

Die dielektrischen Verluste an Kondensatoren, insbesondere an Kabeln wurden schon um 1910 mit dem Wattmeter oder mit dem Elektrometer gemessen. Schering¹ hat 1919 eine Brücke angegeben, die es ermöglicht, in sehr einfacher und exakter Weise die Kapazität und den Verlustwinkel an Kondensatoren zu messen. Zunächst war diese Brücke für die Untersuchung an Hochspannungskabeln gedacht; sie hat sich aber sehr bald und in erweiterter Form auch für die Untersuchung von Dielektriken jeder Art eingebürgert. Bei der folgenden Beschreibung ist die Darstellungs- und Bezeichnungsweise gewählt, die Krönert² für die Beschreibung von Brücken für das ATM eingeführt hat.

1. Prinzipielle Anordnung und ihre Abarten. Die einfachste und ursprüngliche Form der Scheringbrücke ist in Bild 1 dargestellt. Es gelten hierfür nach Semm die Beziehungen:

$$C_x = C_N \frac{R_2}{R_1}; \quad \operatorname{tg} \delta = R_2 \omega C_2. \quad (1) \quad (2)$$

Hierin bedeutet:

- C_x Kapazität des Meßobjektes,
- $\operatorname{tg} \delta$ Verlustfaktor, δ Verlustwinkel von C_x ,
- C_N Kapazität des verlustfreien Normalkondensators,
- R_2, R_1 kapazitäts- und induktionsfreie Widerstände,
- C_2 Kapazität eines veränderbaren Kondensators,
- ω Kreisfrequenz.

Die Hochspannung wird einem Transformator T entnommen und liegt im wesentlichen an den Kondensatoren C_x und C_N . An den Widerständen R_2 und R_4

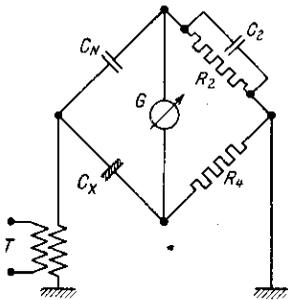


Bild 1. Einfache Schering-Meßbrücke.

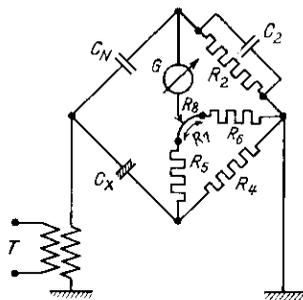


Bild 2. Schering-Meßbrücke für höhere Ströme.

liegt nur eine kleine Spannung von der Größenordnung 1 V. Die rechte Ecke der Brücke ist geerdet. Schering hat konsequent darauf geachtet, daß die Teile, die Hochspannung führen, im Verlauf einer Messung unverändert bleiben, während die veränderbaren Widerstände und Kondensatoren nur eine geringe Spannung gegen Erde aufweisen. Die Abgleichung erfolgt durch Veränderung des Widerstandes R_4 und des Kondensators C_2 . Als Nullinstrument G wird meist ein Vibra-

tionsgalvanometer verwendet, das nur die Grundwelle der angelegten Wechselspannung berücksichtigt.

Mit dieser einfachen Scheringbrücke konnten nur kleine Kapazitäten, d. h. nur kurze Kabelstücke untersucht werden, da der Widerstand R_4 in feinen Stufen veränderbar sein muß. Schering und Burmester³ haben durch eine Erweiterung der Brücke nach Bild 2 die Möglichkeit geschaffen, auch hohe Ströme, wie sie großen Kapazitäten entsprechen, mit dieser Brücke zu beherrschen. Der Widerstand R_4 wird nur in groben

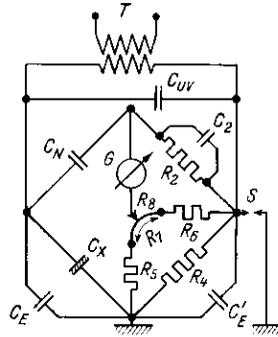


Bild 3. Schaltung zur Messung an verlegten Kabeln.

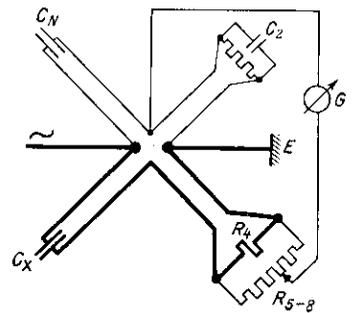


Bild 4. Bifilare Anordnung der Brückenarme für Hochstrommessungen.

