**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 60 (1969)

**Heft:** 5

**Artikel:** Ortung von Fehlern in Energieverteilnetzen mit Hilfe von Stosswellen

**Autor:** Schlatter, E.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-916131

**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:** 02.07.2025

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

# Ortung von Fehlern in Energieverteilnetzen mit Hilfe von Stosswellen [1])

Von *E. Schlatter*, Zürich

2461 - 2480

621.316.1:621.317.333.4:621.3.015.33

## 1. Einleitung

In diesem Aufsatz werden Vorschläge und Anregungen beschrieben, wie man mit Hilfe von Stosswellen den Fehlerort bestimmen kann. Im letzten Kapitel sind Messungen beschrieben, die an einer Leitung durchgeführt wurden und die Anwendbarkeit des Ortungsprinzipes bestätigen.

In einem anderen Artikel, der an dieser Stelle erschienen ist [2]), findet sich eine theoretische Begründung für den Gedanken, der den Vorschlägen zu Grunde liegt.

Will man in einem Netz eine Störung durch Aussenden einer Stosswelle und Beobachten der Echos orten, so zeigt sich das Problem die Echos von der Störstelle zu unterscheiden von den vielen anderen Echos, die an Leitungsenden, Abzweigungen und anderen Unstetigkeiten entstehen. Ein zusätzliches Unterscheidungsmerkmal der Echos sind die Spannungsverhältnisse zwischen den Leitern. Wird eine Welle an einem Leitungsende oder an einer Abzweigung mit einer ähnlichen Leitung reflektiert, so findet keine Umwandlung der Wellenmodi statt und sie werden im selben Ausmass reflektiert. Daher haben diese Echos die selben Spannungsverhältnisse zwischen den Leitern wie die ausgesendete Welle.

Demgegenüber gibt es bei der Reflexion an einem zweiphasigen Kurzschluss oder an einem Erdschluss ungleiche Reflexionsfaktoren für die verschiedenen Wellenmodi und Umwandlungen von einem Wellenmodus in andere. Dies äussert sich darin, dass die Echos von Störstellen ein verändertes Spannungsverhältnis zwischen den Leitern aufweisen. Man kann nun mit Brückenschaltungen oder Differenzverstärkern dafür sorgen, dass nur die Echos von zweiphasigen Kurzschlüssen und /oder Erdschlüssen sichtbar werden.

Fig. 1 zeigt eine solche Brückenschaltung. Bei den Versuchen im Kapitel 7 wurde mit Differenzverstärkern gearbeitet, wie man sie am Eingang der meisten Oszillographen findet.

## 2. Massnahmen im Netz, damit mit Stosswellen Störstellen geordnet werden können

### *2.1 Übergänge zwischen verschiedenen Leitungsabschnitten*

Damit überhaupt mit Stosswellen gemessen werden kann, muss das Netz für Stosswellen durchlässig gemacht werden. Dies erfordert das Einschalten von Impulsübertragern zwischen Freileitungen und Kabeln, da zwischen diesen zwei Leitungstypen ein so grosser Unterschied im Wellenwiderstand besteht, dass Wellen beim Durchgang unzulässig stark abgeschwächt würden. Die Impulsübertrager müssen so geschaltet werden, dass der Starkstrom ungehindert übertragen wird, da es ja nicht möglich wäre erst im Störungsfall die Impulsübertrager einzubauen oder einzuschalten. Bei dieser Gelegenheit sei darauf hingewiesen, dass es sich auf alle Fälle empfiehlt, die ganze Messanordnung so aufzubauen, dass man auch Messungen am Netz im Betrieb vornehmen kann. Dies ist beim Suchen von Erdschlüssen von Vorteil. Es sollte aber auch nach jeder baulichen Veränderung geprüft werden, ob keine unzulässigen Reflexionsstellen eingebaut wurden. Es wäre lästig, wenn man dazu jedesmal das Netz ausschalten müsste. Die Schaltung in Fig. 1 ermöglicht das Messen an einem Netz im Betrieb. Fig. 2 zeigt, wie man Impulsübertrager in einem Leitungszug einschalten kann.

Es kann auch nötig werden, bei Übergangsstellen zwischen verschiedenartig aufgebauten Leitungen Übertrager einzubauen, da an solchen Übergängen Reflexionen mit Umwandlungen der Wellenmodi stattfinden können. Genaueres darüber findet sich im eingangs erwähnten Artikel.

### *2.2 Anschalten der Schaltstationen und Transformatoren an die Leitung*

Es kann nicht immer erwartet werden, dass die an der Leitung angeschlossenen Apparate für die kurzen Impulse eine für alle drei Leiter gleiche und hohe Impedanz darstellen. Falls dies nicht der Fall ist, müssen drei kleine Induktivitäten in den Leitungszug eingeschaltet werden, wie das in Fig. 1 gezeigt ist. Falls nicht ein Impulsübertrager an derselben Stelle die Leitung belastet, sollte eine Induktivität von 0,25 mH genügen, wenn die Leitung ein niederohmiges Kabel ist. Handelt es sich um eine Freileitung, müssen Induktivitäten von ca. 5 mH verwendet werden.

Man könnte auch auf den Gedanken kommen, dasselbe zu erreichen, indem man Kapazitäten zwischen die Leiter

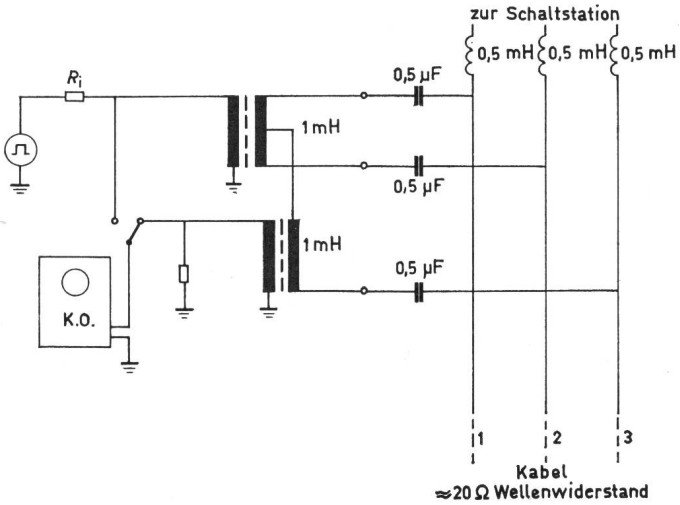


Fig. 1
**Brückenschaltung zur Unterdrückung der Echos von Leitungsenden und Abzweigungen**
Die Kondensatoren dienen zur Abtrennung der Hochspannung, so dass auch an Netzen im Betrieb gemessen werden kann. Die Induktivitäten trennen die Schaltstation ab, damit diese die Messung nicht störend beeinflusst
$R_i$ Innenwiderstand des Impulsgenerators

[1]) Von der Denzler-Stiftung des SEV preisgekrönte Arbeit.
[2]) Siehe Bull. SEV 59(1968)1, S. 6...10.

