

ELEKTRIZITÄTSWIRTSCHAFT

**Zeitschrift der Vereinigung Deutscher
Elektrizitätswerke - VDEW**

im Verlag der Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der
Elektrizitätswerke, Frankfurt a. M., Bockenheimer Landstr. 109

Sonderdruck 323

Band 54 (1955), Heft 5, Seite 140-145

Schnellschreiber bei der Aufzeichnung von Störungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen

Von Dipl.-Ing. Max Erich, Karlsruhe

Schnellschreiber bei der Aufzeichnung von Störungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen

Von Max Erich, Karlsruhe

Allgemeines

Etwa gleichzeitig mit dem Beginn des Einbaus von Distanzrelais in den Hochspannungsnetzen um die Mitte bis Ende der 20er Jahre wurden auch die ersten Schnellschreiber als Störschreiber [1] eingebaut. Sie beschränkten sich zunächst auf die Aufzeichnung einer Dreiecksspannung, um dadurch einen Einblick in die Lauf- und Auslösezeiten der Relais zu gewinnen. Dagegen reichte zur Klärung der elektrischen Vorgänge während des Ablaufs der Störungen die Aufzeichnung einer Spannung keineswegs aus. Um diesen Mangel zu beheben, wurden die Schreiber bald mit drei Meßsystemen zur Aufzeichnung der drei Dreiecksspannungen oder Leiter-Erdspannungen ausgerüstet. Mit dem weiteren Wachsen der Hochspannungsnetze ergab sich aber eine Reihe von Fragen, die nur bei gleichzeitiger Aufzeichnung der Dreieck- und Leiter-Erdspannungen zu beantworten waren. Einige fortschrittliche Werke hatten daher schon vor dem Krieg durch mechanische Kuppelung zweier Dreifachschreiber Sechsfachschreiber in ihren Netzen eingebaut.

Nach dem Krieg erhielt die noch keineswegs abgeschlossene Entwicklung der Störschreiber einen starken Impuls. Es zeigte sich nämlich, daß die Probleme in den Hoch- und Höchstspannungsnetzen, in denen die Schreiber bisher meist eingesetzt waren, im allgemeinen durchsichtiger als in den Mittelspannungsnetzen sind, denn gerade die Mittelspannungsnetze haben durch den erheblich gesteigerten Energiebedarf ein Wachstum und eine Vermaschung erfahren, die zwar für die Sicherheit der Energielieferung an die Verbraucher und hinsichtlich der Erzielung geringer Netzverluste Vorteile bringen, die Anforderungen an den Schutz und die Störungsaufklärung aber nennenswert erhöhen.

Die heute verfügbaren Störschreiber lassen sich in zwei Hauptgruppen mit und ohne Erinnerungsvermögen für die Vorgänge unmittelbar vor bzw. bei Eintritt der Störung unterteilen.

Störschreiber mit Erinnerungsvermögen zeichnen in der Regel sowohl im störungsfreien als auch im gestörten Betrieb den Spannungs- bzw. den Stromverlauf in großem Zeitmaßstab auf. Um unnötigen Materialverbrauch zu vermeiden, werden die Aufzeichnungen des störungsfreien Betriebes nach kurzer Zeit wieder gelöscht. Nach diesem Verfahren arbeitet der Perturbograph von *Masson-Carpentier* sowie ein in Entwicklung befindlicher Magnetbandschreiber auf der Grundlage des Magnetophonbandes.

Bei dem Perturbographen werden die Werte auf einer Farbtrommel kurzfristig gespeichert und bei jedem Umlauf gelöscht. Nur im Fall einer Störung erfolgt ein Abdruck der auf der Farbtrommel gespeicherten Werte durch Anpressen einer Papierwalze. Infolge der räumlichen Lage von Abdruck- zur Aufzeichnungsstelle auf der Farbtrommel — sie liegen etwa um 90° versetzt — kommt zunächst bei Anregung durch eine Störung noch eine Aufzeichnung des störungsfreien Betriebes zum Abdruck. Sie entspricht der Zeit, die die Farbwalze für die Drehung um etwa 90° von

der Aufzeichnungs- zur Abdruckstelle — das sind etwa 0,7 s abzüglich der Eigenzeit der Hilfsrelais — benötigt.

Bei dem zur Zeit in Entwicklung stehenden Magnetbandschreiber werden die Werte statt auf einer Farbwalze auf einem Magnetophonband gespeichert, das im Normalbetrieb laufend gelöscht wird. Im Gegensatz zum Perturbographen benötigt dieser Störschreiber allerdings ein Gerät zur Übertragung der Aufzeichnungen des Magnetophonbandes auf einen Film.

Störschreiber ohne Erinnerungsvermögen sind weitaus am meisten verbreitet. Hierunter fallen alle die Schreiber, die erst nach Eintritt der Störung den Verlauf der Spannungen oder der Ströme in einem großen Zeitmaßstab aufzeichnen, während im Normalbetrieb entweder gar keine Aufzeichnungen oder aber in einem so kleinen Maßstab erfolgt, daß das zeitliche Auflösungsvermögen zur Rekonstruktion der Vorgänge bei Eintritt der Störung selbst nicht ausreicht. Hierzu gehören vor allem die Schreiber mit Tinten- oder Metallpapierregistrierung, die gleichzeitig die Aufgabe normaler Registrierinstrumente mit übernehmen können. Durch Vorschalten eines Vierpols [2] mit einer nennenswerten Laufzeitverlängerung für elektrische Vorgänge vor einen Störschreiber ohne Erinnerungsvermögen kann dieser ein Erinnerungsvermögen erhalten, wobei im störfreien Betrieb in kleinem und im störbehafteten Betrieb in großem Zeitmaßstab geschrieben wird.

