

Ballistische Galvanometer

Fluxmeter, Kriechgalvanometer

V J

727-1

Verfasser: Dr. H. Roth, Frankfurt a. M.

DK 537.741
621.317.715

Allgemeine Kennzeichnung. Ballistische Galvanometer und Kriechgalvanometer sind Drehspulinstrumente, deren Name sich von den für sie charakteristischen Bewegungsformen herleitet. Sie dienen zur Messung von Strom- bzw. Spannungsintegralen, wie solche z. B. bei der Entladung von Kondensatoren oder bei der Veränderung magnetischer Flüsse in Induktionsspulen auftreten. Bei den ballistischen Galvanometern bewirkt der durchgeleitete Stromstoß einen Ausschlag der Drehspule, welche darauf in periodischer oder aperiodischer Bewegung wieder in ihre Ruhelage zurückkehrt. Man beobachtet den ersten Umkehrpunkt. Das Kriechgalvanometer oder Fluxmeter ist eine Abart des ballistischen Galvanometers mit besonders großer (kriechender) Dämpfung. Ein Stromstoß bewirkt bei ihm eine rasche Veränderung der Galvanometereinstellung in eine neue, und man beobachtet nicht wie bei dem ballistischen Galvanometer den Umkehrpunkt, sondern die Ausschlagsweite.

Bewegungsgleichungen.

Im folgenden werden nachstehende Bezeichnungen verwendet:

- J = Trägheitsmoment,
- D = Richtvermögen,
- p = Dämpfungsfaktor,
- α = Dämpfungsgrad,
- γ = Ausschlagswinkel,
- $\dot{\gamma}$ = Winkelgeschwindigkeit,
- t = Zeit,
- $\tau = \omega_0 \cdot t$ = dimensionsloser Zeitmaßstab,
- T_0 = Schwingungsdauer in ungedämpftem Zustand,
- T = Schwingungsdauer in gedämpftem Zustand,
- $\omega_0 = \text{Kreisfrequenz} = \frac{2\pi}{T_0}$,
- C = statischer Reduktionsfaktor = Strom, der den Ausschlag 1 hervorruft,
- P = ballistischer Reduktionsfaktor = Elektrizitätsmenge, die den Ausschlag 1 hervorruft,
- q = dynamische Galvanometerkonstante = Drehmoment das von der Stromeinheit bewirkt wird.

Die Bewegungsgleichungen der ballistischen und Kriechgalvanometer leiten sich aus den allgemeinen Galvanometergleichungen ab.

Man macht die vereinfachende Bedingung, daß das auf das Galvanometer wirkende Zeitintegral der EMK abgeklungen sei, ehe eine merkliche Verschiebung eingetreten ist, d. h. für $t = 0$, sei $\gamma = 0$ und $\dot{\gamma}_{t=0} = 0$. Für das Galvanometer heißt das, daß von den drei die Bewegung bestimmenden Kräften, nämlich Träg-

heitswiderstand, rücktreibendes Drehmoment und Bremskraft im Moment des Stromdurchgangs die beiden letzten gegen die erste zu vernachlässigen sind. Für verschiedene Dämpfungsgrade ergeben sich dann bei Einführung des dimensionslosen Zeitmaßes

$$\tau = \omega_0 \cdot t = \frac{2\pi}{T_0} \cdot t$$

die Bewegungsgleichungen

$$\gamma = \dot{\gamma}_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \cdot e^{-\alpha \tau} \cdot \sin h\tau \quad \sqrt{\alpha^2 - 1} \quad (1a)$$

für $\alpha > 1$, aperiodische Bewegung,

$$\gamma = \dot{\gamma}_0 \cdot \tau \cdot e^{-\tau} \quad (1b)$$

für $\alpha = 1$, aperiodischer Grenzfall,

$$\gamma = \dot{\gamma}_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \alpha^2}} \cdot e^{-\alpha \tau} \cdot \sin \tau \cdot \sqrt{1 - \alpha^2} \quad (1c)$$

für $\alpha < 1$, periodische Bewegung.

