Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 22 (1931)

Heft: 9

Artikel: Korona-Verlustmessungen an der 150 kV-Übertragungsleitung Innertkirchen-Mühleberg

Autor: Müller, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058579

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: 22.08.2025

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

Korona-Verlustmessungen an der 150 kV-Uebertragungsleitung Innertkirchen-Mühleberg.

Von der *Materialprüfanstalt des SEV* (Ing. P. Müller).

621.3.014.4: 621.315.1.014.4

Der Aufsatz enthält die Resultate von Korona-Verlustmessungen, die mit Hilfe einer etwas modifizierten Schering-Brücke durchgeführt wurden. Die Versuchsresultate zeigen zahlenmässig den Zusammenhang der Korona-Verluste mit den atmosphärischen Verhältnissen sowie den Einfluss verschiedener betriebsmässiger Schaltzustände.

Die Resultate einer Anzahl analoger Versuche, die der amerikanischen Literatur entnommen sind, werden mit näheren Angaben über die Leitungsdaten in einem Diagramm, das direkte Vergleiche mit den Versuchen von Innertkirchen gestattet, zusammengestellt. Ferner wird die mathematische Formulierung der Messergebnisse mittels der Peekschen Gleichungen untersucht.

Cette étude contient les résultats de mesures de pertes par effet corona effectuées au moyen d'un pont de Schering quelque peu modifié. Les résultats des essais montrent par des chiffres le rapport entre les pertes par effet corona et les conditions atmosphériques ainsi que l'influence de différents états de branchement du réseau.

L'auteur groupe ensuite les résultats d'un certain nombre d'essais analogues cités par les périodiques américains en un diagramme, tout en donnant des indications plus précises sur les puissances en jeu. Ce diagramme permet une comparaison directe avec les mesures effectuées à Innertkirchen. Suit une étude mathématique des résultats des mesures à l'aide des équations de Peek.

I. Allgemeines über Korona-Untersuchungen.

Mit dem Entwurf und dem Betrieb von Höchstspannungsfreileitungen ist das Bedürfnis nach quantitativer Erfassung des Korona-Effektes stark gewachsen. Die Schwierigkeit, genaue Leistungsmessungen bei grossen Phasenverschiebungen und hohen Spannungen durchzuführen — die leerlaufende Hochspannungsleitung arbeitet mit einem mittleren Leistungsfaktor von 2 bis 10 % — hat mannigfache Wege für die Anordnung der Messapparatur gewiesen. Die amerikanischen Untersuchungen, welche in Fig. 1 mit Angabe der wichtigsten Daten zusammengestellt sind, wurden stets mit Wattmetern durchgeführt. Neuere Untersuchungen in Deutschland, über welche jedoch unseres Wissens noch keine Veröffentlichungen vorliegen, abgesehen von einer kurzen Notiz im Archiv für Elektrotechnik [1]), benützten Kompensationsmethoden mit Dynamometern als Nullinstrumente. In diesem Zusammenhange sei noch auf eine interessante Feststellung von Carroll im J.A.I.E.E. 1930 [1]) hingewiesen (Kurven VII und VIII).

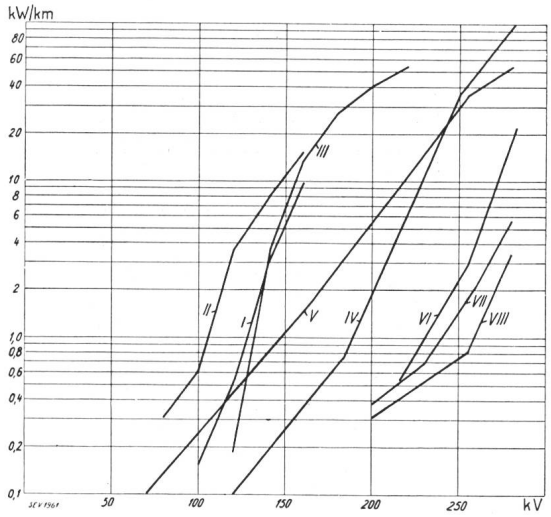

Fig. 1.
Koronaverlustmessungen an Dreiphasen-Freileitungen. Verluste in kW/km Leitungslänge in Funktion der verketteten Betriebsspannung.

Kurve I, II und III *Junktion Dam-Grand Rapids:*
Cu-Seile zu je 7 Drähten, Aussenradius $r_a = 0{,}48$ cm, vertikale Anordnung, Leiterabstand 365 cm, Leitungslänge 163 km, mittlerer Erdabstand des untersten Seiles 10 m, 10 Isolatoren, Betriebsspannung verk. 140 kV, Frequenz 30 p/s.

Kurve	Test	Barometerstand mm Hg	Temperatur °C	Relat. Feuchtigkeit %	Witterung
I	10	745	7	91,4	schön
II	15	747	6	94,4	Regen
III	42	750	5	93,6	bewölkt

Kurve IV und V *Pit-Vaca:*
Cu-Kabel zu 49 Drähten zu 2,56 mm ∅, $r_a = 1{,}19$ cm, je 7 Drähte zu einem Seil vereinigt. Betriebsspannung 220 kV, Erdabstand minimal 9 m, Frequenz 60 p/s.
Kurve IV: Vertikale Anordnung, Leiterabstand 450 cm, 712 mm Hg. 11° C, Witterung schön.
Kurve V: Horizontale Anordnung, Leiterabstand 450 cm, 712 mm Hg. 11° C. Witterung schön.