Eigenzeiten

Die neuen Entwicklungen dieser Schreiber im engeren Sinn zielen dahin, die Einstellzeit der Meßsysteme bei genügender Dämpfung zur Vermeidung des Überschwingers zu verringern und die für die Anregung und die Umschaltung auf großen Papiervorschub erforderliche Eigenzeit möglichst herabzudrücken. Diese Zeiten konnten in den letzten Jahren von 100 ms auf etwa 50 ms herabgesetzt werden. Dadurch ist allerdings der Mechanismus empfindlicher und der wirtschaftliche Aufwand größer geworden. Da eine weitere Senkung von 50 ms z. B. auf 30 ms kein wesentlich tieferes Eindringen in die Störungsverhältnisse zuläßt und das Erreichen einer Eigenzeit 0 mit diesen Konstruktionen ohnedies grundsätzlich nicht möglich ist, erscheint es fraglich, ob eine weitere Herabsetzung im Hinblick auf einen robusten und billigen Schreiber zumindest für die Mittelspannungsnetze überhaupt empfehlenswert ist. Für die Hoch- und Höchstspannungsnetze ist die heute erzielte Reduzierung auf etwa 50 ms besonders wertvoll, da die Kommandozeiten des in diesen Netzen verwendeten Schutzes bei 60 ms liegen. Unter Berücksichtigung einer Schalterzeit von 40 ms ergeben sich für die gesamte Dauer einer Störung nur 100 ms, und es ist notwendig, daß die Einstellzeiten der Meßgeräte wesentlich kürzer sind.

Wie oben erwähnt, können Störschreiber ohne Erinnerungsvermögen ein solches durch Vorschalten eines

Vierpols erhalten. Die Laufzeit für den elektrischen Vorgang bis zum Meßsystem wird durch den Vierpol auf 0,1 s erhöht, d. h., sie liegt über der mechanischen Eigenzeit für die Umschaltung von Langsam- auf Schnellvorschub. So einfach diese Lösung erscheint, so liegen ihre Schwierigkeiten in den Anforderungen an den Vierpol, der verzerrungsfrei in einem größeren Frequenzbereich entsprechend den Frequenzen der Umladungsvorgänge arbeiten muß. Ein noch sehr unvollkommener Vierpol mit Verstärker, der nur bis zu 250 Hz verzerrungsfrei arbeitet, kostet schon so viel wie der ganze Schreiber selbst.

Registrierung

Die Meßsysteme erfassen entweder Momentan- oder Mittelwerte. Bei den Schreibern mit Erinnerungsvermögen ist eine Aufzeichnung der Momentanwerte besonders vorteilhaft, da dadurch die wichtigen Umladungsvorgänge auf den stationären Zustand des gestörten Netzes erkannt werden können. Die Schreiber ohne Erinnerungsvermögen mit Tinten- oder Metallpapieraufzeichnung erfassen stets nur die Mittelwerte. Der in Entwicklung befindliche Magnetbandschreiber wird bis zu 5000 Hz aufzeichnen können. Der Schreiber von *Masson-Carpentier* zeichnet zwar auch Momentanwerte auf, da sein Schwingsystem jedoch mechanisch auf eine Eigenfrequenz von 70 Hz abgestimmt ist, gehen die interessanten höher frequenten Einschwingvorgänge trotz des Erinnerungsvermögens verloren.

Die Amerikaner haben einen echten Störungsszillographen entwickelt. Die Szillographenschleifen mit einer Eigenfrequenz von 3000 Hz zeichnen auf einen Film, der erst im Störfall vorgeschoben wird. Da die ersten sechs (bei sehr sorgfältiger Wartung wenigstens die ersten drei) Halbperioden bis zum Erreichen des hohen Filmvorschubs verloren gehen, stehen Aufwand und Empfindlichkeit des Geräts in der Regel nicht im Verhältnis zum Ergebnis. Diese Störungsszillographen bieten allerdings den Vorteil, daß sie auch mit Leistungsschleifen bestückt werden können.

Bei den Schreibern ohne Erinnerungsvermögen ist eine Mittelwertaufzeichnung ausreichend und wegen der schnelleren Übersicht sogar vorteilhaft, da die Einschaltvorgänge ohnehin nicht erfaßt werden. Unter den Schreibern im engeren Sinne werden in der Regel Störschreiber ohne Erinnerungsvermögen mit Tinten- oder Metallpapieraufzeichnung verstanden. Sie liefern stets Mittelwerte und zeichnen in geraden oder gebogenen Koordinaten auf. Die Aufzeichnung in geraden Koordinaten verdient dabei den Vorzug.

Die Tintenregistrierung, wie sie bis 1945 üblich war, erfordert eine sorgfältige Wartung und einen geeigneten Einbauort. Sind diese Bedingungen erfüllt, so muß trotzdem mit dem Aussetzen der einen oder anderen Aufzeichnung gerechnet werden. Das Aufzeichnen auf Metallpapier vermeidet diese Schwierigkeiten. Die Wartung beschränkt sich auf das Auswechseln des Papiers und das gelegentliche (wöchentliche) Entfernen des sich an den Schreibspitzen bildenden Bartes von Metallstaub mittels Pinsels.

Die Tinten- und Metallpapieraufzeichnungen haben den Vorzug der Pausfähigkeit. Bei Metallpapieraufzeichnungen kommt dieser Vorteil allerdings erst jetzt voll zum Tragen, nachdem es gelungen ist, auch die aufgedruckte Eichteilung mit zu pausen.

Vorschub

Der Vorschub im störungsfreien Betrieb wird in der Regel zu 20 mm/h, im störungsbehafteten Betrieb zu 20 mm/s bzw. 80 mm/s gewählt. Durch die Forderung des zeitgerechten Einspringens nach einem Schnellvorschub ergibt sich daher die Dauer eines solchen zu 24 bis 6 s, entsprechend der Beziehung $24 \text{ h} \times 20 \text{ mm/s} = \text{Dauer eines Schnellvorschubs} \times \text{Geschwindigkeit im Schnellablauf}$.

Die Gegenüberstellung der Aufzeichnungen zweier Störschreiber bei ein und derselben Störung mit einem Schnell-

vorschub von 20 mm/s bzw. 80 mm/s zeigt den Vorteil des höheren Auflösungsvermögens, Bild 1, das besonders bei Konstruktionen von Spannungsdreiecken in

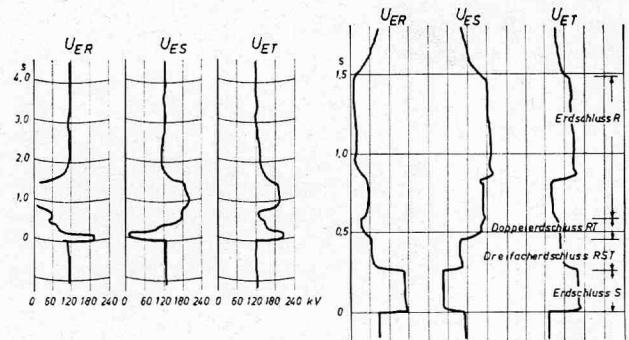


Bild 1. Aufzeichnungen zweier Störschreiber bei einem Mehrfachfehler 220 kV mit einem Schnellvorschub von 20 mm/s und 80 mm/s

Erscheinung tritt. In der Regel dürfte der zweckmäßigste Vorschub zwischen 40 mm/s und 60 mm/s liegen, da hierbei das Auflösungsvermögen genügend groß ist und andererseits die mechanische Beanspruchung des Papiers in erträglichen Grenzen bleibt.

