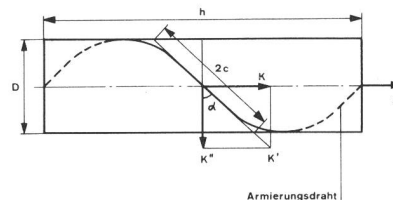


Fig. 2

Komponenten der Zugkraft am Armierungsdraht und Schnittellipse der Schmiegungeebene

Z = Zugkraft auf das Kabel

$K = \frac{Z}{k}$ = Zugkraft pro Draht

$K' = \frac{Z}{k \cdot \sin \alpha}$ = Längskomponente

$K'' = \frac{Z}{k} \operatorname{ctg} \alpha$ = Komponente in Richtung des Kabelumfanges

k = Zahl der Armierungsdrähte

3.2 Der Längszug des Armierungsdrahtes und dessen Deformation

Der Zug auf einen Armierungsdraht beträgt nach *Figur 2*

$$K' = \frac{Z}{k \sin \alpha}$$

Nach dem Hookeschen Gesetz $\sigma = E \varepsilon$ erhält man somit

$$\frac{dL}{L} = \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{4 K'}{\pi a^2 E} = \frac{4 Z}{k \pi a^2 E \sin \alpha} \quad (5)$$

worin Z = Kabelzug

a = Durchmesser der Armierungsdrähte

k = Zahl der Armierungsdrähte

E = Elastizitätsmodul der Armierungsdrähte

ε = relative Dehnung des Drahtes

3.3 Die radiale Einpresskraft des Armierungsdrahtes

Die auf eine Länge s des Armierungsdrahtes wirkende radiale Einpresskraft kann auf folgende Art berechnet werden: In der Umgebung jedes Punktes hat der Draht die Form eines Kreissegmentes, das im Krümmungskreis der vom Draht beschriebenen Schraubenlinie liegt. Der Radius ϱ dieses Kreises ist gleich dem Krümmungsradius im Nebenscheitel der Ellipse, die die Schmiegungeebene an die Schraubenlinie aus dem Kabelzylinder ausschneidet.

Die Halbachsen der Schnittellipse betragen nach *Figur 2*:

$$c = \frac{D}{2 \cos \alpha} = \text{grosse Halbachse}$$

$$b = \frac{D}{2} = \text{kleine Halbachse}$$

Der Krümmungsradius im Nebenscheitel ist

$$\varrho = \frac{c^2}{b} = \frac{D}{2 \cos^2 \alpha}$$

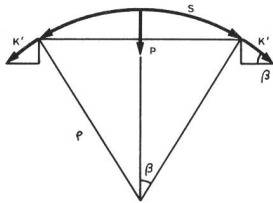


Fig. 3
Einpresskraft des
Armierungsdrahtes

Er ist gleich dem Krümmungsradius der Schraubenlinie, wie vorhin erklärt.

Aus Fig. 3 ergibt sich durch Komponentenzerlegung

$$P = 2 K' \sin \beta \quad \text{und} \quad \frac{P}{s} = \frac{2 K' \sin \beta}{2 \varrho \beta}$$

Setzt man die vorstehenden Beziehungen für ϱ und K' gemäss Fig. 2 ein, so folgt

$$\frac{P}{s} = \frac{Z \sin \beta \cdot 2 \cos^2 \alpha}{k \sin \alpha \cdot D \beta}$$

Macht man schliesslich den Grenzübergang $\beta \rightarrow 0$, so erhält man

$$\frac{dP}{ds} = \frac{2 Z \cos^2 \alpha}{k D \sin \alpha}$$

Da die Armierungsdrähte infolge dieser Einpresskraft etwas ins Bitumen- oder Kunststoffpolster einsinken, darf die Armierung nicht satt geschlossen sein, andernfalls sofort einzelne Drähte unter die restliche Armierung gekeilt oder ausspringen würden. Dies ist auch tatsächlich zu beobachten bei Kabeln, die zu grosse Querkräfte aufweisen.