Stufen verändert. Zu R_4 sind drei in Reihe geschaltete Widerstände R_5, R_6 und R_7 parallel geschaltet, die nur schwache Ströme führen. R_7 ist zur Feinabgleichung als Schleifdraht ausgebildet; die Schleifdrahtbürste ist mit der einen Klemme des Nullinstrumentes verbunden. Für die abgeglichene Brücke nach Bild 2 gelten folgende Beziehungen:

$$C_x = C_N \cdot R_2 \frac{R_1 + R_5 + R_6 + R_7}{R_4 (R_6 + R_8)} \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \delta = R_2 \omega C_2 - \left[\frac{R_5 + R_7 - R_8}{R_6 + R_8} \cdot R_2 \omega C_N \right] \quad (4)$$

Das Glied in der Klammer in Gl. (4) ist meist vernachlässigbar klein, und damit geht (4) in (2) über.

Nach dem Schema Bild 2 sind fast alle Scheringmeßbrücken geschaltet; ihre Ausführung soll weiter unten noch besprochen werden. Zunächst werden noch einige Abarten beschrieben, die Spezialzwecken dienen.

Die Schaltung nach Bild 1 und 2 setzt voraus, daß beide Beläge des Kondensators C_x nicht geerdet sind. Zur Messung an verlegten Hochspannungskabeln und anderen Kondensatoren, bei denen ein Belag an Erde liegt, haben Bormann und Seiler⁴ die Schaltung nach Bild 3 angegeben. Im Gegensatz zu Bild 2 liegt hier der untere Eckpunkt und damit der eine Belag (Kabelmantel) des Kondensators C_x an Erde. Es geht hierbei die Kapazität der Brücke und ihre Verbindungsleitungen, die in Bild 3 mit C_E, C'_E und C_{uv} angedeutet sind,

mit in die Messung ein. Durch zwei Messungen läßt sich diese fremde Kapazität eliminieren, indem man erst die Gesamtkapazität \bar{C} und den dazu gehörigen Verlustfaktor $\overline{\text{tg } \delta}$ und nach Abschaltung von C_x die fremde Kapazität C_0 und den zugehörigen Verlustfaktor $\text{tg } \delta_0$ mißt. Die gesuchten Werte sind dann:

$$C_x = \bar{C} - C_0; \quad \left[\text{tg } \delta = \frac{\bar{C} \overline{\text{tg } \delta} - C_0 \text{tg } \delta_0}{\bar{C} - C_0} \right] \quad (5) \quad (6)$$

Der Widerstand R_4 in Bild 3 war ursprünglich für Ströme bis 5 A vorgesehen. Schering⁵ hat für höhere Ströme bis 30 A den Widerstand R_4 in Form eines induktionsfreien Nebenwiderstandes aus der Brücke herausgelegt, wie weiter unten noch gezeigt werden soll (Bild 6).

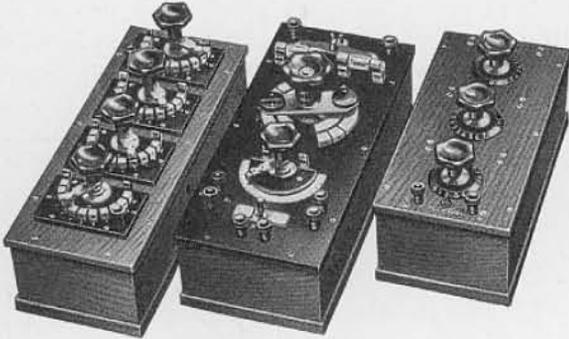


Bild 5. Ausführung der Schering-Meßbrücke von H. & B.

In den letzten Jahren wurden in der Starkstromtechnik Ölkondensatoren und Elektrolyt-Kondensatoren in Betrieb genommen, die Ströme bis zu etwa 1000 A führen. Die Spannung liegt hierbei in der Größenordnung 100 V. Zickner und Pfestorf⁶ haben festgestellt, daß sich der Strombereich der Brücke nach Bild 3 nicht durch eine einfache Anpassung der Brückenwiderstände an die hohen Stromstärken erweitern läßt. Die Ursache der hierbei auftretenden Fehler vermuten sie in der Selbstinduktion der Widerstände R_4 , R_5 und R_6 und geben auch Maßnahmen an, die es ermöglichen, Kondensatoren bis etwa 10000 μF in der Anordnung nach Bild 2 fehlerfrei zu messen.