Um einen unnötigen Papierverbrauch zu vermeiden, beschränkt man sich in der Regel auch bei Weiterbestehen der Störung, insbesondere bei Erdschluß, auf einen Schnellablauf. Geht aber der Erdschluß in einen Kurzschluß oder einen Mehrfachfehler über, so muß auf jeden Fall der Schnellablauf erneut in Tätigkeit treten.

Bei der Wahl eines Schnellvorschubs von 60 bzw. 40 mm/s ergibt sich für die Schnellregistrierung eine Zeit von 8 bis 12 s, eine Zeitspanne, in der bei den heute in den Netzen eingebauten schnellarbeitenden Schutzeinrichtungen die kurzschlußartigen Vorgänge in der Regel abgeschaltet sind. Im Hinblick auf eine Vereinfachung der Automatik ist daher zu überlegen, ob der heute vielfach noch übliche mehrmalige Ablauf (Mehrfachabfrage) für die seltenen Ausnahmefälle länger andauernder Kurzschlußvorgänge überhaupt wünschenswert ist.

Meßsysteme

Die Störschreiber im engeren Sinn werden mit 3, 4, 6 oder sogar 7 Meßsystemen ausgerüstet und können sowohl zur Aufzeichnung von Spannungs- als auch von Stromwerten benutzt werden. Spannungsschreiber sind am gebräuchlichsten, da sich mit einem, allenfalls zwei Schreibern in einer Anlage die Verhältnisse bei einer Störung überblicken lassen. Stromschreiber müssen dagegen jedem Leitungsende zugeordnet werden; das bedeutet einen erheblichen Aufwand an Schreibern, der in der Regel, abgesehen von besonders wichtigen Hochspannungsleitungen, nicht zu rechtfertigen ist, obgleich die Stromschreiber für manche Vorgänge, z. B. bei Kurztrennung, eine wesentlich bessere Beurteilung als die Spannungsschreiber zulassen. Bei Spannungsschreibern erscheinen im Hinblick auf die Störungsaufklärung sechs Meßsysteme zur Aufzeichnung der drei Dreieck- bzw. Leiter-Erdspannungen am günstigsten. Sie erleichtern die Aufklärung erheblich gegenüber Schreibern mit weniger Systemen. Bei Verwendung eines Schreibers mit vier Systemen werden in Kabelnetzen gern die drei Dreieck- und die Verlagerungsspannung, bei Schreibern mit drei Meßsystemen die drei Leiter-Erdspannungen aufgezeichnet.

Zeitzeichen

Die neuen Konstruktionen gestatten darüber hinaus, noch eine Reihe von Zeitzeichen mit aufzunehmen, z. B. zur Markierung des Anlaufs von Relais und der Abgabe von Auslösekommandos. Oft ist es im Hinblick auf die Übersichtlichkeit der Streifen vorteilhafter, die Zeitmarkierung

gen auf einen gesonderten Zeitzeichenschreiber, selbstverständlich auch mit Schnellvorschub, zu geben.

Anregung

Die Umschaltung der Störschreiber von Normal- auf Schnellvorschub, d. h. also die Anregung, wird im allgemeinen von einem Spannungssteigerungsrelais, das die Sternpunktterdspannung (Verlagerungsspannung im Erdschlußfall) überwacht, und von drei Unterspannungsrelais die an den Dreiecksspannungen angeschlossen sind, veranlaßt. Da bei den meisten Fehlern eine unmittelbare Erdberührung durch die Leiter oder eine mittelbare über Lichtbogen auftritt, ist die Überwachung der Sternpunktterdspannung (Verlagerungsspannung) ein besonders zuverlässiges Kriterium. Die zusätzliche Überwachung der drei Dreiecksspannungen ist zur Feststellung von Fehlern ohne Erdberührung notwendig. Sie ist aber wesentlich unempfindlicher, da mit Rücksicht auf den veränderlichen Spannungspegel, insbesondere in den Hoch- und Höchstspannungsnetzen, die Ansprechspannung tief gelegt werden muß. Bei entfernt liegenden Fehlern, sowie bei Mehrfach Fehlern über Erde erreicht dann in vielen Fällen der Spannungseinbruch am Einbauort der Schreiber nicht den Ansprechwert.

Wird dagegen als Kriterium für die Anregung der Störschreiber die Spannungsänderung ($-dU/dt$) nach der Zeit gewählt, so gestattet dieses Verfahren eindeutig die Feststellung auch weit entfernt liegender Fehler und den Übergang eines Erdfehlers in einen Mehrfachfehler, selbst wenn die Fehlerpunkte sehr weit auseinander liegen. Da andererseits bei diesem Verfahren eine Anregung immer wieder von neuem bei intermittierenden Erdschlüssen oder Pendelungen erfolgt, sind besondere Maßnahmen zur Begrenzung des Schnellvorschubs bei dieser Art von Fehlern zu treffen.

Heute ist das erstgenannte Verfahren der Überwachung der Spannungen am gebräuchlichsten, obgleich schon 1937 Geräte mit dem Anregeprinzip ($-dU/dt$) auf dem Markt waren [3]. Die Weiterentwicklung der Anregung ($-dU/dt$) wurde aber durch den Krieg unterbrochen und ist erst neuerdings wieder aufgenommen worden.

Die wichtigsten technischen Daten sind nach Angaben der Firmen in **Zahlentafel 1** zusammengefaßt.

Auswahl der Schreiber und Einbauorte

Bei der Wahl des Einbaus von Störschreibern sind die besonderen Netzverhältnisse zu berücksichtigen. In Mittelspannungsnetzen ist die Zahl der Kurzschlüsse, insbesondere aber der Erdschlüsse recht hoch. Daher kommen im wesentlichen aus Gründen der Arbeitersparnis nur Schreiber in Frage, die die Werte unmittelbar aufzeichnen, also eine Filmentwicklung und dergl. vermeiden. Die Metallpapierschreiber verdienen dabei den Vorzug wegen der einfachen Handhabung.