Es liegt also nahe, einen Überdeckungsfaktor γ einzuführen, wobei zu beachten ist, dass der Armierungsdraht in Richtung des Kabelumfanges die Ausdehnung $a/\sin \alpha$ besitzt. Die Bestimmungsgleichung für den Überdeckungsfaktor lautet somit

$$k \frac{a}{\sin \alpha} = D \pi \gamma \quad (6)$$

Durch Einsetzen von (6) in das letzte Resultat wird die Einpresskraft je Längeneinheit des Armierungsdrahtes

$$\frac{dP}{ds} = Z \frac{2a}{D^2 \pi \gamma} \operatorname{ctg}^2 \alpha = Z \frac{2 \pi a}{\gamma h^2}$$

Die Flächenpressung unter dem Draht erhält man hieraus mit Division durch a und die *mittlere* Flächenpressung des Kabelmantels wird schliesslich

$$\delta_a = Z \frac{2\pi}{h^2} \quad (7)$$

Sie ist nur abhängig vom Kabelzug und der Schlaghöhe der Armierung, jedoch unabhängig vom Kabel- und Armierungsdrahtdurchmesser. Zwei ganz verschiedene Kabel, die nur in der Schlaghöhe übereinstimmen, weisen also bei

gleichen Zugkräften gleiche Flächenpressungen auf. Diese Feststellung gilt aber nur bei runden Kabelquerschnitten, wie sich später herausstellen wird.

Eine Kontrolle der hergeleiteten Beziehungen ergibt sich aus dem Energiesatz. Die bei der Verlängerung des ganzen Kabels zugeführte Energie wird aufgeteilt auf die Dehnung der Armierungsdrähte, das Zusammenpressen sowie das Drehen des Kabels:

$$Z dl = k K' dL + \sigma_a \pi D l \frac{dD}{2} + M d\varphi$$

Durch Einsetzen der Beziehungen (4), (7) und K' (siehe Fig. 2), wobei σ_a und M mit negativem Vorzeichen einzuführen sind (da beide entgegengesetzt der positiven Richtung von dD oder dn orientiert sind) sowie von $d\varphi = 2 \pi dn$, folgt nach einer kleinen Umformung die Gleichung (3), die früher auf geometrischem Wege gefunden wurde. Damit ist gezeigt, dass die Kräfte richtig berechnet wurden.

Zwischen der Flächenpressung und dem Torsionsmoment besteht übrigens eine sehr einfache Beziehung. Um diese zu erhalten, muss man lediglich das Torsionsmoment umrechnen auf die Tangentialkraft je Längeneinheit des Kabelumfanges:

$$u = \frac{M}{\frac{D}{2} \cdot D \pi} = \frac{Z}{h}$$

Damit erhält man die Beziehung

$$\frac{u}{\sigma_a} = \frac{h}{2\pi}$$

4. Folgerungen aus den bisherigen Ergebnissen

Die in den vorangegangenen Abschnitten erhaltenen Gleichungen sind alle einfach, obschon sie ohne Näherungen hergeleitet wurden, also exakt gelten. Sie sind mithin schon in einer für die Praxis brauchbaren Form. Im folgenden werden einige Konsequenzen aus der Theorie und den praktischen Erfahrungen mit Weitspannkabeln gezogen.

4.1 Radiale Flächenpressung; Wirbelbildung

Die mittlere Flächenpressung, die die Armierung auf das darunterliegende Kabel mit Polster ausübt, ist nach (7) umgekehrt proportional zum Quadrat der Schlaghöhe der Armierung und kann durch deren Vergrösserung stark reduziert werden. Dass dies wünschenswert ist, ergibt sich aus zwei Gründen. Einerseits bedeutet eine mässige Flächenpressung (auch etwa Querkraft genannt), dass die Armierungsdrähte wenig in die Jute- und Bitumen- oder Kunststoffumhüllung einsinken, womit dD in (3) klein gehalten werden kann. Andererseits wird die Wirkung von dD auf die Verlängerung des Kabels ihrerseits wieder im selben

Tabelle 1: Charakteristiken einiger Weitspannungen.