Kurve VI *Big-Creek:*
Stahl-Al-Kabel, $r_a = 1{,}22$ cm, horizontale Anordnung, Leiterabstand 520 cm, Erdabstand 7,6 bis 9,0 m, Betriebsspannung 220 kV, Frequenz 60 p/s. 720 mm Hg, 11° C. Witterung trocken.

Kurve VII und VIII *Carrolls Versuchsleitung:*
Stahl-Al-Kabel, $r_a = 2{,}54$ cm, horizontale Anordnung, Leiterabstand 610 cm, Erdabstand 7,5 m. Frequenz 60 p/s.
Kurve VII: Ungebrauchte Kabel. 765 mm Hg, 21° C. Relative Feuchtigkeit 36,5 %.
Kurve VIII: Dasselbe gewaschen. 760 mm Hg, 17,5° C. Relative Feuchtigkeit 35 %.

Es zeigt sich nämlich, dass bei Hochspannungsleitungen bei der ersten Inbetriebsetzung schon relativ niedere Spannungen zahlreiche Glimmpunkte an den Seilen entstehen lassen, die jedoch eigentümlicherweise nach einigen Betriebsmonaten verschwinden, so dass man also auch bei Leitungen von einem allmählichen «Einlaufen» sprechen kann. Der erwähnte Autor weist nach, dass die von der Fabrikation der Seile herrührende Fettschicht, die im Betriebe allmählich durch Regen entfernt wird, Ursache dieser Erscheinung ist. Durch sorgfältiges Waschen der Versuchsleitung konnte jeweils eine wesentliche Reduktion der Glimmverluste erreicht werden.

II. Versuchsanordnung.

Die speziellen Verhältnisse der Freiluftanlage Innertkirchen, Speisepunkt der 150-kV-Leitung Innertkirchen-Mühleberg, deren Untersuchung bezüglich Korona-Verluste die Technischen Prüfanstalten des SEV im Auftrage der Bernischen Kraftwerke A.-G. und Kraftwerke Oberhasli A.-G. durchführen konnten, beschränkten in bedeutendem Masse die zur Untersuchung anwendbaren Schaltmöglichkeiten. Das generelle Schema der Anlage zeigt Fig. 2.

Der erste Versuch, unter Verwendung eines der betriebsmässigen Hochspannungsmesskasten, enthaltend einen Dreiphasenspannungswandler und 3

[1]) Siehe Literatur am Schlusse der Arbeit.

Schleifenstromwandler, und eines astasierten Wattmeters ergab wegen der Kleinheit der Verluste keine brauchbaren Resultate. Ausserdem betrugen die Winkelfehler der Stromwandler ca. 50 min und bedingten somit allein schon grosse Korrekturen. Es blieb, da 150-kV-Stromwandler mit kleinern Winkelfehlern nicht vorhanden waren und eine Messung auf der Unterspannungsseite der 50/150 kV-Drehstromtransformatoren und nachträgliche Berücksichtigung der Verluste derselben zu ungenau erschien, einzig die Durchführung der Versuche direkt auf der 150 kV-Seite übrig. Die Analyse der

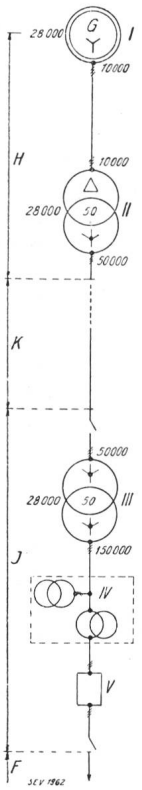

Fig. 2.
Generelles Schema.

H Kraftwerk Handeck.
I Generatoren 3~50, 28000 kVA, 10000 V
II Transformatoren 3~50, 28000 kVA, 10/50 kV.
K Kabel- resp. Freileitung Handeck-Innertkirchen.
J Unterwerk Innertkirchen.
III Transformatoren 3~50, 28000 kVA, 50/150 kV.
IV Betriebsmässig eingebauter Messkasten.
V Scheringbrücke.
F Freileitung nach Bickigen-Mühleberg.

Spannungs- und Stromkurven, die bei verschiedenen Spannungen oszillographisch aufgenommen worden waren, ergab eine derart unbedeutende Grösse der Oberwellen (Fig. 3), dass eine Brückenmessung mit Vibrationsgalvanometer, das bekanntlich praktisch nur die Grundwelle misst, sich geradezu aufdrängte.