Bei vermaschten Netzen sind mehrere im Netz verteilte Schreiber zweckmäßig. Bei der Auswahl der Standorte ist zu berücksichtigen, daß die Spannungsverhältnisse in den Haupteinspeisestellen meist nicht so aufschlußreich sind wie in entferntesten Punkten des Netzes.

In Hoch- und Höchstspannungsnetzen ist ein größerer Aufwand für die Störungsaufklärung tragbar. Spannungsschreiber werden an allen wichtigen Sammelschienen anzuschließen sein. Darüber hinaus ist es aber zweckmäßig, auch eine Reihe der wichtigsten Leitungen mit Stromschreibern auszurüsten. Da in den Hoch- und Höchstspannungsnetzen die Zahl der Störungen verhältnismäßig klein ist, darf auch der Arbeitsaufwand für eine einzelne Störung größer werden. Außer den Schreibern im engeren Sinn kommen hier daher auch Störschreiber mit Erinnerungsvermögen in Frage.

Erkenntnisse aus den Aufzeichnungen von Störschreibern

Die Masse der Störungen läßt sich allein schon durch die gemeldeten Schalterfälle, durch die Relaislaufzeiten und durch die sonstigen augensichtlichen Umstände recht leicht deuten. Aber gerade die seltenen Fälle, deren Folgen sowohl für die Abnehmer als auch für das EVU meist recht unangenehm sind, lassen sich erst mit Hilfe der Angaben der Störschreiber klären und die sich hieraus ergebenden Maßnahmen zur Vermeidung einer Wiederholung bestimmen. Einige charakteristische Beispiele dieser seltenen, aber auch unangenehmen Fälle aus dem Netzbetrieb sollen dazu dienen, die Erkenntnisse, die aus solchen Aufzeichnungen gewonnen werden können, zu erörtern.

Ungleiche Startzeit der Relais

Das in Bild 2 dargestellte vermaschte Mittelspannungsnetz wird außer von den beiden kleinen Laufwasserkraftwerken in den drei Punkten A F K von der Hochspannungsseite her jeweils mit einer Kurzschlußleistung von etwa 200 MVA bis 300 MVA eingespeist. Der in Station E eingebaute Störschreiber mit Metallpapier-Registrierung und sechs Meßsystemen zeichnet die Leiter-Erdspannungen und die Dreiecksspannungen auf. Aus Platzgründen sind hier abgesehen für den Zeitpunkt 0 s, nur die Dreiecksspannungen wiedergegeben. Der Schnellvorschub beträgt 20 mm/s.

In diesem Netz tritt etwa in der Mitte der Leitung DE II infolge Vogelfluges ein Kurzschluß auf. Dabei brennen zwei Seile herunter. Die fehlerbehaftete Leitung wird in D einseitig vom Netz getrennt. Da die andere Seite der Leitung ohne Leistungsschalter unmittelbar an der Sammelschiene angeschlossen ist, müssen die der Station E vorgelagerten Schalter auslösen. Infolge einer mechanischen Hemmung des Relais in F \rightarrow E nimmt die Störung einen unerwartet großen Umfang an, da nun auch noch die der Station F vorgelagerten Schalter auslösen müssen. Der Fehler wird, wie aus den Leiter-Erdspannungen hervorgeht, zunächst zweipolig eingeleitet und geht dann sofort in einen dreipoligen Kurzschluß über.

Mit Beginn der Störung (Zeitpunkt 0 s) sprechen die Relais in A \rightarrow E, D \rightarrow E II und der Umspanner in F an. Die übrigen Relais in A B C G K bleiben noch unbeteiligt, da der Kurzschlußenergie kürzere Wege zur Fehlerstelle offenstehen. Zunächst trennt im Zeitpunkt 1,0 s der Schalter in D die Leitungsstrecke DE II einseitig vom Netz ab. Damit fließt ein Teil der Kurzschlußenergie über DE I. Das

Zahlentafel 1. Technische Daten der wichtigsten Störschreiber nach Angaben der Hersteller

	Vorschub		Ansprechzeit ¹⁾ ms	System	Meßwerk		Nutzbare Papierbreite mm	Registrierung
	normal mm/h	schnell mm/s			Einstellzeit ms	Stück		
Spannungsstörschreiber								
Bauart A	20/60	20/60	50	Drehspule	50	3 bis 6 ²⁾	3/6 x 35	Tinte Metallpapier
Bauart S	10/20	10/60	50	Drehspule	50	4 ²⁾	4 x 24	Metallpapier
Bauart T	20	20/80	50	Drehspule	30	3 bis 7	6 x 45	Tinte
Pertubograph	0	100	0	Schwinger	Eigenfrequenz Hz 70	7	7 x 10	Aufdruck
Störungsszillograph	0	500	30	Schleifen	3000	12	250	Film

