Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 51 (1960)

Heft: 4

Rubrik: Regeln für Überspannungsableiter

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: 15.07.2025

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

Regeln für Überspannungsableiter

Der Vorstand des SEV veröffentlicht im folgenden den Entwurf zu Regeln für Überspannungsableiter. Der Entwurf wurde vom Fachkollegium 37 des CES, Überspannungsableiter, ausgearbeitet und vom Schweizerischen Elektrotechnischen Komitee (CES) genehmigt.

Der Vorstand lädt die Mitglieder ein, den Entwurf zu prüfen und Bemerkungen dazu bis *spätestens Samstag, den 19. März 1960, in doppelter Ausfertigung,* dem Sekretariat des SEV, Seefeldstrasse 301, Zürich 8, einzureichen. Sollten keine Bemerkungen eingehen, so würde der Vorstand annehmen, die Mitglieder seien mit dem Entwurf einverstanden. Er würde dann auf Grund der ihm von der 75. Generalversammlung (1959) erteilten Vollmacht über die Inkraftsetzung beschliessen.

Entwurf

Regeln für Überspannungsableiter

1 Grundlagen

Die vorliegenden Regeln stützen sich auf die Verordnung des Bundesrates über die Erstellung, den Betrieb und den Unterhalt von elektrischen Starkstromanlagen vom 7. Juli 1933 (Starkstromverordnung) samt den bisher zu dieser Verordnung erschienenen Änderungen und Ergänzungen.

2 Gültigkeit

2.1 Geltungsbeginn

Diese Regeln wurden vom Vorstand des SEV am .... genehmigt. Sie treten am ..... in Kraft.

2.2 Geltungsbereich

Diese Regeln gelten für die Prüfung und Bewertung von Überspannungsableitern mit Funkenstrecken und spannungsabhängigen Widerständen für die in Ziff. **2.3** aufgeführten normalen Betriebsbedingungen.

2.3 Normale Betriebsbedingungen

Ableiter, die den vorliegenden Regeln entsprechen, sind für die folgenden normalen Betriebsbedingungen geeignet:

a) Umgebungstemperatur nicht über + 40 °C

b) Höhenlage des Aufstellungsortes nicht über 1000 m ü. M.

c) Betriebsfrequenz zwischen 48...62 Hz

d) Betriebsfrequente Spannung zwischen den Ableiterklemmen nicht höher als die Nennspannung des Ableiters

e) Isolation der Anlage gemäss Publ. 0183 des SEV, Regeln und Leitsätze für die Koordination der Isolation in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen

f) Der Aufstellungsort oder ein allfälliger Lagerort soll frei sein von anormalen physikalischen oder chemischen Einflüssen, insbesondere darf er keine der nachfolgenden anormalen Bedingungen aufweisen:

— korrosionsaktive oder explosible Gemische von Gasen und Dämpfen;

— übermässige Verunreinigung durch Rauch, Staub, Salz oder andere leitende Substanzen;

— anormale Vibrationen oder mechanische Schläge

g) Wenn im Netz Schalt- oder Erdschlussüberspannungen auftreten, die die Ansprechspannung der Ableiter erreichen und damit die Ableiter zum Ansprechen bringen, so dürfen die dabei zur Entladung kommenden Ladungsmengen nicht grösser sein als die beim Typenversuch vom Ableiter abgeleitete Ladung. Im Minimum ist dies die Ladung eines Rechteckstosses mit den in Kol. 3 und 4 von Tabelle I angegebenen Nenndaten (bei schwingenden Entladungen sind die Ladungsmengen der positiven und negativen Halbwellen stets mit dem gleichen Vorzeichen zu rechnen).

Bemerkung: Wo Ableiter unter anderen als den hier aufgeführten Betriebsbedingungen verwendet werden sollen, müssen damit zusammenhängende Anforderungen von Fall zu Fall aufgestellt und evtl. entsprechend modifizierte Prüfungen zwischen Hersteller und Besteller vereinbart werden. Wird ein Ableiter, der diesen Regeln entspricht, in einer 1000 m übersteigenen Höhenlage eingesetzt, so kann er die Anlage nur dann schützen, wenn deren Luftisolation hoch genug bemessen ist, um auch bei der betreffenden Höhenlage die von den Koordinationsregeln, Publ. 0183 des SEV, verlangte Stossprüfung auszuhalten. Soll eine Anlage geschützt werden, deren Isolation den Koordinationsregeln nicht entspricht, so muss ein Spezialableiter mit reduzierter Ansprech- und Restspannung vorgesehen werden. Auf keinen Fall darf ein Ableiter mit ungenügender Nennspannung verwendet werden.

Genormte Werte der Nennspannung für Hochspannungsableiter

Tabelle 1

	3,6	**7,2**	9	*12*	15	**17,5**	20
Nennspannung	**24**	30	**36**	40	**52**	60	**72,5**
kV	80	90	97	**106**	**123**	130	**148**
	160	**170**	184	196	**208**	**245**	**340**

Bemerkung: Die fett gedruckten Werte sind auch in Tabelle I enthalten; es sind dies die den genormten Nennspannungen der Netze nach Publ. Nr. 0159 bei voller und reduzierter Isolation entsprechenden Ableiter-Nennspannungen.

3 Begriffsbestimmungen

3.1 Begriffsbestimmungen für Stoßspannungen und Stoßströme

3.1.1 Die *Stoßspannung bzw. der Stoßstrom* ist eine Spannung bzw. ein Strom einheitlicher Polarität von einem zeitlichen Verlauf, der ohne wesentliche Schwingungen rasch auf einen Höchstwert ansteigt und hernach im allgemeinen weniger rasch auf Null absinkt. Die Bestimmungsgrössen einer Stoßspannung bzw. eines Stoßstromes sind: a) Polarität; b) Scheitelwert; c) Frontdauer; d) Stossdauer.

3.1.2 Die *Front* ist der ansteigende Teil im zeitlichen Verlauf der Stoßspannung oder des Stoßstromes.

3.1.3 Der *Rücken* ist der abfallende Teil im zeitlichen Verlauf der Stoßspannung oder des Stoßstromes.

3.1.4 Die *volle Stoßspannung* ist eine Stoßspannung, die nicht durch Durchschläge, Überschläge oder durch das Ansprechen einer Funkenstrecke unterbrochen ist.

3.1.5 Die *abgeschnittene Stoßspannung* ist eine Stoßspannung, die in irgendeinem Zeitpunkt der entsprechenden vollständigen Stoßspannung durch Durchschlag, Überschlag oder durch das Ansprechen einer Funkenstrecke plötzlich zusammenbricht.

3.1.6 Der *Scheitelwert* ist der Höchstwert der Spannung oder des Stromes. Er dient als Mass für die Höhe der Stossspannung oder des Stoßstromes. Sind im zeitlichen Verlauf der Stoßspannung oder des Stoßstromes kleine Schwingungen höherer Frequenz enthalten, so wird der Scheitelwert an der ausgeglichenen, von der überlagerten Schwingung befreiten Kurve gemessen.

Bemerkung: Bei in der Front abgeschnittenen Stoßspannungen ist der Scheitelwert der höchste Spannungswert, der vor dem Zusammenbruch erreicht wird, und nicht etwa der Scheitelwert des entsprechenden vollen Stosses.

3.1.7 Die *Frontdauer* ist die Dauer des Spannungs- bzw. Stromanstieges von Null bis zum Scheitelwert auf einer Verbindungsgeraden der folgenden zwei Frontpunkte im linearen Spannungs-Zeit- bzw. Strom-Zeit-Diagramm:

a) Bei Stoßspannung: Frontpunkte mit 30 % und 90 % des Scheitelwertes;

b) Bei Stoßstrom: Frontpunkte mit 10 % und 90 % des Scheitelwertes.

3.1.8 Die *Frontsteilheit* ist die Neigung der die Frontdauer definierenden Geraden gegen die Zeitaxe.

3.1.9 Der *konventionelle Beginn* der Stoßspannung oder des Stoßstromes ist der durch den Schnittpunkt der die Frontdauer definierenden Geraden mit der Zeitaxe bestimmte Zeitpunkt.

3.1.10 Die *Stossdauer* ist die Dauer der Stoßspannung oder des Stoßstromes vom konventionellen Beginn bis zum Moment, wo die Spannung oder der Strom auf die Hälfte des Scheitelwertes abgenommen hat.

3.1.11 Der *Stoss T_f/T* ist eine Stoßspannung oder ein Stoßstrom mit der Frontdauer von T_f µs und der Stossdauer von T µs.

3.1.12 Der *Rechteckstoss* ist eine Stoßspannung oder ein Stoßstrom mit einem zeitlichen Verlauf, der rasch auf den Scheitelwert ansteigt, dort während einer bestimmten Zeit annähernd konstant bleibt und dann wieder rasch auf Null abfällt. Die Bestimmungsgrössen eines Rechteckstosses sind: a) Polarität; b) Scheitelwert; c) Dauer des Rechteckstosses.

3.1.13 Die *Dauer des Rechteckstosses* ist die Zeit während der die Spannung oder der Strom grösser als 90 % des Scheitelwertes ist.

3.1.14 Die *genormte Stoßspannung* zur Prüfung von Überspannungsableitern ist ein Stoss 1|50 mit den folgenden Toleranzen:

± 50 % für die Frontdauer von 1 µs;
± 20 % für die Stossdauer von 50 µs.

Im Spannungsverlauf enthaltene Schwingungen dürfen keine grössere Amplitude aufweisen als:

± 10 % des Scheitelwertes in der Front;
± 5 % des Scheitelwertes in der Umgebung des Scheitels.

3.1.15 Die *genormten Stoßströme* zur Prüfung von Überspannungs-Ableitern sind der Stoss 8|20, der Stoss 4|10 und der Rechteckstoss mit vom Ableitertyp abhängiger Dauer (gemäss Tabelle I, Kolonne 4). Dabei gelten die folgenden Toleranzen:

± 10 % für die Frontdauer und für die Stossdauer der Stoßströme 8|20 und 4|10;
+ 20 % / — 0 % für die Dauer der Rechteckstösse.

Für den Rechteckstoss gelten noch die folgenden Bedingungen:

a) Allfällige überlagerte Schwingungen dürfen keine grössere Amplitude aufweisen als 5 % des Scheitelwertes;

b) Die Dauer während der der Strom grösser als 10 % des Scheitelwertes ist, darf höchstens 150 % des in Tabelle IV angegebenen Wertes für die Dauer des Rechteckstosses betragen.

3.2 Begriffsbestimmungen für Überspannungsableiter und Ansprechregistrierapparate

3.2.1 Der *Überspannungsableiter* (Ableiter) ist ein Schutzapparat, der insbesondere zwischen einen spannungsführenden Leiter und Erde geschaltet wird, mit dem Zweck, Überspannungen atmosphärischen Ursprungs, unter Umständen auch durch Schaltvorgänge und andere Änderungen im Stromkreis verursachte Überspannungen, auf ungefährliche Werte zu begrenzen. Die dazu im Ableiter entstehende leitende Verbindung wird nachher von diesem selbsttätig wieder unterbrochen.

