Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 41 (1950)

Heft: 13

Artikel: Schwingungen von Stromleiterseilen nach dem Abfallen von Zusatzlasten

Autor: Oertli, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1061255

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: 11.12.2025

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

41. Jahrgang Nr. 12 Samstag, 24. Juni 1950

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Schwingungen von Stromleiterseilen nach dem Abfallen von Zusatzlasten

Von *H. Oertli*, Bern

621.315.1.056.3

An einer 150-kV-Leitung der Bernischen Kraftwerke A.-G. wurde ein Stromleiterseil in einem Spannfeld mit Gewichten belastet. Die dem Lastabwurf folgenden Seilschwingungen wurden kinematographisch aufgenommen. Der vorliegende Artikel enthält zeichnerische Vergrösserungen aus Filmbildern, die Bahnen der Mitte des schwingenden Seiles und den zeitlichen Verlauf der Seilschwingungen bei verschiedenen Stromleiteraufhängungen. Die Höchstlagen des schwingenden Seiles werden unter vereinfachenden Annahmen berechnet, und die Ergebnisse werden mit den gemessenen Werten verglichen. Zum Schluss wird die praktische Bedeutung der Versuchsergebnisse beurteilt.

Dans une portée d'une ligne à 150 kV des Forces Motrices Bernoises S. A. un des câbles a été chargé avec des poids. Les oscillations qui se manifestèrent après le déclenchement de ces poids furent cinématographiées. Cet article fournit des agrandissements dessinés de prises cinématographiques, des trajectoires du milieu du câble oscillant et des diagrammes des oscillations en fonction du temps pour différents dispositifs de suspension du câble. Sur la base de suppositions simplificatrices, on calcule les positions les plus élevées atteintes par le câble oscillant et on compare les résultats avec les valeurs mesurées. Finalement, on considère la signification pratique des résultats des essais.

Die im Winter 1929/30 auf der 150-kV-Leitung Innertkirchen–Bickigen gemachten Erfahrungen veranlassten die Bernischen Kraftwerke, die Bewegungen der Stromleiterseile nach dem Abfallen von Zusatzlasten experimentell abzuklären. Die Resultate der im Jahre 1930 unter der Leitung des Verfassers durchgeführten Versuche wurden — abgesehen von kurzen Hinweisen [1], [2], [3] — bisher nicht veröffentlicht; Aufforderungen von Fachkollegen folgend, holt dies nun der Verfasser mit dem Einverständnis der Bernischen Kraftwerke nach, bittet aber die Leser, den Zeitpunkt der Versuche im Auge zu behalten. Im Jahre 1930 war man noch nicht auf dem Stand der heutigen Fachkenntnisse; im besonderen waren die von *Hunziker* entwickelten Modellgesetze und Modellversuche [4] [5] noch nicht bekannt. Heute könnten die damaligen Aufgaben zum grossen Teil mit verhältnismässig bescheidenem Zeit- und Kostenaufwand mit Modellversuchen gelöst werden; 1930 drängten sich Versuche an der Hochspannungsleitung selbst auf, weil wir in kurzer Frist zu praktisch brauchbaren Resultaten gelangen mussten. Da die Spannfelder, in denen Störungen vorgekommen waren, im Gebirge lagen, wählten wir für die Versuche andere, leicht zugängliche Spannfelder. Der Umfang und die Dauer der Versuche mussten beschränkt werden; es fehlten deswegen eine Reihe von Versuchen und Messungen, die im Zusammenhang mit den ausgeführten Versuchen wünschenswert und nützlich gewesen wären.

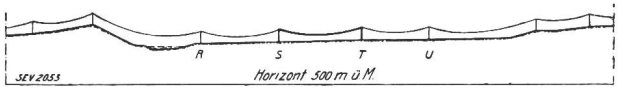

Fig. 1
Schematisches Längenprofil des ersten Versuchsgeländes
Masten und Seillinien nicht maßstäblich; im übrigen Maßstab zirka 1:30 000

Versuchseinrichtungen

Zur Nachahmung von Reif- und Schneeansatz belasteten wir den zu untersuchenden Stromleiter — Stahlaluminiumseil (170,5 mm² Al+39,8 mm² St.) — mit vorhandenen gusseisernen Gewichten, wobei wir Seilklemmen zur Schonung des Stromleiters und einfache mechanische Auslöseapparate für den Lastabwurf einschalteten. Monteure lösten die Apparate nach einem Vorsignal auf einen Revolverschuss des Versuchsleiters aus. Diese Einrichtungen bewährten sich, so dass wir nicht bedauerten, wegen der knappen für die Vorbereitung der Versuche zur Verfügung stehenden Zeit auf kompliziertere Vorrichtungen verzichten zu müssen.

Die Seilbewegungen wurden mit zwei Amateur-Kino-Kameras für 35-mm-Film registriert, wobei die eine im Prinzip die vertikalen, die zweite die seitlichen Schwingungen des entlasteten Stromleiters aufzunehmen hatte. Die normale Bildzahl 16/s genügte; es waren keine Zeitlupenaufnahmen nötig. Es wurden jeweils eine grosse Uhr sowie

[1]) Die Trapez-Halbabspannung für Hochspannungsleitungen der Bernischen Kraftwerke A.-G., Bern. Bull. SEV Bd. 22 (1931), Nr. 13, S. 309; Elektrotechn. Z. 1933, Nr. 51, S. 1243. Compte rendu de la Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques 1933, Tome II, p. D-62.

[2]) A. Roth, Hochspannungstechnik. Julius Springer, Wien. 2. Aufl. 1938. S. 507; 3. Aufl. 1950. S. 534.

[3]) H. Oertli und W. Köchli. Die 150-kV-Leitung Innertkirchen-Wimmis-Mühleberg der Bernischen Kraftwerke A.-G. Bull. SEV 1944, Nr. 3, S. 57.

[4]) G. Hunziker, Schnellhöhe und Modellmechanik. Leemann & Co. Zürich. 1942.

[5]) Auszug aus [4]) im Bull. SEV 1942, Nr. 9, S. 242. G. Hunziker, Mechanische Freileitungsmodelle.

Längenmaßstäbe mitphotographiert; vor und nach den Aufnahmen wurden die Ruhelagen des Stromleiters auch mit dem Theodoliten gemessen. Aus den kinematographischen Aufnahmen konnte daher die räumliche Lage des Seiles in Funktion der Zeit bestimmt werden; es wurden dazu die Bilder in passender Grösse an eine Wand projiziert und, soweit sie besonders interessant waren, in der Vergrösserung zeichnerisch festgehalten (siehe z. B. die Fig. 4, 5 und 6).

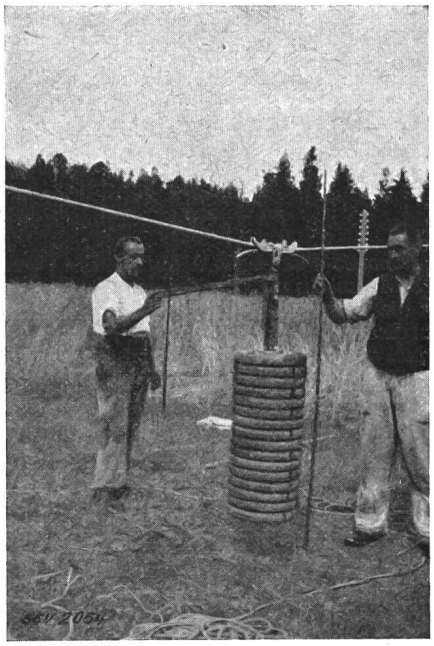

Fig. 2
Mitte des Spannfeldes *S...T*
An dem bei den Masten *S* und *T* halbabgespannten Stromleiterseil hängt ein Gewicht von 560 kg, das durch eine kleine Hebelbewegung ausgeklinkt werden kann.

Versuche

Das erste Versuchsfeld ist in der Fig. 1 dargestellt. Die Masten *R*, *S*, *T*, *U* standen auf einer gegen den Mast *U* schwach ansteigenden Ebene; beim Mast *R* betrug der Leitungswinkel 2°; bei den übrigen genannten Masten wies die Leitung keine Winkel auf. Das untersuchte Spannfeld *S...T* hatte eine Länge von 342 m; die Spannweiten *R...S* und *T...U* betrugen 328 m bzw. 283 m. Die Masten *S* und *T* waren mit normalen Halbabspann-Isolatorenketten ausgerüstet, die je nach den beabsichtigten Versuchen bei dem betreffenden Stromleiter ersetzt oder belassen wurden; die Masten *R* und *U* hatten Hänge-Isolatorenketten, die bei allen Versuchen unverändert beibehalten wurden.