In Bild 1 ist für verschiedene Dämpfungsgrade die Galvanometerbewegung für jeweils gleiche Anfangsgeschwindigkeit $\dot{\gamma}_0$ dargestellt. Die Kurven lassen verschiedene Eigenschaften der ballistischen Bewegung erkennen:

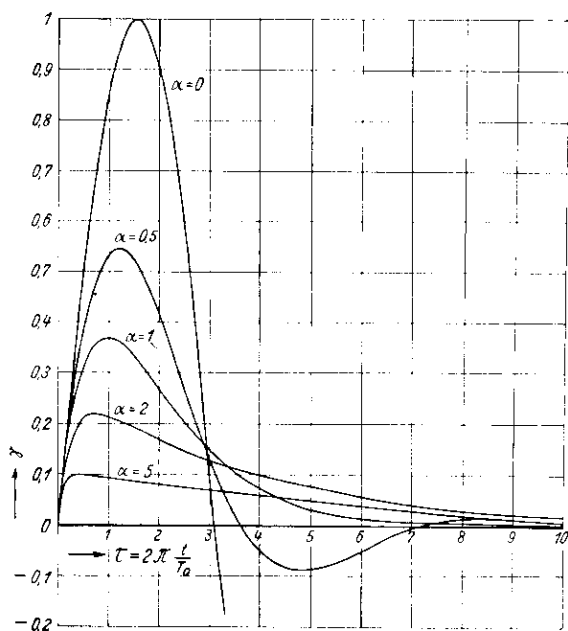


Bild 1. Bewegung eines ballistischen Galvanometers bei verschiedenen Dämpfungsgraden und gleicher Anfangsgeschwindigkeit.

Der ballistische Ausschlag ist bei gleicher Anfangsgeschwindigkeit von der Dämpfung abhängig und nimmt mit zunehmender Dämpfung ab. Die Größe der maxi-

malen Ablenkungen bei verschiedenen Dämpfungsgraden ist

$$\gamma_{\max} = \dot{\gamma}_0 \cdot e^{-\frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \cdot \arctg \frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha}} \quad \text{für } \alpha > 1 \quad (2a)$$

$$\gamma_{\max} = \dot{\gamma}_0 \cdot \frac{1}{e} \quad \text{für } \alpha = 1 \quad (2b)$$

$$\gamma_{\max} = \pm \dot{\gamma}_0 \cdot e^{-\frac{n}{1-\alpha^2}} \cdot e^{-\frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \cdot \arctg \frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha}} \quad \text{für } \alpha < 1, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2c)$$

Daraus geht hervor, daß bei allen Dämpfungsgraden der maximale Ausschlag der Anfangsgeschwindigkeit proportional ist. Bild 2 zeigt graphisch die Abhängigkeit des ballistischen Ausschlages vom Dämpfungsgrad.

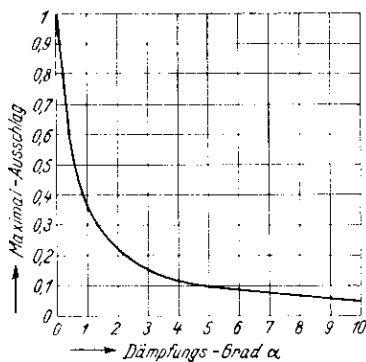


Bild 2. Ballistischer Galvanometer-Maximalausschlag als Funktion des Dämpfungsgrads bei gleicher Anfangsgeschwindigkeit.