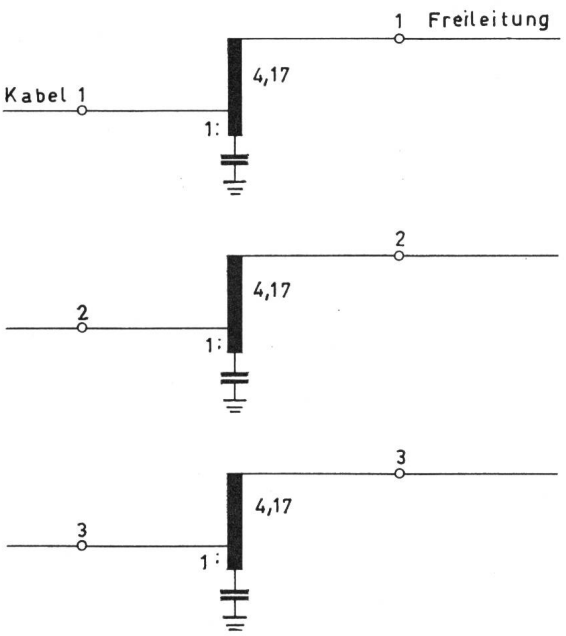


Fig. 2
**Schaltung von Impulsübertragern zur Anpassung von Kabeln an Freileitungen**
Der Starkstrom fliesst durch einen Teil der Wicklung der Übertrager. Die Kondensatoren verhindern einen Kurzschluss der Hochspannung

schaltet und damit die kurzen Impulse kurzschliesst. Dies wäre aber nicht zweckmässig, da dann Kurzschlüsse in der Nähe dieser Kondensatoren nicht mehr erkannt werden könnten.

## 3. Messanordnung

### *3.1 Anschaltung des Generators und des Oszillographen an die Leitung*

Der Generator muss so an die Leitung angeschaltet werden, dass nur die Leitermodi in einem festen Verhältnis angeregt werden. Der Oszillograph soll durch Spannungen im Erdmodus nicht gestört werden und auch das vom Generator gesendete Signal nicht direkt empfangen. Dies kann sowohl mit Gegentakt- bzw. Differenzverstärkern erreicht werden als auch mit Übertragern. Ausserdem soll ein Hochpass die 50-Hz-Wechselspannung von den Messgeräten fernhalten, damit auch ein Netz im Betrieb überprüft werden kann. Fig. 1 zeigt eine Übertragerschaltung, die diesen Anforderungen genügt. Der Anschluss an die Leitung hat so zu erfolgen, dass die einzelnen Leiter leicht vertauscht werden können. Ein Kurzschluss zwischen Leiter *1* und *2* würde in der gezeigten Schaltung kein sichtbares Echo ergeben. Tauscht man aber die Anschlüsse, z. B. zwischen Leiter *2* und *3*, so wird ein Echo angezeigt.

### *3.2 Der Impulsgenerator*

#### 3.2.1 Impulslänge und Wiederholfrequenz

Es ist wünschenswert, die Impulslänge so kurz wie möglich zu wählen, da es leichter ist, die Oszillogramme richtig zu interpretieren, wenn sich Echos nicht überschneiden. Je kürzer die Impulse sind, um so näher dürfen zwei Stoßstellen sein, ohne dass sich deren Echos überdecken. Ausserdem werden die Impulsübertrager und die Kondensatoren für kurze Impulse kleiner als für lange. Auch die Trennung vom 50-Hz-Wechselstrom fällt für kurze Impulse leichter.

Der Verkürzung der Impulse werden aber Grenzen gesetzt durch die obere Grenzfrequenz (und damit die Flankensteilheit), die man über die Leitung noch übertragen kann. Die Messungen in Kapitel 7 wurden mit 0,5 µs langen Impulsen durchgeführt. Diese Impulslänge war für die vorhandene Leitung günstig. Man muss aber auch mit ungünstigeren Leitungen rechnen. Demzufolge basieren die weiteren Überlegungen auf einer Impulslänge von 1 µs. Dies entspricht einer Freileitungslänge von 300 m oder einer Kabellänge von ≈ 100 m. Da man für die Fehlerortung die Impulsflanken beobachtet, ist es sicher möglich, den Fehlerort mit einer Unsicherheit von nur ⅓ dieser Längen anzugeben.

Bei der Frage, ob man mit einmaligen Impulsen arbeiten soll oder mit periodisch wiederholten, spricht die leichtere Beobachtbarkeit eines periodischen Signals für die Anwendung wiederholter Impulse. Hingegen ist es nicht zweckmässig, die Wiederholfrequenz zu hoch zu wählen. Bei 50 Hz flimmert das Bild am Oszillographen noch nicht und ist daher bequem beobachtbar. Auch die Helligkeit moderner Oszillographen-Röhren lässt eine Wiederholfrequenz von 50 Hz bei den verlangten Ablenkgeschwindigkeiten ohne weiteres zu. Bei dieser Wiederholfrequenz ist die mittlere Leistung selbst bei einer Pulsleistung von 200 kW nur 10 W. In 20 ms haben sich sicher auch sämtliche Echos totgelaufen. Es besteht also keine Ursache, die Wiederholfrequenz noch niedriger zu wählen. Eine Wiederholfrequenz von 50 Hz gibt zudem die Möglichkeit Impulse netzsynchron zu erzeugen. Dies ist besonders wichtig, wenn man mit einer 50-Hz-Spannung an der Störstelle einen Lichtbogen unterhalten will. Damit wird es möglich, die Impulse auf einen Zeitpunkt zu legen, in dem die Störungen durch das Zünden des Lichtbogens sich am wenigstens auswirken. Dies erfordert allerdings, dass man die Phase zwischen Impuls und Netz beliebig einstellen kann.

#### 3.2.2 Impulsspannung

Die Impulsspannung muss nach den Ergebnissen der im Kapitel 4 erwähnten Versuche gewählt werden. Eine zu niedrige Spannung lässt die Impulse in den Störgeräuschen ertrinken. Die Versuche in Kapitel 7 wurden notgedrungen mit sehr niedrigen Spannungen durchgeführt. Für diese Messungen mussten vorhandene Messgeräte verwendet werden, die für einen anderen Zweck gebaut und angeschafft wurden. Die Messungen zeigen immerhin, dass unter günstigen Verhältnissen auch Impulse von nur wenigen Volt durchaus genügen. Zweckmässiger ist es aber mit Spannungen von einigen 100 V zu arbeiten.

Bei Spannungen bis zu einigen 100 V wird der Mehraufwand am Generator durch eine Vereinfachung des Oszillographen aufgewogen. Bei noch höheren Spannungen muss

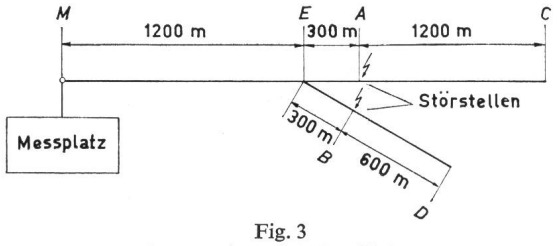


Fig. 3
**Schema eines einfachen Netzes**
zur anschaulichen Darstellung wie man den gestörten Ast feststellen kann
Bezeichnungen siehe im Text

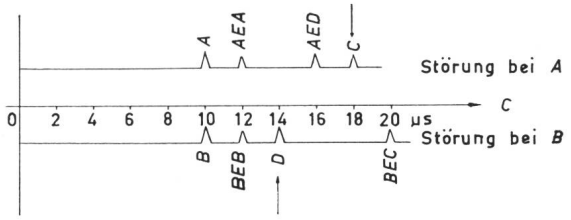


Fig. 4
**Schematisches Oszillogramm zum Netz nach Fig. 3**
Bezeichnungen siehe im Text

der Aufwand für den Generator beachtet werden. Will man an eine Freileitung Impulse von 10 kV anlegen, so ergibt das Pulsleistungen von 150 kW. Die Radartechnik zeigt, dass auch solche Leistungen noch mit vernünftigem Aufwand bewältigt werden können.

