Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 21 (1930)

Heft: 23

Artikel: Untersuchungen mittels Kathodenstrahl-Oszillograph der durch Erdschluss hervorgerufenen Ueberspannung in einem 8 kV-Verteilnetz

Autor: Berger, Karl

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1061340

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: 03.10.2025

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

	Minimale Belastung	Vorjahr	Mittlere Belastung	Maximale Belastung	Vorjahr
im Dezember 1929	0,67	(0,67)	1	1,4	(1,35)
im März 1930	0,71	(0,66)	1	1,3	(1,31)
im Juni 1930	0,75	(0,76)	1	1,24	(1,26)
im September 1930	0,71	(0,75)	1	1,27	(1,26).

Der Vergleich mit der im Jahre 1928/29 erzeugten Energie gibt folgendes Bild

Eine Abnahme der totalen ausgenützten Energie von $30{,}5 \cdot 10^6$ kWh (0,86 %),
Eine Abnahme der exportierten Energie von . . . . $133{,}3 \cdot 10^6$ kWh (12,2 %),
Eine Zunahme der in der Schweiz für normalen Verbrauch verwerteten Energie . . . . . $154{,}2 \cdot 10^6$ kWh (7,0 %),
Eine Abnahme der in der Schweiz verwerteten Abfallenergie . . . . . $51{,}4 \cdot 10^6$ kWh (20,0 %).

Die zur Verfügung stehende Energie hat sich im Berichtsjahre erhöht durch die Inbetriebsetzung der Kraftwerke Handeck, Sembrancher und Champsec. Das Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt wird im kommenden Jahre als Energieproduzent auftreten.

Die grösste verzeichnete Maximalleistung der Gesamtheit der Kraftwerke betrug 629 000 kW im Dezember 1929, gegenüber 633 000 kW im Dezember 1928. Die virtuelle Benützungsdauer dieser Maximalleistung war $\frac{3528}{629000} = 5608$ Stunden.

Untersuchungen mittels Kathodenstrahl-Oszillograph der durch Erdschluss hervorgerufenen Ueberspannungen in einem 8 kV-Verteilnetz.

Von Dr. ing. *Karl Berger*, Ingenieur beim Schweiz. Elektrotechnischen Verein.

621.317.755.004 : 621.316.93

Es werden Erdschlussversuche beschrieben, die in verschieden geformten 8 kV-Netzen erstmals mit Hilfe des Kathodenstrahl-Oszillographen durchgeführt wurden. Dabei zeigte sich, dass Höhe und Verlauf der Ueberspannungen wesentlich von der Lage des Erdschlusses abhängen. Ferner variiert die Ueberspannung ein und derselben Phase je nach der örtlichen Lage, wo gemessen wird. Die Wirkungen von veralteten Schutzapparaten werden untersucht, ferner das Verhalten eines Induktionsreglers und der Stromwandler beobachtet. Die Vorgänge werden zu erklären versucht durch Betrachtung des Wanderwellenvorganges, der durch den plötzlichen Erdschluss ausgelöst wird. Schliesslich werden Folgerungen für die Isolation solcher Netze gezogen.

L'auteur décrit des essais de courts-circuits à la terre, exécutés dans différents réseaux à 8 kV et mesurés pour la première fois à l'aide de l'oscillographe cathodique. Il en résulte que l'amplitude et l'allure des surtensions dépendent sensiblement de l'endroit du court-circuit. En outre, la surtension d'une seule et même phase varie suivant l'endroit où a lieu la mesure. L'auteur a examiné l'influence d'appareils de protection surannés et observé le fonctionnement d'un régulateur d'induction et des transformateurs d'intensité. Il essaie d'expliquer les phénomènes en jeu en considérant le processus des ondes mobiles, provoqué par un court-circuit à la terre subit. Des conclusions relatives à l'isolement de réseaux analogues terminent cet article.

I. Einleitung.

Im Frühjahr 1929 ermöglichten die Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (E. K. Z.) in verdankenswerter Weise die Durchführung einer grossen Reihe von Erdschlussversuchen in einem Teil ihres 8 kV-Netzes. Es handelte sich dabei erstmals um die Verfolgung des zeitlichen Verlaufs und der Höhe der auftretenden Erdschlussüberspannungen mit Hilfe des Kathodenstrahl-Oszillographen. Anlass gaben eine Reihe typischer Ueberspannungsstörungen infolge von Gewittern. Auf Grund der im Sommer 1928 durchgeführten Gewitterspannungsmessungen auf der

Station Forch[1]) wurde anfänglich vermutet, dass es sich bei den Störungen um die Auswirkung von Gewittererdschlüssen handle. Es wurde daher zur Abklärung eine gründliche Ausmessung der als Folge von Erdschlüssen entstehenden Beanspruchungen der speisenden Transformatorenstationen vorgesehen und durchgeführt, die im folgenden beschrieben werden.

II Netzdaten und Versuchsanordnungen.

Das den Erdschlüssen unterworfene Netz bestand entweder aus einer Verbindungsleitung zweier Transformatoren-Unterwerke *A* und *R* für 45 auf 8,6 kV, oder dann aus der Gesamtheit aller vom Unterwerk *A* oder *R* gespiesenen Leitungen.

Das erste kleine Netz sei mit *Versuchsnetz H* bezeichnet. Seine Lage ist in Fig. 1 dargestellt. Es ist wesentlich T-förmig. Die Länge der Verbindungsleitung zwischen den Endpunkten, d. h. den Unterwerken *A* und *R* beträgt 13,920 km. Die ungefähr in der Mitte zwischen *A* und *R* abgehende Zweigleitung ist 8,030 km lang.

Gesamtlänge des Netzes $H = \begin{cases} 37{,}50 \text{ km Freileitung.} \\ 0{,}050 \text{ km Kabel.} \end{cases}$

Anzahl Stützpunkte (Holzmasten) = 942.

Anzahl angeschlossener Verbrauchertransformatoren = 30.

Summe der Nennleistungen der angeschlossenen Verbrauchertransformatoren = 1420 kVA.

Erdschlusstrom = 1,1 A.

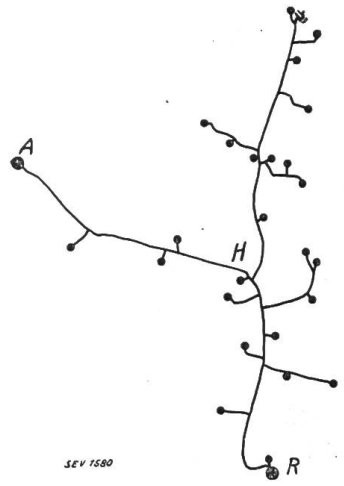

Fig. 1.
Versuchsnetz *H*.
Masstab: 1 : 250 000.

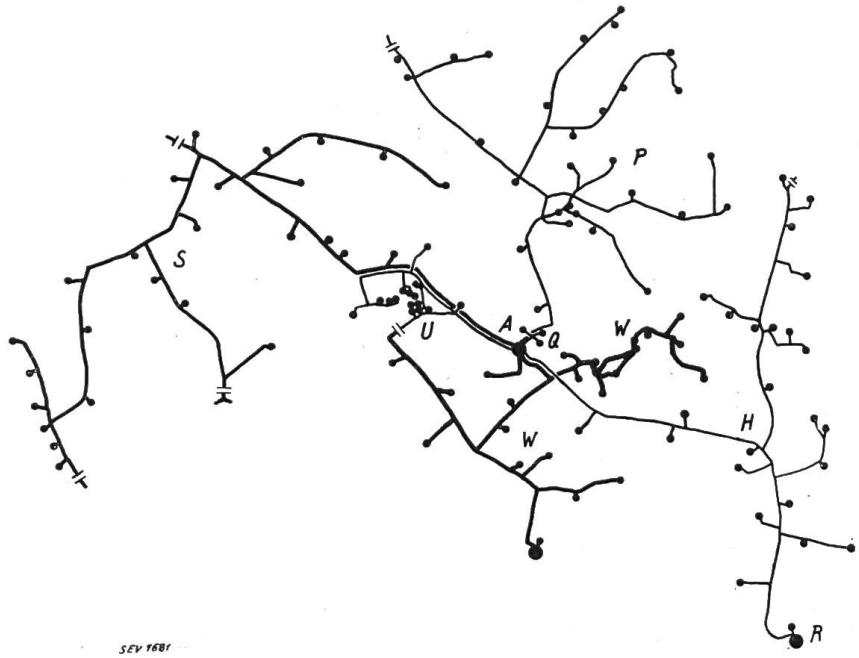

Fig. 2.
Versuchsnetz *A*. Masstab: 1 : 250 000.

Die Leitung besteht hauptsächlich aus Kupferdraht mit 8 oder 4 mm Durchmesser. Phasenabstand der Drähte = ca. 70 cm, mittlere Höhe über Boden = 9 m. 39 Stützpunkte vor dem Unterwerk *A* werden zugleich auch von andern 8 kV-Leitungen benutzt.

Das zweite Versuchsnetz, das wir als *Versuchsnetz A* bezeichnen wollen, umfasst alle vom Unterwerk *A* ausgehenden 8 kV-Verteilleitungen; es ist in Fig. 2 dargestellt. Ausser dem als Versuchsnetz *H* bereits beschriebenen Teil sind noch 5 Leitungen

[1]) K. Berger. Ueber den Verlauf der von Gewittern auf zwei Mittelspannungsleitungen erzeugten Spannungen. Bull. SEV 1929, No. 5, sowie Dissertation Zürich 1930.

vorhanden, die entsprechend der Eigenart des ländlichen Versorgungsgebietes stark verzweigt sind.

Zusammensetzung des Versuchsnetzes *A*:

Netzteil	*H* =	37,50 km	30 Transformatoren
„	*P* =	43,41 „	39 „
„	*Q* =	0,28 „	8 „
„	*W* =	30,32 „	28 „
„	*U* =	11,30 „	19 „
„	*S* =	45,63 „	31 „
Total Freileitung	=	168,44 km	155 Transformatoren mit
Total Kabel	=	0,42 km	total 10 100 kVA Nennleistung

Die Gesamtzahl der Leitungsisolatoren pro Phase beträgt ca. 4800; die Anzahl der Masten ist infolge von mehrfachen Leitungen auf denselben kleiner, nämlich ca. 4200. Der Erdschlusstrom dieses ganzen Versorgungsgebietes des Unterwerks *A* beträgt 4,5 A. Die Phasenabstände auf den Leitungen betragen für die zum weitaus grössten Teil benutzten Kupferdrähte mit 4 und 8 mm Durchmesser 70 cm, für einige kürzere Aluminiumleitungsstücke 80 cm.

Das dritte Versuchsnetz endlich umfasste wiederum die stets benutzte Verbindungsleitung *A-H-R* (Versuchsnetz *h*), aber diesmal zusammen mit der Gesamtheit aller vom Unterwerk *R* am Ende der Leitung *H* ausgehenden 8 kV-Leitungen. Wir bezeichnen deshalb das dritte Netz als *Versuchsnetz R*. Es umfasst ausser der Leitung *H* noch weitere 5 von *R* ausgehende Leitungen und hat ähnliche Form wie das Versuchsnetz *A*. Eine bildliche Darstellung erübrigt sich daher.

Die Gesamtlänge des Netzes *R* beträgt = 138,7 km,
resp. in einer speziellen Versuchsreihe ≅ 118 km.
Der Erdschlusstrom ergibt sich daraus zu ca. 3,7 resp. 3,2 A.

Besonders zu erwähnen ist noch, dass während der Dauer der Versuche im ganzen Netz keine Ueberspannungsableiter angeschlossen und sämtliche Transformatoren-Sternpunkte von Erde isoliert waren. Die einzige Verbindung des Netzes nach Erde war über 3 Spannungswandler im Unterwerk *A* hergestellt, die zwischen je einer Phase und Erde angeschlossen sind und je ein Voltmeter und Signalrelais speisen. Die Spannungsmessung mittels des Kathodenstrahl-Oszillographen geschah ausschliesslich im Unterwerk *A*. Dagegen wurden die Erdschlüsse bei den beiden Versuchsserien an Netz *A* und Netz *H*, sowohl in *A* als auch am Ende der Versuchsleitung *H*, nämlich im Unterwerk *R* eingeleitet. Während der Versuche stand das Versuchsnetz übrigens unter normaler Verbraucherbelastung. Die bei Erdschlüssen im Betrieb auftretenden Verhältnisse sind dadurch vollständig gewahrt worden, wofür der Betriebsleitung der E. K. Z. besonderer Dank gebührt. Das prinzipielle Schema des Versuchsnetzes und der Messanordnung im Unterwerk *A* geht aus Fig. 3 hervor.

Bei den Versuchen mit dem ganzen Netz *A* wurde die Energie von ein oder zwei Transformatoren zu je 4000 kVA und 4,4 % Kurzschlusspannung des Unterwerkes *A* geliefert. Bei den Versuchen mit der Leitung *H* allein wurde sowohl bei Speisung durch Unterwerk *A* als auch bei Speisung durch Unterwerk *R*, d. h. am Anfang oder am Ende der Leitung, gemessen; im letztern Fall mit einem Transformator für 1000 kVA mit 4,4 % Kurzschlusspannung. Die Erdschlüsse wurden entweder durch langsames Schliessen eines zwischen eine Phase und Erde geschalteten Trenners oder Schalters, oder dann durch Schliessen und langsames Oeffnen eines verstellbaren Horns erzeugt. Der erste Fall wird im folgenden als *fester*, der zweite Fall als *aussetzender Erdschluss* bezeichnet. Die Erdschlusstelle lag stets an einem Abzweig auf der Leitungsseite des Leitungsschalters *H*, um bei eventuell auftretenden Doppelerdschlüssen, d. h. Kurzschlüssen, diese automatisch abzuschalten. In Fig. 3 ist auch der 8 kV-Induktionsregler des Unterwerks *A*

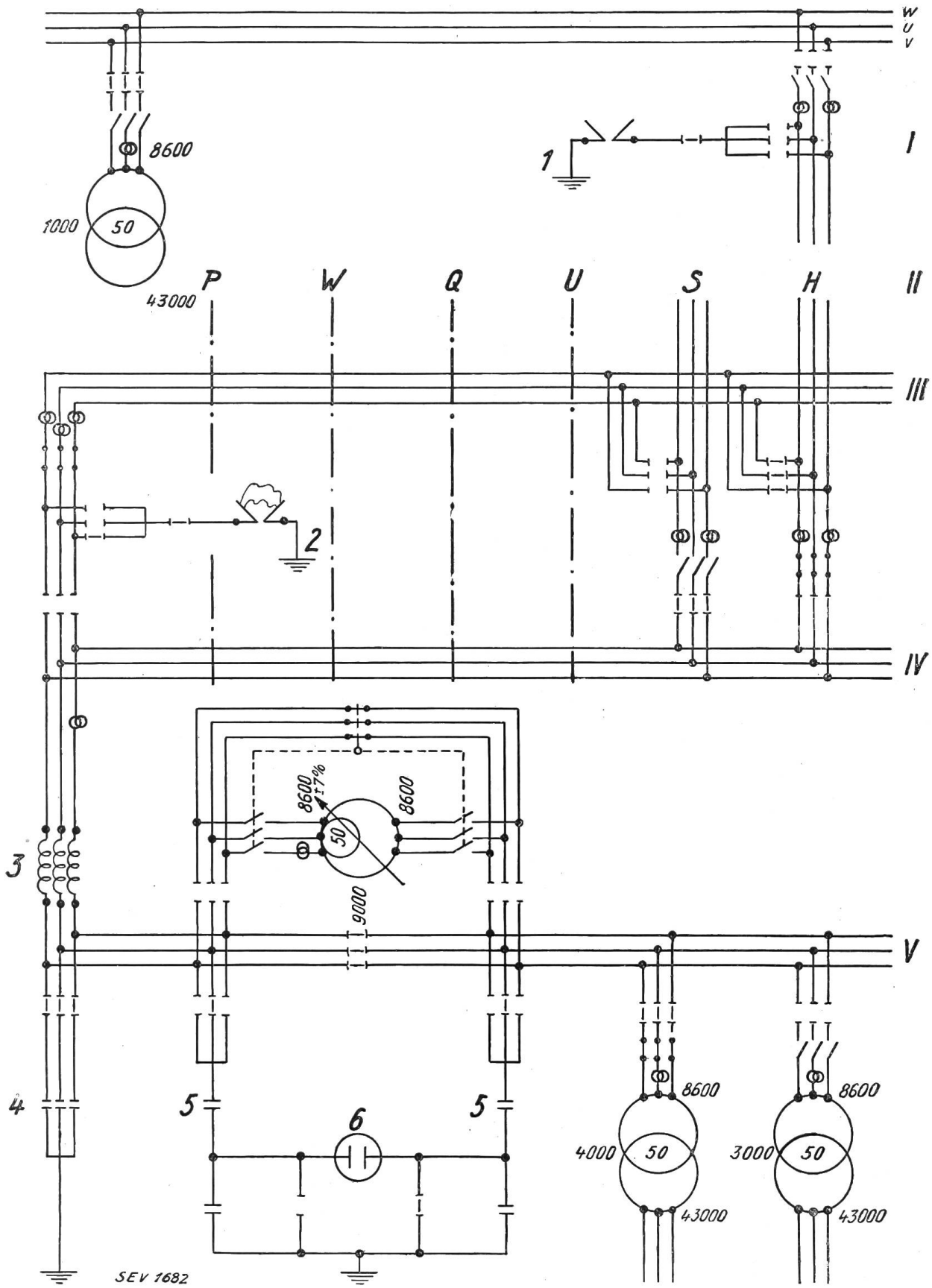

Fig. 3. Schema der Netz- und Messanordnung.

I = Unterwerk R
II = Leitungen
III = Hilfsschienen
IV = Leitungssammelschienen
V = Transformatorensammelschienen
} des Unterwerkes A

1 = Erdschlusspunkt in R; Widerstand ca. 1,3 resp. 38 Ω.
2 = Erdschlusspunkt in A; Widerstand ca. 1,6 Ω.
3 = Sammelschienendrosselspulen in A; 0,08 mH pro Phase.
4 = Sammelschienenkondensatoren in A; 0,044 μF pro Phase.
5 = Spannungsteilkondensatoren; ca. 50 cm Kapazität.
6 = Kathodenstrahl-Oszillograph.

angedeutet. Seine Daten sind folgende: Durchgangsleistung 9000 kVA, Zusatzleistung 660 kVA, Statorimpedanz ca. 0,075 Ω, Statorstreuinduktivität ca. 0,24 mH pro Phase. Einesteils wurde mit überbrückter Statorwicklung und abgetrenntem Regler, anderseits mit eingeschaltetem Regler gemessen. Im letztern Fall war Spannungsmessung leitungsseitig, transformatorseitig und über die Statorwicklung (Zusatzwicklung) des Reglers möglich. – Auf Grund einer früheren Untersuchung wurde auch auf die Beobachtung der Stromwandler und deren Ueberbrückung Wert gelegt. Ebenso war es möglich, den in Fig. 3 angedeuteten Ueberspannungsschutz an den Sammelschienen auszuschalten, d. h. die Drosselspulen zu überbrücken und die Kondensatoren abzutrennen. Die Kapazität der letztern beträgt 0,044 μF pro Phase, die Induktivität der Drosselspulen 0,08 mH pro Phase. Es ergab sich dadurch die eventuelle Nützlichkeit oder Nichtnützlichkeit der vor Jahren getroffenen Anordnung. Der Anschluss des Kathodenstrahl-Oszillographen an das zu untersuchende 8 kV-Netz geschah mit Hilfe einer rein kapazitiven Spannungsteilung, wie in Fig. 3 angedeutet ist. Auf eine Verzögerungsleitung zwischen Kathodenstrahl-Oszillograph und Spannungsteilung musste deshalb verzichtet werden. In den Oszillogrammen fehlt daher stets die erste Millionstel Sekunde des Störungsvorganges. Nur in wenigen Fällen wurde dies als Mangel empfunden. Der benutzte Kathodenstrahl-Oszillograph ist früher beschrieben worden[2]). Zu erwähnen bleibt noch, dass infolge der nicht vollständigen magnetischen Abschirmung und der nur wenige Meter betragenden Entfernung des Kathodenstrahl-Oszillographen von den 8 kV-Sammelschienen sich eine magnetische Strahlablenkung von ca. $\pm$ $^1/_2$ mm, in wenigen Schaltanordnungen sogar bis zu $\pm$ 2,5 mm bemerkbar machte. Es wurde daher durch besondere Versuche festgestellt, dass in den Erdschlussmomenten und Oszillogrammen dieser Betrag nicht überschritten wurde.

III. Versuchsresultate.

Es wurden im ganzen über 1000 Erdschlüsse gemacht und rund 750 Oszillogramme aufgenommen. Dabei ereigneten sich insgesamt 5 Doppelerdschlüsse, wovon einer infolge einer Leitungsmontage mit Stangenbrand. (Tabellen I bis III). Sämtliche angegebenen Spannungen sind in effektiven kV verstanden.

Erklärungen zu den Tabellen I bis III und den zugehörenden Figuren.

Die Tabellen enthalten im Kopf jeweils Angaben über den Zustand des Versuchsnetzes. Sie geben im weitern Aufschluss über die durchgeführten Versuche (Versuchs No.), die Art des Erdschlusses (f = fester Erdschluss, durch langsames Schliessen eines Erdungstrenners eingeleitet; i = aussetzender Erdschluss, durch Schliessen und langsames Oeffnen eines Hornes erzeugt), die Phasen, in welchen der Erdschluss eingeleitet wurde, und die Figuren, die in der Folge dem Aufsatz als Beispiele beigegeben sind. Endlich bedeuten die fettgedruckten Ziffern die paar höchsten, im Unterwerk A bei den betreffenden Versuchen gemessenen Ueberspannungen als Vielfache der normalen Phasenspannung.

