Versuchsanlage für die Messung der Korona-Verluste von Höchstspannungsleitern unter willkürlich erzeugbaren oder natürlichen klimatischen Verhältnissen

Bericht an die Forschungkommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH)

(*E. Seylaz* und *K. Berger*)

Sonder-Abdruck
aus dem Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Jahrgang 1952, Nr. 14

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

Sonder-Abdruck aus dem Bulletin des SEV, Jahrgang 1952, Nr. 14

Versuchsanlage für die Messung der Korona-Verluste von Höchstspannungsleitern unter willkürlich erzeugbaren oder natürlichen klimatischen Verhältnissen

Bericht an die Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH), von *E. Seylaz*, Gösgen, und *K. Berger*, Zürich

621.3.015.532.0014

Es wird eine Messeinrichtung beschrieben, welche die Messung der Koronaverluste an Hochspannungsseilen bei künstlich hergestelltem Klima in einem Kessel von rund 14 m Länge und 3 m Durchmesser und bei Wechselspannungen bis 300 kV gegen Erde erlaubt. Die Einrichtungen zur Klimatisierung der Luft im Messgefäss, sowie die Einrichtungen für die Verlustmessung werden beschrieben und einige an einem Seilmuster gemessene Resultate erwähnt.

Les auteurs décrivent une installation permettant la mesure, sous conditions climatiques artificiellement imposées dans une nasse de 14 m de long et 3 m de diamètre, et sous tension maximum de 300 kV contre terre, des pertes par effet de couronne qui apparaissent sur les conducteurs de lignes à haute tension. L'installation de climatisation de l'air dans l'enceinte et les montages de mesure des pertes y sont décrits et complétés par quelques résultats d'essais d'un échantillon de corde.

Einleitung

Die enormen Mengen elektrischer Energie, die in immer steigendem Masse über grosse Distanzen transportiert werden müssen, führen zum Bau von Übertragungsanlagen mit sehr hohen Spannungen. Mit der Verwendung immer höherer Übertragungsspannungen wird die gründliche Erforschung des Wesens und der Grösse der dabei auftretenden Glimm- oder Koronaverluste immer wichtiger. Diese Verluste hängen in starkem Masse von Dimension und Konstruktion der Leiter und ihrer Anordnung, von den veränderlichen klimatischen Verhältnissen und von der Topographie des Leitungstracés ab. Die Messung der Koronaverluste an einem im Freien montierten Versuchsseilstück unter den verschiedenen natürlichen Wetterbedingungen verlangt sehr viel Zeit; zudem erweist sich der Vergleich der so erhaltenen Werte für Leiter mit verschiedenen Durchmessern und verschiedener Konstruktion als schwierig, da die klimatischen Verhältnisse im Freien selten genau die gleichen sind. Im Gegensatz dazu hat die Methode der Verlustmessung in einer künstlich klimatisierten Atmosphäre den grossen Vorteil, jederzeit Messungen bei genau definierten meteorologischen Verhältnissen zu ermöglichen. Damit wird es erst möglich, die einzelnen Resultate einwandfrei zu vergleichen. Es ist zu erwarten, dass man auf diese Weise am schnellsten zu einwandfreien Ergebnissen bezüglich der Wahl von Höchstspannungsseilen gelangt.

Aus diesem Grunde haben sich die in der Korona-Gruppe der Forschungskommission für Hochspannungsfragen des SEV und VSE (FKH) zusammengeschlossenen schweizerischen Elektrizitätswerke und Fabrikanten zum Bau der im folgenden beschriebenen Versuchs- und Messanlage entschlossen.

Beschreibung der Anlage

Der dominierende Teil der neuen Messanlage ist eine sogenannte geschlossene *Reuse*. Diese besteht zur Hauptsache aus einem zylindrischen, luftdicht verschliessbaren, metallischen Kessel von rund 3 m Durchmesser und 14 m Länge, in dessen Längsachse das zu prüfende Seilstück isoliert vom Gefäss ausgespannt und unter Spannung gesetzt wird. Zur Befestigung des Leiters dienen zwei in den beiden Stirnwänden des Gefässes koaxial eingelassene Hochspannungs-Durchführungen. Die den Leiter umgebende Luft in der Reuse kann weitgehend klimatisiert werden, d. h. Druck, Temperatur und Feuchtigkeit lassen sich in gewissen Grenzen verändern. Weiter ist es möglich, den Leiter einem gut definierten Regen auszusetzen und auf der Oberfläche des Versuchsseiles verschiedene Arten von Reif zu erzeugen. Die effektive Spannung des Leiters lässt sich dabei bis auf 300 kV gegen Erde steigern.

Die Koronaverluste werden in der Reuse pro Längeneinheit des Leiters bestimmt. Es müssen darum Massnahmen getroffen werden, die Gewähr bieten, dass nur der gleichmässige, radiale bzw. zylindrische Teil des Feldes in die Messung einbezogen wird, d. h. dass das durch die Leiterenden gestörte Feld nicht in die Messung eingeht.

Die Berechnung der Verluste einer Drehstromleitung auf Grund der Messungen in der Reuse ist für einen Leiter nach dem Gesetz von *Potthoff* einwandfrei möglich. Dieses Gesetz sagt, dass, wenn das elektrische Feld an der Oberfläche eines bestimmten Leiters in verschiedenen Anordnungen das gleiche ist, oder anders gesagt, wenn die elektrische Ladung pro Meter gleich gross ist, auch die Verluste pro Meter die gleichen sind. Die Gleichheit der Ladung pro Meter eines Seiles z. B. in der Reuse und auf einer Drehstromleitung ergibt sich durch Messung des Ladestromes oder durch Berechnung aus

dem Produkt von Spannung und Betriebskapazität. Da dieses sich aus den Gesetzen der Elektrostatik sehr genau errechnen lässt, stehen die Spannungen, bei denen auf der Leitung und in der Reuse gleiche Verluste entstehen, im umgekehrten Verhältnis dieser Kapazitäten.

Wir beschränken uns in dieser Arbeit auf die Beschreibung der neuen Versuchsanlage; die damit erzielten Resultate und ihre Anwendung auf die Berechnung von Leitungen werden in einem weiteren Artikel behandelt werden.

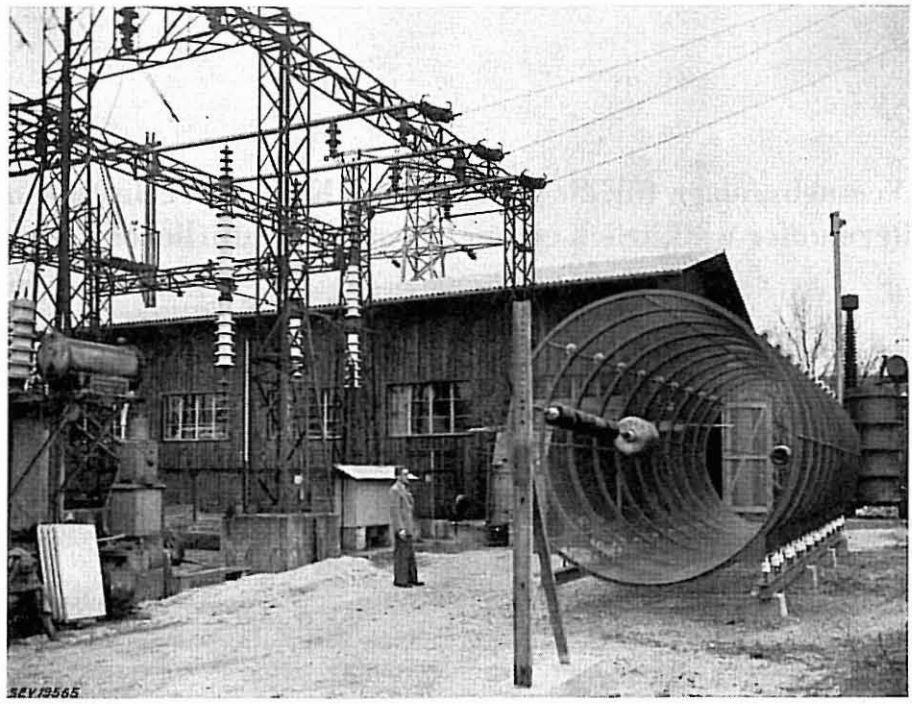


Fig. 1

Gesamtansicht der Koronamessanlage in der Versuchsstation Gösgen der FKH

Im *Vordergrund* die Freiluftreuse, im *Hintergrund links* das Gebäude, in dem die geschlossene Reuse untergebracht ist, *rechts davon* der Hochspannungstransformator