Anlage	D cm	a mm	k	Z _{max} 9000 Da kg	Z kg	h = 0,5 √ Z cm	h _{eff} cm	σ _Q = Z $\frac{2\pi}{h^2_{eff}}$ kg/cm ²	γ = ka D π sin α	ε ‰	$\frac{D}{2}$ mm	tg ² α	σ _{Draht} kg/mm ²	Zustand
1. Entlematt	2,44	3	24	6 590	7 044	42	25	71	0,983	2,37	1,00	10,7	43,4	viele W
2. Kandersteg Stock	2,86	3	28	7 720	6 550	40,5	31	43	0,973	1,87	1,41	11,8	34,5	stark w, mit B, e
3. Innertkirchen	3,91	2,5	44	8 800	8 100	45	55	17	0,814	2,02	3,23	20,2	38,4	leicht w
4. Faïdo-Dalpe	2,85	2,5	33	6 410	4 000	31,5	30	28	0,961	1,39	1,38	11,2	25,7	wenig B, e
5. Brione-Verzasca	3,55	3	35	9 580	1 200	17,4	43	4	0,863	0,27	2,55	14,8	5,0	E
6. Corippo	4,22	3	40	11 400	2 050	22,6	44	6,7	0,945	0,41	2,19	11,0	7,6	leicht w, A
7. Berzona-Mergoscia	4,71	3,5	39	14 850	12 000	54,9	44	39	0,974	1,88	1,71	8,8	33,8	viele W, E, e
8. Fiesch-Ernen	3,75	2,5	43	8 440	5 700	37,8	40	22,4	0,952	1,53	1,84	11,6	28,2	e, sonst gut
9. Rhone b. Fiesch	3,40	2,7	37	8 280	4 000	31,6	38	17,4	0,969	1,06	1,97	12,7	19,6	V, leicht w
10. Illgraben-Brig	3,93	2,5	44	8 840	2 800	26,5	34	11	0,948	0,78	1,40	7,6	13,8	A, E
11. Illgraben-Sitten	5,05	2,5	57	11 360	3 800	30,8	37,5	15	0,976	0,87	1,27	5,6	14,8	E
12. Suen-Mase	3,65	2,5	43	8 210	3 995	31,6	47	16	0,966	1,03	2,76	16,8	19,5	gut
13. Moléson	3,38	2,2	40	6 700	6 150	39,6	27	53,4	0,890	2,50	0,83	6,5	43,5	tiefe W, starke B
14. Plaffeien	2,65	2	39	4 770	3 700	30,4	29	27,5	0,975	1,70	1,33	12,2	31,5	V, B, e

Abkürzungen:

e Armatur eng geschlossen
A ausgesprungene ArmaturdrähteV Verdrehung
W WirbelbildungenB Bitumenaustritte
w wellig

E Einschnürung

Mass durch die Schlaghöhe reduziert wie die Flächenpressung, da auch $\text{ctg}^2 \alpha$ umgekehrt proportional zum Quadrat der Schlaghöhe ist.

In *Tabelle 1* sind für einige ausgeführte Weitspannungen die Flächenpressungen σ_Q für die der Dimensionierung zugrunde gelegte Zugkraft Z angegeben. Die Werte schwanken zwischen 4 und 71 kg/cm². Aus den festgestellten Zuständen der Kabel folgt ohne weiteres, dass Flächenpressungen über 25 kg/cm² die Kabel stark gefährden und Wirbelbildungen, Bitumenausflüsse, Verdrehungen usw. verursachen.

Der Mechanismus, der zur Wirbelbildung führt, ist noch weitgehend unbekannt; gemäss Zugversuchen in einer Kabelfabrik wird der Querschnitt zunächst abgeplattet, was wahrscheinlich auf kleine Asymmetrien in der Armatur zurückzuführen ist. Später wird dann der Querschnitt «geknickt», das heisst die Wirbelbildung setzt ein. Künstliches Erzeugen von Unrundheiten durch Hammerschläge oder Ziehen über eine Umlenkrolle beschleunigen die Wirbelbildung jedoch nicht; diese setzt bei derselben Zugkraft ein wie am unbehandelten Kabel.

