

Die Tabellen enthalten diejenigen Werte der höchsten Betriebsspannung, die in den Regeln des SEV über Genormte Werte der Spannungen, Frequenzen und Ströme (Publ. Nr. 159) als Normwerte aufgeführt sind. Zu jedem Normwert der höchsten Betriebsspannung werden dann bestimmte Werte der Stosshaltespannung und der industriefrequenten Prüfspannung des Materials sowie die Grenzwerte des Schutzniveaus vorgeschrieben. Ob schon die Betriebsspannungen der schweizerischen Netze zum Teil nicht mit den Normwerten zusammenfallen, sollen trotzdem für das Hochspannungsmaterial nur Normwerte vorgeschrieben werden.

Man geht dabei so vor, dass man sich über die wirkliche höchste Betriebsspannung einer Anlage klar wird und im weiteren ausschliesslich mit dem nächst höheren genormten Wert der höchsten Betriebsspannung operiert. Es werden also für die Stosshaltespannung und die industriefrequente

Prüfspannung nur die in den Tabellen aufgeführten Normwerte verwendet, aber keine interpolierten Werte.

Eine Abweichung ist für Überspannungsableiter vorgesehen, die ohne Schwierigkeit feiner abgestuft werden können. Ferner dürfen für die Spannung der 15- und 20-Minuten-Prüfung von Kabeln Zwischenwerte verwendet werden. Für alles übrige Material verlangen dagegen die Koordinationsregeln eine Beschränkung auf die in den Tabellen aufgeführten Normwerte. Diese Regeln legen also nicht nur die Isolationsforderungen an das Material mit Rücksicht auf die in den Anlagen vorkommenden Beanspruchungen fest, sondern sie bilden gleichzeitig auch die Grundlage für die Normung des Materials hinsichtlich seiner Isolationsfestigkeit.

Adresse des Autors:

Dr. sc. techn. W. Wanger, Vizedirektor der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

## Überspannungen und Überspannungsschutz

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV am 7. März 1957 in Bern,

von K. Berger, Zürich

621.316.93 : 621.31.048

In diesem Vortrag kann es sich bei der knappen verfügbaren Zeit nur um eine sehr gedrängte Zusammenfassung des heutigen Standes der Kenntnisse handeln. Dabei interessiert uns hier in erster Linie der Zusammenhang der Überspannungen mit der Bemessung der Isolation und mit der Beanspruchung der Überspannungsableiter. Wir fragen somit vor allem nach der Häufigkeit, Höhe und Form der Überspannungen verschiedenen Ursprungs. Anschliessend sollen die Schutzmöglichkeiten kurz dargestellt werden. Um nicht allzusehr statistisch und trocken zu werden, sollen am Schluss einige Beispiele von Überspannungsvorgängen und ihrer Darstellungsweise beschrieben werden. Für jene Zuhörer, die sich für Einzelheiten interessieren, sind am Ende einige Literaturhinweise beigefügt.

### I. Überspannungen

#### 1. Atmosphärische Überspannungen

Was uns Elektriker interessiert, ist die Häufigkeit der direkten Blitzeinschläge in Masten und Stationen, und der Stromverlauf des Blitzes, der die Ursache der wesentlichen Überspannungen ist. Zwei Messmethoden stehen zur Verfügung:

Blitzmessung mit Oszillographen in allen Einzelheiten dort, wo Einschläge häufig vorkommen, und Messungen an Hochspannungsleitungen mit sehr vielen, verteilten Messmitteln, die entsprechend einfach und billig sein müssen.

Im folgenden sei die Häufigkeit der auf Hochspannungsleitungen in der Schweiz zu erwartenden Blitzeinschläge mit deutschen Stahlstäbchenmessungen verglichen.

Aus den Zahlen der Tab. I ergibt sich für den Monte San Salvatore eine jährliche Blitzeinschlagszahl von total etwa 33, jedoch von nur etwa 5, sofern

nur die Blitze mit kräftigem Anfangsstoss von mehr als 5 kA, die bestimmt von den Wolken gegen den Boden vorwachsen, gezählt werden. Wie dieses Vorwachsen erfolgt zeigt Fig. 1.