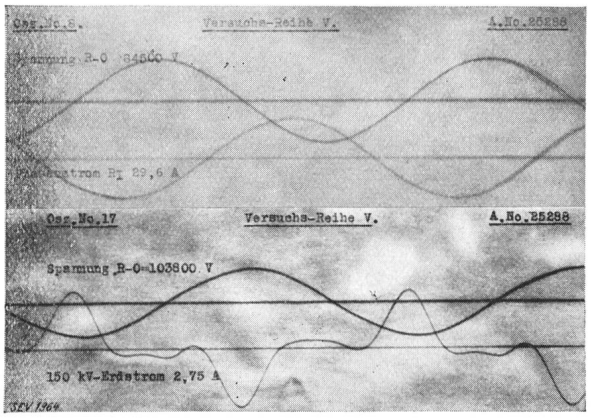

Fig. 3.
150 kV Freileitung Innertkirchen-Mühleberg.
Sternpunkt in Innertkirchen über Stromwandler geerdet.
Oben: 1 mm = 22,2 kV, resp. 8,2 A
Unten; 1 mm = 35 kV, resp. 1,02 A
Analyse des Erdstromes bei 103,8 kV Phasenspannung.
Grundwelle 100 %
3. Harmonische 30,6 % 7. Harmonische 3,4 %
5. Harmonische 3,5 % 9. Harmonische 6,6 %

Es gelangte eine nach Fig. 4 modifizierte Schering-Brücke, die in einen Faraday-Käfig eingebaut wurde, zur Verwendung. Der Gedanke, mittels

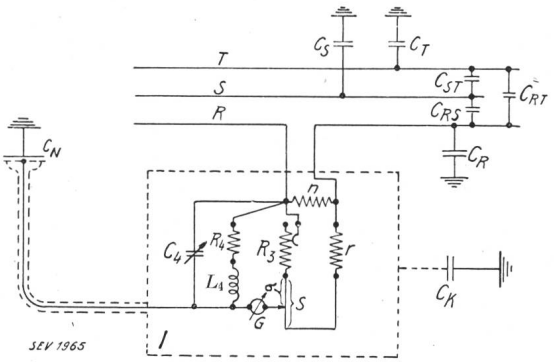

Fig. 4.
Schema der Messbrücke.

C_R, C_S, C_T	Erdkapazitäten der Seile.
C_{RS}, C_{ST}, C_{RT}	gegenseitige Kapazitäten der Leiter.
C_K	Erdkapazität des Käfigs (geht nicht in die Messung ein).
C_N	abgeschirmter Normalkondensator.
L_4	Selbstinduktionsnormal v. 0,1 H u. 20,7 Ohm
C_4	Regulierbarer Kondensator.
R_4	Widerstand $\frac{1000}{\pi}$ Ohm.
n	Widerstandsnormal 0,6 Ohm.
$n + r + S =$	100 Ohm.
R_3	Regulierbarer Widerstand.
I	Faraday-Käfig.

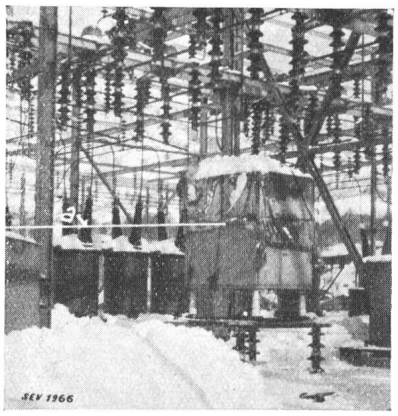

Fig. 5.
Faraday-Käfig,
installiert in der Freiluftanlage Innertkirchen.
a = abgeschirmte Leitung zum Pressgaskondensator.

einer Messbrücke unter Hochspannung zu messen, wurde erstmals von Dr. Bormann und Seiler praktisch ausgeführt [1]) und hat sich seither in der Kabelmesstechnik Eingang verschafft. Der Faraday-Käfig (Fig. 5) und, bei den Messungen am 15. Februar 1931, auch der Pressgaskondensator, wurden in sehr zuvorkommender Weise von der Firma Kabelwerke Brugg A.-G. zur Verfügung gestellt.

Bei Gleichgewicht der Brücke gelten folgende Gleichungen:

a) Induktivität L_4 mit Widerstand r_4 überbrückt (normale Schering-Brücke)

Betriebskapazität $C = C_N \cdot R_4 \dfrac{100 + R_3}{n\,(R_3 + \sigma)}$

Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg}\,(90^0 - \varphi)$
$\sim \sin \varphi = R_4\, \omega\, C_4.$

b) Induktivität nicht überbrückt

Betriebskapazität $C = C_N (R_4 + r_4) \frac{100 + R_3}{n (R_3 + \sigma)}$.

Verlustfaktor

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{-\omega L_4}{R_4 + r_4} \cdot (1 - \omega^2 L_4 C_4) + \omega (R_4 + r_4) C_4.$$

Die Verluste jeder Phase lassen sich so einzeln und durch Summation der Phasenverluste die Gesamtverluste bestimmen nach der Gleichung:

$$P = \sum U^2_{\text{Phase}} \cdot \omega C \operatorname{tg} \delta.$$

Die Messung ergibt durch den Tangens des Verlustwinkels, um einen Ausdruck aus der Kondensatoren- und Kabelmesstechnik auf Freileitungen zu übertragen, ein klares Bild über die Ionisierungsverhältnisse. Auch bei gleichen Verlusten jedes Leiters sind die Leistungsfaktoren der drei Phasen ungleich infolge der stets vorhandenen Unsymmetrie des Spannungsdreieckes, vor allem aber infolge der gegenseitigen Kapazität der Leiter. Das Diagramm Fig. 6, das diese Verhältnisse klarlegt, ist der besseren Uebersicht halber für eine verlustlose Drehstromleitung gezeichnet worden.