Zickner und Pfestorf⁷ haben im weiteren Verlauf ihrer Arbeiten in der PTR die in Bild 4 dargestellte Anordnung der Scheringbrücke mit bifilaren Brücken-zweigen für Hochspannungsmessungen entwickelt. Es sind hier dieselben Bezeichnungen gewählt wie in Bild 2.

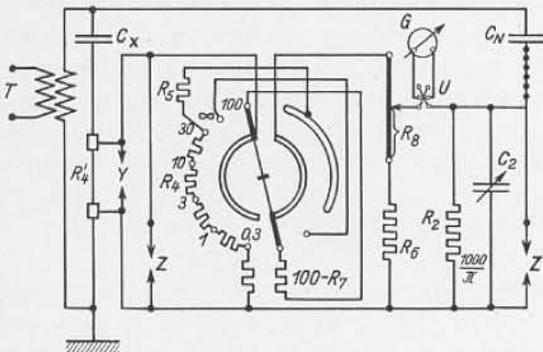


Bild 6. Schaltschema der Brücke nach Bild 2.

Die Stromführung kommt von links und führt rechts nach Erde. Es dürfte noch zweckmäßiger sein, diese Starkstromleitung senkrecht zu der meist horizontalen

Ebene der Brückenordnung zu führen. Für das Gleichgewicht der Brücke gelten die Beziehungen 3 u. 4. Es wurden Kondensatoren bis zu 10000 μF bei nur 3 V fehlerfrei gemessen. Die Brücke wird von Hartmann & Braun in den Handel gebracht.

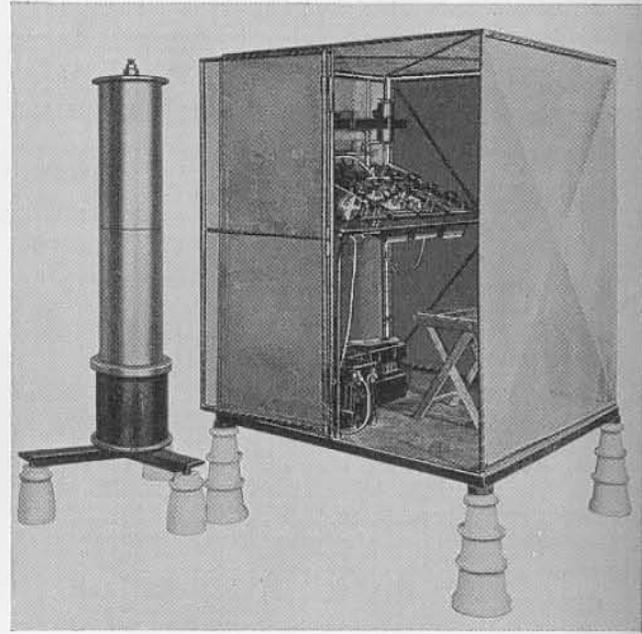


Bild 7. Meßbrücke im Faraday-Käfig.

2. Ausführung. Bild 5 zeigt die bekannte, im wesentlichen von Schering angegebene Ausführung der Brücke. Rechts steht der Abgleichkondensator (C_2 , Bild 2) mit drei Kurbeln für die Einstellung von 10 (0,001 + 0,01 + 0,1) μF . Es sind Glimmerkondensatoren verwendet, deren Verlustwinkel hier vernachlässigt werden kann. Links in Bild 5 steht der Abgleichwiderstand (R_6 , Bild 2) mit vier Kurbeln für die Stufen 10 (0,1 + 1 + 10 + 100) Ω mit Wicklungen nach Wagner und Wertheimer. Zwischen dem Kurbelkondensator und dem Kurbelwiderstand ist in Bild 5 der sog. Brückenkasten aufgestellt, dessen Inneneinrichtung an Hand von Bild 6 erläutert werden soll. In der Mitte dieses Kastens befindet sich eine kräftige Doppelkurbel, durch die der Widerstand R_4 (Bild 2) dem zu erwartenden Strom im Kondensator C_x angepaßt wird. Die Werte für R_4 sind folgende:

R_4	∞	30	10	3	1	0,3 Ω
Höchststrom	0,03	0,075	0,25	0,75	2,5	5 A.

Für die Messung von Strömen zwischen 5 und 30 A wird die Doppelkurbel auf den Wert 100 gestellt. An Stelle von R_4 tritt dann der getrennte Widerstand R_4' , der bei den Stellungen 0,3 ... ∞ fortzudenken ist. Für 10 A hat R_4' 0,2 Ω , für 30 A 0,06 Ω . Diese Werte sind auch in Gl. (3) für den Wert R_4 einzusetzen. In dem Brückenkasten befinden sich noch der Schleifdraht R_7 (vordere Kurbel in Bild 5) und der Widerstand R_2 mit $1000/\pi \Omega$; mit letzterem Wert gehen die Gl. (2) u. (4) bei der Frequenz 50 in die einfache Form $\text{tg } \delta = 0,1 C_2$ über.

Auf dem Brückenkasten sind leicht zugänglich Fein- und Grobsicherungen an der in Bild 5 vom Beschauer abgekehrten Seite montiert, die in Bild 6 bei Z angedeutet sind. Die Grobsicherungen bestehen aus zwei

blanken Kupferscheiben von 30 mm Dmr. mit dazwischengelegter gelochter Glimmerscheibe. Für Feinsicherungen sind die in der Fernmeldetechnik bekannten Luftleerblitzableiter verwendet. Die Sicherungen haben den Zweck, bei einem etwaigen Durchschlag des Kondensators C_x oder C_N den Beobachter und die Brücke vor Schaden zu bewahren und haben diese Aufgabe auch an sehr vielen Brücken immer anstandslos erfüllt. Nur bei kleinen Spannungen, etwa von 500 V abwärts, sprechen diese Sicherungen nicht mehr an. Da es sich dann meist um Hochstrom handelt, muß man durch einen Automaten oder durch eine Abschmelzsicherung die Brücke schützen.

Auf dem Brückenkasten befinden sich ferner noch die erforderlichen Anschlußklemmen und ein Umschalter U (Bild 6) für die Verbindung zum Nullinstrument. Letzterer ermöglicht die Feststellung, ob das Nullinstrument und seine Zuleitungen durch fremde Felder beeinflusst werden. Hat man bei einer Stellung von U abgeglichen, so muß diese Abgleichung auch in der anderen Stellung noch bestehen. Ist dies nicht der Fall, so muß die Beeinflussung beseitigt werden. Die Bildung des Mittels aus zwei Abgleichungen bei den beiden Schalterstellungen ist falsch.

Der Normalkondensator C_N soll vor allem verlustfrei sein. Man verwendet daher vorwiegend Luftkondensatoren und für hohe Spannungen Preßgaskondensatoren, die heute bis 500 kV ausgeführt werden. Eine ausführliche Beschreibung dieser Apparate würde hier zu weit führen; eine zusammenfassende Veröffentlichung ist in Aussicht genommen (ATM Z 133). Es sei hier auf einige Literaturstellen verwiesen^{8, 9}.

Als Nullinstrument wird fast immer ein Vibrationsgalvanometer verwendet, wie es von der PTR durchgebildet wurde. Das empfindliche Telephon eignet sich schlecht, da das menschliche Ohr bei Niederfrequenz vorwiegend die unerwünschten Obertöne hört, so daß man auf ein Lautminimum abgleichen muß, was nur wenigen Beobachtern mit genügender Genauigkeit gelingt. Die getrennten Nebenwiderstände R_4 Bild 4 und R_4' Bild 6 müssen induktionsfrei sein. Bei hohen Strömen erhalten sie Wasserkühlung. An Stelle der Widerstände können auch Präzisions-Stromwandler verwendet werden, die bei Stromstärken über 500 A ebenso genau gemacht werden können wie die besten Widerstände.

3. Aufstellung und Handhabung. Das Meßobjekt C_x und der Normalkondensator C_N werden im Hochspannungsraum aufgestellt, die Niederspannungsapparatur außerhalb desselben. Zur Verbindung zwischen beiden sind besondere Meßkabel mit geerdetem Metallschutz notwendig, deren Kapazität sehr klein, und deren Isolationswiderstand sehr hoch sein muß, da sonst Meßfehler (siehe unten) entstehen könnten. Die Entfernung zwischen den Hochspannungs- und Niederspannungsteilen der Brücke kann unter besonderen Vorsichtsmaßnahmen bis zu etwa 20 m betragen.

Für die Aufstellung der Niederspannungsteile ist zu beachten, daß der Beobachter des Vibrationsgalvanometers nicht geblendet werden darf, und daß er die Kurbeln der Brücke nach Bild 5 bequem zur Hand haben muß. Meist werden die Apparate nach Bild 5 auf einem Tisch aufgestellt oder in einen schreibtisch-

ähnlichen Meßtisch eingebaut. Bild 7 zeigt die Aufstellung in einem Faraday-Käfig, in dem sich während der Messung auch der Beobachter befindet. Diese Aufstellung ist zu wählen, wenn der sonst geerdete Eckpunkt der Brücke an Hochspannung liegt.

Zur Messung einer Kapazität C_x und ihres Verlustwinkels δ berechnet man zunächst annähernd den über C_x fließenden Strom und stellt die Doppelkurbel des Brückenkastens auf den entsprechenden Wert ein. Das Nullinstrument wird auf unempfindlich gestellt. Die Brücke wird durch gleichzeitige Veränderung von R_6 und C_2 abgeglichen. Dies wird solange wiederholt, bis der Ausschlag am Nullinstrument auch bei höchster Empfindlichkeit Null ist. Kennt man die zu messende Kapazität C_x nicht, so stellt man die Doppelkurbel, die unter Strom umgeschaltet werden kann, zunächst auf den kleinsten Widerstandswert und steigert die Empfindlichkeit durch stufenweises Übergehen auf höhere Widerstandswerte.

In Kabelfabriken steht die Meßbrücke fast immer in dem Meßraum fest eingebaut, der verlustfreie Kondensator im Prüfraum zwischen den Kabeltrommeln. In vielen Laboratorien ist die Brücke so zusammengestellt, daß sie leicht an das Meßobjekt herangebracht werden kann. In den Elektrizitätswerken, die häufig Isolatoren und Transformatoren mit der Scheringbrücke überwachen, wird sie einschl. des Normalkondensators transportabel eingerichtet und in einen Meßwagen eingebaut.

4. Fehlermöglichkeiten. Störende fremde Felder lassen sich mit Sicherheit durch den oben schon erwähnten Umschalter in der Leitung zum Nullinstrument erkennen. Elektrostatische Fremdfelder, die an sich selten zu Fehlmessungen Anlaß geben, lassen sich durch entsprechende Abschirmung immer ausschalten. Gegen magnetische Fremdfelder hilft nur deren Beseitigung durch eine hinreichende Entfernung von einem streuenden Transformator, einem im Betrieb befindlichen Starkstromkabel od. dgl. m. Man kann sich Zeit und Mühe sparen, wenn man vor der Aufstellung der Brücke an einer Laboratoriumswand einen Blick auf ihre andere Seite wirft.

Die Kapazität der Verbindungskabel zwischen Hochspannungskondensatoren C_x , C_N und der Brücke kann, wie oben angedeutet, bei großer Meßkabelkapazität zu Fehlmessungen des Verlustwinkels führen. Der Einfluß der Meßkabelkapazität läßt sich rechnerisch ermitteln. Schering hat dem Verfasser in freundlicher Weise hierfür folgende Gleichung angegeben:

$$\operatorname{tg} \delta = R_2 \omega C_2 + [R_2 \omega K_N - R_6 \omega K_x] \quad (7)$$

wo K_N bzw. K_x die Kapazität des zu C_N bzw. C_x führenden Meßkabels bedeutet (Bild 2 u. 6). Das Glied in der rechteckigen Klammer tritt noch zu den Gl. (2) u. (4) hinzu. Ist die Differenz der Glieder in der Klammer kleiner als 10^{-4} , was meist der Fall ist, so ist diese Korrektur vernachlässigbar. Wird der Klammerausdruck negativ, so täuscht die Meßkabelkapazität einen Verlustwinkel im Normalkondensator C_N vor. Beldi¹⁰ hat über diese Erscheinung ebenfalls beachtenswerte praktische und mathematische Untersuchungen angestellt. Auf die Kapazitätsmessung ist die Kabelkapazität ohne Einfluß.

Auch die Aufstellung und Eigenart des Meßobjektes C_x kann zu Fehlmessungen führen. Vor allem sind Glimm-Erscheinungen zu vermeiden, die zusätzliche Verluste mit sich bringen, und meist an einer deutlichen Unruhe des Nullinstrumentes zu erkennen sind. Solche Fehlermöglichkeiten, die außerhalb der eigentlichen Scheringbrücke liegen, sind z. B. von Rosenlöcher und Rühlemann¹¹ und von Schaudinn¹² beschrieben.

5. Empfindlichkeit. Man kann sich über die Empfindlichkeit einer vorhandenen Brücke leicht ein Bild machen, wenn man nach erfolgter Abgleichung erst den Kondensator C_2 und nachher den Widerstand R_6 ändert, bis man eben noch einen deutlichen Ausschlag am Nullinstrument wahrnimmt. Diese Änderungen ΔC_2 und ΔR_6 geben die Möglichkeit, nach Gl. (3) u. (4) die Empfindlichkeit ΔC_x und $\Delta \text{tg} \delta$ zu berechnen.

Tschiassny¹³, Schering¹⁴ und Miller¹⁵ haben die Empfindlichkeit der Brücke berechnet. Miller hat eine sehr ausführliche Beziehung aufgestellt, die unter Vernachlässigung von Werten mit geringem Einfluß lautet:

$$\Delta i_1 = U \cdot \frac{\Delta R_6}{R_6} \cdot \frac{R_2 \omega C_N}{(R_6 + R_2 + r)^2 + x^2} \quad (8)$$

$$\Delta i_2 = U R_2 \Delta C_2 \omega \cdot \frac{R_2 \omega C_N}{(R_6 + R_2 + r)^2 + x^2} \quad (9)$$

wobei

- Δi_1 Änderung des Stromes im Nullinstrument bei einer Änderung des Widerstandes R_6 um ΔR_6 ,
- Δi_2 bei einer Änderung des Kondensators C_2 um ΔC_2 ,
- U Spannung zwischen rechtem und linkem Eckpunkt Bild 2,
- r Ohmscher, x induktiver Widerstand des Nullinstrumentes.

Die Gl. (8) stellt also die Empfindlichkeitsgleichung für die Kapazitätsmessung, (9) für die Verlustfaktormessung dar. (Vgl. hierzu auch (3) und (4).) Man sieht, daß die Empfindlichkeit der Brücke mit U und C_N , bis zu einem gewissen Grad auch mit ω wächst. Will man die Empfindlichkeit der Messungen beurteilen, so muß man selbstverständlich auch die Empfindlichkeit des Nullinstrumentes kennen. Das Nadelvibra-

tionsgalvanometer besitzt z. B. eine Empfindlichkeit von $0,15 \mu\text{A}/\text{mm}$ bei 50 Hz und einen Widerstand von $r = 70 \Omega$, $x = 100 \Omega$.

6. Anwendung. Die Schering-Meßbrücken lassen sich praktisch zur Untersuchung aller Isoliermittel, welche Form sie auch haben, und in welchem Zustand sie sich auch befinden, verwenden. Es sind Messungen bei einer Kapazität von $10^1 \dots 10^{10} \mu\text{F}$ ($1,11 \mu\text{F} = 1 \text{cm}$) praktisch ausgeführt. Der Frequenzbereich ist nach oben zunächst durch das Nullinstrument beschränkt, dann durch die Wicklung der Widerstände und die Leitungsführung; praktisch liegt die obere Grenze bei etwa 2000 Hz.

Es sei noch die Literatur über einige besonders charakteristische Untersuchungen mit Schering-Meßbrücken angeführt: Generatorwicklung¹⁶, Transformatoröl¹⁸, Kabeltränkmass¹⁹, Koronaverluste an Freileitungen²⁰, verlegte Kabel²¹, Betriebsmessungen an Hartpapier-Isolatoren¹⁵, Messungen in Drehstrom-Kabeln²⁴.

Auch für Massenuntersuchungen an gleichartigen Isolierkörpern läßt sich die Brücke mit gutem Erfolg verwenden. Es muß hier eine Einrichtung geschaffen werden, in die sich der Isolierkörper rasch und sicher einspannen läßt. Die Kapazität des Prüflings soll nicht zu klein gewählt werden. Es ist wohl darauf zu achten, daß zwischen den Prüfelektroden und dem Prüfling kein Luftspalt entsteht, der durch Glimmen zusätzliche Verluste bringt. Die Messung der dielektrischen Verluste gibt wertvolle Aufschlüsse über die allgemeine Güte eines Isoliermaterials und sein Verhalten im elektrischen Feld. Dabei ist die Prüfung ohne Gefahr einer Überbeanspruchung möglich. Die Messung läßt aber eng begrenzte Fehler, z. B. eine Haarspur in einem Porzellanisolator, nicht erkennen.

