

Zeitschrift:	Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = 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 Telegrafenbetriebe
Band:	45 (1967)
Heft:	2
Artikel:	Berechnung von Weitspannungen für Telephonkabel : Schluss
Autor:	Gnehm, Bruno
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-874852

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 11.01.2026

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

Berechnung von Weitspannungen für Telephonkabel (Schluss*)

Bruno GNEHM, Bern

621.315.243.001.24

Zusammenfassung. Die allgemeine Theorie der Durchhangslinie wurde bereits in vielen Artikeln behandelt. In der vorliegenden Arbeit jedoch liegt das Hauptgewicht auf der Berechnung von selbsttragenden Telefonkabeln mit Spannweiten bis 1200 m, deren besondere Eigenschaften untersucht werden. An einem Beispiel wird gezeigt, wie man mit den üblichen Mitteln und verhältnismässig grossem Zeitaufwand zu nützlichen Resultaten gelangt. Im letzten Abschnitt wird auf die Berechnung mit Hilfe eines Computers näher eingetreten, der absolute Sicherheit gewährt und in kürzester Zeit optimale Lösungen zur Verfügung stellt.

Calcul des longues portées pour câbles téléphoniques

Résumé. La théorie générale de la flèche à donner aux lignes aériennes a déjà fait l'objet de nombreux articles. Dans le travail qui suit, il est cependant question, principalement, des calculs se rapportant aux câbles téléphoniques autoportants avec portées jusqu'à 1200 m et de leurs caractéristiques particulières. On montre par un exemple que des résultats utilisables peuvent être obtenus par les moyens usuels, mais au prix d'un temps assez long. Le dernier chapitre traite plus en détail du calcul au moyen d'un ordinateur électrique, qui présente une sécurité absolue et donne en un temps très bref des solutions optimales.

Calcolo delle campate lunghe per cavi telefonici

Riassunto. La teoria generale della catenaria è già stata trattata in numerosi articoli. Nel presente lavoro si esaminano specialmente il calcolo e le particolarità di cavi telefonici autoportanti con campate fino a 1200 metri. Sulla scorta di un esempio si chiarisce come l'impiego di mezzi convenzionali permetta di conseguire risultati utili solo con un notevole sacrificio di tempo. Nell'ultima parte si descrive la procedura di calcolo con un elaboratore elettronico, che garantisce una sicurezza assoluta, mettendo a disposizione delle soluzioni ottimali in brevissimo tempo.

12. Berechnungsbeispiel

Als Beispiel nehmen wir die Weitspannung im Vazzatal, wo ein Telefonkabel vom linken Ufer des Stausees nach dem Bergdorf Mergoscia gebaut werden musste.

In dieser gebirgigen Gegend mit häufigen heftigen Gewittern mit Blitzschlag wurde ein Spezialkabel aufgehängt. Dessen Querschnitt zeigt Figur 2.

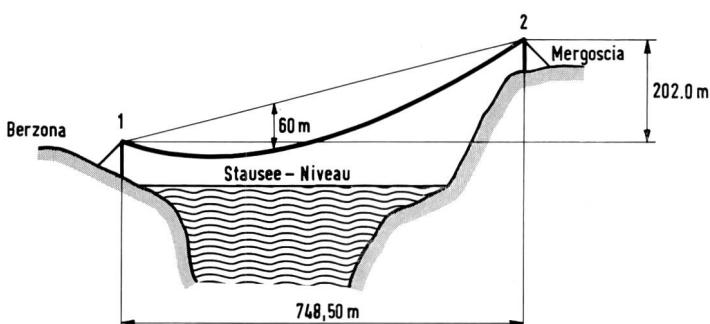
12.1 Die Kabeldaten

Kabel: PPba-TCR spez. $60 \times 2 \times 0,8 \text{ mm}$
Gewicht des Kabels: $8,27 \text{ kg/m}$
Tragarmatur: 39 Drähte $\varnothing 3,5 \text{ mm}$
Bruchfestigkeit der Tragarmatur: 120 kg/mm^2

12.2 Annahmen

Zusatlast hervorgerufen durch Schnee oder Rauhreif: 2 kg/m .

12.3 Topographische Verhältnisse



Horizontale Spannweite a = 74 850 cm
Höhendifferenz der Aufhängepunkte h = 20 200 cm
maximaler Durchhang bei 0° C und Zusatlast = 6 000 cm

* Teil I ist in den Tech. Mitt. PTT Nr. 1/1967, S. 6...20 erschienen.

12.4 Berechnung

Wir unterteilen die Berechnungen in zwei Gruppen:

a) Maximale Beanspruchungen; diese Werte sind massgebend bei der Bestimmung der Masten, Anker, Fundamente usw.

Nach der Schwach- und Starkstromverordnung gelten folgende Zustände.

- 1) Beanspruchungen bei 0° C und Zusatlast, oder
- 2) bei tiefster Ortstemperatur ohne Zusatlast und ohne Wind.

Praktisch finden wir immer den Fall 1 vor, bei Spannweiten unter 100 m ist jedoch zu untersuchen, ob die Vorschriften nach Fall 2 ebenfalls erfüllt sind.

b) Montagezustände, das heisst Werte, die bei der Montage, also ohne Zusatlasten bei einer bestimmten Temperatur auftreten.

12.4.1 Neigungswinkel

$$\tan \psi = \frac{h}{a} = \frac{20200}{74850} = 0,26987$$
$$\psi = 15^\circ 6' 10''$$

Da wir besonders den $\cos \psi$ benötigen, notieren wir sogleich dessen Wert

$$\cos \psi = 0,9655$$

12.4.2 Querschnitt

Wie wir gesehen haben, kann nur der Querschnitt der Tragarmatur als belastbare Fläche gezählt werden

$$F = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot n}{4} = \frac{\pi \cdot 0,35^2 \cdot 39}{4}$$
$$F = 3,7522 \text{ cm}^2$$

12.4.3 Virtuelles spezifisches Gewicht γ_v bei 0° C und Zusatlast

$$\gamma_v = \frac{G_{ka} + G_{zu}}{F} \quad (\text{Kabelgewicht} + \text{Zusatlast}) \text{ je cm} \text{ Querschnitt}$$

$$\gamma_o = \frac{0,0827 + 0,020}{3,7522} = 0,02737 \text{ kg/cm}^3$$

Virtuelles spezifisches Gewicht γ bei einer Temperatur t , ohne Zusatzlast

$$\gamma = \frac{G_{ka}}{F} \quad \text{Kabelgewicht pro cm}$$

$$\text{Querschnitt}$$

$$\gamma = \frac{0,0827}{3,7522} = 0,02204 \text{ kg/cm}^3$$

12.4.4 Durchhang

Der maximale Durchhang bei 0°C und Zusatzlast wird an Hand des Stauseeniveaus oder einem vorspringenden Geländepunkt ermittelt.