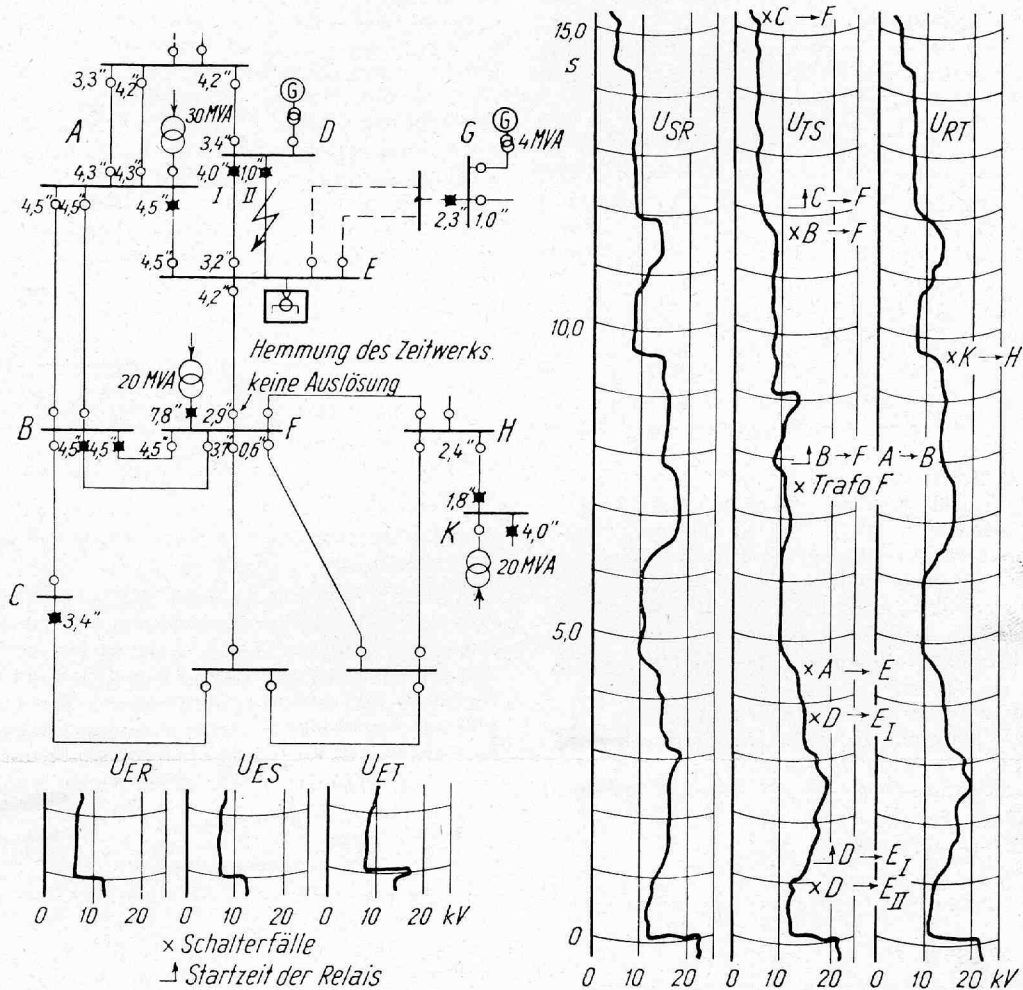
¹⁾ Ansprechzeit ist die Zeit vom Eintritt der Verlagerungsspannung (100 v. H.) bis zur vollendeten Umschaltung auf Schnellvorschub, Ansprechspannung des Überspannungsrelais 20 v. H. ²⁾ Zusätzliche Markierrelais möglich.

Relais D → E I spricht an. Der Schalterfall ist, da nunmehr die gesamte Kurzschlußleistung den Weg über E nimmt, im Störstreifen durch einen leichten Spannungsanstieg gekennzeichnet.

Entsprechend den eingestellten Kennlinien löst das Relais in D → E I zum Zeitpunkt 4,0 s und in A → E zum Zeitpunkt 4,5 s aus. Die Abschaltung D → E I macht sich nur

einstweilen noch durch die wesentlich geringere Kurzschlußimpedanz der Leitung B F E überbrückt.

Im Zeitpunkt 11,8 s fallen die Schalter in B → F. Damit ist die Kurzschlußbahn über C freigegeben. Das Relais wird zum Zeitpunkt 11,8 s angeregt und löst nach der eingestellten Endzeit von 3,4 s zum Zeitpunkt 15,2 s aus. Im Zeitpunkt 11,4 s ist noch ein starker Spannungseinbruch zu



•Bild 2. Ungleiche Startzeit der Relais

durch einen kleinen Spannungseinbruch im Streifen bemerkbar, da der Anteil der Kurzschlußleistung über D infolge der wesentlich größeren Impedanz der Leitung nicht eine so ausschlaggebende Rolle spielt. Die Abschaltung in A → E hat einen wesentlich stärkeren Spannungseinbruch zur Folge, da die Kurzschlußenergie durch den längeren Weg erheblich herabgesetzt wird.

Vom Zeitpunkt 4,5 s ab erfolgt die Speisung in der Hauptsache über den Transformator in F. Die Relais in ABC und K bleiben noch unbeteiligt. Zum Zeitpunkt 7,8 s fällt der Transformatorschalter in F entsprechend der eingestellten Relais-Endzeit. Das ist nunmehr die Startzeit für die Relais in A und B → F E, während das Relais B → C F E infolge der wesentlich größeren Kurzschlußimpedanz der Leitung noch nicht zum Ansprechen kommt. Auch der Transformator in K liefert nunmehr einen erheblichen Anteil der Kurzschlußleistung und bringt das Relais in K—H zum Anlauf. Nach weiteren 1,8 s, zum Zeitpunkt 9,6 s, löst der Schalter in K aus, wobei die Spannung in E infolge Wegfalls eines wesentlichen Anteils der Kurzschlußenergie einen erheblichen Einbruch erleidet. Etwas unklar bleibt die Laufzeitdifferenz der Relais in H und K.

Nun liefert die Kurzschlußenergie im wesentlichen der Transformator in A über B F E. Der Weg B C F E wird

erkennen, der durch die Abschaltung der Wasserkraftgeneratoren durch das Relais in G hervorgerufen sein dürfte.

Die Gesamtstörung nimmt also eine Zeit von 16 s in Anspruch, während die längste Laufzeit der Leitungsrelais nur 4,5 s und des Transformatorrelais 7,8 s beträgt.

Diese Untersuchung zeigt, daß bei der Auswertung der Schleppzeigerangaben die in vielen Fällen stillschweigend gemachte Voraussetzung des gleichzeitigen Starts aller Relais, besonders in vermaschten Netzen, nicht zu recht besteht. Die ungleiche Startzeit der Relais ist auch bei der Aufstellung der Staffelpäne für vermaschte Netze zu berücksichtigen. Die Endzeit der Transformatoren darf nicht zu knapp, d. h. nicht nur um eine Stufe höher als die Endzeit der nachgeschalteten Relais, eingestellt werden. Bei der Festlegung der Transformatoren-Endzeit ist zu berücksichtigen, daß gegebenenfalls zwei oder in seltenen Fällen auch noch mehrere Endzeiten der nachgeschalteten Relais sich addieren können. Mit Rücksicht auf den Schutz des überlagerten Hochspannungsnetzes und der unbedingten Forderung, daß sich eine Störung im Mittelspannungsnetz unter keinen Umständen im Hochspannungsnetz auswirken darf, wird in vielen Fällen eine Kompromißlösung gefunden werden müssen zwischen den erwünschten langen Laufzeiten für die Einspeisung in das Mittelspannungsnetz und den geforderten kurzen Zeiten im Hochspannungsnetz.