Es läßt sich zeigen, daß der ballistische Ausschlag der durchgeflossenen Elektrizitätsmenge proportional ist:

$$\gamma_{\max} = q \cdot \int i \cdot dt = q \cdot Q \quad (3)$$

Die **Ausschlagszeit** nimmt mit zunehmender Dämpfung ab, die Rückkehrzeit wird mit zunehmender Dämpfung größer. Die Werte für die Ausschlagszeiten bei verschiedenen Dämpfungsgraden sind

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{1-\alpha^2}} \cdot \ln \frac{\alpha + \sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha - \sqrt{1-\alpha^2}} \quad \text{für } \alpha > 1 \quad (4a)$$

$$\tau_{\max} = 1 \quad \text{für } \alpha = 1 \quad (4b)$$

$$\tau_{\max} = \frac{1}{\sqrt{1-\alpha^2}} \cdot \arctg \frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha} \quad \text{für } \alpha < 1 \quad (4c)$$

Bild 3 zeigt graphisch diese Abhängigkeit.

Den Maximalwert der Ausschlagszeit hat die ungedämpfte Bewegung ($\alpha = 0$), hierbei wird

$$\tau_{\max} = \frac{\pi}{2} \left(t = \frac{T_0}{4} \right)$$

Bei aperiodischer Bewegung ($\alpha = 1$) ist

$$\tau_{\max} = 1, \text{ also } t = \frac{T_0}{2\pi} \sim \frac{T_0}{6}$$

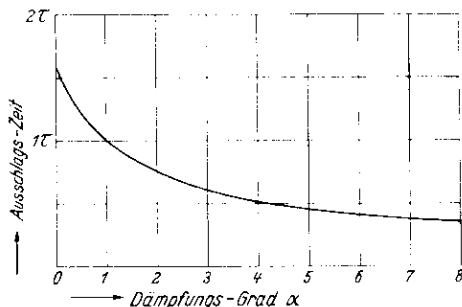


Bild 3. Ballistische Galvanometer-Ausschlagszeit als Funktion des Dämpfungsgrads.

Aus Bild 1 geht auch noch hervor, daß bei geringen Dämpfungsgraden die Bewegungskurven im Umkehrpunkt spitzer sind als bei höheren Dämpfungsgraden. Die Umkehrpunkte sind also bei stärkerer Dämpfung besser zu beobachten.

Wichtig für die Beurteilung des Galvanometers ist auch die **Rückkehrzeit** weil erst danach das Galvanometer wieder für eine neue Messung bereit ist. Nimmt man als Rückkehrzeit die Zeit an, in welcher der Ausschlag auf $1/n$ des Maximalausschlages zurückgegangen ist, so ist diese für periodische Bewegung

$$\tau = \frac{\ln n}{\alpha \cdot \omega_0} \quad (5)$$

und errechnet sich für den aperiodischen Grenzfall

$$(\alpha = 1) \text{ aus } \tau' = \frac{1}{e' - 1} = \frac{1}{n} \quad (6)$$

Vom Umkehrpunkt an gerechnet ($\tau = 1$) ergibt sich dann für $n = 100$: $\tau_{\text{Rückkehr}} = 6,6$; für $n = 1000$: $\tau_{\text{Rückkehr}} = 9,2$.

Empfindlichkeit. Die ballistische Empfindlichkeit ist der statischen Empfindlichkeit proportional. Sie hängt weiterhin von der Schwingungsdauer und dem Dämpfungsgrad ab.

Für die ungedämpfte Bewegung ($\alpha = 0$) ist

$$P = C \cdot \frac{T_0}{2\pi} = C \cdot \frac{1}{\omega_0} \quad (7a)$$

Für die periodische Bewegung ($\alpha < 1$) ist

$$P = C \cdot \frac{1}{\omega_0} \cdot e^{-\frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \cdot \arctg \frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha}} \quad (7b)$$

Für den aperiodischen Grenzfall ($\alpha = 1$) ist

$$P = C \cdot \frac{1}{\omega_0} \cdot e \quad (7c)$$

Für den aperiodischen Grenzfall ist also die ballistische Empfindlichkeit $\frac{1}{2,7}$ der Empfindlichkeit im ungedämpften Zustand.