Für unser Beispiel ist der maximale Durchhang mit $f_{\max} = 60 \text{ m}$ festgelegt worden.

12.4.5 Scheitelspannung

Um die Spannungen in den Aufhängepunkten ermitteln zu können, brauchen wir die Scheitelspannung.

In der Gleichung des maximalen Durchhangs der Kettenlinie finden wir die p_o -Werte

$$f_{\max} = \frac{a^2 \cdot \gamma_o}{8 \cdot p_o \cdot \cos \psi} \left(1 + \frac{a^2 \cdot \gamma_o^2}{48 p_o^2} \right)$$

Diese Formel enthält p_o in der dritten Potenz. Sie ist somit nicht mit einfachen Mitteln aufzulösen.

Vergleichen wir mit der Parabelgleichung

$$f_{\max} = \frac{a^2 \cdot \gamma_o}{8 \cdot p_o \cdot \cos \psi}$$

so sehen wir, dass nur die Glieder höherer Ordnung weggelassen sind.

Diese Annäherung erlaubt uns p_o zu errechnen

$$p_o = \frac{a^2 \cdot \gamma_o}{f_{\max} \cdot 8 \cdot \cos \psi} = \frac{0,02737 \cdot 74850^2}{6000 \cdot 8 \cdot 0,9655}$$

$$p_o = 3308,9 \text{ kg/cm}^2$$

Um p_o genauer zu bestimmen, setzen wir Werte etwas grösser als das Parabelresultat in die Kettenliniengleichung für f_{\max} ein und variiieren p_o bis die gewünschte Genauigkeit vorhanden ist:

1. Annahme

$$p_o = 3310 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{\max} = \frac{74850^2 \cdot 0,02737}{8 \cdot 3310 \cdot 0,9655} \left(1 + \frac{74850^2 \cdot 0,02737^2}{48 \cdot 3310^2} \right)$$

$$f_{\max} = 6045,7 \text{ cm}$$

2. Annahme

$$p_o = 3350 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{\max} = \frac{74850^2 \cdot 0,02737}{8 \cdot 3350 \cdot 0,9655} \left(1 + \frac{74850^2 \cdot 0,02737^2}{48 \cdot 3350^2} \right)$$

$$= 5972,6 \text{ cm}$$

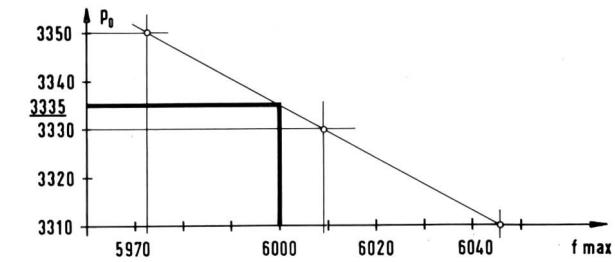
3. Annahme

$$p_o = 3330 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{\max} = \frac{74850^2 \cdot 0,02737}{8 \cdot 3330 \cdot 0,9655} \left(1 + \frac{74850^2 \cdot 0,02737^2}{48 \cdot 3330^2} \right)$$

$$= 6009,1 \text{ cm}$$

Genügt keiner der drei Werte, so kann die graphische Methode zu Hilfe genommen werden



$$p_o = 3335 \text{ kg/cm}^2$$

12.4.6 Spannung am oberen Aufhängepunkt

Wir betrachten den oberen Aufhängepunkt, da uns nur die maximalen Beanspruchungen interessieren.

$$p_{o2} = p_o \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x_2 \cdot \gamma_o}{p_o} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{x_2 \cdot \gamma_o}{p_o} \right)^4 \right]$$

Es fehlen uns jedoch die Koordinaten des Scheitelpunktes x_1 und x_2 , um die vorgenannte Gleichung lösen zu können.

Die Gleichung der Höhe vermittelt uns nun die Berechnungsgrundlage

$$h = \frac{a \cdot \gamma}{2 p_o} (x_2 + x_1) \left[1 + \frac{(x_2^2 + x_1^2) \gamma^2}{12 p_o^2} \right]$$

Wir finden Glieder dritten Grades. Wie bei der Scheitelspannung verwenden wir die Parabelgleichung als erste Annäherung

$$h = \frac{\gamma_o \cdot a}{2 p_o} (x_2 + x_1) \quad \text{und} \quad x_1 = x_2 - a$$

somit wird

$$x_2 = \frac{p_o \cdot h}{\gamma_o \cdot a} + \frac{a}{2} = \frac{3335 \cdot 20200}{0,02737 \cdot 74850} + \frac{74850}{2}$$

$$x_2 = 70310 \text{ cm}$$

$$x_1 = -4540$$

Wir setzen den Wert in der Kettenliniengleichung ein und erhalten

$$h_1 = \frac{0,02737 \cdot 74850}{2 \cdot 3335} (70310 - 4540)$$

$$\left[1 + \frac{(70310^2 + (-4540^2)) \gamma^2}{12 \cdot 3335^2} \right]$$

$$h_1 = 20756 \text{ cm} \quad (h = 20200)$$

2. Annahme

$$x_2 = 70000$$

$$x_1 = 70000 - 74850 = -4850$$

$$h_2 = \frac{0,02737 \cdot 74850}{2 \cdot 3335} (70000 - 4850)$$

$$h_2 = 20562 \text{ cm}$$

$$\left[1 + \frac{(70000^2 + (-4850)^2) \cdot \gamma_o^2}{12 \cdot 3335^2} \right]$$