In allen Figurenlegenden sind die Phasen wie folgt bezeichnet: 1 = Erdschlussphase, 2 = nacheilende Phase, 3 = voreilende Phase.

A. Allgemeiner Verlauf der Ueberspannungen.

Der Uebergang vom erdschlussfreien zum Erdschlussbetrieb vollzieht sich in allen Fällen mit mehr oder weniger ausgeprägten Schwingungen. Am Speisetransformator ist dieser am deutlichsten sichtbar bei entfernten Erdschlüssen (Fig. 4 bis Fig. 11 der Versuchsreihe I). Dagegen ist der schwingende Charakter nur sehr schwach vorhanden bei Erdschlüssen am Speisetransformator selber. Die Frequenz der Ausgleichsschwingung beträgt beim Versuchsnetz H (Oszillogramme der Figuren 4) ca. 2200 Per/s, beim ganzen Netz A ca. 600 Per/s. In ähnlicher Weise vollzieht sich bei den Versuchen der Uebergang vom Erdschlussbetrieb zum erdschlussfreien Betrieb über Schwingungen, deren Frequenz sehr tief liegt. Sie rühren

[2]) K. Berger. Die Weiterentwicklung des Kathodenstrahl-Oszillographen als Registrierinstrument. Bull. SEV 1928, No. 9 und No. 21.

vom Ausgleich der Sternpunktspannung, d. h. der mittleren Netzspannung gegen Erde her, der sich über die Erdungsspannungswandler vollzieht (Fig. 25). Dadurch entsteht mit den Erdkapazitäten eine langsame Schwingung von weniger als Netzfrequenz. Aus Fig. 26 ist die Spannungsbewegung des Netzes beim definitiven Löschen des Erdschlusses ersichtlich. Es ergibt sich, dass diejenige Phase, die Erdschluss hatte, infolge des langsamen Einschwingens nachher theoretisch auf maximal 2-fache Phasenspannung, genauer Löschspannung gelangen, kann. Eine solche Spannungserhöhung bis höchstens zum knapp 1,8fachen Phasenspannungswert nach $^1/_2$ Periode der Netzfrequenz ist aus vielen Oszillogrammen aussetzender Erdschlüsse beim Löschen letzterer ersichtlich. Oft zündet der Lichtbogen dabei wieder, was dadurch verhindert werden kann, dass die Ausgleichsfrequenz ungefähr gleich der Netzfrequenz gemacht wird, womit die Spannung der kranken Phase gegen Erde sich nur langsam erholt (Löschspule).

Die Spannung am Erdschlussfunken war stets kleiner als 1000 V. Im allgemeinen zündet derselbe bei intermittierenden Erdschlüssen in jeder Halbwelle neu, wobei die jeweilige Zündspannung mit der Oeffnung des Lichtbogenhorns ansteigt, um z. T. plötzlich wieder bei tieferen Werten anzufangen. Es gibt aber häufig auch aussetzende Erdschlüsse, die nur in jeder zweiten z. B. jeder positiven Halbwelle zünden,

Uebersicht über die Versuchsreihe I. Tabelle I.

Speisung in *A*; Erdschluss in *R* (am Ende der Leitung *A-H-R*); Messung in *A*					
Leitung *A-H-R* (Versuchsnetz *H*); Erdschlusstrom = 1,1 A				Ganzes Netz *A* (Versuchsnetz *A*) Erdschlusstrom = 4,5 A	
Sammelschienenschutz in *A* ist:				Sammelschienenschutz in *A* ist:	
ausgeschaltet		eingeschaltet		ausgeschaltet	eingeschaltet
Induktionsregler ist:				Induktionsregler ist:	
ausgeschaltet	eingeschaltet	ausgeschaltet	eingeschaltet	ausgeschaltet	ausgeschaltet
No. 1 – 30 *f* *u, v, w* **2,8; 2,9; 3,0**	No. 228 – 245 *f* *u* **2,6**	No. 84 – 95 *f* *u, v* **3,0; 3,1; 2,9**	No. 246 – 263 *f* *u* **2,6; 2,8; 2,6**	No. 70 – 83 *f* *u, v* **2,7; 2,8**	No. 96 – 101 *f* *u, w* **2,6**
No. 31 – 63 *f* *u, v* **2,9; 3,0; 2,9; 2,8**				No. 144 – 152 *i* *w* **3,0**	No. 123 – 131 *i* *w* **3 1; 2,9** $R_e = 38\,\Omega$
No. 64 – 69 *u* **2,7** $R_e = 38\,\Omega$				No. 153 – 161 *i* *w* **3,1** $R_e = 38\,\Omega$	No. 132 – 143 *i* *w* **3,5; 3,3; 3,0**
No. 186 – 191 *i* *w* **3,2** $R_e = 38\,\Omega$	No. 210 – 227 *i* *u* **2,7**	No. 102 – 113 *i* *w* **3,5; 2,7**	No. 264 – 281 *i* *u* **2,7**	No. 162 – 176 *i* *w* **3,2; 3,3**	No. 282 – 290 *i* *u* **2,2**
No. 192 – 197 *i* *w* **3,1**		No. 114—122 *i* *w* **3,1; 3,1; 3,3,** $R_e = 38\,\Omega$		No. 177 – 185 *i* *w* **3,0** $R_e = 38\,\Omega$	
				No. 198 – 209 *i* *u* **2,9**	
(Fig. 4)	(Fig. 10)	(Fig. 6 und 7)	(Fig. 11)	(Fig. 5 und 9)	(Fig. 8)

Der Erdungswiderstand an der Erdschlussstelle betrug stets R_e = ca. 1,3 Ω, sofern nichts anderes bemerkt ist.
Die Stromwandler sind betriebsmässig mit 20 Ω-Silitwiderständen überbrückt. Dasselbe gilt bei obigen Versuchen mit folgenden Ausnahmen: No. 78 83 und 144–161 Stromwandler mit Glimmrohr überbrückt. No. 31–41, 42–51, 52–63: *a)* ohne Ueberbrückung, *b)* mit 500 Ω-Silitwiderständen, *c)* mit Glimmrohr überbrückt.

z. T. sogar 2 mal, weil der Ausgleichsvorgang in noch kürzerer Zeit als $^1/_2$ Halbwelle abgeklungen ist (siehe z. B. Fig. 24, 17, 20). Sofern letzteres auftritt, kommen in den entgegengesetzten (z. B. negativen) Halbwellen meist nur 1 malige Zündungen vor (Fig. 24). In wieder andern Fällen entstehen die Zündungen beim aussetzenden Erdschluss überhaupt ausschliesslich nur in den positiven oder nur in den negativen Halbwellen (Fig. 14), wodurch die Spannnngskurven der „gesunden", d. h. nicht

Oszillogrammbeispiele zu Tabelle I.
f = fester Erdschluss.
i = aussetzender Erdschluss.
Der Zeitmasstab der Oszillogramme (*i*) geht aus der Betriebsfrequenz 50 hervor.

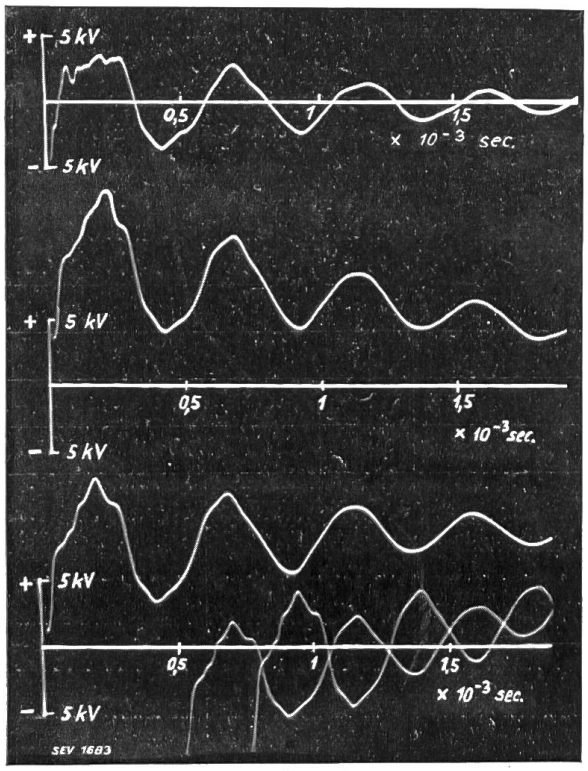

Fig. 4. (*f*) Versuchs-No.: 10—3—6; Messung in Phasen: 1—2—3.

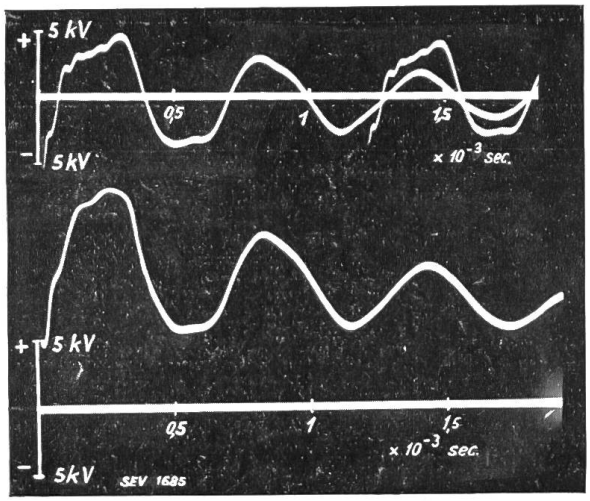

Fig. 6. (*f*) Versuchs-No.: 85—89; Messung in Phasen: 1—3.

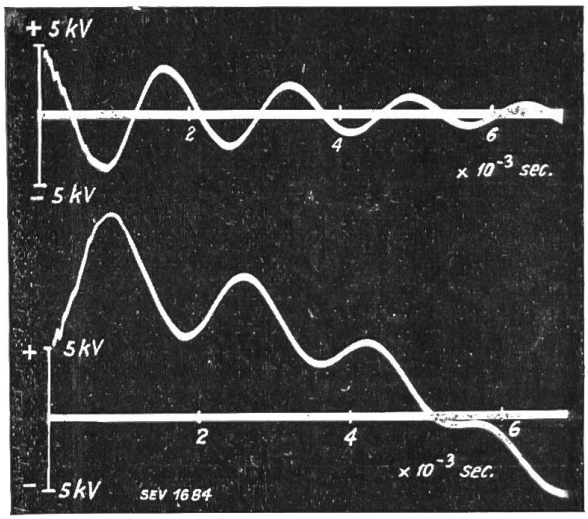

Fig. 5. (*f*) Versuchs-No.: 80—82; Messung in Phasen: 1—2.

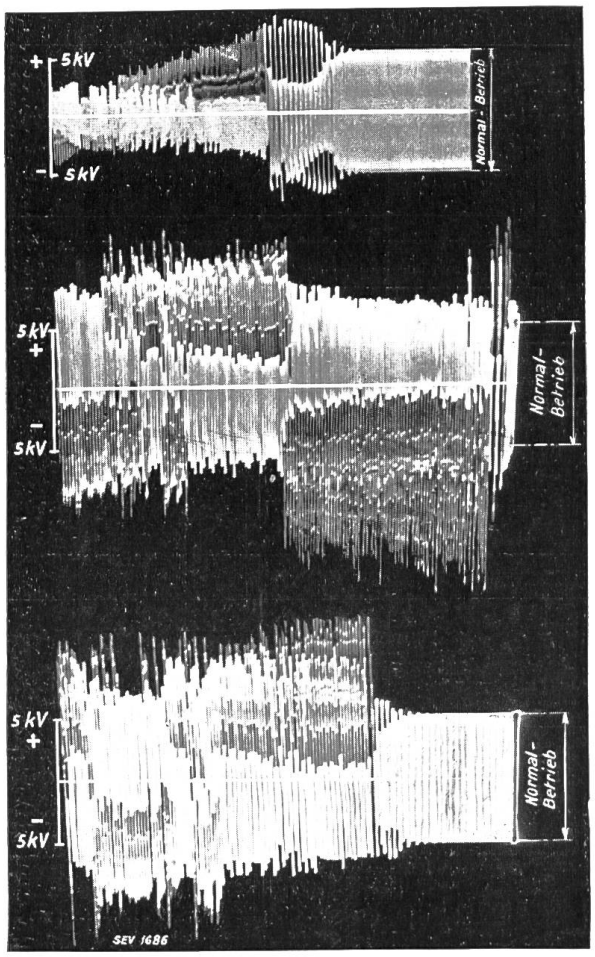

Fig. 7. (*i*) Versuchs-No.: 108—102—104; Messung in Phasen: 1—2—2.

Oszillogrammbeispiele zu Tabelle I.
f = fester Erdschluss.
i = aussetzender Erdschluss.
Der Zeitmasstab der Oszillogramme (i) geht aus der Betriebsfrequenz 50 hervor.

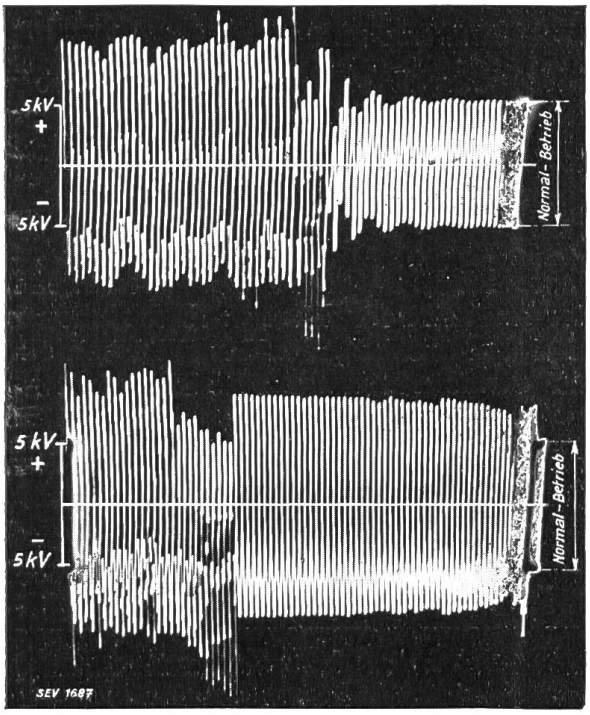

Fig. 8. (i) Versuchs-No. 123—133; Messung in Phasen: 2—2.

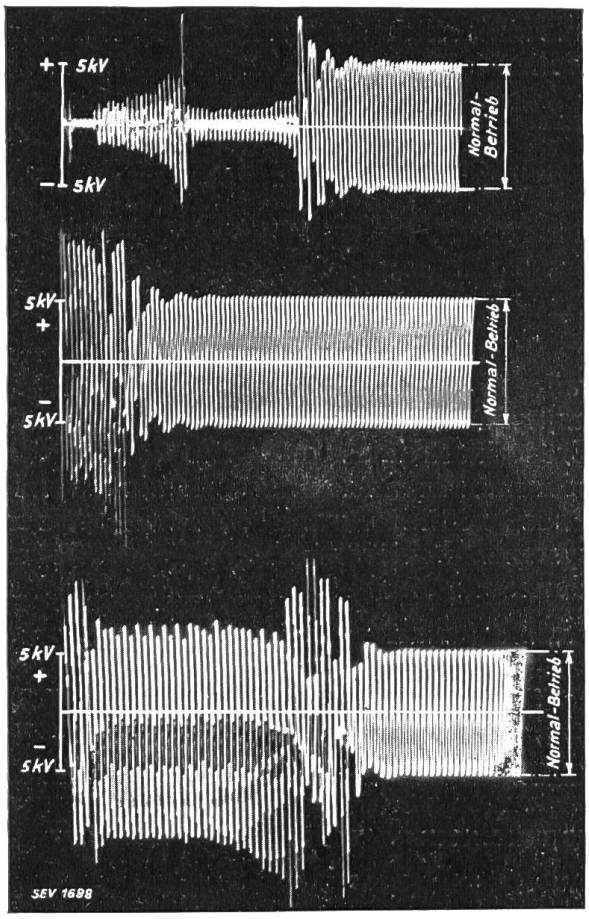

Fig. 9. (i) Versuchs-No. 154—156—167; Messung in Phasen: 1—2—2.

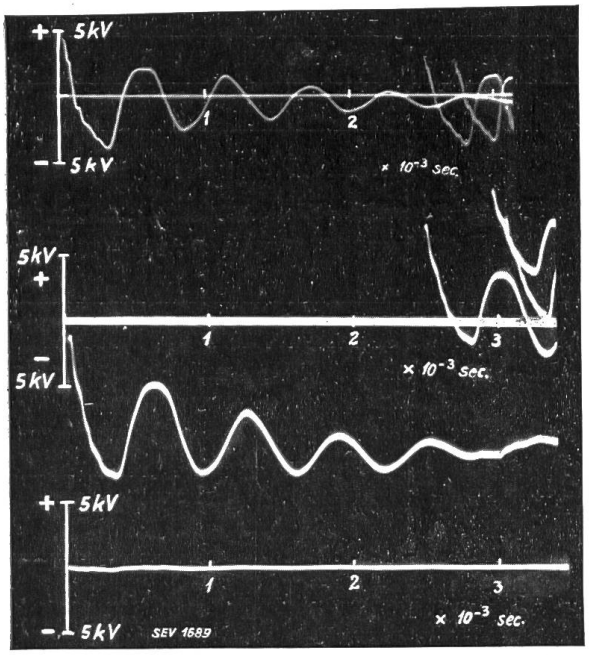

Fig. 10. (f) Versuchs-No. 236—238—242; Messung in Phasen: 1—3—1 (über Induktionsregler).

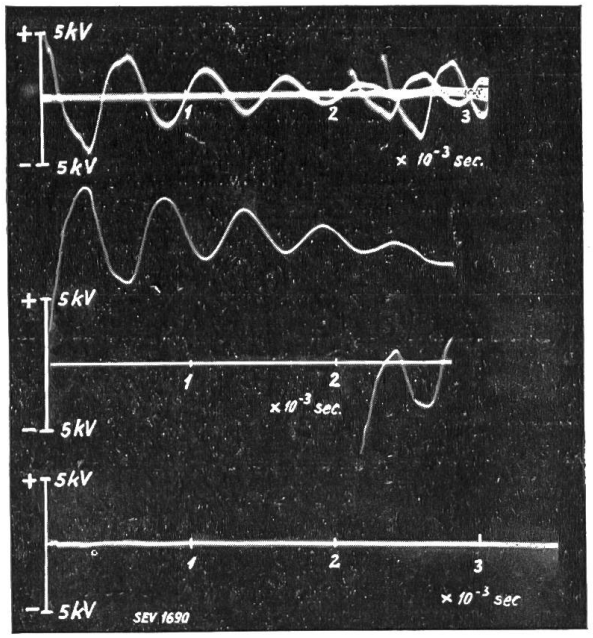

Fig. 11. (f) Versuchs-No.: 254—250—260.
Messung in Phase 1: Leitungsseite des Induktionsreglers.
Messung in Phase 3: Transformerseite des „
Messung in Phase 1: Ueber den Induktionsregler.

erdgeschlossenen Phasen stark einseitig zur Nullinie verlagert werden. Dieser Polaritätseffekt kehrt z. T. nach einigen Perioden um, indem die Zündungen, die vorher ausschliesslich die positiven Halbwellen heimsuchten, plötzlich alle negativen Halbwellen erfassen, wie z. B. in Fig. 7. Aus den Oszillogrammen aussetzender Erdschlüsse ist ersichtlich, dass Nullspannungsrelais nicht jeden Erdschluss anzeigen, sondern dass dazu Minimalspannungsrelais nötig sind, die bereits bei knapp $^1/_2$ Normalspannung sicher ansprechen.

B. Höhe der gemessenen Erdschlussüberspannungen.

In den Tabellenkolonnen sind jeweils die paar höchsten gemessenen Ueberspannungen als Vielfache der Phasenspannung des 8 kV-Netzes in Fettdruck angegeben. Es zeigt sich hier das interessante Resultat, *dass bei der ersten Versuchsreihe (Speisung in A, Erdschluss in R) in A durchwegs die grössten Ueberspannungen auftraten.* Das gilt innert der Versuchsgrenzen unabhängig von der Grösse des Erdschlusstromes oder des betroffenen Netzes (I_e = 1,1 resp. 4,5 A). Die Ueberspannungen sind am grössten in derjenigen Phase, die der vom Erdschluss betroffenen Phase zeitlich voranläuft, etwas kleiner in der nacheilenden Phase des Dreiphasensystems. In der kranken Phase selber wird bei den aussetzenden Erdschlüssen eine Spannung beobachtet, die bei allen Versuchen etwas unter dem 1,8fachen Betrag der normalen Phasenspannung blieb.

Vergleichen wir die maximal gemessenen Ueberspannungen der drei Tabellen, so finden wir etwa das Verhältnis *3,5 : 2,7 : 2,4. Die grösste Ueberspannung ist demnach im speisenden Unterwerk selber entstanden, sofern der Erdschluss am Ende einer davon ausgehenden Leitung eingeleitet wurde.* Ob gleichzeitig noch andere Leitungen vom Unterwerk gespiesen werden, ist auf die Höhe der Ueberspannungen von keinem wesentlichen Einfluss.

Uebersicht über die Versuchsreihe II. Tabelle II.