Die gesamte Koronaversuchsanlage (Fig. 1), die auf dem Areal der bestehenden Versuchsstation der FKH in Gösgen aufgestellt wurde, besteht aus den vier folgenden Hauptteilen, von denen wir anschliessend die Beschreibung folgen lassen:

1. Geschlossene Reuse mit Klimaanlage
2. Freiluft-Reuse
3. Elektrische Versuchseinrichtungen und Speisung
4. Messeinrichtungen für die elektrischen und klimatischen Grössen

1. Geschlossene Reuse mit Klimaanlage (Fig. 2 und 3)

Die Aufgabe bestand in der Schaffung einer Messeinrichtung, die es erlaubt, ein Seilmuster von rund 10 m Länge rasch verschiedenen, den natürlichen Verhältnissen entsprechenden, meteorologischen Zuständen zu unterwerfen. Weiter müssen diese einmal eingestellten Zustände während der Dauer der Messung der Koronaverluste bei verschiedenen Spannungen konstant gehalten werden können. Um den Einfluss der einzelnen klimatischen Faktoren abklären zu können, muss weiter die Möglichkeit bestehen, eine einzelne Grösse (Temperatur, Druck, Feuchtigkeit usw.) zu variieren, ohne die andern zu verändern.

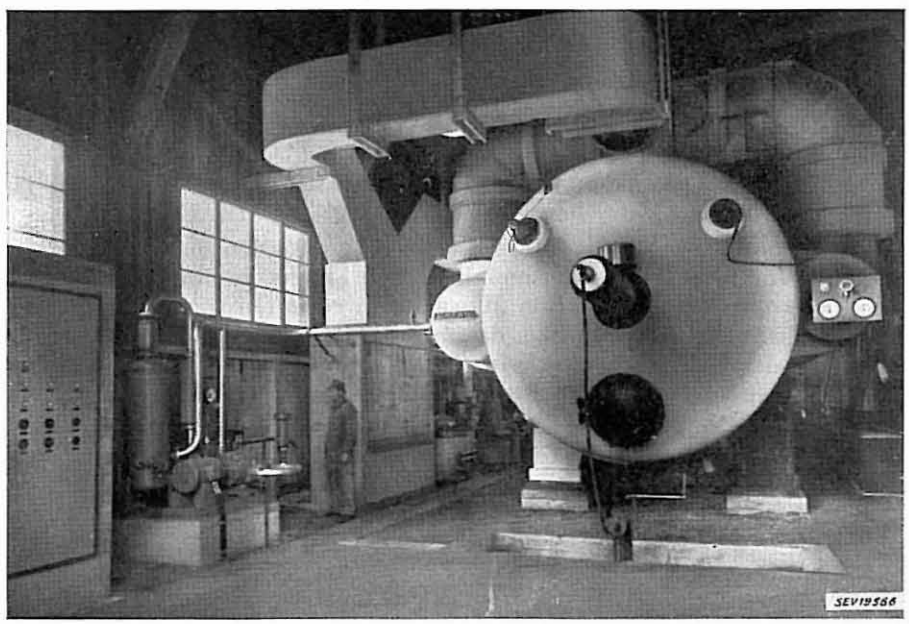


Fig. 2

Ansicht der Meßseite der geschlossenen Reuse

Die von der Firma Escher Wyss A.-G., Zürich, gebaute Anlage besteht aus einem doppelwandigen, thermisch isolierten Kessel von 3 m lichter Weite und rund 14 m Länge, in dem 10 Messzylinder von je 1 m Länge und 2,9 m innerem Durchmesser isoliert eingebaut sind. Weiter gehören alle nötigen Einrichtungen zur Erzeugung der verlangten kli-

matischen Verhältnisse im Innern des Kessels dazu. Da es sich bei diesem Auftrag um eine neuartige Anlage handelte, waren bei deren Ausführung eine Menge konstruktiver und praktischer Probleme zu lösen. Die Firma und alle ihre Mitarbeiter haben in äusserst anerkennenswerter Weise mitgeholfen, die vielgestaltigen Schwierigkeiten zu überwinden.

Eine kurze Beschreibung der Klima-Anlage ist von Ingenieur A. Kornfehl in der STZ Nr. 20/21 vom 24. Mai 1951 erschienen. Wir verweisen jene Leser, die sich besonders für die mechanischen und thermischen Einzelheiten interessieren, auf diese Publikation.

An dieser Stelle beschränken wir uns auf die Beschreibung der verschiedenen klimatischen Zustände, denen das Versuchsseil ausgesetzt werden kann, und erläutern kurz das Arbeiten der verschiedenen Organe der Klimaanlage mit Hilfe des Schemas Fig. 4.

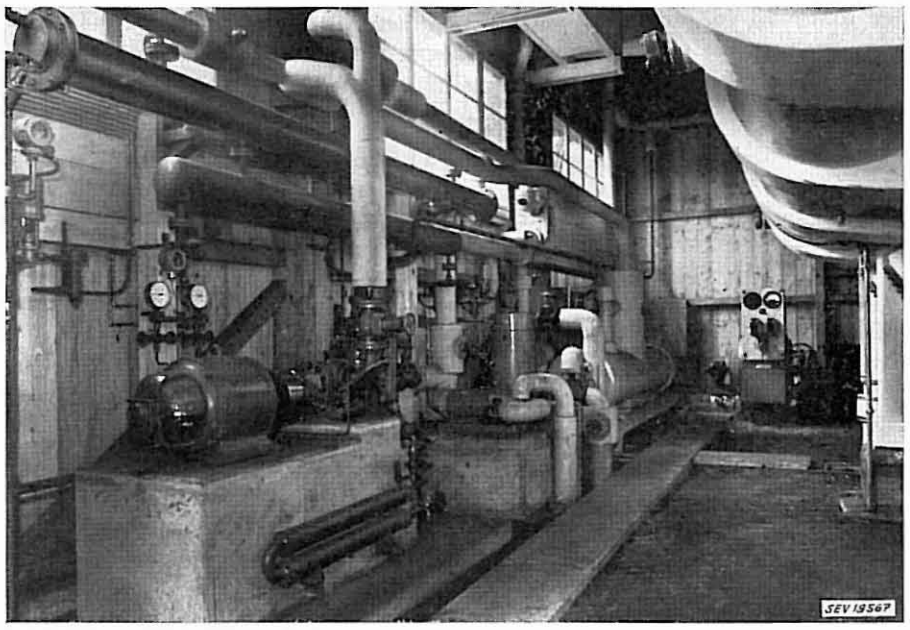


Fig. 3
Klimaanlage für die geschlossene Reuse

a) Temperaturen zwischen + 40 und — 30 °C

Die gewünschte Temperatur der Luft in der Reuse wird durch Erwärmen oder Abkühlen der inneren Kesselwand mit Hilfe einer Chlor - Calziumlösung erreicht, die zwischen den beiden Wänden *7* und *8* des Kessels durch die Pumpe *23* in Zirkulation gehalten wird und entweder im Heizgefäss *24* erwärmt oder im Ammoniakverdampfer *C* abgekühlt wird. Die Abkühlung wird in bekannter Weise durch Verdampfung von Ammoniak erreicht, das vom Kompressor 1 angesaugt und komprimiert, dann im Kondensator *D* mit Wasser abgekühlt und in flüssiger Form in die verschiedenen Verdampfer (für Chlor-Calciumlösung, Öl-Petrolgemisch, oder Luft) geleitet wird. Parallel zu dieser Abkühlung der Luft in der Reuse selber durch den Mantel *7* des Kessels kann die Luft auch noch mit Ventilatoren durch wärmeisolierte Kanäle *29* in einen Luftkühler gesaugt, dort gekühlt und wieder zurück in die Reuse geleitet werden.