3. Annahme

$$x_2 = 69350$$

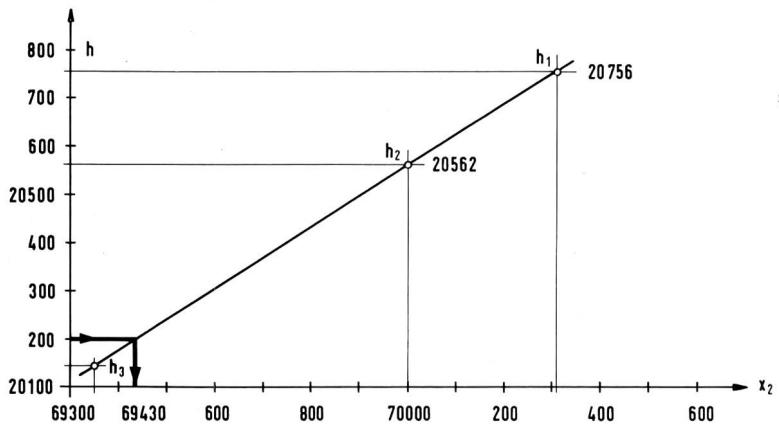
$$x_1 = -5500$$

$$h_3 = \frac{0,02737 \cdot 74850}{2 \cdot 3335} (69350 - 5500)$$

$$h_3 = 20144 \text{ cm}$$

$$\left[1 + \frac{(69350^2 + (-5500)^2) \cdot \gamma_o^2}{12 \cdot 3335^2} \right]$$

Nochmals nehmen wir die graphische Methode zu Hilfe, um den genauen x_2 -Wert zu suchen.



$$x_2 = 69430 \text{ cm}$$

$$x_1 = -5420$$

Wir fahren mit der Spannung am oberen Aufhängepunkt weiter

$$p_{o2} = 3335 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{69430 \cdot 0,02737}{3335} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{69430 \cdot 0,02737}{3335} \right)^4 \right]$$

$$p_{o2} = 3890 \text{ kg/cm}^2$$

12.4.7 Zugkraft am oberen Aufhängepunkt

$$P_{o2} = p_{o2} \cdot F = 3890 \cdot 3,7522$$

$$P_{o2} = 14597 \text{ kg}$$

Die maximale Zugkraft am oberen Aufhängepunkt bei 0°C und Zusatzlast ist somit 14597 kg.

12.4.8 Sicherheit

Bei einer Stahlqualität mit einer Bruchlast von 120 kg/mm² erhalten wir folgende Sicherheit

$$s = \frac{\sigma_z}{p_{o2}} = \frac{12000}{3890}$$

$$s = 3,08$$

Damit haben wir die Gruppe a erledigt. Die Fundamente, Masten usw. können auf Grund der berechneten Daten konstruiert und dimensioniert werden.

12.5 Montagebedingungen

12.5.1 Zustandsgleichung

Um die Montagebedingungen auszurechnen, bedienen wir uns der Zustandsgleichung

$$p^3 + p^2 \left[\frac{\gamma_o^2 \cdot a^2 \cdot E \cdot \cos \psi}{24 \cdot p_o^2} + \frac{(t - t_o) \alpha \cdot E}{1 + \frac{h^2}{2a^2}} - p_o - \frac{\gamma_o^2 \cdot a^2}{24 \cdot p_o} \right] + \frac{\gamma^2 \cdot a^2 \cdot p}{24} = \frac{\gamma^2 \cdot a^2 \cdot E \cdot \cos \psi}{24}$$

Auch diese Gleichung dritten Grades ist sehr umständlich zu lösen.

Wir fassen zuerst die Konstanten zusammen

$$\frac{\gamma_o^2 \cdot a^2 \cdot E \cdot \cos \psi}{24 \cdot p_o^2} = u \quad 1 + \frac{h^2}{2a^2} = w$$

$$\frac{\gamma^2 \cdot a^2 \cdot E \cdot \cos \psi}{24} = v$$

$$\alpha \cdot E = z$$

$$\frac{\gamma_o^2 \cdot a^2}{24 \cdot p_o} = q$$

$$\frac{\gamma^2 \cdot a^2}{24} = r$$

und setzen in der Zustandsgleichung ein

$$p^3 + p^2 \left[u + \frac{(t - t_o) z}{w} - p_o - q \right] + r \cdot p = v$$

wir dividieren durch p^2

$$p + u + \frac{(t - t_o) z}{w} - p_o - q + \frac{r}{p} = \frac{v}{p^2}$$

und lösen nach $t - t_o$ auf

$$\frac{(t - t_o) z}{w} = \frac{v}{p^2} - \frac{r}{p} - p + p_o + q - u$$

oder

$$t - t_o = \frac{w}{z} \left(\frac{v}{p^2} - \frac{r}{p} - p + p_o + q - u \right)$$

Wir haben eine einfache Gleichung dritten Grades gefunden, die mit Einsetzen von verschiedenen P-Werten die entsprechenden Temperaturen ergeben.

Nun ist

$$t_0 = 0$$

und somit $t - t_0 = t$

Wir beginnen mit den Konstanten unseres Beispiels

$$u = \frac{0,02737^2 \cdot 74850^2 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 0,9655}{24 \cdot 3335^2} = 3,1878 \cdot 10^4$$

$$v = \frac{0,02204^2 \cdot 74850^2 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 0,9655}{24} = 2,2992 \cdot 10^{11}$$

$$z = 2,1 \cdot 10^6 \cdot 12 \cdot 10^{-6} = 25,2$$

$$q = \frac{0,02737^2 \cdot 74850^2}{24 \cdot 3335} = 52,436$$

$$r = \frac{0,02204^2 \cdot 74850^2}{24} = 1,1340 \cdot 10^5$$

$$w = 1 + \frac{20200^2}{2 \cdot 74850^2} = 1,036416$$

Wir übernehmen diese Werte in die vereinfachte Formel

$$t = \frac{1,036416}{25,2} \left(\frac{2,2992 \cdot 10^{11}}{p^2} - \frac{1,1340 \cdot 10^5}{p} - p + 3335 + 25,436 - 3,1878 \cdot 10^4 \right)$$

oder zusammengefasst

$$t = 0,041127 \left(\frac{2,2992 \cdot 10^{11}}{p^2} - \frac{1,1340 \cdot 10^5}{p} - p - 28490,6 \right)$$

Wir gehen zu den Annahmen der p-Werte über. Die erste Schätzung ist nicht einfach, doch zeigt das Resultat sofort, ob die Werte zu gross oder zu klein angenommen worden sind.