Fehlerwechsel, Mehrfachfehler

Kommt in dem vorhergehenden Beispiel vor allem das Wechselspiel zwischen den einzelnen Relais bei Vorliegen eines und desselben Fehlers zu Tage, so ist der nachstehende Störfall durch die Art des Fehlerwechsels gekennzeichnet. In dem dargestellten Mittelspannungsnetz, Bild 3, übernimmt im wesentlichen der Transformator in A die Versorgung. Die Kurzschlußleistung liegt in dem betreffenden Netzteil unter 100 MVA. Der Störschreiber ohne Erinnerungsvermögen ist in der Station G eingebaut und hat einen Schnellvorschub von 40 mm/s. Trotz sorgfältiger Wartung des Tintenschreibers hat eine der sechs Federn ausgesetzt.

Auf der Leitung HK wird durch einen Baumfall das Seil des Leiters T herabgerissen und bildet einen stehenden Erdschluß. Ferner wird ein Ventilableiter des Leiters R in der Station C zerstört. Ein Erdschluß einer Durchführung des Leiters S in der Station E führt zu einem dreipoligen Kurzschluß. Zunächst tritt durch den Seilriß auf der Leitung HK ein Erdschluß in T auf, der etwa eine Stunde, bis zum Zeitpunkt 0 s, stehen bleibt. Infolge der Spannungserhöhung der gesunden Leiter schlägt eine veraltete mit Masse gefüllte Durchführung des Leiters S in der Station E durch und leitet so einen Doppelerdschluß ein, der durch den Schalter H → K in 0,1 s zur Abschaltung der beschädigten

renden Erdschluß hin. Durch die Zerstörung des Ableiters zum Zeitpunkt 6,5 s wird ein Doppelerdschluß R — S eingeleitet, der in B nach 0,1 s und in D → B nach 1,3 s, also zum Zeitpunkt 7,8 s einpolig abgeschaltet wird.

Infolge der beschädigten Durchführung verbleibt der nunmehr nahezu satte Erdschluß in S. Nach weiteren 4,2 s, zum Zeitpunkt 12,0 s, geht der Erdschluß an der Durchführung in Station E zu einem dreipoligen Kurzschluß über. Es kommt zur Auslösung des Schalters in F. Anhand der Angabe des Schleppzeigers des Relais in F erfolgt die Abschaltung in 1,5 s. Dem Störstreifen ist jedoch diese lange Laufzeit nicht zu entnehmen. Nach Lage des Fehlers muß auch mit einer schnelleren Abschaltung gerechnet werden. Die angezeigte Laufzeit von 1,5 s stammt von einem früheren Anlauf (Zeitpunkt 6,5 s) her und hängt nicht mit der Auslösung zum Zeitpunkt 12,0 s zusammen.

Die häufig vertretene Ansicht, daß die Kommandozeit der Relais den Schleppzeigerangaben entspricht, stimmt bei Fehlerwechsel und Mehrfachfehlern, da zwischenzeitlich eine Rückstellung nicht erfolgt, nicht. Werden die besonderen Umstände nicht beachtet, so findet eine vollkommen falsche Beurteilung der Arbeitsweise der Relais statt und führt zu zeitraubenden Relaisnachprüfungen und Nacheichungen an Ort und Stelle, ohne positive Ergebnisse zu erzielen.

Durch das tiefere Eindringen in den zeitlichen Ablauf der Gesamtstörung konnten einige Erkenntnisse über die besonderen Bedingungen, die zur Zerstörung des Ableiters führten, gewonnen werden.

Erddpunktverlagerung außerhalb des Spannungsdreiecks

Während in den bisher behandelten Fällen wahrscheinlich eine Klärung bei Aufzeichnung der drei Leiter-Erdspannungen schon möglich gewesen wäre, obgleich die Aufzeichnung der sechs Spannungen die Auswertung wesentlich erleichtern, sind die beiden in Bild 4 zusammengefaßten Betriebszustände ohne Sechsfachauszeichnung unmöglich zu erfassen. In beiden Fällen handelt es sich um ein kompensiertes Mittelspannungsnetz, in dem ein Erdschluß auftritt, wobei aber der Erddpunkt außerhalb des Spannungsdreiecks fällt.

Im Fall a) tritt zunächst im Leiter S ein Erdschluß über einen hohen Widerstand auf, wobei die Spannung U_{ET} auf einen Wert oberhalb der verketteten Spannung ansteigt, während die Spannung U_{ER} praktisch konstant bleibt. Nach etwa 0,05 s ist auch die Spannung U_{ES} wieder normal, hingegen bleibt die Spannung U_{ET} nach wie vor für mehrere Sekunden überhöht. Die Erscheinung verschwindet nach einiger Zeit. Der Vorgang wiederholt sich mehrmals, ohne daß irgend eine Ursache für dieses Verhalten gefunden werden konnte.

Im Fall b) liegt zunächst ein Erdschluß im Leiter R vor. Er verschwindet und wird durch einen Erdschluß in S abgelöst. Der Vorgang ist einmalig und dauert insgesamt etwa 0,1 s. Eine Ursache konnte nicht gefunden werden. Auch hier liegt, wie die Konstruktion des Spannungsdreiecks aus den sechs Spannungen zeigt, der Erddpunkt außerhalb des Dreiecks.

Aus früheren Zeiten ist durch eine Reihe von Störungen schon bekannt, daß das Netz unter inneren Überspannungen leidet. Nachdem nunmehr einwandfreie Meßergebnisse vorliegen, lassen sich die genauen Bedingungen, die zu den Erscheinungen führen, untersuchen, um so die entsprechenden Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

Bei der Konstruktion von Spannungsdreiecken ist allerdings etwas Vorsicht am Platz. Sind die Vorgänge zu schnell oder noch von schnelleren Schwingungen überlagert, dann ist die Zuordnung der sechs Meßwerte infolge des Überschlingens der Meßsysteme nicht gegeben. Im