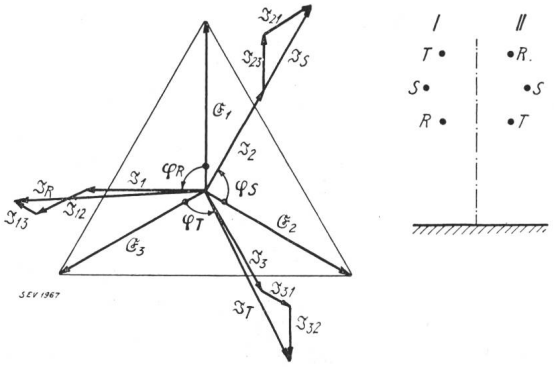

Fig. 6.
Diagramm der leerlaufenden Leitung.
Strang I. Rechts: Schema des Mastbildes.
$\mathfrak{E}_1$ $\mathfrak{E}_2$ $\mathfrak{E}_3$ Phasenspannungen.
$\mathfrak{J}_R$ $\mathfrak{J}_S$ $\mathfrak{J}_T$ Leiterströme; diese setzen sich zusammen aus den Teilströmen $\mathfrak{J}_1$, $\mathfrak{J}_{12}$ und $\mathfrak{J}_{13}$ etc. Phasenspannnng und Leiterstrom sind gegeneinander verschoben, und zwar um mehr als 90° in Phase *R*, um 90° in Phase *S* und um weniger als 90° in Phase *T*.

Durch die Art der beschriebenen Messeinrichtung ist es allerdings nicht möglich, gleichzeitig die Messungen der drei Phasen der Uebertragungsleitung durchzuführen. Es können, wenn sich die Verhältnisse während der Dauer einer Messreihe stark ändern, Fehler auftreten. Durch gute Organisation der nötigen Umschaltungen konnte bei den Versuchen in Innertkirchen eine Messreihe im ungünstigsten Falle innerhalb von drei Stunden, meist jedoch in weniger als 1½ Stunden aufgenommen werden.

III. Daten der Uebertragungsleitung.

Die zu den Versuchen benützte Leitung Innertkirchen—Mühleberg zieht sich von Innertkirchen (630 m ü. M.) gegen den Brünigpass, erreicht am Kringen (1920 m) ihre grösste Höhe und fällt allmählich, den Abhängen des Emmentales folgend, bis Bickigen (538 m), um über Pieterlen (447 m) die Freiluftstation Mühleberg (447 m) der Bernischen Kraftwerke wenige 100 m unterhalb des Kraftwerkes Mühleberg an der Aare zu erreichen; die totale Leitungslänge beträgt 124,1 km. Zu den Messungen im Februar 1931 konnte aus betriebstechnischen Gründen nur das Leitungsstück Innertkirchen—Bickigen mit einer Leitungslänge von 73,3 km freigemacht werden. Die Leiter- und Erdabstände sind aus dem schematischen Mastbilde (Fig. 7) ersichtlich. Die Leiter der beiden Stränge sind Stahl-Aluminiumseile von 18,85 mm Aussendurchmesser. Das Erdseil weist einen Durchmesser von 8,8 mm auf; die äussere Lage besteht bei diesem aus 6 Drähten von 2,69 mm Durchmesser, bei jenem aus 18 Drähten von 2,69 mm Durchmesser.

Die Leitungsreaktanz wurde zu 52 Ohm/Phase, der Wirkwiderstand zu ca. 20,8 Ohm/Phase bei einer Leitungslänge von 124,1 km und 50 p/s gemessen. Die Seile sind bei den normalen Masten an 9-, bei den Winkel- und Abspannmasten an 10-gliedrigen Isolatorenketten der Type Ohio Brass 25 620 oder Langenthal gleicher Dimension aufgehängt. Die mittleren Mastabstände betragen 230 bis 310 m, je nach den Geländeverhältnissen.

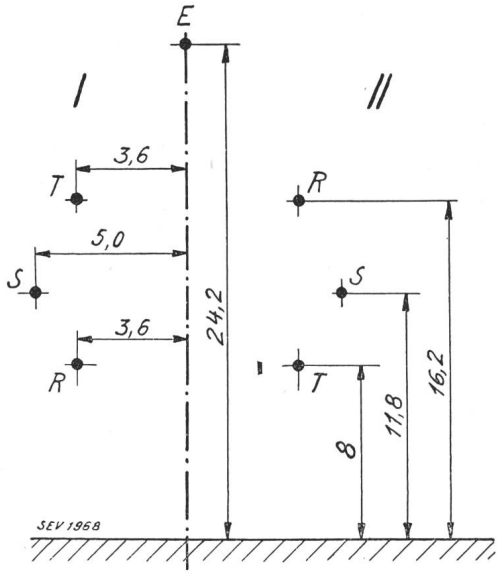

Fig. 7.
Mastbild an Leitung Innertkirchen-Bickigen-Mühleberg.
I Strang I. *II* Strang II. *E* Endseil.
Alle Masse sind in m.