Speisung in *R*; Erdschluss in *A* (am Anfang der Leitung *A-H-R*); Messung in *A*					
Leitung *A-H-R* (Versuchsnetz *H*); Erdschlusstrom = 1,1 A				Ganzes Netz *R* (Versuchsnetz *R*) Erdschlusstrom = ca. 3,7 A	
Sammelschienenschutz in *A* ist:				Sammelschienenschutz in *A* ist:	
ausgeschaltet		eingeschaltet		ausgeschaltet	eingeschaltet
Induktionsregler ist:				Induktionsregler ist:	
ausgeschaltet	eingeschaltet	ausgeschaltet	eingeschaltet	ausgeschaltet	ausgeschaltet
No. 420 – 428 *f* *u, w* **2,4; 2.4**	No. 401 – 419 *f* *u* **2,0**	No. 291 – 302 *f* *u* **≅ 2**	No. 303 – 322 *f* *u* **≅ 2**	No. 389 – 400 *f* *u, w* **2**	No. 323 – 327 *f* *v, w* **2,0; 2,1**
No. 429 – 440 *f* *v* **2,0; 2,4; 2,2**					
		No. 328 – 339 *i* *u, w* **2,4; 2,3; 2,7**	No. 340 – 357 *i* *u, w* **2,6; 2 3; 2,2**	No. 377 – 388 *i* *u, w* **2 2; 2.2; 2,0**	No. 368 – 376 *i* *u, w* **2,1; 2,3**
(Fig. 18)	(Fig. 17)	(Fig. 14)	(Fig. 12 und 15)	(Fig. 16)	(Fig. 13)

Der Erdungswiderstand an der Erdschlusstelle betrug stets R_e = ca. 1,6 Ω.
Die Stromwandler sind betriebsmässig mit 20 Ω-Silitwiderständen überbrückt. Dasselbe gilt bei obigen Versuchen mit folgenden Ausnahmen: { No. 429 – 434 mit Glimmrohr überbrückt. No. 435 – 440 ohne Ueberbrückung.

Oszillogrammbeispiele zu Tabelle II.

f = fester Entschluss.
i = aussetzender Erdschluss.

Der Zeitmasstab der Oszillogramme (*i*) geht aus der Betriebsfrequenz 50 hervor.

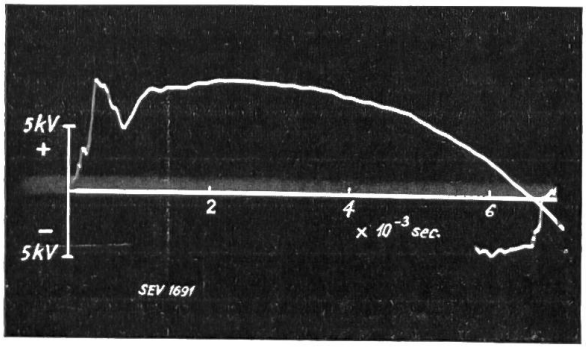

Fig. 12. (*f*) Versuchs-No. 314;
Messung in Phase: 3 (Leitungsseite des Induktionsreglers).

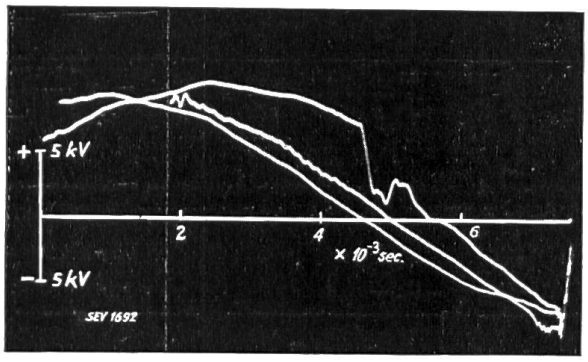

Fig. 13. (*f*) Versuchs-No.: 326; Messung in Phase: 2.

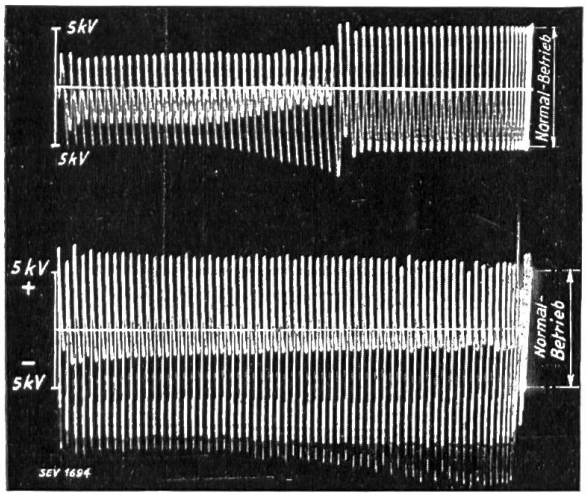

Fig. 14. (*i*) Versuchs-No.: 328—336; Messung in Phase: 1—2.

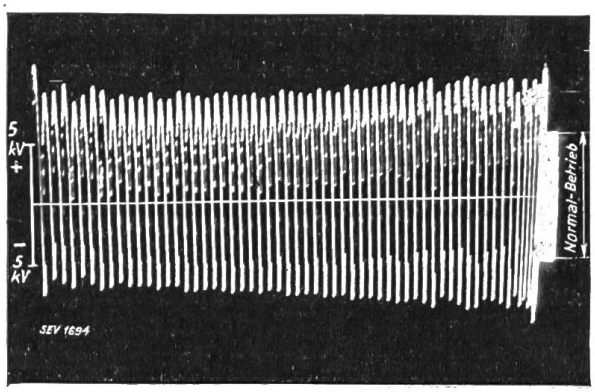

Fig. 15. (*i*) Versuchs-No.: 345;
Messung in Phase: 3 (Transformerseite d. Induktionsreglers).

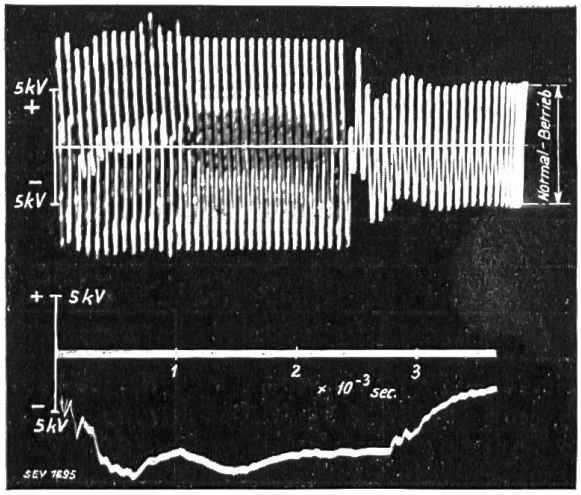

Fig. 16. (*i, f*) Versuchs-No.: 377—393; Messung in Phase: 2—3.

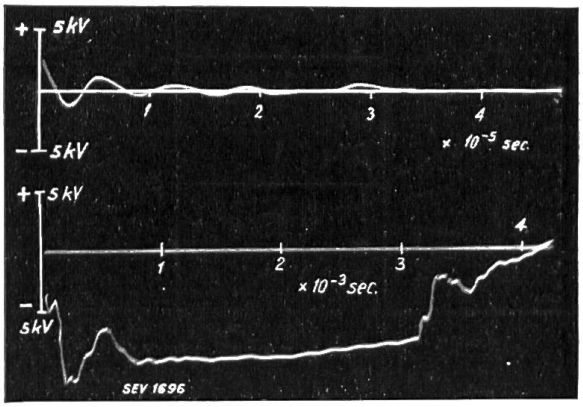

Fig. 17. (*f*) Versuchs-No.: 403—419;
Messung in Phase: { 1 (Transformerseite d. Induktionsreglers)
3 (Leitungsseite des Induktionsreglers)

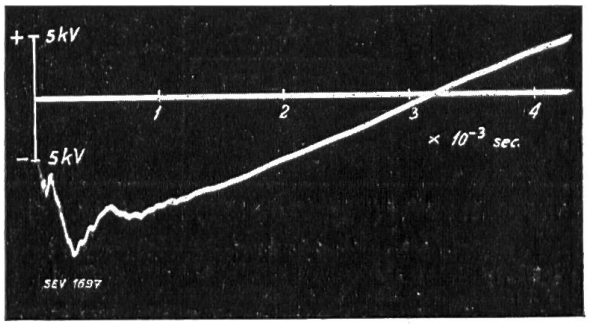

Fig. 18. (*f*) Versuchs-No.: 428; Messung in Phase: 2.

Man kann einwenden, dass der Kathodenstrahl-Oszillograph nur an einem Netzpunkt *A* aufgestellt war, und es nötig gewesen wäre, ihn auch am Ende einer abgehenden Leitung aufzustellen. Nun entspricht dieser gewünschte Fall aber der zweiten Versuchsreihe (Speisung in *R*, Erdschluss in *A*), wo wieder in *A* gemessen wurde. Da die Verbindungsleitung *A-R-H*, d. h. unser Versuchsnetz *H* in bezug auf seine Mitte infolge seiner T-Form angenähert symmetrisch gebaut ist, ist der Ersatz der oszillographischen Messung in *R* durch die zur ersten Versuchsreihe inverse zweite Reihe, abgesehen von der kleineren Transformatorleistung in *R*, deren Einfluss noch zu untersuchen ist, mit guter Näherung zulässig.

Während die Werte der gemessenen Ueberspannungen mit den Resultaten früherer Untersuchungen von Erdschlussüberspannungen ähnlicher Netze mit Hilfe von Kugel-Messfunkenstrecken etwa übereinstimmen, sind meines Wissens noch wenig Versuche ausgeführt worden, die über die räumliche Verteilung der Ueberspannungen bei ein und demselben Erdschluss Auskunft geben. Die vorliegenden

Uebersicht über die Versuchsreihe III. Tabelle III.

Speisung in *A*; Erdschluss in *A* (am Anfang der Leitung *A-H-R*); Messung in *A*					
Leitung *A-H-R* (Versuchsnetz *H*); Erdschlusstrom = 1,1 A			Ganzes Netz *A* (Versuchsnetz *A*); Erdschlusstrom = 4,5 A		
Sammelschienenschutz in *A* ist:			Sammelschienenschutz in *A* ist:		
ausgeschaltet		eingeschaltet	ausgeschaltet		eingeschaltet
Induktionsregler ist:			Induktionsregler ist:		
ausgeschaltet	eingeschaltet	ausgeschaltet	ausgeschaltet	eingeschaltet	ausgeschaltet
No. 441 – 459 *f* *u, w* **2,0; 2,1; 2,4; 2,3**	No. 460 – 476 *f* *u* **2,1**	No. 555 – 567 *f* *u, w* **< 2,0**	No. 486 – 492 *f* *u, w* **2,1; 2 0**	No. 493 – 507 *f* *u* **2,0**	No. 537 – 554 *f* *u, w* **≅ 2,0**
	No. 477 – 485 *f* *u* **2,1**			No. 532 – 536 *f* *u* **2,4; 2,4; 2,2**	
	No. 508 – 521 *f* *u* **2,1; 2,4**		No. 615 – 623 i *u, w* **≅ 2,0**	No. 624 – 652 *i* *u* **≅ 2,0**	No. 580 – 591 *i* *u, w* **2,0; 2,4**
	No. 680 – 685 *f* *u* **≅ 2,0**			No. 667 – 679 *i* *u* **≅ 2,0**	
	No. 592 – 602 *i* *u* **≅ 2**	No. 568 – 579 *i* *u, w* **≅ 2,0**		No. 686 – 689 *i* *u* **≅ 2,0**	
	No. 603 – 614 *i* *u* **2,1; 2,1**				
	No. 653 – 666 *i* *u* **≅ 2,0**				
(Fig. 19)	(Fig. 20 und 24)	(Fig. 23)	(Fig. 21)	(Fig. 22)	—

Der Erdungswiderstand an der Erdschlusstelle betrug stets R_e = ca. 1,6 Ω. Die Stromwandler sind betriebsmässig mit 20 Ω-Silitwiderständen überbrückt. Dasselbe gilt bei obigen Versuchen mit Ausnahme der Versuche No. 680—689, wo der zur Messung des Erdschlusstromes in den Erdschlusskreis geschaltete Stromwandler 5/5 A ohne Ueberbrückung, mit Silitwiderständen, und mit Glimmrohrüberbrückung beobachtet wurde (siehe Seite 770).

Versuche dürften in dieser Beziehung einen Beitrag zur Kenntnis des Erdschlussvorganges in Netzen bieten. Die vorliegenden Versuche zeigen erstens, dass ein an einer bestimmten Stelle des Netzes auftretender Erdschluss an verschiedenen Stellen ein und derselben Phase verschieden hohe Ueberspannungen auslösen kann. Zweitens ändert die Höhe der Ueberspannungen wesentlich mit der Lage des Erdschlusspunktes im betroffenen Netz, insbesondere mit der Lage gegenüber den grossen Transformatoren (Speisepunkten) des Netzes. Es wird im Kapitel IV versucht werden, für einige wenige, einfache Netzkonfigurationen den genauen Vorgang beim Erdschluss an bestimmten Netzstellen zu berechnen.

C. Unterschied der Ueberspannungen bei festen und aussetzenden Erdschlüssen.

Bekanntlich ist die Gefahr des aussetzenden Erdschlusses in vielen Netzen sehr gefürchtet, viel mehr als die eines festen. Vergleichen wir in dieser Richtung die

Oszillogrammbeispiele zu Tabelle III.
f = fester Erdschluss.
i = aussetzender Erdschluss.
Der Zeitmasstab der Oszillogramme (*i*) geht aus der Betriebsfrequenz 50 hervor.

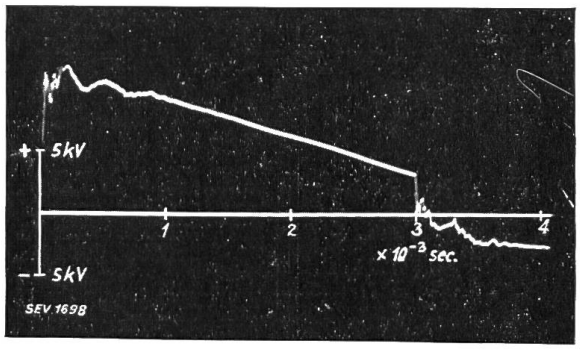

Fig. 19. (*f*) Versuchs-No.: 457; Messung in Phase: 2.

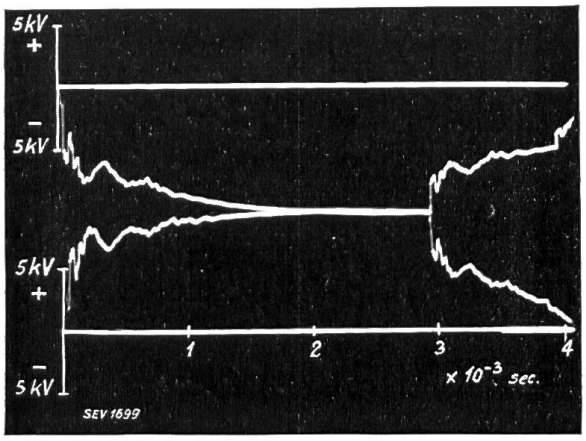

Fig. 20. (*f*) Versuchs-No. 471 und 472; Messung in Phase: 3 (Leitungsseite des Induktionsreglers)

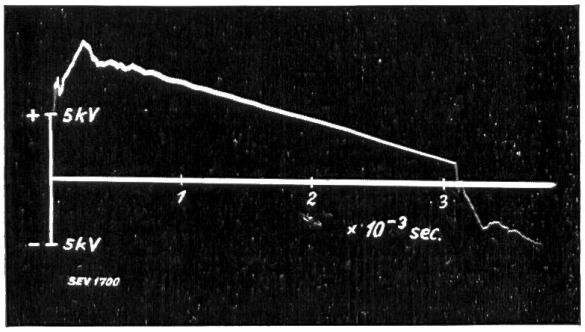

Fig. 21. (*f*) Versuchs-No.: 489; Messung in Phase: 2.

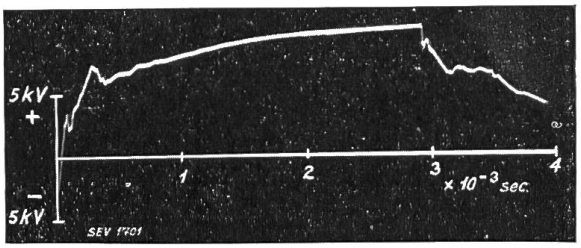

Fig. 22. (*f*) Versuchs-No. 504; Messung in Phase: 3.

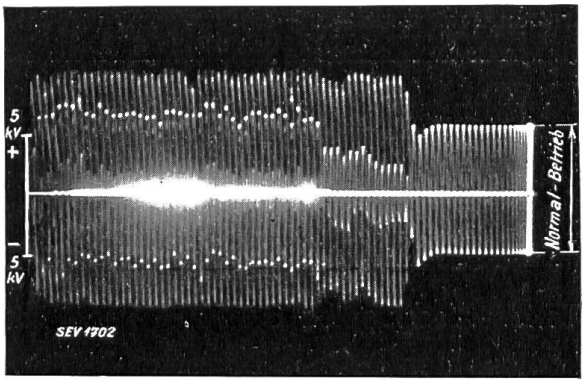

Fig. 23. (*i*) Versuchs-No.: 574; Messung in Phase: 2.

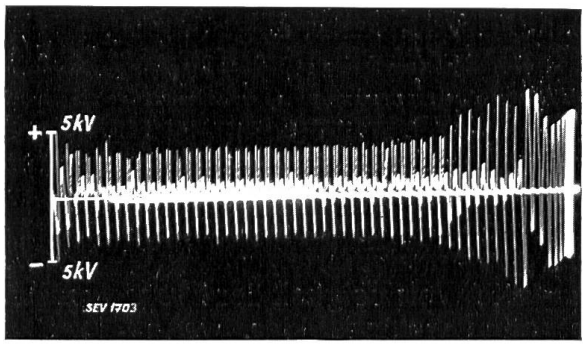

Fig. 24. (*i*) Versuchs-No.: 592; Messung in Phase: 1 (Transformerseite d. Induktionsreglers).

drei Tabellen, so ist wohl eine Mehrgefährdung beim aussetzenden Erdschluss vorhanden, sie ist aber nicht gross, nämlich

3,5 gegen 3,0fache bei Versuchsreihe I
2,7 gegen 2,4fache bei Versuchsreihe II.

(Versuchsreihe III scheidet in dieser Beziehung aus, da nicht genügend aussetzende Erdschlüsse gemacht wurden.)

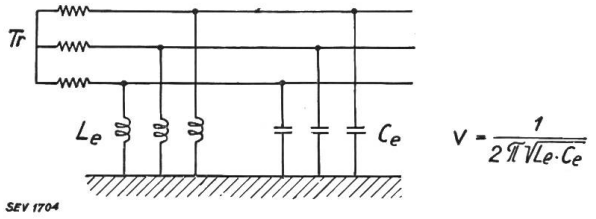

Fig. 25.
Erdverbindungen des Netzes.

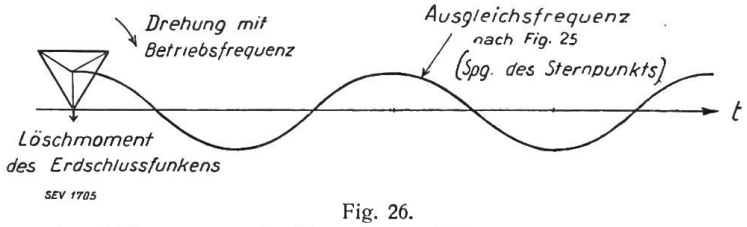

Fig. 26.
Ausgleichsspannung des Netzes gegen Erde beim Uebergang vom Erdschluss- zum normalen Betrieb.

Es wäre verfehlt, dieses Ergebnis auf andere Netze zu übertragen. Der Erdschlusstrom von 1,1 und 4,5 A ist zu klein, um den richtigen, kräftigen Erdschluss*lichtbogen* zu erzeugen. Dies ist am Geräusch des aussetzenden Ueberschlages zu erkennen: Derselbe gab deutlich das knatternde, abgerissene Funkengeräusch, nicht das dumpfe Brummen oder Tönen eines Lichtbogens. Von einem Aufschaukeln der Netzspannung gegen Erde von Halbwelle zu Halbwelle ist deshalb kaum etwas zu bemerken; die Erdschlussphase erreichte kaum den 1,8fachen Phasenspannungswert. Die Grösse dieser Zahl scheint ein brauchbares Mass für die Gefährdung durch *aussetzenden* Erdschluss zu sein, da sie je nach der Ausgleichsfrequenz des Netzes gegen Erde den Wert 1 bis höchstens 2,0 besitzen kann, sofern kein Aufschaukeln vorkommt, wie bereits gezeigt wurde (siehe Seite 761). Trotz grosser Anstrengung, das Horn langsamer oder rascher zu öffnen, um damit den Erdschlussfunken in die Länge und die Ueberspannung in die Höhe zu ziehen, gelang dies nur bis zu den genannten Spannungsgrenzen. Meistens kamen die grössten Ueberspannungen kurz nach der Zündung oder kurz vor dem Verlöschen des Erdschlussüberschlages vor. Ein Unterschied in der Ueberspannungshöhe bei langer oder kurzer Erdschlussdauer war nicht festzustellen.

D. Einfluss des Sammelschienenschutzes.

(Tellerdrosselspulen 0,08 mH pro Phase und Kondensatoren 0,044 μ pro Phase).