1. Annahme $p_1 = 2700$

$$t_1 = 0,041127 \left(\frac{2,2992 \cdot 10^{11}}{2700^2} - \frac{1,1340 \cdot 10^5}{2700} - 2700 - 28490,6 \right)$$

$$t_1 = 12,6^\circ\text{C}$$

2. Annahme $p_2 = 2730$

$$t_2 = 0,041127 \left(\frac{2,2992 \cdot 10^{11}}{2730^2} - \frac{1,1340 \cdot 10^5}{2730} - 2730 - 28490,6 \right)$$

$$t_2 = -16,9^\circ\text{C}$$

3. Annahme $p_3 = 2710$

$$t_3 = 0,041127 \left(\frac{2,2992 \cdot 10^{11}}{2710^2} - \frac{1,1340 \cdot 10^5}{2710} - 2710 - 28490,6 \right)$$

$$t_3 = 3,07^\circ\text{C}$$

4. Annahme $p_4 = 2670$

$$t_4 = 0,041127 \left(\frac{2,2992 \cdot 10^{11}}{2670^2} - \frac{1,1340 \cdot 10^5}{2670} - 2670 - 28490,6 \right)$$

$$t_4 = 43,1^\circ\text{C}$$

Da wir Werte von etwa -20° bis $+50^\circ$ C für die Montagekurven brauchen, genügen die vier oben berechneten Resultate bei Temperaturen von $+12,6$; $-16,9$; $+3,07$; $+43,1^\circ$ C

12.5.2 Spannungen in den Aufhängepunkten

Von der Scheitelspannung gehen wir auf die Spannungen im oberen Aufhängepunkt bei den errechneten Temperaturen über

$$p_2 = p \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x_2 \cdot \gamma}{p} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{x_2 \cdot \gamma}{p} \right)^4 \right]$$

Den Scheitel der Kettenlinie haben wir bereits bei den maximalen Spannungen berechnet

$$x_2 = 69430 \text{ cm}$$

Wir setzen die p-Werte ein und erhalten folgende Resultate

$$p_1 = 2700 \text{ (bei } +12,6^\circ\text{C)}$$

$$p_{21} = 2700 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{69430 \cdot 0,02204}{2700} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{69430 \cdot 0,02204}{2700} \right)^4 \right]$$

$$p_{21} = 3145 \text{ kg/cm}^2$$

$$p_{11} = 2730 \text{ (bei } -16,9^\circ\text{C)}$$

$$p_{211} = 2730 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{69430 \cdot 0,02204}{2730} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{69430 \cdot 0,02204}{2730} \right)^4 \right]$$

$$p_{111} = 2710 \text{ (bei } 3,07^\circ\text{C)}$$

$$p_{2111} = 2710 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{69430 \cdot 0,02204}{2710} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{69430 \cdot 0,02204}{2710} \right)^4 \right]$$

$$p_{1111} = 2670 \text{ (bei } 43,1^\circ\text{C)}$$

$$p_{21111} = 2670 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{69430 \cdot 0,02204}{2670} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{69430 \cdot 0,02204}{2670} \right)^4 \right]$$

12.5.3 Die Zugkräfte am oberen Mast bei den Temperaturen $t_1 \dots t_4$

$$P_2 = p_2 \cdot F$$

$$P_{21} = 3145 \cdot 3,7522 = 11805 \text{ kg}$$

$$P_{211} = 3170 \cdot 3,7522 = 11897 \text{ kg}$$

$$P_{2111} = 3153,4 \cdot 3,7522 = 11834 \text{ kg}$$

$$P_{21111} = 3120,4 \cdot 3,7522 = 11709 \text{ kg}$$

Daraus ersieht man, dass die Temperatur nur einen relativ kleinen Einfluss auf die Zugkraft hat.

12.5.4 Im folgenden Abschnitt berechnen wir die Durchhängen bei den Temperaturen $t_1 \div t_4$. Dabei werden sich Temperaturdifferenzen sehr stark auf die Durchhängen auswirken.

$$f = \frac{a^2 \cdot \gamma}{8 \cdot p \cdot \cos \psi} \left(1 + \frac{a^2 \cdot \gamma^2}{48 \cdot p^2} \right)$$

$$f_1 = \frac{74850^2 \cdot 0,02204}{8 \cdot 2700 \cdot 0,9655} \left(1 + \frac{74850^2 \cdot 0,02204^2}{48 \cdot 2700^2} \right)$$

$$\underline{f_1 = 5966 \text{ cm}}$$

$$f_{11} = \frac{74850^2 \cdot 0,02204}{8 \cdot 2730 \cdot 0,9655} \left(1 + \frac{74850^2 \cdot 0,02204^2}{48 \cdot 2730^2} \right)$$

$$\underline{f_{11} = 5900 \text{ cm}}$$

$$f_{111} = \frac{74850^2 \cdot 0,02204}{8 \cdot 2710 \cdot 0,9655} \left(1 + \frac{74850^2 \cdot 0,02204^2}{48 \cdot 2710^2} \right)$$

$$\underline{f_{111} = 5946 \text{ cm}}$$

$$f_{1111} = \frac{74850^2 \cdot 0,02204}{8 \cdot 2670 \cdot 0,9655} \left(1 + \frac{74850^2 \cdot 0,02204^2}{48 \cdot 2670^2} \right)$$

$$\underline{f_{1111} = 6035 \text{ cm}}$$

12.5.5 Die Befestigung des Kabels an den Aufhängepunkten mit dem Klemmkonensystem PTT verlangt die Kenntnis der genauen Kabellänge in Funktion der Temperatur.

$$l = \frac{a}{\cos \psi} \left(1 + \frac{a^2 \cdot \gamma^2}{24 p^2} + \frac{a^4 \cdot \gamma^4}{1920 \cdot p^4} \right)$$

$$l_1 = \frac{74850}{0,9655} \left(1 + \frac{74850^2 \cdot 0,02204^2}{24 \cdot 2700^2} + \frac{74850^4 \cdot 0,02204^4}{1920 \cdot 2700^4} \right)$$

$$\underline{l_1 = 78737 \text{ cm}}$$

$$l_{11} = \frac{74850}{0,9655} \left(1 + \frac{74850^2 \cdot 0,02204^2}{24 \cdot 2730^2} + \frac{74850^4 \cdot 0,02204^4}{1920 \cdot 2730^4} \right)$$

$$\underline{l_{11} = 78711 \text{ cm}}$$

$$l_{111} = \frac{74850}{0,9655} \left(1 + \frac{74850^2 \cdot 0,02204^2}{24 \cdot 2710^2} + \frac{74850^4 \cdot 0,02204^4}{1920 \cdot 2710^4} \right)$$