Bemerkung: Eine Schutzfunkenstrecke z. B. fällt nicht unter den Begriff «Ableiter», da sie, solange sie unter Betriebspannung steht, im allgemeinen nicht in der Lage ist, den durch ihr Ansprechen eingeleiteten Erdschluss- oder Kurzschlußstrom zu unterbrechen.

3.2.2 Der *Ableiter mit Funkenstrecke und spannungsabhängigem Widerstand* ist ein Ableiter, bei dem eine oder mehrere Funkenstrecken (im folgenden als Ableiter-Funkenstrecken bezeichnet) mit einem oder mehreren spannungsabhängigen Widerständen (im folgenden als Ableiter-Widerstände bezeichnet) in Serie geschaltet sind.

Bemerkung: Die Funkenstrecke leitet den Stromdurchgang ein, sobald die Überspannung an den Ableiterklemmen eine bestimmte Höhe erreicht hat. Nach dem Durchgang des Stossstromes bewirkt sie die Unterbrechung des unter dem Einfluss der Betriebspannung nachfliessenden Stromes. Der spannungsabhängige Widerstand hat beim Durchgang eines grossen Stossstromes einen kleinen Widerstandswert, damit die Spannung an den Ableiterklemmen begrenzt bleibt und bei der Betriebspannung einen grossen Widerstandswert, der den Nachstrom Ziff. 3.2.19 begrenzt und dessen Unterbrechung durch die Funkenstrecke ermöglicht.

3.2.3 *Luftdicht gekapselte Ableiter* sind Ableiter, bei denen der ganze aktive Teil oder die Funkenstrecke allein so eingeschlossen ist, dass die für die Ansprechspannung massgebende Luftdichte zwischen den Elektroden der Funkenstrecke von dem ausserhalb des Ableiters herrschenden Luftdruck dauernd unabhängig ist.

3.2.4 *Nicht luftdichtgekapselte Ableiter* sind solche Ableiter, bei denen der für die Ansprechspannung massgebende Luftdruck zwischen den Elektroden der Funkenstrecke den Schwankungen der äussern Atmosphäre jederzeit folgt.

3.2.5 Ein *Teil-Ableiter* ist ein Teil eines Ableiters, der, in einem Gehäuse eingeschlossen, Funkenstrecken und Widerstände im gleichen Verhältnis enthält wie der vollständige Ableiter.

3.2.6 Ein *Ableiterelement* ist ein Teil-Ableiter im Sinne von Ziff. 3.2.5 falls er eine serienmässig fabrizierte Einheit ist, die einen Ableiter kleinerer Nennspannung darstellt und durch Serieschaltung mit anderen gleichen oder nur durch die Nennspannung sich unterscheidenden Elementen den Aufbau eines Ableiters höherer Nennspannung gestattet.

3.2.7 Die *Nennspannung* eines Ableiters ist der Effektivwert der höchsten Spannung von Industriefrequenz, die an die Ableiterklemmen angelegt werden darf.

Bemerkung: Diese Definition gilt nur für Hochspannungsableiter. Bei Niederspannungsableitern darf gemäss Publ. 0159 des SEV, Genormte Werte der Spannungen, Frequenzen und Ströme für elektrische Netze und für elektrisches Material, die Betriebspannung bis zu 10 % höher sein als die Nennspannung.

3.2.8 Die *Ansprechspannung bei Industriefrequenz* ist der Effektivwert der tiefsten Spannung von Industriefrequenz, die, am Ableiter angelegt, das Ansprechen aller in Serie geschalteten Ableiterfunkenstrecken bewirkt. Bei nicht luftdicht gekapselten Ableitern hängt die Ansprechspannung von der Luftdichte und Luftfeuchtigkeit ab.

3.2.9 Die *Ansprechspannung bei Stoss* ist der Höchstwert der vor dem Ansprechen der Ableiterfunkenstrecken am Ableiter auftretenden Spannung. Bei nicht luftdicht gekapselten Ableitern ist die Ansprechspannung bei Stoss von der Luftdichte und Luftfeuchtigkeit abhängig.

Bemerkung: In der Ansprechspannung des Ableiters erscheint in Addition zur Ansprechspannung der Funkenstrecke auch der Spannungsabfall, den der vor ihrem Ansprechen durch die Funkenstreckenkapazität oder allfällige Steuerelemente fliessende Strom in den spannungsabhängigen Ableiterwiderständen erzeugt. Im allgemeinen fällt beim Ansprechen der Funkenstrecke die Spannung am Ableiter momentan ab (Fig. 1). Es können aber auch Fälle vorkommen, wo infolge der Trägheit der Ableiter-Widerstände der Spannungsabfall etwas verzögert eintritt, die Spannung also nach dem Ansprechen der Funkenstrecke erst noch etwas ansteigt. In solchen Fällen gilt als Ansprechspannung die höchste in der Umgebung des Ansprechmomentes auftretende Spannungsspitze.

3.2.10 Die *Ansprechzeit bei Stoss* ist die Zeit vom konventionellen Beginn der Stoßspannung bis zum Ansprechen der Ableiter-Funkenstrecken.

3.2.11 Die *100-%-Ansprechstoßspannung* ist die kleinste Stoßspannung einer bestimmten Stossform, die, an den Ableiter angelegt, jedesmal zum Ansprechen der Ableiter-Funkenstrecke führt.

3.2.12 Die *Frontansprechspannung* ist der Höchstwert der Ansprechspannung, die beim Ansprechen in der Front einer Stoßspannung von bestimmter Form und Höhe gemessen wird.

3.2.13 Die *Ansprechcharakteristik* ist die graphische Darstellung der Ansprechspannung in Funktion der Ansprechzeit bei Anwendung von Stoßspannungen mit verschiedener Höhe, aber gleicher Polarität und Stossform. Für das Ansprechen in der Front sind allein Frontsteilheit und Polarität massgebend.

3.2.14 Der *Ableitstrom* ist der Stoßstrom, der nach dem Ansprechen des Ableiters durch den letztern fliesst.

3.2.15 Die *Restspannung* ist der durch den Ableiterwiderstand bedingte Scheitelwert Ziff. 3.1.6 der an Ableiter beim Durchfliessen eines Ableitstromes auftretenden Stossspannung. Sie hängt von der Höhe und Frontsteilheit des Ableitstromes ab.

Bemerkung: In Fig. 1 ist für einen typischen Fall der zeitliche Verlauf des Ableitstromes und der Spannung am Ableiter dargestellt. Daraus sind die der Ansprechspannung und der Restspannung entsprechenden Maxima des Spannungsverlaufes ersichtlich.

3.2.16 Die *Spannung-Strom-Charakteristik* ist die graphische Darstellung der Spannung am Ableiter oder an einem Ableiterwiderstand in Funktion des Ableitstromes (Momentanwert) während ein und desselben Stosses.

Bemerkung: Fig. 2 zeigt ein Beispiel dieser Charakteristik.

3.2.17 Die *Restspannung-Strom-Charakteristik* ist die graphische Darstellung der Restspannung in Funktion des Stossstromes (Scheitelwert) beim Durchfliessen verschieden hoher Ableitströme bestimmter Form.

3.2.18 Der *Nennableitstrom* ist der grösste Ableitstrom 8|20, für den der Ableiter die im Kapitel 4 formulierten Anforderungen erfüllt. — Genormte Werte des Nennableitstromes sind:

10 000, 5000 und 2500 A

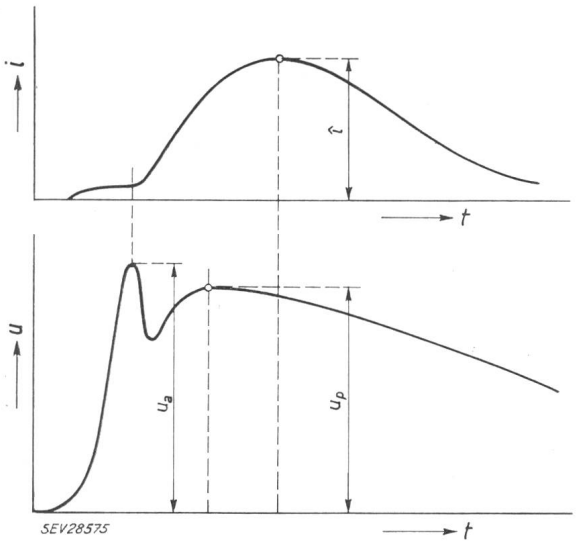

Fig. 1

Beispiel für den Verlauf der Spannung an den Ableiterklemmen beim Durchgang eines Ableitstromes

$\hat{\imath}$ Strom-Scheitelwert
u_a Ansprechspannung
u_p Restspannung

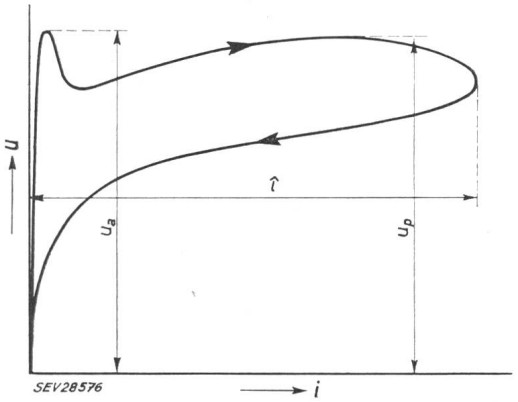

Fig. 2

Beispiel für die Strom-Spannungs-Charakteristik eines Ableiters

$\hat{\imath}$ Strom-Scheitelwert
u_a Ansprechspannung
u_p Restspannung

3.2.19 Der *Nachstrom* ist der nach dem Durchfliessen des Ableitstromes unter dem Einfluss der Betriebspannung bis zum Löschen des Lichtbogens in der Funkenstrecke nachfliessende Strom.

3.2.20 *Ansprechregistrierapparate* sind Apparate, die in die Leitung zwischen Ableiter und Erde geschaltet werden zum Zählen oder anderweitigem Registrieren des Ansprechens von Ableitern. Sie können entweder auf den durchfliessenden Ableitstrom oder den Nachstrom oder beides reagieren.

4 Anforderungen

4.1 Allgemeines

Die wesentlichen Anforderungen, die an den Ableiter gestellt werden, sind:

a) Einwandfreier Schutz der Anlagen-Isolation

b) Betriebssicherheit des dauernd unter Betriebspannung stehenden Ableiters

c) Konstanz der elektrischen Eigenschaften des Ableiters unter den normalen Betriebsbedingungen (Ziff. **2.3**).