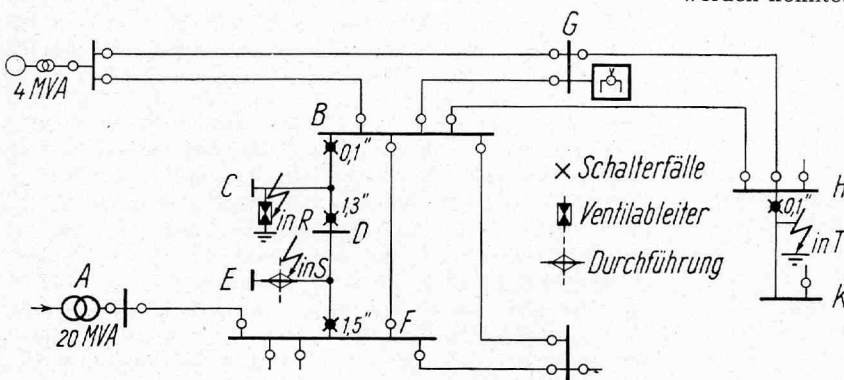
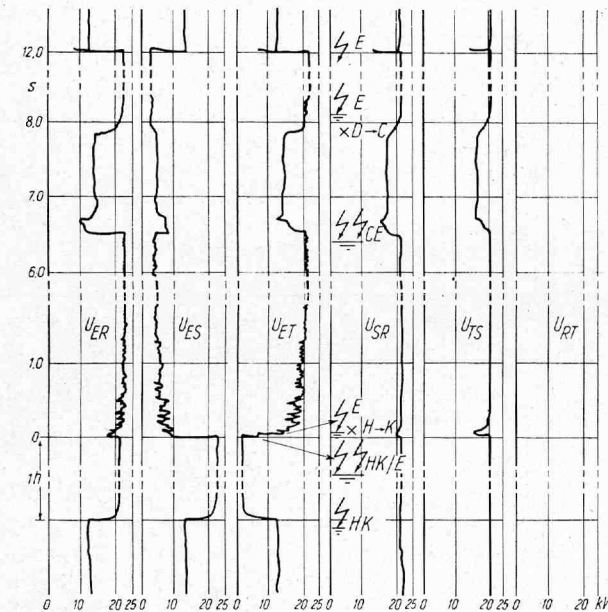


Bild 3. Fehlerwechsel, Mehrfachfehler

Leitung HK führt. Das Netz fährt infolge der beschädigten Durchführung des Leiters S im Erdschluß weiter. Es ist nicht eindeutig zu entscheiden, ob es sich um einen Lichtbogen-Erdschluß oder um einen intermittierenden Erdschluß handelt. Die Zerstörung des Ableiters in dem Leiter R in der Station C deutet vielleicht eher auf einen intermittie-

Fall a) ist eine solche Vorsicht nicht nötig, da hier über längere Zeit konstante Verhältnisse vorliegen. Im Fall b) ist die Konstruktion des Dreiecks nicht unbedingt eindeutig, da aber zwei mechanisch und elektrisch verschiedenartige Schreiber den gleichen Verlauf aufzeichnen, dürfte auch dieses Dreieck den Tatsachen entsprechen.

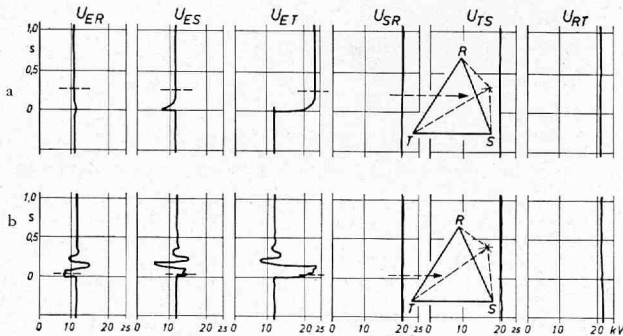


Bild 4. Erdpunktverlagerung

Überlastabschaltung

Eine weitere charakteristische Gruppe bilden die Überlastabschaltungen nach selektiv erfaßten Kurzschlüssen. Es handelt sich wiederum um ein Mittelspannungsnetz, Bild 5, dessen Speisung von der Hochspannungsseite her in den Punkten A und E erfolgt. Außerdem arbeitet auf das Netz eine Reihe von kleineren Wasserkraftwerken.

Auf der Leitung E→D verursacht ein Baumfall einen Kurzschluß. Infolge einer Unterschneidung der Kennlinie löst der Schalter in G vorzeitig aus, so daß das Netz nur von A her noch versorgt wird. Aus dem Spannungstreifen des in der Station C eingebauten Sechsfachschreibers mit Tintenregistrierung ist ersichtlich, daß zum Zeitpunkt 0 die Störung durch einen zweipoligen Kurzschluß eingeleitet wird, der sich nach 0,4 s zu einem dreipoligen Kurzschluß entwickelt. Zum Zeitpunkt 1,5 s fällt der Schalter in G. Im Störungstreifen ist dieser Vorgang durch einen erheb-

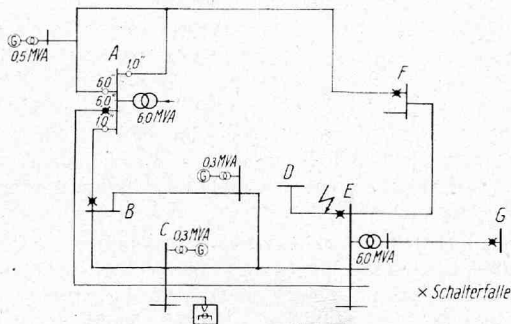
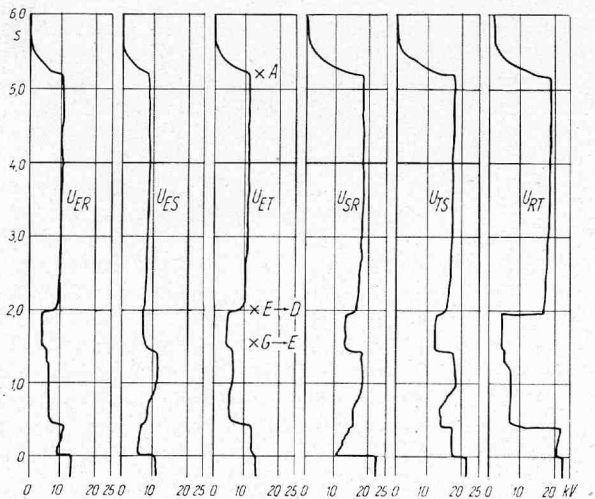


Bild 5. Überlastung

lichen Spannungseinbruch gekennzeichnet, da die Kurzschlußenergie nunmehr ausschließlich von A geliefert wird. Der Kurzschluß auf der Leitung ED wird zum Zeitpunkt 2,0 s vom Schalter E→D abgeschaltet. Die Spannung im Netz ist von dem Zeitpunkt 2,0 s ab wieder normal. Trotzdem fallen die Schalter in B, F und A infolge Überlastung. Der Zeitpunkt der einzelnen Auslösungen ist nicht erkennbar. Der letzte Schalter, wahrscheinlich der in A, löst zum Zeitpunkt 5,2 s aus, wodurch das gesamte Gebiet spannungslos wird.