$$\underline{l_{111} = 78729 \text{ cm}}$$

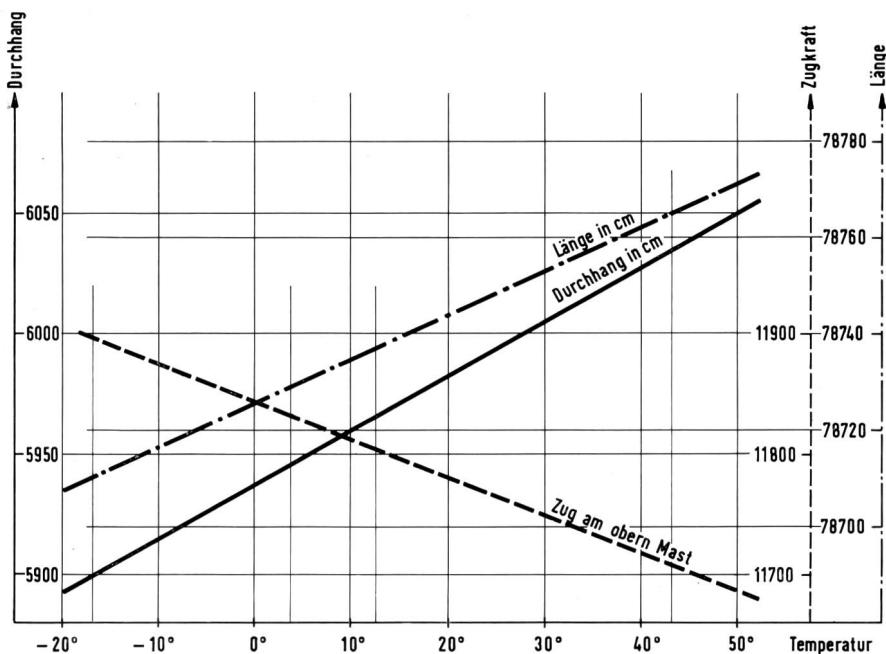
$$l_{1111} = \frac{74850}{0,9655} \left(1 + \frac{74850^2 \cdot 0,02204^2}{24 \cdot 2670^2} + \frac{74850^4 \cdot 0,02204^4}{1920 \cdot 2670^4} \right)$$

$$\underline{l_{1111} = 78765 \text{ cm}}$$

12.5.6 Zusammenstellung der errechneten Montagedaten

t in °C	Pz in kg	f in cm	l in cm
-16,9	11 897	5900	78711
3,07	11 834	5946	78729
12,6	11 805	5966	78737
43,1	11 709	6035	78765

12.5.7 Montagekurven

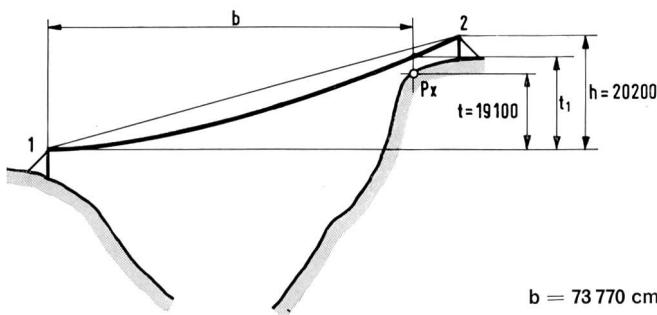


12.6 Hindernisabstand

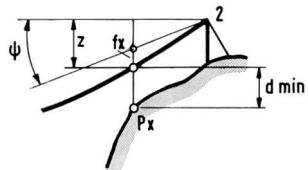
Nach den Schwach- und Starkstromvorschriften sind gewisse minimale Durchhangshöhen einzuhalten.

Wir sind deshalb gezwungen, an den kritischen Stellen die Durchhänge zu kontrollieren, damit die Höhe des Kabels über Boden den Vorschriften genügt.

In unserem Beispiel handelt es sich um den Punkt Px



Wir betrachten den Standort 2



Der Durchhang im Punkt Px = fx, demnach ist

$$z = f_x + (a - b) \frac{h}{a} \text{ und}$$

$$f_x = \frac{\gamma_o}{2 p_o} \left\{ x_2^2 - (x_1 + b)^2 + \frac{[x_2^4 - (x_1 + b)^4] \gamma_o^2}{12 p_o^2} \right\} - (a - b) \frac{h}{a}$$

somit wird

$$z = \frac{\gamma_o}{2 p_o} \left\{ x_2^2 - (x_1 + b)^2 + \frac{[x_2^4 - (x_1 + b)^4] \cdot \gamma_o^2}{12 p_o^2} \right\}$$

Wir setzen die Werte des Beispiels ein

$$z = \frac{0,02737}{2 \cdot 3335} \left\{ 69430^2 - (-5420 + 73770)^2 + \frac{[69430^4 - (-5420 + 73770)^4] \cdot 0,02737^2}{12 \cdot 3335^2} \right\}$$

$$z = 642,81 \text{ cm}$$

Die minimale Distanz des Kabels zum Gelände P bei 0°C und Zusatzlast wird deshalb

$$d_{\min} = h - (t + z) = 20200 - (19100 + 642,8)$$

$$d_{\min} = 457,2 \text{ cm}$$

Zum Vergleich mit den nachfolgenden Berechnungen mit dem Computer IBM 7070 zeigen wir noch die Distanz t1, die Differenz zwischen 1 und dem Punkt P auf dem Kabel

$$t_1 = h - z = 20200 - 642,8 = 19557.$$

$$t_1 = 19557 \text{ cm}$$

12.7 Tangente an die Kurve

Zur Bestimmung der Kräfte an den Masten benötigen wir den Tangentenwinkel des Kabels im Aufhängepunkt.

12.7.1 Tangente am untern Aufhängepunkt

$$\begin{aligned} \tan \alpha_1 &= \frac{x_1 \cdot \gamma_o}{p_o} + \frac{x_1^3 \cdot \gamma_o^3}{6 \cdot p_o^3} + \frac{x_1^5 \cdot \gamma_o^5}{120 \cdot p_o^5} \\ &= \frac{5420 \cdot 0,02737}{3335} + \frac{5420^3 \cdot 0,02737^3}{6 \cdot 3335^3} + \frac{5420^5 \cdot 0,02737^5}{120 \cdot 3335^5} \end{aligned}$$

$$\tan \alpha_1 = 0,044497$$

$$\alpha_1 = 2^\circ 32' 52''$$

12.7.2 Tangente am oberen Aufhängepunkt

$$\begin{aligned} \tan \alpha_2 &= \frac{x_2 \cdot \gamma_o}{p_o} + \frac{x_2^3 \cdot \gamma_o^3}{6 \cdot p_o^3} + \frac{x_2^5 \cdot \gamma_o^5}{120 \cdot p_o^5} \\ &= \frac{69430 \cdot 0,02737}{3335} + \frac{69430^3 \cdot 0,02737^3}{6 \cdot 3335^3} + \frac{69430^5 \cdot 0,02737^5}{120 \cdot 3335^5} \\ \tan \alpha_2 &= 0,6011445 \\ \alpha_2 &= 31^\circ 0' 44'' \end{aligned}$$