Damit der Ableiter die Anlageisolation einwandfrei zu schützen vermag, darf seine Ansprech- und Restspannung gewisse Grenzwerte nicht übersteigen, die von der Haltespannung der Isolation abhängen und in den Koordinationsregeln, Publ. 0183 des SEV, festgelegt sind. Da die Restspannung vom Ableitstrom abhängt, werden ihre Maximalwerte für den Durchgang des Nennableitstromes festgelegt. Dies ergibt die unter Ziff. **4.2...4.5** formulierten Anforderungen bezüglich Schutzwirkung.

Die Funktionssicherheit unter Betriebsspannung wird im wesentlichen durch die unter Ziff. **4.7** formulierte Bedingung bestimmt. Damit der Ableiter nicht zu häufig und vor allem nicht unter Bedingungen anspricht, die zu einer Überlastung führen könnten, wird unter Ziff. **4.8** noch gefordert, dass die 50-Hz-Ansprechspannung einen minimalen Wert nicht unterschreitet. Im weitern ist natürlich zu verlangen, dass der Ableiter die auftretenden Ableitströme ohne Schaden führen kann und den atmosphärischen Bedingungen des Aufstellungsortes gewachsen ist.

4.2 100-%-Ansprechstoßspannung

Die 100-%-Ansprechstoßspannung bei Stoss 1|50 des luftdicht gekapselten Ableiters, bzw. die auf normale Luftdichte reduzierte Ansprechstoßspannung des nicht luftdicht gekapselten Ableiters, darf den in Kolonne 4 der Tabellen II und III angegebenen Wert nicht übersteigen. Der Nachweis geschieht durch die unter Ziff. **5.3** beschriebene Kontrolle.

Höchstwerte der Ansprech- und Restspannungen für Hochspannungsableiter

Tabelle II

Kolonne 1	2	3	4	5
Nennspannung des Ableiters U_n	Höchste Betriebspannung des Netzes		Höchstwerte der Restspannung beim Nennableitstrom und der 100-%-Ansprechstoßspannung	Frontsteilheit für die Messung der Frontansprechspannung bei steiler Front (Ziff. **5.5**)
	bei nicht wirksam geerdetem Nullpunkt	bei wirksam geerdetem Nullpunkt		
kV	kV	kV	kV	kV/µs
3,6	3,6		26	30
(7,2)	(7,2)		(38)	(60)
12	12		55	100
17,5	17,5		75	146
24	24		95	200
36	36		125	300
52	52		185	433
72,5	72,5		245	604
106		123	355	884
123	123		410	1020
148		170	490	1200
170	170		560	1200
208		245	680	1200
245	245	(300)	800	1200
340		420	1100	1200

Bemerkungen: Für Zwischenwerte der Ableiternennspannung sind die Werte der Kolonne 4 linear zu interpolieren.

Die Werte der Kolonne 5 sind für Nennspannungen bis 144 kV gleich $\frac{10}{1{,}2} \cdot U_n$, für höhere Nennspannungen gleich 1200 kV/µs.

Höchstwerte der Ansprech- und Restspannungen für Niederspannungsableiter

Tabelle III

Kolonne 1	2/3	4	5
Nennspannung des Ableiters	Höchste Betriebspannung des Netzes	Höchstwerte der Restspannung beim Nennableitstrom und der 100%-Ansprechstoßspannung	Frontsteilheit für die Messung der Frontansprechspannung bei steiler Front (Ziff. **5.5**)
V	V	kV	kV/µs
380	418	2	10
500	550	2,8	10
1000	1100	5	10

Bemerkung: Die Definition der Nennspannung gemäss Ziff. **3.7** gilt nur für Hochspannungsableiter. Für Niederspannungsmaterial darf gemäss Publ. Nr. 0159 des SEV die Betriebspannung die Nennspannung um 10 % übersteigen. Der Löschversuch gemäss Ziff. **5.7** muss bei der höchsten Betriebspannung des Netzes (Kolonne 2/3) durchgeführt werden.

4.3 Frontansprechspannung bei steiler Front

Die Frontansprechspannung des luftdicht gekapselten Ableiters, bzw. die auf normale Luftdichte reduzierte Frontan-

sprechspannung des nicht luftdicht gekapselten Ableiters, bei Frontsteilheiten bis zu dem in Kolonne 5 der Tabellen II und III angegebenen Wert, darf höchstens 15 % höher sein, als der in Kolonne 4 der gleichen Tabelle angegebene Wert. Der Nachweis geschieht durch einen der beiden unter Ziff. **5.4** und **5.5** beschriebenen Versuche.

4.4 Frontansprechspannung bei flacher Front

Die Frontansprechspannung des luftdicht gekapselten Ableiters, bzw. die auf normale Luftdichte reduzierte Frontansprechspannung des nicht luftdicht gekapselten Ableiters, bei einer Frontsteilheit in der Grössenordnung von 3 % des in Kolonne 5 der Tabellen II und III angegebenen Wertes soll den in Kolonne 4 der gleichen Tabellen angegebenen Wert nicht übersteigen. Der Nachweis geschieht durch den unter Ziff. **5.6** beschriebenen Versuch.

4.5 Restspannung

Die Restspannung beim Durchgang des Nennableitstromes darf nicht höher sein als der in Kolonne 4 der Tabellen II und III angeführte Wert. Der Nachweis geschieht durch die unter Ziff. **5.7** beschriebene Messung.

4.6 Beanspruchung durch Stoßströme

Der Ableiter muss Stoßströme bis zur Höhe des Nennableitstromes, sowie unter den in den Prüfvorschriften in Ziff. **5.9** und **5.10** spezifizierten Bedingungen auch einzelne Stoßströme mit hohem Scheitelwert und Rechteckstoßströme von langer Dauer ohne schädliche Veränderung aushalten können. Diese Anforderung gilt als erfüllt, wenn der Ableiter die unter Ziff. **5.8**, **5.9** und **5.10** beschriebenen Versuche erfolgreich bestanden hat.

4.7 Betriebssicherheit

Der unter Nennspannung stehende Ableiter muss nach dem Durchgang eines Ableitstromes bis zur Höhe des Nennableitstromes den Nachstrom jederzeit sicher unterbrechen können. Der Ableiter darf bei diesem Vorgang keine nachteiligen Veränderungen erleiden. Diese Anforderung gilt als erfüllt, wenn der Ableiter den unter Ziff. **5.8** beschriebenen Löschversuch erfolgreich bestanden hat.

4.8 Ansprechspannung bei Industriefrequenz

Die Ansprechspannung bei Industriefrequenz des luftdicht gekapselten Ableiters, bzw. die auf normale Luftdichte reduzierte Ansprechspannung bei Industriefrequenz des nicht luftdicht gekapselten Ableiters, darf nicht tiefer als der 1,5fache Wert der Nennspannung sein. Der Nachweis geschieht durch die unter Ziff. **5.2** beschriebene Messung. Falls die Ansprechspannung weniger als den 1,8fachen Wert der Nennspannung beträgt, ist mit häufigerem Ansprechen des Ableiters infolge innerer Überspannungen zu rechnen, und der Ableiter muss diesen Beanspruchungen gewachsen sein.

4.9 Aufschriften und Kennzeichen

Der Ableiter soll ein Leistungsschild mit den folgenden Angaben aufweisen:

a) *Firmenaufschrift*;
b) *Typenbezeichnung*, *Fabrikationsnummer* und evtl. *Baujahr* oder ein anderes eindeutiges Kennzeichen für die Bauart;
c) *Nennspannung* in kV;
d) *Nennfrequenz* in Hz (falls diese ausserhalb 48...62 Hz liegt);
e) *Nennableitstrom* in kA;
f) *Maximal zulässige Höhe über Meer* (falls diese mehr als 1000 m beträgt).

Bemerkung: Bei einem zur Prüfung eingereichten Ableiter muss aus einer dem Ableiter beigefügten Betriebsvorschrift oder aus einer entsprechenden Mitteilung an die Prüfstelle hervorgehen, ob der Ableiter luftdicht gekapselt ist oder nicht. Ebenso sind die Garantiewerte der 100-%-Ansprechspannung und der Restspannung anzugeben.

5 Durchführung der Prüfungen

5.1 Aufstellung des Ableiters bei der Prüfung

Bei der Bestimmung der Ansprechspannung nach Ziff. **5.2...5.6** ist folgendes zu beachten:

Der Ableiter wird auf einer geerdeten Platte oder einem geerdeten Gitter auf dem Boden möglichst frei aufgestellt. Die Spannung soll in der Ableiterachse zugeführt werden. Gegenstände, deren Entfernung vom Prüfling weniger als die Ableiterlänge beträgt, sind im Protokoll anzugeben (Skizze).

Bemerkung: Die Ansprechspannung eines Ableiters kann durch die Ausbildung des elektrischen Feldes ausserhalb des Ableiters beeinflusst werden. Die Höhe der Aufstellung über Boden und die Nachbarschaft von leitenden Gegenständen können sich in dieser Hinsicht auswirken. In extremen Fällen (z. B. Ableiter, die in Metallzellen eingebaut werden) ist es angezeigt, bei der Messung der Ansprechspannungen die Umgebung des Ableiters am Standort nachzubilden. Solche Prüfungen müssen zwischen Hersteller und Besteller vereinbart werden.

5.2 Ansprechspannung bei Industriefrequenz

Die Messung der Ansprechspannung bei Industriefrequenz geschieht auf gleiche Weise wie die Messung einer Überschlagspannung nach Publ. 0173, Regeln für Spannungsprüfungen. Die Frequenz der Wechselspannung soll zwischen 48...62 Hz liegen. Ist die Spannung nicht genau sinusförmig, so ist gemäss Publ. 0173 der Scheitelwert/$\sqrt{2}$ anstelle des Effektivwertes der Spannung einzusetzen. Der Strom, der nach dem Ansprechen durch den Ableiter fliesst, soll durch eine äussere Impedanz auf höchstens 0,7 A begrenzt und nach längstens einer Sekunde unterbrochen werden. Falls der Funkenstrecke Widerstände zur Spannungssteuerung parallel geschaltet sind, die bei diesem Versuch überlastet werden könnten, ist durch den Hersteller die minimale Geschwindigkeit vorzuschreiben, mit der die Spannung bis zum Ansprechen gesteigert werden muss. Es werden fünf Einzelmessungen in Intervallen von ca. 60 s durchgeführt. Ist der Ableiter luftdicht gekapselt, so darf keiner der Messwerte tiefer als die 1,5fache Nennspannung des Ableiters sein. Ist der Ableiter nicht luftdicht gekapselt, so wird der tiefste Messwert auf normale Luftdichte reduziert und darf dann nicht tiefer als die 1,7fache Nennspannung sein, damit auch in einer Höhenlage von 1000 m ü. M. die 1,5fache Nennspannung nicht unterschritten wird.

Bei Ableitern für Freiluftaufstellung wird die Messung im trockenen Zustand des Ableiters und unter Regen durchgeführt. Bei Ableitern für Innenraumaufstellung wird die Messung nur am trockenen Ableiter vorgenommen.