Aus den 3 Tabellen ist ersichtlich, dass der vorhandene Sammelschienenschutz nicht imstande war, die Erdschlussüberspannungen auch nur einigermassen herabzusetzen. Er ist in dieser Beziehung vollkommen wertlos. Die absolut höchste Ueberspannung aller Versuche (3,5×Phasenspannung) wurde mit im Betrieb befindlichem Sammelschienenschutz gemessen. Die Kapazität der „Schutzkondensatoren" beträgt dabei ungefähr $^1/_5$ der Kapazität des Versuchsnetzes *A-H-R*, ist also als gross zu bezeichnen. Die verflachende, abrundende Wirkung der Kapazität ist in allen Vergleichsoszillogrammen zu erkennen. Dieser Abrundung kommt aber hier keine praktische Bedeutung zu. Andererseits schafft aber der kapazitive Energiebetrag die Möglichkeit stärkerer Schwingungen, wodurch vielleicht die eher höhern Erdschlussüberspannungen bei eingeschaltetem Sammelschienenschutz hervorgerufen sind (vergl. Kapitel IV).

Die Wertlosigkeit der *Drosselspulen* bezüglich Erdschlüssen in einigen km Distanz ist ohne weiteres klar, wenn die Steilheit der dabei in *A* auftretenden Wellen betrachtet wird. Alle Wellen sind nämlich so flach, dass sie von den relativ kleinen Drosselspulen glatt durchgelassen werden. Selbst Wellen an unverzweigten Höchst-

spannungsleitungen aus mehreren km Distanz[3]) würden die vorhandenen Drosselspulen ohne Reflexion passieren. Wie aus den Oszillogrammen der Versuchsreihe I hervorgeht, sind die Wellenstirnen hier so flach, dass die Bezeichnung als solche fast fraglich erscheint. Diese Feststellung ist deshalb wertvoll, weil sie zeigt, *dass in Mittelspannungsnetzen sowohl die Abzweige, wie auch die vielen Stützisolatoren eine ganz erhebliche Verschleifung der Wellenstirn bewirken, so dass steile Wellen nur in nächster Nähe des die Wellen verursachenden Funkens auftreten können.* Je nach Art der Leitung und Dichtigkeit der Abzweige dürfte das Gebiet grosser und damit eventuell gefährlicher Steilheit auf wenige 100 m bis auf ca. 1 km beschränkt sein. Wie im nächsten Kapitel IV gezeigt wird, ergänzen sich in Beziehung auf Verflachung der Wellenstirn die Abzweige und die vielen Leitungsisolatoren, indem erstere die Gesamtfront in einzelne Stufen auftrennen und letztere die Einzelstufen verflachen.

Die Wirksamkeit der Drosselspulen ist demgemäss auf Störungsvorgänge oder Schaltfunken in nächster Umgebung beschränkt. Bei der Versuchsreihe III (Erdschluss und Speisung in *A*) war daher in der erdgeschlossenen Phase am speisenden Transformator eine Eingangsschwingung zu erwarten, die durch das Zusammenwirken der Drosselspulen mit der Transformatoreneingangskapazität entsteht[4]). Die Oszillogramme zeigen, dass die Spannung am Transformator in der Tat anfänglich schwingenden Charakter hat, dies aber sowohl bei eingeschaltetem als auch bei abgetrenntem Sammelschienenschutz. Es ergab sich durch Veränderung der Erdschlussstelle, dass die Induktivität der Schienen zwischen Erdschlusstelle und Transformator wichtiger war als jene der Schutzdrosselspulen. Die vorhandenen Drosselspulen sind also auch bezüglich naher Störungen (d. h. steiler Wellen) als praktisch wirkungslos erkannt worden. Zum Teil mag die hohe Windungskapazität daran Schuld sein[5]), welche die Drosselwirkung ähnlich wie bei den Stromwandlern bei Hochfrequenz teilweise oder ganz aufhebt[6]).

E. Beanspruchung des Induktionsreglers.

Die Statorwicklung des Induktionsreglers in *A* liegt als Zusatzwicklung im Zug der Leitung und ist deshalb bei steilen auftreffenden Wellen einer erhöhten Beanspruchung unterworfen. Die Statorwicklung verhält sich dabei offenbar ganz ähnlich wie die bereits besprochenen Tellerdrosselspulen und wie die noch zu besprechenden Stromwandler. Die Versuchsreihe I zeigt, dass bezüglich *entfernter Erdschlüsse* keine Gefahr für die Statorwicklung besteht. Die auftreffenden Wellen sind zu flach, die Statorinduktivität (0,24 mH pro Phase) zu klein, um eine Reflexion zu bewirken. Die Erdschlussüberspannungen sind mit im Betriebbefindlichen Induktionsregler am Netz *H* kleiner als ohne Regler.

Dagegen zeigt die Versuchsreihe III, dass bei *nahen Erdschlüssen* eine Reflexion am Stator auftritt. Der Stator

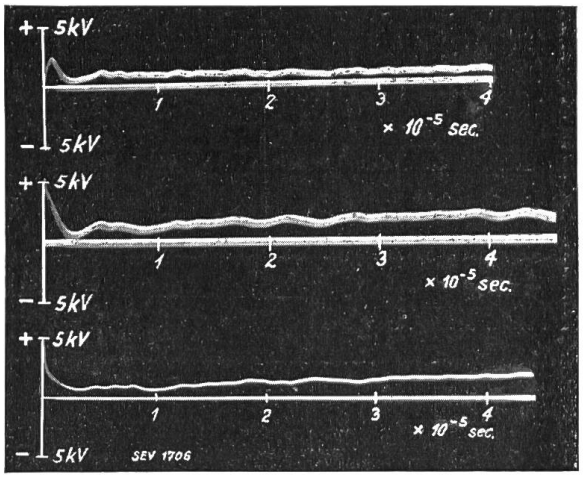

Fig. 27.

1. Kurve = Beanspruchung des Induktionsreglers.
2. Kurve = Spannung Transformer-Erde (hinter dem Induktionsregler).
3. Kurve = Leitung-Erde (vor dem Induktionsregler).

[3]) K. Berger: Ueberspannungen in elektrischen Anlagen, Bull. SEV 1930, No. 3.
[4]) Gábor: Forschungshefte der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen 1927. K. Berger: Bull. SEV 1930, No. 3.
[5]) R. Klein: E & M 1930, S. 337.
[6]) K. Berger: Bull. SEV 1927 No. 11.

nimmt dabei bis ca. 40% der an Erde kurzgeschlossenen Spannung auf, und zwar während der Dauer von ungefähr $1 \cdot 10^{-6}$ s. Zur genauern Ausmessung wäre hier eine Verzögerungsleitung nötig gewesen. Es ist zu erwähnen, dass diese Beanspruchung nur bei unmittelbarem Sammelschienenerdschluss auftrat; die Verlegung der Erdschlusstelle zu den Hilfsschienen verminderte bereits die Beanspruchung. Die bei diesen sehr nahen Erdschlüssen in der Anlage *A* auftretenden Beanspruchungen zeigt die Fig. 27. Man erkennt darin den kurzdauernden Spannungsstoss am Stator des Reglers, sowie das schwache Ueberschwingen der Spannung am Transformator. Der kurzzeitige Spannungsstoss am Stator kann durch Kondensatoren zwischen Eingangs- und Ausgangsklemmen des Stators vermindert oder annulliert werden; die Wiedergabe entsprechender Oszillogramme erübrigt sich.

Die gefährlichste Beanspruchung zwischen den Statorklemmen ist nach den Versuchen bei der Sprungwellenprobe mit entsprechender Sprungspannung vorhanden, d. h. bei einem Ueberschlag unmittelbar an den Statorklemmen.

F. Beanspruchung der Stromwandler.

Die im Zug der erdgeschlossenen Leitung und Phase liegenden Stromwandler für 8 kV, 150 A und 80 VA wurden auf das Auftreten von Ueberspannungen zwischen den Primärklemmen beobachtet. Bei den entfernten Erdschlüssen der Versuchsreihe I (Speisung in *A*, Erdschluss in *R*) konnte keine störende Ueberspannung wahrgenommen werden. Die Erdschlusswellen haben dieselbe Form, ob der Wandler mit 500 Ω, resp. 20 Ω-Silitstäben, oder mit einer Glimmröhre mit ca. 300 V statischer Ansprechspannung, oder gar nicht überbrückt wurde. Die Glimmröhre kam überhaupt nicht zum Ansprechen. Ohne Ueberbrückung traten keine Funken zwischen den Primärklemmen auf.

Bei *sehr nahen Erdschlüssen* innerhalb der Anlage *A* war bei Glimmrohrüberbrückung in der Dunkelheit ein sehr schwaches Leuchten zu bemerken. Bei Tageslicht war das Leuchten unsichtbar schwach. Ohne Ueberbrückung war nichts Abnormales sichtbar. Die Oszillogramme zeigen auch bei nicht überbrücktem Wandler innert der Grenzen der Messgenauigkeit keine Unterschiede in den Spannungskurven. Da aus diesen Versuchen ersichtlich war, dass die Stromwandler für 150 A infolge ihrer geringen Induktivität und der merklichen Windungskapazität auch bei steilen Wellen keine gefährliche Beanspruchung erfahren, wurden die Versuche noch erweitert. Zu diesem Zwecke wurde in die Erdleitung des Erdschlussabzweiges bei Punkt 2 der Fig. 3 ein 5/5 A-Stromwandler für 20 VA geschaltet. Tabelle IV zeigt die Beobachtungen an diesem Wandler.

Tabelle IV.

Ueberbrückung des Wandlers 8 kV, 5/5 *A*	Art des Erdschlusses:		
	fest mit ganzem Netz *A*	aussetzend mit	
		Leitung *A-H-R*	ganzem Netz *A*
500 Ω Silit	dunkel	dunkel	feuert, sprüht
Glimmrohr	spricht an	spricht an	spricht an
keine	Ueberschlag zwischen den Primärklemmen	kräftige Ueberschläge zwischen Primärklemmen	nicht versucht

Während die 8 kV, 150 A-Stromwandler auch durch sehr nahe, steile Erdschlusswellen nicht gefährdet sind, war das Bild für den 5 A-Wandler ganz anders. Ohne Ueberbrückung der Primärklemmen trat bei aussetzenden Erdschlüssen ein beunruhigendes Feuern zwischen den Klemmen ein, sofern die Leitung *A-H-R* Erdschluss erlitt. Man hatte den Eindruck, dass bei dem 4fachen Erdschlusstrom des ganzen Netzes *A* der Wandler Schaden nehmen müsse; dieser Versuch wurde daher unterlassen, da er auch kaum hätte Neues zeigen können. Der Silitwiderstand bewältigte den Erdschlusstrom der Leitung *A-H-R* noch funkenfrei, aber nicht mehr die Gesamtheit der 6 von *A* ausgehenden Leitungen. Er ist also in einem

gewissen Belastungsgebiet gut brauchbar, aber sehr bald überlastet, so dass er sprüht und damit das zu verhindernde Feuer nicht verhüten kann. Am besten schien das Glimmrohr die Ueberbrückung auszuführen. Ausführlichere Versuche wurden damit nicht ausgeführt.

Aus den Beobachtungen ist zu sehen, *dass Stromwandler mittlerer Hochspannung und grosser Nennströme (einige 100 A) eine Ueberbrückung zwischen den Primärklemmen nicht unbedingt nötig haben, wohl aber solche kleiner Nennströme.* Für Wandler tieferer Frequenz oder besonders grosser Nennleistung, d. h. Wandler mit grösserer Induktivität, oder solche höherer Spannung verschiebt sich die Grenze, so dass in den meisten Fällen eine Ueberbrückung zu empfehlen ist. Die heute in Europa meistens zur Ueberbrückung verwendeten Silitwiderstände haben den Nachteil der ständigen Shuntung des Wandlers und daher infolge ihrer Inkonstanz im Betrieb der Beeinträchtigung der Messgenauigkeit. Die Glimmröhren besitzen diesen Nachteil infolge ihres Ventilcharakters nicht. Ueberdies vermeiden sie das offene Feuer der im Störungsmoment meistens sprühenden Silitstäbe und lassen sich von Auge jederzeit im Betrieb kontrollieren.

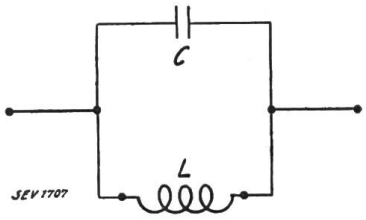

Fig. 28.
Ersatzschema des Stromwandlers.

Es mag in diesem Zusammenhang erwähnt sein, dass es möglich ist, die am nicht überbrückten Wandler auftretende Spannung zu berechnen, wenn sehr steile Wellen auftreffen. Der Wandler verhält sich nach Fig. 28 wie eine Parallelschaltung von Kapazität und Induktivität, wie früher gezeigt wurde [7]). Beim Auftreffen steiler Wellen rechnet sich die Spannung demnach nach dem Ersatzschema der Fig. 29.

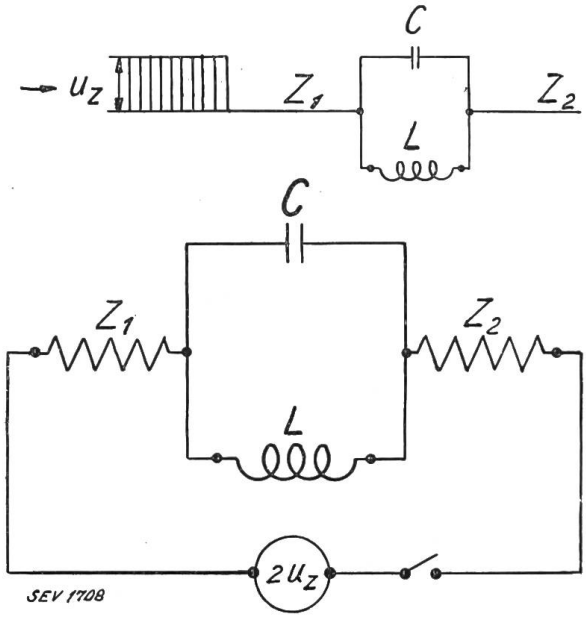

Fig. 29.
Verhalten des Stromwandlers im Zug zweier Leitungen.

Man sieht, dass es nur vom Verhältnis der 2 Zeitkonstanten

$$\left.\begin{aligned} T_1 &= (Z_1+Z_2)\,C \\ T_2 &= \frac{L}{Z_1+Z_2} \end{aligned}\right\}$$ abhängt, welche Spannng zwischen den Primärklemmen erreicht wird.

Aus
$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{L}{(Z_1+Z_2)^2 C} = \frac{L}{C}\Big/(Z_1+Z_2)^2$$

ist ersichtlich, dass nur das Verhältnis der Schwingimpedanz $\left(\frac{L}{C}\right)$ zur Summe der beidseitigen Wellenwiderstände (Z_1+Z_2) die Höhe der prozentualen Ueberspannung am Wandler bestimmt. Die Bedeutung und Grösse der Werte L und C ist für einige Wandler aus der genannten Untersuchung ersichtlich.

IV. Theoretische Betrachtung des Erdschlussvorganges.

Wir sind heute gut unterrichtet über die Entstehung und Gefahr des aussetzenden Erdschlusses, vor allem durch die Untersuchungen von Petersen, Roth u. a. Die bisher meistens angewendete Betrachtungsweise und versuchsmässige Nachahmung

[7]) K. Berger, Bull. SEV 1927, No. 11.

unter Anwendung quasistationärer Ersatzschematas, bei denen sämtliche Transformatoren des Erdschlussnetzes in einen einzigen Ersatztransformator, und sämtliche verteilten Leitungskapazitäten in *eine* konzentrierte Kapazität zusammengefasst werden, führen stets zur Behandlung des Erdschlusses nach dem Schema der Fig. 30, das für ein Drehstromnetz gezeichnet ist. (Rüdenberg, Elektrische Schaltvorgänge 1923, S. 250 und 251.)

Die Rückzündungen beim Abschalten des gezeichneten Serie-Resonanzkreises bewirken im ungünstigsten Fall das Aufschaukeln der Spannung zu immer höhern Werten von Halbwelle zu Halbwelle, bis zu theoretischen Endwerten der ca. 10fachen verketteten Netzspannung.

Nach dem üblichen Ersatzschema der Fig. 31 erhalten wir für die Netze A und H folgende Rechnungswerte der Ausgleichsfrequenzen zu Beginn des Erdschlusses. Die Streuinduktivität eines Transformators in A beträgt nach Kurzschlussversuch:

$$L_{Tr} = \frac{3\,U_p^2}{\text{kVA}\cdot\omega}\cdot 4{,}4\ \% = 2{,}71 \text{ mH pro Phase}$$

die Streuinduktivität des Stators des Induktionsreglers

$$L_R \cong 0{,}24 \text{ mH pro Phase,}$$

die Induktivität einer Leitungsphase gegen Erde

$$L_{Le} \cong 1{,}7 \text{ mH/km,}$$

die Induktivität einer Leitungsschleife aus zwei Phasenleitern

$$L_{Ls} \cong 2{,}1 \text{ mH/km,}$$

die Erdkapazität des Netzes H

$$C_{eH} = \frac{I_e}{3\,\omega\,U_p} = 0{,}23\ \mu\text{F pro Phase,}$$

die Erdkapazität des Gesamtnetzes A

$$C_{eA} = \frac{I_e}{3\,\omega\,U_p} = 0{,}94\ \mu\text{F pro Phase.}$$

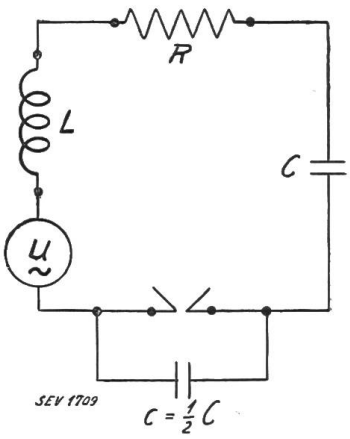

Fig. 30.
Quasistationäres Ersatzschema des aussetzenden Erdschlusses.

Damit wird die Eigenfrequenz f des Netzes H ohne Induktionsregler und ohne Sammelschienenkondensator, mit Speisung in A, vorläufig ohne Berücksichtigung der Leitungsinduktivität berechnet:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{3\,C_{eH}\cdot L_{Tr}}} = 3675 \text{ Per/s}$$

und jene des Gesamtnetzes A:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{3\,C_{eA}\cdot L_{Tr}}} = 1820 \text{ Per/s}$$

Mit eingeschaltetem Induktionsregler reduzieren sich die Eigenfrequenzen

$$\text{für das Netz } H \text{ auf } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{3\,C_{eH}\,(L_{Tr}+L_R)}} = 3525 \text{ Per/s}$$

$$\text{für das Netz } A \text{ auf } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{3\,C_{eA}\,(L_{Tr}+L_R)}} = 1745 \text{ Per/s}$$

Durch Anschliessen der Sammelschienenkondensatoren (Kapazität C_K) reduzieren sich diese Werte nochmals, und zwar

$$\text{für das Netz } H \text{ auf } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{3\,(C_{eH}+C_K)\,(L_{Tr}+L_R)}} = 3210 \text{ Per/s}$$

$$\text{für das Netz } A \text{ auf } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{3\,(C_{eA}+C_K)\,(L_{Tr}+L_R)}} = 1700 \text{ Per/s}$$

Diese Rechnungswerte liegen durchwegs höher als die wirklichen Frequenzen, da wir die Induktivität der Leitung nicht berücksichtigt haben. Durch Einführung passender Induktivitätswerte der Leitung werden wir auf die gemessenen Werte der Ausgleichsfrequenzen kommen. Nun folgt aber die schwierige Frage der Erdschlussfrequenzberechnung in praktischen Netzen: Wie gross ist die wirksame Leitungsinduktivität bei irgendwelcher Lage des Erdschlusses im Netz? Da infolge der verteilten Leitungskapazität die Ströme längs jeder Phase veränderlich sind, kommt entweder nicht die ganze Leitungslänge als wirksame Länge einer Phase in Betracht, oder nicht der maximale Strom einer Phase. Da es sich um die Eigenschwingung des Gebildes handelt, ist überdies die Stromverteilung längs einer Phase nicht mehr wie bei den 50periodigen Ladeströmen eine lineare[8]), sondern sie ist analog derjenigen einer Antenne zu berechnen. Dazu kommt aber bei der Leitung

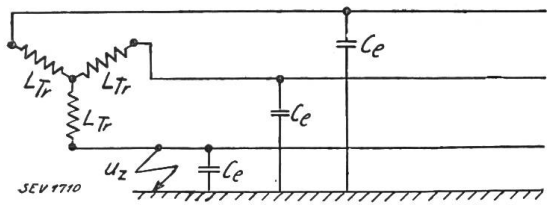

Fig. 31.
Ausgleichsschwingung beim Uebergang vom normalen zum Erdschlussbetrieb.