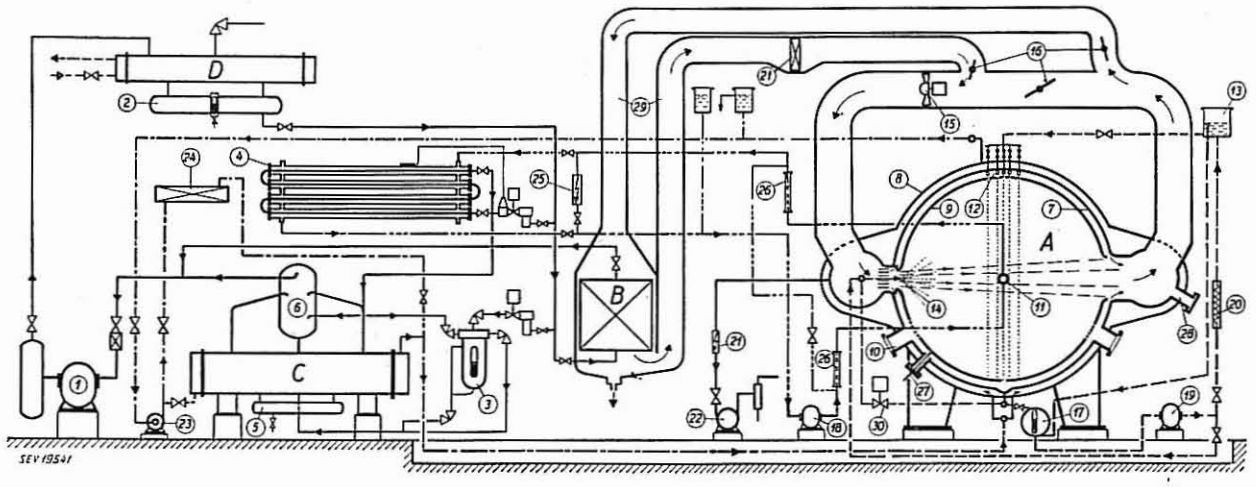


Fig. 4
Prinzipschema der Klimaanlage

A Geschlossene Reuse; *B* Ammoniakverdampfer für Luftkühlung; *C* Ammoniakverdampfer für Solekühlung; *D* Kondensator; *1* Kompressor; *2* NH_3-Behälter; *3* Regulierung des NH_3-Niveaus; *4* Ammoniakverdampfer für öl-Petrol-Kühlung; *5* öltopf; *6* Flüssigkeitsabscheider; *7* Behältermantel, Kühlmantel; *8* Solegefässmantel; *9* Messzylinder; *10* Schauöffnungen; *11* zu messender Leiter; *12* Regenvorrichtung; *13* Wasserbehälter; *14* Wasserzerstäuber; *15* Ventilator; *16* Luftklappen; *17* Wasser-Sammelbehälter; *18* Öl-Petrol-Pumpe; *19* Wasserpumpe; *20* Ohmmeter; *21* Elektrischer Lufterhitzer; *22* Luftpumpe für Vakuum und Überdruck; *23* Solepumpe; *24* Elektrischer Soleerhitzer; *25* Elektrischer Öl-Petrol-Erhitzer; *26* Isolation für öl-Petrol-Gemisch; *27* Messzylinder-Anschlüsse; *28* Meßstutzen; *29* Isolierte Luftkanäle; *30* Elektromagnetisches Ventil für Wasser

——— Ammoniak
—·—·— Sole
— — — Wasser
—··—··— Öl-Petrol

b) Drücke von 0,1 bis 1,6 kg/cm² (absolut)

Die als Wasserringpumpe gebaute Vakuumpumpe *22*, die ebenso als Kompressor verwendet werden kann, gestattet rasch Vakuum oder Überdruck in den Grenzen von 0,1...1,6 kg/cm² herzustellen. Die Undichtigkeit der Reuse ist so gering, dass die Pumpe, nachdem der gewünschte Druck erreicht ist, abgeschaltet und die Messungen bei praktisch konstantem Druck ausgeführt werden können.

c) Regen

Im obersten Teil der Reuse, zwischen dem inneren Mantelblech *7* und den Messbelägen *9* eingebaut, befinden sich 9 Kupferrohrstränge *12* von 10 m Länge und zwar 5 innere mit 5 cm Abstand und je 2 äussere mit 10 cm Abstand (in Fig. 4 nicht alle eingezeichnet). In diesen Rohren sind auf ihrer ganzen Länge auf der obersten Mantellinie alle 10 cm Bohrungen angebracht. Das ausfliessende Wasser bildet an der unteren Seite der Rohre die gewünschten Tropfen. Jeder einzelne dieser Rohrstränge ist in 5 Sektionen unterteilt, die jede für sich mit einem besonderen Hahn reguliert werden kann. Diese Anordnung gestattet eine Fläche von 0,6 × 10 m mit einer regulierbaren Wassermenge von 1...5 mm pro min gleichmässig zu beregnen oder beliebig einzelne Regionen trocken zu lassen. So besteht z. B. die Möglichkeit, den Leiter allein dem Regen auszusetzen, während seine nähere Umgebung ohne Regen ist oder auch umgekehrt. Der Durchmesser der erzeugten Tropfen beträgt bei spannunglosem Leiter durchwegs rund 5 mm. Ob bei grosser Feldstärke an der Oberfläche des Leiters eine Veränderung der Tropfen eintritt, konnte bis jetzt noch nicht kontrolliert werden.

Die Verwirklichung dieser Regenanlage, vor allem das Erzeugen eines genügend gleichmässigen und gut regulierbaren Regens war eine schwierige und zeitraubende Aufgabe, die nun aber mit der beschriebenen Anordnung zufriedenstellend gelöst werden konnte.

Das einmal gebrauchte Regenwasser sammelt sich im Behälter *17*, von wo es durch die Pumpe *19* wieder in den Behälter *13* gedrückt wird. Ein Überlaufrohr führt zurück in den Sammelbehälter *17*. Die Einhaltung bestimmter Leitfähigkeiten des Wassers ist auf einfache Weise möglich.

d) Wind

Mit 4 in speziellen Kanälen eingebauten Ventilatoren *15* kann ein starker horizontaler Wind quer durch die Reuse erzeugt werden. Regulierklappen *16* gestatten, die Windgeschwindigkeit zu verändern, die in Leiternähe *11* im Maximum auf 8...10 m/s gebracht werden kann. In den Eintrittsöffnungen angebrachte Führungsbleche geben dem Wind in einem keilförmigen Raum horizontale Richtung.

e) Nebel

Die Befeuchtung der Luft in der Reuse wird durch ein System von Düsen *14* erreicht, die in den Eintrittsöffnungen des Windes in den Kessel montiert sind. Der damit erzeugte Nebel entspricht sehr gut den Erfordernissen bei diesen Messungen. Der Durchmesser der Wassertröpfchen beträgt, wie uns der Hersteller der Düsen auf Grund von mikrophotographischen Messungen mitteilte, etwa 50 µm.