Eine obere Grenze setzt die Isolationsfestigkeit der Leitung und der angeschlossenen Apparate. Man wird kaum Spannungen anwenden wollen, die über dem Scheitelwert der Betriebsspannung liegen. Will man an einer Leitung auch während dem Betrieb messen, so wird man sogar wesentlich unter dieser Spannung bleiben müssen oder aber keine beliebige Phase einstellen können.

#### 3.2.3 Innenwiderstand des Generators

Man wird sicher den Wunsch haben, auch den Wellenmodus zu beobachten, den man sendet. Der Generator darf demzufolge diese Echos nicht kurzschliessen. Am zweckmässigsten ist es, wenn der Generator einen Innenwiderstand hat, der gleich dem Wellenwiderstand der Leitung ist. Notfalls kann man dies durch einen dem Generator in Serie geschalteten Widerstand erreichen.

## 4. Störungen an Kabeln

Ein Kabel, das bei Betriebsspannung durchgeschlagen hat, zeigt sehr häufig für kleinere Spannungen noch eine einwandfreie Isolation. Man kann daher nicht immer ein Echo erwarten, wenn mit kleinen Impulsspannungen geprüft wird. Der niedrige Wellenwiderstand der Kabel hat aber zur Folge, dass die Impulsspannung im Kabel $\approx$ 4mal kleiner ist als auf einer angeschlossenen Freileitung. Will man die Nennspannung auf der Freileitung mit den Impulsen nicht überschreiten, so kann man sich nicht darauf verlassen, dass im Kabel an der schadhaften Stelle ein Durchschlag erfolgt. Es ist daher angezeigt, nach einem anderen Hilfsmittel zu suchen. Gemäss einem Vorschlag sollte den Impulsen noch eine 50-Hz-Wechselspannung überlagert werden. Diese könnte den Durchschlag herbeiführen und (über eine Strombegrenzung selbstverständlich) einen Lichtbogen unterhalten. Damit hat man es auch in der Hand, einen Schluss zwischen nur zwei Leitern herbeizuführen. Dieses Verfahren sollte sich in allen Fällen bewähren, in denen nicht schon ein satter Kurzschluss besteht. Ungeklärt an diesem Vorschlag ist noch, wie starke Störspannungen durch einen Lichtbogen erzeugt werden. Sollten die Störspannungen ein solches Vorgehen verunmöglichen, so wäre abzuklären, wie leicht es möglich ist, Störstellen «einzubrennen», d. h. mit einem Lichtbogen die Isolation zu verkohlen und nachher erst zu messen. Ob diese Wege gangbar sind und welches Vorgehen das zweckmässigste ist, kann nur experimentell abgeklärt werden. Nach den Ergebnissen solcher Experimente muss sich auch die Wahl der Impulsscheitelspannung richten.

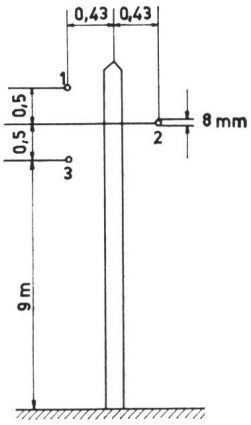


Fig. 5
**Disposition der Freileitung**
wie sie für die beschriebenen Messungen verwendet wurde

## 5. Identifikation des Astes

Aus der Zeit, die verstreicht bis das erste Echo von der Störstelle eintrifft, kann man feststellen, in welcher Entfernung sich diese befindet. Damit ist aber häufig der Fehlerort noch nicht eindeutig bestimmt, da die Störung immer noch an verschiedenen Ästen des Netzes sein kann. Wie aber Fig. 17 recht deutlich zeigt, folgen dem 1. Echo noch weitere, da die einmal in andere Modi umgewandelte Welle nun an jeder Stoßstelle ein sichtbares Echo auslöst. Aus diesen nun weiter folgenden Echos sollte es in den meisten Fällen gelingen, den Fehlerort eindeutig zu bestimmen. Es sei dies anhand eines einfachen Beispieles erklärt. Fig. 3 zeigt ein einfaches Netz mit zwei Störungen, die aber nicht gleichzeitig auftreten. Fig. 4 zeigt schematisch die Oszillogramme falls die Störung bei *A* und falls sie bei *B* liegt. Bei jedem Echo ist angeschrieben, an welchen Stellen es reflektiert wurde. Die zwei Echos, die sich besonders eignen zur Identifikation des Astes, sind mit einem Pfeil bezeichnet. Ein zweckmässiges Vorgehen ist folgendes: Mit Hilfe des ersten Echos stellt man fest, in welcher Distanz sich die Störung befindet. Dann kontrolliert man auf dem Plan die möglichen Fehlerorte. Zu jedem Fehlerort bestimmt man nun das Echo des zugehörigen Leitungsendes. Jetzt prüft man auf dem Oszillogramm,

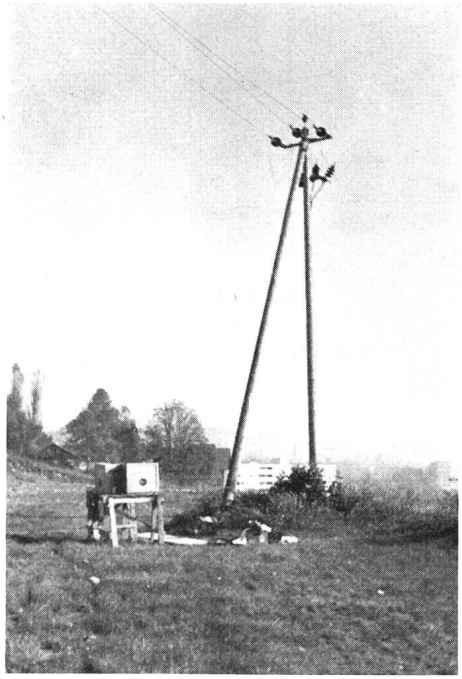

Fig. 6
**Messplatz für die Messungen an einer Freileitung**

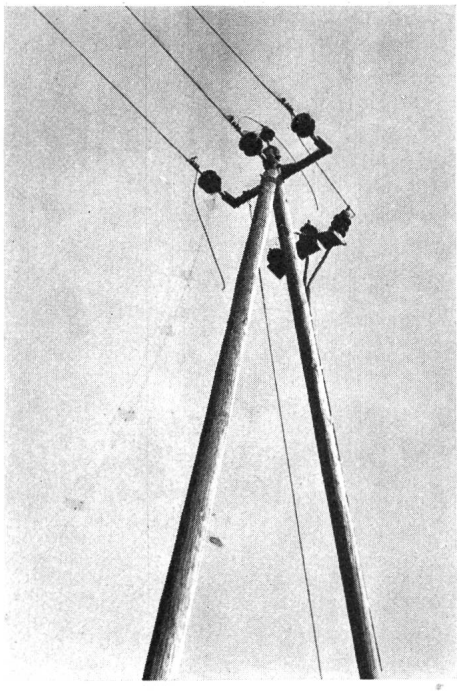

Fig. 7
**Anschluss an die Freileitung**
Die Leitung wurde durch eine mit dem Faktor 10 maßstäblich verkleinerte Leitung bis zu den Messgeräten fortgesetzt

welches dieser Echos auftritt. Damit weiss man dann, auf welchem Leitungsast die Störung liegt. Es ist nötig, sämtliche möglichen Leitungsenden nachzusehen und sich nicht mit dem ersten zu begnügen, von dem man ein Echo sieht, da es leicht möglich ist, dass dieses vielleicht auf einem ganz anderen Weg entstanden ist, den man nicht vorausgesehen hat. Falls dieses Vorgehen noch nicht endgültig zum Ziele führt, kann man versuchen, Doppelechos auszunützen.