Anzahl der gemessenen Blitzeinschläge auf dem Monte San Salvatore 1947...1954 Tabelle I

Benennung	In 8 Jahren		Mittel pro Jahr		Bemerkungen
	total	mit Anfangsstoss	total	mit Anfangsstoss	
Positive Blitze (+)	54	13	≈ 7 <sup>1)</sup>	1,6	Bis 1950 1 Auf- fangturm, ab 1951 2 Auf- fangtürme in Betrieb.
Negative Blitze (-)	197	27	≈ 25 <sup>1)</sup>	ca. 3,5	
± Blitze	13	2	1,6	0,25	
Total	264	42	33	5,2	

Mittlere Anzahl Blitzeinschläge mit Anfangsstoss (Vorwachsen nach unten): 5,2 pro Jahr. Das Einzugsgebiet beträgt 1...2 km<sup>2</sup> (Schätzung).

<sup>1)</sup> Maximale Einschlagzahl im Jahre 1954: 12 positive und 68 negative Blitze.

Wenn mit einem Einzugsgebiet des San Salvatore von 1...2 km<sup>2</sup> und mit einem Streifen von 2,5...3mal Leitungshöhe bei Freileitungen gerechnet wird, wäre im Mittelland etwa mit folgenden Einschlagzahlen kräftiger Blitze zu rechnen:

Für 10 m hohe Leitungen 1 Blitz pro Jahr auf etwa 16...32 km Leitungslänge;

Für 20 m hohe Leitungen 1 Blitz pro Jahr auf etwa 7...14 km Leitungslänge.

Zum Vergleich seien die Resultate der deutschen Stäbchenmessungen erwähnt [1]<sup>1)</sup>. In den Jahren 1933...1940 wurden mittels maximal 115 000 Stahlstäbchen auf 2000 km deutschen Leitungen von 15...220 kV total 1434 Einschläge festgestellt. Das

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

gibt einen Blitz pro Jahr auf etwa 11 km Leitungslänge. An anderer Stelle erwähnt *H. Baatz* für Deutschland eine mittlere Einschlagshäufigkeit von einem Blitz pro Jahr auf etwa 9 km Leitungslänge.

Aus diesem Zahlenvergleich geht hervor, dass die Einschlagshäufigkeit für Leitungen als zu klein geschätzt wird, wenn nur die nach unten wachsenden Blitze mit kräftigem Anfangsstromstoss berücksichtigt werden. Um klarer zu sehen, haben wir in Fig. 2 die Häufigkeitskurven der Blitzeinschläge des Monte San Salvatore aufgezeichnet, und eine Häufigkeitskurve der Mastströme nach den deutschen Messungen von *Baatz* reproduziert. Da diese nur Ströme von mindestens etwa 2,5 kA berücksichtigt, haben wir auch für den Monte San Salvatore eine Kurve gezeichnet, die für Blitzströme > 2,5 kA gilt, sowie eine weitere für Ströme > 5 kA. Diese beiden Kurven decken sich annähernd. Sie decken sich aber auch mit guter Näherung mit der deutschen Kurve für Mastströme. Auch daraus geht hervor, dass offenbar auch in der Ebene Blitzströme in Masten vorkommen, die nicht aus solchen Blitzen stammen, die von der Wolke gegen die Erde vorwachsen, sondern, dass kleinere Ströme, ähnlich wie auf dem Monte San Salvatore, aus Büschelentladungen eines

Fig. 2 zeigt ferner, dass die Häufigkeitskurven sehr verschieden ausfallen können, je nachdem, wo die untere Messgrenze gewählt wird, und dass die Blitzströme in Masten nur recht selten (je nach