Abhängigkeit des ballistischen Ausschlags von der Stromdauer. Bei der Ableitung der Formeln war vorausgesetzt, daß der Stromimpuls vor Beginn der Spulenbewegung abgeklungen sei. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so mißt man den Stromimpuls zu klein. Der Fehler $\Delta\gamma$ ist

$$\Delta\gamma = F \cdot \frac{\vartheta^2}{T^2} \quad (8)$$

wobei ϑ die Stromdauer bedeutet und F für konstanten Strom = 1,6 ist. Soll der Fehler unter 1% bleiben, so muß $\frac{\vartheta}{T} < 1/12$ sein. F hängt von der Stromform ab und ist für andere Stromformen, die kein Minimum haben, kleiner als 1,6.

Folgerungen für Konstruktion und Benutzung ballistischer Galvanometer. Die nachstehenden Betrachtungen gelten für geringe Dämpfungsgrade.

1. Ballistische Galvanometer müssen eine hohe Eigenschwingungsdauer haben, damit die Dauer des zu messenden Impulses ihr gegenüber als klein anzusehen ist. Dies läßt sich durch großes Trägheitsmoment oder kleine Direktionskraft erzielen.

2. Um hohe ballistische Empfindlichkeit zu erreichen ist hohe statische Empfindlichkeit anzustreben.

3. Geringe Dämpfung erhöht die Ausschlagsweite, bewirkt jedoch rasche Umkehr im Punkt maximalen Ausschlags.

Es ist deshalb, um genauer ablesen zu können, ratsam, die Dämpfung zu erhöhen, am besten bis zum aperiodischen Grenzzustand.

Ausführungsformen. Man kann je nach der verlangten Empfindlichkeit ballistische Galvanometer als spitzengelagerte oder bandaufgehängte Instrumente mit Zeiger- oder Spiegelablesung bauen. Sie entsprechen hinsichtlich des Magnetsystems, der Spulenwicklung und dem äußeren Aufbau vollkommen den normalen Drehspulgeräten. Besonderheiten liegen nur in den Maßnahmen zur Erzielung einer großen Schwingungsdauer. Aus Gründen der Einstellsicherheit, der Nullpunkt Konstanz kann man die Richtkraft nicht beliebig herabsetzen, man muß also dem ballistischen Galvanometer ein großes Trägheitsmoment geben.

Naheliegender ist es, der Drehspule selbst eine solche Form zu geben, daß ein großes Trägheitsmoment erzielt wird, wie es die Firma Carpentier Paris tut. Während die Breite normaler Drehspulrahmen zwischen etwa 10...30 mm beträgt, haben die Spulen der ballistischen Instrumente dieser Firma eine Breite von 150 mm bei einer Höhe von 64 mm. Da Magnete, Spulenkern usw. in gleichem Maße wachsen, bekommen solche Instrumente große Ausmaße.

Im allgemeinen gibt man deshalb der Drehspule ein zusätzliches Trägheitsmoment durch Hinzufügen von Gewichten. Es ist vorteilhaft, die Zusatzgewichte möglichst entfernt von der Drehachse anzubringen, weil man dann bei gleichem Systemgewicht ein höheres Trägheitsmoment erzielt.

Bild 4 zeigt eine Ausführung von S. & H. womit Schwingungsdauern bis zu 60 s erreicht werden.

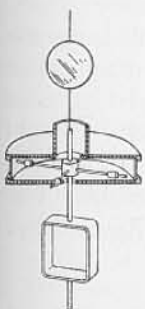


Bild 4. Zusatzgewichte eines ballistischen Galvanometers von S. & H.

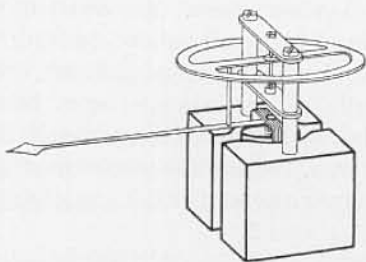


Bild 5. Besonders gelagertes Zusatzgewicht eines ballistischen Galvanometers (DRP. 485 611, Gossen).

Bei ballistischen Instrumenten, wie sie in der Röntgenpraxis als mAs-Messer zum Messen kurzer Stromimpulse bei Belichtungen benutzt werden, beschwert man die Zeigerspitze durch aufgelötete Metallplättchen.

Von der Firma Gossen ist eine Ausführung nach Bild 5 vorgeschlagen worden (DRP. 485 611), bei der eine zusätzliche träge Masse gesondert gelagert und mit dem Drehspulsystem starr gekuppelt ist.

H. & B. versehen verschiedene Galvanometer mit einer ballistischen Zusatzeinrichtung, welche erlaubt, die Galvanometer als gewöhnliche Galvanometer mit normaler Schwingungsdauer und als ballistische Instrumente mit großer Schwingungsdauer zu benutzen. Das Zusatzgewicht kann entweder von Hand aufgelegt (Bild 6) oder bei einer anderen Konstruktion durch Umlegen eines Hebels aufgelegt werden (Bild 7).

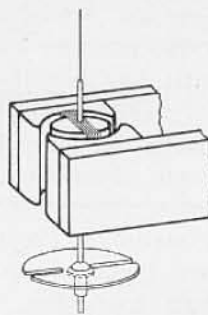


Bild 6. Ballistisches Galvanometer mit Zusatzgewicht (H. & B.).

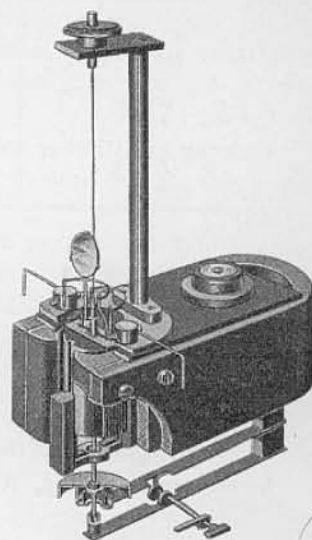


Bild 7. Ballistisches Galvanometer mit Zusatzgewicht (H. & B.).

Empfindlichkeit. Eigenschaften im Handel befindlicher Instrumente: Die von verschiedenen Herstellern auf dem Markt befindlichen ballistischen Galvanometer haben als Spiegel- oder Zeigerinstrumente eine Schwingungsdauer (in offenem Zustand) zwischen 22 und 60 s. Die Ausschlagszeiten in aperiodischem Grenzzustand liegen demzufolge zwischen 3,5 und etwa 10 s.

Bei Spiegelinstrumenten liegen die Empfindlichkeiten im aperiodischen Grenzzustand in der Größe von 10...60 nAs/mm bei 1 m Skalenabstand, bei Zeigerinstrumenten bei etwa 0,5 μ As/Skalenteil.

Bei der Auswahl der Galvanometer ist zu beachten, ob man Ladungsmessungen an Kondensatoren oder Messungen an Induktionsspulen machen will. Im ersten Fall arbeitet man mit offenem Stromkreis, wird also ein Galvanometer mit hohem äußerem Grenzwiderstand vorziehen. Im letzteren Fall jedoch ein solches, bei dem der Induktionsspulenwiderstand möglichst dem äußeren Grenzwiderstand nahekommmt.

Empfindlichkeitsregler. Zur Empfindlichkeitsregelung sind für ballistische Galvanometer besondere Nebenschlüsse erforderlich, die für die verschiedenen Empfindlichkeitsstufen nicht nur den Dämpfungswiderstand des Galvanometers, sondern auch den Widerstand des Gesamtstromkreises konstant halten. Volkmann hat für solche Regler Widerstandskombinationen Anleitung für ihre Berechnung angegeben. Bild 8 zeigt die Schaltung eines solchen Reglers mit zwei Stöpseln für eine Prüfpule von 10 Ω und einen Galvanometerwiderstand von 100 Ω . Wie leicht ersichtlich,

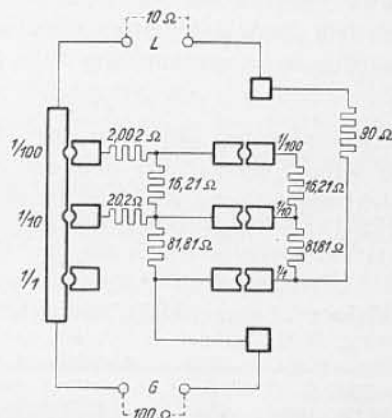


Bild 8. Empfindlichkeitsregler nach Volkmann.

ist bei allen drei Stöpelstellungen der Schließungswiderstand stets 200Ω , wobei das Galvanometer jeweils von $\frac{1}{15}$, $\frac{1}{10}$ bzw. $\frac{1}{100}$ des Gesamtstroms durchflossen wird.

Eichung ballistischer Galvanometer. 1. Durch Entladen eines Kondensators bekannter Größe und Aufladung.

2. Durch Berechnung aus der statischen Empfindlichkeit des Galvanometers unter Beobachtung der Schwingungsdauer und Dämpfung nach den Gleichungen (7).

3. Mit Hilfe eines Normals der gegenseitigen Induktion.

Fluxmeter, Kriechgalvanometer.

Bewegungsgleichung, Ausschlagszeit. Bei der Ableitung der Bewegungsgleichung der ballistischen Galvanometer war Voraussetzung, daß der Stromstoß abgeklungen sei, ehe die Drehspule ihre Ruhelage verlassen hat. Ist dies nicht mehr der Fall, was dann eintritt, wenn das Galvanometer sehr stark gedämpft ist, die Galvanometerbewegung also nicht mehr durch den Trägheitswiderstand sondern durch die Dämpfung bestimmt wird, so treten andere Bewegungsformen auf. Die Ausschlagszeiten werden sehr klein, die Rückkehr geht sehr langsam vor sich (kriechende Bewegung). Die Ausschlagszeit wird für sehr große Dämpfungsgrade

$$\tau = \frac{\ln 2\alpha}{\alpha} \quad (9)$$

Für $\alpha = 65$, d. h. z. B. für ein Galvanometer, dessen äußerer Grenz Widerstand 1300Ω beträgt, welches jedoch über 20Ω geschlossen wird, ist die Ausschlagszeit

$$\tau = \frac{1}{13}, \text{ d. h. } \frac{1}{13}$$

der Ausschlagszeit in aperiodischem Zustand.

Ist bei diesem Galvanometer $T_0 = 36,5 \text{ s}$, so ist die Ausschlagszeit in dem kriechenden Zustand $T = 0,4 \text{ s}$. Die abklingende Bewegung erfolgt sehr langsam.

Für sie gilt ($\alpha > 4$)

$$\gamma = \dot{\gamma}_0 \frac{1}{2\sqrt{\alpha^2 - 1}} \cdot e^{-(\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 1}) \cdot t} \quad (10)$$

Für nicht zu große τ vereinfacht sich diese Gleichung zu

$$\gamma = \dot{\gamma}_0 \frac{1}{2\sqrt{\alpha^2 - 1}} \left(1 - \frac{\tau}{2\alpha}\right) \quad (10a)$$

Während bei dem ballistischen Galvanometer

$$\gamma_{\max} = q \cdot Q = q \cdot \int i \, dt \quad (3)$$

war, ist bei dem stark gedämpften Galvanometer bei Vernachlässigung der Luftdämpfung

$$\int e \cdot dt = q \cdot (\gamma_1 - \gamma_0) \quad (11)$$

d. h. das Galvanometer geht von der Anfangslage plötzlich in seine Endlage über und das Zeitintegral über die elektromotorische Kraft ist proportional der Ausschlagsänderung. Der Proportionalitätsfaktor ist

gleich der dynamischen Galvanometerkonstanten, und unabhängig vom Schließungswiderstand des Galvanometerkreises und davon, ob der Impuls plötzlich oder langsam erfolgt. Die Beziehung ist unter Vernachlässigung des Trägheitsmomentes und der Direktionskraft erhalten. Die hierdurch bedingten Fehler bleiben jedoch unter 1% , wenn der Schließungswiderstand nur $\frac{1}{15}$ des aperiodischen Grenz Widerstandes, unter 2% , wenn er unter $\frac{1}{30}$ des aperiodischen Grenz Widerstandes bleibt.

Wenn man γ_1 und γ_0 ungefähr symmetrisch zum natürlichen Nullpunkt des Galvanometers wählt, so werden die Fehler noch kleiner.

Vorteile gegen ballistische Galvanometer. Empfindlichkeit. Der Vorzug von Fluxmetern und Kriechgalvanometer gegenüber ballistischen Galvanometern liegt in der leichteren Beobachtung und in der Verkürzung der Meßzeiten, was besonders bei größeren Meßreihen angenehm empfunden wird. Man beobachtet nicht Nullage und Umkehrpunkt sondern zwei Zeigerstellungen. Eine Einbuße an Empfindlichkeit durch die starke Dämpfung braucht nicht einzutreten, wenn man mit niederohmigen Prüfspulen bei magnetischen Messungen arbeitet. Die wegen der Dämpfung kleineren Empfindlichkeit des Kriechgalvanometers wird dann durch den kleinen Schließungswiderstand des Stromkreises wieder wettgemacht. Man erreicht so bei Spiegelinstrumenten eine Empfindlichkeit von etwa $7 \text{ Mikro Voltsekunden je mm}$, d. s. $\sim 0,2 \mu\text{As/mm}$, bei Zeigerinstrumenten $1^\circ = \sim 20 \text{ mVs} : \sim 1 \text{ mA}$.

Zeigerrückführung. Bei der starken Dämpfung würde es un bequem lang dauern, wenn man das Galvanometer von selbst in die Anfangslage zurückgehen lassen. Man versieht deshalb entweder den Spulenkreis mit einem Schalter, mit dem man einen Zusatzwiderstand einschaltet, der aperiodische Einstellung bewirkt, oder man benutzt eine Einrichtung um das Galvanometer durch Fremdstrom zurückzuführen. Man kann diese dann gleichzeitig mit einem Empfindlichkeitsregler vereinigen. Eine Schaltung zeigt Bild 9.

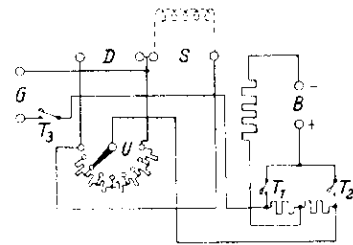


Bild 9. Kriechgalvanometer. Empfindlichkeitsregler mit Zeigerrückführung durch Fremdstrom.

Eichung von Kriechgalvanometern. Es kommen die oben bei der Eichung ballistischer Galvanometer unter 1. und 3. genannten Verfahren zur Anwendung.

Literatur.

Lehrbücher: 1. Jaeger, Elektrische Meßtechnik. Leipzig, J. A. Barth. — 2. F. Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik. Leipzig, B. G. Teubner. — 3. O. Werner, Empfindliche Galvanometer für Gleich- und Wechselstrom. Berlin u. Leipzig, Walter de Gruyter & Co., 1928. — **Aufsätze:** 4. E. Dorn, Wied. Ann. 17 (1882), 654. — 5. Diebelhorst, Ann. d. Phys. 9 (1902), 458 u. 712. — 6. Wilson, Proc. Phys. Soc. London 34 (1922), 55...65. — 7. H. Zölllich, Wiss. Veröff. Siemenskonzern Bd. 11, 1922, 378...400. — 8. Grassot, Journ. de Phys. 3 (1904), 696...700. — 9. Darbois et G. Ribaud, Ann. de Phys. (10), 1. (1924), 173...212. — 10. Busch, Z. techn. Physik 7 (1926), 361...371. — 11. Voikmann, Ann. Physik 10 (1903), 217...221.