Die Leitung wurde im Winter 1928 zunächst mit reduzierter Spannung von 80 kV verkettet in Betrieb genommen und war vorgängig den Messungen bereits seit September 1929, also während eines Jahres, mit ca. 140 kV betrieben worden.

IV. Messresultate.

Aus dem Wunsche, zahlenmässige Angaben nicht nur bezüglich der Verluste während irgend eines Betriebstages, sondern eine Uebersicht über das Verhalten der Leitung unter verschiedenen Witterungseinflüssen zu gewinnen, nahmen die

Auftraggeber Messungen unter verschiedenen Witterungsverhältnissen in Aussicht. Die beiden ersten Messungen, über die hier berichtet wird, wurden am 21. September 1930 und 15. Februar 1931 durchgeführt; die Resultate der weiteren Untersuchungen sollen später an dieser Stelle ebenfalls bekanntgegeben werden.

Bei der Auswertung der Messresultate sind die Ohmschen Verluste in den Leitungen berücksichtigt worden. Die Spannungserhöhung über die leerlaufende Leitung ist nur gering, kleiner als 1 %. Die Annahme linearer Stromabnahme vom Speisepunkt an gerechnet wird also genügend genaue Werte der Ohmschen Verluste ergeben. Es ist

$$P_{Cu} = 3 \int_{l=o}^{l=L} I_0^2 \left(1 - \frac{l}{L}\right)^2 \cdot \frac{R}{L} \cdot dl = I_0^2 \cdot R_{Phase}$$

(worin L die einfache Leitungslänge bedeutet) und wegen der nur unbedeutenden Spannungserhöhung kann gesetzt werden:

$$\text{Korona-Verluste pro km} = \frac{\text{Totalverluste} - \text{Ohmsche Verluste}}{\text{Leitungs-km}},$$

in Abhängigkeit von der Speisespannung.

Die erste Versuchsreihe, deren Werte nach obigen Annahmen aus den Messresultaten umgerechnet in Fig. 8 dargestellt sind, wurde am 21. September 1930 aufgenommen. Während des den Messungen vorausgehenden Tages setzte in Innertkirchen um die Mittagszeit als Abschluss einer Föhnperiode von wenigen Tagen ein Regen ein, der mit kurzen Unterbrüchen bis in die Nacht andauerte; längs der Leitung dürften ähnliche Verhältnisse geherrscht haben. Am Messtag selbst hatte der Regen aufgehört. Die Wolkenschicht zog sich bis auf eine Höhe von ca. 1500 m hinunter, um etwa von 10 Uhr an einer allmählichen Aufhellung zu weichen. Im Verlaufe des Nachmittags nahm die Bewölkung wieder zu und gegen 5 Uhr abends herrschten etwa dieselben Verhältnisse wie am frühen Vormittag.

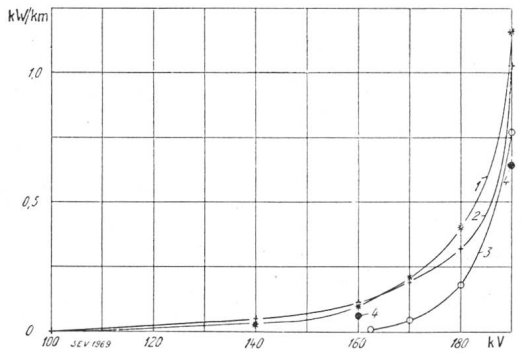

Fig. 8.
Koronaverluste in kW/km in Funktion der verketteten Spannung an der Freileitung Innertkirchen-Bickigen.

Barometerstand: Innertkirchen ca. 709,5 mm
Mühleberg 724,0 bis 725,6 mm
Temperatur: Innertkirchen 13 bis 16° C
Mühleberg 11 bis 13,5° C
Relative Feuchtigkeit: Innertkirchen (Meiringen) 40 bis 55 %
Witterung: Wechselnd bewölkt, ohne Niederschläge.
Versuch 1 * Kurve. Messung an Strang II, Strang I isoliert, Sternpunkt geerdet
Versuch 2 + Kurve. Messung an Strang I, Strang II isoliert, Sternpunkt geerdet
Versuch 3 O Kurve. Messung an Strang II, Strang I geerdet, Sternpunkt geerdet
Versuch 4 ● Punkte. Messung an Strang I, Strang I geerdet, Sternpunkt isoliert

Zusammenstellung der Witterungscharakteristika während der ersten Versuchsreihe (21. IX. 1930).

Tabelle I.