## 6. Kenntnis des Netzes und Vorgehen bei 3phasigen satten Kurzschlüssen

Abschnitt 5 hat gezeigt, wie wichtig es ist, dass man das Netz genau kennt. Man wird sich zweckmässigerweise Netzpläne erstellen, in denen nicht die Längen, sondern die Laufzeiten der einzelnen Leitungen eingetragen sind. Dies ist besonders wichtig bei teilweise verkabelten Nutzen. Ausserdem wird man auch Kontrolloszillogramme aufbewahren, die man nach jeder Änderung im Netz aufnimmt, um Klarheit zu haben, ob sich vielleicht doch noch nicht abgeglichene Stossstellen im Netz befinden.

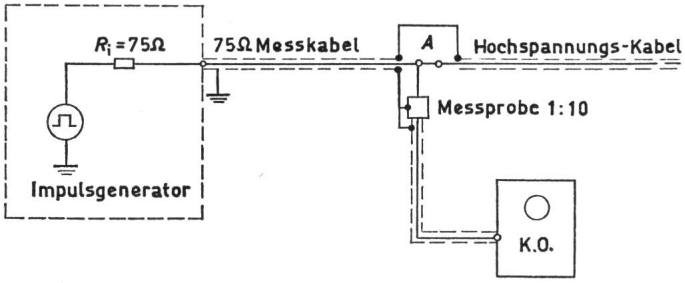


Fig. 8
**Schaltung für Messungen an einem Kabel**
*A* Anschlusspunkt; $R_i$ Innenwiderstand des Generators

Ist ein 3-phasiger Kurzschluss Ursache der Störung, so ist es unumgänglich den Oszillographen so anzuschalten, dass sämtliche Echos angezeigt werden. Dadurch wird es schwierig das Echo vom Fehlerort zu erkennen. Man wird das Oszillogramm mit einem älteren, das aufgenommen wurde solange das Netz noch einwandfrei arbeitete, vergleichen und auf Grund der Unterschiede zwischen den zwei Oszillogrammen feststellen, welche Echos von der Fehlerstelle herrühren. Diese Arbeit kann sehr schwierig sein, und man wird prüfen, ob sie besser durch eine Datenverarbeitungsanlage durchgeführt werden kann. Ob man diese zusätzlichen Aufwendungen in Kauf nehmen will, hängt davon ab, wie gut es noch möglich ist, den Vergleich der Oszillogramme durch einen Menschen vorzunehmen und wie häufig 3-phasige Kurzschlüsse vorkommen.

### *6.1 Vergleich von Oszillogrammen durch eine Datenverarbeitungsanlage*

#### 6.1.1 Einrichtungen und Organisation

Damit ein Computer irgendwelche Information verarbeiten kann, muss sie zuerst in digitale Form umgewandelt werden. Ausserdem muss sie zum Computer gebracht werden. Im vorliegenden Fall wäre es zweckmässig, das Digitalisieren bei der Meßstelle, d. h. in der Schaltstation vorzunehmen. Da Zeitverlust nicht in Betracht kommt und die Übermittlung selten erfolgt, kommt für die Übertragung nur eine Telephonwahlverbindung in Betracht. Man wird zweckmäs-

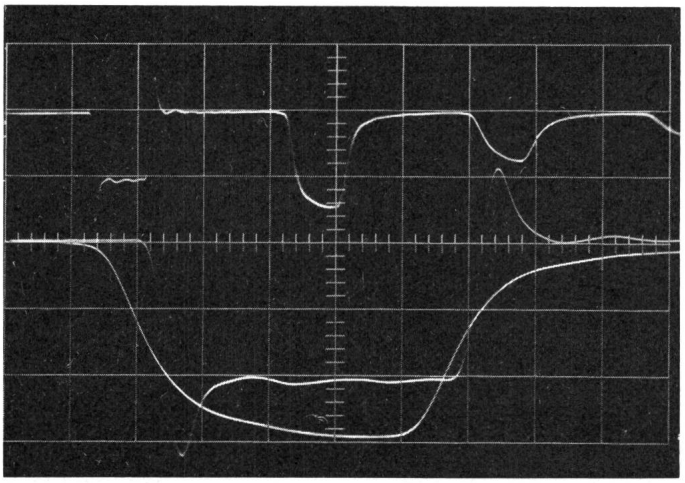

Fig. 9
**Oszillogramm einer Übertragung von Impulsen über ein Hochspannungskabel, dessen Ende offen ist**
Im obersten Oszillogramm beträgt die Ablenkgeschwindigkeit 0,5 µs/Teilung und die Spannungsempfindlichkeit 1 V/Teilung. Ganz links sieht man den Sendeimpuls, rechts davon sind zwei Echos sichtbar, die beide vom Leitungsende herrühren. Das erste entstand nach einmaligem Durchlaufen des Kabels, das zweite nach zweimaligem, da das Kabel auch am Eingang nicht reflexionsfrei abgeschlossen war. Darunter sieht man vergrössert den Sendeimpuls und das erste Echo. Die Ablenkgeschwindigkeit beträgt 0,1 µs/Teilung und die Spannungsempfindlichkeit 0,5 V/Teilung

sigerweise auch mit einem leistungsfähigen Rechenzentrum einen Vertrag abschliessen der garantiert, dass diese Arbeit mit Priorität erledigt wird.

Für das Digitalisieren kommen verschiedene Verfahren in Frage. Man kann mit einem sehr raschen Analog-Digital-Converter direkt die Signale von der Leitung digitalisieren

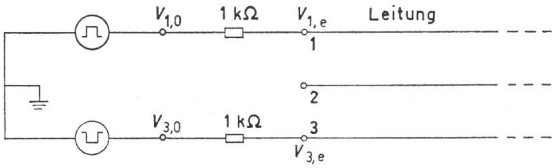


Fig. 10
**Schaltung zur Messung des Wellenwiderstandes einer Leitung**
Anregung eines Leitermodus
$V_1$, $V_3$ Potential; *1, 2, 3* Anschlussklemmen

und dann in einem raschen Speicher aufnehmen. Nachher würde man die Signale aus dem Speicher in einer dem Computer und der Übertragungsleitung angemessenen Geschwindigkeit wieder auslesen. Will man ein Auflösungsvermögen von 0,2 µs und ± 127 Amplitudenstufen, so ist für eine Leitungslänge von ≈ 15 km (d. h. 100 µs) ein Speicher von $8 \cdot 500 = 4000$ bit nötig. Dies ist kein sehr grosser Speicher, er müsste aber mit einer beträchtlichen Geschwindigkeit arbeiten. Dieser Weg scheint technisch möglich, verspricht aber weder billig noch einfach zu sein.