12.8 Die Kräfte am Mast

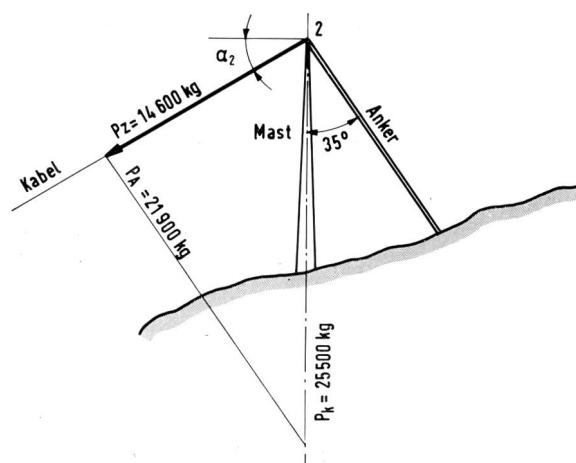
Die maximale Zugkraft am oberen Mast bei 0°C und Zusatzlast beträgt nach 12.4.7

$$P_{o2} = 14597 \text{ kg}$$

und der soeben berechnete Tangentenwinkel = 31° 0' 44''

Wir wählen den Abspannwinkel des Ankers nach dem Gelände, in unserem Beispiel ist $\beta = 35^\circ$.

Das Kräftediagramm sieht demnach folgendermassen aus:



Wir finden nachstehende Resultate

Zugkraft im Anker: 21 900 kg

Knickkraft im Mast: 25 500 kg

Damit kennen wir sämtliche wichtigen Daten, die für die Herstellung des Kabels, der Masten und für die Montage benötigt werden.

13. Berechnung von Weitspannungen mit Hilfe eines Computers

13.1 Einleitung

Der grosse Zeitaufwand bei Berechnungen von Weitspannungen «von Hand» und mit Logarithmen hat uns dazu geführt, nach einem schnelleren und sicheren System Umschau zu halten.

Zusammen mit den Spezialisten von IBM haben wir ein Programm ausgearbeitet, das es uns erlaubt die Berechnungen auf den im PTT-Rechenzentrum vorhandenen Computern auszuführen. Die Wirtschaftlichkeit wurde vorerst geprüft und die inzwischen berechneten Beispiele haben diese bestätigt.

13.2 Berechnung

Bevor ein Problem programmiert werden kann, müssen die mathematischen Grundlagen geschaffen, die Anpassungen an die Rechenanlage untersucht und die erforderliche Rechengenauigkeit abgeklärt sein.

Die theoretischen Grundlagen in unserer Anwendung sind im ersten Teil dieser Arbeit ausführlich behandelt.

Unter Anpassungsarbeiten an die Bedürfnisse der Rechenanlage verstehen wir die Wahl numerischer Methoden und Verfahren, die einen störungsfreien Ablauf des Programmes bei kleinstem Zeitaufwand gewährleisten.

Für die Konvergenzkontrolle iterativer Verfahren müssen ferner die Toleranzen der zu berechnenden Werte festgelegt werden.

13.3 Aufbau des Programmes

Die Eingabedaten sind durch ein Beispiel gegeben und im Resultatblatt nur zu Kontrollzwecken wiedergegeben. Es sind dies A, H, FL, GK, GZ, FMAZ, PZUG, ALF und E.

Die Nullzustände sind Zahlen, die für das belastete Kabel bei 0°C gelten, es sind folglich die maximalen Werte, die auftreten können. Die eigentliche Rechenarbeit beginnt mit dem Neigungswinkel ψ , den Werten von γ_o und γ , die nach den üblichen Formeln behandelt werden. Für PNUL, der Scheitelpunktspannung, wird eine Iteration nach Newton zu Hilfe genommen.

$$F_{\max} = \frac{1}{\cos \psi} \left[\frac{\gamma_o \cdot a^2}{8 p_o} + \frac{\gamma_o^3 \cdot a^4}{384 p_o^3} \right]$$

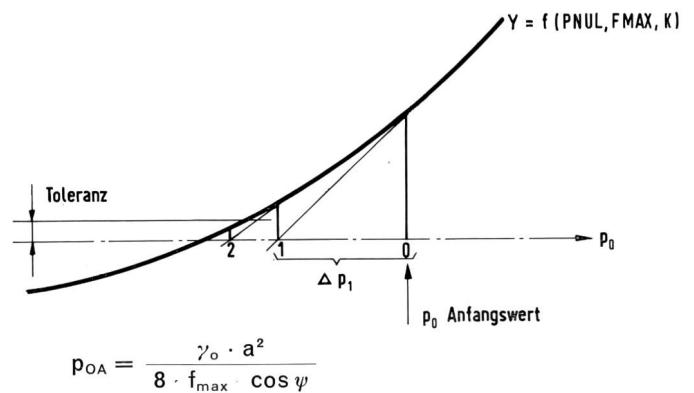
daraus folgt

$$Y = \frac{A_1}{\cos \psi \cdot p_o} \left[1 + \frac{A_2}{p_o^2} \right] - F_{\max} = 0$$

und die Ableitung

$$Y' = \frac{-A_1}{\cos \psi \cdot p_o^2} \left[1 + \frac{3 \cdot A_2}{p_o^2} \right]$$

oder graphisch dargestellt:



Wie bei der «Handrechnung», bedienen wir uns der Parabelgleichung, um den ersten Annäherungswert auszurechnen.

Nach ein bis zwei Iterationssprüngen Δp erreicht man die Grenze T, wenn $Yx \leq 0,5$ cm ist.

Die Scheitelpunktlage wird gleichfalls mit der Iteration nach Newton gelöst.

Wir verwenden nun die Ordinatenformel mit Exponentialfunktionen, da diese in FORTRAN-Subroutinen enthalten sind und damit eine kompakte Programmierung erreicht wird.

$$h = y_2 - y_1$$

$$y = \frac{c}{2} \left[e^{\frac{x_2}{c}} + e^{\frac{-x_2}{c}} - e^{\frac{x_2-a}{c}} - e^{\frac{a-x_2}{c}} \right] - h = 0$$

$$\text{und } x_1 = x_2 - a$$

Den Anfangswert für die Iteration erhalten wir wieder aus der Parabelformel

$$x_2 = \frac{c \cdot h \cdot \cos \psi}{a} + \frac{a}{2}$$

Die Grenze wurde hier bei $\leq 0,5$ cm gewählt.