Die ersten Versuche — mit einer einzigen Belastungsstelle in der Mitte des Spannfeldes *S...T* — waren im wesentlichen Vorversuche; einige besondere Ergebnisse werden erwähnt werden. Bei den weitern Versuchen wurde ein Stromleiterseil im Spannfeld *S...T* an 7 Stellen belastet. Dadurch näherte man sich der pro Längeneinheit gleichmässig verteilten Zusatzlast. Die Seillinie des belasteten Stromleiters wich deswegen von der Parabelform nicht mehr wesentlich ab. Es wurden folgende Verhältnisse untersucht:

1. Hängeketten bei den Masten *S* und *T*; an jeder der 7 Belastungsstellen 116 kg (Gewichts-Aufhängungen und Auslösevorrichtung inbegriffen), was einer gleichmässigen Zusatzlast von 2,38 kg/m entsprach;
2. Halbabspannungen bei den Masten *S* und *T*; an jeder der 7 Belastungsstellen 150 kg entsprechend 3,08 kg/m;
3. Abspannungen bei den Masten *S* und *T*; an jeder der 7 Belastungsstellen 150 kg entsprechend 3,08 kg/m.

An dem entlasteten Seil blieb, herrührend von der Seilklemme und dem Klöppel des Auslöseapparates, eine Zusatzlast von 6 kg pro Belastungspunkt oder durchschnittlich 0,12 kg/m. Das untersuchte Seil hatte deswegen einen etwas grösseren Durchhang als die andern, vollständig leeren Seile.

Bei allen diesen Versuchen wurden die Gewichte in den 7 Aufhängepunkten (abgesehen von Ungenauigkeiten) gleichzeitig abgelöst. Es wurden keine systematischen Versuche mit zeitlich verschiedenen Ablösungen in den 7 Belastungspunkten ausgeführt; hingegen wurden die Folgen von ungewollt verspäteten Ablösungen festgestellt (Fig. 15).

Die Figuren 4, 5 und 6 sind übereinandergelegte zeichnerische Vergrösserungen aus Filmbildern der Kinokamera I, mit der die Vertikalbewegungen zu registrieren waren. Die Figuren 7, 8 und 9 sind entsprechende Umzeichnungen auf Normalprojektion; die nach Photographien gezeichneten Fig. 10 und 11 stellen die Isolatorenketten dar.

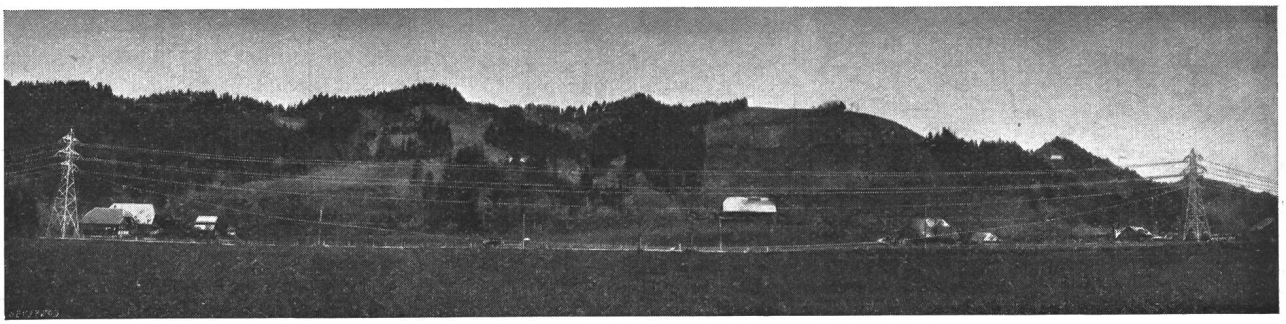

Fig. 3
Das erste Versuchsfeld
Links Mast *S*, rechts Mast *T*; 6 Stromleiter (durch Retusche hervorgehoben) und 1 Erdseil. Stromleiter Nr. 3 — mit Hängeisolatorenketten an den Masten *S* und *T* — an 7 Stellen mit je 116 kg belastet; Nachbarspannfelder ohne Zusatzlast.

Die Figuren 12, 13, 14 und 15 zeigen den aus den Kinoaufnahmen ermittelten zeitlichen Verlauf der Vertikalschwingungen des Seilmittelpunktes im Spannfeld *S...T*.

Bei den beschriebenen Versuchen mit Hängeketten und mit Halbabspannungen im Spannfeld *S...T*, an das sich die Nachbarspannfelder ohne Leitungswinkel anschlossen, schwang der entlastete Stromleiter praktisch in einer vertikalen Ebene.

Wenn Leitungswinkel vorkommen und Hängeketten und Halbabspannungen seitlich schräg gezogen werden, so führen die Aufhängepunkte des Seiles bei der Belastung und Entlastung seitliche Bewegungen aus. Bei einer plötzlichen Entlastung gerät der Stromleiter im ganzen Spannfeld in seitliche Schwingungen. Versuche im Spannfeld *E...F* (siehe Fig. 16) bestätigten dies. Die Masten *D*, *E* und *G* hatten Hänge-Isolatorenketten, der Mast *F* Halbabspannketten, die bei einem Versuch an einem Stromleiter durch eine Hängekette ersetzt wurden. Wegen der Überhöhung des Mastes *G* trugen die Isolatorenketten des Mastes *F* eine verhältnismässig kleine Vertikallast und wurden deswegen durch den Winkelzug um so mehr seitlich ausgelenkt.

Es wurde ein Stromleiter in dem 266 m langen Spannfeld *E...F* in 7 Punkten mit je 150 kg belastet entsprechend 3,95 kg/m; die nach der Entlastung am Seil verbleibende Last betrug je 6 kg entsprechend 0,16 kg/m. Die aus den kinematographischen Aufnahmen erhaltenen Bahnen des Seilmittelpunktes des Spannfeldes *E...F* sind in den Fig. 17 und 18 dargestellt; die Fig. 19 zeigt schematisch die Hängeisolatorenkette des Mastes *F* in drei typischen Stellungen.

Ähnliche Bahnen ergaben sich, als in einem Versuch die Wirkung des Windes im Spannfeld *S...T* (wo kein Winkelzug vorhanden war) nachgeahmt wurde; siehe Fig. 20.

Die besonderen Versuche an Halbabspannungen wurden an anderer Stelle beschrieben; siehe Literatur [1]).

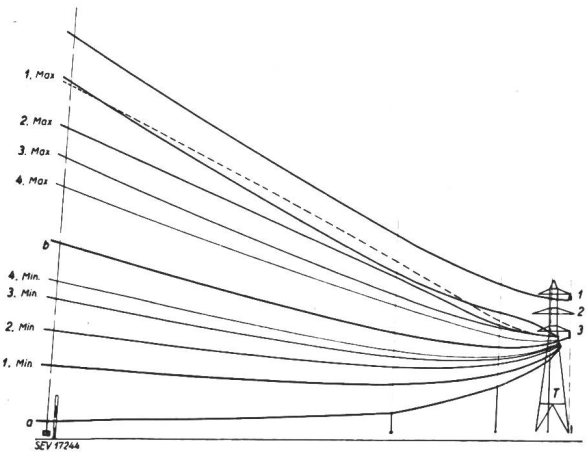

Fig. 4

Stromleiter Nr. 3 mit Hängeisolatorenketten bei den Masten *S* und *T*; an 7 Stellen mit je 116 kg belastet, entsprechend 2,38 kg/m

— — — — — — ca. 1 s vor 1. Max. siehe Fig. 12.

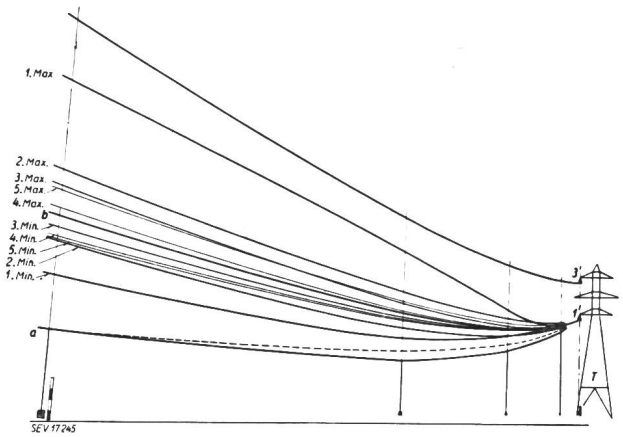

Fig. 5

Stromleiter Nr. 1', halbabgespannt bei den Masten *S* und *T*; an 7 Stellen mit je 150 kg belastet, entsprechend 3,08 kg/m

In der Spannfeldmitte Lastabwurf um 1/5 s verspätet

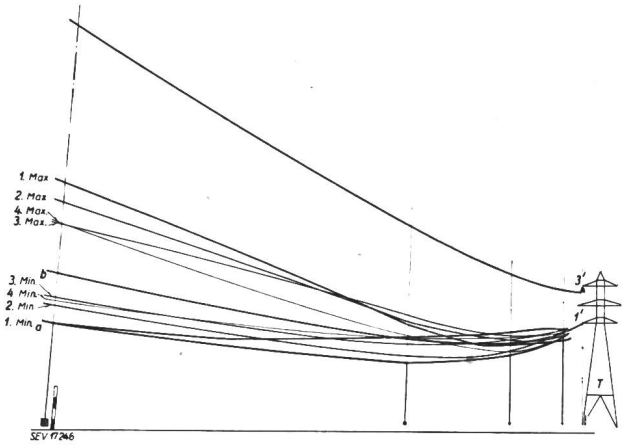

Fig. 6

Stromleiter Nr. 1' abgespannt bei den Masten *S* und *T*; an 7 Stellen mit je 150 kg belastet, entsprechend 3,08 kg/m