Ein anderer Weg wäre, die Signale nach dem «Samplingverfahren» zu «verlangsamen» und dann in einer Geschwindigkeit, die vom Übertragungskanal verarbeitet werden kann, zu digitalisieren.

Man könnte auch das Oszillogramm photographieren und das Photo mit einem Kurvenverfolgungs-Gerät abtasten. Dieses langsame Signal könnte ohne weiteres digitalisiert übertragen und von der Datenverarbeitungsanlage aufgenommen werden.

Das Photo könnte auch ausgewertet werden, indem man ein Raster darüberlegt und jedem Bildpunkt ein bit zuordnet, das L oder 0 wäre, jenachdem ob die betreffende Stelle weiss oder schwarz ist. Nach diesem Verfahren sind zur Wiedergabe eines Oszillogrammes $500 \cdot 256 = 128\,000$ bit nötig. Die Übertragung könnte in ca. 2 min erfolgen.

#### 6.1.2 Computer-Programme

Falls die Digitalisierung nach dem letzten erwähnten Verfahren erfolgt ist, müsste zuerst eine Umwandlung erfolgen, so dass $U(t)$ als Tabelle der Spannungswerte $U$ für äquidistante $t$-Werte (z. B. 0,2 µs) dargestellt würde. Dies ist möglich, da $U(t)$ sicher eine eindeutige Funktion ist, was gegenüber allgemeinen Zeichenerkennungsprogrammen eine wesentliche Vereinfachung bringt. (In allgemeinen Programmen kann, wenn auch nur Linien und kleine Flächen erkannt werden müssen, nicht vorausgesetzt werden, dass $X(Y)$ oder $Y(X)$ eine eindeutige Funktion ist.) Falls eines der anderen Digitalisierungsverfahren angewendet wird, ist dieser Schritt nicht mehr nötig.

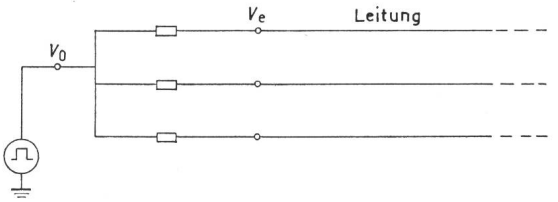


Fig. 11
**Schaltung zur Messung des Wellenwiderstandes einer Leitung**
Anregung im Erdmodus
$V_0$ Potential am leerlaufenden Generator; $V_e$ Potential an den Leitern

Diese Tabellen würden für das störungsfreie Netz auf Magnetband gespeichert. Tritt eine Störung auf, so muss $U(t)$ des gestörten Netzes, mit $U(t)$ des ungestörten Netzes verglichen werden. Dazu müssen zuerst Zufälligkeiten, die von der Messung herrühren, eliminiert werden. Dies sind:

a) Positionierung des Oszillogrammes in $t$- und in $U$-Richtung.
b) Maßstäbe für $U$ und $t$.
c) Nichtlinearitäten der $U$- und t-Maßstäbe.
d) Veränderte Dämpfung auf der Leitung (trapezförmige Bildkorrektur).

Sind die beiden Tabellen durch Ausgleichen dieser Zufälligkeiten möglichst gut angeglichen, so kann die Differenz gebildet und ausgegeben werden. Auf Grund dieser Ausgabe sollte es möglich sein, den Fehlerort zu bestimmen. Eine direkte Bestimmung des Fehlerortes durch die Datenverarbeitungsanlage könnte erwogen werden.

## 7. Messungen an einer Leitung

Zur Kontrolle der Überlegungen in den vorhergehenden Abschnitten und zur Abklärung der hochfrequenztechnischen

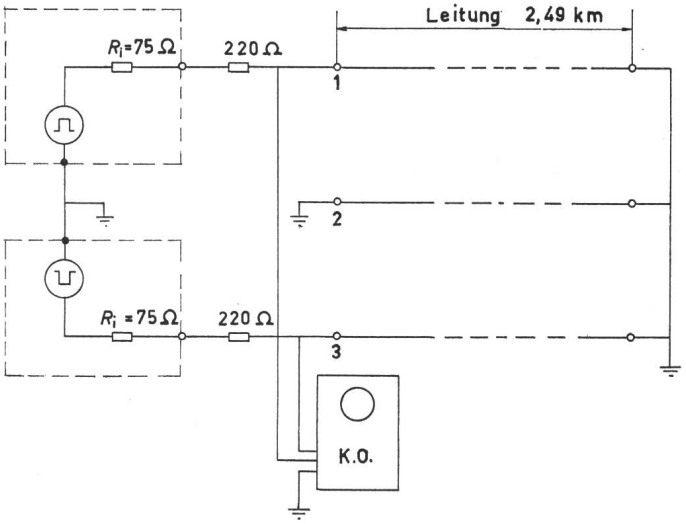


Fig. 12
**Schaltung für Messungen an einer Freileitung**
Die zwei Generatoren sind so eingestellt, dass sie gleichzeitig entgegengesetzt gleiche Impulse erzeugen. Dadurch wird eine Welle in den Leitermodi angeregt
$R_i$ Innenwiderstand des Generators; *1, 2, 3* Anschlusspunkte an der Freileitung

Übertragungseigenschaften einer Starkstromleitung wurden einige Messungen durchgeführt.

### *7.1 Leitung und Messanordnung*

Die ausgemessene Leitung wird mit 16 kV betrieben. Von der Schaltstation weg führt ein 113,5 m langes Kabel. Das Kabel endet auf einem Holzmasten. Die Leitung wird von dort als Freileitung auf Holzmasten mit einer Leiteranordnung nach Fig. 5 weitergeführt. In einer Entfernung von 2520 m vom Kabelmast befindet sich ein Streckenschalter, der für sämtliche Messungen geöffnet war.

Für die meisten Messungen war die Leitung 40 m vor dem Streckenschalter kurzgeschlossen und geerdet. Die Leitungs-

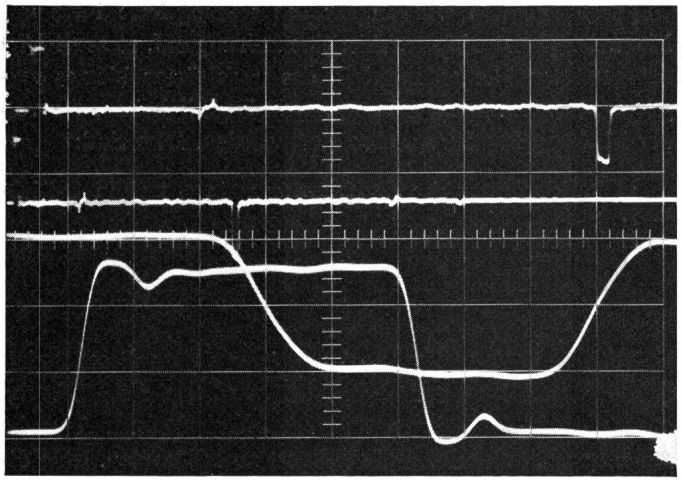

Fig. 13
**Oszillogramm einer Übertragung von Impulsen über eine Freileitung mit kurzgeschlossenem Leitungsende**
Maßstäbe:
*oberste Kurve:* 2 µs/Teilung, 5 V/Teilung; *2. Kurve:* 5 µs/Teilung, 5 V/Teilung; *3. Kurve:* 0,1 µs/Teilung, 2 V/Teilung; *unterste Kurve:* 0,1 µs/Teilung, 2 V/Teilung

führung ist nicht gradlinig, sondern ist an 2 Stellen um annähernd 90° abgewinkelt. In einer Entfernung von ca. 730 m vom Kabelmasten befindet sich ein weiterer Streckenschalter, der während sämtlichen Messungen geschlossen blieb.