Versuch No.	Tageszeit	Innertkirchen Temperatur °C	Innertkirchen Barometerstand mm (Meiringen)	Innertkirchen Rel. Feuchtigkeit % (Meiringen)	Mühleberg Barometerstand mm	Mühleberg Temperatur °C
	6	—	709,5	40	—	—
	7	—	709,7	45	—	—
	8	—	709,8	50	724,0	11
	9	—	709,9	53	724,2	11
1 und 2	10	13,2	709,8	55	724,2	13
Anfang 09.51	11	13,7	709,8	53	724,3	13
Ende 13.22	12	15,5	709,5	49	724,3	13
	13	16,5	709,1	43	724,5	13,5
	14	—	709,0	37	724,6	13,5
3						
Anfang 15.00	15	15,2	709,0	36	724,8	12
Ende 16.55	16	14,6	709,1	38	725,0	12
4						
Anfang 16.55	17	14,5	709,4	39	725,5	12
Ende 17.56	18	13,0	709,9	41	725,6	11

Die zweite Versuchsserie vom 15. Februar 1931 wurde bei winterlichen Verhältnissen aufgenommen. Am Tage vor der Messung fiel längs der ganzen Leitung, die in diesem Falle nur eine Länge

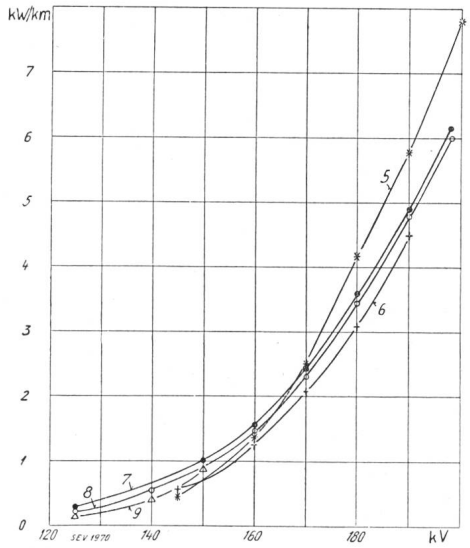

Fig. 9.
Koronaverluste in kV/km in Funktion der verketteten Spannung an der Freileitung Innertkirchen-Bickigen.

Barometerstand: Innertkirchen 702 bis 701 mm
Temperatur: Innertkirchen − 2 bis + 2° C
Witterung: Innertkirchen und Brünig intermittierend Schneefall; Bickigen ohne Schneefall.
Versuch 5 * Kurve. Messung an Strang I, Strang II isoliert, Sternpunkt geerdet
Versuch 6 + Kurve. Messung an Strang I, Strang II isoliert, Sternpunkt isoliert
Versuch 7 ● Kurve. Messung an Strang I, Strang II geerdet, Sternpunkt geerdet
Versuch 8 O Kurve, Messung an Strang I, Strang II isoliert, Sternpunkt geerdet
Versuch 9 △ Kurve. Parallelschaltung beider Stränge, Sternpunkt geerdet

von 73,3 km aufwies, Schnee; am Messtage hörte der Schneefall bei Beginn der Versuche allmählich auf, setzte jedoch am Nachmittag auf einer Teilstrecke erneut ein. Um den Einfluss der ziemlich langen Dauer einer Messreihe auf die Genauigkeit abzuklären, wurde der Hauptversuch zweimal durchgeführt (Fig. 9).

Zusammenstellung der Witterungscharakteristika während der zweiten Versuchsreihe (15. II. 1931).

Tabelle II.

Versuch No.	Zeit	Innertkirchen Temperatur °C	Innertkirchen Barometerstand mm	Bickigen
5 und 6 Anfang 09.56 Ende 13.19	10	— 3	702,0	ohne Schneefälle am Messtage Wetter klar
	11	— 1	—	
	12	+ 2	701,5	
	13	+ 1,5	—	
7 und 8 Anfang 13.30 Ende 15.10	14	+ 1	—	
	15	0	701,2	
9 Anfang 15.30 Ende 16.10	16	0	701,0	

Beim Vergleich der Resultate aus beiden Messungen fällt zunächst ausser der sehr beträchtlichen Abhängigkeit der Korona- und Ableitungsverluste von den atmosphärischen Verhältnissen auch eine Veränderlichkeit während der Dauer eines Tages auf. Einige Autoren haben Kurven über Variationen der Verluste während einiger Sekunden oder weniger Minuten angegeben; solche kurzzeitige Veränderungen wurden bei unseren Versuchen zwar auch beobachtet, konnten aber bei der Brükkenmessung nicht erfasst werden; man musste jeweils Konstanz der Verhältnisse abwarten, um vollständig kompensieren zu können.

Die Erdung des Hochspannungssternpunktes in Innertkirchen hatte, wie dies aus den zwei Messpunkten des Versuches 4, ganz deutlich aber aus der Kurve 8 hervorgeht, einen Einfluss auf die Grösse der Korona-Verluste. Bei geerdetem Sternpunkt, also einem absolut starren System, sind diese stets höher als bei isoliertem Nullpunkt.

Aus dem Verlauf des Verlustfaktors $tg\,\delta$, der in Fig. 10 für zwei charakteristische Fälle aufgezeichnet ist, lässt sich der Ionisierungspunkt ohne Schwierigkeit ziemlich genau bestimmen. Entgegen der schon öfters vertretenen Ansicht, die mittlere Phase, d. h. Phase *S*, hätte die niederste Glimmspannung, ergeben die Kurven fast völlige Uebereinstimmung der Ionisationsspannungen der drei Leitungen. Die *Verluste* allerdings sind in der mittleren Phase stets am grössten, wenn die kritische Spannung überschritten ist. Hierbei wird vorausgesetzt, dass das Spannungsdreieck bei Aenderung der Speisespannung winkelgetreu bleibt. Diese Bedingung ist, die Kontrolle mit Voltmetern bestätigte es, praktisch erfüllt. Ein Einfluss der Spannung auf die Betriebskapazität, also jener Kapazität, welche in der Messbrücke ermittelt wird, ist nur in geringem Masse vorhanden (Tabelle III).

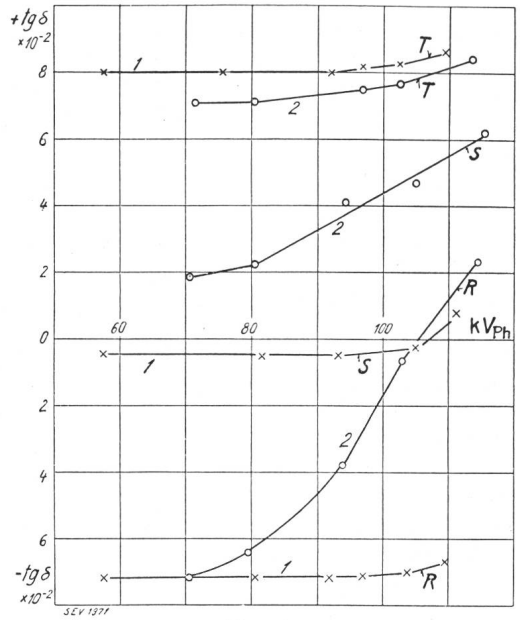

Fig. 10.
Verlustfaktorkurven, inkl. Ohmsche Verluste in Funktion der Phasenspannung.
Kurve 1 × Versuch 3, Messung an Strang II, Strang I geerdet, 21. IX. 30.
Kurve 2 O Versuch 7, Messung an Strang I, Strang II geerdet. 15. II. 31.

Kapazität in μF in Funktion der Spannung.

Tabelle III.

Versuch No.	Spannungen 140 kV R	140 kV S	140 kV T	190 kV R	190 kV S	190 kV T	200 kV R	200 kV S	200 kV T
1	1,108	1,164	1,097	1,108	1,164	1,094	—	—	—
2	1,082	1,169	1,122	1,084	1,169	1,122	—	—	—
3	1,087	1,163	1,122	1,087	1,160	1,122	—	—	—
4	1,093	1,141	1,132	1,093	1,139	1,132	—	—	—
5	0,638	0,673	0,632	0,653	0,676	0,636	0,659	0,678	0,638
6	0,645	0,658	0,636	0,658	0,663	0,636	—	—	—
7	0,641	0,666	0,633	—	—	—	0,660	0,672	0,635
8	0,640	0,672	0,633	—	—	—	0,658	0,678	0,633
9	1,310	1,345	1,317	—	—	—	—	—	—

V. Die Peekschen Formeln zur Bestimmung der Korona-Verluste.

Auf Grund umfangreicher Untersuchungen hat Peek zwei empirische Formeln zur Berechnung von Korona-Verlusten angegeben, welche hier zunächst kurz erläutert werden sollen, um hernach die Möglichkeit der mathematischen Erfassung der Leitungsverluste auf der von uns geprüften 150-kV-Leitung zu untersuchen.

Steigert man die zwischen zwei parallelen Leitern angelegte Spannung über einen bestimmten kritischen Wert U_0, so treten, falls die Drähte vollständig homogene Oberfläche besitzen, mit dem Einsetzen der Stossionisation (Glimmerscheinungen) Verluste auf, nach dem Gesetze

$$P = c^2\,(U - U_0)^2$$

c^2 bedeutet darin eine Konstante, U_0 die kritische Spannung und U die Spannung zwischen den Lei-

tern. Die Spannung U_0 ist bei 760 mm Barometerstand und einer Temperatur von 25° C durch den Gradienten 30 kV_{max}/cm an der Leiteroberfläche gegeben.

Bei den Seilen, wie sie in Hochspannungsfreileitungen gewöhnlich verwendet werden, hat die angegebene Gleichung ebenfalls Gültigkeit, doch ist hier die kritische Spannung U_0 nicht mehr durch den Spannungsgradienten von 30 kV_{max}/cm bestimmt, sondern liegt um ca. 15 bis 20 % tiefer. Ausserdem hat die Gleichung nur Gültigkeit oberhalb der theoretischen Glimmspannung (Gradient 30 kV_{max}/cm); unterhalb der Spannung U_0 folgt die Verlustkurve der Gleichung

$$P = q \cdot \varepsilon^{-h\,(U_0 - U)^2}$$

(ε = Basis der natürlichen Logarithmen, q und h = Konstanten) und zwischen U_0 und der theoretischen Glimmspannung sind die Verluste durch die Summe der aus beiden obigen Gleichungen erhaltenen Werte bestimmt.