5.3 Kontrolle der 100-%-Ansprechstoßspannung

Soweit im folgenden keine speziellen Angaben gemacht sind, gelten für diesen Versuch die Vorschriften von Publ. 0173.

Die angewendete Stoßspannung 1|50 soll bei luftdicht gekapselten Ableitern möglichst genau die Höhe der garantierten 100-%-Ansprechstoßspannung aufweisen. Bei nicht luftdicht gekapselten Ableitern ist die entsprechend der beim Versuch vorhandenen Luftdichte reduzierte 100-%-Ansprechstoßspannung anzuwenden. Der Ableiter wird 10 positiven und 10 negativen Stössen unterworfen und soll bei jedem Stoss ansprechen. Wenn bei einer Serie von 10 Stössen bei höchstens einem Stoss kein Ansprechen erfolgt, wird der Ableiter einer zweiten Serie von 10 Stössen derselben Polarität unterworfen und muss dann bei jedem Stoss ansprechen. Es wird also im Grenzfall noch toleriert, dass bei der garantierten Spannung nur 95 % statt 100 % der Stösse zum Ansprechen führen.

5.4 Messung der Frontansprechspannung bei steiler Front

Der Ableiter wird 10 positiven und 10 negativen Stössen mit möglichst linearem Spannungsanstieg unterworfen. Die an der durch das Ansprechen des Ableiters abgeschnittenen Stoßspannung gemessene Frontsteilheit soll den in Kolonne 5 von Tabelle II und III angegebenen Wert aufweisen. Abweichungen bis $\pm$ 10 % von der verlangten Frontsteilheit werden toleriert. Von den oszillographisch gemessenen Ansprechspannungen soll kein Wert mehr als 15 % höher sein, als der in Kolonne 4 der Tabellen II und III angegebene Wert. Bei nicht luftdicht gekapselten Ableitern wird der höchste Wert auf normale Luftdichte reduziert und darf dann nicht mehr als 15 % höher als der in Kolonne 4 der Tabellen II und III angegebene Wert sein. Der prinzipielle Aufbau des Stosskreises für diesen Versuch soll dem Schema in Fig. 3 entsprechen. Zwischen Frontkondensator und Ableiter ist ein Widerstand von ca. 400 Ω zu schalten. Der zur Spannungsmessung verwendete Spannungsteiler darf höchstens eine Eigenkapazität von 100 pF aufweisen, und seine Messgenauigkeit ist nachzuweisen.

Bemerkungen: Wenn durch die Trägheit der Ableiterwiderstände der Spannungszusammenbruch beim Ansprechen etwas verzögert wird, ist die Frontansprechspannung auch von der Frontsteilheit des Stoßstromes und damit von der Stossgenera-

tor-Schaltung abhängig. Um eindeutige Verhältnisse zu schaffen, muss daher die Stossgenerator-Schaltung festgelegt werden.

Falls die Ansprechcharakteristiken nach Ziff. 5.5 bestimmt werden, kann die Frontansprechspannung bei der vorgeschriebenen Steilheit auch aus diesen Charakteristiken ermittelt werden.

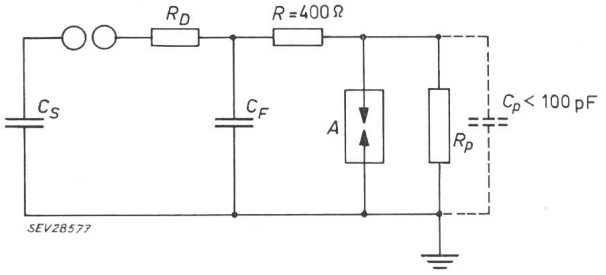

Fig. 3
Prüfschaltung

A Ableiter
C_F Frontkondensator
C_P Eigenkapazität des Spannungsteilers (< 100 pF)
C_S Stosskondensator
R Widerstand zwischen Frontkondensator und Ableiter (ca. 400 Ω)
R_D Dämpfungswiderstand
R_P Spannungsteiler (Genauigkeit nachgewiesen)

5.5 Ermittlung der Ansprechcharakteristik für positiven und negativen Stoss

(Bei einer Typenprüfung ist diese Messung fakultativ)

Der Ableiter wird Stoßspannungen 1|50 unterworfen, wobei der Spannungsanstieg zwischen 10 und 90 % des Scheitelwertes möglichst linear erfolgen soll. Die Spannung wird von einem Wert, der noch kein Ansprechen ergibt, stufenweise gesteigert, bis das Ansprechen mit einer Ansprechzeit zwischen 0,4...0,5 µs erfolgt. Von je 5 Messungen mit der gleichen Einstellung des Stossgenerators wird der Maximalwert der gemessenen Ansprechspannung in Funktion der Ansprechzeit aufgetragen. Für Ansprechzeiten zwischen 0,4...1,5 µs müssen auf diese Weise 5 Punkte gemessen werden. Für den Stosskreis und den Spannungsteiler gelten bei diesem Versuch die gleichen Vorschriften wie unter Ziff. 5.4.

Bemerkung: Aus der höheren der den beiden Stosspolaritäten zugeordneten Charakteristiken kann die Frontansprechspannung bei der unter Ziff. 5.4 spezifizierten Frontsteilheit bestimmt werden durch den Schnittpunkt der Charakteristik mit einer durch den Nullpunkt gehenden Geraden, deren Neigung

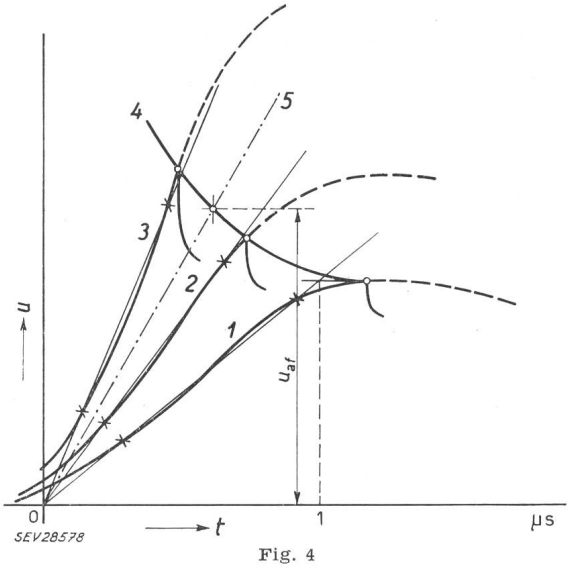

Fig. 4
Ermittlung der Ansprechcharakteristik und der Frontansprechspannung eines Ableiters (Ziff. 5.5 und 5.4)

0 Konventioneller Beginn der Stoßspannungen
1...3 Stoßspannungen (1|50)
4 Ansprechcharakteristik
5 Gerade entsprechend der zur Messung der Frontansprechspannung nach Ziff. 5.4 vorgeschriebenen Frontsteilheit
o Ansprechen des Ableiters
u_{af} Frontansprechspannung des Ableiters bei der nach Ziff. 5.4 vorgeschriebenen Frontsteilheit

der betreffenden Frontsteilheit entspricht. Infolge der verschiedenen Definitionen für die Ansprechzeit und für die Frontdauer beim durch das Ansprechen des Ableiters abgeschnittenen Stoss ist die so ermittelte Frontansprechspannung mit der gemäss Ziff. 5.4 gemessenen nicht absolut identisch. Bei einem einigermassen linearen Spannungsanstieg sind aber die Unterschiede bedeutungslos.

Fig. 4 zeigt ein Beispiel für die Ermittlung der Ansprechcharakteristik und die Ermittlung der Frontansprechspannung aus dieser Charakteristik.

5.6 Messung der Ansprechspannung bei flacher Front

Der Ableiter wird 10 positiven und 10 negativen Stössen unterworfen. Die an der durch das Ansprechen des Ableiters abgeschnittene Stoßspannung gemessene Frontsteilheit soll zwischen 2 und 4 % des in Kolonne 5 der Tabellen II und III angegebenen Wertes liegen. Die oszillographisch gemessenen Ansprechspannungen dürfen den in Kolonne 4 der Tabellen II und III angegebenen Wert nicht übersteigen. Bei nicht luftdicht gekapselten Ableitern wird der höchste gemessene Wert auf normale Luftdichte reduziert und darf dann denjenigen von Kolonne 4 der Tabellen II und III nicht übersteigen.

5.7 Messung der Restspannung

Der Prüfling kann ein vollständiger Ableiter oder ein Ableiterwiderstand sein. Er wird je einem positiven und einem negativen Stoßstrom 8|20 von der Höhe des halben, einfachen und doppelten Nennableitstromes unterworfen. Abweichungen bis ± 10 % von diesen Werten werden toleriert. Falls zusätzliche Einzelstösse notwendig sind, muss sich der Ableiter bei der Messung wieder auf Raumtemperatur befinden. Mit den oszillographisch gemessenen Restspannungen wird die Restspannung-Strom-Charakteristik gemäss Ziff. **3.2.17** aufgezeichnet und daraus die Restspannung beim Nennableitstrom ermittelt. Diese darf die in Kolonne 4 der Tabellen II und III angegebenen Grenzwerte nicht übersteigen.

Sofern der Energieinhalt der Stossprüfanlage nicht zur Prüfung des ganzen Ableiters oder seines Widerstandes ausreicht, ist im Rahmen der unter Ziff. **5.12** spezifizierten Bedingungen die Messung der Restspannung an einem Ableiterelement, einem Teilableiter oder einem entsprechend reduzierten Ableiterwiderstand zulässig.

Erfolgt die Messung der Restspannung im Rahmen eines Typenversuches Ziff. **5.11** oder in Verbindung mit dem Löschversuch Ziff. **5.8**, so ist wie folgt vorzugehen: Am Ableiter, Teilableiter oder Ableiterelement, an dem der Löschversuch durchgeführt wird (Hauptprüfling), wird die Restspannung nur beim Nennableitstrom (Toleranz ± 10 %) gemessen.

Die oben beschriebene Messung bei drei verschiedenen Strömen erfolgt an einem gleichartigen Zusatzprüfling, der mitzuliefern ist, oder an der entsprechenden Anzahl Ableiterwiderstände. Diese Widerstände, bzw. diejenigen des Zusatzprüflings sollen von der gleichen Beschaffenheit sein und der gleichen Fabrikationsserie entstammen wie jene des Hauptprüflings. Die am Hauptprüfling gemessene Restspannung wird mit Hilfe der am Zusatzprüfling ermittelten Restspannung-Strom-Charakteristik auf den genauen Nennableitstrom umgerechnet und darf dann ebenfalls nicht höher sein als der in Kolonne 4 der Tabelle II oder III angegebenen Wert.

Bemerkung: Die Messung von Strom und Spannung kann statt in getrennten Oszillogrammen Spannung–Zeit und Strom–Zeit auch durch die oszillographische Aufnahme der Spannung-Strom-Charakteristik bei Stossform 8|20 erfolgen.

5.8 Löschversuch

Dieser Versuch dient gleichzeitig der Kontrolle der Löschfähigkeit unter Nennspannung und des Verhaltens beim wiederholten Durchgang des Nennableitstromes. Vorgängig dieses Versuches sollen die Ansprechspannung bei Industriefrequenz (im trockenen Zustand des Ableiters) und die Restspannung beim Nennableitstrom des Ableiters gemessen sein. Der Ableiter wird an eine Wechselspannungsquelle mit der Frequenz 50 Hz ± 4 % angeschlossen und die Spannung so reguliert, dass die oszillographisch gemessene Spannung (Scheitelwert/$\sqrt{2}$) während des Stromdurchganges durch den Ableiter möglichst genau der Ableiter-Nennspannung entspricht (zulässige Abweichung ± $\frac{5}{0}$ %). Die Leistung der Spannungsquelle soll so gross sein, dass die Leerlaufspannung nach dem Löschen des Ableiters die Nennspannung um höchstens 10 % übersteigt. Der Stossgenerator, der über eine Löschfunkenstrecke angeschlossen ist, die den Stossgenerator nach Ablauf

des Stoßstromes vom Ableiter und von der 50-Hz-Spannungsquelle trennt, wird auf den Nennableitstrom des Ableiters eingestellt. Dabei werden Abweichungen bis maximal ± 10 % in der Einstellung des Scheitelwertes toleriert.

Die Auslösung des Stosses erfolgt 60° vor dem Scheitelwert der Wechselspannungs-Halbwelle gleicher Polarität. Kann jedoch bei dieser Einstellung kein sicheres Zünden des Nachstromes erreicht werden, so wird der Auslösemoment in Stufen von 10° zurückverschoben, höchstens aber bis 30° vor den Scheitelwert der Wechselspannung.

Der Versuch erfolgt in vier Gruppen zu fünf Stössen. Der zeitliche Abstand der Stösse innerhalb einer Gruppe soll 50...60 s betragen, derjenige zwischen den Gruppen 25...30 min. Alle zur Einstellung der Wechselspannung, des Stossgenerators und des Auslösemomentes notwendigen Vorversuche sind an einem separaten, dem Prüfling elektrisch gleichwertigen Einstell-Ableiter vorzunehmen, so dass der Prüfling nur durch die zum Prüf-Versuch gehörenden 20 Stösse beansprucht wird.

Die Wechselspannung und der Nachstrom sollen mindestens bei drei Versuchen pro Gruppe oszillographisch registriert werden. Das Oszillogramm soll vor der Anwendung des Stosses und nach der Unterbrechung des Nachstromes mindestens je eine volle Periode der Wechselspannung zeigen. Der Stoßstrom kann während des Versuches oder durch einen Vorversuch ohne Wechselspannung kontrolliert werden.

Der Ableiter muss nach jedem Stoss den eingeleiteten Nachstrom unterbrechen. Nach den Versuchen lässt man ihn auf die Umgebungstemperatur abkühlen und misst dann nochmals die Ansprechspannung bei Industriefrequenz (trocken) und die Restspannung beim Nennableitstrom. Die Ansprechspannung soll sich dann nicht mehr als 10 % und die Restspannung nicht mehr als 8 % verändert haben. Die Oszillogramme dürfen keine Anzeichen von Durchschlägen oder Überschlägen an den Ableiterwiderständen zeigen. Der Ableiter darf nach diesem Versuch nicht im Betrieb verwendet werden.

Falls der Energieinhalt der Stossanlage oder die Spannung oder Leistung der Wechselspannungsquelle zur Prüfung des ganzen Ableiters nicht ausreicht, ist im Rahmen der unter Ziff. **5.12** aufgeführten Bedingungen auch die Prüfung an einem Ableiter-Element oder Teilableiter zulässig.

Bemerkungen: Der Löschversuch an einem Ableiter-Element oder Teilableiter ist nur dann probant, wenn an einem Bruchteil von $1/n$ des Ableiters die Teilspannung auch $1/n$ der Betriebsspannung des ganzen Ableiters beträgt. Falls dies nicht aus der Dimensionierung der Steuerelemente offensichtlich hervorgeht, ist die lineare Spannungsverteilung bei Betriebspannung durch Versuch nachzuweisen.

Für das Auftreten oder Nichtauftreten des Nachstromes kann die Stosskapazität ausschlaggebend sein. Tritt kein Nachstrom auf, auch wenn die Auslösung des Stosses nur 30 ° vor dem Scheitelwert der Wechselspannung erfolgt, so ist die Ursache beim Stosskreis zu suchen und dieser zu ändern. Der Einfluss des Stosskreises auf den Stromverlauf ist im Anhang I zu diesen Regeln behandelt.

5.9 Hochstromstösse

Der Versuch wird an einem Teilableiter von mindestens 3 kV Nennspannung durchgeführt, der vorgängig (mit Ausnahme der Messung der Ansprechspannung bei Industriefrequenz) keinen anderen Versuchen unterworfen wurde. Der Prüfling darf nach dem Versuch nicht im Betrieb verwendet werden.

Der Prüfling wird zwei Stoßströmen 4|10 von dem in Kolonne 2 in Tabelle IV angegebenen Scheitelwert unterworfen. Ist ein Garantiewert angegeben, der den Wert von Tabelle IV übersteigt, so wird der Versuch mit dem garantierten Stossstrom durchgeführt. Abweichungen bis zu max. ± 10 % vom vorgeschriebenen Scheitelwert werden noch toleriert. Der zweite Stoss wird erst angewendet, wenn sich der Prüfling wieder auf die Umgebungstemperatur abgekühlt hat.

Genormte Nennwerte für Hochstromstösse und Stoßströme langer Dauer

Tabelle IV

Kolonne 1	2	3	4
Nennableitstrom des Ableiters kA	Scheitelwert der Hochstromstösse kA	Scheitelwert der Stoßströme langer Dauer A	Nenndauer der Stoßströme langer Dauer µs
10	100	150	2000
5	65	75	1000
2,5	25	50	500

Weder aus den Oszillogrammen von Strom und Spannung, noch bei der visuellen Kontrolle der Ableiterwiderstände nach dem Versuch dürfen sich Anzeichen für Durchschläge oder Überschläge ergeben. Die nach dem Versuch gemessene Ansprechspannung bei Industriefrequenz darf nicht mehr als 10 % von der vorher gemessenen abweichen.

5.10 Stoßströme langer Dauer

Der Versuch wird an einem Teilableiter von mindestens 3 kV Nennspannung durchgeführt, der vorgängig keinen anderen Versuchen unterworfen wurde. Der Prüfling darf nach dem Versuch nicht im Betrieb verwendet werden.

Der Prüfling wird 20 Rechteckstössen mit den in Kolonnen 3 und 4 der Tabelle IV angegebenen Nenndaten unterworfen. Sind Garantiewerte angegeben, die die Werte der Tabelle IV übersteigen, so ist der Versuch mit den betreffenden garantierten Nenndaten des Rechteckstosses durchzuführen. Abweichungen bis + 10 % im Stoßstrom sind zu tolerieren. Die 20 Stösse werden in fünf Gruppen eingeteilt. Die Intervalle zwischen den Stössen einer Gruppe sollen 50...60 s, diejenigen zwischen den Gruppen 14...15 min betragen. Vor Beginn jeder neuen Gruppe wird die Polarität gewechselt. Mindestens bei einem der ersten und einem der letzten Stösse der Prüfung werden Strom und Spannung oszillographisch gemessen. Der Verlauf der Restspannung bei den letzten Stössen darf keine Teildurchschläge oder -Überschläge erkennen lassen.

5.11 Vollständige Typenprüfung

Ein vollständiger Typenversuch umfasst die in Ziff. **5.2**... **5.10** spezifizierten Versuche (evtl. mit Ausnahme des fakultativen Versuches der Ziff. **5.5**). Die Versuche gemäss Ziff. **5.2**...**5.6** sind in der angeführten Reihenfolge an ein und demselben vollständigen Ableiter durchzuführen.

Die für die weiteren Versuche verwendeten Ableiter oder Teilableiter sollen von gleicher Beschaffenheit sein und der gleichen Fabrikationsserie entstammen wie der Hauptprüfling bzw. dessen Bestandteile.

5.12 Prüfung von Teilableitern

Sofern wegen beschränkter Leistungsfähigkeit der Prüfanlage die Messung der Restspannung Ziff. **5.7** und der Löschversuch Ziff. **5.8** an einem Ableiter-Element oder Teilableiter durchgeführt werden müssen, so sind die folgenden Regeln zu beachten:

a) Es ist das grösste Ableiter-Element oder der grösste Teilableiter zu prüfen für den die Prüfanlage noch genügt. Auf alle Fälle soll dessen Nennspannung 6 kV nicht unterschreiten;

b) Die maximal zulässige Restspannung nach Kolonne 4 der Tabelle I und die beim Löschversuch anzulegende Wechselspannung werden im Verhältnis des Bruchteiles reduziert.

5.13 Prüfung einer Typenreihe

Zur Prüfung einer Typenreihe, deren einzelne Typen sich nur durch die Nennspannung unterscheiden, genügt eine vollständige Typenprüfung gemäss Ziff. **5.11** an Ableitern dreier repräsentativer Nennspannungen.

Ableiter, die sich untereinander nur durch die verschiedene Ausbildung der Befestigungsarmaturen unterscheiden (z. B. verschiedene Armaturen für stehende und hängende Montage) dürfen bezüglich Typenprüfung als zu ein und demselben Typ gehörig betrachtet werden, wenn die verschiedene Ausbildung dieser Armaturen keinen wesentlichen Einfluss auf das elektrische Feld am Ableiter ausüben kann.

5.14 Stückprüfung

Zumindest die Messung der Ansprechspannung bei Industriefrequenz Ziff. **5.2** soll als Stückprüfung an jedem Ableiter im trockenen Zustand durchgeführt werden.

5.15 Kontrollversuche des Herstellers

Der Hersteller ist für die Auswahl und Durchführung aller Prüfungen verantwortlich, die an jedem Ableiter, Ableiterelement oder Bestandteil notwendig sind, damit die durch den Typenversuch ausgewiesenen Eigenschaften bei allen abgelieferten Ableitern gewährleistet werden.

5.16 Abnahmeprüfung

Werden von einem Kunden in der Bestellung Abnahmeversuche verlangt, ohne dass dieselben näher spezifiziert sind,

sind die folgenden normalen Abnahmeversuche an der der Kubikwurzel aus der Bestellungsstückzahl nächst höheren ganzen Zahl von Ableitern vorzunehmen:

a) Ansprechspannung bei Industriefrequenz (nach Ziff. 5.2) im trockenen Zustand des Ableiters;

b) Kontrolle der 100-%-Ansprechstoßspannung (nach Ziff. 5.3).

Bemerkung: Zum Nachweis der einwandfreien Funktion des Ableiters sind auch die Kontrolle der Restspannung und der Löschversuch wichtig. Da diese Versuche einen grösseren Aufwand und die Bereitstellung zusätzlicher Ableiter oder Ableiterbestandteile bedingen, werden sie aber nur nach entsprechender Vereinbarung zwischen Besteller und Hersteller gefordert.

5.17 Ansprechregistrierapparate: Anforderungen und Prüfung

Apparate zur Registrierung oder Zählung des Ansprechens von Ableitern dürfen den Schutzwert der Ableiter nicht beeinträchtigen [1]) und bei den vom Ableiter abzuleitenden Strömen keinen Schaden erleiden.

Auf Apparaten, die nicht mit einem Ableiter zusammengebaut sind, muss die Herstellerfirma des Apparates, sowie der Nennableiterstrom des Ableiters, mit dem der Apparat verwendet werden kann, angegeben sein.

Die Typen-Prüfung der Ansprechregistrierapparate geschieht wie folgt:

a) Apparate, die mit einem Ableiter zusammengebaut sind, werden gemeinsam mit diesem der Ableiterprüfung unterworfen;

b) Apparate, die nicht mit einem Ableiter zusammengebaut sind, werden 10 positiven und 10 negativen Stoßströmen 8|20 vom Nennableitstrom unterworfen und die dabei am Registrierapparat auftretende maximale Spannung oszillographisch gemessen. Der Registrierapparat darf durch diese Prüfung keinen Schaden nehmen;

c) Mit Stoßströmen 8|20 wird der kleinste Ableitstrom ermittelt, bei dem der Apparat noch registriert oder zählt.

6 Auswahl der Ableiter

6.1 Auswahl bezüglich Nennspannung

6.1.1 *Allgemeines*

Damit der Ableiter einwandfrei arbeitet, darf die höchste im Betrieb oder bei Störungen (z. B. Erdschluss) an den Ableiterklemmen auftretende Wechselspannung die Ableiternennspannung nicht übersteigen. Im allgemeinen wird der Ableiter zwischen Phasenleiter und Erde angeschlossen. Es muss also die grösste zwischen Phase und Erde auftretende Wechselspannung ermittelt werden. Im allgemeinen ergibt dann diese Spannung, bzw. der nächst höhere genormte oder sonst als Nennspannung verfügbare Wert, die Nennspannung der zu wählenden Ableiter. Wenn die Anlage den Koordinationsregeln, Publ. 0183, gemäss isoliert und angeordnet ist, ist dann auch die Schutzwirkung des Ableiters gewährleistet. Bei reichlicher Isolation der Anlage (z. B. höchste Betriebsspannung wesentlich unter der genormten Nennspannung des Materials oder Anlage mit voller Isolation bei wirksam geerdetem Nullpunkt) kann die Ableiter-Nennspannung auch etwas höher gewählt werden, soweit das der Nennspannung des Isoliermaterials zugeordnete Schutzniveau von der 100-%-Ansprechspannung und der Restspannung des Ableiters nicht überschritten wird. Eine höhere Nennspannung vergrössert die Betriebssicherheit, eine tiefere Nennspannung dagegen erweitert den räumlichen Schutzbereich der Ableiter.

Die genormten Ableiter-Nennspannungen für Hochspannung sind in Tabelle I zusammengestellt. Damit die Ableiter den jeweiligen Betriebsspannungen möglichst gut angepasst werden können, wurde die Reihe der nach Publ. 0159 genormten Nennspannungen (in Tabelle I fett gedruckt) durch Zwischenwerte ergänzt.

6.1.2 *Ableiter für schwach isolierte Anlagen*

Anlagen, deren Isolation den Koordinationsregeln nicht genügt (z. B. alte Anlagen) können nur durch Spezialableiter geschützt werden, deren Ansprech- und Restspannungen tiefer liegen als die in diesen Regeln vorgeschriebenen Werte. Die Anforderungen an solche Ableiter sind von Fall zu Fall zwischen Besteller und Hersteller zu vereinbaren.

Bemerkung: In den Koordinationsregeln, Publ. 0183, ist das sog. Schutzniveau, d. h. der Höchstwert für die 100-%-Ansprechspannung und die Restspannung der Ableiter, stets ca. 25 % tiefer angesetzt als die Haltespannung der Isolation. Die vorgeschriebene Haltespannung bezieht sich aber auf normale Luftdichte. Bei Aufstellung in einer Höhenlage von 1000 m ü. M. kann die wirkliche Haltespannung infolge der reduzierten Luftdichte nur noch 90 % des angegebenen Wertes betragen, während die Restspannung eines Ableiters und die Ansprechspannung eines luftdicht gekapselten Ableiters durch die Höhenlage nicht verändert werden. Die Sicherheitsmarge zwischen Isolationsniveau und Schutzniveau schrumpft somit in dieser Höhenlage auf 16 % zusammen. Dies ist ein absolutes Minimum, wenn man berücksichtigt, dass an der zu schützenden Isolation, infolge ihres räumlichen Abstandes vom Ableiter, eine noch etwas höhere Spannung auftreten kann als am Ableiter selbst. Ein normaler Ableiter vermag daher eine Isolation, deren Haltespannung einige Prozent unter dem von den Koordinationsregeln verlangten Werte liegt, auf Meereshöhe noch knapp zu schützen, nicht mehr dagegen in einer Höhenlage von gegen 1000 m ü. M.

6.1.3 *Grösste Spannung Phase-Erde im Dreiphasennetz mit wirksam geerdetem Nullpunkt*

Ein Netz gilt als wirksam geerdet, wenn während eines Erdschlusses die höchste betriebsfrequente Spannung zwischen einer gesunden Phase und Erde höchstens 80 % der höchsten verketteten Spannung erreicht, gleichgültig an welcher Stelle der Erdschluss auftritt (Publ. 0183, Ziff. 19). Diese Bedingung ist annähernd erfüllt, wenn für alle Netzzustände das Verhältnis von Nullreaktanz zu Mitreaktanz höchstens gleich 3 und das Verhältnis vom Nullwiderstand zu Mitreaktanz höchstens gleich 1 ist.

Die Nennspannung der Ableiter muss also in einem Netz mit wirksam geerdetem Nullpunkt mindestens 80 % der höchsten verketteten Betriebsspannung betragen. Die in den Koordinationsregeln, Publ. 0183, festgelegten Werte des Schutzniveaus bei reduzierter Isolation entsprechen Ableiternennspannungen von 81...87 % der höchsten verketteten Betriebsspannung des Netzes. Kolonne 3 in Tabelle III gibt die entsprechende Zuordnung der höchsten Betriebsspannung zu den genormten Ableiter-Nennspannungen.

6.1.4 *Grösste Spannung Phase-Erde im Dreiphasennetz mit nicht wirksam geerdetem Nullpunkt*

Bei Erdschluss kann die Spannung gegen Erde an den gesunden Phasen bis auf die verkettete Spannung ansteigen. Die Ableiter-Nennspannung muss also mindestens gleich der höchsten verketteten Betriebsspannung am Aufstellungsort der Ableiter sein.

Ist das Netz isoliert oder ist sein Nullpunkt nur über hochohmige Widerstände oder Drosseln geerdet, so kann die Spannung gegen Erde noch etwas höher liegen als die verkettete Spannung im Netz ohne Erdschluss bei sonst gleichem Netzzustand. In extremen Fällen ist diese Spannungserhöhung bei der Wahl der Ableiternennspannung zu berücksichtigen (Ziff. 2.3 d).

Bemerkung: Die Ermittlung der grössten Spannungen gegen Erde bei einphasigem Erdschluss ist im Anhang II zu diesen Regeln behandelt.

6.2 Auswahl bezüglich Nennableitstrom

6.2.1 *Beanspruchung der Ableiter bei atmosphärischen Überspannungen*

Die Beanspruchung des Ableitermaterials hängt von der Höhe und Dauer des Ableitstromes ab, sie braucht allerdings nicht proportional zu diesen beiden Grössen zu sein. Die gesamte, bei einem Stoßstrom durch den Ableiter fliessende Ladung ist immerhin ein gewisses, wenn auch rohes Mass für die diesem zugemutete Beanspruchung.

Die mit atmosphärischen Überspannungen verbundenen Ströme und Ladungsmengen sind sehr verschieden. Durch eine allgemeine Formel ausdrücken lassen sie sich nur bei Überspannungswellen, die aus grosser Entfernung einlaufen (Wellenlaufzeit auf der doppelten Strecke Einschlag-Ableiter grösser als die Dauer des Blitzstromes). Es ist dann der durch einen Ableiter fliessende Strom:

$$i_p = \frac{2u_w - u_p}{Z} \quad \text{in der Kopfstation, bzw.}$$

$$i_p = \frac{2u_w - 2u_p}{Z} \quad \text{in der Durchgangsstation.}$$

[1]) Dies ist bei Hochspannungsableitern der Fall, wenn der Spannungsabfall am Registrierapparat nicht mehr als 2...3 kV beträgt. In Verbindung mit Niederspannungsableitern sollen keine Ansprechregistrierapparate verwendet werden.

darin bedeuten:

u_w die Wellenspannung, die auf die Überschlagsspannung der Leitungsisolation begrenzt ist;
u_p die Restspannung des Ableiters und
Z den Wellenwiderstand eines Leitungsdrahtes (ca. 500 Ω).

Die so berechneten Ströme erreichen nur bei extrem hoher Isolation (Höchstspannungsleitungen oder Holzmastenleitungen) Werte in der Grössenordnung von 10 kA. In den meisten praktischen Fällen ergeben sich Ströme, die kleiner sind als der kleinste genormte Nennableitstrom von 2,5 kA. Dies gilt ganz besonders dann, wenn die Überspannungen nicht durch direkte Einschläge in die Leitung erzeugt sind. Bei Blitzeinschlägen in die Leitung in geringer Entfernung vom Ableiter, wo die entstehende Wanderwelle während der Blitzdauer mehrmals zwischen Einschlagstelle und Ableiter hin- und herlaufen kann, können sich dagegen in allen Fällen Ableitströme ergeben, die auch den grössten genormten Wert von 10 kA wesentlich übersteigen.

In einem Mittelspannungsnetz mit leitenden Masten (keine Holzstangen) genügt somit schon der kleinste genormte Nennableitstrom von 2,5 kA für die grosse Mehrzahl der auftretenden Überspannungen. Grössere Nennableitströme der Ableiter werden nur in den seltenen Fällen ausgenützt, wo ein relativ stromstarker oder langdauernder Blitz die Leitung innerhalb einiger Kilometer vom Ableiter trifft. Trotzdem kann sich aber der Ableiter mit dem höheren Nennableitstrom lohnen, wenn er in einem solchen Fall einen schweren Defekt mit Energieausfall verhindert. Der bei nahen Einschlägen über den Ableiter fliessende Strom und die zugehörige Ladung hängen von den Blitzdaten, den Leitungsdaten, den Erdungsverhältnissen am Einschlagsort und von der Entfernung des Einschlagsortes ab [2]). Nimmt man noch die statistischen Unterlagen über Blitzdaten und Einschlaghäufigkeit zu Hilfe, so lässt sich für jeden Ableiterstandort die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen einer bestimmten Ableiterbeanspruchung abschätzen [3]). Die Wahl des Nennableitstromes erfolgt dann nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Zusätzliche Schutzmassnahmen, z. B. Grobschutzfunkenstrecken auf der Leitung, welche den grössten Teil des Blitzstromes schon ausserhalb der Station nach Erde ableiten, und Nahzonenerdseile, welche direkte Einschläge in die Leitung in Stationsnähe vermeiden, reduzieren die Gefahr grosser Ableitströme wesentlich.

Als allgemeine Richtlinie kann gelten, dass bei hoher Leitungsisolation, wo relativ hohe Überspannungen auf der Leitung entstehen können (Höchstspannungsleitungen oder Holzstangenleitungen ohne Grobschutz) zweckmässig Ableiter mit hohen Nennableitströmen gewählt werden. Dies gilt in besonderem Masse, wenn teure Objekte geschützt werden müssen, oder wenn ein allfälliger Schaden grössere Ausfälle in der Energielieferung nach sich ziehen würde. Wenn dagegen bei kleineren Nennspannungen (etwa unterhalb 30...60 kV) keine Holzstangenleitungen ohne Grobschutz vorkommen, und insbesondere wenn noch Nahzonenerdseile angebracht sind, sind Ableiter mit kleinerem Nennableitstrom des geringeren Preises wegen durchaus zu verantworten.

Ein Vorteil der grösseren Nennableitströme ist allerdings noch hervorzuheben: Wenn die betreffenden Ableiter nur mit kleinen Ableitströmen beansprucht werden, ist ihre Restspannung tiefer und dadurch ihr räumlicher Schutzbereich grösser.

6.2.2 *Beanspruchung der Ableiter bei inneren Überspannungen*

Überspannungen, die beim Unterbrechen stark induktiver Stromkreise (z. B. leerlaufender Transformatoren) entstehen, können im allgemeinen durch Ableiter ohne weiteres begrenzt werden. Weniger günstig liegen die Verhältnisse bei Überspannungen, die beim Ein- und Ausschalten stark kapazitiver Stromkreise (z. B. Kondensatorbatterien, Kabel oder langer Leitungen) oder bei Erdschlüssen in Netzen mit grosser Kapazität entstehen. Spricht der Ableiter unter diesen Überspannungen an, so wird er von einem grossen Teil der bei der Ansprechspannung in der Kapazität gespeicherten Ladung durchflossen und kann unter Umständen überlastet werden. Solchen Verhältnissen ist daher bei der Auswahl des Nennableitstromes Rechnung zu tragen. Der dem Nennableitstrom von 10 kA zugeordnete Rechteckstoss von 150 A, 2000 µs (Tabelle IV) entspricht z. B. dem Verlauf des Entladestromes einer 300 km langen Freileitung bei der Ansprechspannung eines Ableiters von ungefähr 40 kV Nennspannung unter der Voraussetzung, dass die Restspannung des Ableiters bei 150 A etwa gleich der halben Ansprechspannung ist. Wenn das Produkt aus Netzausdehnung und Nennspannung grösser ist als in diesem Beispiel, oder wenn zusätzliche Kapazitäten vorhanden sind, wäre also ein normaler Ableiter mit 10 kA Nennableitstrom bereits überlastet. In solchen Anlagen verwendete Ableiter müssen daher für die Entladungsströme speziell dimensioniert sein, oder dann müssen die Schaltüberspannungen durch andere Mittel so tief gehalten werden, dass sie die Ableiter nicht zum Ansprechen bringen.

[2]) Für die Berechnung der Ableiterbeanspruchung aus diesen Daten siehe Bull. SEV Bd. 33(1942), S. 272.

[3]) siehe z. B. Bull. SEV Bd. 48(1957), S. 465.

Anhang I

Einfluss des Stosskreises auf den Stromverlauf beim Löschversuch

Die Stösse 8|20 werden im allgemeinen in einem Stosskreis bestehend aus einer Serieschaltung von Kapazität C, Induk-

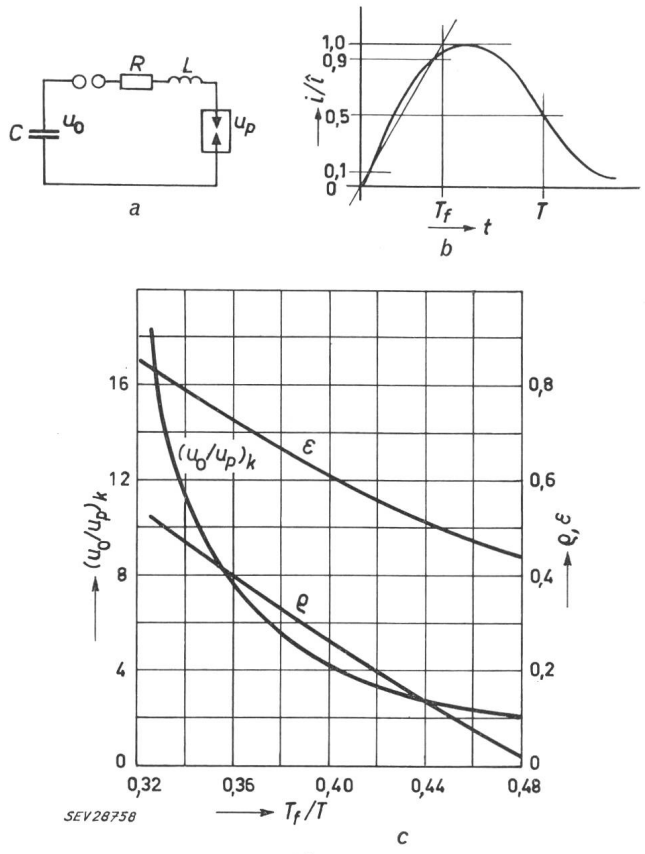

Fig. 5

Beziehungen zwischen den Stosskreisdaten für den genormten Stoßstrom 8|20 unter Berücksichtigung der Toleranzen von Frontdauer und Stossdauer

a Stosskreis
- C Stossgeneratorkapazität
- R Ohmschen Widerstand
- L Induktivität
- u_0 Ladespannung des Stossgenerators
- u_p Restspannung des Ableiters

b Stoßstrom
- T_f Frontdauer
- T Stossdauer
- $\hat{i}$ Scheitelwert

c Darstellung in Funktion des Verhältnisses T_f/T des kritischen Verhältnisses $(u_0/u_p)_k$ und der Hilfsgrössen ϱ und ϵ, welche nach den folgenden Formeln die Grössen R und u_0 aus T, C, $\hat{i}$ und u_p ermitteln lassen:

$$R \approx \varrho \cdot (T/C)$$
$$u_0 \approx u_p + \epsilon\, \hat{i} \cdot (T/C)$$

Ferner gilt für L die Näherungsformel:

$$L \approx 0{,}155\ (T^2/C)$$

tivität L, Widerstand R und dem Ableiter erzeugt. Durch die vorgeschriebene Stossform sind für die Grössen C, L und R zwei Beziehungen gegeben. Es kann also eine der Grössen (z. B. die Kapazität C des Stossgenerators) frei gewählt werden, und die andern beiden sowie die zur Erzielung des gewünschten Ableitstromes notwendige Ladespannung sind dann festgelegt. Die betreffenden Beziehungen, die die Berechnung der Stosskreisdaten erlauben, sind für einen idealisierten Ableiter mit vom Strom unabhängiger Restspannung in Fig. 5 zusammengestellt. Ist die Stosskapazität klein, so wird die Ladespannung gross und umgekehrt.

Solange der Stoßstrom gross ist (mehr als einige 100 A), ist der Widerstand des Ableiters klein und beeinflusst den Vorgang wenig. Stoßstrom und Spannung am Stossgenerator folgen dabei im wesentlichen einer gedämpften Schwingung, wobei die Kondensatorspannung um die Restspannung des Ableiters schwingt. Je nach dem Verhältnis der Ladespannung zur Restspannung kann dabei der Spannungsverlauf die Null-Linie überschneiden oder nicht. Fällt nun der Strom auf kleine Werte, so steigt der Widerstand des Ableiters stark an und beeinflusst den weitern Verlauf massgebend. Ist die Kondensatorspannung, die sich in diesem Moment in der Nähe des Extremwertes befindet, nicht durch Null gegangen, so geht auch der Strom nicht durch Null. Der Stromverlauf biegt vor dem Erreichen des Nullwertes brüsk ab und geht dann schleichend auf Null. Ist dagegen die Kondensatorspannung durch Null gegangen, so schneidet auch der Stromverlauf noch die Nullinie und geht erst nachher in den langsam ausklingenden Verlauf über. Fig. 6 zeigt den Strom und Spannungsverlauf in den beiden Fällen.

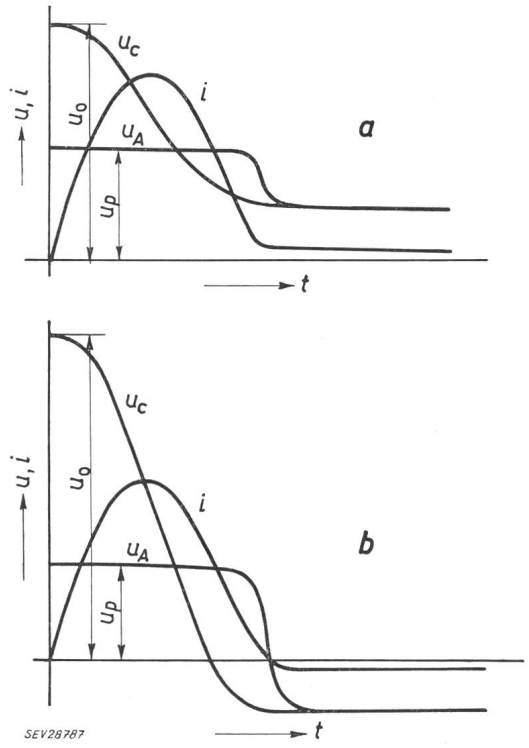

Fig. 6

Strom- und Spannungsverlauf in einem Stosskreis nach Fig. 5a

a	Ohne Nulldurchgang: $u_0/u_p < (u_0/u_p)_k$
b	Mit Nulldurchgang: $u_0/u_p > (u_0/u_p)_k$
i	Stoßstrom
u_A	Spannung am Ableiter
u_c	Spannung am Stosskondensator
u_0	Ladespannung des Stosskondensators
u_p	Restspannung des Ableiters

Zwischen den beiden verschiedenen Formen des Entladungsverlaufes liegt ein Grenzfall, bei dem die Stossgeneratorspannung gerade auf Null schwingt und auch der Strom ohne langsamen Auslauf Null wird. Die Erfahrung zeigt, dass bei einem Stossverlauf, der in die Nähe dieses Grenzfalles kommt, das Auftreten des Nachstromes fraglich wird.

Beim Stoss 8|20 erhält man den Grenzfall bei einem kritischen Verhältnis der Ladespannung zur Ableiterrestspannung

$$(u_0/u_p)_k = 4{,}1$$

Berücksichtigt man die Toleranzen der Front- und Stossdauer, so hängt das kritische Verhältnis $(u_0/u_p)_k$ vom Verhältnis der Frontdauer zur Stossdauer (T_f/T) ab (siehe Fig. 6). Immer unter Voraussetzung eines idealisierten Ableiters mit vom Strom unabhängiger Restspannung ist:

$(u_0/u_p)_k = 2{,}2$ für Stoss 8,5|18 (längste Front und kürzester Rücken)

$(u_0/u_p)_k = 16{,}5$ für Stoss 7,2|22 (kürzeste Front und längster Rücken)

Damit mit Sicherheit ein Nachstrom auftritt, ist bei der Auswahl der Stoßschaltung darauf zu achten, dass das Verhältnis u_0/u_p entweder wesentlich über oder wesentlich unter den kritischen Wert zu liegen kommt. Im übrigen ist die Wahl des Stromkreises frei und kann nach praktischen Gesichtspunkten vorgenommen werden. Schaltungen mit kleiner Kapazität und hoher Ladespannung benötigen einerseits eine relativ hohe Ladeenergie, ergeben aber anderseits die folgenden Vorteile:

a) Veränderungen der Ableiter-Restspannung beeinflussen den Stoßstrom nur wenig;

b) Die Löschfunkenstrecke, welche den Stosskreis nach Abklingen des Stoßstromes vom Ableiter abtrennen muss, kann eine relativ hohe Ansprechspannung aufweisen und ist entsprechend wirksam;

c) Der Stosskreis muss eine relativ hohe Induktivität aufweisen und ist leichter zu realisieren als ein Kreis mit kleiner Induktivität.

Anhang II

Spannungerhöhung der gesunden Phasen bei einphasigem Erdschluss

Nimmt man an, der Erdschluss befinde sich in Phase 1, so liefert die Rechnung mit symmetrischen Komponenten für die Spannungen der Phasen 2 und 3 die folgenden Formeln:

$$\left|\frac{U_2}{U_v}\right| = \left|\frac{Z^0 - a^2 Z'' - \mathrm{j}\sqrt{3}\, a R_F}{Z^0 + Z' + Z'' + 3 R_F}\right|$$

$$\left|\frac{U_3}{U_v}\right| = \left|\frac{Z^0 - a Z'' + \mathrm{j}\sqrt{3}\, a^2 R_F}{Z^0 + Z' + Z'' + 3 R_F}\right|$$

Darin bedeuten:

U_2, U_3	Spannung der gesunden Phasen gegen Erde am Ort des Erdschlusses
U_v	Verkettete Spannung des ungestörten Netzes am Ort des Erdschlusses
$a =$	$\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{3}}$
R_F	Fehlerwiderstand an der Erdschlußstelle
Z^0, Z', Z''	Impedanzen des Netzes, am Erdschlusspunkt gemessen, für das Nullsystem, das Mitsystem und das Gegensystem.

Bei der Ermittlung der Impedanzen sind diejenigen der Erzeuger und der Verbraucher in gleicher Weise zu berücksichtigen. Hat das Netz z. B. den in Fig. 7 dargestellten Aufbau, so ist für die Fehlerstelle:

$$Z^0 = \frac{Z^0{}_A\, Z^0{}_B}{Z^0{}_A + Z^0{}_B}$$

$$Z' = \frac{Z'_A\, Z'_B}{Z_A' + Z_B'}$$

$$Z'' = \frac{Z''_A\, Z''_B}{Z''_A + Z_B}$$

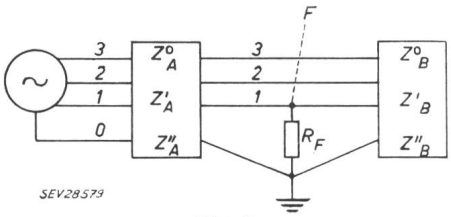

Fig. 7

Schema eines Netzes mit einer Fehlerstelle F

Z^0_A, Z'_A, Z''_A bzw. Z^0_B, Z'_B, Z''_B Impedanzen des Netzes, am Erdschlusspunkt gemessen, für das Nullsystem, das Mitsystem und das Gegensystem

Da auch Spannungserhöhungen von der Dauer weniger Perioden von Bedeutung sind, ist für die Maschine die Anfangsreaktanz einzusetzen. Es ist dann

$$Z'' = Z'$$

und somit

$$\left|\frac{U_2}{U_v}\right| = \left|\frac{Z^0 - a^2\,Z' - \mathrm{j}\sqrt{3}\,a\,R_F}{Z^0 + 2\,Z' + 3\,R_F}\right|$$

$$\left|\frac{U_3}{U_v}\right| = \left|\frac{Z^0 - a\,Z' + \mathrm{j}\sqrt{3}\,a^2\,R_F}{Z^0 + 2\,Z' + 3\,R_f}\right|$$

oder etwas umgeformt:

$$\left|\frac{U_{2,3}}{U_v}\right| = \left|\frac{1 + 2(Z^0/Z') + 3\,(R_F/Z') \pm \mathrm{j}\sqrt{3}\,[1 + (R_F/Z')]}{4 + 2\,(Z^0/Z') + 6\,(R_F/Z')}\right|$$

Die Spannungerhöhung der gesunden Phasen hängt also nur von den Verhältnissen Z^0/Z' und R_F/Z' ab. Die darin vorkommenden Grössen seien im folgenden kurz diskutiert.

Der Fehlerwiderstand R_F kann beliebige reelle Werte annehmen. Es ist also für jeden Netzzustand der Fehlerwiderstand zu suchen, der die grösste Spannungserhöhung ergibt und dieser in die Formel einzusetzen.

Die Mitimpedanz Z' ist, basierend auf das anfangs gezeigte Prinzipschema, $Z' = (Z_{A'}\,Z_{B'})/(Z_{A'} + Z_{B'})$. Darin kann im allgemeinen der Anteil der Belastung gegenüber der Kurzschlussimpedanz des speisenden Netzes vernachlässigt werden. Es ist dann $Z' \approx Z_K$, worin Z_K die Kurzschlussimpedanz des Netzes bei dreiphasigem Kurzschluss an der Fehlstelle bedeutet. Da die Kurzschlussimpedanz im allgemeinen überwiegend induktiv ist, kann in den meisten Fällen der ohmsche Widerstand gegenüber der Reaktanz X_K vernachlässigt werden. Es ist dann:

$$Z' \approx \mathrm{j}\,X_K$$

Die Nullimpedanz Z^0 hängt vom Erdungswiderstand des Netzes ab und muss für die gebräuchlichen Erdungszustände einzeln untersucht werden.

Bei *direkt geerdetem Nullpunkt* ist die Nullimpedanz im wesentlichen durch die Transformatoren und Leitungen bestimmt [1]). Bei wirksamer Nullpunktserdung muss die Nullimpedanz so klein sein, dass die grösste Spannung der Phasen gegen Erde 80 % der verketteten Spannung des ungestörten Netzes nicht überschreitet. Die Auswertung der gegebenen Formel zeigt, dass diese Bedingung erfüllt ist, wenn $Z^0 = R^0 + \mathrm{j}\,x^0$ wie folgt begrenzt wird:

$$\begin{aligned} 0{,}4 \leqq X^0/X' &\leqq 3 \\ R^0/X' &\leqq 1 \end{aligned}$$

wobei $Z' \approx \mathrm{j}\,X'$ vorausgesetzt wird [2]).

Müssen Erdschlüsse gegen die Ableitererde in Betracht gezogen werden, so ist der Erdungswiderstand der Ableitererde in R^0 zu berücksichtigen.

Im *gelöschten Netz* wird durch die Abstimmung der Löschspule der Imaginärteil der Nullimpedanz sehr gross gemacht, so dass ihm gegenüber die übrigen Summanden in der Formel vernachlässigt werden dürfen. Die grösste Spannung der gesunden Phasen im Erdschlussfall wird dann praktisch gleich der verketteten Spannung des ungestörten Netzes.

Im *isolierten Netz* ist die Nullimpedanz durch die Erdkapazität des Netzes und durch allfällige zwischen Phase und Erde geschaltete Belastungen bestimmt. Setzen wir voraus, dass keine wesentlichen Belastungen zwischen Phase und Erde geschaltet sind, so ist allein die Erdkapazität massgebend. Es ist somit

$$Z^0 = \frac{1}{1\,\omega\,C_E}$$

wenn C_E die pro Phase gerechnete Erdkapazität des Netzes ist.

Es ist weiter $Z^0/Z' \approx -\dfrac{1}{X_K\,\omega\,C_E}$

und da im allgemeinen $X_K \ll \dfrac{1}{\omega\,C_E}$ ist,

wird $Z^0/Z' \ll 1$.

Legt man diese Verhältnisse zu Grunde, so ergeben sich für die grösste Spannungserhöhung einer gesunden Phase die folgenden Näherungsformeln:

a) beim Fehlerwiderstand Null:

$$\frac{U_{max}}{U_V} \approx 1 + 1{,}5\;X_K\omega C_E,$$

b) beim ungünstigsten Fehlerwiderstand $\left(R_F \approx \dfrac{1}{10\,\omega C_E}\right)$:

$$\frac{U_{max}}{U_V} \approx 1 + 1{,}5\;X_K\omega C_E,$$

Wenn die Kurzschlussreaktanz X_K durch den Kurzschlussstrom I_K, und die Erdkapazität C_E durch den Erdschlussstrom I_E ausgedrückt wird, wird daraus:

a) beim Fehlerwiderstand Null:

$$\frac{U_{max}}{U_V} \approx 1 + 0{,}5\;\frac{I_E}{I_K}$$

b) beim ungünstigsten Fehlerwiderstand:

$$\frac{U_{max}}{U_V} \approx 1{,}05 + 0{,}5\;\frac{I_E}{I_K}$$

Es zeigt sich also, dass unter praktischen Verhältnissen ($I_E/I_K \leqq 0{,}1$) im isolierten Netz die Spannung der gesunden Phasen gegen Erde die verkettete Spannung des ungestörten Netzes bis etwa 10 % übersteigen kann. Ist in speziellen Fällen die Bedingung $Z^0/Z' \ll -1$ nicht erfüllt (praktisch etwa für $0 > Z^0/Z' > -20$, bzw. $I_E/I_K > 0{,}15$), so ist die Näherungsformel nicht mehr gültig. In diesem Bereich können infolge Resonanz sehr hohe Phasenspannungen auftreten.

[1]) siehe z. B. *A. Hochrainer:* Symmetrische Komponenten in Drehstromnetzen. Berlin: Springer, 1957.

[2]) siehe z. B. Electrical Transmission and Dristribution Reference Book. Westinghouse, 1944.