Die Messungen am Kabel erfolgten von der Schaltstation aus. Beim Kabelendverschluss wurde die Verbindung zum Leistungsschalter aufgetrennt. Der Anschluss an ein Hochspannungskabel kann in hochfrequenztechnischer Hinsicht nicht günstig vorgenommen werden. Die Verbindung von der Abschirmung der Messkabel zum Mantel des Hochspannungskabels erfolgt über einen zu grossen Umweg, was sich bei den Messungen auswirkt. Die Freileitung wurde am Kabelmasten vom Kabel abgetrennt. Dann wurde sie durch eine 10 m lange geometrisch ähnliche Leitung bis zum Messplatz weitergeführt. Der Messplatz wurde gleich neben dem Kabelmasten aufgebaut.

Fig. 6 zeigt den Messplatz und den Leitungsmasten. Fig. 7 ist eine Aufnahme des Anschlusses an die Freileitung. Als

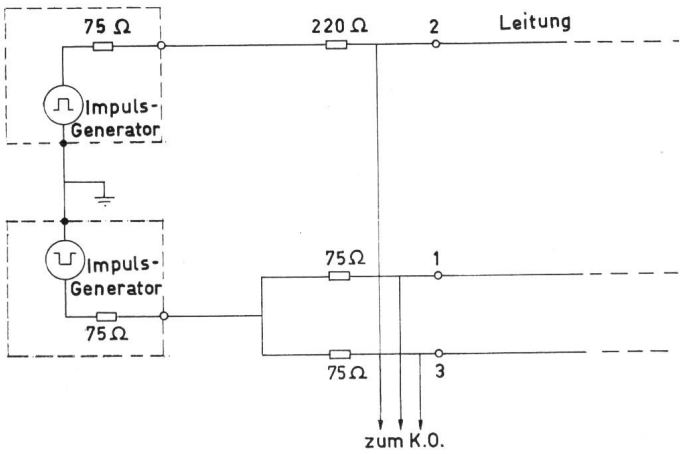


Fig. 14
**Schaltung für Messungen an einer Freileitung**
Auch bei dieser Schaltung werden nur die Leitermodi angeregt, aber in einem anderen Verhältnis als in der Schaltung nach Fig. 12
*1, 2, 3* Anschlusspunkte an der Leitung

Messgeräte wurden ein Kathodenstrahloszillograph und zwei Impulsgeneratoren verwendet.

### *7.2 Messungen am Kabel*

#### 7.2.1 Bestimmung des Wellenwiderstandes

Es wurde eine Schaltung nach Fig. 8 aufgebaut. Bei *A* befindet sich der Kabelendverschluss des Hochspannungskabels. Zuerst wurde die Verbindung bei *A* aufgetrennt und der Scheitelwert des Impulses auf 5 V eingestellt. Dann wurde bei *A* verbunden und eine Impulshöhe von 1 V gemessen. Daraus ergibt sich ein Wellenwiderstand von:

$$75\,\Omega \frac{1}{\frac{5\,\mathrm{V}}{1\,\mathrm{V}} - 1} \approx 19\,\Omega$$

Die Impulslänge war bei dieser Messung 0,5 µs, d. h. kürzer als die Laufzeit im Kabel, und es wurde nur der Sendeimpuls beobachtet, so dass die Abschlussverhältnisse ausser Betracht fallen.

#### 7.2.2 Übertragungseigenschaften des Kabels

Mit derselben Messanordnung wurde Fig. 9 aufgenommen. In der oberen Kurve beträgt die Ablenkgeschwindigkeit

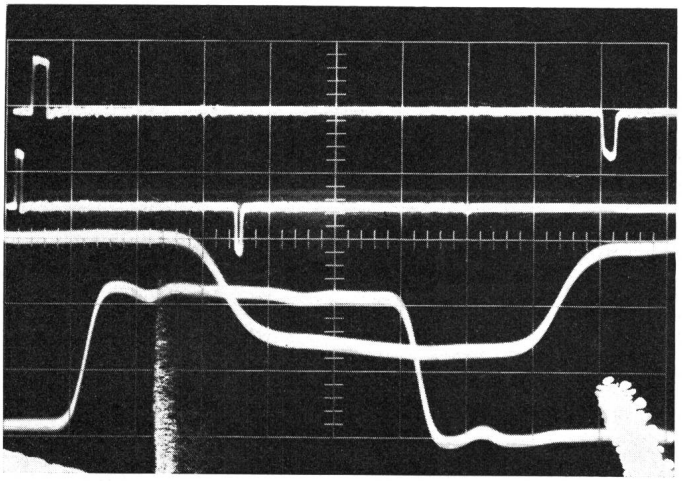

Fig. 15
**Oszillogramm der Spannung zwischen Leiter *1* und *2* der Schaltung nach Fig. 14**
Maßstäbe siehe Fig. 13

0,5 µs/Teilung und die Spannungsempfindlichkeit 1 V/Teilung.

Der erste Impuls ist der Sendeimpuls. Die zwei folgenden sind Echos. Die Überhöhung am Anfang des Sendeimpulses wird durch den unvollkommenen Anschluss des Hochspannungskabels verursacht. Ein Teil der Verflachung der Echos ist demzufolge ebenfalls auf den Anschluss und nicht auf die Übertragung im Kabel zurückzuführen. Im unteren Teil der Aufnahme ist vergrössert der Sendeimpuls und das 1. Echo aufgenommen. Ablenkgeschwindigkeit und Empfindlichkeit für diese Aufnahmen betragen 0,1 µs/Teilung und 0,5 V/Teilung.