Das verwendete destillierte Wasser wird aus dem Behälter *17* angesaugt und in die Düsenleitungen gepresst. Durch Betätigen des elektromagnetischen Ventils *30* können die Düsen rasch unter Druck gesetzt oder abgestellt werden.

f) Trocknen der Luft

Die feuchte Luft aus der Reuse gibt beim Durchströmen des Luftkühlers *B* einen Teil ihrer Feuchtigkeit ab. Nachdem sie im Heizelement *21* wieder erwärmt wurde, gelangt sie von neuem in die Reuse, wo sie wiederum Feuchtigkeit aufnimmt, diesmal aber schon in vermindertem Masse. Das mehr oder weniger häufige Wiederholen dieses Kreislaufes gestattet den Wassergehalt der Luft auf den gewünschten Wert zu bringen, der zwischen 90 % und 15 % der Sättigung beliebig gewählt werden kann.

g) Reifbildung auf dem Leiter

Das Erzeugen von Reif auf dem Prüfling verlangt die Verwendung eines Seilmusters mit durchgehendem, dichtem Hohlraum. Das Entstehen einer Reifschicht auf einem solchen Leiter wird folgendermassen erreicht:

Ein Kälteträger, bestehend aus einer Mischung von je 50 % Spezialöl und Petrol, wird im Kühler *4* auf tiefe Temperatur gebracht (— 30 °...— 40 °C) und durch die Pumpe *18* unter Druck durch den Hohlleiter gepresst. Das Wasser in der stark befeuchteten Luft (Nebeldüsen und 1 Ventilator in Betrieb) kondensiert und gefriert auf der kalten Leiteroberfläche und bildet auf diese Weise nach und nach die gewünschte Reifschicht. Körnig und weiss, und durch den angewendeten Wind etwas exzentrisch zur Leiterachse liegend, entspricht diese Schicht den natürlich gebildeten Reifschichten gut. Die dem Winde zugekehrte Seite der Reifwalze weist dabei die grösste Dicke auf. Die Temperatur der Luft im Kessel wird bei diesem Versuch bei etwa 0 °C gehalten, was durch Abkühlen der Reusenwand möglich ist.

h) Heizen des Leiters

An Stelle des Abkühlens der Öl-Petrolmischung im Kühler *4* tritt in diesem Falle deren Erwärmung im Heizelement *25*, in welchem ihre Temperatur im Maximum auf + 40 °...+ 50 °C gebracht werden kann. Die Erwärmung des Hohlleiters über die Temperatur seiner Umgebungsluft ist wichtig, weil sie erlaubt, die Wirkung der Ohmschen Verluste einer im Betriebe stehenden Leitung nachzuahmen.

i) Automatische Steuerung

Die meisten Organe der Anlage werden automatisch gesteuert. Die Temperatur der Luft in der Reuse kann auf einen zum voraus festgelegten Wert zwischen — 30 ° und + 40 °C gebracht und gehalten werden. Das gleiche trifft auch zu für die Temperatur des Öl-Petrolgemisches für die Hohlseilkühlung.

In die Leitungen des Ammoniak-Kreislaufes und des Kühlwassers eingebaute automatische Ventile steuern den Kompressor *1* und schützen ihn zu-

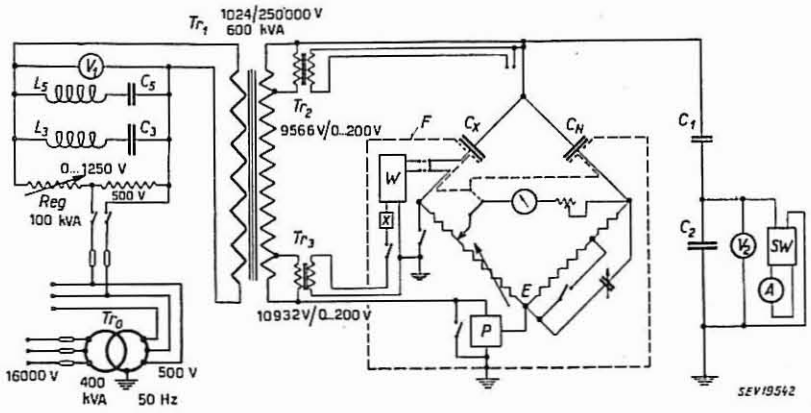
gleich. Thermische Relais vor allen Motoren bilden den Motorschutz. Störungen in der Anlage (Kurzschluss, abnormer Überdruck, Unterbruch in der Kühlwasserzufuhr usw.) werden auf der Schalttafel durch Signallampen angezeigt. Weiter verhindern Verriegelungen das Wiedereinschalten von gestörten Anlageteilen. Diese Sicherheitsmassnahmen erwiesen sich für eine so komplizierte Anlage, die zudem stundenlang ohne besondere Wartung arbeiten muss, als unumgänglich notwendig.

2. *Freiluft-Reuse*
(Fig. 1)

Um die bei künstlichem Klima in der geschlossenen Reuse gemessenen Koronaverluste mit solchen unter natürlichen meteorologischen Verhältnissen vergleichen zu können, wurde in Gösgen auch eine offene Reuse erstellt. Sie besteht analog der geschlossenen Reuse aus einem Zylinder von 2,9 m Durchmesser und 10 m Länge, wieder aufgeteilt in 10 Messzylinder, von denen jeder 1 m lang ist und aus Drahtgeflecht besteht, das von Rohrringen gehalten wird. Die Wirkungsweise und die Art der Messung unterscheiden sich nicht von denjenigen in der geschlossenen Reuse.

Fig. 5
Prinzipschema der elektrischen Versuchs- und Messanlage

Tr_0 Stations-Transformator; Tr_1 Prüf-Transformator; Tr_2 Spannungswandler; Tr_3 Spannungswandler; *Reg* Induktionsregler; L_3C_3 Filter für die 3. Harmonische; L_5C_5 Filter für die 5. Harmonische; V_1 Kontroll-Voltmeter; C_1C_2 Kapazitiver Mess-Spannungsteiler; V_2 Statisches Präzisions-Voltmeter (Effektivspannung U in kV); *SW-A* Spannungs-Scheitelwert-Voltmeter, in kV/$\sqrt{2}$ geeicht; *F* Faraday-Käfig; *W* Präzisionswattmeter 30/300 mW; *X* Vorwiderstand und Phasenschieber; C_x Prüfobjekt (Versuchsseil); C_n Normalkondensator (Pressgas); *P* Potentialregler



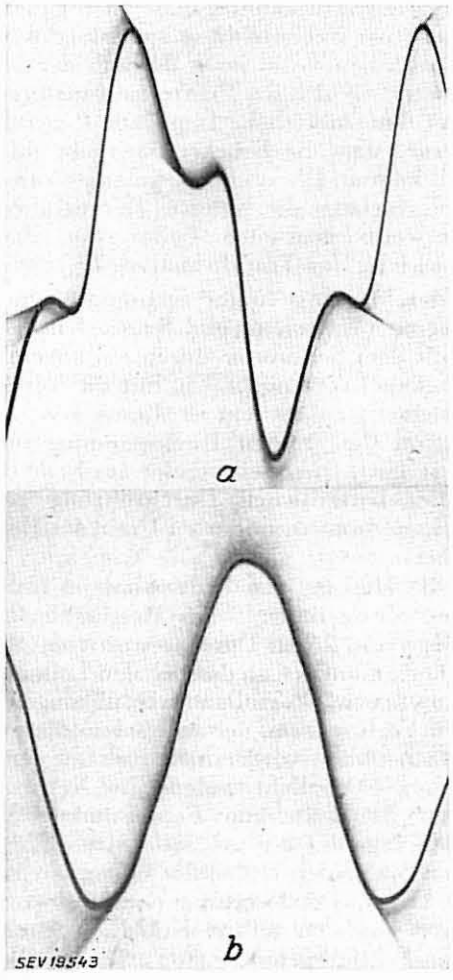


Fig. 6
Oszillogramme der Spannung am Prüftransformator
a ohne Filter *b* mit *LC*-Filter