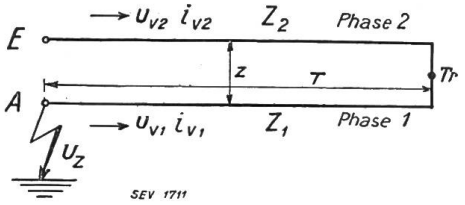

Fig. 32.
Vereinfachtes Wellenschema der unverzweigten Einphasenleitung. $\delta = z/Z$.

eine weitere Erschwerung gegenüber der Antenne: Die magnetische und elektrische Kopplung der Phasen untereinander. Der Vorgang beim plötzlichen Erdschluss ist deshalb bei näherem Zusehen bereits an einfachen Leitungen nicht sehr einfach, in praktischen, zusammengesetzten Netzen sogar sehr kompliziert, sobald die Leitungsinduktivität in Betracht kommt gegenüber jener der Transformatoren. Da letzteres in den meisten Netzen der Fall ist, wollen wir eine genaue Berechnung des Vorganges für diesen Fall dadurch ermöglichen, dass wir ihn so betrachten, wie er sich in Wirklichkeit abspielt, nämlich unter Bildung von Wanderwellen längs der Leitung. Wir verlassen also das quasistationäre Ersatzschema und wollen anhand einiger einfacher Netzformen den Wellenvorgang beim plötzlichen Erdschluss näher verfolgen. Vielleicht gelingt es, den beobachteten Unterschied in der Höhe der Ueberspannungen am speisenden Transformator und an der Erdschlusstelle zu erklären. Es ist klar, dass diese Betrachtungsweise genau genommen für jede neue Netzkonfiguration neu durchzuführen ist. Es kann sich hier nur darum handeln, die Betrachtungsweise anhand einiger einfacher Grundbeispiele zu zeigen. Dabei wird als Phase 1 diejenige bezeichnet, in welcher der Erdschluss vorkommt, mit Phase 2 jene, die sich aus der Parallelschaltung sämtlicher übrigen Phasen ergeben würde (z. B. bei Einphasennetzen die nicht erdgeschlossene Phase, bei Dreiphasennetzen die Parallelschaltung der beiden nicht erdgeschlossenen Phasen).

a) Unverzweigte Einphasenleitung mit einseitiger Speisung nach Fig. 32.

Der Erdschluss ereigne sich am Ende der offenen Leitung, im Punkt *A*. Vereinfachende Annahmen:

1. Die Induktivität des Speisetransformators *Tr* sei sehr klein, wir setzen sie = 0 (mit anderen Worten: sehr grosse Leistung des Speisetransformators).

[8]) R. Rüdenberg, Elektrische Schaltvorgänge 1923, S. 152, Fig. 130.

2. Die Induktivität aller Verbrauchstransformatoren längs der Leitung sei sehr gross, wir setzen sie unendlich; mit andern Worten: Verbrauchertransformatoren abgetrennt.

3. Von Ohmschen Widerständen und durch die Leitungsisolatoren bedingter Verflachung der Wanderwellen wird abgesehen.

Damit lässt sich unter Berücksichtigung der kapazitiven Leitungsinfluenz z der Spannungsverlauf beim Speisetransformator Tr und am Erdschlussort, resp. Leitungsende E berechnen, sofern in der Erdschlussphase (die im folgenden durch den Index 1 bezeichnet sei) in A beim Spannungswert u_z (Zündspannung) ein Erdschluss eintritt. Durch die Phase 1 läuft dabei eine Entladewelle der Höhe u_z mit dem Wellenstrom $i_0 = u_z/Z_1$, durch die auf demselben Gestänge liegende gesunde, vom Erdschluss nicht betroffene Phase (die im folgenden durch den Index 2 bezeichnet sei) eine Influenzwanderwelle von der Höhe $u_i = \delta \cdot Tu_z$, wobei δ auch gleich dem Verhältnis der Leitungsinfluenz z zum Eigenwellenwiderstand Z_1 ist: $\delta = z/Z_1$. Die Wellenspannungen jeder Phase setzen sich jederzeit aus Eigenwelle und Influenzwelle zusammen zu:[9])

$$\left.\begin{aligned} u_1 &= Z_1\, i_1 + z\, i_2 \\ u_2 &= Z_2\, i_2 + z\, i_1 \end{aligned}\right\}$$

Jede Spannung und jeder Strom setzt sich aus vor- und rücklaufenden Wellen i_v und i_r, u_v und u_r zusammen, so dass bei symmetrischen Leitungen mit $Z_1 = Z_2 = Z$:

$$\left.\begin{aligned} u_1 &= Z\,(i_{1v} + i_{1r}) + z\,(i_{2v} + i_{2r}) \\ u_2 &= Z\,(i_{2v} + i_{2r}) + z\,(i_{1v} + i_{1r}) \end{aligned}\right\}$$

Strom- und Spannungswellen beim Erdschluss resp. Einschalten der unverzweigten Einphasenleitung nach Figur 32. Tabelle V.

Zeitintervall t	i_{1v}	i_{2v}	u_E
$0 - 2T$	i_0	0	$u_z \cdot \delta$
$2T - 4T$	$i_0\,(1-2\,\delta)$	i_0	$u_z\,(2+\delta-2\,\delta^2)$
$4T - 6T$	$i_0\,(-2\,\delta+4\,\delta^2)$	$i_0\,(1-2\,\delta)$	$u_z\,(2-3\,\delta-2\,\delta^2+4\,\delta^3)$
$6T - 8T$	$i_0\,(2\,\delta+4\,\delta^2-8\,\delta^3)$	$i_0\,(-2\,\delta+4\,\delta^2)$	$u_z\,(-3\,\delta+8\,\delta^2+4\,\delta^3-8\,\delta^4)$
$8T - 10T$	$i_0\,(1+2\,\delta-8\,\delta^2-8\,\delta^3+16\,\delta^4)$	$i_0\,(2\,\delta+4\,\delta^2-8\,\delta^3)$	$u_z\,(5\,\delta+8\,\delta^2-20\,\delta^3-8\,\delta^4+16\,\delta^5)$
$10T - 12T$	$i_0\,(1-4\,\delta-8\,\delta^2+24\,\delta^3+16\,\delta^4-32\,\delta^5)$	$i_0\,(1+2\,\delta-8\,\delta^2-8\,\delta^3+16\,\delta^4)$	$u_z\,(2+5\,\delta-18\,\delta^2-20\,\delta^3+48\,\delta^4+16\,\delta^5-32\,\delta^6)$
$12T - 14T$	$i_0\,(-4\,\delta+16\,\delta^2+24\,\delta^3-64\,\delta^4-32\,\delta^5+64\,\delta^6)$	$i_0\,(1-4\,\delta-8\,\delta^2+24\,\delta^3+16\,\delta^4-32\,\delta^5)$	$u_z\,(2-7\,\delta-18\,\delta^2+56\,\delta^3+48\,\delta^4-112\,\delta^5-32\,\delta^6+64\,\delta^7)$
. . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .

Zeitintervall t	i_{1r}	i_{2r}	u_{Tr}
$T - 3T$	0	i_0	$u_z\,(1+\delta)$
$3T - 5T$	i_0	$i_0\,(1-2\,\delta)$	$u_z\,(2-2\,\delta^2)$
$5T - 7T$	$i_0\,(1-2\,\delta)$	$i_0\,(-2\,\delta+4\,\delta^2)$	$u_z\,(1-3\,\delta+4\,\delta^3)$
$7T - 9T$	$i_0\,(-2\,\delta+4\,\delta^2)$	$i_0\,(2\,\delta+4\,\delta^2-8\,\delta^3)$	$u_z\,8\,\delta^2\,(1-\delta^2)$
$9T - 11T$	$i_0\,(2\,\delta+4\,\delta^2-8\,\delta^3)$	$i_0\,(1+2\,\delta-8\,\delta^2-8\,\delta^3+16\,\delta^4)$	$u_z\,(1+5\,\delta-20\,\delta^3+16\,\delta^5)$
$11T - 13T$	$i_0\,(1+2\,\delta-8\,\delta^2-8\,\delta^3+16\,\delta^4)$	$i_0\,(1-4\,\delta-8\,\delta^2+24\,\delta^3+16\,\delta^4-32\,\delta^5)$	$u_z\,(2-18\,\delta^2+48\,\delta^4-32\,\delta^6)$
$13T - 15T$	$i_0\,(1-4\,\delta-8\,\delta^2+24\,\delta^3+16\,\delta^4-32\,\delta^5)$	$i_0\,(-4\,\delta+16\,\delta^2+24\,\delta^3-64\,\delta^4-32\,\delta^5+64\,\delta^6)$	$u_z\,(1-7\,\delta+56\,\delta^3-112\,\delta^5+64\,\delta^7)$
. . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .

[9]) Siehe z. B. R. Rüdenberg: Elektrische Schaltvorgänge 1923, S. 338.

und ferner als Stromgleichungen:

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= i_{1\,v} - i_{1\,r} \\ i_2 &= i_{2\,v} - i_{2\,r} \end{aligned}\right\}$$

Nach jedem Vorlauf beginnen neue rücklaufende, nach jedem Rücklauf neue vorlaufende Wellen. Die Randbedingungen am Leitungs*anfang* (Phase 1 keine Spannung, Phase 2 kein Strom) und am Leitungs*ende*, d. h. Transformator (Ströme $i_1 + i_2 = 0$) bedingen die Höhe der Wellen. Wir bezeichnen wie üblich die Laufzeit einer Welle über eine Phase mit T und geben in Tabelle V die berechneten Werte der paar ersten Strom- und Spannungswellen an.

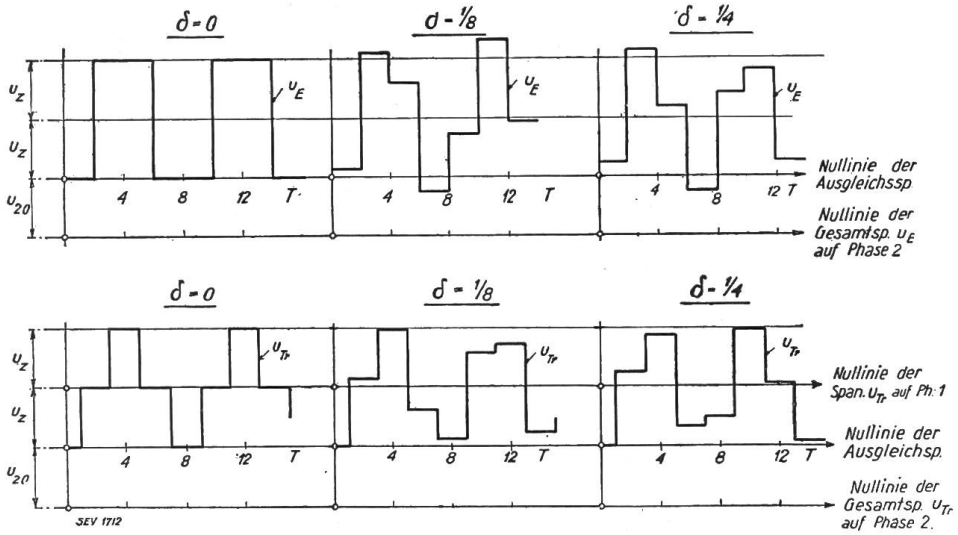

Fig. 33.
Spannungsverlauf bei plötzlichem Erdschluss des Netzes der Fig. 32, am Transformator (u_{Tr}) und am offenen Leitungsende (u_E) für verschiedene Werte der Leitungsinfluenz δ.

Fig. 33 gibt drei Beispiele des Verlaufs der Spannungen u_{Tr} am Transformator und u_E am offenen Leitungsende. Als Werte der relativen Leitungsinfluenz $\delta = z/Z$ sind 0, $^1/_8$ und $^1/_4$ angenommen. Die praktischen Werte von δ liegen bei $^1/_{10}$ bis $^1/_4$. Man erkennt deutlich den Einfluss der Influenzwellen auf die Form der Wanderwellenschwingung. Mehr als zwei Perioden sind nicht berechnet, weil infolge der Dämpfung den weitern Perioden kaum je praktische Bedeutung zukommt.

Die gezeichneten Wellen überlagern sich in der gesunden Phase 2 der vorhandenen Betriebsspannung u_{20} im Moment des Erdschlusses. Bei der ersten Zündung ist diese im symmetrischen Einphasennetz entgegengesetzt zu u_z, so dass die Nullinie für die Spannung der Phase 2 erstmals um $u_{20} = -u_z$ zu verschieben ist. Bei spätern Zündungen kommt natürlich der jeweilige Spannungswert u_{20} der Phase 2 im Zündmoment zur Geltung, der bei aussetzendem Erdschluss höher liegen kann. Als theoretisches Resultat bemerken wir, dass im einfachen, unverzweigten Einphasennetz bei einseitiger Speisung und ohne Berücksichtigung der Verbrauchertransformatoren ein starker örtlicher Unterschied in der Ueberspannung, wie er bei den Versuchen am Dreiphasennetz vorkam, nicht errechnet wird.

b) Unverzweigte Dreiphasenleitung mit einseitiger Speisung nach Fig. 34.

Die Voraussetzungen seien dieselben wie im Fall a der Einphasenleitung. Mit Z_1 ist wieder der Wellenwiderstand einer Phase, mit z die gegenseitige Influenz zweier Phasen bezeichnet.

Die zwei gesunden Phasen können, wie bei der quasistationären Betrachtung, als parallelgeschaltet betrachtet werden; sie besitzen als solche einen resultierenden Wellenwiderstand Z_2, der infolge der Nähe beider Leiter stets etwas grösser als

Strom- und Spannungswellen beim Erdschluss resp. Einschalten der unverzweigten Dreiphasenleitung nach Fig. 34.

Tabelle VI.

Zeitintervall t	i_{1v}	i_{2v}	u_E
$0 - 2T$	$i_0 = u_z/Z_1$	0	$z\,i_0 = \delta\,u_z$
$2T - 4T$	$\frac{2\,i_0}{N}(1 - 3\,\delta + 2\,\delta^2)$	$\frac{2\,i_0}{N}(1-\delta)$	$\frac{u_z}{N}(4\,\kappa + \delta - 3\,\kappa\,\delta - 6\,\delta^2 + 4\,\delta^3)$
$4T - 6T$	$\frac{i_0}{N^2}\left\{\begin{array}{l}3 - 4\,\kappa + \kappa^2 - 18\,\delta + \\ 10\,\kappa\delta + 40\,\delta^2 - 8\,\kappa\delta^2 \\ - 40\,\delta^3 + 16\,\delta^4\end{array}\right\}$	$\frac{2i_0}{N^2}\left\{\begin{array}{l}3 - \kappa - 9\,\delta + \kappa\delta + \\ 10\,\delta^2 - 4\,\delta^3\end{array}\right\}$	$\frac{u_z}{N^2}\left\{\begin{array}{l}12\,\kappa - 4\,\kappa^2 + \delta - 34\,\kappa\delta + \\ 5\,\kappa^2\,\delta - 16\,\delta^2 + 40\,\kappa\delta^2 + \\ 40\,\delta^3 - 20\,\kappa\delta^3 - 40\,\delta^4 + 16\,\delta^5\end{array}\right\}$
$6T - 8T$	$\frac{4\,i_0}{N^3}\left\{\begin{array}{l}1 - 4\,\kappa + 3\,\kappa^2 - 9\,\delta + \\ 20\,\kappa\delta - 7\,\kappa^2\delta + 34\,\delta^2 \\ - 42\,\kappa\delta^2 + 4\,\kappa^2\delta^2 - \\ 70\,\delta^3 + 42\,\kappa\delta^3 + 84\,\delta^4 \\ - 16\,\kappa\delta^4 - 56\,\delta^5 \\ + 16\,\delta^6\end{array}\right\}$	$\frac{4\,i_0}{N^3}\left\{\begin{array}{l}3 - 4\,\kappa + \kappa^2 - 15\,\delta + \\ 12\,\kappa\delta - \kappa^2\delta + 34\,\delta^2 \\ - 14\,\kappa\delta^2 - 42\,\delta^3 + \\ 6\,\kappa\delta^3 + 28\,\delta^4 - 8\,\delta^5\end{array}\right\}$	$\frac{u_z}{N^3}\left\{\begin{array}{l}24\,\kappa - 32\,\kappa^2 + 8\,\kappa^3 + \delta - \\ 117\,\kappa\delta + 99\,\kappa^2\delta - 7\,\kappa^3\delta \\ - 30\,\delta^2 + 292\,\kappa\delta^2 - 126\,\kappa^2\delta^2 \\ + 132\,\delta^3 - 420\,\kappa\delta^3 + 56\,\kappa^2\delta^3 \\ - 280\,\delta^4 + 336\,\kappa\delta^4 + 336\,\delta^5 \\ - 112\,\kappa\delta^5 - 224\,\delta^6 + 64\,\delta^7\end{array}\right\}$
$8T - 10T$	$\frac{i_0}{N^4}\left\{\begin{array}{l}5 - 40\,\kappa + 66\,\kappa^2 - \\ 16\,\kappa^3 + \kappa^4 - 60\,\delta + 300\,\kappa\delta \\ - 308\,\kappa^2\delta + 36\,\kappa^3\delta + \\ 320\,\delta^2 - 1032\,\kappa\delta^2 + \\ 576\,\kappa^2\delta^2 - 24\,\kappa^3\delta^2 - \\ 1000\,\delta^3 + 2016\,\kappa\delta^3 - \\ 504\,\kappa^2\delta^3 + 2016\,\delta^4 - \\ 2304\,\kappa\delta^4 + 176\,\kappa^2\delta^4 - \\ 2688\,\delta^5 + 1440\,\kappa\delta^5 + \\ 2304\,\delta^6 - 384\,\kappa\delta^6 - \\ 1152\,\delta^7\ 256\,\delta^8\end{array}\right\}$	$\frac{4\,i_0}{N^4}\left\{\begin{array}{l}5 - 15\,\kappa + 11\,\kappa^2 - \kappa^2 - \\ 35\,\delta + 75\,\kappa\delta - 33\,\kappa^2\delta \\ + \kappa^3\delta + 120\,\delta^2 - \\ 172\,\kappa\,\delta^2 + 36\,\kappa^2\delta^2 - \\ 250\,\delta^3 + 216\,\kappa\,\delta^3 - \\ 14\,\kappa^3\delta^3 + 336\,\delta^4 - \\ 144\,\kappa\delta^4 - 288\,\delta^5 + \\ 40\,\kappa\delta^5 + 144\,\delta^6 - 32\,\delta^7\end{array}\right\}$	$\frac{u_z}{N^4}\left\{\begin{array}{l}40\,\kappa - 120\,\kappa^2 + 88\,\kappa^3 - 8\,\kappa^4 \\ + \delta - 276\,\kappa\delta + 606\,\kappa^2\delta - \\ 260\,\kappa^3\delta + 9\,\kappa^4\delta - 48\,\delta^2 + \\ 1056\,\kappa\delta^2 - 1488\,\kappa^2\delta^2 + \\ 288\,\kappa^3\delta^2 + 304\,\delta^3 - 2552\,\kappa\delta^3 \\ + 2016\,\kappa^2\delta^3 - 120\,\kappa^3\delta^3 - \\ 992\,\delta^4 + 4032\,\kappa\delta^4 - 1440\,\kappa^2\delta^4 \\ + 2016\,\delta^5 - 4032\,\kappa\delta^5 + \\ 432\,\kappa^2\delta^5 - 2688\,\delta^6 + 2304\,\kappa\delta^6 \\ + 2304\,\delta^7 - 576\,\kappa\,\delta^7 - \\ 1152\,\delta^8 + 256\,\delta^9\end{array}\right\}$