### *7.3 Messungen an der Freileitung*

#### 7.3.1 Wellenwiderstandsmessungen

Nach demselben Verfahren, wie es im Abschnitt 7.2.1 beschrieben ist, wurde auch der Wellenwiderstand der Freilei-

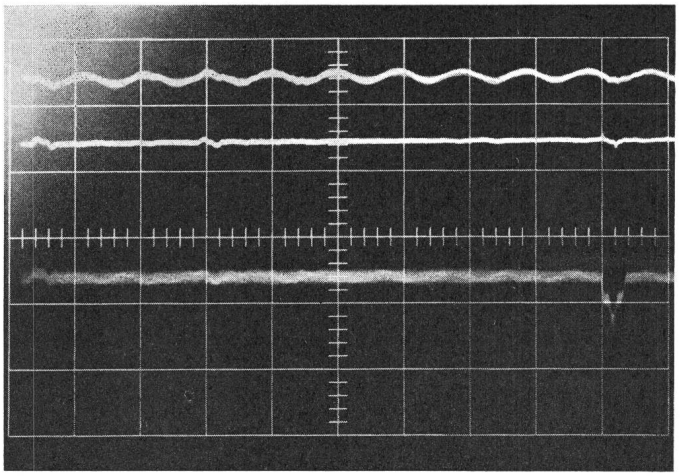

Fig. 16
**Oszillogramm der Spannung zwischen Leiter *1* und *3* gemäss Schaltung nach Fig. 14**
Maßstäbe: 2 µs/Teilung, 2 V/Teilung
Die 1. Kurve ist gestört. Die 2. Kurve entstand bei 3phasigem Kurzschluss in 2,49 km Entfernung von der Meßstelle. Die 3. Kurve entstand bei einem Kurzschluss zwischen Leiter *2* und *3* in 2,49 km Entfernung. In 2,53 km Entfernung von der Meßstelle ist die Leitung offen

tung gemessen. Da die Freileitung nicht aus drei voneinander abgeschirmten Leitungen besteht, sind zur Erfassung des Wellenwiderstandes mehrere Messungen nötig.

Zuerst wurden in einer Messanordnung nach Fig. 10 die Scheitelspannungen der Impulse gemessen. Die Impulsamplituden wurden folgendermassen eingestellt:

$$V_{1,0} = -V_{3,0} = 14\,\text{V}$$

Es wurde gemessen:

$$V_{1,e} = -V_{3,e} = 3{,}5\,\text{V}$$

Daraus errechnet sich zwischen Leiter *1* und *3* ein Widerstand von 0,666 kΩ. Nach den Berechnungen müsste er 1,61 kΩ ‖ 3,21 kΩ ‖ 1,72 kΩ = 0,660 kΩ sein. Die Übereinstimmung ist ausgezeichnet.

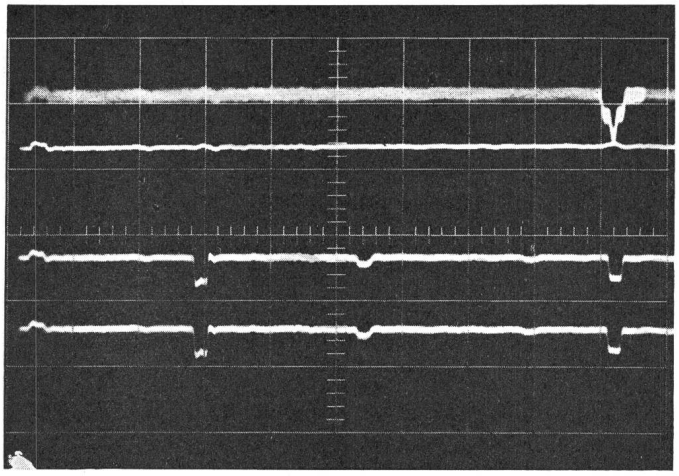

Fig. 17
**Weitere Oszillogramme zwischen Leiter *1* und *3* gemäss Schaltung nach Fig. 14**
Die 1. Kurve ist eine Wiederholung der 3. Kurve in Fig. 16. Die 2. Kurve wurde bei offenem Leitungsende in 2,53 km Entfernung aufgenommen. Die 3. und 4. Kurve wurden aufgenommen bei einem Kurzschluss zwischen Leiter *2* und *3* in ca. 0,73 km Entfernung

Eine zweite Messung wurde nach Fig. 11 aufgebaut. Es wurden folgende Impulsamplituden gemessen: $V_0 = 30$ V, $V_e = 17$ V. Daraus ergibt sich ein Widerstand von 1,32 kΩ. Gegenüber den errechneten Werten von 0,847...0,872 kΩ besteht ein wesentlicher Unterschied. Er muss mit der beschränkten Leitfähigkeit der Erde erklärt werden.

#### 7.3.2 Echos auf der Freileitung

Fig. 13 wurde mit der Messanordnung nach Fig. 12 aufgenommen. Die zwei Impulsgeneratoren sind so eingestellt, dass sie gleichzeitig Impulse gleicher Länge aber entgegengesetzt gleicher Amplitude abgeben. Der Oszillograph ist mit einem Differenzverstärker ausgerüstet, so dass die Spannung zwischen Leiter *1* und *3* gemessen wird.

Die oberste Kurve (Fig. 13) ist mit einer Ablenkgeschwindigkeit von 2 µs/Teilung und einer Empfindlichkeit von 5 V/Teilung aufgenommen. Der positive Impuls ganz links ist der Sendeimpuls. Nach 17,2 µs sieht man ein deutliches Echo von entgegengesetztem Vorzeichen. Dieses rührt vom

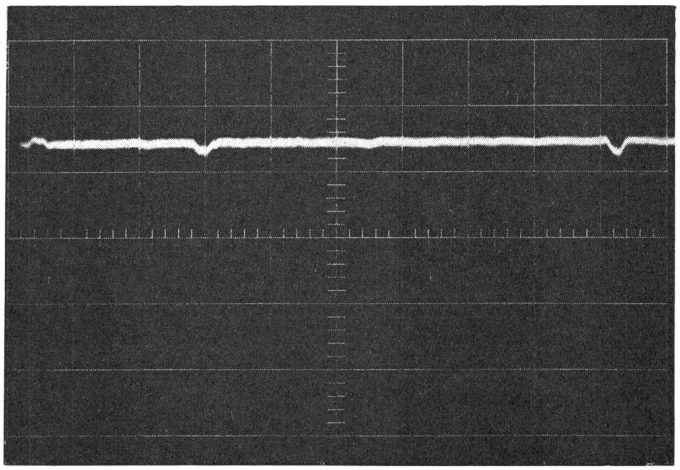

Fig. 18
**Oszillogramm eines Erdschlusses in ca. 0,73 km Entfernung**
Meßschaltung wie in Fig. 14

Kurzschluss am Ende der Leitung her. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit beträgt $2{,}91 \cdot 10^5$ km/s. Die Abweichung gegenüber der Lichtgeschwindigkeit beträgt 3 %. Die Messunsicherheit liegt in derselben Grössenordnung. Es können daraus keine sicheren Rückschlüsse gezogen werden. Eine etwas niedrigere Ausbreitungsgeschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit ist zu erwarten durch den Einfluss des Bodens, der Isolatoren, des Durchhangs der Leiter und der unvollständigen Stromverdrängung an die Oberfläche der Leiter.

5 µs nach dem Sendeimpuls sieht man ein kleines Doppelecho. Dieses rührt vom Streckenschalter in 730 m Entfernung her. Es ist sehr wertvoll, dass man auf dieser Aufnahme sieht, was für ein Echo eine solche Unstetigkeit verursacht. Die zweite Kurve wurde genau gleich wie das erste aufgenommen, nur die Ablenkgeschwindigkeit ist auf 5µs/cm erniedrigt. Das Echo vom Leitungsanfang kann kaum mehr wahrgenommen werden. Es liegt 2 Teilungen rechts von der Bildmitte. Das Echo eine Teilung rechts von der Bildmitte ist das am Leitungsende reflektierte Echo, das die rücklaufende Welle beim Streckenschalter erzeugte.