Über das ganze Netz verstreute Auslösungen werden leicht als Fehlauflösungen oder durch Pendelerscheinungen und dergl. hervorgerufen erklärt. In der Mehrzahl der Fälle wird man jedoch erkennen, daß, wenn es sich nicht um Mehrfachfehler handelt, es Auslösungen infolge von Überlastungen sind, wobei diese Überlastungen durch den Ausfall der einen oder anderen Leitung hervorgerufen werden.

Intermittierender Erdschluß

Den Verlauf der Spannungen bei einem intermittierenden Erdschluß eines gut kompensierten Hochspannungsnetzes zeigt das in Bild 6 wiedergegebene Oszillogramm eines

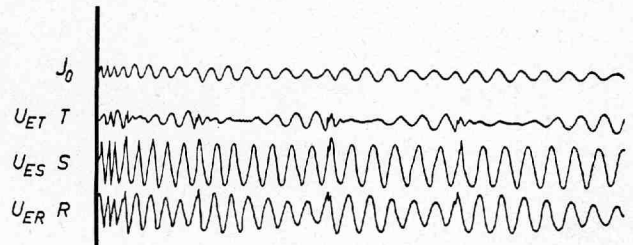


Bild 6. Erdschluß in einem 110-kV-Netz

Störungsozillographen, der Momentanwerte der Leiter-Erdspannung und des Nullpunktstromes aufzeichnet. Die Spannung des kranken Leiters erholt sich und erreicht jeweils einen gewissen Wert. Die Verfestigung der Durchschlagstrecke ist aber nicht so groß, daß sie der vollen Spannung Widerstand leisten kann. Daher kommt es zu einem neuen Erdschluß. Die dabei auftretenden Spannungserhöhungen der gesunden Leiter erreichen nur den Wert der Dreiecksspannung. Die gefürchteten Erscheinungen der Überspannungen bei einem intermittierenden Erdschluß sind also wegen des gut kompensierten Netzes nicht aufgetreten. Der Kompensationszustand eines Netzes kann an Hand des Verlaufs der Leiter-Erdspannungen nach Verschwinden eines Erdschlusses leicht überprüft werden [3]. Es ist daher unerheblich, ob der Störschreiber Momentanwerte wie hier, oder Mittelwerte aufzeichnet.

Gehen nach Verlöschen des Erdschlusses die Leiter-Erdspannungen der gesunden Leiter gleichmäßig von dem $\sqrt{3}$ -fachen Wert auf ihren Normalwert zurück, so ist das Netz gerade auskompensiert. Fällt die Leiter-Erdspannung, die der Leiter-Erdspannung des kranken Leiters naheilt, steiler ab, besteht Überkompensation; fällt jedoch die Leiter-Erdspannung, die der Leiter-Erdspannung des kranken Leiters voreilt, steiler ab, herrscht Unterkompensation. Da im vorliegenden Fall die Leiter-Erdspannung U_{ER} , also die der Leiter-Erdspannung U_{ET} naheilende, steiler abfällt, liegt eine schwache Überkompensation vor.

Obwohl die ersten Halbwellen verloren gehen, zeigt die Aufzeichnung der Momentanwerte sehr schön sowohl den langsamen Spannungsanstieg der kranken Phase als auch das Nichtauftreten von Überspannung im Mittelfrequenzbereich. Wanderwellenvorgänge werden vom Schleifenoszillographen grundsätzlich nicht erfaßt. Aus dem Oszillogramm ist auch zu erkennen, daß die Beschleunigung des Filmes eine gewisse Zeit benötigt. Die ersten Schwingun-

gen haben eine Breite von rd. 2,5 mm, während sie nach Erreichen der vollen Geschwindigkeit eine konstante Breite von 10 mm aufweisen.

Zusammenfassung

Der Einbau von Schreibern läßt sehr wertvolle Aufschlüsse über das elektrische Verhalten der Netze insbesondere bei Störungen, aber auch über das Verhalten des Schutzes zu. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die geeigneten Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit der Netze gegen Störungen zu treffen. Da aus wirtschaftlichen Gründen der Einbau früher in der Hauptsache in den Hochspannungsnetzen erfolgte, setzt sich mehr und mehr die Meinung durch, daß gerade in den Mittelspannungsnetzen mit der absolut höheren Zahl der Störungen die Aufwendungen für Störschreiber mehr als gerechtfertigt sind.

Für den Normalfall werden Schreiber, deren Auswertung möglichst wenig Arbeitsaufwand erfordert, den Vorzug verdienen, also in der Regel Sechs- oder Vierfachschrreiber mit Tinten- oder besser Metallpapier-Registrierung und einem Schnellvorschub von 40 mm/s bis 60 mm/s. An den besonders wichtigen Punkten können dann wertvollere Schreiber mit Erinnerungsvermögen und gegebenenfalls mit Aufzeichnung von Momentanwerten in Frage kommen.

In den Mittelspannungsnetzen werden zweckmäßigerweise die Leiter-Erdspannungen und Dreieckspannungen überwacht, in Hoch- und Höchstspannungsnetzen werden die Spannungsschreiber durch Stromschreiber für die wichtigsten Leitungen ergänzt werden müssen.

Eines aber sollte bedacht werden: Der Einbau von Störschreibern allein bringt nichts, fehlen der Geist und das technische Verständnis, die Aufzeichnungen zu deuten und die notwendigen Maßnahmen zur Verbesserung der Netze zu treffen.

Schrifttum

- [1] ATM J 036 — 1 (1931)
- [2] Dr.-Ing. W. Lange, Ein neuer Siemens-Störungsschreiber ohne Anlaufverzögerung (Memnograph). Siemens-Zeitschrift Bd. 18 (1938), Heft 8
- [3] Dipl.-Ing. W. Brauer, AEG-Störungsschreiber. AEG-Mitteilungen 1937, Heft 2, S. 62

Weiteres Schrifttum

- Dipl.-Ing. O. Kautzmann, Elektrizitätswirtschaft Bd. 35 (1936), S. 493
- W. Ortloff, AEG-Mitteilungen 1937, Heft 11, S. 388
- Dipl.-Ing. W. Oesinghaus, AEG-Mitteilungen 1952, Heft 7/8, S. 188
- Dipl.-Ing. Oesinghaus/Zacher, AEG-Mitteilungen 1940, Heft 5/6, S. 125
- Metzger, Siemens-Zeitschrift Bd. 28 (1954), S. 314
- Dr.-Ing. Weller und Dipl.-Ing. Erich, Technischer Bericht der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen