

**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 auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 17.02.2026

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

## Ueber die erstmalige Bestimmung der günstigsten Einstellung von Erdenschlusspulen.\*)

Von Erich Groß, Wien.

621.316.935.2

Nach dem Einbau von Erdschlusspulen 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.

In Hochspannungsnetzen ist der Einbau von Erdschlusspulen 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 Erdschlusspulen eingebaut. Im folgenden werden die Verfahren beschrieben, welche bei Inbetriebnahme einer Erdschlusspule zur erstmaligen Funktionskontrolle durchzuführen sind. Dabei werden wohl auch Löschversuche 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 Erdschlusspulen in Kabel- und Freileitungsnetzen mit 3 bis 125 kV Betriebsspannung erprobt<sup>1)</sup>. Sie sind ganz allgemein anwendbar, also nicht auf einphasige Erdschlusspulen beschränkt, sondern ebenso für Versuche mit dreiphasigen Erdschlusspulen 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

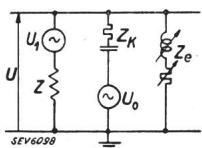


Fig. 1.

Allgemeines Ersatzschema.

unsymmetrisch ist. Das Ersatzschema hiefür 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 Erdschlusspule).  $U$  ist die Nullpunktverlagerung, wenn irgendeine Erdung vorgenommen wird und  $Z_e$  ist die gesamte, vornehmlich induktive Impedanz der ein- oder dreiphasigen Erdschlusspule. Schliesslich ist  $Z_K$  die Impedanz der Erdkapazität des gesamten

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.

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

Durch Verdrillung wird die Unsymmetriesspannung  $U_0$  verkleinert. In Kabelnetzen verschwindet  $U_0$  wegen des symmetrischen Aufbaues von selbst. In ausgedehnten Mittelspannungsnetzen ergeben sich meist praktisch vernachlässigbare Unsymmetriesspannungen ( $U_0 = 0$ ). 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 Unsymmetriesspannungen deshalb wohl erst in Netzen mit höherer Betriebsspannung, von etwa 50 kV aufwärts, weil die dort angewandte 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 Erdschlusspulen ist die Herstellung von Erdschlässen zweckmässig. Durch die Einschaltung eines Widerstandes soll dem Entstehen von Doppelerschluss-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 Ausnutzung 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  $Z = \infty$  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.

<sup>1)</sup> 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 legen<sup>2)</sup>.

### 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 Netztumfang 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

$$U = Z_e \cdot \frac{U_0}{Z_e + Z_K}$$

oder

$$U = U_0 \cdot \frac{Z_e}{Z_e + Z_K} = U_0 \frac{\frac{1}{Z_K}}{\frac{1}{Z_e} + \frac{1}{Z_K}}$$

Das ist bekanntlich die Gleichung eines Kreises durch den Ursprung, weil die Ortsgerade für  $Z_e$  auch durch den Ursprung geht. Dabei ist  $Z_e = R_e + jX_e$  und  $Z_K = R_K - jX_K$ . 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 Parallelenschaltungen nach den Formeln:

$$\frac{1}{Z_e} = \frac{1}{\varrho} + \frac{j}{\xi} \quad \text{und} \quad \frac{1}{Z_K} = \frac{1}{\gamma} - \frac{j}{\kappa}$$

so wird

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

Bei exakter Abstimmung (Resonanz) hebt sich die Parallelenschaltung der Blindwiderstände  $\xi$  und  $\kappa$  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 Netztumfang sind.

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

als Gesamtverlustwiderstand der Parallelschaltung von Netz und Erdschlussspule:

$$\frac{U_0}{U_R} = \frac{Z_{\text{exakt}}}{R_v} = \frac{\frac{U_{\text{stern}}}{R_v}}{\frac{U_{\text{stern}}}{Z_{\text{exakt}}}} = \frac{\text{Wattreststrom}}{\text{Erdschlusstrom}},$$

eine bekannte Beziehung<sup>3)</sup>. Weil der Wattreststrom in Freileitungsnetzen nie weniger als 5 % des Erdschlusstromes beträgt, kann die maximale Verlagerungsspannung höchstens 20mal grösser werden als die Unsymmetriesspannung  $U_0$ . Da es leicht ist, so zu verdrillen, dass  $U_0$  kleiner bleibt als 5 % der Sternspannung  $U_{\text{stern}}$  des Netzes, wird  $U_{\text{max}}$  immer kleiner sein als  $U_{\text{stern}}$ . Beispielsweise beträgt die Verlagerung  $U_{\text{max}}$  bei 3 % Unsymmetriesspannung unter der Annahme von 5 % Wattreststrom nur 60 % der Sternspannung  $U_{\text{stern}}$ .

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  $U_{\text{max}}$  (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 Änderung soll über einen Wert  $U \approx 0,25 U_{\text{stern}}$  nicht hinausgegangen werden. Höhere Werte werden nur in Ausnahmsfällen bei unzureichend oder gar nicht verdrillten Leitungen auftreten. In solchen Netzen wird für den Betrieb natürlich nicht die Resonanzinstellung, sondern eine benachbarte so gewählt, dass  $U$  nicht grösser als ca.

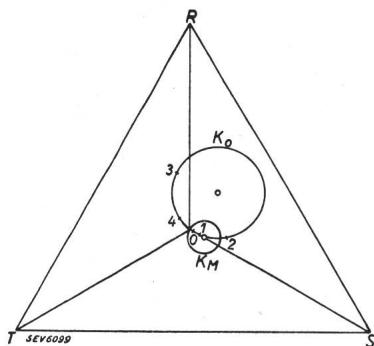
3) J. Jonas, E. u. M. Bd. 38 (1920), S. 453.

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

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

0,25  $U_{\text{stern}}$  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 anderseits 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.



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

Tabelle I.

Erdschlussspule		Erdspannungen			verkettete Spannungen			Frequenz Hz
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.

Nachdem die günstigste Einstellung der Erdschlussspule ermittelt ist, können Löschversuche ausgeführt werden, beispielsweise durch lichtbogenfreies Abschalten eines Erdschlusses mit einem Trenner<sup>4)</sup> oder durch Nachahmung natürlicher Erdschlüsse, indem ein Stützisolator oder eine Hängekette mit einem dünnen, gewichtsbelasteten Metalldraht überbrückt<sup>5)</sup> 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

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

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

gesamten Strecke verdrillt ist<sup>6)</sup> und vorher gar nicht verdrillt war. Wie Fig. 2 zeigt, bleibt die Verlagerung nach der Verdrillung trotzdem in zulässigen Grenzen<sup>7)</sup>.

### 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 Netzerdkapazität 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

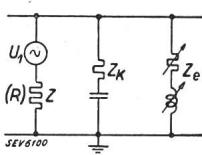


Fig. 3.  
Ersatzschema des symmetrischen Netzes mit Widerstandserdung einer Phase.

nun an, dass die Erdung beispielsweise über einen induktiven Widerstand erfolgt und Unterkompensation herrscht, so ist die Gefahr der Resonanz zwischen der Erdungssinduktivität 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

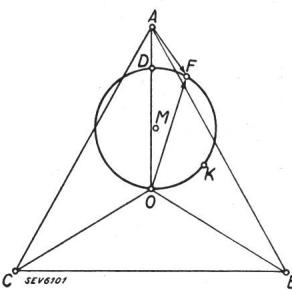


Fig. 4.

Kreisdiagramm der Nullpunktverlagerung bei Widerstandserdung einer Phase.

am Vektor OA der Sternspannung  $U_1$ , sondern ist etwas gegen die Seite der Unterkompensierung verschoben<sup>8)</sup>. Bei exakter Abstimmung ist der Erdschlussreststrom ein reiner Wattstrom, also in Phase mit der treibenden Spannung  $U_1$ . Durch den Schnitt-

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

<sup>7)</sup> 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  $U_{\text{stern}}$  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.

<sup>8)</sup> 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

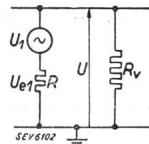


Fig. 5.

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

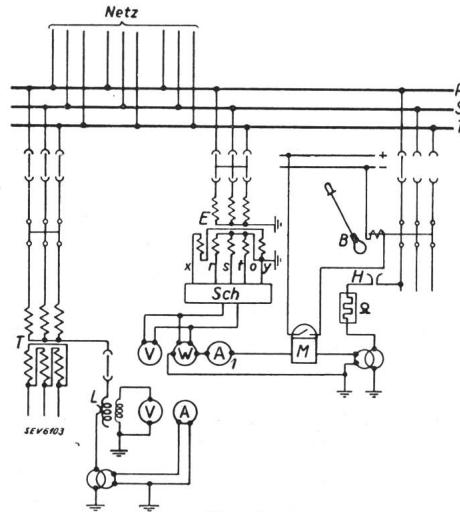
$$OD : DA = U_R : U_{e1} = R_v : R$$

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  $U_{e3}$ <sup>9</sup>). Bei Abschaltung der Spule ( $Z_e = \infty$ ) wird  $U_\infty = OK$ ; dieser Fall kommt z. B. auch dann vor, wenn der Erdschlussstrom des noch unkompensierten Netzes zwecks Projektierung einer Erdschlussspule zu messen ist.

Aehnlich 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  $A_1$ , anderseits 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 Nullpunktsspannung  $U = OF$  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 Netzerdschlussstromes 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 Erdungsdrossel (Fünfschenkelwandler) mit Messwicklungen. Phasenenden r, s, t; Sternpunkt o; Nullpunktsspannung  $U = xy$ .  
R Erdungswiderstand (Metallwiderstand in Öl).  
H Lichtbogenhorn (sehr weit eingestellt).  
B Überbrückung 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).

Betrag 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

Betrag 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-

<sup>9</sup>) 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  $Z_e$  alle interessanten Nullpunktgrössen des Netzes.

## Messungen bei Widerstandserdung.

Tabelle II.

Versuch No.	Erdschlusspule			Wider- stand $\Omega$	verkettete Span- nungen kV	Erdspan- nungen kV	Null- punkt- spannung kV xy	Rest- strom I A	Wattmessung: I mit			Be- obachtete Lösung						
	Stellung	Strom A	Spannung kV						xy	1)	ST	SR - RT <sup>2</sup> )						
1) Wattkomponente des Reststromes.																		
2) Komponente des Reststromes in Phase mit der Sternspannung des geerdeten Leiters R.																		

strom beträgt der Widerstand der Erdkapazität  $\frac{30000}{17 \cdot \sqrt{3}} = 1000$  Ohm. Der Dämpfungswiderstand also  $R = 1000$  Ohm bei 10 % Wattverlusten, bzw.  $R = 2000$  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<sup>10)</sup>.

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<sup>11)</sup>. Diese Verfahren ergeben jedoch nur dann genaue Werte für die Wattkomponente des gesamten Erdschlussstromes, wenn die Unsymmetriesspannung  $U_0$  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 Unsymmetriesspannung  $U_0$  gefälscht werden. Es kann durch eine Unsymmetriesspannung  $U_0$  eine Vergrösserung oder Verkleinerung des Watt- und Blindreststromes vorgetäuscht werden, und zwar in Abhängigkeit von der Phasenlage der Unsymmetriesspannung  $U_0$ , 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

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

<sup>11)</sup> 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-Ueberspannungsableiter gebaut und sind deshalb in den Magazinen der Elektrizitätswerke zu finden.

Aus dem Beispiel eines 30-kV-Netzes mit 17 A Erdschlusstrom ist zu erkennen, dass der Widerstand  $R = 1000$  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 ange deutet, 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 Netzmfang 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

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

Impedanz  $Z_K$  der gesamten Erdkapazität des Netzes:

$$\frac{1}{Z_K} = \sum_{i=1}^{i=3} \frac{1}{Z_{Ki}}$$

Nullpunktspannung:  $U_0$  ohne Erdschlussspule.

Nullpunktspannung:  $U$  mit Erdschlussspule.

Impedanz der Erdschlüsse Spule  $Z_e$ , 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  $\Sigma_i$  für  $i = 1, 2, 3$  bezeichnet mit  $\Sigma$ .

2. Unsymmetrisches Netz ohne Erdschlüsse Spule:

$$\beta_{K1} \neq \beta_{K2} \neq \beta_{K3}.$$

Die Summe aller Ströme nach Erde muss Null werden:

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

also

$$\begin{aligned} \sum \frac{U_i}{\beta_{Ki}} + \sum \frac{U_0}{\beta_{Ki}} &= \sum \frac{U_i}{\beta_{Ki}} + U_0 \sum \frac{1}{\beta_{Ki}} \\ &= \sum \frac{U_i}{\beta_{Ki}} + \frac{U_0}{\beta_K} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

mit  $\sum \frac{U_i}{\beta_{Ki}} = \mathfrak{J}_u = \text{unausgeglichenener Erdstrom des Netzes,}$

hervorgerufen durch Ungleichheit der drei Erdkapazitäten, wird

$$\mathfrak{J}_u \beta_K + U_0 = 0.$$

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 Erdschlüsse Spule;  $U_{ei} = U_i + U$ , Stromsumme Null wie oben:

$$\sum \frac{U_{ei}}{\beta_{Ki}} + \frac{U}{\beta_e} = 0 = \sum \frac{U_i}{\beta_{Ki}} + U \left( \frac{1}{\beta_K} + \frac{1}{\beta_e} \right) = 0$$

oder mit Gl. (1)

$$U \left( \frac{1}{\beta_K} + \frac{1}{\beta_e} \right) = \frac{U_0}{\beta_K}$$

oder

$$\frac{U - U_0}{\beta_K} + \frac{U}{\beta_e} = 0.$$

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

$$\begin{aligned} U_{e1} + \frac{U}{\beta_e} + \sum \frac{U_{ei}}{\beta_{Ki}} &= \\ &= \frac{U_1 + U}{3} + \frac{U}{\beta_e} + \sum \frac{U_i}{\beta_{Ki}} + \frac{U}{\beta_K} = 0, \end{aligned}$$

oder mit Gl. (1)

$$\frac{U_1 + U}{3} + \frac{U}{\beta_e} + \frac{U - U_0}{\beta_K} = 0; \quad (2)$$

Dieser Gleichung entspricht das Schema Fig. 1.

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

$$\frac{U_1}{3} + U \left( \frac{1}{3} + \frac{1}{\beta_e} + \frac{1}{\beta_K} \right) = 0$$

und das Schema Fig. 3, aus dem sich die Kreisdiagramme für  $U$  auf bekannte Weise<sup>12)</sup> ableiten lassen.

<sup>12)</sup> 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 Funkeinrichtungen des Zeppelinluftschiffes LZ 129 (Hindenburg) kurz berichtet<sup>1)</sup>. Die folgenden Angaben über die Funknavigation der Luftschiffe LZ 127 (Graf Zeppelin) und LZ 129 entnehmen wir einem Artikel der Kapitäne Wittemann und Pruss<sup>2)</sup>.

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*<sup>3)</sup> beruht darauf, dass die von den horizontalen Teilen der Sendeantenne abgestrahlten Wellen in der Heavisideschicht eine Drehung der Polarisationsebene

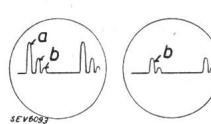


Fig. 1.

Zackenbilder auf der Braunschen Röhre beim Impulspeilverfahren.  
a Bodenwelle.  
b Raumwellen.

Fig. 1.  
Bild im Peilmaximum.

Fig. 2.  
Bild im Peilminimum.

Fig. 2.

Fig. 2.

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-

<sup>1)</sup> 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.

<sup>2)</sup> Bulletin SEV 1936, Nr. 15, S. 429.

<sup>3)</sup> Telefunken-Ztg., Nr. 73, Juli 1936.