3. *Elektrische Einrichtungen und Speisung*

Das Gesamtschema des elektrischen Teils der Anlage ist in Fig. 5 dargestellt. Der 600-kVA-Einphasen-Hochspannungstransformator Tr_1, dessen Unterspannung mit dem Induktionsregler *Reg* reguliert und mit einem Filter annähernd sinusförmig gehalten wird, gestattet, das Versuchsseil an beliebige Effektiv-Spannungen zwischen 0 und 300 kV zu legen. Die Notwendigkeit der Filtrierung der Primärspannung geht aus den Oszillogramm-Beispielen Fig. 6 hervor. Um das Glimmen zu vermeiden, bestehen die Hochspannungsverbindungen vom Transformator zur Messanlage aus Kupferrohren von 44 mm Durchmesser, in denen zugleich alle Messkabel eingezogen sind.

Das Versuchsseil wird zwischen zwei in den Stirnflächen des Kessels koaxial eingebauten Hochspannungs-Kondensatordurchführungen ausgespannt. Diese für 300 kV gebauten Durchführungen müssen zugleich die für einen minimalen Durchhang des Leiters nötigen Zugkräfte aufnehmen. Da zudem infolge der beträchtlichen Temperaturänderungen, die in der Reuse auftreten, wesentliche Ausdehnungsunterschiede zwischen Leiter und Kessel entstehen, die zu zusätzlichen mechanischen Spannungen führen, sind zwischen Leiter und Durchführungen Federn eingebaut, die den Zug auf max. 1 t begrenzen.

Weiter muss für die Messung der Koronaverluste das Seilmuster über das Messinstrument, also indirekt, an Spannung gelegt werden und demzufolge von den Durchführungen isoliert sein. Zu diesem

Zweck sind zwischen Seilmuster und Durchführungen Isolatoren eingebaut. Auf die Enden der Durchführungen montierte metallische Hauben von 500 mm Durchmesser umhüllen den Befestigungsmechanismus und vermeiden das Glimmen dieser Teile.

4. Messeinrichtungen

A. Elektrische Messungen

a) Spannungsmessung. Die Messung der an das Seilmuster gelegten Versuchsspannung geschieht mit Hilfe der kapazitiven Spannungsteilung C_1—C_2 nach dem Schema der Fig. 5. Der Effektivwert der Teilspannung an C_2 wird durch das statische Präzisionsvoltmeter V_2 angezeigt, während der Scheitelwert mit der Anordnung *SW–A*, welche parallel dazu angeschlossen ist, gemessen wird. Die Schaltung besteht in der Hauptsache aus einem über Röhren auf den Scheitelwert der Wechselspannung geladenen Kondensator SW, und einem hochohmigen Mikroampèremeter *A* zur Messung der Aufladespannung. Die Messung des Effektiv- und des Scheitelwertes der Spannung erlaubt auf einfache Weise, die Form der Spannungskurve zu kontrollieren. Dabei darf aber auch bei Gleichheit der beiden Anzeigen nicht auf absolute Sinusform geschlossen werden. Einige Vergleichsmessungen sind in Tabelle I zusammengestellt.

Vergleich der Prüfspannungen mit oder ohne Filter auf der Primärseite des Transformators Tr_1
(siehe Fig. 5)

Tabelle I

Spannung ohne Filter				Spannung mit Filter			
V_1 U_1 V	V_2 U kV	SW-A $\hat{U}/\sqrt{2}$ kV	$\frac{\hat{U}/\sqrt{2}}{U}$	V_1 U_1 V	V_2 U kV	SW-A $\hat{U}/\sqrt{2}$ kV	$\frac{\hat{U}/\sqrt{2}}{U}$
ca. 100	ca. 38	36,2	ca.1,08	100	—	—	—
200	55	58	1,055	200	ca. 60	60	ca.1
300	81,4	87	1,07	300	81,4	80,8	0,993
400	102,6	111	1,082	400	105,6	104	0,987
500	127,2	139,8	1,10	500	127,8	125,4	0,983
600	152,4	174	1,143	600	152	148,2	0,977
700	176,8	206,2	1,168	700	174,2	170,4	0,978
800	201,6	232,6	1,155	800	199	196	0,985
900	227	261,2	1,15	900	224	220,6	0,985
				1000	246,6	243	0,986
				1060	262	259	0,989

b) Koronaverlustmessung. Die in der Versuchsanlage an kurzen Seilstücken gewonnenen Resultate müssen ohne weiteres für die Konstruktion von Übertragungsleitungen verwendet werden können. Diese Bedingung erfordert Vorsicht in Bezug auf die Genauigkeit der Messung der sehr kleinen in Frage kommenden Leistungen. Aus diesem Grunde wurden zwei Messmethoden mit je zwei Varianten in Aussicht genommen, und zwar entweder die Verwendung eines Spezial-Präzisionswattmeters oder die Messung mit der Scheringbrücke, beide «an Spannung» oder «an Erde» verwendbar.

Durch ein abgeschirmtes Polythenkabel speist der Spannungswandler Tr_3 oder Tr_2 die Spannungsspule des Wattmeters *W* mit maximal 200 V, während dessen Stromspule direkt vom Strom im Kondensator C_x durchflossen wird. Die vom Spannungswandler Tr_2 oder Tr_3 und dem Spannungskreis des Wattmeters verursachte Phasenverschiebung wird durch die Anwendung eines *RC*-Kompensationskreises *X* eliminiert, indem dieser eine Phasenverschiebung gleicher Grösse mit umgekehrtem Vorzeichen erzeugt. Die Grösse des Kondensators *C* der Kompensationsschaltung wird durch Messung der Verluste an einem praktisch verlustlosen Druckgas-Eichkondensator eingestellt. Dadurch lässt sich erreichen, dass der Strom- und der Spannungsvektor bei 50 Hz genau senkrecht zueinander stehen und die Anzeige des Wattmeters bei allen Spannungen null bleibt. Das verwendete Wattmeter ist mit 2 Skalen ausgerüstet, die eine für 30 mW und die andere für 300 mW Endausschlag. Zusammen mit der Spannungsübersetzung (1250) ergibt dies Leistungsbereiche von 37,5 W und 375 W. Die kleinsten noch messbaren Verlustwinkel haben einen tg δ von ca. $^1/_{1000}$ bei 100 kV.

Die Brückenschaltung nach Schering ist allgemein bekannt, so dass wir hier auf eine Beschreibung verzichten können und nur eine Abweichung von der gebräuchlichen Schaltung erwähnen müssen. Diese ist dadurch bedingt, dass die Reuse fest geerdet ist, und somit auch die Messzylinder und damit die Brücken-Diagonale in der abgestimmten Brücke auf Potential Null sein müssen. Das Abgleichen der Brückenabschirmung besteht darin, deren Spannung nach Grösse und Phasenlage gleich der Spannung der Brückendiagonale zu regulieren, damit kapazitive Nebenschlüsse spannunglos werden. Im vorliegenden Falle muss deshalb der üblicherweise geerdete Pol *E* des Prüftransformators isoliert und über eine zusätzliche Impedanz *P* geerdet werden, derart, dass die Brückendiagonale auf Potential Null kommt. Diese Lösung gelangte zur Anwendung; sie verlangt die isolierte Herausführung des normalerweise geerdeten Endes der Hochspannungswicklung des Transformators Tr_1.

Bei der Messung «unter Spannung» sind beide Instrumente (Wattmeter und Brücke) im Faraday-Käfig mit dem Seilmuster durch ein abgeschirmtes Polythenkabel verbunden. Um nur die Verluste des Seilmusters C_x zu messen, ist dieses, wie schon erwähnt, von den beiden Hochspannungsdurchführungen isoliert. Die Speisung der am Ende des Versuchsseiles befindlichen Durchführung geschieht durch einen dünnen, isolierten Draht im Hohlraum des Leiters.

Für die Messung «an Erde» sind im Innern der Reuse 10 Messzylinder *9* aus Messingblech von je 1 m Länge und 2,9 m Durchmesser, vom Metallgefäss isoliert, montiert, so dass sie den Leiter konzentrisch umfassen. Porzellandurchführungen erlauben, den Verluststrom, der von jedem dieser Zylinder aufgenommen wird, einzeln zu messen. Diese Anordnung ermöglicht zudem die Kontrolle der Verteilung des elektrischen Feldes und der Verluste über die Länge des Versuchsseiles. Diese Verteilung ist wegen der beiden Enden des Leiters nicht gleichmässig. Für die Auswertung der Verluste langer Leitungen kommen selbstverständlich nur die im mittleren Feldteil gemessenen Verluste in Betracht.

Die beiden Messungen «unter Spannung» und «an Erde» können nicht ohne vorhergehende Korrekturen miteinander verglichen werden, weil die erste

die Verluste der ganzen Länge des Versuchsseiles einschliesst, also auch die in der Nähe der Hochspannungsdurchführungen, welche beträchtlich kleiner sind.

Um die verschiedenen Messmethoden und Varianten genau kontrollieren und vergleichen zu können, wurde an Stelle des Versuchsseiles ein Kupferrohr von 25 mm Durchmesser, das aus drei von einander isolierten Teilen besteht, in die Reuse eingebaut und nur dessen mittlerer Teil von 6 m Länge mit den Messinstrumenten verbunden.

Die Resultate der Messungen mit Wattmeter «unter Spannung» (6 m) und «an Erde» (Messzylinder Nr. 3...8 parallel, ebenfalls 6 m) sind im Kurvenblatt Fig. 7 dargestellt. Die Messwerte stimmen «trocken» wie auch «unter Regen» gut überein. Weiter sind einige Vergleichsmesswerte «an Erde» und «trocken» mit der Scheringbrücke und dem Wattmeter im Kurvenblatt Fig. 8 eingetragen. Diese sind

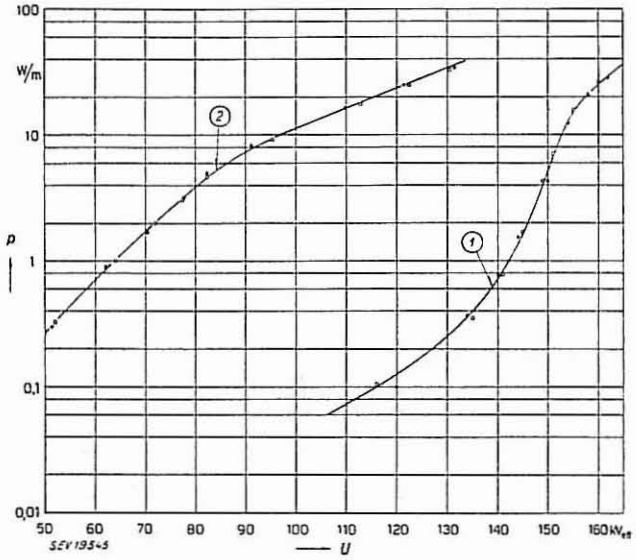


Fig. 7

Vergleich der Verlustmessungen an einem Kupferrohr von 25 mm ϕ

Wattmeter erdseitig oder spannungseitig angeschlossen

1 bei trockenem Zustand; *2* unter Regen; ● Messungen «an Erde»: Messzylinder *3...8* parallel geschaltet (6 × 1 m); ○ Messungen «unter Spannung»: 6 m Rohrlänge

im Gegensatz zu den oben genannten Messungen an einem Kupferseil von 20 mm Durchmesser ausgeführt. Die Absolutwerte können somit nicht mit den Werten aus Fig. 7 verglichen werden, zeigen aber die Übereinstimmung der Resultate beider Messmethoden.

Zu den Messungen mit der Scheringbrücke ist zu bemerken, dass infolge der Unstabilität der Koronaverluste eines kurzen Leitungsstückes der Verlustwinkel unter einer gegebenen, konstanten Spannung fortwährend ändert. Das Abgleichen der Brücke wird dadurch sehr erschwert und erfordert viel Zeit; die Streuung der Messwerte ist beträchtlich. Die Verwendung der Scheringbrücke ist dagegen wertvoll für die genaue Messung der Kapazität C_x des Leiters gegenüber den einzelnen Messzylindern.

Im Vergleich zur Verlustmessung mit der Brücke weist die Wattmetermethode einige wichtige Vorteile auf. Vor allem erlaubt sie ein viel rascheres Messen. Eine vollständige Messreihe $P = f(u)$ kann z. B. in rund 10 min ausgeführt werden, während mit der Brückenmethode 30...40 min nötig sind. Das Wattmeter gestattet somit besser, die Veränderung der Koronaverluste zu erfassen, die als Folge von raschen Zustandänderungen der Ober-

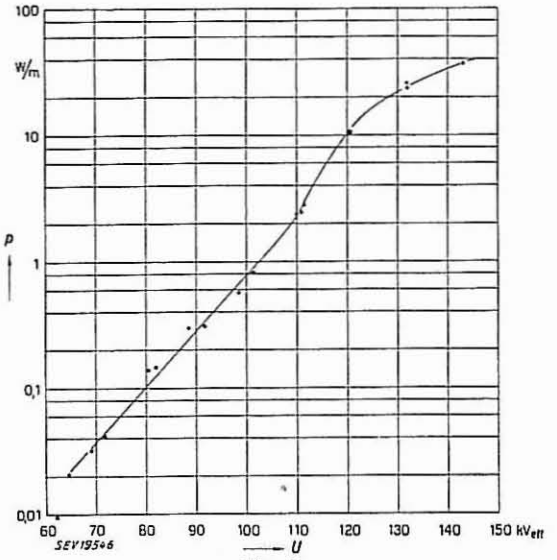


Fig. 8

Vergleich der Verlustmessungen mit Wattmeter und Brücke an einem Kupferseil von 20 mm ϕ

Messungen «an Erde» in trockenem Zustand, Messzylinder *3...8* parallel geschaltet (6 m Messlänge); ● Messungen mit dem Wattmeter; ○ Messungen mit der Scheringbrücke

fläche des Leiters entstehen. Weiter ist die Messung mit dem Wattmeter wegen der geringen Impedanz (260 Ω) weniger abhängig vom Isolationszustand der Messzylinder. Jeder dieser Zylinder wird von 20 Steatit-Isolatoren von 130 mm Durchmesser getragen. Um bei allen klimatischen Verhältnissen in der Reuse einen genügend hohen Isolationswiderstand

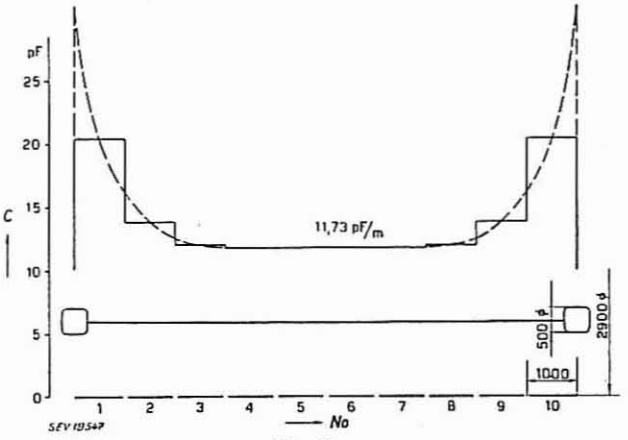


Fig. 9

Längsverteilung der Kapazität des Kupferrohres von 25 mm ϕ gegen die Messzylinder

Messungen mit der Scheringbrücke, bei $U = 50$ kV; Koronaverluste ≅ 0

zu erhalten, ist die Oberfläche dieser Isolatoren mit einer leichten Schicht Siliconfett versehen. In trockenem Zustand beträgt der Isolationswiderstand der parallel geschalteten Messzylinder rund 40 MΩ. Unter Regen fällt er bis auf etwa 0,1 MΩ. Dieser

Wert ist noch genügend hoch für die Messung mit dem Wattmeter.

