Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 55 (1964)

Heft: 6

Artikel: Lösung von Überspannungsschutzproblemen durch Anlagemodelle

Autor: Stephanides, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916696

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: 09.08.2025

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

gleichzeitig den Bedürfnissen der Leitungen der Notrufsäulen, Signal- und Autobahnbeleuchtung entsprochen werden kann.

Mit diesen zum Teil bereits recht weitgehenden Massnahmen, zu denen sich vielleicht noch weitere gesellen werden, glauben wir, dem Bedürfnis des Verkehrs mit wirtschaftlichen Mitteln weitgehend entsprochen und uns die Erweiterungsmöglichkeiten für die Zukunft nicht genommen zu haben.

Zum Abschluss seien noch folgende Bemerkungen erlaubt: Autobahnen sind im Vergleich zu Gemischtverkehrsstrassen wesentlich sicherere Anlagen. Wir wollen dies nicht vergessen, auch wenn in der Presse Autobahnunfälle meistens spektakulärer behandelt werden. Wäre es nicht angebracht, in Bezug auf die Strassenbeleuchtung das Wissen der Fachleute, den guten Willen des Publikums und den Franken des Steuerzahlers dort einzusetzen, wo am meisten Nutzen resultiert: bei den Gemischtverkehrsstrassen!

Adresse des Autors:
Jacques Richter, Sektionschef des Eidg. Amtes für Strassen- und Flussbau, Bern.

Lösung von Überspannungsschutzproblemen durch Anlagemodelle

Von *H. Stephanides,* Oberentfelden

621.316.933 : 621.3.001.57

Die Diskussion der Bedingungen des Überspannungsschutzes zeigt, dass die Nachbildung im analogen Anlagemodell gute Möglichkeiten zur Lösung von Überspannungsschutzproblemen bietet. Zur Vermeidung von Verfälschungen müssen in einem solchen Modell die Kettenleiter zur Nachbildung der Leitungen und Kabel sehr eng gestuft werden. Wichtig ist auch die Verwendung einer genau definierten, reproduzierbaren Wellenform und eine gute Nachbildung der Überspannungsableiter. Es wird ein Anlagemodell beschrieben, das diese Anforderungen erfüllt und die exakte Messung aller Überspannungen ermöglicht. Dieses arbeitet mit einer linear ansteigenden Spannungskurve. Oszillogramme zeigen die gute Messgenauigkeit des Modells.

L'examen des conditions du problème de la protection contre les surtensions montre qu'une reproduction dans le modèle analogique des installations offre de bonnes possibilités de solution. Pour éviter des interpolations, il faut que les réseaux récurrents qui reproduisent les lignes et les câbles soient très étroitement échelonnés. Il importe également d'utiliser une forme d'onde exactement définie et reproductible, ainsi qu'une bonne reproduction des parafoudres.

L'auteur décrit un modèle analogique qui satisfait à ces exigences et permet la mesure exacte de toutes les surtensions. Ce modèle fonctionne avec une courbe de tension qui augmente linéairement. Des oscillogrammes montrent la bonne précision de mesure du modèle.

1. Einleitung

Im Gebiete des Überspannungsschutzes von elektrischen Anlagen ist es heute möglich, durch Einsatz verfeinerter Untersuchungsmethoden digitaler und analoger Art sich ein zuverlässiges Bild der Spannungsbeanspruchung einzelner Apparate zu machen. Zweck solcher Untersuchungen ist vor allem die Optimierung des Schutzes, der durch Ableiter erzielt werden kann. Dieses Problem gewinnt immer mehr an Bedeutung infolge der fortschreitenden Reduktion der Prüfspannung der Geräte bestehender Spannungsklasse und der Festlegung relativ niedriger Isolationspegel für die kürzlich eingeführten Höchstspannungen von 525 und 765 kV.

Solange sehr einfache Anlagen betrachtet werden, lässt sich die Schutzwirkung einer Anordnung nach den bekannten rechnerischen und graphischen Methoden [1; 2] [1]) gut überblicken. Sobald jedoch innerhalb der Anlage Kapazitäten oder Induktivitäten den Spannungsverlauf beeinflussen, muss man zur Lösung der Probleme zu komplizierten Hilfsmitteln greifen.

Mit Digitalrechnern kann in Anlehnung an das Bergeronverfahren der Spannungsverlauf in einer Anlage berechnet werden [3], wobei sich durch geeignete Programmierung die meisten Bedingungen nachbilden lassen. Die Resultate bleiben dabei immer genau reproduzierbar und vermitteln wertvolle Erkenntnisse über den Verlauf von Überspannungen. Eine Einschränkung des Anwendungsbereiches ergibt sich jedoch durch die langen Rechenzeiten, da die Aufnahme eines Messpunktes oft eine Stunde benötigen kann. Längere Versuchsreihen werden dadurch oft undurchführbar.

In vorliegendem Bericht wird aus dem obigen Grunde ein analoges Verfahren, das in der Nachbildung der Anlage in einem Anlagemodell besteht, beschrieben. Die gesuchten Spannungskurven können dort augenblicklich am Oszillographenschirm abgelesen werden, was die Arbeit beträchtlich erleichtert. Kleine Abweichungen ergeben sich bei diesen gegenüber den digitalen Berechnungen, da idealisierte Kurven nur näherungsweise nachgebildet werden können und da die Elemente im Modell mit einer Dämpfung behaftet sind. Diese Einflüsse können so klein gehalten werden, dass ihre Wirkung von sekundärer Bedeutung bleibt. Auch die Wellengleichung, deren exakte Lösung die digitalen Rechenmethoden geben, beschreibt nur näherungsweise die tatsächlichen Vorgänge in der Anlage. Eine Reihe von Sekundäreinflüssen wird bei ihrer Ableitung vernachlässigt. Die resultierende Wirkung dieser Einflüsse verursacht meist Fehler, welche diejenigen im analogen Anlagemodell übertreffen.

Da die Abweichungen in beiden Fällen in der gleichen Richtung liegen, ist im analogen Anlagemodell damit die Nachbildung der tatsächlichen Bedingungen sogar meist besser als bei der digitalen Berechnung nach der dämpfungsfreien Wellengleichung.

2. Nachbildung der Leitungen und Kabel

Gegenüber früheren Verwirklichungen ähnlicher Art [4] weist das beschriebene Modell eine flexiblere Anordnung, eine feinere Unterteilung und eine wesentlich gesteigerte Genauigkeit auf. Besondere Bedeutung hat in jedem analogen Modell eine gute Nachbildung der Leitungen und Kabel. Diese enthalten beide kontinuierlich über ihre Länge verteilte Kapazitäten und Induktivitäten, deren Grösse ihr Verhalten bei Wanderwellen bestimmt.

Die direkte Nachbildung mit kontinuierlich verteilten Grössen erfordert einen sehr grossen Aufwand. Einfache Anordnungen erhält man dagegen, wenn die Kapazitäten

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

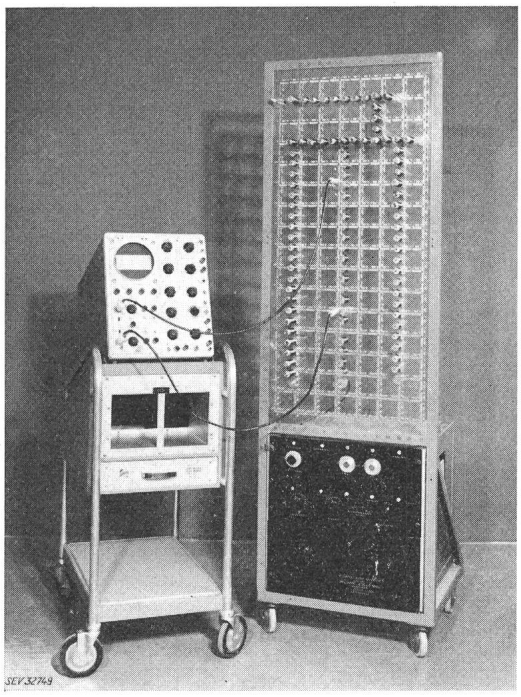

Fig. 1
Ansicht des kompletten Netzmodells

und Induktivitäten einzelner Leitungsstücke zu diskreten Vierpolelementen zusammengefasst werden.

Wie sich theoretisch beweisen lässt, zeigen Ketten gleicher Vierpole ein Verhalten, durch das eine homogene Leitung gut nachgebildet wird. Unterschiede zwischen der Vierpoldarstellung und der kontinuierlichen Leitung zeigen sich erst, wenn die Fourierzerlegung der Spannungskurve sehr hochfrequente Komponenten enthält. Schwingungen mit $f \approx 0{,}2\, f_0$ ergeben bereits starke Phasenfehler und damit Verzerrungen. Bei steigender Frequenz nimmt diese Verzerrung sehr rasch zu. Man erkennt dies deutlich aus den Oszillogrammen in Fig. 2.

Die Grenzfrequenz f_0 ist gleich der Eigenfrequenz eines Halbgliedes:

$$f_0 = \frac{1}{\pi \sqrt{LC}}$$

und ist daher der Länge des durch ein Element abgebildeten Leitungsstückes umgekehrt proportional.

Neben dieser Grenzfrequenz bestimmen auch die Wellenwiderstandswerte das Verhalten der Leitungsnachbildung. Diese lassen sich den Elementen zuordnen und können aus deren Komponenten berechnet werden. Sind die Wellenwiderstände nicht für alle Elemente gleich gross, so führen Teilreflexionen zu zusätzlichen Verfälschungen. Alle Elemente müssen daher exakt auf den gleichen Wellenwiderstand abgestimmt werden. Dazu müssen diese mit ausgesuchten, genau gleich grossen Kondensatoren ausgerüstet werden. Die Induktivität jedes Elementes kann dann nach einer Resonanzmethode mit einem Ferritkern ebenfalls auf einen einheitlichen Wert abgeglichen werden.

Auch die wechselseitige Verkopplung der Elemente verschiedener Leitungsstücke über die elektromagnetischen Streufelder kann die Messergebnisse verfälschen. Dies muss bei der Auslegung der Elemente berücksichtigt werden. Die Spulen nebeneinanderliegender Elemente müssen dazu im entgegengesetzten Sinn gewickelt werden.

Alle Elemente des Anlagemodells entsprechen diesen Forderungen. Ihre Ausführung ist in Fig. 3 gut zu erkennen. Jedes Element bildet eine Leitungslänge von 7,5 m oder eine Kabellänge von 5 m ab.

Wie Fig. 1 und 3 zeigen, werden die einzelnen Elemente in ein Steckbrett mit eingebauten Verbindungen eingesteckt, in dem beliebige Anlagen kombiniert werden können. Zur Ergänzung dienen einzelne Kapazitäten, Induktivitäten und Ohmsche Widerstände. Diese bilden die in der Anlage aufgestellten Geräte nach und werden nach dem Ersatzschaltbild verbunden.

3. Nachbildung der Spannungskurve

Bei der Lösung eines Überspannungsschutzproblems muss auch der Verlauf der in die Anlage einlaufenden Welle richtig nachgebildet werden. Dies muss mit einer idealisierten Spannungskurve geschehen, da sich die tatsächlichen Wellenformen in den Anlagen von Fall zu Fall ändern.

Für Isolationsprüfungen wurden in der Definition der genormten 1|50 Stosswelle nur zwei Parameter festgelegt, welche die Isolationsbeanspruchungen in grober Weise bestimmen.

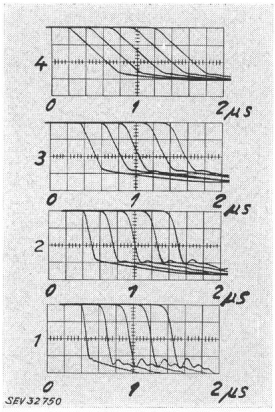

Fig. 2
Die Verzerrung von Spannungsimpulsen verschiedener Anstiegsgeschwindigkeit im Modell an einer Leitungsnachbildung
Von *links* nach *rechts* folgen in jedem Oszillogramm die Spannungskurven an Anzapfungen bei 0, 10, 20, 30 und 40 Elementen
(Laufzeit in einem Element 0,025 µs, Grenzfrequenz der Elemente f_0 = 13,1 MHz)

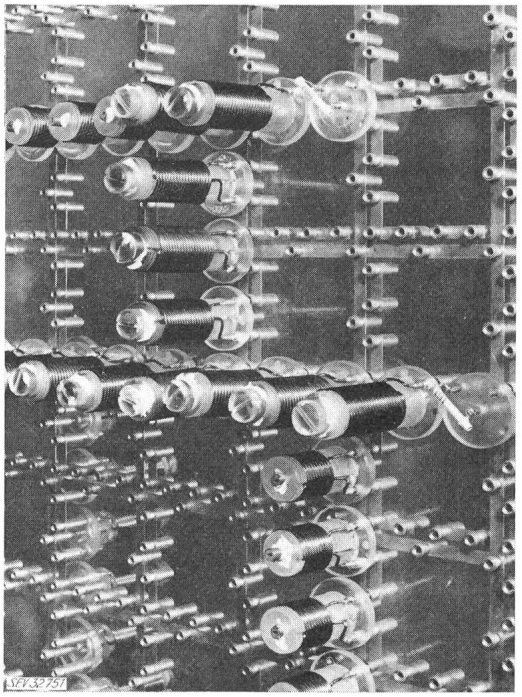

Fig. 3
Teilausschnitt des Steckbrettes mit Elementen zur Nachbildung von Leitungen und Kabeln

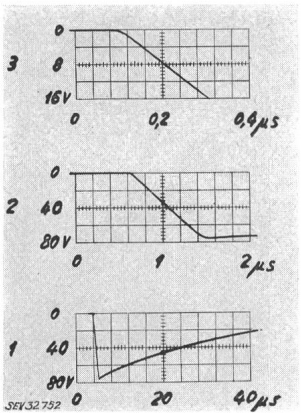

Fig. 4
Verschiedene Ausschnitte aus einer Welle mit linear ansteigender Stirn
aufgenommen an dem mit dem Wellenwiderstand der Leitungsnachbildung belasteten Ausgang des Anpassgliedes

Bei einer Messung der Spannungsverteilung innerhalb einer Anlage reicht diese Definition keineswegs aus, um die Ergebnisse in eindeutiger und reproduzierbarer Form zu kennzeichnen. Der verschiedenartige Verlauf der Wellenfront kann bei gleichbleibender Stirndauer zu einer starken Streuung der gemessenen Spannungswerte führen. Die Wellenform muss daher während ihres ganzen Verlaufs eindeutig bestimmt sein. Eine Welle mit linear ansteigender Front erfüllt in einfachster Weise diese Bedingung. Tatsächlich wird diese meist bei Überspannungsschutzproblemen angenommen [5; 6].

Um eine solche linear ansteigende Spannung tatsächlich zu erzeugen, wurde ein spezieller Stossgenerator entwickelt, der im Anhang näher beschrieben ist. In diesem wird der Spannungsanstieg als Teilstück aus der sinusförmigen Spannungskurve der Eigenschwingung eines Schwingungskreises herausgeschnitten. Dieses weicht nur unwesentlich von einer Geraden ab, wenn es in der Umgebung des Nulldurchganges der Welle liegt. Praktisch kann dies mit dem Wellengenerator realisiert werden, an dessen Belastungskondensator man eine Spannung mit konstanter Anstiegsgeschwindigkeit erhält. Die Zuführung dieser Spannung zum Modell erfolgt über ein kurzes konzentrisches Kabel, das an seinem Ende mit einem Anpassvierpol abgeschlossen ist. Durch geeignete Wahl der Widerstände ist dieser am Ausgang so an den Wellenwiderstand der Leitungselemente angepasst, dass vom Modell zurücklaufende Wellen nicht reflektiert werden. Damit wird eine Welle nachgebildet, die über eine lange Zuleitung in die Anlage einläuft. Fig. 4 zeigt den Verlauf einer solchen Spannungskurve am Ausgang des belasteten Anpassvierpols in verschiedenen Ausschnitten.

4. Nachbildung der Überspannungsableiter

Die Ableiter haben bei allen Überspannungsschutzproblemen eine zentrale Bedeutung. Während die Wellen zur Erde abgeleitet werden, ergibt sich an diesen ein Spannungsabfall, der die Schutzwirkung wesentlich beeinflusst.

Vor dem Ansprechen des Ableiters ist die Zuleitung noch unbelastet und verhält sich wie ein offenes Leitungsende. Nach Zünden des Ableiters wird dieses nach einem kurzen Ausgleichsvorgang mit dem Ableiterwiderstand belastet, an dem sich ein leicht stromabhängiger Spannungsabfall ergibt.

In erster Näherung wird dieses Verhalten durch einen idealen Ableiter nachgebildet, der die Spannung immer auf einen vorgegebenen konstanten Wert senkt. Zenerdioden zeigen ein solches Verhalten und werden daher oft in analogen Nachbildungen als Ableitermodelle verwendet [7]. Ihre hohe Kapazität verfälscht jedoch den Spannungsverlauf vor dem Ansprechen, wie die Spannungskurven 1.1...1.4 in Fig. 6 zeigen. Im Anlagemodell wird daher nach Fig. 5a die Zenerdiode mit einem konstanten Vorstrom belastet. Eine kapazitätsarme Diode in der Anschlussleitung verhindert dessen Abfliessen über die angeschlossene Leitungsnachbildung. Mit diesem Ableitermodell erhält man die Spannungskurven 1.2 und 2.2 in Fig. 6. Man sieht, dass diese nicht mehr durch kapazitive Ladeströme verfälscht werden.

Zur Nachbildung des verzögerten Ansprechens kann zum Ableitermodell nach Fig. 5b ein schneller Schalttransistor

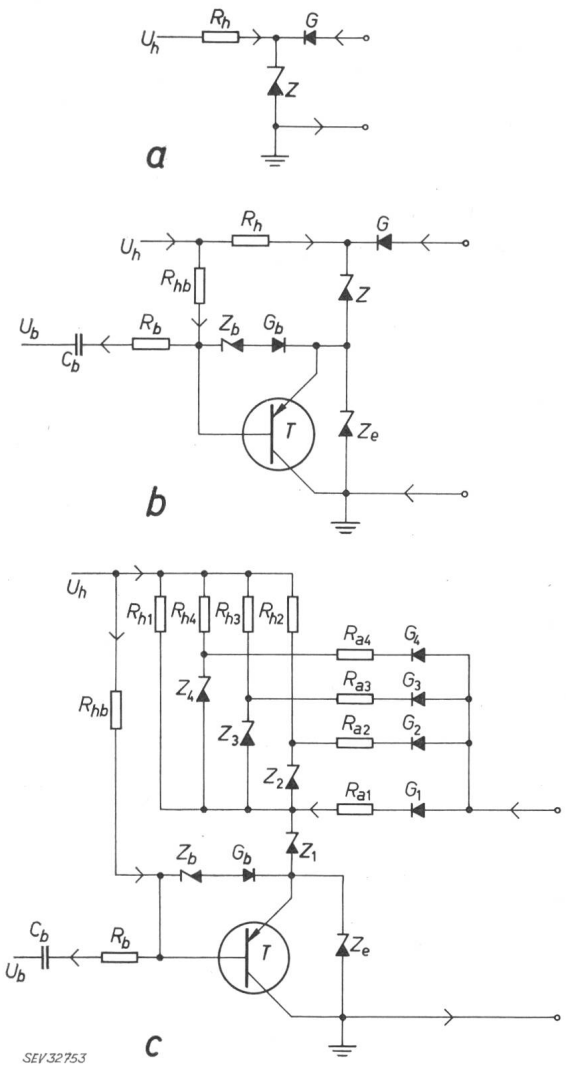

Fig. 5
Verschiedene Modelle zur analogen Nachbildung eines Ableiters
a Modell des idealen Ableiters; *b* Modell eines verzögert ansprechenden Ableiters mit idealer Widerstandscharakteristik; *c* Modell eines Ableiters mit Nachbildung der Ansprechverzögerung und der Widerstandscharakteristik

U_h	Hilfsspannung
$R_h, R_{h1}...R_{h4}$	Widerstände zur Begrenzung des Vorstromes
$G, G_1...G_4$	Gleichrichter zur Trennung vom Modell
$Z, Z_1...Z_4$	Zenerdioden zur Nachbildung der Ableiterrestspannung
$R_{a1}...R_{a4}$	Widerstände zur Nachbildung der Ableitercharakteristik
T	Schalttransistor zur Nachbildung der Ansprechverzögerung
R_{hb}, Z_b, G_b, Z_e	Hilfskreis zur Erzeugung der Basisvorspannung und der Emitterspannung von T
U_b	Steuerspannung zu T
R_b, C_b	*RC*-Glied im Steuerkreis von T

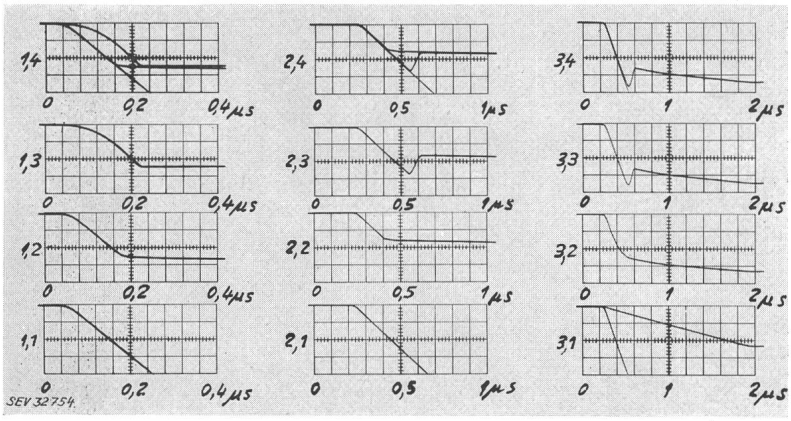

Fig. 6
Senkung einer Welle mit linear ansteigender Stirn durch verschiedene Ableiternachbildungen
1,1 einlaufende Welle; *1,2* Spannung am Ableitermodell Fig. 5a; *1,3* Spannung an einer Zenerdiode; *1,4* Kurven 1,1...1,3 übereinandergeschrieben; *2,1* einlaufende Welle; *2,2* Spannung am Ableitermodell nach Fig. 5a; *2,3* Spannung am Ableitermodell nach Fig. 5b; *2,4* Kurven 2,1...2,3 übereinandergeschrieben; *3,1* einlaufende Welle; *3,2* Spannung am Ableitermodell nach Fig. 5c mit kurzgeschlossenem Schalttransistor (keine Ansprechverzögerung); *3,3* Spannung am Ableitermodell nach Fig. 5c mit Ansprechverzögerung; *3,4* Kurven 3,1 und 3,3 übereinandergeschrieben

in Serie geschaltet werden. Dieser wird im gewünschten Zeitpunkt freigesteuert und bildet das Zünden der Ableiterfunkenstrecken nach [2]). Kurve 2.3 in Fig. 6 zeigt den entsprechenden Spannungsverlauf.

Nach Fig. 5c können auch mehrere Zenerdioden mit vorgeschalteten Seriewiderständen parallel geschaltet werden. Durch geeignete Wahl der Zenerspannungen und der Seriewiderstände kann damit die Strom-Spannungscharakteristik des Ableiterwiderstandes nachgebildet werden. Kurve 3.3 in Fig. 6 zeigt den Verlauf der Begrenzungsspannung bei einer solchen 4-stufigen Nachbildung. Ohne Ansprechverzögerung ergibt sich dafür die Kurve 3.2.

Die Kurven 1.4, 2.4 und 3.4 enthalten übereinandergeschrieben die darunter getrennt gezeigten Oszillogramme. Man sieht aus diesen, dass vor dem Ansprechen die Rückwirkung der Ableitermodelle auf die Wellenform immer vernachlässigbar bleibt.

5. Genauigkeit der Messungen mit dem Anlagemodell

Bei der analogen Nachbildung einer Anlage beeinflussen die Verformungen der Welle in den Leitungsnachbildungen, die Abweichungen von der geforderten idealisierten Wellenform und die Fehler der Messeinrichtung das Messergebnis. Die komplexe Wirkung dieser Einflüsse wurde in der einfachen Schaltung nach Fig. 7, welche der Rechnung leicht zugänglich ist, kontrolliert. Fig. 8 zeigt die zugehörigen Spannungsoszillogramme, in die zu Vergleichszwecken strichliert die berechneten Spannungskurven eingetragen sind. Die Gegenüberstellung zeigt die geringen Abweichungen, welche als Folge der schwachen Dämpfung entstehen.

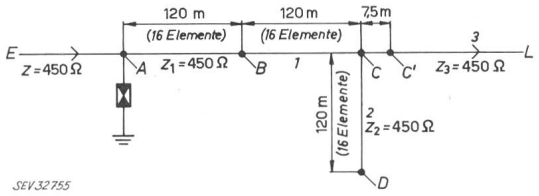

Fig. 7
Schema einer Anlage mit einlaufender Wanderwelle
Die Spannung der Welle wird mit einem idealen Ableiter gesenkt

E	Leitung mit einlaufender Welle (über Anpassglied Fig. 10 an Wellengenerator Fig. 9 angeschlossen)
1, 2, 3	Leitungsstücke
A, B, C, C', D	Messpunkte (siehe Fig. 8)
L	lange abgehende Leitung

[2]) Eine ähnliche Schaltung wurde unabhängig auch im Hochspannungslaboratorium der ETH in Zürich unter der Leitung von Prof. Dr. *K. Berger* von *U. Burger* entwickelt.

Die durch Reflexionen verursachten Spannungsänderungen erhalten etwas verkleinerte Amplituden.

Auch in der Anlage selbst wird die Welle immer gedämpft. Da dort die Dämpfung meist noch stärker ist, stört die im analogen Modell beobachtete leichte Dämpfung nicht und müsste unter Umständen künstlich noch verstärkt werden, um den in der Anlage vorliegenden Bedingungen genau zu entsprechen. Um in der Grössenordnung von 1...2 % auf der sicheren Seite zu liegen, wurde dies bisher jedoch unterlassen.

6. Anhang

Schaltung zur Erzeugung einer linear ansteigenden Welle

Zur Erzeugung einer Spannung mit konstanter Anstiegsgeschwindigkeit am Kondensator C_2 muss über diesen während eines Zeitintervalls ein konstanter Strom I_s fliessen. In der Schaltung nach Fig. 9 bleibt die Stromstärke näherungsweise konstant, wenn die Induktivität L_s genügend gross ist und der Spannungsabfall zwischen deren Anschlüssen klein bleibt. Die Spannungskurve bildet dann einen Ausschnitt aus einer Sinuskurve, der bei geeigneter Dimensionierung der Elemente und bei richtiger Wahl des Zündzeitpunktes des Thyratrons S_2 in der Umgebung des Nulldurchganges liegt.

Bei gesperrten Thyratrons ist vor Beginn des Stossvorganges der Kondensator C_s auf eine positive Gleichspannung $U_s = U_{s0}$ aufgeladen. Nach Zündung des Thyratrons S_1 entladet sich dieser, wobei der Strom in der Induktivität L_s einen Teil seiner Ladeenergie übernimmt.

Wird darauf das Thyratron S_2 gezündet, so löscht der Strom in S_1, da die Spannung U_t am Verzweigungspunkt sinkt und kleiner als die Spannung U_1 am Kondensator C_1 wird. Der Strom I_s ladet dann den Kondensator C_2 und er-

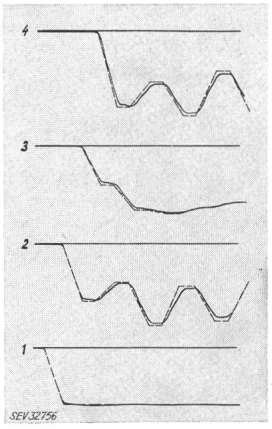

Fig. 8
An verschiedenen Punkten an der nachgebildeten Anlage nach Fig. 7 aufgenommene Spannungskurven
In die Oszillogramme sind die berechneten Spannungskurven strichliert eingezeichnet
1 Spannung am Punkt *A* (am Ableiter); *2* Spannung am Punkt *B*; *3* Spannung am Punkt *C'* (in der abgehenden Leitung); *4* Spannung am Punkt *D* (am offenen Leitungsende)

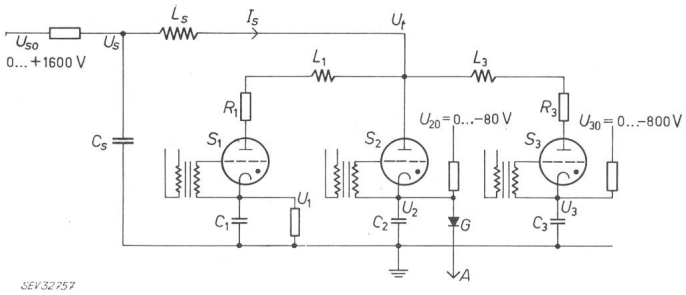

Fig. 9

Schaltung zur Erzeugung linear ansteigender Spannungsimpulse

Erläuterung siehe im Text

zeugt an diesem einen Spannungsanstieg mit konstanter Anstiegsgeschwindigkeit. Dieser endet bei Zündung des Thyratrons S_3, da danach die Spannung U_t am Verzweigungspunkt kleiner als die Spannung U_2 wird.

Zur Unterdrückung des Einschwingvorganges bei der Zündung von S_2 wird der Kondensator C_2 vor Beginn der Stosswelle auf eine kleine negative Vorspannung U_{20} aufgeladen und durch einen Gleichrichter G gegen den Ausgang hin abgeriegelt. Am Ausgang ergibt sich erst dann ein Spannungsanstieg, wenn der Strom I_s die ursprüngliche negative Ladung kompensiert hat. Der Ausgleichsvorgang ist dann bereits abgeklungen.

Zur Beschleunigung der Umschaltung am Ende des Spannungsanstieges kann auch der Kondensator C_3 auf eine Vorspannung $U_3 = U_{30}$ aufgeladen werden. Die Spannung U_t wird dann bei der Zündung von S_3 rascher gesenkt. Induktivitäten L_1, L_3 und Widerstände R_1, R_3 unterdrücken in den Schaltphasen störende Ausgleichsschwingungen.

Als Schaltthyratrons S_1, S_2 und S_3 wurden Wasserstoffthyratrons Philips 3 C 45 verwendet. Zur Vermeidung von Störungen mussten diese über Impulstransformatoren gezündet werden.

Die so erzeugte Spannung muss vom Ausgang A des Generators möglichst unverfälscht zum Eingang des Modells geleitet werden. Dies erfolgt durch ein kurzes verlustarmes Koaxialkabel. Dieses ist über einen Anpasswiderstand am Ausgang A angeschlossen und an seinem Ende durch den Vierpol Fig. 10 mit der nachgebildeten Anlage verbunden. Für rasche Vorgänge, deren Dauer die Grössenordnung der Laufzeit im Kabel hat, wirkt der Kondensator C_a darin als Kurzschluss und das Kabel ist daher durch R_a mit seinem Wellenwiderstand abgeschlossen. Für langsam veränderliche Vorgänge verhindert dagegen C_a eine rasche Entladung des

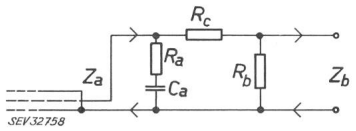

Fig. 10

Anpassglied zum Anschluss des Wellengenerators an das Netzmodell

Z_a	Generatorseitiger Eingang. Mit kurzem konzentrischem Kabel des Wellenwiderstandes Z_a an den Ausgang A des Wellengenerators Fig. 9 angeschlossen.
Z_b	Anschluss an das Analogmodell. Eine über eine lange Leitung des Wellenwiderstandes Z_b einlaufende Welle wird nachgebildet.
R_a, R_b, R_c	Anpasswiderstände.
C_a	Hilfskondensator zur Abtrennung von R_a bei konstant bleibender Spannung.

Kondensators C_2 über den niederohmigen Widerstand R_a. Es können dadurch auch Wellen mit längeren Rückenhalbwertzeiten erzeugt werden.

Fig. 4 zeigt den Spannungsverlauf an dem mit dem Wellenwiderstand der Leiterelemente belasteten Anschluss Z_b des Anpassvierpols. Man erkennt darin die Exaktheit der Nachbildung der linear ansteigenden Wellenfront.

7. Zusammenfassung

Die knappe Isolation von modernen Hoch- und Höchstspannungsanlagen erfordert eine verfeinerte Überprüfung der Auswirkungen von Überspannungswellen. Mit Hilfe des beschriebenen analogen Anlagemodelles kann der zeitliche Verlauf von Überspannungsvorgängen in jedem Punkt abgelesen werden, weshalb die Messungen rasch einen Überblick über alle kritischen Stellen geben. Die im Modell gemessenen Spannungen entsprechen dabei mit guter Genauigkeit den tatsächlichen in der Anlage auftretenden Werten.

Alle Leitungen und Kabel werden durch Vierpolketten nachgebildet, in denen sich die Wellen wie in homogenen Leitern fortpflanzen. Da die Ketten sehr eng gestuft sind, bleiben die Verzerrungen dabei klein. Ausschlaggebend für die Güte des Modelles ist die genaue Abstimmung der Elemente und die Unterdrückung von Längs- und Querkopplung.

Reproduzierbare Messergebnisse werden mit einer Stosswelle von genau definierter Kurvenform erhalten. Diese wird von einem speziell entwickelten Repetitionsstossgenerator erzeugt, der eine Stosswelle mit linearem Stirnanstieg liefert.

Auch die spezielle Charakteristik der Überspannungsableiter wird mit einigen Kunstgriffen nachgebildet. Es werden dabei die Ansprechverzögerungen der Ableiterfunkenstrekken und die Spannungsabhängigkeit des Ableiterswiderstandes berücksichtigt. Es können damit im analogen Modell alle Anlagen nachgebildet werden und quantitative Angaben über die Schutzwirkung der Ableiter gemacht werden.

Es sei an dieser Stelle *A. W. Roth* und Dr. *J. Amsler* für die grundsätzlichen Anregungen und Dr. *R. Schaltenbrand* für die ersten Berechnungen und Ausführungen gedankt.

Literatur

[1] *Bewley, I. V.:* Traveling Waves on Transmission Systems. AIEE — Transact. (1931), S. 532...560.

[2] *Prinz, H., Zaengl, W., Völker, O.:* Das Bergeronverfahren zur Lösung von Wanderwellenaufgaben. Bull. SEV 53(1962)16, S. 725...739.

[3] *Frey, W., Althammer, P.:* Die Berechnung von elektromagnetischen Ausgleichsvorgängen auf Leitungen mit Hilfe eines Digitalrechners. BBC. Mitt. 48(1961), S. 344...355.

[4] *Clayton, J. M., Young, F. S.:* Application of Arresters for Lightning Protection of Multilines Substations. AIEE-Transact. P III. (Power App. a. Syst.) 79(1960), Aug. S. 566...575.

[5] AIEE Committee-Report. «A Method of Estimating Lightning Performance of Transmission Lines.» AIEE Transact. P II, 56 (1950), S. 1187...1196.

[6] *Christoffel, M., Fischer, E., Hosemann, G.:* Überspannungsschutz von Transformatoren mit direkt eingeführtem Kabel bei Blitzeinschlag in die vorgelagerte Freileitung. ETZ — A, 83(1962) 23, S. 761...772.

[7] *Breuer, G. D., Hopkinson, R. H., Johnson, I. B., Schultz, A. J.:* Arrester Protection of High-Voltage Stations Against Lightning. AIEE-Transact. P. III. (Power App. a. Syst.) 79(1960), Aug. S. 414...423.

Adresse des Autors:
Dr. *H. Stephanides,* Hochspannungsfabrik der Sprecher & Schuh AG, Oberentfelden (AG).