

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 28 (1937)
Heft: 8

Artikel: Ueber die erstmalige Bestimmung der günstigsten Einstellung von Erdschlusspulen
Autor: Gross, Erich
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059838>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 11.05.2025

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

Ueber die erstmalige Bestimmung der günstigsten Einstellung von Erdschlussspulen.^{*)}

Von Erich Groß, Wien.

621.316.935.2

Nach dem Einbau von Erdschlussspulen sind Versuche anzustellen, durch welche die richtige Einstellung ermittelt wird. Die hiebei zweckmässigsten Messungen, welche nach langjährigen Erfahrungen im praktischen Betriebe die genauesten Ergebnisse liefern, werden beschrieben.

Après le montage des bobines de mise à la terre, il faut déterminer leur réglage correct par des essais. L'auteur décrit ici la méthode la mieux appropriée qui, selon une longue expérience pratique, donne les résultats les plus exacts.

In Hochspannungsnetzen ist der Einbau von Erdschlussspulen nötig, wenn der Umfang so gross wird, dass mit dem Erlöschen von Erdschlußlichtbögen nicht mehr gerechnet werden kann. In Mittelspannungsnetzen (bis etwa 50 kV) erlöschen Erdschlußlichtbögen noch von selbst, wenn der Erdschlußstrom weniger als ca. 5 A beträgt. Bei höherer Betriebsspannung liegt diese obere Grenze noch tiefer. Da die Hochspannungsnetze meist von grösserer Ausdehnung sind, wurden in den vergangenen Jahren viele Erdschlussspulen eingebaut. Im folgenden werden die Verfahren beschrieben, welche bei Inbetriebnahme einer Erdschlussspule zur erstmaligen Funktionskontrolle durchzuführen sind. Dabei werden wohl auch Lösversuche gemacht, um den Betriebsingenieuren die sichere Wirkungsweise der neuen Einrichtung vorzuführen. Die hier beschriebenen Verfahren wurden vom Verfasser in den vergangenen 13 Jahren an rund 200 Erdschlussspulen in Kabel- und Freileitungsnetzen mit 3 bis 125 kV Betriebsspannung erprobt¹⁾. Sie sind ganz allgemein anwendbar, also nicht auf einphasige Erdschlussspulen beschränkt, sondern ebenso für Versuche mit dreiphasigen Erdschlussspulen geeignet.

A. Allgemeines Ersatzschema.

Im allgemeinsten Fall des einphasigen Erdschlusses eines Drehstromnetzes wird eine Phase nicht satt, sondern über eine Impedanz Z geerdet. Gleichzeitig ist anzunehmen, dass das Netz, etwa infolge unzureichender Verdrillung, auch ohne Erdschluss

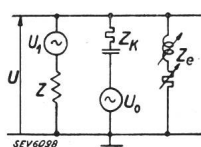


Fig. 1.

Allgemeines Ersatzschema.

unsymmetrisch ist. Das Ersatzschema hierfür zeigt Fig. 1. Darin ist vorausgesetzt, dass die Phase 1 (Sternspannung U_1) über die Impedanz Z geerdet wird. U_0 ist die Nullpunktverlagerung ohne Erdung (d. h. ohne Erdschluss einer Phase und ohne Erdschlussspule). U ist die Nullpunktverlagerung, wenn irgendeine Erdung vorgenommen wird und Z_e ist die gesamte, vornehmlich induktive Impedanz der ein- oder dreiphasigen Erdschlussspule. Schliesslich ist Z_K die Impedanz der Erdkapazität des gesamten

Drehstromnetzes (Parallelschaltung der Erdungs-impedanzen Z_{Ki} ($i = 1, 2, 3$) der drei Phasen). Die Beziehungen zwischen den Netzkonstanten und den Ersatzwiderständen nach Fig. 1 werden in Abschnitt D dargelegt.

Durch Verdrillung wird die Unsymmetriespannung U_0 verkleinert. In Kabelnetzen verschwindet U_0 wegen des symmetrischen Aufbaues von selbst. In ausgedehnten Mittelspannungsnetzen ergeben sich meist praktisch vernachlässigbare Unsymmetriespannungen ($U_0 = 0$). Obwohl die einzelnen Strecken nicht verdrillt sind, gleicht sich hier die Unsymmetrie, die auf verschiedene Erdkapazitäten der «oberen», «mittleren» und «unteren» Phase zurückgeht, im ganzen Netz im Mittel aus. Zu berücksichtigen sind Unsymmetriespannungen deshalb wohl erst in Netzen mit höherer Betriebsspannung, von etwa 50 kV aufwärts, weil die dort angewendete Verdrillung aus wirtschaftlichen Gründen nicht sehr weit getrieben werden kann. Aber auch in solchen Netzen kommen höhere Werte als etwa $U_0 = 5\%$ der Sternspannung nie vor.