Aus den genannten Gründen werden die meisten Messungen mit dem Wattmeter ausgeführt. Die Brückenmethode wird nur für die Kapazitätsbestimmung des Versuchsseils und für die periodische Kontrolle der Genauigkeit der Wattmetermessungen verwendet.

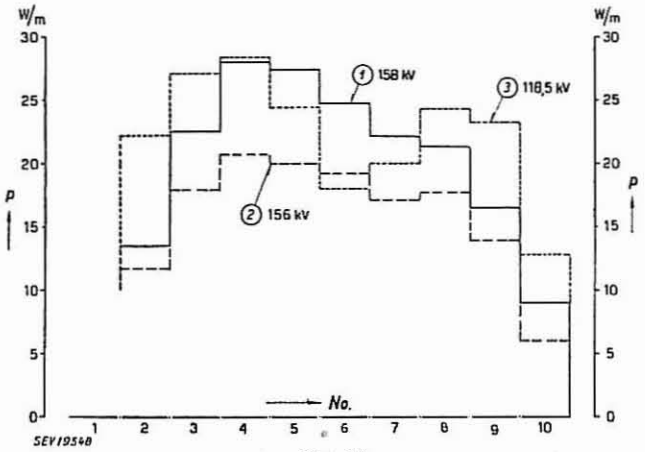


Fig. 10

Längsverteilung der Koronaverluste pro Meter Messlänge an einem Kupferrohr von 25 mm ϕ

1 am 7. 11. 51 vormittags, bei trockenem Zustand, bei 158 kV;
2 am 7. 11. 51 abends, bei trockenem Zustand, bei 156 kV;
3 am 16. 11. 51 unter unregelmässigem Regen, bei 118,5 kV

Die Verteilung der Kapazität des 25-mm-Kupferrohres über seine Länge gegenüber den Messzylindern ist in Fig. 9 dargestellt. Die aus den gegebenen Dimensionen berechnete Kapazität dieses 25-mm-Zylinders beträgt 11,7 μF/m, was sehr gut mit dem gemessenen Wert von 11,73 μF/m übereinstimmt.

In Fig. 10 sind einige Beispiele der Längsverteilung der Verluste bei verschiedenen Spannungen dargestellt. Wie ersichtlich, ist diese Verteilung in trockenem Zustande ziemlich unregelmässig (Kurve *1* und *2*). Es ist anzunehmen, dass kleine Unebenheiten auf der Oberfläche des Leiters die Ursache dieser unregelmässigen Verteilung sind. Die Kontrolle der Oberfläche des Versuchsrohres nach den Versuchen zeigte schon von blossem Auge deutlich kleine Flecken. Unter dem Mikroskop erscheinen diese Flecken als kleine, zentrale Erhöhungen, die von dunkeln Stellen umgeben sind. Das Vorhandensein einiger solcher zufällig auf dem Versuchsrohr verteilter Stellen genügt, um die oben gezeigte unregelmässige Verteilung der Koronaverluste zu ergeben, hauptsächlich in der Zone der kritischen Spannung, d. h. beim Beginn der Verluste. Die Kurve *3* inFig. 10 stellt die Verteilung der Verluste bei ungleichmässig beregnetem Leiter dar. Die Leiterzone bei Messzylinder *6* und *7* war sichtlich weniger dichtem Regen ausgesetzt, was die kleineren Verluste in diesem Teile des Versuchsrohres erklärt.

Diese Verteilungsmessungen bestätigen die schon erwähnte Tatsache, dass die Glimmerscheinungen auf dem Leiter wenig über der Einsatzspannung sehr unstabil sind. Dies ergibt sich auch daraus, dass sich bei Wiederholung von Verlustmessungen an einigen Messzylindern nicht mehr der gleiche Wert ergibt, wenn nicht sorgfältig darauf geachtet wird, dass die klimatischen Bedingungen und der Oberflächenzustand genau dieselben sind. Infolge der schlechten Isolation des Messzylinders Nr. *1* konnte dieser bei den erwähnten Messungen nicht benützt werden.

Die Verlustmessungen in der Freiluftreuse werden mit den gleichen Messmethoden und Instrumenten durchgeführt. Die 10 Messzylinder sind hier auf Freileitungsisolatoren montiert, die einen genügend hohen Isolationswiderstand unter allen Wetterverhältnissen garantieren. Zum Schutze gegen den Einfluss einer in der Nähe der Messanlage vorbeiführenden 50-kV-Leitung musste die Freiluftreuse mit einem an Erde verbundenen Gitter abgeschirmt werden (in Fig. 1 noch nicht vorhanden).

B. Klimatische Messungen

Temperatur- und Druckmessung in der geschlossenen Reuse werden mit je einem in die Kesselwand eingebauten Thermometer und Manometer durchgeführt und bieten weiter keine Schwierigkeiten. Bei der Feuchtigkeitsmessung unter verschiedenen Temperaturen, bei Unter- und Überdruck mussten dagegen etwelche Hindernisse überwunden werden, besonders für Messungen bei tiefen Temperaturen. Es bestand die Notwendigkeit, Messmethoden zu finden, welche nicht zu viel Zeit beanspruchen und durch genügend robuste und nicht zu teure Messeinrichtungen verwirklicht werden konnten. Zudem drängte es sich auf, zur gegenseitigen Kontrolle zwei Messmethoden zu benützen. Die endgültig gewählten Methoden sind sehr verschieden voneinander. Die eine ist die Absorptions-

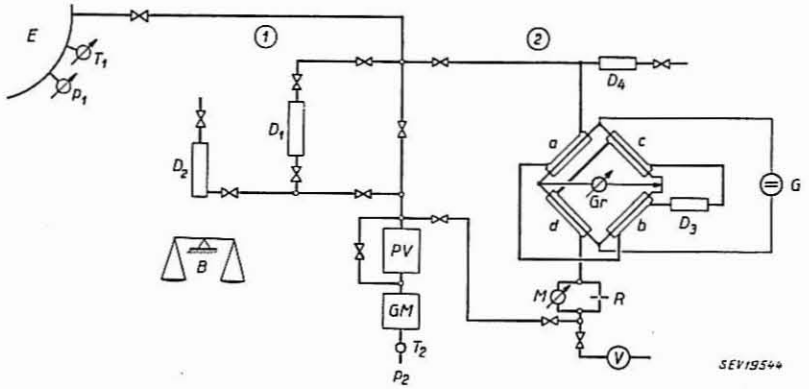


Fig. 11

Prinzipschema der Feuchtigkeitsmessung

① Absorptions-Methode; ② Brücken-Methode (BBC); *E* Geschlossene Reuse; *PV* Hochvakuumpumpe; *GM* Gasvolumenmesser; $D_1 ... D_4$ Lufttrockner; p_1, p_2, M Manometer; T_1, T_2 Thermometer; *G* Stromquelle; *Gr* Messinstrument (g/m³); *a*, *b*, *c*, *d* Brückenzweige; *R* Diaphragma; *V* Ventilator; *B* Präzisionswaage (Empfindlichkeit 2 mg, Tara 500 g)

methode, die andere basiert auf der Variation der Wärmeleitfähigkeit der Luft in Funktion ihrer Feuchtigkeit. Diese Veränderung der Wärmeleitfähigkeit wird durch eine Brückenschaltung gemessen, die von der Brown Boveri entwickelt und gebaut wurde. Die beiden Messmethoden sind in Fig. 11 schematisch dargestellt.