Zeitintervall t	i_{1r}	i_{2r}	u_{Tr}
$T - 3T$	$\frac{i_0}{N}(\kappa - 1)$	$\frac{2\,i_0}{N^2}(1-\delta)$	$\frac{2\,u_z}{N}(\kappa - \delta^2)$
$3T - 5T$	$\frac{2\,i_0}{N^2}\left\{\begin{array}{l}-1 + 3\kappa + \delta - 5\kappa\delta \\ + 2\,\kappa\delta^2\end{array}\right\}$	$\frac{2\,i_0}{N^2}\left\{\begin{array}{l}3 - \kappa - 9\,\delta + \kappa\delta + \\ 10\,\delta^2 - 4\,\delta^3\end{array}\right\}$	$\frac{8\,u_z}{N^2}(\kappa - 2\kappa\delta - \delta^2 + \kappa\delta^2 + 2\delta^3 - \delta^4)$
$5T - 7T$	$\frac{i_0}{N^3}\left\{\begin{array}{l}-3 + 19\kappa - 9\kappa^2 + \kappa^3 \\ + 6\delta - 60\kappa\delta + 14\kappa^2\delta \\ - 4\delta^2 + 84\kappa\delta^2 - 8\kappa^2\delta^2 \\ - 56\,\kappa\delta^3 + 16\,\kappa\delta^4\end{array}\right\}$	$\frac{4\,i_0}{N^3}\left\{\begin{array}{l}3 - 4\,\kappa + \kappa^2 - 15\,\delta + \\ 12\,\kappa\,\delta - \kappa^2\,\delta + 34\,\delta^2 \\ - 14\,\kappa\,\delta^2 - 42\,\delta^3 + \\ 6\,\kappa\,\delta^3 + 28\,\delta^4 - 8\,\delta^5\end{array}\right\}$	$\frac{2\,u_z}{N^3}\left\{\begin{array}{l}9\,\kappa - 6\,\kappa^2 + \kappa^3 - 36\,\kappa\,\delta + \\ 12\,\kappa^2\delta - 9\,\delta^2 + 66\,\kappa\delta^2 - \\ 9\,\kappa^2\delta^2 + 36\,\delta^3 - 60\,\kappa\delta^3 - \\ 60\delta^4 + 24\kappa\delta^4 + 48\,\delta^5 - 16\,\delta^6\end{array}\right\}$
$7T - 9T$	$\frac{4\,i_0}{N^4}\left\{\begin{array}{l}-1 + 11\,\kappa - 15\,\kappa^2 + \\ 5\,\kappa^3 + 3\,\delta - 51\,\kappa\delta + \\ 49\,\kappa^2\delta - 9\,\kappa^3\delta - 4\delta^2 + \\ 120\,\kappa\,\delta^2 - 72\,\kappa^2\delta^2 + \\ 4\,\kappa^3\delta^2 + 2\,\delta^3 - 168\,\kappa\delta^3 \\ + 54\,\kappa^2\delta^3 + 144\,\kappa\delta^4 \\ - 16\,\kappa^2\delta^4 - 72\,\kappa\delta^5 + \\ 16\,\kappa\delta^6\end{array}\right\}$	$\frac{4\,i_0}{N^4}\left\{\begin{array}{l}5 - 15\,\kappa + 11\,\kappa^2 - \kappa^3 \\ - 35\,\delta + 75\,\kappa\,\delta - \\ 33\,\kappa^2\,\delta + \kappa^3\,\delta + 120\delta^2 \\ - 172\,\kappa\,\delta^2 + 36\,\kappa^2\,\delta^2 \\ - 250\,\delta^3 + 216\,\kappa\delta^3 - \\ 14\,\kappa^2\,\delta^3 + 336\,\delta^4 - \\ 144\,\kappa\,\delta^4 - 288\,\delta^5 + \\ 40\,\kappa\delta^5 + 144\,\delta^6 - 32\delta^7\end{array}\right\}$	$\frac{32\,u_z}{N^4}\left\{\begin{array}{l}\kappa - 2\,\kappa^2 + \kappa^3 - 6\,\kappa\delta + 8\kappa^2\delta \\ - 2\,\kappa^3\,\delta - \delta^2 + 19\,\kappa\,\delta^2 - \\ 15\,\kappa^2\,\delta^2 + \kappa^3\,\delta^2 + 6\,\delta^3 - \\ 36\,\kappa\,\delta^3 + 14\,\kappa^2\,\delta^3 - 17\,\delta^4 \\ + 42\,\kappa\,\delta^4 - 5\,\kappa^2\,\delta^4 + 28\,\delta^5 \\ - 28\,\kappa\,\delta^5 - 28\,\delta^6 + 8\,\kappa\,\delta^6 \\ + 16\,\delta^7 - 4\,\delta^8\end{array}\right\}$
$9T - 11T$	—	—	$\frac{2\,u_z}{N^5}\left\{\begin{array}{l}25\,\kappa - 100\,\kappa^2 + 110\,\kappa^3 - 20\kappa^4 \\ + \kappa^5 - 200\,\kappa\,\delta + 600\,\kappa^2\,\delta - \\ 440\,\kappa^3\,\delta + 40\,\kappa^4\,\delta - 25\,\delta^2 \\ + 900\,\kappa\,\delta^2 - 1830\,\kappa^2\,\delta^2 + \\ 740\,\kappa^3\,\delta^2 - 25\,\kappa^4\,\delta^2 + 200\,\delta^3 \\ - 2600\,\kappa\,\delta^3 + 3320\,\kappa^2\,\delta^3 - \\ 600\,\kappa^3\,\delta^3 - 800\,\delta^4 + 5076\,\kappa\,\delta^4 \\ - 3600\,\kappa^2\,\delta^4 + 176\,\kappa^3\,\delta^4 + \\ 24\,\kappa^4\,\delta^4 + 2000\,\delta^5 - 6720\,\kappa\,\delta^5 \\ + 2160\,\kappa^2\,\delta^5 - 3360\,\delta^6 + \\ 5760\,\kappa\delta^6 - 560\,\kappa^2\delta^6 + 3840\delta^7 \\ - 2880\,\kappa\,\delta^7 - 2880\,\delta^8 + \\ 640\,\kappa\,\delta^8 + 1280\,\delta^9 - 256\,\delta^{10}\end{array}\right\}$

In der Tabelle hat der Nenner N folgenden Wert: $N = 1 + \kappa - 2\,\delta$.

$\frac{1}{2} Z_1$ ist. Wir setzen die Verhältnisse $\delta = z/Z$ und $\varkappa = Z_2/Z_1$ und erhalten als allgemeine Lösung die paar ersten Wellen nach Tabelle VI.

Wie aus Tabelle VI ersichtlich ist, werden die Wellengrössen rasch komplizierter infolge der wiederholten Reflexionen und Wellenspaltungen im Verzweigungspunkt (Sternpunkt des Transformators). Für $\varkappa = 1$ (Einphasenleitung) geht übrigens die Tabelle VI in die Tabelle V über. Ueberdies muss sie für sehr grosses $\varkappa$ auf die Wellenschwingung der beim Transformator abgetrennten Phase 1 führen.

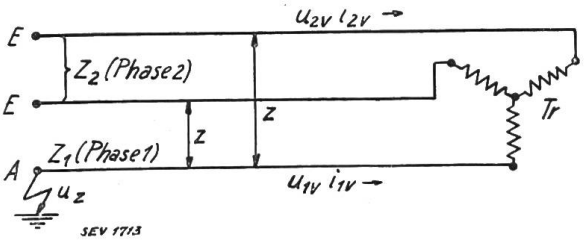

Fig. 34.
Wellenschema der unverzweigten Drehstromleitung: $\delta = z/Z$; $\varkappa = Z_2/Z_1$.

Die Zahlenwerte können mittels der folgenden Rückführungsformeln auf einfachere Weise erhalten werden. Es ist stets:

$$\left.\begin{aligned} i_{1vx} &= i_o - i_{1r\,(x-1)} - 2\,\delta \cdot i_{2r\,(x-1)} \\ i_{2vx} &= i_{2r\,(x-1)} \\ \frac{1}{Z_1} \cdot u_E &= (i_{1r\,(x-1)} + i_{1vx})\,\delta + 2\varkappa \cdot i_{2r\,(x-1)} \end{aligned}\right\} \text{Werte beginnen bei geraden Vielfachen von } T.$$

$$\text{ferner:}\quad \left.\begin{aligned} i_{1rx} &= \frac{1}{N}\left\{ 2(\varkappa-\delta) \cdot i_{2vx} + (\varkappa-1)\ i_{1vx} \right\} \\ i_{2rx} &= \frac{1}{N}\left\{ 2(1-\delta) \cdot i_{1vx} + (1-\varkappa)\ i_{2vx} \right\} \\ \frac{1}{Z_1} \cdot u_{Tr} &= \frac{2}{N}\,(i_{1vx} + i_{2vx})\,(\varkappa-\delta^2) \end{aligned}\right\} \text{Werte beginnen bei ungeraden Vielfachen von } T.$$

Zahlenwerte der ersten Spannungswellen beim Erdschluss resp. Einschalten der unverzweigten Drehstromleitung nach Fig. 34.

Tabelle VII.

Annahme: $\varkappa = \frac{Z_2}{Z_1} = 1/2$, $\delta = \frac{z}{Z_1} = 0, 1/8, 1/4$			
Zeitintervall t	$\delta = 0$ $N = 3/2$	$\delta = 1/8$ $N = 5/4$	$\delta = 1/4$ $N = 1$
	Rel. Werte der Endspannung u_E / u_Z:		
$0 - 2T$	0	1/8 = 0,125	1/4 = 0,250
$2T - 4T$	4/3 = 1,333	237/160 = 1,482	25/16 = 1,563
$4T - 6T$	20/9 = 2,222	6693/3200 = 2,0915	121/64 = 1,890
$6T - 8T$	40/27 = 1,482	1,009	169/256 = 0,660
$8T - 10T$	8/81 = 0,099	− 0,087	−31/1024 = −0,030
$10T - 12T$	−20/243 = −0,082	0,501	3103/4096 = 0,758
$12T - 14T$	860/729 = 1,180	1,862	1,915
$14T - 16T$	4816/2187 = 2,203	1,887	1,474
$16T - 18T$	1,621	0,537	–
	Rel. Werte der Spannung am Transformator u_{Tr} / u_Z:		
$T - 3T$	2/3 = 0,667	31/40 = 0,775	7/8 = 0,875
$3T - 5T$	16/9 = 1,778	1519/800 = 1,899	63/32 = 1,97
$5T - 7T$	50/27 = 1,853	26071/16000 = 1,630	175/128 = 1,367
$7T - 9T$	64/81 = 0,790	0,3844	63/512 = 0,123
$9T - 11T$	2/243 = 0,0082	0,0909	385/2048 = 0,188
$11T - 13T$	400/729 = 0,549	1,208	11865/8192 = 1,448
$13T - 15T$	3698/2187 = 1,690	2,000	1,925
$15T - 17T$	12544/6561 = 1,910	1,242	0,782
$17T - 19T$	0,928	0,110	–

Mit N ist wie in Tabelle VI der Wert $(1 + \varkappa - 2\delta)$ bezeichnet. Es sind anschliessend die für Drehstromnetze etwa in Betracht kommenden Zahlenwerte in Tabelle VII zusammengestellt und die entsprechenden Spannungskurven in Fig. 35 aufgezeichnet.

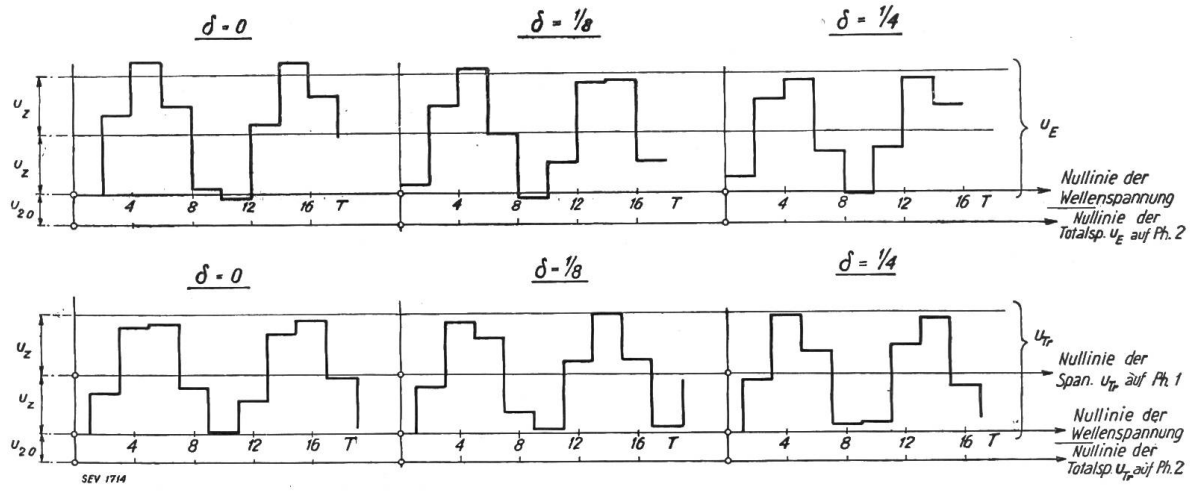

Fig. 35.
Spannungsverlauf beim plötzlichen Erdschluss des Netzes der Fig. 34, am Transformator (u_{Tr}) und am offenen Leitungsende (u_E), für $\varkappa = 1/2$ und verschiedene Werte der Leitungsinfluenz δ.

Die Wellenspannung überlagert sich, ähnlich wie bei der Einphasenleitung, dem Spannungswert u_{20} der Phase 2 gegen Erde im Erdschlussmoment. Bei der ersten Zündung ist u_{20} etwa gleich dem halben Maximalwert der Phasenspannung, oder ca. $-1/2$ der Zündspannung u_z an der Erdschlusstelle.

Fig. 35 zeigt, dass bei der ersten Zündung im berechneten Dreiphasennetz die Gesamtspannung der gesunden Phasen immer noch unter dem dreifachen Phasenspannungswert bleibt. Ferner ergibt sich, dass auch in diesem Fall, nämlich im unverzweigten Drehstromnetz, ein grosser örtlicher Unterschied der Ueberspannungen auf derselben Phase nicht besteht. Immerhin ist deutlich ersichtlich, *dass mit zunehmenden Werten von δ, d. h. mit zunehmender Leitungsinfluenz die Ueberspannungen am Leitungsende u_E abnehmen, dagegen am Transformator Tr ansteigen.* Bei dem den praktischen Verhältnissen meistens am nächsten kommenden Wert $\delta = 1/4$ ist bereits die Spannung am Transformator u_{Tr} ca. 4 % grösser als u_E am Leitungsende. Doch ist der gemessene Unterschied wesentlich grösser und durch die vereinfachte Rechnung nicht voll erklärt.

Es soll deshalb zunächst noch untersucht werden, ob eine dem untersuchten Netz näher kommende Netzkonfiguration das beobachtete Verhalten erklären lässt. Wie aus Fig. 1 ersichtlich, besteht das Versuchsnetz H in der Hauptsache aus der Leitung A-H-R und einem langen, etwa in deren Mitte angeschlossenen Abzweig. Das gibt dem Netz die Form eines T, und wollen wir ein solches Netz einer weitern Wellenrechnung unterziehen. Um die ziemlich umständliche Rechnung zu vereinfachen, setzen wir die Länge des Abzweigs gleich der halben Leitungslänge $A-R$; den Anschlusspunkt H nehmen wir in der Mitte zwischen A (Transformator Tr) und R an. Es ergeben sich damit die Netzmodelle c und d, je nachdem, ob ein Einphasen- oder Dreiphasennetz zugrunde gelegt wird.

c) T-förmiges Einphasennetz mit einseitiger Speisung nach Fig. 36.
Länge $\overline{CE} = \overline{CTr} = \overline{CD}$.

Die übrigen Voraussetzungen seien dieselben wie unter *a)*, d. h. unendlich starker Speisetransformator Tr, verschwindend kleine Verbrauchertransformatoren. Ausserdem führen wir die Rechnung nur für den Fall verschwindend kleiner Leitungsinfluenz durch, da wir über deren Wirkung schon durch *a)* und *b)* orientiert sind, und weil damit die Rechnung einfacher wird.

Damit geht Fig. 36 über in Fig. 37. Der Erdschluss in A schickt seine Wanderwellen über die Verzweigung C_1 ans Ende D_1 und zum Speisetransformator Tr, wo die Wellen auf die gesunde Phase übertreten, um bei C_2 nochmals geteilt zu werden. Wir bezeichnen als Laufzeit T die zum Durchlaufen von $\overline{AC_1} = \overline{C_1Tr} = \overline{TrC_2} = \overline{C_2E}$

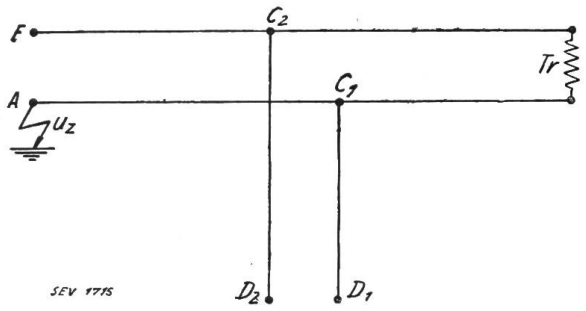

Fig. 36.
Schema des T-förmigen Einphasennetzes mit gleich langen Schenkeln.

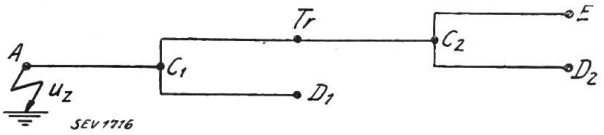

Fig. 37.
Vereinfachtes Wellenschema des Netzes der Fig. 36 unter Vernachlässigung der Leitungsinfluenz T = Laufzeit einer Welle über $\overline{AC_1} = \overline{C_1Tr} = \overline{C_1D_1} = \overline{TrC_2} = \overline{C_2D_2} = \overline{C_2E}$.

Zahlenwerte der ersten Spannungswellen beim Erdschluss resp. Einschalten der T-förmigen Einphasenleitung nach Fig. 37. Tabelle VIII

Zeitintervall t	Rel. Wellenspannung u/u_z in:									
	Punkt C_1		Punkt Tr		Punkt D_1		Punkt C_2		Punkt $E(D_2)$	
$T - 2T$	0,667	0,667	0	0	0	0	0	0	0	0
$2T - 3T$		0,667	0,667	0,667	1,333	1,333	0	0	0	0
$3T - 4T$	0,667	1,333		0,667		1,333	0,444	0,444	0	0
$4T - 5T$		1,333	0,444	1,111	0	1,333		0,444	0,888	0,888
$5T - 6T$	−0,370	0,963		1,111		1,333	1,038	1,482		0,888
$6T - 7T$		0,963	0,222	1,333	−0,740	0,593		1,482	1,185	2,073
$7T - 8T$	0,025	0,988		1,333		0,593	0,692	2,174		2,073
$8T - 9T$		0,988	0,494	1,827	0,790	1,383		2,174	0,197	**2,270**
$9T - 10T$	0,832	1,820		1,827		1,383	−0,099	2,075		2,270
$10T - 11T$		1,820	0,239	**2,066**	0,873	2,256		2,075	−0,395	1,875
$11T - 12T$	0,047	1,867		2,066		2,256	−0,269	1,806		1,875
$12T - 13T$		1,867	−0,461	1,605	−0,793	1,463		1,806	−0,143	1,732
$13T - 14T$	−1,011	0,856		1,605		1,463	−0,229	1,577		1,732
$14T - 15T$		0,856	−0,777	0,828	−1,241	0,222		1,577	−0,317	1,415
$15T - 16T$	−0,529	0,327		0,828		0,222	−0,711	0,866		1,415
$16T - 17T$		0,327	−0,309	0'519	0,183	0,039		0,866	−1,105	0,310
$17T - 18T$	0,344	−0,017		0,519		0,039	−0,970	−0,104		0,310
$18T - 19T$		−0,017	−0,316	0,203	0,504	−0,465		−0,104	−0,834	−0,524
				0,203		−0,465				−0,524

nötige Zeit. Die schrittweise Verfolgung der Wellen, ihrer Verzweigungen und Reflexionen ergibt die in Tabelle VIII angeführten Spannungssprünge, deren Summierung die in derselben Tabelle rechts angeführten Totalspannungswerte zu irgend einem Zeitpunkt.

Die Darstellung der Spannungen am Transformator Tr und am Erdschlussort E nach der Ta-

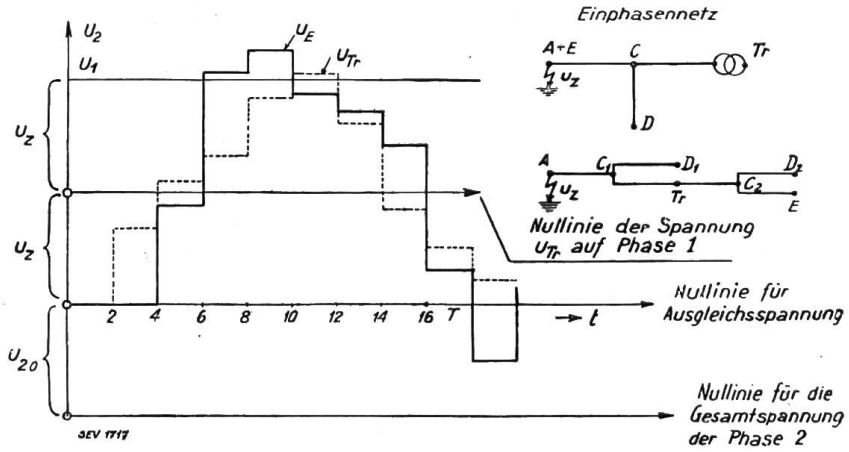

Fig. 38.
Spannungsverlauf beim plötzlichen Erdschluss des Netzes nach Fig. 36 und 37, am Transformator (u_{Tr}) und am offenen Leitungsende (u_E).

belle VIII geht aus Fig. 38 hervor. Die Höhe der Ueberspannung ist wenig verschieden von Fall *a)*, hingegen ist infolge des Abzweiges in C_1 der Spannungsverlauf doppelt so stark abgestuft wie unter *a)*. Da die vielen Isolatoren der Leitung, sowie die vielen kleineren Abzweigungen durch ihre Kapazität die Wellenfronten verflachen und damit die Einzelstufen abrunden, ist die gemessene abgerundete Netzschwingung durch dieses Beispiel bereits gut erklärt.

d) T-förmiges Dreiphasennetz mit einseitiger Speisung nach Fig. 39.

Mit denselben Voraussetzungen wie bei *c)*, wobei jeder Phase derselbe Wellenwiderstand zugeschrieben wird, ergeben sich beim Erdschluss in A aus dem Schema Fig. 40 für die andern Netzpunkte die Spannungswerte der Tabelle IX.

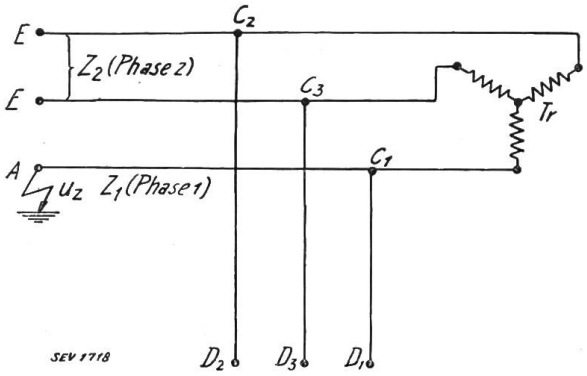

Fig. 39.
Schema des T-förmigen Drehstromnetzes mit gleichlangen Schenkeln.

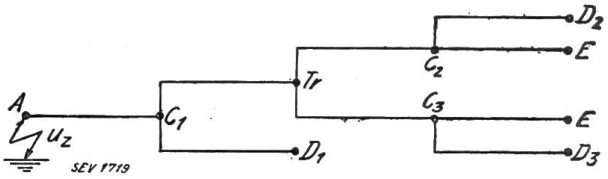

Fig. 40.
Vereinfachtes Wellenschema des Netzes der Fig. 39 unter Vernachlässigung der Leitungsinfluenz.
T = Laufzeit einer Welle über $\overline{AC_1} = \overline{C_1Tr} = \overline{C_1D_1} = \overline{TrC_2} = \overline{TrC_3} = \overline{C_2D_2} = \overline{C_2E} = \overline{C_3D_3} = \overline{C_3E}$.

Der Verlauf der Spannung am Transformator T_r und auf der gesunden Phase am Erdschlussort ist in Fig. 41 dargestellt. Auf den gesunden Phasen ist diese Wellenschwingung dem im Erdschlussmoment vorhandenen Spannungswert u_{20} gegen Erde zu überlagern, um die Gesamtspannung zu erhalten. *Es zeigt sich hier noch*

Zahlenwerte der ersten Spannungswellen beim Erdschluss resp. Einschalten der T-förmigen Drehstromleitung nach Fig. 40. Tabelle IX.

Zeitintervall t	Rel. Wellenspannung u/u_2 in:									
	Punkt C_1		Punkt Tr		Punkt D_1		Punkt C_2		Punkt E (D_2)	
T – $2T$	0,667	0,667		0		0		0		0
$2T$ – $3T$		0,667	0,444	0,444	1,333	1,333		0		0
$3T$ – $4T$	0,518	1,185		0,444		1,333	0,296	0,296		0
$4T$ – $5T$		1,185	0,296	0,740	−0,296	1,037		0,296	0,592	0,592
$5T$ – $6T$	−0,518	0,667		0,740		1,037	0,692	0,988		0,592
$6T$ – $7T$		0,667	0,280	1,020	−0,741	0,296		0,988	0,790	1,382
$7T$ – $8T$	0,211	0,878		1,020		0,296	0,549	1,537		1,382
$8T$ – $9T$		0,878	0,593	1,613	1,164	1,460		1,537	0,307	1,689
$9T$ – $10T$	0,959	1,837		1,613		1,460	0,256	1,793		1,689
$10T$ – $11T$		1,837	0.388	**2,001**	0,756	2,216		1,793	0,205	1,893
$11T$ – $12T$	−0,197	1,640		2,001		2,216	0,276	2,069		1,893
$12T$ – $13T$		1,640	−0,151	1,849	−1,149	1,067		2,069	0,347	**2,240**
$13T$ – $14T$	−0,670	0,970		1,849		1,067	0,086	2,155		2,240
$14T$ – $15T$		0,970	−0,181	1,668	−0,191	0,876		2,155	−0,175	2,065
$15T$ – $16T$	0,422	0,548		1,668		0,876	−0,440	1,715		2,065
$16T$ – $17T$		0,548	−0,124	1,544	1,034	1,910		1,715	−0,705	1,360
$17T$ – $18T$	0,185	0,733		1,544		1,910	−0,582	1,133		1,360
$18T$ – $19T$		0,733	−0,529	1,015	−0,664	1,246		1,133	−0,458	0,902
$19T$ – $20T$	−0,981	−0,248		1,015		1,246	−0,383	0,750		0,902
$20T$ – $21T$		−0,248	−0,636	0,379	−1,298	−0,052		0,750	−0,308	0,594
$21T$ – $22T$	−0,308	−0,556		0,379		−0,052	−0,451	0,299		0,594
$22T$ – $23T$		−0,556	−0,171	0,208	0,682	0,630		0,299	−0,594	0
				0,208		0,630				

deutlicher als bei Fall c) der wellenbrechende Einfluss der Abzweigung auf den Verlauf der Wanderwellenschwingung. Die Spannungskurven am Transformator und am Leitungsende haben angenähert Dreieckform. Würde man den Einfluss der Kapazität der Leitungsisolatoren und der kurzen Abzweige berücksichtigen, so verschwänden auch die scharfen Ecken der einzelnen Spannungsstufen, und die Dreieckform würde noch deutlicher. Die absolute Spannungshöhe ist auch hier etwas höher als das zweifache der Zündspannung u_Z, wie in allen bisher untersuchten Fällen. Ein theoretischer Unterschied in der Spannungshöhe am Transformator *Tr* und am Erdschlussorte *E* ist in kleinem Mass vorhanden, aber derart, dass die Spannung am Transformator kleiner ist als bei *E*. Der beobachtete örtliche Spannungsunterschied im Sinne der höhern Ueberspannung am Transformator wird also auch durch dieses, der wirklichen Netzform *H* angenähert gleiche Netzmodell nicht erklärt. Es bleibt deshalb zu untersuchen, ob die in der Rechnung gemachten Voraussetzungen zulässig sind, oder aber ob die Wirkung der Induktivität des Speisetransformators, und der vielen Verbrauchertransformatoren zu berücksichtigen ist.

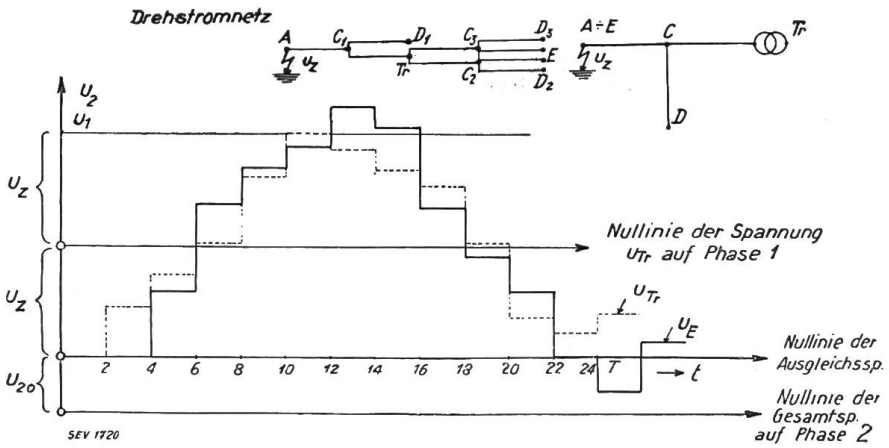

Fig. 41.

Spannungsverlauf beim plötzlichen Erdschluss des Netzes nach Fig. 39 und 40, am Transformator (u_{Tr}) und am offenen Leitungsende (u_E).

Ergänzend mag erwähnt sein, dass die Abzweigungen und Aenderungen des Wellenwiderstandes auch in der Grösse der Frequenz der Wanderwellenschwingungen deutlich zum Ausdruck kommen. Bekanntlich[10]) bewirken angeschlossene Kapazitäten eine Verlangsamung der Wellen*schwingung* (nicht der Wellengeschwindigkeit). In durchaus ähnlicher Weise wirken Verminderungen des Wellenwiderstandes, vor allem Abzweige, wie die Fig. 38 und 41 zeigen. Die Höhe der Wellenfrequenz (deren Begriff allerdings nur durch die *ungefähre* Periodizität gefasst werden kann) ist etwa 20 ÷ 30 % kleiner als der vierfachen Laufzeit über die Gesamtlänge $A-E$ entspricht; sie stimmt mit der gemessenen sehr annähernd überein, viel besser als die nach Fig. 31 Seite 773 ohne Berücksichtigung der Leitungsinduktivität berechnete.

e) Wirkung der Transformatoreninduktivität auf die Wanderwellenschwingung beim Erdschluss.

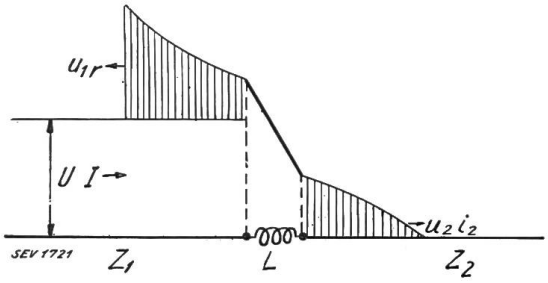

Fig. 42.

Reflexion einer Rechteckwelle durch eine Drosselspule im Zuge der Leitung.

Die Grösse der Streuinduktivität des das Versuchsnetz *H* oder *A* speisenden Transformators im Unterwerk A ergab sich auf Seite 772 aus dessen Kurzschlussversuch zu:

$$L = 2{,}71 \text{ mH pro Phase.}$$

Eine auftretende Wanderwelle wird je nach ihrer Steilheit mehr oder weniger reflektiert. Eine *unendlich steile Welle U, I* aus der Leitung Z_1 schickt, wie in Fig. 42

[10]) Bucksath, ETZ 1923.

angedeutet ist, nach Z_2 eine exponentiell ansteigende Stromspannungswelle. Die Zeitkonstante, mit welcher der Strom i_2 und dessen Spannung entstehen, beträgt: $T = L/(Z_1 + Z_2)$[11]; er hat die Form $i_2 = \frac{2 Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot I\,(1 - \varepsilon^{-t/T})$. In unserem Fall ist $T = \frac{1{,}5 \cdot 2{,}71 \cdot 10^{-3}}{500 + 250} = 5{,}42\,\mu s$, sofern der Wellenwiderstand Z_1 einer Phase zu 500 Ω eingesetzt wird. Da die Exponentialfunktion in der Zeit $3\,T$ praktisch abgeklungen ist, wirkt also der Transformator während ca. 16 μs als Drosselspule.

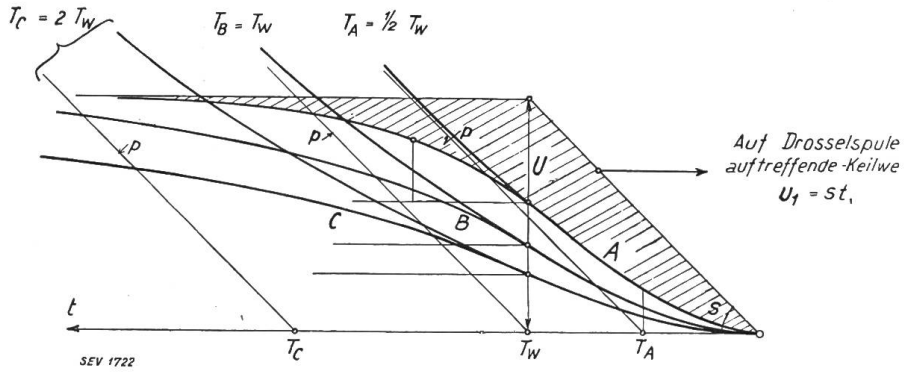

Fig. 43.
Reflexion einer keilförmigen Welle durch eine Drosselspule im Zug der Leitung.
A-B-C = Fronten der durchgelassenen Stromspannungswellen.
Kurve A: Spulenzeitkonstante $T_A = 1/2 \times$ Frontlänge T_w der Keilwelle.
Kurve B: Spulenzeitkonstante $T_B = 1 \times$ Frontlänge T_w der Keilwelle.
Kurve C: Spulenzeitkonstante $T_C = 2 \times$ Frontlänge T_w der Keilwelle.
Schraffiert: Reflektierte Welle für Fall A.

Ist die auf der Leitung Z_1 ankommende Welle I schon relativ flach, so ist die Reflexion schwächer ausgeprägt; sie verschwindet schliesslich bei sehr flachen Wellen. Für eine Wellenfront mit der gleichmässigen Steigung s kann der Verlauf der durch die Drosselspule dringenden Spannung in anschaulicher Weise durch Fig. 43 dargestellt werden[12]).

Bezeichnen:

U = maximale Höhe der ankommenden Welle,
s = Steilheit der Keilwelle, $= U/T_w$,
T_w = Kopflänge der Keilwelle,
T = Zeitkonstante der Drosselspule (Transformator) im Zug der Leitung,
also $T = L/(Z_1 + Z_2)$,

so erhält man für irgend eine Wellensteilheit die durch L durchtretende Welle auf folgende Art: Man markiert auf der Abszissenaxe im Abstand T vom Wellenfusspunkt den Punkt T und zieht durch diesen eine Parallele p zur Wellenfront, d. h. eine um s gegen die Zeitaxe geneigte Gerade. Die durchgelassene Welle wird dann während der Zeit der ansteigenden Wellenfront durch die vom Fusspunkt der Wellenfront ausgehende, sich mit der Zeitkonstante T der Parallelen p anschmiegende Exponentiallinie dargestellt. Als Formel:

$$\text{Für } \left.\begin{array}{l} u_1 = s \cdot t \\ U = s \cdot T_w \end{array}\right\} \text{ wird } u_2 = \frac{2\,s\,Z_2}{Z_1 + Z_2} \left\{ t - T\,(1 - \varepsilon^{-t/T}) \right\}.$$

Vom Zeitpunkt T_w der Erreichung des Wellenrückens U an strebt dann die durchgelassene Welle u_2 auf bekannte Weise als abklingende Exponentialfunktion mit der Zeitkonstante T dem Wert $\frac{2\,Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot U$ zu. Die grösste Steilheit von u_2 tritt daher stets im Moment T_w auf; sie beträgt $\left(\frac{du_2}{dt}\right)_{t=T_w} = 2\,s\,\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}\left(1 - \varepsilon^{-T_w/T}\right)$.

Bei Veränderung der Wellensteilheit s oder des Verhältnisses $T_w : T$ ist aus der Fig. 43 deutlich der veränderte Einfluss der Drosselspule erkennbar. Insbesondere ist ersichtlich, dass bei einer Frontdauer T_w gleich der Verflachungszeitkonstanten T der Drosselspule die maximale Steilheit der durchgelassenen Welle noch 37 %

[11]) R. Rüdenberg, l. c. S. 367 und S. 398.
[12]) L. Binder: Die Wanderwellenvorgänge auf experimenteller Grundlage, 1928. Dort ist der Fall berechnet, wo die Drosselspule am Leitungsanfang liegt.

kleiner bleibt als die Steilheit s der auftreffenden Welle. Bei noch flacheren Wellen bleibt als Hauptwirkung der Drosselspule noch die zeitliche Verschiebung der Welle u_2 um einen Bruchteil von T bestehen, während die Reduktion der Wellensteilheit praktisch verschwindet. Die Betrachtung zeigt ohne weiteres auch die Grösse des *reflektierten* Wellenteils. Was nicht durchgelassen wird, wird reflektiert. Die Ordinatendifferenzen zwischen der Schrägen $u_1 = st$ und der Kurve u_2 geben somit den zurückgeworfenen Wellenteil an. Dieser hat stets die Form eines der ursprünglichen Welle u_1 überlagerten Hügels von der ungefähren Gesamtlänge $(3\,T + T_w)$.

Betrachten wir nun nach dieser orientierenden Betrachtung die Bedeutung des Transformators für den Erdschlussvorgang, so ist eine Drosselwirkung vor allem in den Fig. 4 und 6 deutlich zu erkennen. In der Erdschlussphase (Fig. 4a) sind zu Beginn der Wellenschwingung deutlich die von der Wellenstauung herrührenden Hügel zu sehen, die in den gesunden Phasen (Fig. 4b und c) stets fehlen. Der Transformator hat in seiner Streuung eine solche Grösse der Induktivität, dass ein Reflexionsvorgang gerade noch merklich wird. Dies ist nebenbei deshalb interessant, weil sich zeigt, wie gross wirksame Drosselspulen zur Verflachung von Wellen dieses Netzes aus ca. 14 km Distanz sein müssten. Der hohe Wert (ca. 4 mH) stellt die Verwendung von Drosselspulen für solche Zwecke in ähnlichen Anlagen aus wirtschaftlichen Erwägungen ausser Frage, ganz abgesehen von der Schädlichkeit von nicht oder mit unpassenden Widerständen überbrückten Drosselspulen. Ausser am Anfang ist ein Unterschied der Wellenform vor und nach der Transformatorwicklung deutlich ersichtlich, gerade zur Zeit der höchsten Ueberspannung der gesunden Phasen (Fig. 4b und c) gegenüber der Erdschlussphase (Fig. 4a). Die höchste Ueberspannung kommt gerade durch den überlagerten Buckel der Spannungskurve zustande, der im Spannungsverlauf der Erdschlussphase, d. h. am andern Ende der Transformatorwicklung nicht zu finden ist. Es existiert zu jener Zeit eine zusätzliche Spannungsdifferenz von ca. 0,6 U_p über dem Transformator, die durch eine Stromänderung in der Transformatorinduktivität hervorgerufen sein muss. Die vereinfachten Netzmodelle erklären diesen zusätzlichen Spannungsunterschied über den Transformator nicht, weil sich bei ihnen zu jener Zeit keine abnormal hohen Stromänderungsgeschwindigkeiten im Transformator ergeben, worauf hier nicht näher eingegangen sei. Ueberdies sind die bereits berechneten Wellenfronten zurzeit des Ueberspannungsmaximums bereits flacher als zu Beginn der Schwingung, wo ein Einfluss des Transformators eben noch erkennbar war. Aus der geringen Zeitkonstante der Transformatorinduktivität mit der Leitung, sowie aus der genaueren Betrachtung von Wellen mit mässiger, praktisch vorkommender Frontsteilheit ergibt sich somit, *dass der Induktivität des speisenden Transformators als solcher bei Transformerleistungen einiger 1000 kVA oder mehr eine wesentliche Bedeutung beim Erdschlussvorgang nicht mehr zukommt.* Derselbe spielt sich vielmehr in der Hauptsache als Wellenschwingung zwischen erdgeschlossenen und gesunden Phasen ab, wie diese in den Beispielen für einfache Netzformen berechnet wurde. Das Resultat gilt zwar vorläufig nur im untersuchten Netz H; es scheinen sich aber relativ langgestreckte und wenig vermaschte Netze mit grosser Transformatorleistung oft ebenso zu verhalten. Es kann sich deshalb zur Erklärung der gemessenen Unterschiede in den Ueberspannungen offenbar nur um zwei nicht berücksichtigte Einflüsse handeln:

1. Die Wirkung von lokalen Kapazitäten und damit Schwingungskreisen,
2. Die Wirkung der vielen Verbrauchertransformatoren längs der Leitung.

Zu 1: Die Wirkung konzentrierter Kapazitäten, vor allem der Transformatoren im Netz, in zweiter Linie der Sammelschienenkondensatoren, geht dahin, mit dem Speisetransformator zusammen einen Schwingungskreis zu bilden. Da die ankommende Erdschlusswelle gerade noch so steil ist, dass sie sich am Transformator z. T. staut, ist die Entstehung von Schwingungen desselben mit nahe dahinter liegenden genügend grossen Kapazitäten nicht ausgeschlossen. Die Möglichkeit solcher Schwingungen bleibt noch zu beurteilen.

A) Bei Erdschlüssen in unmittelbarer Nähe des Speisetransformators lässt sich der Vorgang aus Fig. 44 erkennen. Auf der Erdschlusseite des Transformators mit der Induktivität L wird plötzlich die Spannung $+ u_z$ kurzgeschlossen, oder, was auf dasselbe herauskommt, die Spannung $- u_z$ zugeschaltet. Auf der andern Seite der Wicklung, d. h. an den gesunden Phasen liege eine konzentrierte Kapazität C (z. B. die Anlage oder ein „Schutzkondensator"). Die abgehende Leitung

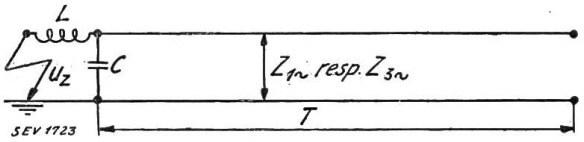

Fig. 44.
Ueberschwingen der Anlagekapazität durch den Erdschluss am Transformator L.

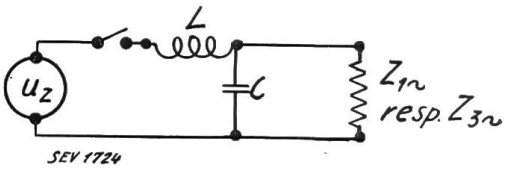

Fig. 45.
Ersatzschema der Fig. 44 für den Zeitabschnitt $2T$.

kann nach Fig. 45 während der zweifachen Laufzeit $2\,T$ einer Welle über eine Phase ersetzt werden durch den Parallelwiderstand $Z_{1\sim}$ (beim Einphasennetz) resp. $Z_{3\sim}$ (beim Dreiphasennetz), wenn $Z_{3\sim}$ den Wellenwiderstand zweier Phasen bedeutet. Schwingungen des durch Z gedämpften Schwingkreises LC sind nun bekanntlich möglich, so lange $(Z_{1\sim}\ \textit{resp.}\ Z_{3\sim}) > \frac{1}{2}\sqrt{L/C}$.

In unserem Fall ist: $L = 2{,}71$ mH pro Phase,
die Kapazität der Schutzkondensatoren: $C = 0{,}044\ \mu$F pro Phase,

der Schwingwiderstand: $\sqrt{L/C} = \sqrt{\dfrac{1{,}5 \cdot 2{,}71 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0{,}044 \cdot 10^{-6}}} = 215\ \Omega$,

die Eigenfrequenz: $f \leqq \dfrac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \cong \dfrac{1}{2\pi\sqrt{1{,}5 \cdot 2{,}71 \cdot 2 \cdot 0{,}044 \cdot 10^{-9}}} = 8420$ Per/s.

ferner: $Z \cong 500\ \Omega$.

Es ergibt sich daraus, dass stark gedämpfte Schwingungen in diesem Fall (Erdschluss und Speisung in A, nur *eine* sehr lange Leitung angeschlossen) möglich sind, dies um so mehr, als die Gültigkeit des Schemas für Netz H nur während $2\,T = 0{,}96 \cdot 10^{-4}$ s besteht und sich nachher gewissermassen der Wert $Z_{1\sim}$ resp. $Z_{3\sim}$ erhöht.