Bei Kabelnetzen und Hochspannungsfreileitungsnetzen kleiner und mittlerer Betriebsspannung ist also die Spannung U_0 im Ersatzschema zu streichen. Zur erstmaligen Funktionskontrolle von Erdschlussspulen ist die Herstellung von Erdschlüssen zweckmässig. Durch die Einschaltung eines Widerstandes soll dem Entstehen von Doppelerdschluss-Kurzschlußströmen vorgebeugt werden. Es ist möglich, dass es während der Versuche zu einem zweiten Erdschluss kommt; dann bringt der Erdungswiderstand die erwünschte Begrenzung des Kurzschlussstromes. Es wird unten gezeigt, dass es richtig ist, für die Erdungsimpedanz Z nur rein Ohmsche Widerstände zu verwenden und es wird auch angegeben, wie gross diese Widerstände in Abhängigkeit von den jeweiligen Netzverhältnissen (Netzspannung und -umfang, Erdschlußstrom) gewählt werden sollen. Bei Höchstspannung ist die Beschaffung geeigneter Widerstände häufig schwierig; deshalb kann die Ausnützung der in solchen Netzen immer vorhandenen Unsymmetrie gegen Erde (U_0) als willkommener Ersatz für die Widerstandserdung einer Phase bezeichnet werden. Die bei der erstmaligen Funktionsprobe anzustellenden Versuche leiten sich somit aus dem allgemeinen Schema Fig. 1 durch zwei Spezialisierungen ab. Bei höheren Netzspannungen wird $Z = \text{unendlich}$ angenommen, weil U_0 immer ungleich Null ($U_0 \neq 0$) ist. Dagegen ist den Versuchen mit Widerstandserdung (in Kabelnetzen und in Freileitungsnetzen mitt-

^{*)} Eingang des Manuskriptes am 23. Dez. 1935.

¹⁾ Der Verfasser verdankt seine praktische Erfahrung auf diesem Gebiete einer mehrjährigen Tätigkeit bei der A. E. G.-Union E. G. Die Veröffentlichung dieser Notiz erfolgt auf Grund von Wünschen, die wiederholt von Ingenieuren der Elektrizitätswerke geäußert wurden.

lerer Spannung) das durch $U_0 = 0$ spezialisierte Schema zugrunde zu legen²⁾.

B. Ermittlung der exakten Abstimmung aus der Resonanzverlagerung.

Mit $Z = \infty$ vereinfacht sich das allgemeine Schema Fig. 1 zu einer reinen Serienschaltung von zwei Impedanzen Z_K und Z_e , auf welche die Spannung U_0 einwirkt. Dabei ist Z_K ein vornehmlich kapazitiver Widerstand und Z_e ein vornehmlich induktiver. Beide sind mit Verlustwiderständen behaftet; bei konstantem Netzzumfang ist Z_K konstant, Z_e ist durch Anzapfungen an der Erdschlußspule variabel. Es kann mit hinreichender Genauigkeit angenommen werden, dass sich bei Uebergang von einer Anzapfung der Erdschlußspule zu einer anderen, sowohl deren induktiver Widerstand (Reaktanz) X_e als auch der auf einen Serienwiderstand reduzierte Verlustwiderstand R_e proportional ändern; demnach ist Z_e im Ortsdiagramm bis zu $U = U_{\text{Stern}}$ (Sättigung der Erdschlußspule bei Spannungen, die grösser sind als Sternspannung!) linear veränderlich. Bezeichnet man die variable Nullpunktverlagerung, d. i. die Spannung, unter welcher die Impedanz Z_e steht, mit U , so gilt

$$U = \mathfrak{Z}_e \cdot \frac{U_0}{\mathfrak{Z}_e + \mathfrak{Z}_K}$$

oder

$$U = U_0 \cdot \frac{\mathfrak{Z}_e}{\mathfrak{Z}_e + \mathfrak{Z}_K} = U_0 \cdot \frac{1}{\frac{1}{\mathfrak{Z}_e} + \frac{1}{\mathfrak{Z}_K}}$$

Das ist bekanntlich die Gleichung eines Kreises durch den Ursprung, weil die Ortsgerade für $\mathfrak{Z}_e$ auch durch den Ursprung geht. Dabei ist $\mathfrak{Z}_e = R_e + jX_e$ und $\mathfrak{Z}_K = R_K - jX_K$. Ersetzt man jetzt in den Impedanzen Z_e und Z_K die Serienschaltung zwischen Verlustwiderstand (R_e , bzw. R_K) und Blindwiderstand (X_e , bzw. X_K) durch entsprechende Parallelschaltungen nach den Formeln:

$$\frac{1}{\mathfrak{Z}_e} = \frac{1}{\varrho} + \frac{j}{\xi} \quad \text{und} \quad \frac{1}{\mathfrak{Z}_K} = \frac{1}{\gamma} - \frac{j}{\kappa}$$

so wird

$$U = U_0 \cdot \frac{1}{\frac{1}{\varrho} + \frac{1}{\gamma} + j\left(\frac{1}{\xi} - \frac{1}{\kappa}\right)}$$

Bei exakter Abstimmung (Resonanz) hebt sich die Parallelschaltung der Blindwiderstände ξ und κ nach aussen auf (Sperrkreis $\xi = \kappa$); also wird die Resonanzverlagerung

²⁾ Man kann symmetrische Netze für Versuche nach Abschnitt B unsymmetrisch machen, indem ein Abzweig nur zweipolig oder einpolig angeschlossen wird. Solche künstliche Unsymmetrien sollen nur an Abzweigen vorgenommen werden, die relativ kurz zum Netzzumfang sind.

$$U_R = U_0 \cdot \frac{1}{\frac{\mathfrak{Z}_{\text{exakt}}}{1} + \frac{1}{\varrho + \gamma}}, \quad \text{oder mit } R_v = \frac{\varrho \gamma}{\varrho + \gamma}$$

als Gesamtverlustwiderstand der Parallelschaltung von Netz und Erdschlußspule:

$$\frac{U_0}{U_R} = \frac{\mathfrak{Z}_{\text{exakt}}}{R_v} = \frac{\frac{U_{\text{Stern}}}{R_v}}{\frac{U_{\text{Stern}}}{\mathfrak{Z}_{\text{exakt}}}} = \frac{\text{Wattreststrom}}{\text{Erdschlußstrom}},$$

eine bekannte Beziehung³⁾. Weil der Wattreststrom in Freileitungsnetzen nie weniger als 5 % des Erdschlußstromes beträgt, kann die maximale Verlagerungsspannung höchstens 20mal grösser werden als die Unsymmetriespannung U_0 . Da es leicht ist, so zu verdrillen, dass U_0 kleiner bleibt als 5 % der Sternspannung U_{Stern} des Netzes, wird U_{max} immer kleiner sein als U_{Stern} . Beispielsweise beträgt die Verlagerung U_{max} bei 3 % Unsymmetriespannung unter der Annahme von 5 % Wattreststrom nur 60 % der Sternspannung U_{Stern} .

Praktisch wird der Versuch so durchgeführt, dass die Erdschlußspule nacheinander auf verschiedene Anzapfungen eingestellt und jeweils an einem dreiphasigen Erdungs-Spannungswandler die Erdspannungen der drei Phasen gemessen werden. Aus zumindest zwei Messwerten lässt sich dann der Ortskreis der Nullpunktverlagerung U finden und aus der Lage der Messpunkte für verschiedene Anzapfungen zur grössten Verlagerung U_{max} (Kreisdurchmesser) ergibt sich die günstigste Einstellung. Da die Erdschlußspulen heute im allgemeinen in ihrer Impedanz nicht stetig regelbar ausgeführt werden, sondern nur auf mehrere Anzapfungen einstellbar sind, ist dann jene Anzapfung als Betriebsanzapfung zu wählen, welche der maximalen Verlagerung am nächsten liegt. Vorausgesetzt bleibt natürlich, dass diese Verlagerungsspannung infolge ausreichender Verdrillung nicht zu gross ist, also etwa 15 % bis 25 % der Sternspannung nicht übersteigt. Bei den Versuchen ist zuerst U_0 zu messen (Verlagerung bei abgeschalteter Spule) und dann mit jener Anzapfung fortzufahren, die von der voraussichtlichen (berechneten) Resonanzabstimmung am weitesten entfernt ist. Bei der nun folgenden stufenweisen Aenderung soll über einen Wert $U \approx 0,25 U_{\text{Stern}}$ nicht hinausgegangen werden. Höhere Werte werden nur in Ausnahmefällen bei unzureichend oder gar nicht verdrillten Leitungen auftreten. In solchen Netzen wird für den Betrieb natürlich nicht die Resonanzeinstellung, sondern eine benachbarte so gewählt, dass U nicht grösser als ca.

³⁾ J. Jonas, E. u. M. Bd. 38 (1920), S. 453.

F. Noether, ETZ Bd. 42 (1921), S. 1479.

Es sei übrigens bemerkt, dass U_R nicht genau dem Maximalwert U_{max} (Kreisdurchmesser) gleich ist, und zwar deshalb nicht, weil ϱ nicht konstant, sondern mit Z_e ebenso wie ξ variiert. Der Unterschied zwischen U_R und U_{max} ist ausserordentlich gering; wir dürfen ihn bei den folgenden Ueberlegungen vernachlässigen.

0,25 U_{stern} ist. Ein Bild über die Grösse der Nullpunktspannung liefert auch die Spannung U_v an einer Spannungsmesswicklung der Erdschlußspule. Der Unterschied zwischen U_v und U liegt bei der einphasigen Erdschlußspule im Nullspannungsabfall ihres Anschlusstransformators. Beim Löschtransformator andererseits ist U_v die Spannung an den Klemmen des «offenen» Dreiecks der Sekundärwicklung.

Es muss noch erwähnt werden, dass das gewählte Zahlenbeispiel insofern zu ungünstige Resultate ergibt als mit einem zu kleinen Wert für den Wattreststrom gerechnet wurde; denn ein so geringer Betrag wie 5 % wird nur in ganz seltenen Fällen, vor allem nur bei völlig trockenem Wetter erreicht.

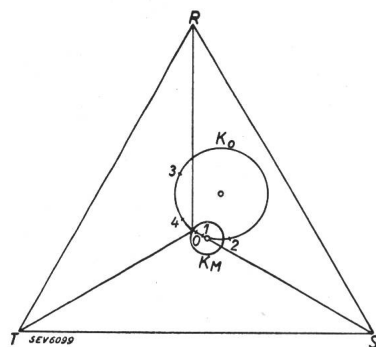


Fig. 2.
Kreisdiagramm der Nullpunktverlagerung durch Netzunsymmetrie (U_0) bei variabler Spuleneinstellung.
Kreis K_0 vor der «Verdrillung»,
Kreis K_M nach der «Verdrillung» (Phasentausch in Streckenmitte).

Messwerte vor der «Verdrillung»
(zu Fig. 2, Kreis K_0).

Tabelle I.

Erdschluss- spule		Erd- spannungen			verkettete Spannungen			Fre- quenz
Stellung	Strom A	U_R kV	U_S kV	U_T kV	RS kV	ST kV	TR kV	
aus, 0	0	67,0	64,3	67,0	115,2	115,2	115,0	50
1	0,5	67,8	63,0	68,0	115,1	115,1	114,9	50
2	1,5	70,0	55,1	75,2	115,0	115,0	114,9	50
4	1,3	62,4	71,5	64,8	115,2	115,0	115,0	50
3	3,8	48,0	81,2	73,5	115,5	115,1	115,1	50

Auf Konstanz der Frequenz ist zu achten.

Auf Konstanz der Frequenz ist zu achten.

Nachdem die günstigste Einstellung der Erdschlußspule ermittelt ist, können Löschversuche ausgeführt werden, beispielsweise durch lichtbogenfreies Abschalten eines Erdschlusses mit einem Trenner⁴⁾ oder durch Nachahmung natürlicher Erdschlüsse, indem ein Stützisolator oder eine Hängekette mit einem dünnen, gewichtsbelasteten Metalldraht überbrückt⁵⁾ und dann an eine Phase des Netzes angeschlossen wird.

Ein praktisches Beispiel zeigt Fig. 2 und die zugehörige Tabelle I. Es handelt sich um eine ca. 35 km lange 110-kV-Doppelleitung, die auch jetzt entgegen der Regel nur einmal durch Phasenvertauschung der Leiter jedes Stranges in der Mitte der

⁴⁾ Durch diesen Schalter darf natürlich nur der Erdschlussstrom, nicht auch der Lade- und Belastungsstrom unterbrochen werden.

⁵⁾ Die Gewichtsbelastung bringt «Funkenziehen» hervor und soll den «pickenden Vogel» nachahmen.

gesamten Strecke verdreht ist⁶⁾ und vorher gar nicht verdreht war. Wie Fig. 2 zeigt, bleibt die Verlagerung nach der Verdrehung trotzdem in zulässigen Grenzen⁷⁾.

C. Ermittlung der exakten Abstimmung durch hochohmige Widerstandserdschlüsse.

Vernachlässigt man jetzt die Unsymmetriespannung ($U_0 = 0$), so vereinfacht sich das Ersatzschema zu Fig. 3. Die Parallelschaltung der Impedanz Z_K der Netzerdskapazität mit der Impedanz Z_e der Erdschlußspule liefert, je nachdem, welcher von beiden Strömen überwiegt, einen resultierenden kapazitiven (Unterkompensierung) oder induktiven (Überkompensierung) Widerstand. Nimmt man

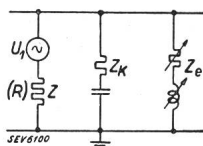


Fig. 3.
Ersatzschema des symmetrischen Netzes mit Widerstandserdung einer Phase.

nun an, dass die Erdung beispielsweise über einen induktiven Widerstand erfolgt und Unterkompensation herrscht, so ist die Gefahr der Resonanz zwischen der Erdungsinduktivität und der restlichen Erdkapazität des Netzes gegeben. Es ist deshalb richtig, für die Erdung einen rein Ohmschen Widerstand R vorzusehen (Fig. 3). Bei variabler Impedanz Z_e der Erdschlußspule beschreibt der Ortsvektor der Nullpunktspannung U (Verlagerung des Sternpunktes) wieder einen Kreis, der im Dreieck ABC der verketteten Spannungen die Lage gemäss Fig. 4 einnimmt. Sein Mittelpunkt M liegt nicht

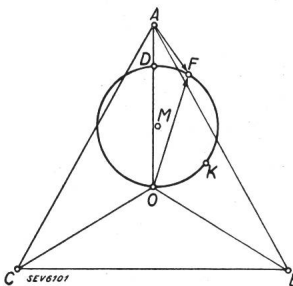


Fig. 4.
Kreisdiagramm der Nullpunktverlagerung bei Widerstandserdung einer Phase.

am Vektor OA der Sternspannung U_1 , sondern ist etwas gegen die Seite der Unterkompensierung verschoben⁸⁾. Bei exakter Abstimmung ist der Erdschlussreststrom ein reiner Wattstrom, also in Phase mit der treibenden Spannung U_1 . Durch den Schnitt-

⁶⁾ Leitungen solcher Länge sollen zwecks Vermeidung der Beeinflussung von Schwachstromleitungen vollständig verdreht sein. Vgl. etwa ETZ Bd. 44 (1923), S. 769.

⁷⁾ Die Frage der zweckmässigsten Abstimmung, bzw. Einstellung ist heute durch die nun fast zwanzigjährige Praxis mit Erdschlußspulen entschieden [s. etwa A. v. Gastel, Bull. SEV Bd. 27 (1936), S. 193]. Die Sättigung der Magnetisierungslinie der Erdschlußspulen sorgt dafür, dass Verlagerungsspannungen sicher auf U_{stern} begrenzt werden. Vgl. etwa R. Willheim, E. u. M. Bd. 39 (1921), S. 152, H. Grünholz, E. u. M. Bd. 42 (1924), S. 194, und W. Diesendorf, E. u. M. Bd. 51 (1933), S. 57.

⁸⁾ Dieses genaue Kreisdiagramm für die hochohmige Widerstandserdung eines gelöschten Netzes wurde schon im Jahre 1925 von R. Willheim in einer bisher nicht veröffentlichten Untersuchung abgeleitet.

punkt D mit dem Kreis wird $OA = U_1$ in zwei Teile zerlegt. Die Spannung OD entspricht der Verlagerungsspannung des Sternpunktes, die Spannung AD dem Spannungsabfall $I_{Rest} \cdot R = U_{e1}$ am Erdungswiderstand R , der jetzt ein reiner Wirkwiderstand ist. Bei exakter Kompensierung wird aus der Parallelschaltung der Erdkapazität des Netzes (Impedanz: $R_k - jX_k$) und der Impedanz der Erdschlussspule ($R_e + jX_e$) ebenfalls ein reiner Verlustwiderstand R_v (Fig. 5). Die Verlagerungsspannung wird

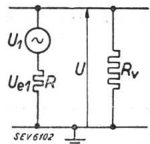


Fig. 5.

Ersatzschema nach Fig. 3 bei exakter Kompensierung des kapazitiven Erdschlußstromes.

also $OD = U_R = I_{Rest} \cdot R_v$. Es verhalten sich die durch den Schnitt-Punkt D des Verlagerungskreises mit dem Vektor der Sternspannung U_1 gegebenen Abschnitte

$$OD : DA = U_R : U_{e1} = R_v : R$$

Die Verlagerung $OD = U_R$ wird um so grösser sein, je kleiner der Erdungswiderstand R im Verhältnis zum Verlustwiderstand R_v des Netzes ist. In umfangreichen Netzen mit grösseren Verlusten (R_v ist kleiner) sind bei hochohmiger Widerstandserdung zur Erzielung der gleichen Verlagerung Widerstände R von absolut kleinerem Betrage zu wählen.

Bei Unterkompensierung liegen die Vektoren der Verlagerungsspannung U auf der rechten Seite des Kreisabschnittes; beispielsweise ist der Vektor der Verlagerung $OF = U$ und die Spannung am Erdungswiderstand $U_{e1} = I_R \cdot R = AF$. Die Güte der Verlagerung kann leicht durch Vergleich der Erdspannungen $U_{e2} = BF$ und $U_{e3} = CF$ der beiden nicht erdgeschlossenen Phasen festgestellt werden (Drehsinn ABC). Bei Unterkompensierung ist die Erdspannung U_{e2} der Phase B kleiner als die Erdspannung U_{e3} der Phase C. Bei exakter Kompensierung sind die beiden Erdspannungen U_{e2} und U_{e3} dem Betrage nach gleich ($U_{e2} = U_{e3}$). Bei Ueberkompensierung ist die Erdspannung U_{e2} grösser als die Erdspannung U_{e3}). Bei Abschaltung der Spule ($Z_e = \infty$) wird $U_\infty = OK$; dieser Fall kommt z. B. auch dann vor, wenn der Erdschlusstrom des noch unkompensierten Netzes zwecks Projektierung einer Erdschlussspule zu messen ist.

Ähnlich wie das Verlagerungsdiagramm im Abschnitt B wird auch das jetzt behandelte Kreisdiagramm aus einigen Punkten leicht gewonnen, zu deren Ermittlung verschiedene Anzapfungen der Erdschlussspule Z_e einzustellen sind. Es genügt hier wieder die Messung der drei Erdspannungen bei jedem Versuche; daraus sind einige Punkte des Kreises festgelegt. Aus der bekannten Grösse des Erdungswiderstandes R ergeben sich dann alle charakteristischen Werte. Es kann aber der Erd-

fehlerstrom auch direkt gemessen werden, und zwar seiner Grösse und Phasenlage nach. Hierzu dient (Fig. 6) einerseits ein Ampèremeter A_1 , andererseits ein Wattmeter W , dem verschiedene nach Grösse und Phasenlage bekannte Spannungen (AB, BC, CD) der Reihe nach zugeführt werden. Die Messwerte (Ströme) sind dann zur Ermittlung der Nennwerte im Verhältnis der jeweiligen Nullpunktspannung $U = OF$ zur grössten Sternspannung U_1 (bzw. U_2 und U_3) zu vergrössern. Bei der ersten Funktionskontrolle der neu eingebauten Erdschlussspule wird der Erdungswiderstand R als Schutzwiderstand möglichst hoch gewählt werden. Soll die Verlagerungsspannung $U_R = OD$ bei exakter Kompensierung beispielsweise ca. 90 % der Sternspannung sein, so muss der Erdungswiderstand R rund 10 % des Verlustwiderstandes R_v betragen. Rechnet man nun, dass der Wattreststrom 10 % des gesamten Netzerdschlusstromes ausmacht (ein für Mittelspannungsnetze erfahrungsgemäss richtiger Mittelwert), dann ist der Verlustwiderstand R_v seinem

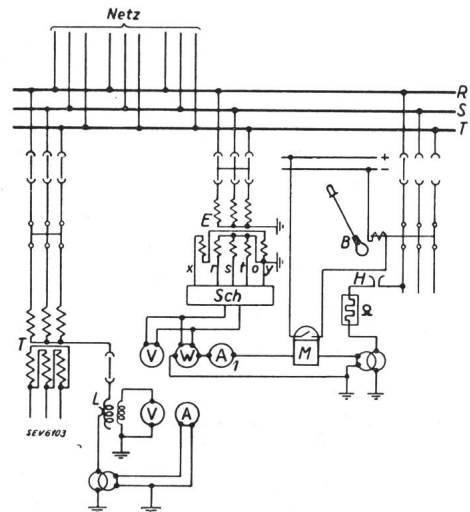


Fig. 6.

Schema für Erdschlussversuche mit Widerstandserdung einer Phase (R).

- T Leistungstransformator.
- L Erdschlussspule.
- E Erdschlossspule (Fünfschenkelwandler) mit Messwicklungen. Phasenenden r, s, t; Sternpunkt o; Nullpunktspannung $U = xy$.
- O Erdungswiderstand (Metallwiderstand in Oel).
- H Lichtbogenhorn (sehr weit eingestellt).
- B Ueberbrückung von H (Stange aus Isoliermaterial mit Metallschleife am Ende).
- Sch Umschalter für die Sekundärspannungen von E, mit eingebautem Umkehrwandler (für Gewinnung der Sternspannung).
- A, A₁ Ampèremeter.
- V Voltmeter.
- W Wattmeter.
- M Maximalrelais (momentan wirkend).

Beträge in Ohm nach 10mal grösser als die Impedanz der Erdkapazität, also ist $R_v = 10 Z_K$. Der Erdungswiderstand R wird $R = \frac{1}{10} R_v$, oder seinem

Beträge nach gleich der Impedanz der Spule gemacht werden ($R_v = Z_{exakt} = Z_K$). Bei nur 5 % Wattverlusten wäre es richtig, für die Erzeugung derselben Verlagerung $U = 0,9 U_1$ den doppelten Widerstand $R = 2 Z_K$ zu verwenden. Im besondern Beispiel eines 30-kV-Netzes mit 17 A Erdschluss-

⁹⁾ Diese Bestimmung der exakten Kompensierung ist bedeutend genauer als die aus der V-Kurve des Reststromes. Zudem bestimmt der Punkt D zusammen mit R und Z_{e0} alle interessanten Nullpunktgrössen des Netzes.

Messungen bei Widerstandserdung.

Tabelle II.

Versuch No.	Erdschlussspule			Wider- stand Ω	verkettete Span- nungen kV			Erdspan- nungen kV			Null- punkt- spannung kV xy	Rest- strom I A	Wattmessung: I mit			Be- obachtete Löschung
	Stellung	Strom A	Spannung kV		RS	ST	TR	RO	SO	TO			xy 1)	ST	SR-RT ²⁾	

¹⁾ Wattkomponente des Reststromes.

²⁾ Komponente des Reststromes in Phase mit der Sternspannung des geerdeten Leiters R .

strom beträgt der Widerstand der Erdkapazität 30000

$\frac{30000}{17 \cdot \sqrt{3}} = 1000 \text{ Ohm}$. Der Dämpfungswiderstand

also $R = 1000 \text{ Ohm}$ bei 10 % Wattverlusten, bzw. $R = 2000 \text{ Ohm}$ bei 5 % Wattverlusten. Als guten Mittelwert bzw. «Faustregel» kann man sich den Wert $R = Z_K$ leicht merken.

Grosse Verlagerungen (etwa 90 % der Phasenspannung und mehr) sind bei der Betriebskontrolle von Erdschlussrelais zweckmässig, weil dann noch hinreichend kräftige Drehmomente in den Erdschlussrelais zur Verfügung stehen. Die Verfahren zur Kontrolle der einwandfreien Funktion von Erdschlussrelais wurden früher beschrieben ¹⁰⁾.

Hochohmige Widerstandserdung kann auch zur betriebsmässigen regelmässigen Kontrolle des Kompensierungsgrades durchgeführt werden. Hierbei werden etwa die Beträge der Erdspannungen U_{e2} und U_{e3} der beiden nicht geerdeten Phasen miteinander verglichen, oder es wird die Wattkomponente und die Blindkomponente des Erdschlussreststromes bestimmt. In solchen Fällen sollen nur geringfügige Verlagerungen zur Anwendung kommen. Mehr als 25 % der Sternspannung sind nicht empfehlenswert, weil ja die Herstellung eines erdschlussähnlichen Zustandes nach Möglichkeit vermieden werden soll. Der Widerstand R wird also mit dem etwa 5- bis 10fachen Wert des Widerstandes (Z_K) der Erdkapazität des gesamten Netzes bemessen ¹¹⁾. Diese Verfahren ergeben jedoch nur dann genaue Werte für die Wattkomponente des gesamten Erdschlußstromes, wenn die Unsymmetriespannung U_0 tatsächlich so klein ist, dass das unter B beschriebene Verfahren keine bemerkbare Resonanzverlagerung liefert. Trifft diese Voraussetzung nicht zu, dann können die Messergebnisse durch die Unsymmetriespannung U_0 gefälscht werden. Es kann durch eine Unsymmetriespannung U_0 eine Vergrösserung oder Verkleinerung des Watt- und Blindreststromes vorgetäuscht werden, und zwar in Abhängigkeit von der Phasenlage der Unsymmetriespannung U_0 , je nachdem, welche von den drei Phasen A, B oder C vom Erdschluss betroffen wird.

Der Erdungswiderstand R muss in allen Fällen so gebaut sein, dass er die Belastung durch den ihn

¹⁰⁾ E. Groß, E. u. M. Bd. 46 (1928), S. 1213, und Bd. 47 (1929), S. 372.

¹¹⁾ Vgl. hierzu auch G. Keinath, Arch. techn. Messen, Artikel G. Meyer, ATM—V 354—2, 1933. Bei Höchstspannung oder in Netzen mit besonders grossem Erdschlußstrom, wenn also der Schutzwiderstand R relativ klein wird, kommen jedoch auch Methoden zur Anwendung, die eine Phasenerdung nicht erfordern.

durchfliessenden Strom ohne Veränderung verträgt. Es ist am besten, einen Metallwiderstand in Oel zu verwenden; solche Widerstände wurden früher für die nun kaum mehr zur Anwendung kommenden Hörner-Überspannungsableiter gebaut und sind deshalb in den Magazinen der Elektrizitätswerke zu finden.

Aus dem Beispiel eines 30-kV-Netzes mit 17 A Erdschlußstrom ist zu erkennen, dass der Widerstand $R = 1000 \text{ Ohm}$ den Kurzschlußstrom bei Doppel-Erdschluss sicher begrenzt (auf 30 A). Ein derartiger Versuch kann also tatsächlich ohne Beunruhigung des Netzbetriebes ausgeführt werden, obwohl der Sternpunkt um nahezu die volle Sternspannung verlagert wird. Um für alle Fälle vorzusorgen, wird der Erdschluss über einen Oelschalter mit automatischer Auslösung vorgenommen. Das Prinzipschema für solche Versuche zeigt Fig. 6. In der Erdleitung ist auch ein Lichtbogenhorn angedeutet, an dem bei einem Löschversuch die sichere Wirkung der Erdschlussspule leicht gezeigt werden kann. Die Messungen sind nach Tabelle II vorzunehmen.

Es sei erwähnt, dass aus dem Kreisdiagramm der hochohmigen Widerstandserdung eines gelöschten Drehstromnetzes (Fig. 4) auch weitgehende Schlüsse über die Abhängigkeit der Lichtbogenlöschung von Netzzumfang und Betriebsspannung abgeleitet werden können, jedoch soll hierauf an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Es ist aber noch darauf hinzuweisen, dass der Erdschlussreststrom dem Ortsvektor von A aus an den Kreis (Fig. 4) in richtiger Phasenlage proportional ist. Da M nicht auf OA liegt, ist der Reststrom bei exakter Kompensierung (AD) etwas grösser als der Minimal-Reststrom (bei geringer Unterkompensierung).

D. Grundlage des Ersatz-Schaltbildes.

1. Bezeichnungen: Sternspannung U_i .

Erdspannung U_{ei} .

Impedanz der Erdkapazität Z_{Ki} pro Phase

$$\left(\mathfrak{Z}_{Ki} = \frac{1}{j \omega C_i} + \frac{1}{G_i} \right)$$

Impedanz $\mathfrak{Z}_K$ der gesamten Erdkapazität des Netzes:

$$\frac{1}{\mathfrak{Z}_K} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\mathfrak{Z}_{Ki}}$$

Nullpunktspannung: U_0 ohne Erdschlussspule.

Nullpunktspannung: U mit Erdschlussspule.

Impedanz der Erdschlußspule Z_e , variabel je nach Einstellung; Z_e enthält alle Widerstände, die zur Nullpunktimpedanz gehören, beispielsweise auch die Nullpunktimpedanz des Anschlusstransformators.

Index $i = 1, 2, 3$ bzw. für Phase A, B, C.

Alle Summierungen Σ_i für $i = 1, 2, 3$ bezeichnet mit Σ .

2. Unsymmetrisches Netz ohne Erdschlußspule:

$$\mathfrak{Z}_{K1} \neq \mathfrak{Z}_{K2} \neq \mathfrak{Z}_{K3}.$$

Die Summe aller Ströme nach Erde muss Null werden:

$$\sum \frac{U_{ei}}{\mathfrak{Z}_{Ki}} = 0 = \sum \frac{U_i + U_0}{\mathfrak{Z}_{Ki}} \text{ weil } U_{ei} = U_i + U_0$$

also

$$\begin{aligned} \sum \frac{U_i}{\mathfrak{Z}_{Ki}} + \sum \frac{U_0}{\mathfrak{Z}_{Ki}} &= \sum \frac{U_i}{\mathfrak{Z}_{Ki}} + U_0 \sum \frac{1}{\mathfrak{Z}_{Ki}} \\ &= \sum \frac{U_i}{\mathfrak{Z}_{Ki}} + \frac{U_0}{\mathfrak{Z}_K} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

mit $\sum \frac{U_i}{\mathfrak{Z}_{Ki}} = \mathfrak{I}_u = \text{unausgeglichener Erdstrom des Netzes,}$

hervorgerufen durch Ungleichheit der drei Erdkapazitäten, wird

$$\mathfrak{I}_u \mathfrak{Z}_K + U_0 = 0.$$

Bei satter Sternpunktterdung wird $U_0 = 0$ und I_u fließt nach Erde ab. U_0 und I_u haben eine ähnliche Bedeutung wie Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom des allgemeinen Uebertragungskreises.

3. Einschaltung der Erdschlußspule; $U_{ei} = U_i + U$, Stromsumme Null wie oben:

$$\sum \frac{U_{ei}}{\mathfrak{Z}_{Ki}} + \frac{U}{\mathfrak{Z}_e} = 0 = \sum \frac{U_i}{\mathfrak{Z}_{Ki}} + U \left(\frac{1}{\mathfrak{Z}_K} + \frac{1}{\mathfrak{Z}_e} \right) = 0$$

oder mit Gl. (1)

$$U \left(\frac{1}{\mathfrak{Z}_K} + \frac{1}{\mathfrak{Z}_e} \right) = \frac{U_0}{\mathfrak{Z}_K}$$

oder

$$\frac{U - U_0}{\mathfrak{Z}_K} + \frac{U}{\mathfrak{Z}_e} = 0.$$

4. Zusätzliche Erdung einer Phase (1) über eine Impedanz Z :

$$\begin{aligned} \frac{U_{e1}}{\mathfrak{Z}} + \frac{U}{\mathfrak{Z}_e} + \sum \frac{U_{ei}}{\mathfrak{Z}_{Ki}} &= \\ &= \frac{U_1 + U}{\mathfrak{Z}} + \frac{U}{\mathfrak{Z}_e} + \sum \frac{U_i}{\mathfrak{Z}_{Ki}} + \frac{U}{\mathfrak{Z}_K} = 0, \end{aligned}$$

oder mit Gl. (1)

$$\frac{U_1 + U}{\mathfrak{Z}} + \frac{U}{\mathfrak{Z}_e} + \frac{U - U_0}{\mathfrak{Z}_K} = 0; \quad (2)$$

Dieser Gleichung entspricht das Schema Fig. 1.

5. Mit $U_0 = 0$, aus $\mathfrak{Z}_{K1} = \mathfrak{Z}_{K2} = \mathfrak{Z}_{K3}$, wegen $\Sigma U_i = 0$, folgt aus Gl. (2)

$$\frac{U_1}{\mathfrak{Z}} + U \left(\frac{1}{\mathfrak{Z}} + \frac{1}{\mathfrak{Z}_e} + \frac{1}{\mathfrak{Z}_K} \right) = 0$$

und das Schema Fig. 3, aus dem sich die Kreisdiagramme für U auf bekannte Weise¹²⁾ ableiten lassen.

¹²⁾ E. Groß, E. u. M. Bd. 49 (1931), S. 825.

Hochfrequenztechnik und Radiowesen — Haute fréquence et radiocommunications

Hochfrequenztagung des SEV am 15. Mai 1937 über Funkpeilung im Luftverkehr

siehe Seite 175.

Die Funknavigation der Zeppelinluftschiffe.

621.396.933

Es wurde an dieser Stelle schon früher über die Funkanlagen des Zeppelinluftschiffes LZ 129 (Hindenburg) kurz berichtet¹⁾. Die folgenden Angaben über die Funknavigation der Luftschiffe LZ 127 (Graf Zeppelin) und LZ 129 entnehmen wir einem Artikel der Kapitäne Wittemann und Pruss²⁾.

Eines der angewendeten Verfahren, die *Fremdpeilung*, beruht darauf, dass die Bordfunkstelle bei Fahrten über Land die zuständige Funkpeilstelle, bei Fahrten über See die zuständige Küstenfunkstelle (oder auch ein Schiff) anruft. Das Luftschiff sendet dann die international vereinbarten Peilzeichen, deren Richtung von der Bodenstation gemessen und telegraphisch mitgeteilt wird. Aus mehreren solchen Peilungen, unter Berücksichtigung der zwischenliegenden Fahr-

strecke kann der Ort des Luftschiffes ermittelt werden. Diese Methode arbeitet bei Tage und besonders in Längsrichtung des Luftschiffes befriedigend bis auf einige 100 Seemeilen; störend wirken der *Nachteffekt* und der *Schleppantennenfehler*. Der *Nachteffekt*³⁾ beruht darauf, dass die von den horizontalen Teilen der Sendeantenne abgestrahlten Wellen in der Heavisideschicht eine Drehung der Polarisationssebene



Fig. 1.

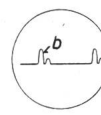


Fig. 2.

Zackenbilder auf der Braunschen Röhre beim Impulspeilverfahren.

a Bodenwelle.
b Raumwellen.

Fig. 1.
Bild im Peil-
maximum.

Fig. 2.
Bild im Peil-
minimum.

erleiden und dadurch von der vertikalen Empfangsantenne teilweise aufgenommen werden und das Intensitätsminimum fälschen. Dieser Effekt wird durch die Schleppantenne, die durch den Fahrwind etwa 45° schräg nach hinten gelegt wird, noch verschlimmert, besonders für Fremdpeilungen quer zur Fahrtrichtung, weil die ausgesandte Welle stark schräg pola-

³⁾ Vergleiche genauere Angaben über Zustandekommen des *Nachteffektes*, über besondere Antennenformen zu dessen Verminderung, im Bulletin SEV 1935, Nr. 8, S. 209; ferner über experimentelle Untersuchungen, Bull. SEV 1935, Nr. 12, S. 328, und 1937, Nr. 5, S. 107.

¹⁾ Bulletin SEV 1936, Nr. 15, S. 429.

²⁾ Telefunken-Ztg., Nr. 73, Juli 1936.