Die Scheitelpunktspannung bei einer bestimmten Temperatur aber ohne Zusatzlast wird mit Hilfe der Zustandsgleichung errechnet. Wir übernehmen die Konstanten q, r, s, u, v, w aus dem Beispiel und können somit folgende Gleichung aufstellen

$$p^3 + p^2 \left[u + \frac{(t - t_o) z}{w} - p_o - q \right] + r p - v = 0$$

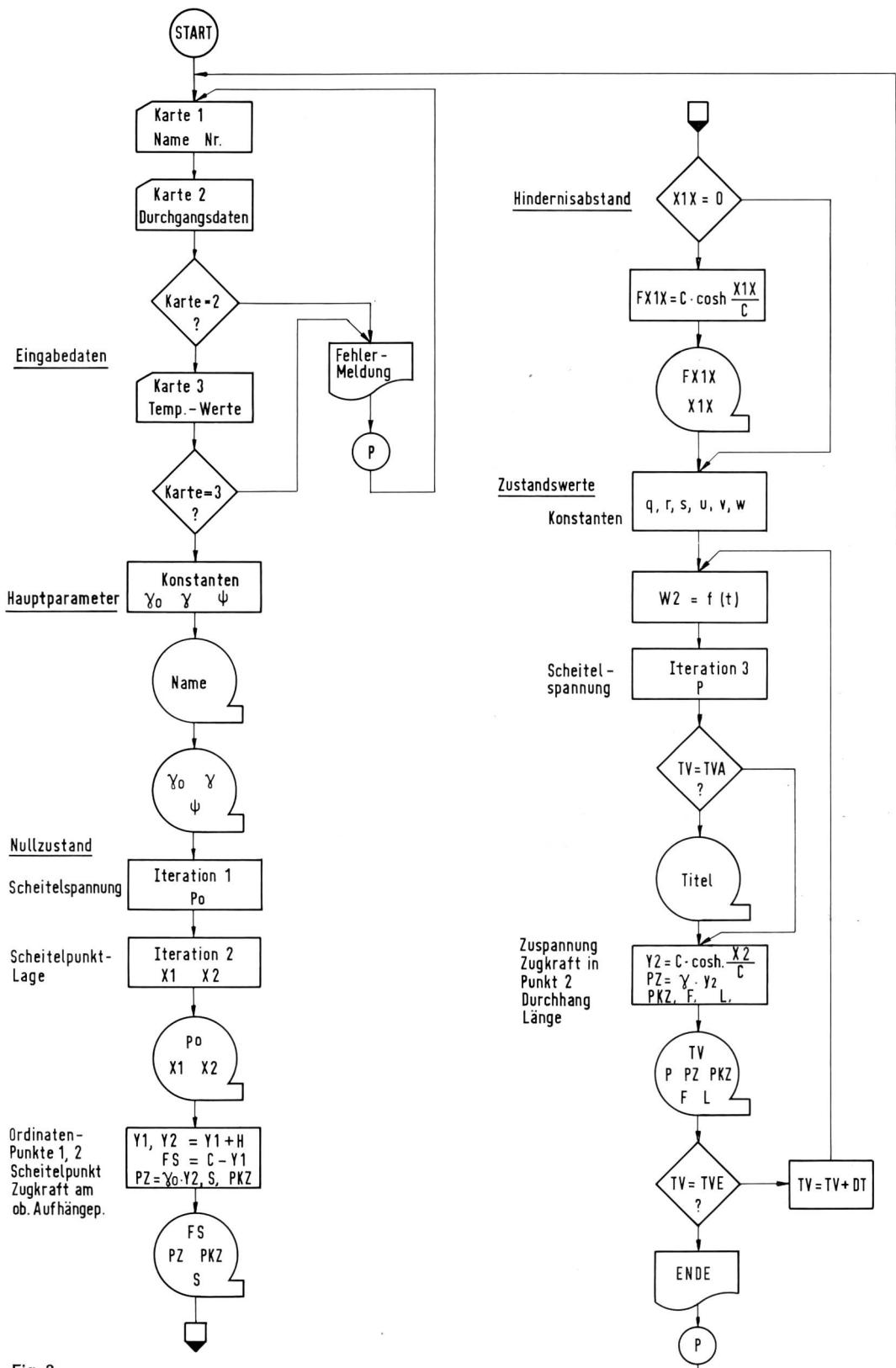


Fig. 3

Auch diese Gleichung dritten Grades ist am einfachsten mit der Newton-Iteration zu lösen, wobei wir als Anfangswert p_0 und für jeden weiteren Schritt den vorher errechneten Wert für p (+) einsetzen

$$p_A = p_0$$

Die Iteration wird bei $\Delta p \leq 0,5 \text{ kg/cm}^2$ abgebrochen.

Der Ablauf der Berechnung wird im Strukturdiagramm festgelegt, wobei auf die Konfiguration der verfügbaren Anlage IBM 7070, im Rechenzentrum PTT Rücksicht genommen wird.

Auf Grund des Blockdiagrammes (Fig. 3) wird das detaillierte Maschinenprogramm in FORTRAN-Sprache aufgebaut. Wir sehen hier von dessen Wiedergabe ab, da die Arbeit lediglich im Umschreiben des Blockdiagrammes in Maschinensprache besteht.