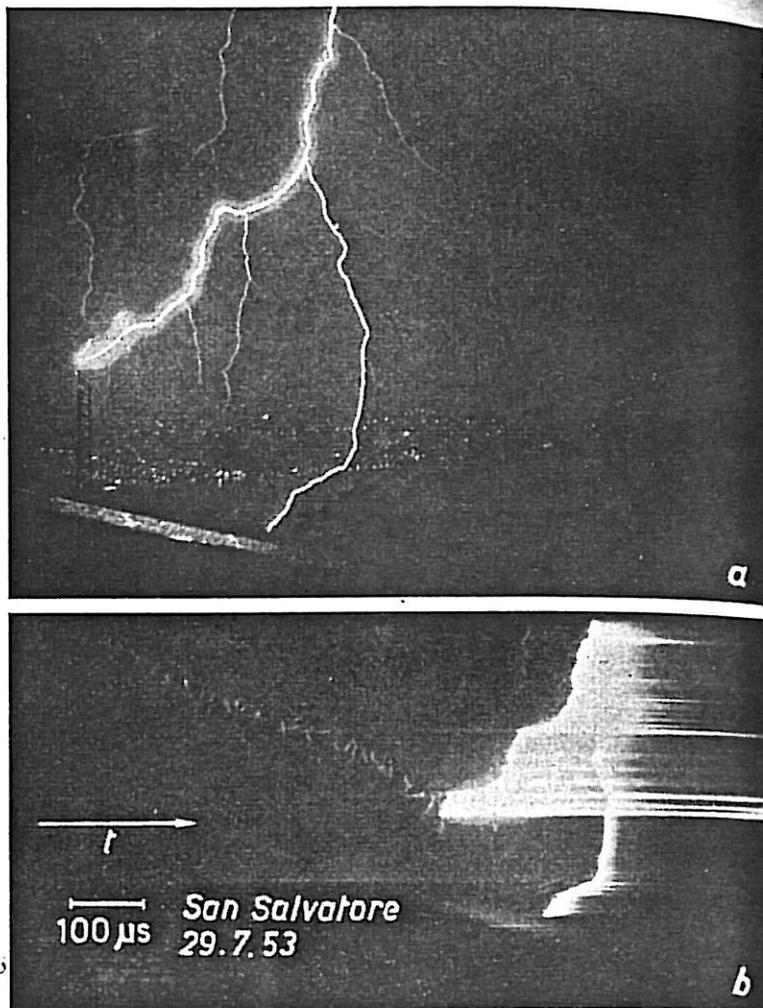


Fig. 1

Ruckweise vorwachsender Blitz

a Aufnahme mit Leica-Kamera; b Aufnahme mit Boys-Kamera (grosse Filmgeschwindigkeit)

Mastes im Moment eines Blitzes zu entstehen scheinen. Leider sind die photographischen Beweise für diese Hypothese noch zu knapp, um Genaueres zu sagen. Wir bemühen uns zurzeit, diese Vorgänge auf dem Monte San Salvatore zu klären.

der untern  $i_{max}$ -Grenze der Statistik in etwa 2...7% aller Fälle) 60 kA übersteigen. Ströme von 20...30 kA dürften den normalen Strom eines Blitzes darstellen. Blitzgiganten von über 100 kA kommen vor, sind aber sehr selten.

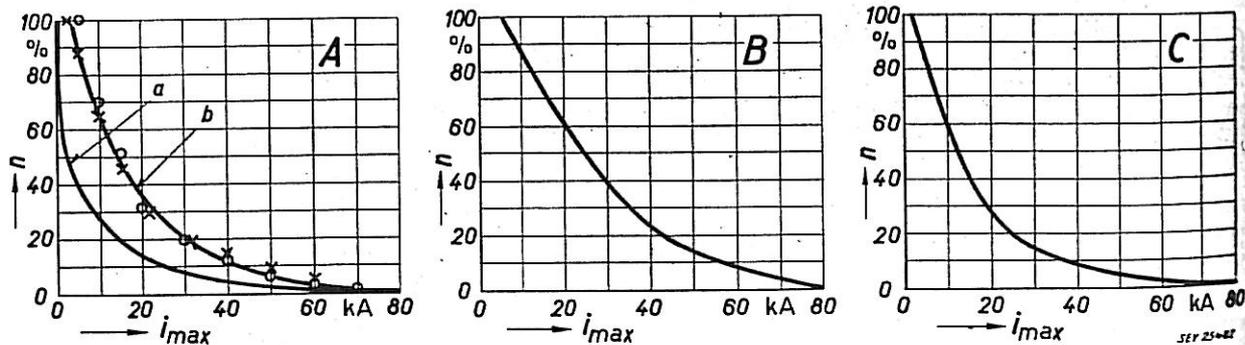


Fig. 2

Häufigkeit der Blitzstrom-Maxima auf dem Monte San Salvatore 1947...1954

n Anzahl Blitzeinschläge;  $i_{max}$  Blitzstrom-Maximum  
 A Sämtliche Blitzstrom-Oszillogramme  
 a  $i_{max} > 30$  A  
 b  $\times i_{max} > 2,5$  kA  
 o  $i_{max} > 5$  kA