Eine kleine Spannungserhöhung über den Wert u_z kommt in diesem Fall auf den gesunden Phasen infolge der Kapazität vor; sie bleibt jedoch nicht lange örtlich am Transformator blockiert, sondern wandert mit der Zeit auf die Leitung, indem sich die Kapazität C auf den Wellenwiderstand Z mit der Zeitkonstante (CZ) entlädt. Durch diese Energieabführung wirkt die Leitung Z während der Zeit $2\,T$ als Dämpfung auf die Schwingung, genau wie ein Ueberbrückungswiderstand, der auch der Drosselspule parallelgeschaltet sein könnte.

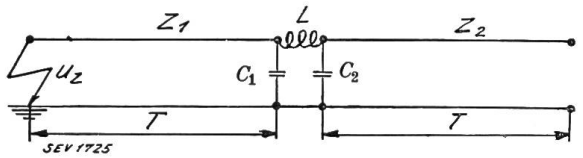

Fig. 46.
Ueberschwingen der Anlagekapazität durch den entfernten Erdschluss auf der Leitung Z_1.

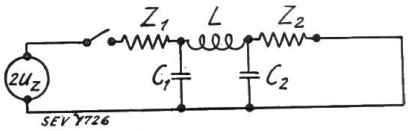

Fig. 47.
Ersatzschema der Fig. 46 für den Zeitabschnitt $2\,T$.

B) Bei Erdschlüssen in grosser Entfernung vom Speisetransformator ist die Schwingungsmöglichkeit anhand der Fig. 46 zu beurteilen. Für die zweifache Laufzeit $2\,T$ einer Welle über eine Phase ersetzen wir wieder das Wellenschema durch das während $2\,T$ für unsere Betrachtung gleichwertige der Fig. 47, wo zugleich wieder an Stelle des Kurzschlusses von u_z ein Einschaltvorgang gezeichnet ist. Die

Erkennung der Schwingmöglichkeit ist hier etwas komplizierter[13]); jedoch sieht man sofort, dass zur Ermöglichung von Schwingungen längs der zwei bezeichneten Wege ungefähr folgende Bedingungen erfüllt sein müssten:

$$\text{Ueber } 2\, u_Z - Z_1 - L - C_2 \quad : \quad Z_1 < 2\sqrt{L/C_2} \text{ und } Z_2 > \frac{1}{2}\sqrt{L/C_2}$$

$$\text{Ueber } \quad C_1 - L - Z_2 \quad : \quad Z_2 < 2\sqrt{L/C_1} \text{ und } Z_1 > \frac{1}{2}\sqrt{L/C_1}.$$

Für Einphasennetze mit $C_1 = C_2 = C$, $Z_2 = Z_1$ heisst dies:

$$\sqrt{L/C} \begin{cases} \text{muss wesentlich kleiner sein als} & 2 \cdot Z_1 \\ \text{und zugleich wesentlich grösser als} & \frac{1}{2} Z_1. \end{cases}$$

Für $\sqrt{L/C}$ ist daher ein offenbar sehr enger Bereich der Gefährlichkeit vorgeschrieben, wo nämlich $Z_1 Z_2 \simeq \sqrt{L/C}$. Die genauere Berechnung des Schemas Fig. 47 zeigt, dass infolge der gleichzeitigen Dämpfung der beiden ungefähr gleichen Wellenwiderstände Z_1 und Z_2 *nie* eine Schwingung von praktisch bedeutender Grösse möglich ist. Für Dreiphasennetze ist $C_2 = C_1$, $Z_2 \cong \frac{1}{2} Z_1$. Man überzeugt sich leicht davon, dass die Schwingmöglichkeit ebenfalls nie in praktisch merklichem Mass vorhanden ist.

Dieses Resultat ist vorläufig nur für sehr langgestreckte Netze gültig, genauer gesagt stets dann, wenn die doppelte Laufzeit $2\,T$ grösser ist als $^1/_4$ Periode der Eigenschwingung des Kreises $L-C$. Im andern Falle nähert sich der Vorgang allmählig demjenigen naher Erdschlüsse, wie er unter *A)* berechnet wurde. Bei den entfernten Erdschlüssen des Netzes *H* war $2\,T = 0{,}96 \cdot 10^{-4}$ s. Es ist also $2\,T > {}^1/_4\,T$, Periode der Eigenschwingung von 8420 Per/s, d. h. es ist eine Schwingungsmöglichkeit in diesem Fall tatsächlich nicht vorhanden. Sofern mehrere Leitungen Z_2 am Speisetransformator angeschlossen sind (Versuchsnetz *A*), sinkt Z_2 entsprechend; die Schwingungsmöglichkeit lokaler Kapazitäten mit den Transformatoren zusammen wird dadurch noch mehr vermindert. Obige Ergebnisse gelten unabhängig vom Verlauf der anregenden Spannung u_Z, also für beliebig steile Wellen. Die Berücksichtigung sehr flacher Wellenzüge ergäbe eine weitere Verminderung der Möglichkeit örtlicher kapazitiver Schwingungen. Diesen ist deshalb, jedenfalls bei den Versuchen mit entfernten Erdschlüssen, die praktische Bedeutung abzusprechen, während bei Erdschlüssen in der Nähe des Speisetransformators ein schwaches Ueberschwingen des Transformators mit der Anlagekapazität vorkommt, sofern nur eine Leitung vom Transformator gespiesen wird. *Die früher als «Schutzkondensatoren» eingebauten Kondensatoren sind also einerseits nicht im Stande, die Höhe der Erdschlussüberspannungen zu vermindern, andrerseits ist die Mehrgefährdung durch dieselben selten von Bedeutung, im vorliegenden Netz jedenfalls unwesentlich, wie dies die Versuche bestätigen.*

Zu 2 (Wirkung der vielen Verbrauchertransformatoren längs der Leitung). Jeder Verbrauchertransformator hat den Einfluss eines infolge seiner hohen Induk-

[13]) Von Rüdenberg ist der Fall berechnet worden, wo entweder C_1 oder C_2 wegfallen, siehe Elektr. Schaltvorgänge 1923, S. 430 bis 442.

Mit $Z_1 = Z_2$ wird dann die theoretisch bei unendlich steilen Wellen höchstmögliche Ueberspannung $= 4{,}5\,\%$. Mit $Z_2 = \frac{1}{2} Z_1$ sinkt dieser Betrag, so dass diesen Ueberspannungen bereits keine praktische Bedeutung mehr zukommt.

Die Berechnung des Schemas der Fig. 17 führt auf die Wurzeln der kubischen Gleichung:

$$X^3 + X^2 \cdot \frac{C_1 Z_1 + C_2 Z_2}{C_1 C_2 Z_1 Z_2} + X \cdot \frac{L + Z_1 Z_2 (C_1 + C_2)}{L \cdot C_1 C_2 Z_1 Z_2} + \frac{Z_1 + Z_2}{L \cdot C_1 C_2 Z_1 Z_2} = 0.$$

Die Gleichung hat *stets* zwei imaginäre Wurzeln und führt deshalb stets zu gedämpft schwingendem Spannungsverlauf. Die dadurch bewirkte Ueberspannung hat aber ebenfalls keine Grösse von praktischer Bedeutung.

tivität langsamen Spannungsausgleiches zwischen den Phasen. Da die Sekundärseite (Niederspannungsseite) derselben je nach der momentanen Belastung nur zum Teil als kurzgeschlossen anzusehen ist, kommt pro Transformator jeweils eine höhere als dessen Streuinduktivität in Betracht. Da anderseits die Summe der Nennleistungen aller angeschlossenen Verbrauchertransformatoren beim Netz *H* etwa ein Drittel der Leistung des bei den Versuchen benutzten Speisetransformators erreicht und im Netz *A* sogar das 2,5fache derselben beträgt, so ist eine Beeinflussung des Spannungsverlaufes doch möglich. Die Art desselben wird sich in folgender Weise äussern:

Beim gefährlichen Fall des vom Speisetransformator entfernten Erdschlusses werden die entfernten Verbrauchertransformatoren zuerst von der Störung erreicht. Einer nach dem andern beginnt seine Spannung gegen Erde zu verlagern unter Entsendung eines Ladestroms nach den gesunden Phasen. Gegen den Speisetransformator hin summieren sich alle diese Ladeströme der gesunden Phasen. Die Gesamtsumme bewirkt am Speisetransformator einen Anstieg, der je nach der örtlichen Verteilung und Grösse (Leistung) und Belastung der Verbrauchertransformatoren verschieden hoch ist und stets wenige Laufzeiten nach der ersten Wellenankunft am Speisetransformator zustande kommt. Das ist in der Tat die beobachtete Zeit der durch die vereinfachten Netzmodelle nicht erklärten Spannungserhöhung. Ein Unterschied in der Höhe der Ueberspannung muss sich dabei auch dadurch ergeben, dass in der Nähe des Erdschlussortes die Spannung der Erdschlussphase nur sehr kurzzeitig über den Wert Null hinausschwingt, während gegen den Speisetransformator das vom Wanderwellenvorgang bedingte Schwingen der Erdschlussphase über Null hinaus auf angenähert die negative Zündspannung länger andauert und aus den Oszillogrammen deutlich ersichtlich ist. Die Spannung der gesunden Phasen wird dadurch in grösserer Entfernung vom Erdschlussort mehr verlagert als in dessen Nähe. *Die vielen Verbrauchertransformatoren bewirken also theoretisch bei entfernten Erdschlüssen eine örtliche Mehrgefährdung in der Gegend des Speisetransformators, wie die Versuche dies ergaben.*

Zur Erklärung der örtlichen Höchstüberspannung am speisenden Transformator bei entfernten Erdschlüssen tragen demnach örtliche Schwingkreise beim Speisetransformator nichts bei; sie werden durch den entfernten Erdschluss nicht angestossen, resp. durch die Wellenwiderstände der Leitungsphasen zu stark gedämpft. Die Erscheinung erklärt sich vielmehr:

1. gegenüber der kleineren Beanspruchung beim Fall der Tabelle III (Erdschluss in Nähe des Speisetransformators) durch das wanderwellenmässige, länger dauernde Umschwingen der Erdschlussphase in grösserem Abstand vom Erdschlussort,

2. bezüglich der kleineren Beanspruchung am Erdschlussort gegenüber derjenigen am Speisetransformator selber (Tabelle II gegen Tabelle I) bei entfernten Erdschlüssen durch die Ausgleichsströme der längs der Leitung verteilten Verbrauchertransformatoren und schliesslich durch die Wirkung der gegenseitigen Leitungsinfluenz zwischen den Phasen. Es wird nötig sein, die gegebenen Erklärungen auf ihre Richtigkeit nachzuprüfen, insbesondere durch weitere Versuche an anders geformten, einfachen Netzen oder durch vergleichende Erdschlussversuche mit und ohne angeschaltete Verbrauchertransformatoren.

V. Folgerungen aus den Erdschlussmessungen.

1. Die Erdschlussversuche im untersuchten 8 kV-Verteilnetz haben gezeigt, dass die Ueberspannungsbeanspruchung wesentlich verschieden hoch ist, je nach der Lage des Erdschlusses in bezug auf den Speisepunkt des Netzes.

2. Die Ueberspannung ist bei ein und demselben Erdschluss und auf derselben Phase an verschiedenen Netzpunkten wesentlich verschieden hoch. Die grösste Ueberspannung trat in der unmittelbaren Nähe des Speisetransformators auf, sofern der Erdschluss am Ende einer Stichleitung, d. h. in grosser Entfernung vom Speisepunkt passierte.

3. Die grösste gemessene Ueberspannung gegen Erde beträgt das 3,5-fache der Phasenspannung des Netzes. Eine Reduktion dieses Wertes durch künstliche Ableitung ist praktisch kaum möglich hauptsächlich wegen der unsichern Wahl des Aufstellungsortes, da es möglich ist, dass bei anderer Lage des Erdschlusses auch die grösste Ueberspannung an anderer Stelle des Netzes auftritt. Das 8 kV-Netz muss zur Vermeidung von Doppelerdschlüssen und damit Betriebsunterbrüchen einer Spannungsbeanspruchung von der Höhe der ca. 4-fachen Phasenspannung (20 kV) gegen Erde *jederzeit* standhalten.

Eine periodische Spannungsprobe dieser Höhe böte ein empfehlenswertes Mittel zur Erhöhung der Betriebssicherheit durch Ausmerzung schwacher Stellen zu passenden Zeitpunkten.

4. Ein Wert des seit früher vorhandenen „Sammelschienenschutzes" (Kondensatoren und Tellerdrosselspulen) konnte in keinem Fall konstatiert werden, ebensowenig eine wesentliche Erschwerung des Ueberspannungsvorgangs durch denselben. Weglassen erhöht die Betriebssicherheit.

5. Die Beanspruchung der *Zusatzwicklung (des Stators) eines Induktionsreglers* erreichte bei sehr nahen Erdschlüssen etwa den Wert der Sprungwellenprobe. Bei entfernten Erdschlüssen sind die Wellen zu flach, um Seriespulen von solcher Grösse wie beim Induktionsregler zu gefährden. *Stromwandler* für 150 A wurden in keinem Fall durch die Erdschlüsse merklich beansprucht oder gefährdet, auch wenn sie gar nicht überbrückt waren. Dagegen ist für Stromwandler mit 5 A Nennstrom eine Ueberbrückung zur Verhinderung der Ueberschläge zwischen den Primärklemmen infolge naher Erdschlüsse unbedingt nötig. Die Ueberbrückung mittels Glimmröhre hat Vorteile gegenüber dem üblichen Silitwiderstand.

6. Die Erklärungen der beobachteten Erscheinungen werden z. T. gegeben auf Grund des durch den Erdschluss eingeleiteten Wanderwellenspiels, das für einige vereinfachte Netzmodelle mit bestimmten Vereinfachungen berechnet wird. Es zeigt sich aus den Oszillogrammen, dass die Induktivität des Speisetransformators als solche keine wesentliche Rolle spielt, sondern der Ausgleich beim Erdschluss in den meisten Fällen als Wanderwellenschwingung zwischen gesunden und kranken Phasen vor sich geht, sofern die Leistung des Speisetransformators mindestens einige 1000 kVA oder genauer dessen Streuinduktivität höchstens einige mH beträgt.

Die Wellenfronten entfernter Erdschlüsse sind infolge der vielen Leitungsabzweige mit Verbrauchertransformatoren ausserordentlich flach. Nur die erste Periode der Ausgleichsschwingung hat einigermassen abgestufte Wanderwellen-Form, die spätern sind bereits vollständig abgerundet. Die höchste Ueberspannung kommt während der ersten Wanderwellen-Periode vor. Die örtlichen Ueberspannungsunterschiede werden erklärt durch das wanderwellenartige Umschwingen der Erdschlussphase bei grosser Distanz des Erdschlusses vom Speisetransformator, durch die Leitungsinfluenz zwischen den Phasen und durch die örtliche Verteilung der vielen Verbrauchertransformatoren.

7. Die quantitative Vorausberechnung der örtlich auftretenden Ueberspannungen scheint sehr schwierig, nicht nur wegen der Unkenntnis der Bedingungen am Erdschlussfunken, sondern auch wegen des in vermaschten Netzen sehr komplizierten Wellenspiels und des mathematisch schwierig zu erfassenden Einflusses der örtlich verteilten Transformatoren des Netzes. Eine Verallgemeinerung der Resultate auf anders geformte Netze ist deshalb kaum möglich. Jedoch zeigen die Ueberlegungen, dass in jedem Netz zu bestimmten Lagen der Erdschlusstelle bestimmte Lagen der grössten Ueberspannung gehören. Im allgemeinen dürften diese oft bei entfernten grossen Speisepunkten liegen.

Genauen Aufschluss darüber können nur die Messung und die Erfahrung geben. Insbesondere wird es nötig sein, verschieden geformte und vor allem einfachere Netze mit dem Kathodenstrahloszillograph zu untersuchen.

8. Schliesslich ist im Hinblick auf die Versuchsresultate die Erhöhung der Prüfspannungen des VDE sehr zu begrüssen. Wir müssen bei den stets erhöhten An-

forderungen an die Betriebssicherheit elektrischer Anlagen unbedingt dazu kommen, die in innern Ausgleichsvorgängen (Schaltungen, Erdschlüssen, Kurzschlüssen) der Netze begründeten Ueberspannungen für die Netzisolation unschädlich zu machen. Die restlichen Betriebsstörungen durch Ueberspannungen entstehen ausschliesslich noch durch Blitze, die auf andere Art zu bekämpfen sind.

Eine Annäherung der elektrischen Sicherheitsgrade an die vom Maschinenbau geforderten mechanischen Sicherheitskoeffizienten ist wohl auch durch die steigende Bedeutung eines Betriebsunterbruches für Haushalt und Gewerbe gerechtfertigt. Die Grundlage zur Bemessung der elektrischen Sicherheitskoeffizienten können nur reichliche Messungen der in praktischen Netzen vorkommenden Ueberbeanspruchungen geben. Die vorliegenden Versuche bilden einen kleinen Beitrag zur Klärung dieser Frage.

Mitteilungen der Technischen Prüfanstalten. – Communications des Institutions de Contrôle.

Inbetriebsetzung von Schweizerischen Starkstromanlagen.

(Mitgeteilt vom Starkstrominspektorat des SEV)

Vom *16. bis 31. Oktober 1930* sind dem Starkstrominspektorat folgende wichtigere Anlagen als betriebsbereit gemeldet worden:

Hochspannungsleitungen.

Aargauisches Elektrizitätswerk, Aarau. Hochspannungsleitungen zu den Transformatorenstationen Neuenhof-Dorf bei Wettingen, im Turbinenhaus Damsau der Spinnerei und Weberei Wettingen und in Meienberg, 3 ~ 50, 8 kV.

Elektra Birseck, Münchenstein. Hochspannungsleitung zur Transformatorenstation Mühlematt in Oberwil, 3 ~ 50, 12,4 kV.

Entreprises Electriques Fribourgeoises, Romont. Ligne à haute tension pour l'alimentation du nouveau poste de la Sté Romande de Radiophonie à Sottens, 3 ~ 50, 8 kV

Bernische Kraftwerke A-G, Betriebsleitung Spiez. Hochspannungsleitung zur Stangen-Transformatorenstation Oertli bei Gunten, 3 ~ 50, 16 kV.

Elektrizitätswerk Schwyz. Hochspannungsleitung Felsenthor-Romiti, 3 ~ 50, 8 kV.

Elektrizitätswerk Wald (Zürich). Hochspannungsleitung zur Stangen-Transformatorenstation in Diezikon, Gemeinde Wald, 3 ~ 50, 8 kV.

Wasser- und Elektrizitätswerk Wallenstadt. Hochspannungsleitung zur Stangen-Transformatorenstation in Tscherlach, Gemeinde Wallenstadt, 3 ~ 50, 5 kV.

Elektrizitätswerke des Kantons Zürich, Zürich. Hochspannungsleitung zur Stangen-Transformatorenstation «Tössallmend» in Neftenbach, 3 ~ 50, 8 kV.

Schalt- und Transformatorenstationen.

A.-G. Hermann Forster, Arbon. Transformatorenstation in der Fabrik in Arbon.

Wasser- und Elektrizitätswerk Buchs. Transformatorenstation bei der alten Krone, Werdenberg.

Services Industriels Electricité, La Chaux-de-Fonds. Station transformatrice «Les Forains» à la rue des Forains, La Chaux-de-Fonds.

Vereinigte Kammgarnspinnereien Schaffhausen und Derendingen, Derendingen. Transformatorenstation im Motorenhaus der Selfaktorengruppe 10—18 der Kammgarnspinnerei Derendingen.

Metallwerke A.-G., Dornach. Schalt- und Transformatorenstation für die Durchziehofenanlage im Metallwerk in Dornach.

Entreprises Electriques Fribourgeoises, Fribourg. Stations transformatrices à Cudrefin et au Gambach-Hôpital Cantonal à Fribourg et poste de sectionnement à la jonction des lignes 60 kV EOS et EEF à Châtel-St-Denis.

Katholischer Kirchenverwaltungsrat Goldach. Transformatorenstation in der Kirche Goldach.

Licht- und Wasserwerke Horgen. Transformatorenstation «Hüsli» in Horgen.

A.-G. Bündner Kraftwerke, Klosters. Unterwerk Landquart, I. Ausbau.

Elektrizitätswerk der Gemeinde Lachen. Transformatorenstation im Oberdorf in Lachen.

Società elettrica Locarnese, Locarno. Stazione trasformatrice di Intragna.

Elektra Birseck, Münchenstein. Transformatorenstation bei der Hofmatt in Münchenstein.

Società elettrica Malcantonese, Novaggio. Stazione trasformatrice di Banco-Bombinasco.

Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt A.-G., Rheinfelden. Verteil- und Transformatorenstation für die Eigenbedarfsanlage im Maschinenhaus.

Entreprises Electriques Fribourgeoises, Romont. Station transformatrice sur poteaux au Col de Jaman (Vaud) et cabine pour la mise sous câbles des lignes 8000 V. (Romont et Semsales) alimentant le poste d'émissions de la Société Romande de Radiophonie à Sottens.

Services Industriels de Sierre. Station de Couplage à Sous-Géronde s/Sierre.

Bernische Kraftwerke A.-G., Betriebsleitung Spiez. Stangen-Transformatorenstation im Oertli bei Gunten.

Elektrizitätswerk Wald (Zürich). Stangen-Transformatorenstation in Diezikon, Gemeinde Wald.

Wasser- und Elektrizitätswerk Wallenstadt. Stangen-Transformatorenstation in Tscherlach, Gemeinde Wallenstadt.