Vernachlässigt man bei der Untersuchung unserer Messresultate zunächst den Einfluss der Luftdichte, so ergeben sich folgende Werte:

Theoretische Glimmspannung der Leitung:

$$U_{0\,eff} = \frac{30{,}0}{\sqrt{2}} \cdot 2\, r_a \ln \left[\frac{a}{r}\right]$$

damit wird $U_{0\,eff} = 242\ kV_{verk.}$

r_a = Leiteraussenradius = 1,88 cm
a = Leiterabstand = 405 cm

Kritische Spannung unter Annahme eines Ungleichmässigkeitsfaktors M_0 von 0,83

$$U_{0\,eff} = 0{,}83 \cdot 242 = 201\ kV.$$

Aus den Versuchen 1 bis 3 hingegen resultiert eine kritische Spannung U_0 von 173 kV . Dieser Unterschied ist sehr wahrscheinlich durch den Einfluss von Lufttemperatur und Barometerstand in den Höhenlagen des Leitungstracés bedingt; unter der Annahme eines Barometerstandes von 600 mm und einer Temperatur von 10° C ergibt sich hierfür ein Korrektionsfaktor von

$$\frac{600}{760} \cdot \frac{273 + 25}{273 + 10} = 0{,}83$$

und damit eine Reduktion der kritischen Spannung auf 201 · 0,83 = 167 kV, sowie der theoretischen Glimmspannung auf 242 · 0,83 = 201 kV.

Unsere Untersuchungen fanden also in jenem Beanspruchungsgebiet statt, wo das zweite Peeksche Gesetz Gültigkeit hat. Aber die Messresultate sowohl des ersten als auch ganz besonders diejenigen der Versuche 5 bis 8 lassen sich mit der Formel nicht in Uebereinstimmung bringen. Es wäre wohl möglich, für die aufgenommenen Kurven 1 bis 9 mathematische Formulierungen zu finden, aber diese hätten infolge der grossen Veränderungen der Absolutwerte der Verluste sicher nur akademischen Wert.

Der Hauptgrund, weshalb die an Versuchsleitungen kurzer Länge gewonnenen Gleichungen hier versagen, scheint uns in der Variation der atmosphärischen Einflüsse längs der Leitung zu liegen.

Literatur.

F. W. Peek, Dielectric Phenomena in High Voltage Engeneering, 2. Ausgabe, 1920.

Arnold Roth, Hochspannungstechnik, 1927.

W. W. Lewis, Some Transmission Line Tests, J. A. I. E. E. 1921, S. 492.

Roy Wilkins, Corona Loss Tests on the 202 Mile 60 Cycle 220 kV Pit-Vaca Transmission Line of the Pacific Gas & Electric Company, J. A. I. E. E. 1924, S. 1109.

Wood, 220 kV Transmission Big Creek, J. A. I. E. E. 1922, S. 471.

Carroll, Brown & Dinapoli, Corona Loss Measurements on an 220 kV, 60 Cycle Three Phase Experimental Line, J. A. I. E. E. 1930, S. 987.

Dr. E. Bormann, Dielektrische Verlustmessungen an Drehstromkabeln bei betriebsmässiger Beanspruchung, VDE-Fachbericht-Sonderheft 1928 und ETZ 1928, S. 238.

W. Spielhagen, Messung kleiner Wechselstromleistungen bei grossen Phasenverschiebungen, Archiv f. Elektrotechnik, Bd. XXIII, Mai 1930.

Einfluss von Korona-Erscheinungen auf Freileitungsdrähte.

Von Prof. Dr. *v. Zeerleder*,
Versuchsabteilung der Aluminium-Industrie A.-G. Neuhausen (AIAG).

621.3.014.4 : 621.315.1.014.4

Auf Grund von theoretischen Erörterungen, Erfahrungen und Versuchen wird gezeigt, dass sich Freileitungsdrähte aus Aluminium und Aluminiumlegierungen (z. B. Aldrey) gegenüber den Wirkungen des Korona-Effektes mindestens ebenso günstig verhalten wie Kupferleiter. Die angeführten Versuche wurden zum Teil von der AIAG ausgeführt, zum Teil durch die Materialprüfanstalt des SEV.

Se basant sur des considérations théoriques, des expériences et des essais, l'auteur montre que les conducteurs de lignes aériennes en aluminium ou en alliage d'aluminium (par exemple Aldrey) se comportent tout au moins aussi favorablement que les conducteurs en cuivre vis-à-vis de l'effet corona. Les essais mentionnés ont été exécutés en partie par l'AIAG elle-même et en partie par la station d'essai des matériaux de l'ASE.

Hochspannungsleitungen werden nach Möglichkeit so konstruiert, dass die spannungsführenden Teile nicht glimmen, dass also keine Korona-Erscheinungen zu erwarten sind. Diese sind unerwünscht, da sie einen nicht unwesentlichen Effektverlust darstellen (Strahlungsverluste) und da sie Störungen in Telephon- und Radioanlagen verursachen. Ferner begünstigen sie die Einleitung von Ueberschlägen, da sie die umgebende Luft ionisieren. Sie sind von verschiedenen Autoren besonders für Freileitungen aus Aluminium als gefährlich bezeichnet worden.