B Blitze mit Anfangs-Stoss  
 $i_{max} > 5$  kA (nach unten vorwachsende Blitze)  
 C Mastströme nach deutschen Messungen mit Stahlstäbchen  
 $i_{max} > 2,5$  kA (nach Baatz)

Bull.  
 Die  
 entwe  
 in Ph  
 leitun  
 übers  
 Maste  
 Fälle  
 hoher  
 leitun  
 genlei  
 (Eisei  
 festge  
 dete,  
 sind,  
 schen  
 ten a  
 zwisch  
 Für  
 auch  
 ungefi  
 muss,  
 konsta  
 figkeit  
 derjen  
 sie au  
 bezoge

Fig.  
 ponen  
 Übers  
 schlag  
 heit v  
 lenwid

den R  
 mittler  
 1000 k  
 Bei  
 Erdsei

Die atmosphärischen Überspannungen entstehen entweder durch den direkten Einschlag des Blitzes in Phasenseile (normaler Fall bei den Holzstangenleitungen ohne Erdseile) oder dann durch den Rücküberschlag von Eisenmasten auf die Phasen, sofern Masten oder Erdseile getroffen werden. Für beide Fälle lässt sich aus der Häufigkeit verschieden hoher Blitzströme die Häufigkeit jener Fälle ableiten, wo es zum Leitungskurzschluss (Holzstangenleitung) oder zum Rücküberschlag kommt (Eisenmasten). Ohne auf Zahlen einzutreten, darf festgestellt werden, dass nicht nur schlecht geerdete, sondern auch sehr hohe Masten blitzgefährdet sind, erstere wegen des mehr oder weniger Ohmschen Spannungsabfalls in der Masterdung, die zweiten auch wegen des induktiven Spannungsabfalls zwischen Mastkopf und Mastfuß.

Für die Form der Blitzüberspannungen ist anzunehmen, dass diese sich bei Holzstangenleitungen ungefähr mit der Form des Blitzstroms decken muss, weil eine solche Leitung mit ihrem annähernd konstanten Wellenwiderstand wirkt. Auch die Häufigkeit verschieden hoher Überspannungen muss mit derjenigen der Blitzströme übereinstimmen, wenn sie auf die Überspannung an der Einschlagstelle bezogen wird.

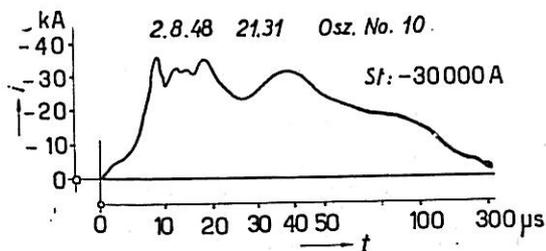


Fig. 3  
1. Beispiel eines Blitz-Stoßstromes

Fig. 3 und 4 geben zwei Beispiele von Stosskomponenten des Blitzstroms und damit der Form der Überspannung auf Holzstangenleitungen beim Einschlagspunkt [2]. Mit einer mittlern Blitzstromsteilheit von 10 kA/ $\mu$ s und einem resultierenden Wellenwiderstand der Holzstangenleitung nach bei-

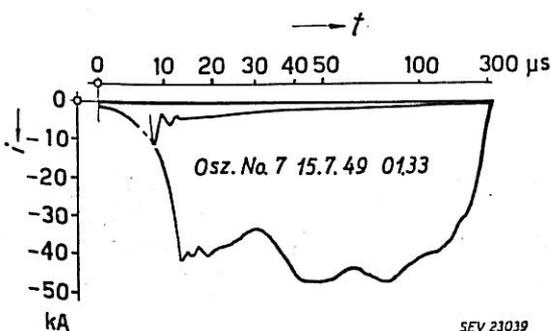


Fig. 4  
2. Beispiel eines Blitz-Stoßstromes

den Richtungen von etwa 100  $\Omega$  ergibt sich eine mittlere Steilheit am Einschlagort von etwa 1000 kV/ $\mu$ s.

Bei Eisenmastleitungen spielt die Anzahl der Erdseile eine mehrfache Rolle: diese verhindern

den Einschlag in die Phasen und setzen den wirksamen Erdungswiderstand herab.

Aus den bereits erwähnten deutschen Stahlstäbchenmessungen [1] folgt, dass in den acht Beobachtungsjahren von 1933...1940

bei Leitungen ohne Erdseil	von 247 Einschlägen 128 (52%)
bei Leitungen mit 1 Erdseil	von 1013 Einschlägen 219 (22%)
bei Leitungen mit 2...3 Erdseilen	von 174 Einschlägen 10 (6%)

zu Störungen führten.