Manchmal ist zu beobachten, dass ein Armierungsdraht ins Polster gedrückt wird und sich die benachbarten Drähte darüber wieder mehr oder weniger zusammenschliessen. Dieser Vorgang ist jedoch keine Voraussetzung für die Wirbelbildung. Es sind genügend Fälle bekannt, und auch experimentell nachgebildet worden, bei denen die Armatur gleichmässig blieb und die Kabel trotzdem zusammenfielen.

Diese Versuchs- und Erfahrungsergebnisse sind einigermaßen verständlich, da die Flächenpressung unabhängig von der Zahl der Armierungsdrähte ist; fällt ein Draht aus irgendeinem Grunde aus, so werden die übrigen Drähte ein wenig mehr beansprucht, die Flächenpressung aber verändert sich nicht, solange der Querschnitt rund bleibt.

Die Flächenpressung ändert jedoch stark und wird ortsabhängig, wenn der Kabelquerschnitt unrund wird. Bezeichnet man mit ϱ den Krümmungsradius des Kabelquerschnittes an einer bestimmten Stelle, so gilt dort für die «lokale» Schlaghöhe h'

$$h' = 2 \varrho \pi \text{tg} \alpha$$

wobei der Steigungswinkel der Armierungsdrähte durch die Unrundheit nicht beeinflusst wird. Setzt man diesen Ausdruck in die Formel für die Flächenpressung ein, so folgt

$$\sigma_Q' = Z \frac{2\pi}{h'^2} = Z \frac{\text{ctg}^2 \alpha}{2\pi \varrho^2}$$

Mit $\text{ctg} \alpha = \frac{D\pi}{h} = \frac{2R\pi}{h}$ resultiert

$$\sigma_Q' = Z \frac{2\pi}{h^2} \left(\frac{R}{\varrho} \right)^2 = \sigma_Q \left(\frac{R}{\varrho} \right)^2 \quad (8)$$

Hiermit wird klar, dass das Abplatteln des Kabelquerschnittes ein äusserst gefährlicher Vorgang ist, da die

lokale Flächenpressung mit abnehmendem Krümmungsradius quadratisch steigt. Offenbar muss eine gewisse Unrundheit erreicht werden, damit die Flächenpressungen im Zusammenspiel mit den immer vorhandenen grösseren oder kleineren Unregelmässigkeiten in der Lastverteilung auf die Armaturdrähte die Wirbelbildung einzuleiten vermögen. Man könnte noch argumentieren, dass Unrundheiten wieder ausgeglichen würden, da an flachen Stellen die Flächenpressung sinkt, an stärker bombierten steigt. Dies könnte aber höchstens eintreten, wenn der abgeplattete Querschnitt und die Kräfteverteilung eine Symmetrie bewahrten, was jedoch nie der Fall sein wird. Aus allen diesen Überlegungen kann nur der Schluss gezogen werden, dass die Querstabilität des Kabelaufbaues erhöht werden muss, wenn die Flächenpressung nicht unter 25 kg/cm² gehalten werden kann. Das ist zum Beispiel der Fall, wenn die Schlaghöhe der Armierung zur Einhaltung dieser Limite so gross wird, dass beim Aufhaspeln des Kabels die Armierung ausbauchen würde. Die Querstabilität kann durch eine Stützspirale oder einen Wellmantel erhöht werden; solche Konstruktionen haben sich in der Praxis gut bewährt.

4.2 Die Verlängerung des Kabels durch Aufdrehen

Beim Spannen eines armierten Kabels entsteht ein Drehmoment, berechnet nach (4), das versucht, das Kabel aufzudrehen. Sollte dies trotz des Drallhalters geschehen, ergibt sich eine Kabelverlängerung (nebst Verdrehung des Bündels), die als Spezialfall von (3) angegeben werden kann:

$$\varepsilon_n = -\frac{dn}{n} \operatorname{ctg}^2 \alpha \quad (9)$$

dn ist beim Aufdrehen negativ, es ergibt sich also tatsächlich eine Verlängerung.

Diese Formel ist genau, so lange dn nur ein kleiner Bruchteil aller Umgänge n ist. Andernfalls muss von der Beziehung

$$L^2 = n^2 D^2 \pi^2 + l^2 \quad (\text{siehe Fig. 1})$$

ausgegangen werden. Da die Drahtlänge angenähert konstant bleibt, folgt

$$\begin{aligned} n_0^2 D^2 \pi^2 + l_0^2 &= n_1^2 D^2 \pi^2 + l_1^2 \\ l_1 - l_0 &= \Delta l = \sqrt{l_0^2 + (n_0^2 - n_1^2) D^2 \pi^2} - l_0 \\ \varepsilon_n &= \frac{\Delta l}{l_0} = \sqrt{1 - \frac{\Delta n}{n_0} \left(2 + \frac{\Delta n}{n_0} \right) \operatorname{ctg}^2 \alpha_0} - 1 \\ \varepsilon_n &\cong -\frac{\Delta n}{n_0} \left(1 + \frac{\Delta n}{2n_0} \right) \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 \end{aligned} \quad (10)$$

Diese Formel enthält die Gleichung (9) als Spezialfall für

$\Delta n \ll n_0$ und ist noch für $\frac{\Delta n}{n_0} = \frac{1}{4}$ auf 1,5% genau.

4.3 Verlängerung durch die Elastizität der Armierungsdrähte

Der Beitrag zur Kabelverlängerung infolge Dehnung der Armierungsdrähte beträgt nach (3) und (5)

$$\varepsilon_L = \frac{dL}{L} \frac{1}{\sin^2 \alpha} = \frac{4Z}{k \pi a^2 E \sin^2 \alpha} \quad (11)$$

In Tabelle I ist dieser Beitrag, berechnet mit einem Elastizitätsmodul von 20 000 kg/mm², eingetragen. Die Werte liegen zwischen 0,4 und 2,5‰.

4.4 Zulässige Verlängerung des Kabels

Bei einer fachgerechten Montage muss unter allen Umständen vermieden werden, dass das Kabel aufdreht, da sonst die Verlängerung rasch über das zulässige Mass von 1% hinausgeht. Auch ohne Verdrehung treten oberhalb dieser Grenze Papierrisse im Bündel auf. Das Aufdrehen beansprucht aber das Bündel noch weiter, indem die mitläufig zur Armatur geschlagenen Adern verhältnismässig gestaucht, die gegenläufigen zusätzlich gedehnt werden. Bei festgehaltenen Kabelenden ist $dn = 0$, so dass sich (3) vereinfacht zu

$$\frac{dl}{l} = \frac{dL}{L} \frac{1}{\sin^2 \alpha} - \frac{dD}{D} \operatorname{ctg}^2 \alpha = \varepsilon_L + \varepsilon_D$$

dD ist im praktischen Fall negativ, da das Polster unter der Armatur zusammengepresst wird; der zweite Term obiger Gleichung wird damit positiv. Die Armierungsdrähte sinken um den Betrag $dD/2$, der aus der Flächenpressung und der Beschaffenheit des Polsters abgeschätzt werden kann, in die Umhüllung ein. Mit (11) ist auch der erste Teil bekannt, und dl/l kann berechnet werden. Meist liegt jedoch der umgekehrte Fall vor, da die Verlängerung durch den Grenzwert von 1% gegeben ist. Man berechnet dann die zulässige Durchmessererringerung dD und vergleicht ihn mit dem auf Grund der Querkraft zu erwartenden Wert. In Tabelle I sind die maximal erlaubten Einpressungen 0,5 dD für eine Gesamtdehnung von 1% unter Normallast angegeben. Man sieht, dass auch bei grossen Zugkräften (Z nur wenig kleiner als $Z_{\max}$, vgl. nächsten Abschnitt) grosse Einpressungen toleriert werden können bei grossen $\operatorname{tg}^2 \alpha$, zum Beispiel im Falle Innerkirchen. Bei kleineren $\operatorname{tg}^2 \alpha$ jedoch werden die so errechneten Einpressungen der Armaturdrähte kleiner als der halbe Drahtdurchmesser (Anlagen Berzona-Mergoscia und Moléson).

5. Einige Bemerkungen zur Kabeldimensionierung

5.1 Die maximale Zugkraft

Die wichtigste Grösse für die Dimensionierung eines Kabels ist die Zugkraft Z . Sie kann berechnet werden aus dem Kabelgewicht je Längeneinheit, der Distanz der Fixpunkte und deren Höhenunterschied sowie den geschätzten

Wind-, Schnee- und Eislasten. Das spezifische Kabelgewicht ergibt sich aus der Aderzahl, der Aderstärke, den gewählten Isolationen und dem äusseren Kabelaufbau (Mantel, Korrosionsschutz, Armierung). Sind diese Daten alle gewählt, so kann man nun aber eine obere Grenze für die Zugkraft angeben. Zieht man die Elastizitätsgrenze der Armierungsdrähte zu deren Berechnung heran, so hat man von (5) und (6) für die Zugspannung im Armierungsdraht auszugehen.

$$\sigma = \frac{4Z}{\pi a^2 \sin \alpha} = \frac{4Z(1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha)}{\pi^2 D a \gamma}$$

Gemäss den Angaben eines Kabelwerkes gelten folgende Richtwerte für die Materialkonstanten der Armierungsstahldrähte:

- Elastizitätsmodul 20 000 kg/mm²
- Nennzugfestigkeit 160...210 kg/mm²
- Proportionalitätsgrenze 40...55% der Nennzugfestigkeit

Demnach darf die Spannung sicherheitshalber höchstens

$$\sigma_{\max} = 0,4 \cdot 160 = 64 \text{ kg/mm}^2 = 6400 \text{ kg/cm}^2$$

betragen. Bei richtiger Dimensionierung wird ferner $\operatorname{ctg}^2 \alpha \cong 0,05$ und die Überdeckung $\gamma \cong 0,8$ (worauf in 5.3 noch eingegangen wird). Setzt man diese Werte in obige Gleichung für die Zugspannung ein, so erhält man

$$\frac{4Z_{\max} \cdot 1,05}{\pi^2 D a \cdot 0,8} \cong \frac{0,525 Z_{\max}}{D a} = 6400$$

$$Z_{\max} \cong 12\,000 D a$$

Bei dieser Berechnung wurde die zweite Hauptspannung im Draht, die von der Flächenpressung herrührt, vernachlässigt, was wegen deren Kleinheit (näherungsweise 25 kg/cm², siehe Abschnitt 4.1) ohne weiteres zulässig ist.

Geht man andererseits von der Kabelverlängerung infolge der Armierungsdrahtelastizität aus, so folgt nach (3) und (5):

$$\varepsilon_L = \frac{dL}{L} \frac{1}{\sin^2 \alpha} = \frac{\sigma}{E \sin^2 \alpha} = \frac{4Z(1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha)^2}{\pi^2 D a \gamma E}$$

Berücksichtigt man nun, dass die gesamte Kabeldehnung sich noch aus den weiteren Beiträgen ε_D und ε_n infolge Durchmesser verringering und allfälligem Aufdrehen zusammensetzt und insgesamt 1% nicht übersteigen darf, so wird man vorsichtigerweise ε_L auf 0,25% begrenzen. Damit und aus den bereits angegebenen übrigen Werten folgt

$$Z_{\max} \cong 9000 D a \quad (12)$$

Diese Grenze ist kleiner als die durch die Elastizität der Armierungsdrähte gegebene und ist deshalb massgebend. Bei der Anwendung dieser und der folgenden Gleichungen ist darauf zu achten, dass im technischen Masssystem gerechnet wird, also mit Längen in cm und Kräften in kg.

5.2 Die optimale Ganghöhe der Armierung

In Abschnitt 4.1 hat sich ergeben, dass die Flächenpressung nicht grösser als 25 kg/cm² sein sollte, damit ein Kabel ohne Stützspirale oder dergleichen einwandfrei bleibt. Unter Hinzunahme von (7) kann man hieraus die erforderliche Ganghöhe h berechnen:

$$\sigma_Q = 25 \geq Z \frac{2\pi}{h^2}$$

$$h \geq 0,5 \sqrt{Z} \quad (13)$$

Dimensioniert man auf $Z_{\max} = 9000 Da$, so ergibt sich eine optimale Ganghöhe von

$$h_{\text{opt}} = 47,5 \sqrt{Da}$$

wobei sogleich zu prüfen wäre, ob sich dieser Wert mit anderen Forderungen, wie etwa Aufhaspelbarkeit, verträgt.

5.3 Die zulässige Einpressung der Armaturdrähte und deren Überdeckungsfaktor

Aus der schon früher besprochenen Grenzdehnung des Kabels von 1% kann nun die zulässige Einpressung der Armaturdrähte ins Polster berechnet werden. Mit der Annahme, dass ein Aufdrehen durch Drallhalter vermieden werde, wird nach (3)

$$\frac{dl}{l} = \varepsilon_L + \varepsilon_D = \varepsilon_L + \frac{|dD|}{D} \operatorname{ctg}^2 \alpha$$

Es ist nun weiter

$$\operatorname{ctg}^2 \alpha = \frac{\pi^2 D^2}{h_{\text{opt}}^2} \cong \frac{D}{225 a}$$

$$\text{und } \frac{dl}{l} = 0,01 \quad \text{ sowie } \varepsilon_L = 0,0025$$

da letzterer Wert zur Berechnung von $Z_{\max}$ führte. Man erhält somit

$$\left| \frac{dD}{D} \right| = 0,85a \quad (14)$$

was bedeutet, dass die Einpressung annähernd eine Drahtdicke betragen darf, wenn optimal dimensioniert worden ist. Bei dieser Einpressung darf dann die Armatur ganz geschlossen sein, was auf die Berechnung der maximalen Überdeckung im Neuzustand führt. Nach (6) ist nämlich

$$ka = \pi D \gamma \sin \alpha = \pi D' \gamma' \sin \alpha'$$

wenn mit den Beistrichen (') die Grössen im gedehnten Zustand bezeichnet werden. Da sich der $\sin \alpha$ praktisch durch die Dehnung nicht ändert und $\gamma' = 1$ ist (geschlossene Armatur!), folgt

$$\gamma = \frac{D'}{D} = 1 - \left| \frac{dD}{D} \right| = 1 - 1,7 \frac{a}{D} \quad (15)$$

unter Berücksichtigung von (14). Aus der Tabelle I ist ersichtlich, dass D/a Werte zwischen etwa 8 und 16 annehmen

kann, womit sich die Überdeckung γ zwischen 0,8 und 0,9 befindet. Weiterhin wird noch

$$\text{ctg}^2 \alpha \cong \frac{D}{225 a} = 0,036...0,071$$

Hiermit ist schliesslich auch die Rechtfertigung der Annahmen zur Berechnung von $Z_{\max}$ gegeben.

6. Einige Weitspannungen in der Sicht der vorstehenden Dimensionierungstheorie

Für einige bestehende Anlagen von Weitspannkabeln ist in der Tabelle I die jeweils zugrundegelegte Nennlast Z mit der sich aus Kabeldurchmesser und gewählter Armierungsdrahtstärke ergebenden maximalen Belastung $Z_{\max}$ nach (12) verglichen. Nur im Falle 1 (Entlematt) ist Z grösser als $Z_{\max}$; in den Fällen 5, 6, 9, 10, 11 und 12 ist die Grenze $Z_{\max}$ nicht einmal zur Hälfte erreicht. Der Vergleich der aus der Nennlast berechneten Ganghöhe der Armierung nach (13) mit der effektiv vorhandenen Ganghöhe h_{eff} zeigt, dass in diesen Fällen die Bedingung $\sigma_a \leq 25 \text{ kg/cm}^2$ für die Flächenpressung eingehalten ist, was auch noch in den Fällen 3 und 8 zutrifft.

In den übrigen Fällen 1, 2, 4, 7, 13 und 14 sind die Schlaghöhen zum Teil erheblich zu klein, was zu viel zu grossen Flächenpressungen bis 71 kg/cm^2 führt. Diese Kabel sind auch in einem entsprechend schlechten Zustand, besonders die Anlagen 1, 7 und 13, in welchen starke Wirbelbildungen aufgetreten sind.

Die Kabelverlängerung ε_L infolge Dehnung der Armierungsdrähte überschreitet in keinem Fall die der Berechnung von $Z_{\max}$ (Gl. 12) zugrunde gelegte Grenze von 0,25%, was jedoch nur heisst, dass die Armierung nirgends überbeansprucht ist. Dies kommt auch zum Ausdruck in den Werten der mechanischen Spannungen $\sigma_{\text{Drähte}}$, die $43,5 \text{ kg/mm}^2$ nicht übersteigen. Offenbar wurde bei der Dimensionierung hauptsächlich auf die Zugbeanspruchung der Armierungsdrähte geachtet und der Flächenpressung nicht immer die nötige Aufmerksamkeit geschenkt.

Die Werte für die Überdeckungsfaktoren γ der Armierungen liegen mit Ausnahme der Fälle 3, 5 und 13 bei 0,95 und höher, sind also nach (15) viel zu hoch und geben

schon bei kleinen Einpressungen der Drähte Anlass zu Platzmangel, was sich in Welligkeit und ausgesprungenen Armaturdrähten äussert.

Damit ist aber der Wirbelbildung Vorschub geleistet, weil durch diese Effekte der Querschnitt leicht unrund wird (vgl. Abschnitt 4.1). Damit das Kabel symmetrisch bleibt, muss der Überdeckungsfaktor der Armierung zwischen 0,8 und 0,9 gehalten werden, was sofort der Frage ruft, wie bei Fabrikation und Montage die Drahtabstände gleichmässig gehalten werden können. Es wurde dazu der Vorschlag gemacht, die Drähte mit einem weichen Kunststoffmantel zu umspritzen, der dann gestatten würde, dass sich die Armatur bei Belastung gleichmässig schliessen könnte.

7. Ausblick

Um die erörterten Schwierigkeiten besser in den Griff zu bekommen, stehen verschiedene Möglichkeiten in der Diskussion oder sind schon ausgeführt (auf die zum Teil am Schluss des Artikels von B. Gnehm eingetreten wird).

Eine Variante des armierten Kabels besteht darin, die Armierungsdrähte in einen Kunststoffmantel einzubetten. Damit könnten dann sehr grosse Schlaghöhen zur Anwendung kommen, ohne die Gefahr des Ausbauchens der Armatur beim Aufhaspeln oder Umlenken.

Beim Zenterportkabel sind die Leiterbündel um ein zentrales Stahldrahtseil geschlagen, und das Ganze wird mit einem Mantel zusammengehalten.

Eine weitere Möglichkeit stellt das Exzenterportkabel dar, bei dem ein blankes Kabel mit einem spiralförmigen Stahlband mit dem parallellaufenden und anliegenden Tragseil verbunden wird.

Eine Variante des Exzenterportkabels besteht in der Hängekonstruktion, bei deren Montage zuerst das Tragseil gespannt und dann das Kabel mit Briden daran hängend befestigt wird.

Zwei sich gegenüberliegende Tragseile, eingelassen in einen dort erheblich verstärkten Kunststoffmantel, ergeben das sogenannte Multiportkabel.

Die Frage, welche Konstruktion den jeweiligen Anforderungen und Gegebenheiten am besten angepasst ist, wird erst die künftige Erfahrung beantworten können.