Die Schering-Meßbrücken haben sich in etwa zehn Jahren dank ihrer Zuverlässigkeit und ihrer einfachen Handhabung ein weites Feld erobert. Die Güte unserer heutigen Isoliermittel ist in hohem Maße der Möglichkeit einer systematischen Untersuchung mit der Schering-Meßbrücke zu verdanken.

Literatur.

1. Semm, Verlustmessungen bei Hochspannung, Arch. Elektrotechn. 13 (1920), S. 30. — 2. Krönert, Wechselstrombrücken, ATM J921—1. — 3. Schering-Burmester, Brücke für dielektrische Verluste, Z. Instrumentenk. 44 (1924), S. 98. — 4. Bormann u. Seiler, Dielektrische Verlustmessungen an einem verlegten Hochspannungskabel, Elektrotechn. Z. 46 (1925), S. 114. — 5. Schering, Messung des dielektrischen Verlustfaktors an langen Kabeln, Z. Instrumentenk. 45 (1925), S. 191. — 6. Zickner u. Pfestorf, Über die Verwendung der Hochspannungsmeßbrücke nach Schering zur Untersuchung von großen Kapazitäten, Z. techn. Phys. 12 (1931), S. 210. — 7. Zickner u. Pfestorf, Methoden zur Messung großer Kapazitäten und ihrer Verlustwinkel, Helios 37 (1931), S. 389. — 8. Palm, Über neuere Hochspannungsmeßgeräte, Elektrotechn. Z. 47 (1926), S. 873 u. 904. — 9. Schering u. Vieweg, Ein Meßkondensator für Höchstspannungen, Z. techn. Phys. 9 (1928), S. 442. — 10. Beldi, Eine Hochspannungsbrücke für Verlustmessungen an Isolierstoffen, Bulletin Schweiz. El. 21 (1930), S. 197. — 11. Rosenlöcher u. Rühlemann, Äußere Einflüsse bei der Messung dielektrischer Verluste von Hartpapierdurchführungen, Arch. Elektrotechn. 22 (1929), S. 21. — 12. Schaudinn, Fehlerquelle durch ungeeignete Schirmung bei Verlustmessungen, E. wirtsch. 28 (1929), S. 248. — 13. Tschiassny, Meßgenauigkeit der Scheringbrücke, Arch. Elektrotechn. 20 (1927), S. 248. — 14. Schering, Die Empfindlichkeit einer Wechselstrommeßbrücke, Elektrotechn. Z. 52 (1931), S. 1138. — 15. Miller, Die Empfindlichkeit der Scheringbrücke, Elektrotechn. u. Maschinenb. 50 (1931), S. 677. — 16. Kautzmann, Die Messung dielektrischer Verluste an Hartpapierdurchführungen u. Generatoren in Anlagen, Elektrotechn. Z. 50 (1929), S. 1401. — 17. Hanauer, Die Anwendung der Methode der dielektrischen Verlustmessung zur Überwachung von Generatorwicklungen, Elektro-Journal 1926, S. 417. — 18. Möllinger, Verlustwinkelmessung an Transformatoröl, Arch. Elektrotechn. 20 (1927), S. 450. — 19. Birnbaum, Dielektrische Verluste an Kabeltränkmass, Elektrotechn. Z. 45 (1924), S. 229. — 20. Müller, Koronaverlustmessungen an der 150-kV-Übertragungsleitung Innertkirchen Mühleberg, Bull. Schweiz. El. V. 22 (1931), S. 210. — 21. Ströhbach, Dielektrische Verlustmessungen an Hochspannungskabeln, El. wirtsch. 27 (1928), S. 116. — 22. Kramer, Verlustwinkelmessungen an dem 65-kV-Kabel Ahlem—Lehrte Nisburg, BBC-Nachr. 19 (1932), S. 37. — 23. Frensdorff, Die Bedeutung der dielektrischen Verlustmessungen an Hartpapierisolation für Höchstspannungsbetriebe, El. wirtsch. 26 (1927), S. 433. — 24. Bormann u. Seiler, Dielektrische Verlustmessungen an Drehstromkabeln bei betriebsmäßiger Beanspruchung, Elektrotechn. Z. 49 (1928), S. 239. — 25. Potthoff, Messung dielektrischer Verluste bei Drehstrom, Elektrotechn. Z. 52 (1931), S. 474.