Fig. 4, 5 und 6

Übereinander gelegte zeichnerische Vergrösserungen aus Filmbildern der Kinokamera I, mit der die Vertikalbewegungen des schwingenden Stromleiters registriert wurden

Links: strichpunktierte Linie: Mitte des Spannfeldes *S...T*

rechts: Mast *T*, Zahlen am Mast $\left\{\begin{matrix}3' & 1\\ 2' & 2\\ 1' & 3\end{matrix}\right\}$ Nummern der Stromleiter

a Ausgangslage, Stromleiterseil mit Gewichten belastet

1. Max.: entlasteter Stromleiter bei erster Höchstlage in der Spannfeldmitte

1. Min.: darauffolgende tiefste Lage in der Spannfeldmitte

2. Max.: zweite Höchstlage in der Spannfeldmitte usw.

b Ruhelage nach dem Ausklingen der Stromleiterschwingungen; bleibende Zusatzlast 7×6 kg entsprechend 0,12 kg/m

Versuchsergebnisse

Die Berechnung der Durchhänge und Schnellhöhen und ihr Vergleich mit den gemessenen Werten hatte den Hauptzweck, eine Berechnungsweise aufzustellen und zu kontrollieren, die sich auf andere Fälle, andere Spannweiten, andere Stromleiter, andere Belastungen und Entlastungen usw. übertragen liess. Dabei wurde weniger eine wissenschaftlich genaue und mathematisch elegante Berechnungsweise angestrebt als eine dem Leitungsbauer verständliche und übersichtliche Berechnungsweise, die

möglichst einfach war und den praktischen Bedürfnissen doch genügte.

A. *Durchhang des nur in einem Spannfeld belasteten Stromleiters; Vergleich des gemessenen und des berechneten Durchhanges*

Fig. 7, 8 und 9 zeigen die Wirkung verschiedener Stromleiteraufhängungen, wobei besonders zu beachten ist, dass beim Versuch mit Hängeisolatorenketten (Fig. 7) die Zusatzlast kleiner war als bei den Versuchen mit Halbabspannungen und Abspannungen.

I) Berechnung des Durchhanges im Spannfeld $S...T$ mit Hängeisolatorenketten bei den Masten S und T.

Daten:

Spannweite $a_1 = 342$ m
Stromleiter: Stahlaluminiumseil
(170,5 mm² Al+39,8 mm² St.)
Gewicht 0,810 kg/m
Elastizitätsmodul $E = 755\,000$ kg/cm²
Zusatzlast im Spannfeld $S...T$: 7×116 kg entsprechend 2,38 kg/m.

Wäre der Stromleiter nicht nur im Spannfeld $S...T$, sondern auch in allen zwischen den nächsten Abspannungen liegenden Spannfeldern pro Längeneinheit gleich belastet gewesen, so hätte der Durchhang des belasteten Seiles nach der üblichen Weise aus dem Durchhang des leeren Seiles ($f_1 = 11{,}30$ m) berechnet werden können [6]). Er wäre in diesem Falle $f_1 = 13{,}8$ m gewesen, bei einer Horizontalspannung von $p_1 = 1605$ kg/cm².

Da der Stromleiter nur im Spannfeld $S...T$ belastet war, lenkten die Isolatorenketten in der Leitungsrichtung aus [7]), [8]); siehe Fig. 7, 10 und 21.

Für eine Parabel gilt angenähert:

$$\text{Seillänge } l_1 = a_1 + \frac{8}{3}\frac{f_1^2}{a_1}$$

$$l_2 = a_2 + \frac{8}{3}\frac{f_2^2}{a_2}, \text{ woraus sich } f_2 \text{ berechnen}$$

lässt.

In erster Annäherung kann man $l_2 = l_1$ setzen; in der genaueren Berechnung ist die elastische Seilverkürzung zu berücksichtigen, die $a_2 < a_1$ und $f_2 > f_1$ entspricht.

$$l_2 = l_1 \left(1 + \frac{p_2 - p_1}{E}\right)$$

Entsprechend den Auslenkungen der Isolatorenketten der Masten S und T ($\delta_{aS} = 1{,}09$ m; $\delta_{aT} = 1{,}06$ m) berechneten wir $f_2 = 20{,}7$ m. Dieser

[6]) E. Maurer, Die Berechnung der Freileitungen mit Rücksicht auf die mechanischen Verhältnisse der Leiter. Bull. SEV 1936, Nr. 2, S. 41; Nr. 3, S. 65.

[7]) H. Bourquin, Influence de la déviation des chaînes d'isolateurs sur la variation de flèche des lignes aériennes suspendues. Bull. SEV (1923), Nr. 10, S. 545.

[8]) K. Langhard, Der Einfluss ungleichmässig verteilter Zusatzlasten auf die Durchhänge von Freileitungen. Elektrotechn. Z. 1929, Nr. 46, S. 1647.

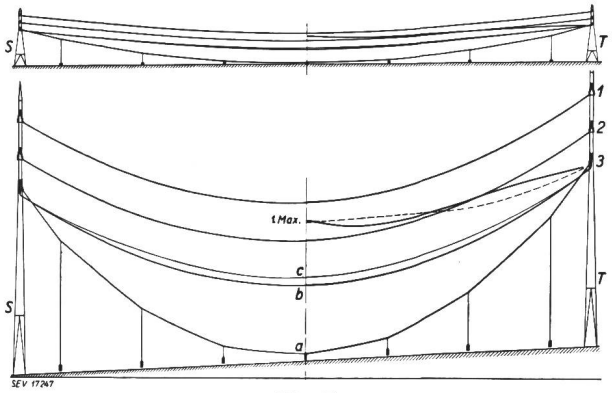

Fig. 7
Stromleiter 3 mit Hängeisolatorenketten bei den Masten S und T; an 7 Stellen mit je 116 kg belastet, entsprechend 2,38 kg/m
Auszug aus Fig. 4, auf Normalprojektion umgezeichnet

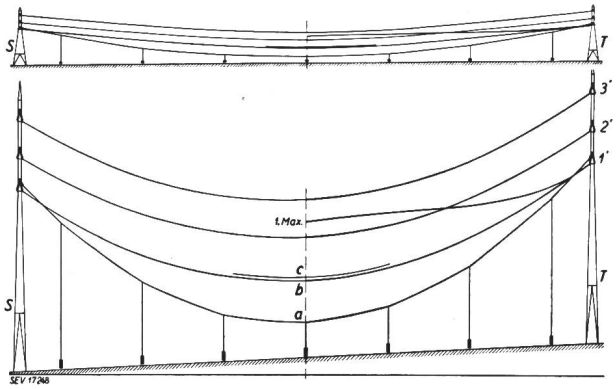

Fig. 8
Stromleiter 1' mit Halbabspannungen bei den Masten S und T; an 7 Stellen mit je 150 kg belastet, entsprechend 3,08 kg/m
Auszug aus Fig. 5, auf Normalprojektion umgezeichnet

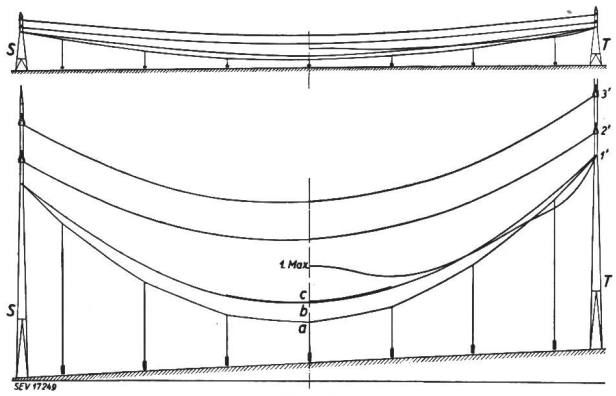

Fig. 9
Stromleiter 1' abgespannt bei den Masten S und T; an 7 Stellen mit je 150 kg belastet, entsprechend 3,08 kg/m
Auszug aus Fig. 6, auf Normalprojektion umgezeichnet
(Infolge eines Versehens bei der Seilregulierung ist der Durchhang des entlasteten Stromleiters grösser als in den Fällen der Fig. 7 und 8)

Fig. 7, 8 und 9

a Ausgangslage, Stromleiterseil mit Gewichten belastet
1. Max.: entlasteter Stromleiter bei erster Höchstlage in der Spannfeldmitte
b Ruhelage des entlasteten Stromleiters nach dem Ausklingen der Schwingungen; bleibende Zusatzlast 7×6 kg, entsprechend 0,12 kg/m
c Ruhelage, die der Stromleiter einnehmen würde, wenn keine Zusatzlasten am Seil blieben
Längenmaßstab 1 : 4500
Höhenmaßstab oben 1 : 4500, unten 1 : 900

Wert stimmte mit dem gemessenen Durchhang überein.

Wären die Auslenkungen δ_{aS} und δ_{aT} nicht bekannt gewesen, so hätten wir sie vorerst geschätzt und die Berechnungen auf die Spannfelder ausgedehnt, die durch die Belastung des Spannfeldes $S...T$ praktisch noch beeinflusst werden konnten.

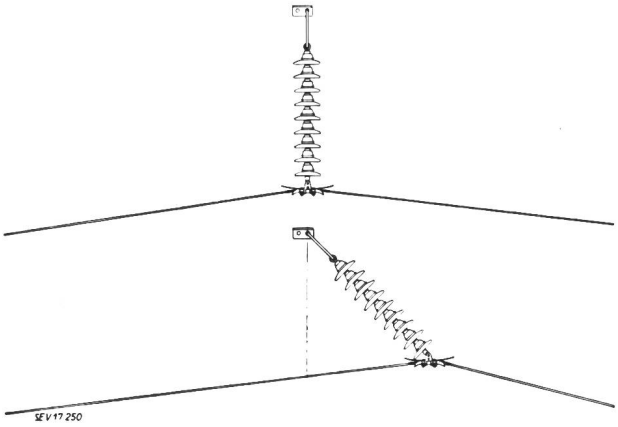

Fig. 10
Hängeisolatorenkette beim Mast *S*, entsprechend Fig. 7

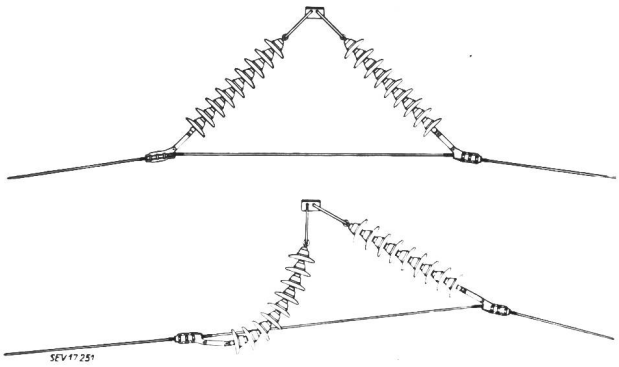

Fig. 11
Halbabspannketten beim Mast *S*, entsprechend Fig. 8

Fig. 10 und 11
unten: Stromleiter im Spannfeld $S...T$ belastet
oben: Ruhelage nach der Entlastung des Stromleiters

II) Berechnung des Durchhanges im Spannfeld $S...T$ mit Halbabspannketten bei den Masten S und T.

Daten:

Zusatzlast im Spannfeld $S...T$: 7×150 kg entsprechend 3,08 kg/m
übrige Daten wie unter I).

Der Durchhang wurde auf ähnliche Weise berechnet wie unter I) beschrieben wurde. Mit den beobachteten Auslenkungen $\delta_{aS} = \delta_{aT} = 0{,}44$ m wurde $f_2 = 17{,}8$ m und stimmte mit dem gemessenen Durchhang überein.

III) Berechnung des Durchhanges im Spannfeld $S...T$ mit Abspannungen bei den Masten S und T. Daten wie unter II).

Der unter Annahme unbeweglicher Abspannpunkte berechnete Durchhang betrug 17,6 m; der gemessene Durchhang war 17,9 m. Der Unterschied von 0,3 m war durch das elastische Nachgeben der Auslegerspitzen um je rund 5 cm zu erklären.

In Fig. 22 sind für das 342 m lange Spannfeld $S...T$ die Durchhangszunahmen gegenüber dem vollständig leeren Seil für Zusatzlasten von 0...4 kg/m dargestellt. Die Kurven *I* und *II* für Hängeketten und Halbabspannungen gelten nicht ohne weiteres für jedes 342 m lange Spannfeld, da die Beweglichkeit der Hängeketten und Halbabspannungen auch von den Nachbarspannfeldern und den Stromleiteraufhängungen an deren Masten abhängt.

Um den Einfluss der Seilaufhängung zu zeigen, sollen hier noch die Durchhangsvergrösserungen angegeben werden, die bei den Vorversuchen, mit einer einzigen Belastungsstelle in der Mitte des Spannfeldes $S...T$, gemessen wurden.

Stromleiteraufhängung bei den Masten S und T	Belastung kg	Durchhangsvergrösserung an der Belastungsstelle m
Hängeketten	220	9,2
Halbabspannungen	220	5,5
Halbabspannungen	560	8,3

B. *Die vertikalen Seilschwingungen*

Bei den in Fig. 4 und 7 (Hängeketten bei den Masten S und T) und 5 und 8 (Halbabspannungen) dargestellten Versuchen im Spannfeld $S...T$ schwang der entlastete Stromleiter praktisch in einer vertikalen Ebene; der abgespannte Stromleiter (Fig. 6 und 9) schwang innerhalb eines Raumes, der in der Spannfeldmitte ungefähr 0,5 m breit war. Der Vergleich der Fig. 12...15 zeigt, dass bei verschiedener Stromleiteraufhängung nicht nur die Amplituden verschieden gross waren, sondern auch die Schwingungsdauer und der Charakter der Schwingung.

Es interessiert besonders, die Höchstlage eines schwingenden Stromleiters in der Spannfeldmitte vorausberechnen zu können. Die Höchstlage z_1 über der Ruhelage hängt, wie noch gezeigt wird, nicht nur von der Senkung y_a des Seillinienscheitels infolge der Zusatzlast ab; die Werte z_1/y_a, die aus den beschriebenen Versuchen berechnet werden könnten, dürften daher nicht ohne weiteres auf andere Verhältnisse übertragen werden.

In allen Fällen setzten wir voraus, die auf dem Spannfeld $S...T$ gleichmässig verteilte Zusatzlast falle gleichmässig und gleichzeitig ab.

Bei der Berechnung der *Schnellhöhe für Hängeketten und für Halbabspannungen* bei den Masten S und T machten wir *für die Höchstlage* des schwingenden Seiles folgende Annahmen, die die Berechnungen vereinfachten, aber der Wirklichkeit nicht ganz entsprachen:

das Seil habe die Form einer Parabel mit senkrechter Achse;

der Seilzug sei ungefähr gleich gross wie bei der Ruhelage nach der Entlastung, und der Unterschied könne vernachlässigt werden;

in den benachbarten Spannfeldern, in denen der entlastete Stromleiter ebenfalls schwingt, könne der in diesem Zeitpunkt vorhandene Unterschied der mechanischen Energie gegenüber derjenigen der Ruhelage nach der Entlastung im Spannfeld $S...T$ vernachlässigt werden.

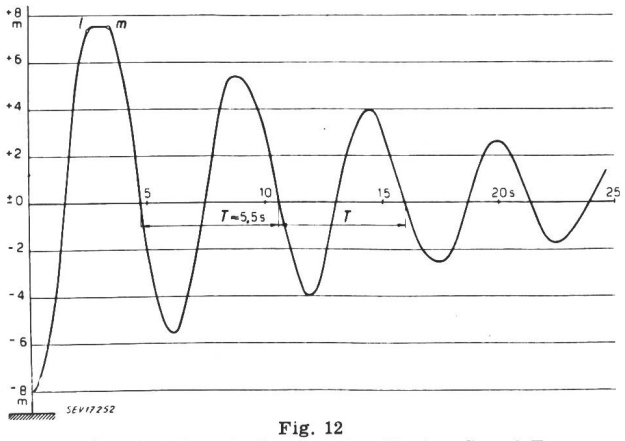

Fig. 12
Hängeisolatorenketten bei den Masten *S* und *T* zu Fig. 4 und Fig. 7
l entspricht — — — in Fig. 4 und Fig. 7
m entspricht 1. Max. in Fig. 4 und Fig. 7

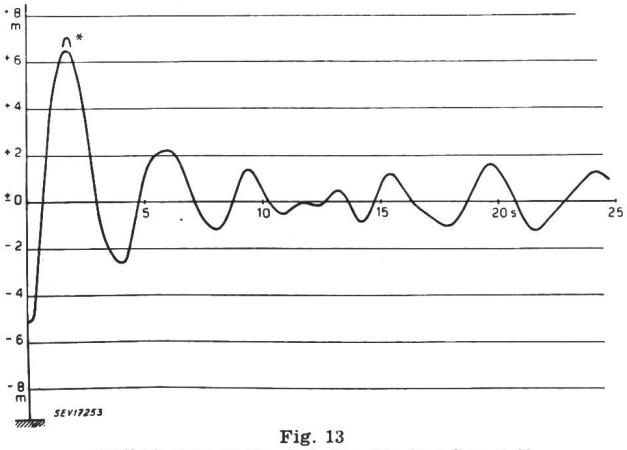

Fig. 13
Halbabspannungen bei den Masten *S* und *T* zu Fig. 5 und Fig. 8
* Schnellhöhe bei Wiederholung des Versuches mit gleichzeitigen Lastabwürfen

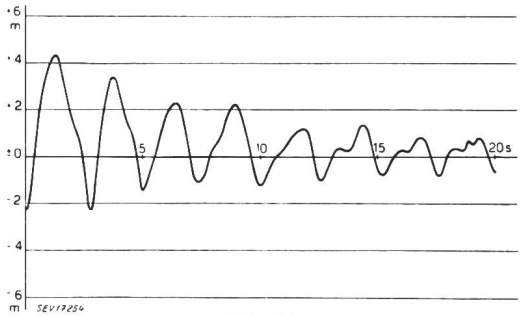

Fig. 14
Abspannungen bei den Masten *S* und *T* zu Fig. 6 und Fig. 9

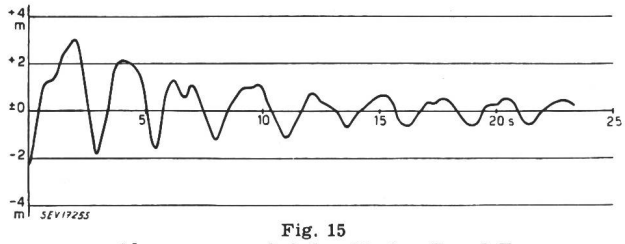

Fig. 15
Abspannungen bei den Masten *S* und *T*
Bei der 5. Belastungsstelle Lastabwurf um 0,4 Sekunden verspätet

Fig. 12 bis 15
Vertikalschwingungen des Seilmittelpunktes im Spannfeld *S*...*T*
Abszissen: Zeit in Sekunden nach der Entlastung des Stromleiters
Ordinaten: Abstand des Stromleiters von der Ruhelage nach der Entlastung

Wir vernachlässigten ferner

die Veränderung der Höhenlage der Seilaufhängepunkte bei der Belastung des Seiles im Spannfeld *S*...*T* und nach der Entlastung,
und die Reibungseinflüsse.

Unter diesen Voraussetzungen konnte folgendermassen überlegt werden:

Die von q_b auf q_a ansteigende Zusatzlast leistet am Stromleiter mechanische Arbeit, die im gespannten Seil (und zwar nicht nur im belasteten Feld *S*...*T*) wie in einer Feder als potentielle Energie A_a aufgespeichert wird. Diese wird nach dem Abfallen der Zusatzlast in kinetische Energie und in Energie

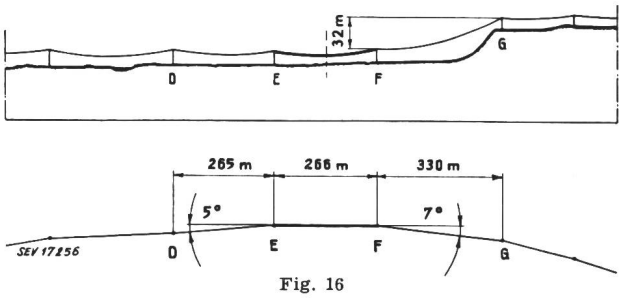

Fig. 16
Schematisches Längenprofil und Situation des zweiten Versuchsgeländes
Belastung eines Stromleiters im Spannfeld *E*...*F* mit 7×150 kg entsprechend 3,95 kg/m; bleibende Zusatzlast nach der Entlastung 7×6 kg entsprechend 0,16 kg/m

der Lage umgesetzt. Befindet sich das aufschnellende Seil in der Höchstlage, so ist seine Geschwindigkeitsenergie gleich Null und seine Energie der Lage — bezogen auf die Ruhelage des entlasteten Seiles — gleich der von der Zusatzlast geleisteten Arbeit A_a. Die Rechnung kann auf 1 m Seil in der Mitte des Spannfeldes beschränkt werden.

In Fig. 23 ist durch die schraffierte Fläche die Arbeit $A_a = \int_0^{y_a} \triangle q \cdot dy$ dargestellt, die die Zusatzlast an dem 1 m langen Seilstück in der Spannfeldmitte leistet, wenn sie von q_b auf q_a anwächst. Vernachlässigt man, wie oben vermerkt, die Verschiebung der durch die Seilaufhängepunkte gezogenen Verbindungsgeraden, so kann man $dy = df$ setzen, wenn f der Durchhang ist, bezogen auf die Verbindungsgerade durch die Seilaufhängepunkte. Die $(y, \triangle q)$-Kurve der Fig. 23 ist dann ein Ausschnitt aus der $(\triangle f, q)$-Kurve der Fig. 22 für die entsprechende Stromleiteraufhängung. Es sei G das Gewicht pro Meter des entlasteten Seiles (eine eventuell am Seil bleibende Zusatzlast inbegriffen). Die Energie der Lage, bezogen auf die Ruhelage des entlasteten Seiles, Gz_1 ist gleich der Arbeit A_a; daraus ist die höchste Erhebung über die Ruhelage nach der Entlastung zu berechnen: $z_1 = A_a/G$.

Auf diese Weise wurden in der Tabelle I für das Spannfeld *S*...*T* die den Versuchsbedingungen entsprechenden Höchstlagen des schwingenden Stromleiters für Hängeketten und für Halbabspannungen berechnet. Die Unterschiede zwischen den berechneten und den gemessenen Werten waren in Anbetracht der vereinfachten Berechnungsweise über-

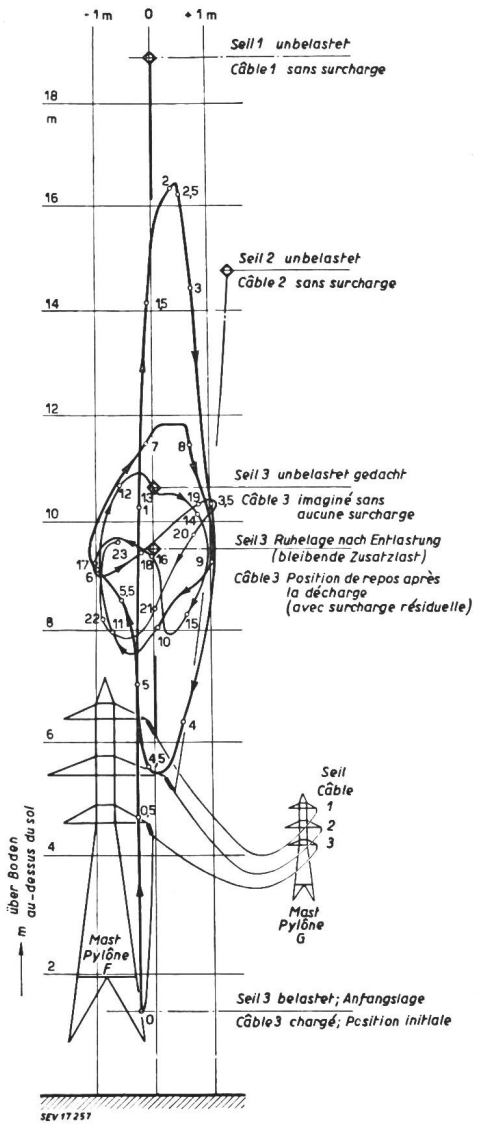

Fig. 17
Bei dem zu untersuchenden Stromleiterseil Hängeisolatorenkette beim Mast *E* und beim Mast *F*

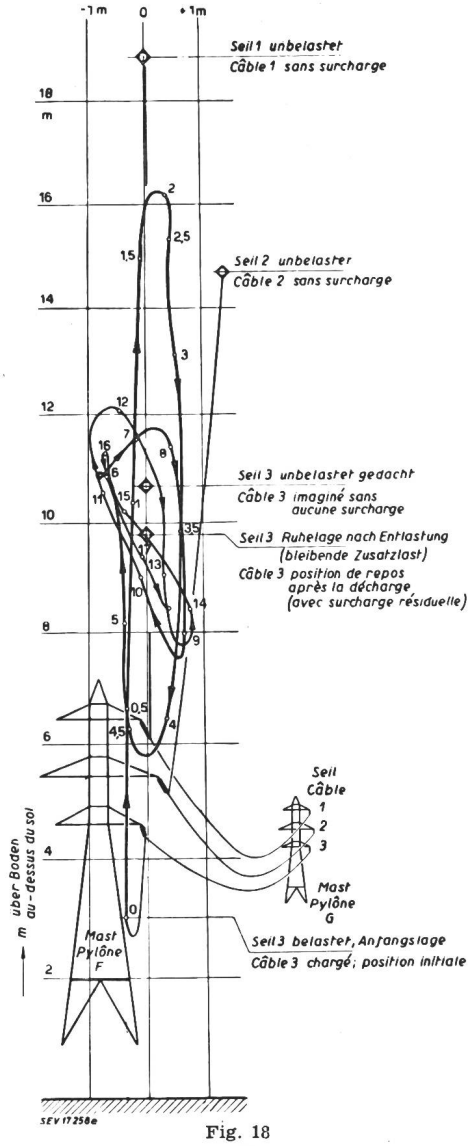

Fig. 18
Halbabspannketten beim Mast *F*, Hängeisolatorenkette unverändert beim Mast *E*, weshalb verhältnismässig kleine Durchhangsverminderung gegenüber Fig. 17

Fig. 17 und 18

Zeichnerische Vergrösserungen aus Filmbildern der Kinokamera II, die unter dem Stromleiter mit Blickrichtung gegen den Mast *F* aufgestellt war

Bahn des Stromleiters in der Mitte des Spannfeldes *E...F* nach der Entlastung. Die bei der Bahnkurve eingeschriebenen Zahlen bedeuten Sekunden nach der Entlastung. Die Punkte ◇ der Seile 1, 2 und 3 liegen ebenfalls in der Spannfeldmitte

raschend klein. Ähnliche Berechnungen für das Spannfeld *E...F* (Fig. 16...18) gaben ebenfalls eine befriedigende Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Schnellhöhen. Die beschriebene Berechnungsweise kann also für die praktischen Verhältnisse genügen, in denen die Unsicherheiten über die Grösse, die Verteilung und das Abfallen der Zusatzlasten weit grösser sind als die Ungenauigkeiten in der Berechnung der Schnellhöhen.

Für den Fall, da der zu untersuchende Stromleiter bei den Masten *S* und *T* *abgespannt* war, rechneten wir etwas anders. Wir nahmen an, die Abspannpunkte seien vollständig unbeweglich. Die Nachbarspannfelder übten dann keinen Zug auf das hochschnellende Seil aus; dieses entspannte sich vollständig; die dabei frei werdende mechanische Energie vergrösserte die Schnellhöhe, siehe Fig. 24. Die so berechnete Höhe z_1 war um rund 20% kleiner als die gemessene. Bei einer Berücksichtigung der elastischen Nachgiebigkeit der Abspannpunkte wäre die berechnete Höhe immer noch kleiner als die gemessene geblieben. Fig. 9 kann dies erklären; das Seil hatte in der Höchstlage auch nicht annähernd Parabelform; in der Nähe des Mastes *T* war es sogar tiefer als im belasteten Zustand (was in der Praxis z. B. auch für Leitungskreuzungen beachtenswert ist). Für praktische Berechnungen genügt es wohl, in der beschriebenen einfachen Weise zu rechnen und zu dem so berechneten Wert z_1 ungefähr 25%

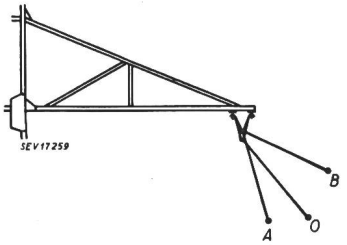

Fig. 19

Durch den Winkelzug seitlich schräg gezogene Isolatorenkette

O Ruhelage; Seil ohne Zusatzlast

A Ruhelage; Seil im Spannfeld vor dem Mast belastet

B Höchstlage der Isolatorenkette nach der Entlastung des Seiles.

A liegt vor, *B* hinter der Ebene, die durch *O* und die Mastachse gelegt werden kann

Berechnung der Höchstlagen des schwingenden Stromleiterseiles im Spannfeld S...T (a = 342 m)

Vergleich mit den gemessenen Werten

Tabelle I

Stromleiteraufhängungen bei den Masten *S* und *T*		Hängeketten	Halbabspannketten	
Zusatzlast pro m des belasteten Seiles im Spannfeld *S...T*	q_a	2,38	3,08	kg/m
Zusatzlast des entlasteten Seiles	q_b	0,12	0,12	kg/m
Bei der Entlastung abgefallene Zusatzlast $(q_a - q_b) =$	$\triangle q_a$	2,26	2,96	kg/m
Gewicht des entlasteten Seiles (samt der bleibenden Zusatzlast q_b)	G	0,93	0,93	kg/m
Berechneter Durchhang des mit q_a belasteten Seiles = gemessener Durchhang	f_a	20,7	17,8	m
Durchhang des entlasteten Seiles mit bleibender Zusatzlast q_b, gemessen (bei Halbabspannungen wegen höherer Temperatur gleich gross wie bei Hängeketten)	f_b	12,2	12,2	m
Durchhangszunahme infolge Vergrösserung der Zusatzlast von q_b auf q_a	$(f_a - f_b)$	8,5	5,6	m
Arbeit an 1 m Seil der Spannfeldmitte $\int_0^{y_a} \triangle q \cdot dy \approx \int_{f_b}^{f_a} \triangle q \cdot df =$	A_a	7,17	6,35	mkg/m
Berechnete Höchstlage des von q_a auf q_b entlasteten, schwingenden Seiles über der Ruhelage des entlasteten Seiles $A_a/G =$	z_1	7,7	6,8	m
Gemessene Höchstlage	z_1*	7,5	7,0	m

zuzuschlagen, wenn ähnliche Verhältnisse wie beim beschriebenen Versuch vorliegen.

Um die Wirkung von Hängeketten, Halbabspannungen und Abspannungen auf die Schnellhöhe vergleichen zu können, rechneten wir die oben angegebenen Werte für gleiche Spannung des leeren Stromleiters und für gleiche Zusatzlast, siehe Tabelle II. Die berechneten Werte z_1/f_a dürfen nicht ohne weiteres auf andere Verhältnisse übertragen werden.

Die in den Figuren und Tabellen dargestellten Durchhänge und Schnellhöhen sind so gross, dass bei oberflächlicher Beurteilung daraus auf eine mangelhafte Betriebssicherheit der untersuchten und ähnlicher Hochspannungsleitungen geschlossen werden könnte.

Man wird anders urteilen, wenn man nicht nur die Möglichkeit, sondern auch die Wahrscheinlichkeit von Betriebsstörungen betrachtet, die durch

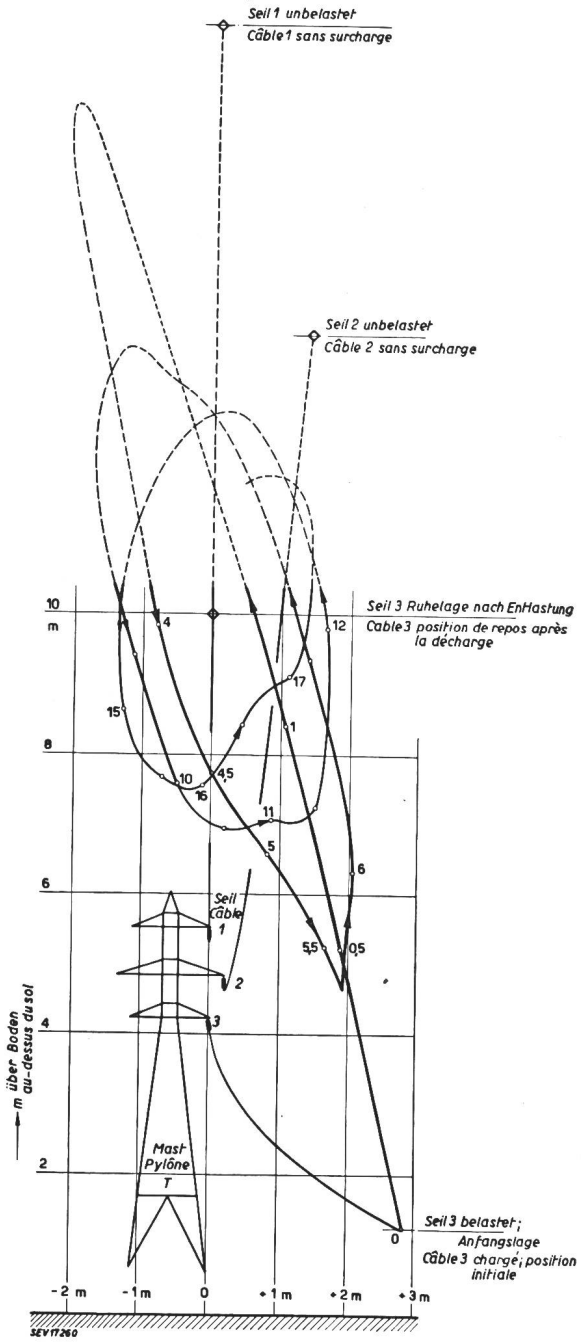

Fig. 20

Stromleiterseil nur in der Mitte des 342 m langen Spannfeldes *S...T* belastet; Gewichte um 3 m senkrecht zur normalen Durchhangsebene verschoben zur Nachahmung der Windwirkung

Bahn des entlasteten Stromleiters in der Mitte des Spannfeldes; ausgezogener Teil zeichnerische Vergrösserung nach Filmbildern der Kinokamera II, gestrichelt Ergänzung nach Filmbildern der Kinokamera I

Einfluss der Stromleiteraufhängungen bei den Masten S und T auf die Durchhangszunahme und die Schnellhöhe im Spannfeld S...T

Tabelle II

Stromleiteraufhängung bei den Masten S und T	Hängeketten m	Halbabspannungen m	Abspannungen m
Durchhangszunahme infolge Vergrösserung der Zusatzlast von 0,12 auf 3,08 kg/m $\triangle f_a =$	9,5	5,6*	3,3**
Höchstlage des auf 0,12 kg/m Zusatzlast entlasteten, schwingenden Seiles über der Ruhelage des entlasteten Seiles $z_1 =$	9,7	7,0*	6,0
Verhältnis $\frac{z_1}{f_a}$ rund	1,0	1,25	1,8

*) gemessene Werte; übrige Werte für $\triangle f_a$ und z_1 durch Umrechnung erhalten.

**) Nachgiebigkeit der Auslegerspitzen berücksichtigt.

belastete und durch schwingende entlastete Stromleiter entstehen können, und wenn man die Grösse der Spannweiten sowie die Grösse der Zusatzlasten und besonders die Art ihrer Verteilung und ihres Abfallens gebührend berücksichtigt. Die Fig. 13 und 15 zeigen, dass die Schnellhöhe schon dann wesentlich kleiner wird, wenn die Last stellenweise etwas verspätet abgeworfen wird. Das plötzliche Abfallen der ganzen Zusatzlast, das bei gleichmässiger Lastverteilung die grösste Schnellhöhe ergibt, ist sehr

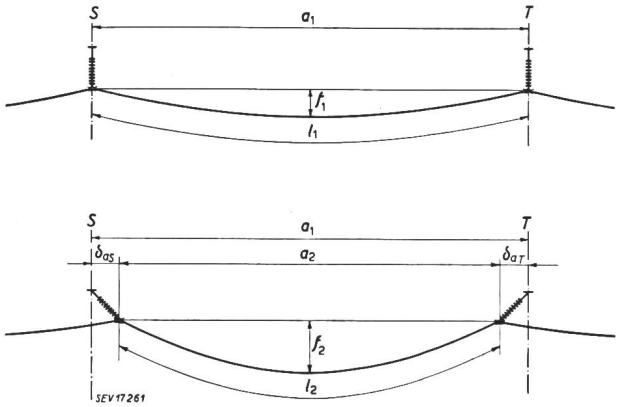

Fig. 21

Schematische Darstellung der Durchhänge im Spannfeld S...T

oben: gleichmässige Zusatzlast auf allen Spannfeldern
unten: gleich grosse Zusatzlast, aber nur im Spannfeld $S...T$; Isolatorenketten in Leitungsrichtung ausgelenkt
$a_2 = a_1 - (\delta_{aS} + \delta_{aT})$
Seillänge $l_2 < l_1$

wenig wahrscheinlich; die Fig. 24 und 25 lassen erkennen, dass eine bleibende Zusatzlast die Schnellhöhe wesentlich vermindert.

Die gemachten Überlegungen zeigen, dass in der Praxis glücklicherweise örtlich oder zeitlich selten so ungünstige Verhältnisse in den Stromleiterschwingungen vorkommen, wie die Versuche darstellten. Dass ungleichmässige Lastverteilungen wesentlich ungünstiger sein können als gleichmässige, wies Hunziker [4]) an Modellversuchen für die 1200 m lange Urserenspannweite nach.

C. *Seitliche Schwingungen eines plötzlich entlasteten Stromleiters*

Die infolge eines Winkelzuges entstehenden seitlichen Stromleiterschwingungen können nicht in

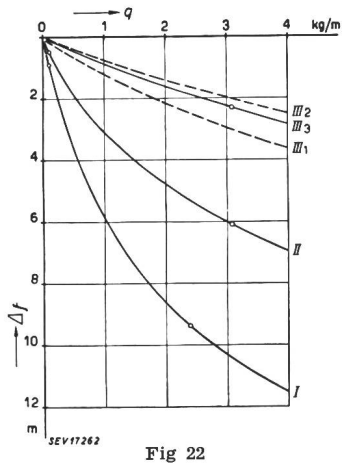

Fig 22

Spannfeld S...T (a = 342 m) mit 0...4 kg/m belastet; übrige Spannfelder ohne Zusatzlast. Durchhangszunahme gegenüber dem vollständig leeren Seile

Abszisse: Zusatzlast in kg/m
Ordinate: Durchhangszunahme in m

I Hängeisolatorenketten bei den Masten S und T
II Halbabspannketten bei den Masten S und T
III Abspannungen bei den Masten S und T

Die Kurven *I*, *II* und III_1 gelten für das normal gespannte Stahlaluminiumseil (170,5 + 39,8) mm² entsprechend einem Horizontalzug von 3100 kg bei 0° C und 2 kg/m Zusatzlast

III_1 gilt für unbewegliche Abspannpunkte bzw. für gleich grosse Zusatzlasten auf allen Spannfeldern
III_2 gilt für die geringere Seilspannung des Versuches und unbewegliche Abspannpunkte
III_3 elastisches Nachgeben der Auslegerspitzen berücksichtigt
o gemessene Durchhangszunahmen

ähnlicher Weise wie die Vertikalschwingungen vorausberechnet werden; es können auch aus den in den Fig. 17 und 18 dargestellten Versuchen keine allgemein gültigen Werte abgeleitet werden; diese Versuche weisen aber darauf hin, dass die seitlichen Schwingungen im Spannfeld grösser sind als die seitlichen Bewegungen der Seilaufhängepunkte. Die oben zur Wahrscheinlichkeit von Betriebsstörungen gemachten Bemerkungen gelten sinngemäss auch für die seitlichen Schwingungen plötzlich entlasteter Stromleiter.

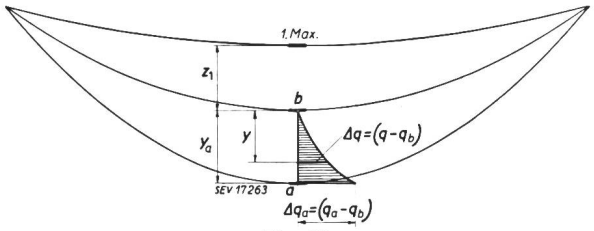

Fig. 23

Arbeit der Zusatzlast an dem 1 m langen Seilstück in der Spannfeldmitte beim Anwachsen der Zusatzlast von q_b auf q_a

Arbeit durch schraffierte Fläche dargestellt

$$A_a = \int_0^{y_a} \triangle q \cdot dy$$

a Stromleiter mit Zusatzlast q_a kg/m
1. Max.: entlasteter Stromleiter in der Höchstlage
($y_a + z_1$) Schnellhöhe
b Ruhelage nach dem Ausklingen der Stromleiterschwingungen; bleibende Zusatzlast = q_b kg/m; Gewicht des entlasteten Seiles (samt Zusatzlast q_b) = G

Der in Fig. 20 dargestellte Versuch war nur eine rohe Nachahmung der wirklichen Verhältnisse mit Zusatzlast und Wind; es ist aber doch zu erwarten,

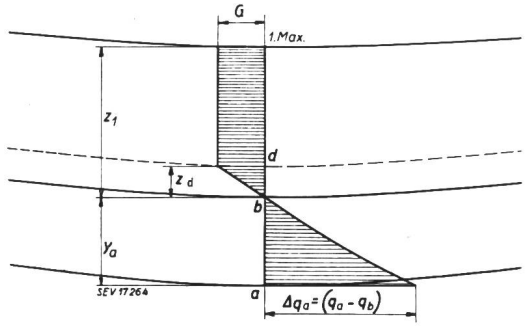

Fig. 24
Ableitung der Schnellhöhe ($y_a + z_1$) für einen an unbeweglichen Punkten abgespannten Stromleiter
a Stromleiter mit Zusatzlast q_a kg/m
1. Max.: entlasteter Stromleiter in der Höchstlage
b Ruhelage nach dem Ausklingen der Stromleiterschwingungen;
bleibende Zusatzlast = q_b kg/m
Gewicht des entlasteten Seiles = G
Oberhalb von *d* Stromleiter spannungslos
(Bei dem in Fig. 9 dargestellten Versuch betrug der Höhenunterschied zwischen b und *d* 0,8 m)
Arbeit der Zusatzlast, durch untere schraffierte Fläche dargestellt:

$$A_a = \int_0^{y_a} \Delta q \cdot dy$$

Arbeit, um das Seil von der Ruhelage *b* in die Höchstlage 1. Max. zu heben, durch die obere schraffierte Fläche dargestellt:

$$A_1 \approx \frac{G}{2} \cdot z_d + G\,(z_1 - z_d) = G\left(z_1 - \frac{z_d}{2}\right)$$

$A_1 = A_a$, daraus Höhe z_1 zu berechnen

dass ein Stromleiter, von dem in seitlich ausgelenkter Lage der Reifansatz plötzlich abfällt, ungefähr so schwingt, wie Fig. 20 darstellt. Beobachtungen über solche Lastabwürfe und deren Folgen sind selten; dem Verfasser ist aber ein Fall bekannt, wo ein hochschnellender Stromleiter das Erdseil berührte, und wo die im Schnee gefundenen Rauhreifwalzen zeigten, dass tatsächlich die Zusatzlast von dem durch den Wind seitlich ausgelenkten Stromleiter abgefallen war.

Praktische Anwendungen der Versuchsergebnisse

Die Bernischen Kraftwerke A.-G. wendeten die aus den Versuchen gewonnenen Erkenntnisse erstmals praktisch an, als sie sich im Jahre 1930 für den Umbau des durch Rauhreif am meisten gefährdeten Abschnittes der 150-kV-Leitung Innertkirchen–Bickigen entschieden [3]). Sie ersetzten dort eine Reihe von Sechsleitermasten durch Gruppen von Zweileitermasten. In den übrigen Abschnitten der Leitung erhöhten sie die Betriebssicherheit grosser Spannfelder durch den Einbau sogenannter Dreieckaufhängungen und von gewöhnlichen und Trapez-Halbabspannungen; bei einigen Masten wurden die mittleren Ausleger verlängert und die Masten entsprechend verstärkt.

Aus den beschriebenen Versuchen wurden — unter Berücksichtigung der Spannweite — die von den belasteten und den infolge von Lastabwurf schwingenden entlasteten Stromleitern «gefährdeten Räume» abgeleitet; in den Annahmen über die Belastung und Entlastung wurde den Reif-, Schnee- und Windverhältnissen der Gegenden Rechnung getragen.

Beim Entwurf der Tragwerke für die 150-kV-Leitung Innertkirchen–Wimmis–Mühleberg [3]) stützten sich die Bernischen Kraftwerke A.-G. auf die Erfahrungen an der 150-kV-Leitung Innertkirchen–Bickigen und auf die Versuche vom Jahre 1930; die Stromleiterabstände wurden gegenüber den früher gebauten 150-kV-Leitungen im allgemeinen vergrössert; bei kleinen Spannweiten wurde die Stromleiteranordnung der 150-kV-Leitung Innertkirchen–Bickigen beibehalten, da die Versuche und die

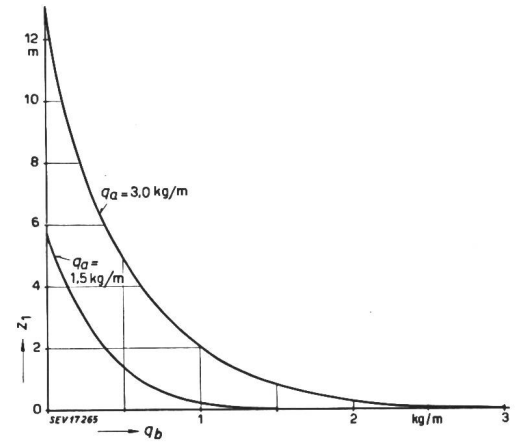

Fig. 25
Ordinaten: z_1 Höchstlage des schwingenden Seiles über der Ruhelage des auf 0...1,5...3 kg/m entlasteten Seiles

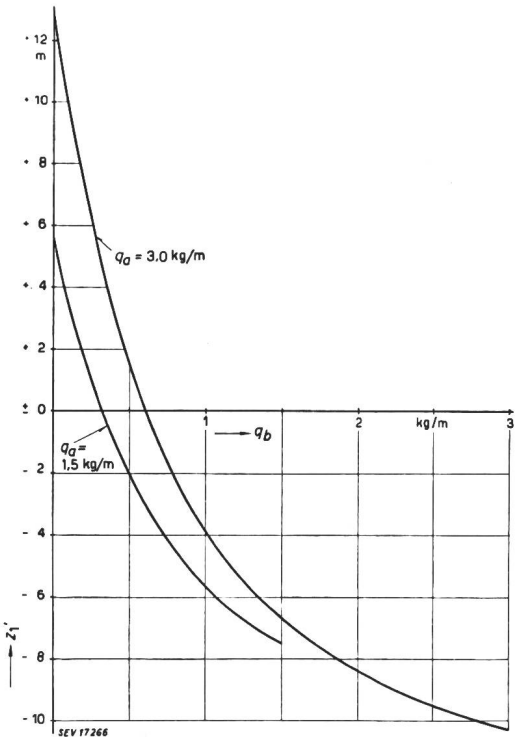

Fig. 26
Ordinaten: z_1' Höchstlage des schwingenden Seiles über der Ruhelage des vollständig leeren Seiles

Fig. 25 und 26
Einfluss der am Seil bleibenden Zusatzlast q_b auf die Schnellhöhe des im Spannfeld *S...T* (a = 342 m) plötzlich entlasteten Stromleiters (170,5 mm² Al + 39,8 mm² St)
bei Hängeisolatorenketten an den Masten S und T
Obere Kurve: anfängliche Zusatzlast im Spannfeld *S...T* q_a = 3,0 kg/m
Untere Kurve: q_a = 1,5 kg/m
Abszisse: am Seil bleibende Zusatzlast q_b

praktischen Erfahrungen eine gute Betriebssicherheit erwarten liessen.

Die in Fig. 28 und 29 dargestellte Stromleiteranordnung der 150-kV-Leitung Innertkirchen–Mühleberg bewährte sich bisher. Wir sind uns aber bewusst, dass unter aussergewöhnlich ungünstigen Verhältnissen auch auf dieser Leitung Störungen auftreten könnten. Nach unserer Ansicht ist es nicht möglich, mit wirtschaftlichen Mitteln eine Hochspannungsleitung derart zu bauen, dass sie auch unter den denkbar ungünstigsten Verhältnissen noch vollkommen betriebssicher ist; in der Praxis müssen die Möglichkeiten und die Wahrscheinlichkeit von Störungen und die Kosten für weitere Erhöhungen der Betriebssicherheit gegeneinander abgewogen werden.

Der Hauptzweck des vorliegenden Artikels war, die wichtigsten Versuche über Stromleiterschwingungen an der 150-kV-Leitung Innertkirchen–Bickigen in Schrift und Bild darzustellen; in dem gesteckten Rahmen wurden die Versuchsergebnisse nur soweit behandelt, wie dies den Ersteller und den Besitzer von Hochspannungsleitungen praktisch besonders interessieren dürfte.

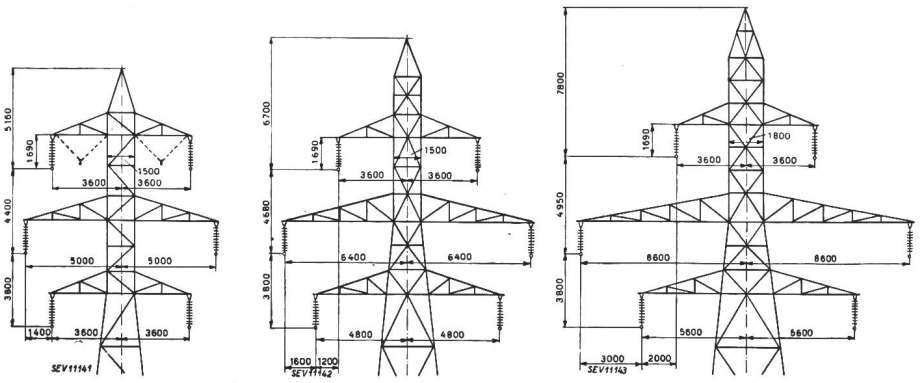

Fig. 27

150-kV-Leitung Innertkirchen—Bickigen
erstellt 1927/28
Gestrichelt Dreieckaufhängung, später bei grossen Spannfeldern angebracht

Fig. 28

150-kV-Leitung Innertkirchen—Mühleberg
erstellt 1942
Tragmasten für Spannweiten bis ca. 300 m

Fig. 29

Innertkirchen—Mühleberg
Tragmasten für grössere Spannweiten

Fig. 27, 28 und 29
Stromleiteranordnungen

Adresse des Autors:
Dr. *H. Oertli*, Ingenieur der Bernischen Kraftwerke A.-G., Bern.

Peroxydbestimmungen während der künstlichen Alterung von Isolierölen mit Kupferkatalyt

Von *M. Zürcher* und *J. Lüder*, Zürich

621.315.615.2.0014

Es wird eine Methode beschrieben, welche eine quantitative Bestimmung der Peroxyde gestattet, die bei der katalytischen Alterung von Mineralölen in Gegenwart von Kupfer entstehen. Die laufende Bestimmung der Peroxydzahlen gestattet die gleichen Rückschlüsse auf die Qualität des Öles, die aus den Beobachtungen über die Reissfestigkeit des Baumwollfadens gefolgert werden, sind jedoch zuverlässiger als diese. Es wird ferner gezeigt, dass durch die Verwendung von Kupfernaphthenat Alterungsreaktionen der gleichen Art wie mit metallischem Kupfer hervorgerufen werden.

Les auteurs décrivent une méthode permettant de déterminer quantitativement les péroxydes qui se forment lors du vieillissement catalytique des huiles minérales en présence de cuivre. Pour se rendre compte de la qualité d'une huile, la détermination continue des indices de péroxyde donne des résultats plus sûrs que l'observation de la résistance à la rupture du fil de coton. D'autre part, les auteurs signalent que l'emploi de naphténate de cuivre conduit à des réactions de vieillissement analogues à celles du cuivre métallique.

Einleitung

Die Alterungserscheinungen an Transformatorenölen, die sich im wesentlichen in der Bildung von Schlamm und in einer Erhöhung der Säurezahl äussern, sind zur Hauptsache die Folge von langsamen Oxydationen, von chemischen Reaktionen, die unter der Einwirkung des Luftsauerstoffs, allenfalls unter Mitwirkung von Katalysatoren verlaufen. Solchen Vorgängen liegt, besonders wenn sie katalytisch beschleunigt werden, ein sehr komplizierter Reaktionsmechanismus zugrunde. Neben dem Auftreten von vielgestaltigen Kondensations- und Polymerisationsreaktionen wird die Übersicht dadurch erschwert, dass die Bindung des Sauerstoffs aus der Luft sehr oft stufenweise verläuft, unter Bildung von unbeständigen Zwischenprodukten, in denen der Sauerstoff intermediär in superoxydartiger Bindung vorliegt. Berücksichtigt man ferner, dass Mineralöle keine einheitlichen Verbindungen sind, sondern aus Mischungen verschiedener Komponenten in variablen Verhältnissen bestehen, so ist es verständlich, dass eine Voraussage über das Verhalten von Ölen während einer betriebsmässigen, langfristigen Alterung nur unter