In der unteren Bildhälfte sieht man den Sendeimpuls und das Echo vom Leitungsende mit einer Ablenkgeschwindigkeit von 0,1 µs/Teilung und einer Empfindlichkeit von 2 V/Teilung aufgenommen. Diese Kurven zeigen, dass die Übertragungseigenschaften solcher Leitungen Fehlerortungen mit Impulsen durchaus zulassen.

Sendet man Impulse mit einer Schaltung nach Fig. 12, so wird der Erdmodus nicht angeregt, sondern nur die zwei Leitermodi. Bei der Schaltung nach Fig. 14 werden ebenfalls nur die Leitermodi angeregt aber in einem ganz anderen Verhältnis.

Fig. 15 zeigt die Spannung zwischen Leiter *1* und *2*. Die Leitung war in einer Entfernung von 2,49 km kurzgeschlossen und geerdet. Vergleicht man Fig. 13 mit Fig. 15, so fällt deren Ähnlichkeit auf. Wie nicht anders erwartet, sind die Übertragungseigenschaften für beide Leitermodi innerhalb der Messgenauigkeit gleich. Die verbreiterten Striche auf Fig. 6 sind auf vermehrte äussere Störeinflüsse zurückzuführen.

Die Fig. 16, 17 und 18 wurden ebenfalls mit der Messanordnung nach Fig. 14 aufgenommen. Sämtliche Oszillogramme zeigen die Spannung zwischen Leiter *1* und *3*. Sie sind mit einer Empfindlichkeit von 2 V/Teilung sowie einer Ablenkgeschwindigkeit von 2 µs/Teilung aufgenommen. Weder an den Impulsgeneratoren noch an der Zeitablenkung des Oszillographen wurde eine Einstellung geändert gegenüber den

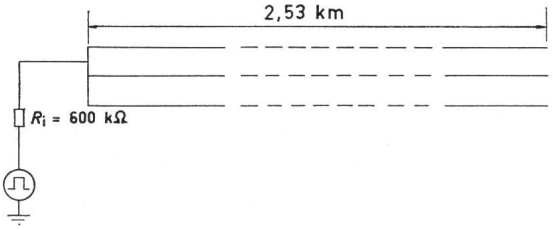


Fig. 19
**Meßschaltung zur Anregung und Beobachtung des Erdmodus**

Oszillogrammen der Fig. 15. D. h. Grösse und Lage des Sendeimpulses stimmen bei diesen Aufnahmen mit Fig. 15 überein.

Die erste Kurve in Fig. 16 ist gestört durch eine Fremdspannung. Der Versuch wurde demzufolge wiederholt (siehe zweite Kurve in Fig. 16). Bei der Aufnahme für das zweite Oszillogramm (zweite Kurve) war die Leitung wie für die vorhergehenden Messungen in einer Entfernung von 2,29 km kurzgeschlossen und geerdet. Der Sendeimpuls erzeugt keine nennenswerte Spannung zwischen Leiter *1* und *3*. Auch das Echo vom Leitungsende ist kaum sichtbar. Dies bestätigt, dass ein vollständiger Kurzschluss über alle drei Leiter keine Umwandlung in andere Wellenmodi erzeugt, und dass die Übertragungseigenschaften für beide Leitermodi höchstens unwesentliche Unterschiede aufweisen.

Bei der Aufnahme der dritten Kurve (Fig. 16) war nur Leiter *2* mit Leiter *3* in einer Entfernung von 2,49 km kurzgeschlossen. Die Leitung war nach 2,53 km durch einen Schalter aufgetrennt. Der unsymmetrische Kurzschluss erzeugt eine Umwandlung der Wellenmodi und verursacht damit ein sichtbares Echo. Da eine Umwandlung der Wellenmodi stattgefunden hat, wird auch das Echo vom offenen Leitungsende sichtbar. Die beiden Echos überdecken sich teilweise.

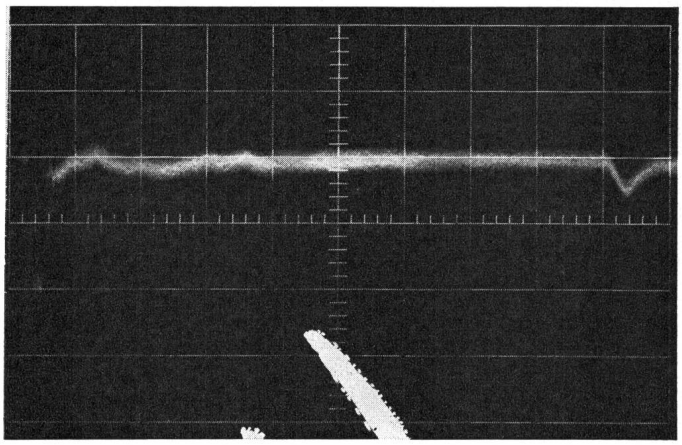

Fig. 20
**Oszillogramm einer Welle im Erdmodus**
Maßstäbe: 2 µs/Teilung, 5 V/Teilung

Die oberste Kurve auf Fig. 17 ist eine Wiederholung der Kurve 3 von Fig. 16.

Für die zweite Kurve (Fig. 17) wurde der Kurzschluss an der Leitung gänzlich entfernt. Diese Aufnahme zeigt, dass auch an einem offenen Leitungsende keine Umwandlungen der Wellenmodi stattfinden.

Bei der dritten Kurve (Fig. 17) wurden Leiter *2* und *3* in ca. 730 m Entfernung kurzgeschlossen. Die Umwandlung der Wellenmodi beim Kurzschluss macht auch wieder das Leitungsende sichtbar. Ausserdem beobachtet man noch ein Echo nach 9 µs. Dieses rührt daher, dass die Leitung an der Speisestelle schlecht angepasst ist. Dadurch erzeugt der Kurzschluss ein zweites Echo.

Für die Aufnahme von Fig. 18 wurde nur Leiter *3* geerdet. Ein Kurzschluss zwischen anderen Leitern bestand nicht. Das Echo das von einem Erdschluss erzeugt wird, ist schwächer als das eines Kurzschlusses, aber immer noch gut sichtbar.

Das Oszillogramm von Fig. 20 wurde aufgenommen um die Übertragungseigenschaften des Erdmodus abzuklären. Es wurde eine Messanordnung gemäss Fig. 19 verwendet. Die Aufnahme zeigt eine starke Einstreuung von Fremdspannungen und eine starke Dämpfung dieses Modus. Dies war zu erwarten.

### *7.4 Kommentar zu den Messungen*

Die beschriebenen Messungen wurden gleich zu Anfang, als diese Arbeit in Angriff genommen wurde, durchgeführt. Sie dienten zur Abklärung, ob der vorgeschlagene Weg überhaupt gangbar ist. Sie haben diesen Zweck ausgezeichnet erfüllt und waren für die weiteren Arbeiten eine wesentliche Grundlage. Es ist verständlich, dass man nach den theoretischen Betrachtungen den Wunsch nach besser gezielten Messungen verspürt. Leider war es aus Zeitgründen bis zum Abschluss dieser Arbeit nicht mehr möglich, eine zweite Messreihe durchzuführen.

**Adresse des Autors:**
*E. Schlatter,* Ingenieur, Bändlistrasse 54, 8048 Zürich.