Ausser dem Maschinenprogramm, das den allgemeinen Ablauf der Berechnung steuert und kontrolliert, müssen wir die Eingabedaten in den Rechner übertragen. Dies geschieht an Hand von drei Lochkarten:

Lochkartensektion PTT Spezialarbeiten III 6		BERECHNUNG VON KABEL - WEITSPANNUNG										Stanzauftrag										
Karte 1		1										21										
		1	B	E	R	Z	O	N	A	-	M	E	R	G	O	S	C	I	A	1	-	
Karte 2	Folge-Nr. 20											1		blank	2							
	A, cm	Horizontale Spannweite										3	7	4	8	5	0	9				
	H, cm	Höhdifferenz der Maststandorte										10	2	0	2	0	0	15				
	Fl, cm ²	Querschnitt der Tragamatur										16	3	7	5	2	2	0	22			
	GK, kg/m	Kabelgewicht										23	8	2	7			26				
	GZ, kg/m	Zusatzzlast										27	2	0	0			30				
	FMAX, cm	Maximaler Durchhang										31	6	0	0	0	0	36				
	PZUG, kg/cm ²	Bruchfestigkeit der Tragamatur										37	1	2	0	0	0	41				
	ALF, cm/ ⁰ C	Lin. Ausdehnungskoeffizient der Tragamatur										42	1	2	0	-	0	5	47			
	E, kg/cm ²	E-Modul der Tragamatur										48	2	1	0	+	0	6	53			
	XIX, cm	Hindernisabstand von Mast 1										54	7	3	7	7	0	60				
Karte 3	Folge-Nr.											1	blank	3	2							
	TN °C	Bezugstemperatur										3	0	-	3	0	1	0	12	14		
	TVA °C	Anfangstemperatur																				
	DT °C	Temperaturschritt																				
	TVE °C	Endtemperatur																				

Fig. 4

- Die erste Karte enthält die Benennung oder Bezeichnung der Anlage.
- Auf der zweiten Karte finden wir die Variablen (Spannweite, Höhdifferenz usw.).
- Die Temperaturen mit Anfangs- und Endwerten und Temperaturschritt enthält die dritte Karte.

Ein Stanzbeleg, der die Werte für das Lochen der drei vorerwähnten Karten enthält, wurde so ausgearbeitet, dass keine besonderen Kenntnisse für das Ausfüllen benötigt werden.

Die eingesetzten Zahlen entsprechen dem Beispiel Berzona-Mergoscia (Fig. 4).

Was wir bei Handrechnung mit einem Zeitaufwand von rund vier Tagen schliesslich erhalten, wird von der Maschine im Resultatenblatt in einigen Sekunden berechnet und ausgedruckt.

Die Grossrechenanlage IBM 7070 übernimmt die Berechnung und Ausgabe der Resultate auf Magnetband, die anschliessend durch eine IBM 1401 auf Schnelldrucker ausgedruckt werden.

BERZONA - MEROGLIA 1

EINGABEDATEN

A	=	74850.
H	=	20200.
FL	=	3.75220
GK	=	8.27
GZ	=	2.00
FMAX	=	6000.0
PZUG	=	12000.
ALF	=	0.12E-04
E	=	0.21E 07

NULLZUSTAND

PSI	=	15 GRD	6 MIN	10.1 SEC
GAMO	=	0.027371		
GAM	=	0.022040		
PNUL	=	3334.8		
X1	=	-5424.8		
X2	=	69425.2		
FS	=	120.8		
PZ	=	3891.0		
PKZ	=	14599.7		
S	=	3.1		
FXIX	=	19556.4	BEI XIX = 73770.0	

ZUSTANDSWERTE

TEMP	P	PZ	PKZ	F	L
-30.	2747.1	3184.4	11948.5	5863.4	78698.0
-20.	2736.3	3175.4	11914.9	5886.9	78707.3
-10.	2725.7	3166.6	11881.6	5910.3	78716.6
0.	2715.1	3157.8	11848.8	5933.6	78725.9
10.	2704.7	3149.2	11816.4	5956.8	78735.2
20.	2694.4	3140.7	11784.4	5980.0	78744.5
30.	2684.1	3132.2	11752.8	6003.1	78753.8
40.	2674.0	3123.9	11721.6	6026.2	78763.2
50.	2664.1	3115.7	11690.8	6049.1	78772.5
60.	2654.2	3107.6	11660.3	6072.0	78781.8

14. Allgemeine Betrachtungen

Abschliessend seien noch einige Gründe erläutert, warum die hier beschriebene Methode angewendet wird.

Im Starkstromleitungsbau bedient man sich der kritischen Spannweite als Ausgangsbasis. Wir haben aus den nach-

stehend erwähnten Gründen auf den maximalen Durchhang aufgebaut:

- a) Wegen des Unterschiedes von Seil und Telephonkabel, den wir in der Einleitung behandelten.
- b) Weil Weitspannkabel in jedem Fall speziell für eine bestimmte Anlage fabriziert werden.
- c) Weil die Stahlqualität der Armierungsdrähte ausgewählt werden kann (die Bruchspannung liegt zwischen 120 und 190 kg/mm², bei Stahl und bei ca. 30 kg/mm² für Aldreydrähte).
- d) Das Computerprogramm ermöglicht uns den Durchhang zu variieren und damit einerseits die verlangten Hindernisabstände einzuhalten und anderseits die maximalen Spannungen auszuwählen.
- e) Weiter bildet diese Rechenmethode willkommene Dienste bei der Bestimmung der Montagedaten.

Das Telephonkabel wird an den beiden Abspannmasten mit dem PTT-Klemmuffsystem festgehalten. Wir haben zwei Fixpunkte auf dem Kabel, die sich im Abstand l voneinander befinden. Das teure Kabel muss mit grösster Sorgfalt und besondern Mitteln montiert werden. Ein zwischen den beiden Aufhängepunkten gespanntes Stahlseil dient als Transportrampe des Kabels, das auf Doppelrollen in Abständen von 4 m von einem zum andern Maststandort transportiert wird. Das ungedehnte Kabel hat einen be-

kannten Durchhang, der beim Einhängen des letzten Festpunktes erreicht sein sollte. Damit stehen wir wieder vor der Aufgabe, die Zugkräfte und Spannungen des Stahlseiles, belastet mit Kabel und Doppelrollen beim bekannten Durchhang, zu berechnen. (Siehe auch den Artikel über die Montage der Weitspannung Waldhaus–Stock in den Techn. Mitt. PTT Nr. 4/1966, S. 122ff.)

15. Schlussfolgerungen

Vergleichen wir die Resultate von Hand- und Maschinenrechnung, so sehen wir, dass jene mit Hilfe fünfstelliger Logarithmen genügend genaue Zahlen ergibt. Die Maschine liefert die Resultate jedoch fehlerfrei in einigen Sekunden, wobei es sich erwiesen hat, dass die Berechnungskosten fünf- bis siebenmal geringer sind. Auch kann durch mehrmaliges Durchrechnen eine optimale Wahl des Durchhangs und des zu verwendenden Materials getroffen werden.

Bibliographie

- E. Maurer.* Die Berechnung der Freileitungen mit Rücksicht auf die mechanischen Verhältnisse der Leiter. Bulletin des SEV (1936), Nr. 2 und 3.
- G. Hunziker.* Theorie gespannter Seile. Gebr. Leemann, Zürich, 1942.