Die bekannte Absorptionsmethode ist im Prinzip sehr einfach. Die Luft, deren Feuchtigkeit bestimmt werden soll, wird durch die Hochvakuumpumpe *PV* angesaugt. Sie durchströmt zunächst das Trockenmittel im Messgefäss D_1, wo sie ihre Feuchtigkeit abgibt. Nachher gelangt sie in den Gasometer *GM*, mit dem ihr Volumen unter Atmosphären-Druck und bei Umgebungstemperatur gemessen wird. Die mit einer Präzisionswaage bestimmte Gewichtserhöhung des Messgefässes D_1 im Laufe des Versuches (Empfindlichkeit 2 mg, Tara 500 g) und das gemessene Volumen der durchgeströmten Luft, gestatten die absolute Feuchtigkeit der Luft in der Reuse zu berechnen. Bei bekannter Temperatur lässt sich daraus auch die relative Feuchtigkeit bestimmen. Bei der Volumenermittlung muss die Temperaturdifferenz der Luft in der Reuse und im Gasometer *GM* berücksichtigt werden.

Die Pumpe *PV* arbeitet unter Hochvakuum. Diese Lösung wurde im Hinblick auf die vorgesehenen Messungen unter Vakuum gewählt. Befindet sich die Reuse unter Druck, so ist die Pumpe *PV* ausser Funktion, und die Luft strömt durch ein Umgehungsrohr. Das Messgefäss D_2 ist vorgesehen, um bei Messungen unter Vakuum das Messgefäss D_1 vor der Wägung wieder mit Luft zu füllen. D_1 und D_2 bestehen aus Spezial-Glasflaschen, in denen kleine Stückchen Bimsstein, die als Träger für das Absorptionsmittel Phosphorpentoxyd (P_2O_5) dienen, in Glaswolle gebettet sind. Der Dampfdruck von P_2O_5 ist kleiner als 10^{-4} mm Hg.

Diese Messmethode für die Feuchtigkeitsbestimmung ergibt sehr genaue Resultate unter allen klimatischen Verhältnissen. Die einzelne Messung benötigt jedoch eine gewisse Zeit (10...15 min), ist dafür aber bei Anwendung einiger Vorsicht sehr zuverlässig; z. B. darf die erwähnte Glaswolle keine Spuren von Feuchtigkeit mehr enthalten, weil sonst diese von der trockenen Luft aus dem Messgefäss getragen wird und so die Wägung fälscht. Selbstverständlich müssen auch alle Leitungen, durch die die feuchte Luft strömt, genügend hohe Temperatur haben, um jede Kondensation zu vermeiden. Aus diesem Grunde sind die Leitungen mit Heizwicklungen versehen, welche deren Temperatur auf rund + 60 °C halten.

Das Prinzip der Feuchtigkeitsmessung mit der Brückenschaltung ist folgendes: Die feuchte Luft wird in den dichten Zylinder *a* gesaugt und strömt darauf durch *b* in den Trockner D_3, wo ihr die Feuchtigkeit entzogen wird; durch die Zylinder *c* und *d* gelangt sie dann über das Diaphragma *R* zur Pumpe *PV*. An einem Strömungsmesser *M-R* kann die Stärke des Luftstromes abgelesen bzw. auf den gewünschten Wert eingestellt werden. Um in den Zylindern *a, b, c, d* keine Kondensation entstehen zu lassen, werden sie auf erhöhter Temperatur gehalten. In ihrer Axe befinden sich feine, geheizte Platindrähte, die unter sich die vier Zweige einer Brücke bilden, deren eine Diagonale an eine Gleichspannungsquelle *G* angeschlossen ist, während die andere mit dem Messinstrument *Gr* verbunden ist. Die feuchte Luft in den Zylindern *a* und *b* besitzt eine grössere Wärmeleitfähigkeit als die trockene Luft in den Zylindern *c* und *d*. Diese Tatsache verursacht eine Reduktion der Temperatur der Platindrähte in *a* und *b* und damit eine Veränderung ihres Ohmschen Widerstandes, welche ihrerseits eine Verstellung der abgeglichenen Messbrücke hervorruft. Der Strom der dabei durch das Instrument *Gr* fliesst, steht somit in direktem Zusammenhang mit der Luftfeuchtigkeit, und die Skala des Instrumentes kann damit in g Wasser pro m^3 Luft (g/m^3) geeicht werden.

Eine vollständige Beschreibung dieser Messeinrichtung wurde von Ingenieur E. Kobel, Physiklabor von Brown Boveri, im Schweizer Archiv Nr. 8, August 1945, Seite 238...241, gegeben. Entsprechend geeicht ergibt diese rasch arbeitende Messeinrichtung gut verwendbare Resultate für Feuchtigkeiten über 1 g/m^3 bei den für die Versuche vorgesehenen Temperaturen und Drücken. Geringere Werte können mit dem zur Zeit in der Schaltung eingebauten Messinstrument nicht mehr gut bestimmt werden. Versuche mit einem empfindlicheren Instrument sind geplant.

Bei den Messungen mit der Freiluft-Reuse wird die relative Feuchtigkeit und die Temperatur der Umgebung mit einem Aspirations-Hygrometer, bestehend aus zwei Thermometern, mit Hilfe der dazugehörigen Eichkurven bestimmt. Diese ermöglichen auch die Bestimmung der absoluten Feuchtigkeit. Der Luftdruck wird mit einem Barographen festgestellt.

Schlussbemerkungen

Ohne Zweifel erlaubt die von der FHK in Gösgen aufgestellte Koronaversuchs- und Messanlage die Durchführung interessanter Forschungsarbeiten, deren Ergebnisse der modernen Hochspannungstechnik gute Dienste leisten wird.

Die Ergänzung der Anlage mit einer Radiostörspannungs-Messeinrichtung, die Gegenstand eines weitern Berichtes sein wird, ist zur Zeit im Gange.

Zum Schluss möchten wir allen, die auf irgendeine Weise zur Verwirklichung dieses Werkes mitgeholfen haben, wärmstens danken. Vor allem gedenken wir in ehrender und dankbarer Erinnerung des kürzlich verstorbenen Präsidenten der FKH, Herrn Ingenieur H. Habich, der durch sein vielseitiges Wissen, sein Verständnis und seinen Weitblick nicht nur die Finanzierung der Arbeiten ermöglichte, sondern auch durch sein eigenes Interesse an der technischen Forschung regen Anteil an der Schaffung der Messanlage nahm. Zu erwähnen ist auch die Erstellerin der «Reuse», Escher Wyss & Cie., die weder Mühe noch Kosten scheute, eine einwandfreie Klimaanlage zu schaffen.

Adresse der Autoren:
E. Seylaz, Ingenieur der FKH, Gösgen (SO).
Prof. Dr. *K. Berger*, Versuchsleiter der FKH, Seefeldstrasse 301, Zürich 8.