Die Ursache der Verbesserung des Schutzes durch mehrere Erdseile dürfte z. T. auch darin liegen, dass mehrere Erdseile nur bei sehr hoher Leitungsisolation angewendet werden.

Ziffern über die Störungshäufigkeit von Höchstspannungsleitungen durch Blitzschlag in einigen europäischen Ländern finden sich im CIGRE-Bericht Nr. 302 (1952) des Autors.

Die Form der Überspannungen beim Rücküberschlag ist wesentlich verschieden von der Form des Blitzstromes. Die Front der Spannung ist durch den Überschlag bedingt und dementsprechend sehr steil, am Ursprungsort vermutlich knapp 1  $\mu$ s. Die Dauer der Überspannung wird vom Verlauf des wirksamen Erdungswiderstandes bedingt. Da sich der Strom mit der Zeit auf immer mehr Masten verteilt, würde

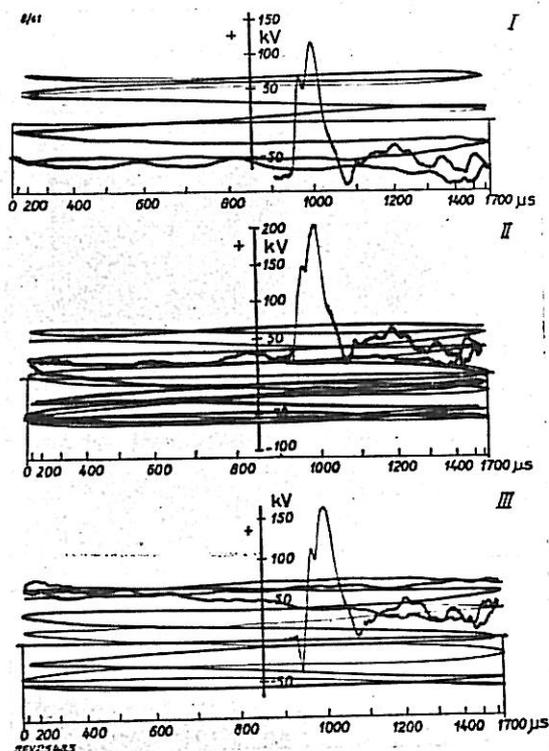


Fig. 5  
1. Beispiel einer Blitz-Überspannung

selbst für einen Blitzstrom unendlicher Dauer die Überspannung nur eine Spitze von begrenzter Dauer aufweisen. Dieser Überspannungsverlauf kann bei gegebenem Blitzstromverlauf am einfachsten durch eine Messung, z. B. mit Hilfe eines Netzmodells für Ausgleichvorgänge («Analog Computer») bestimmt

werden. Wir hoffen in Bälde in den Besitz eines solchen Modells zu kommen.

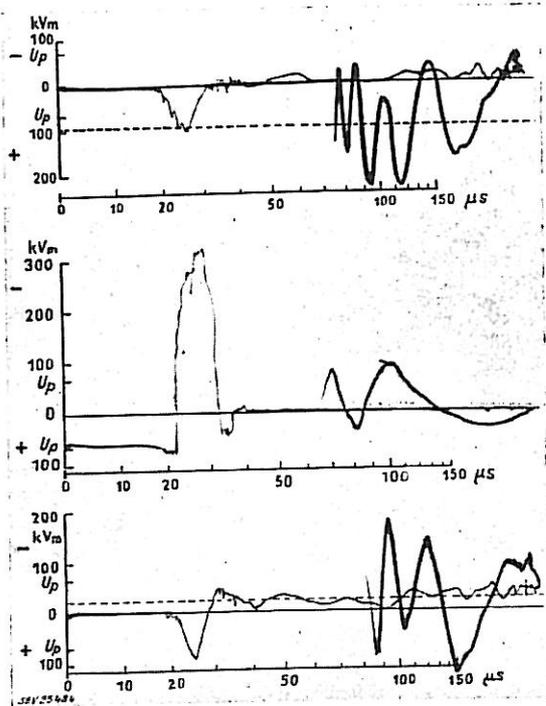


Fig. 6  
2. Beispiel einer Blitz-Überspannung

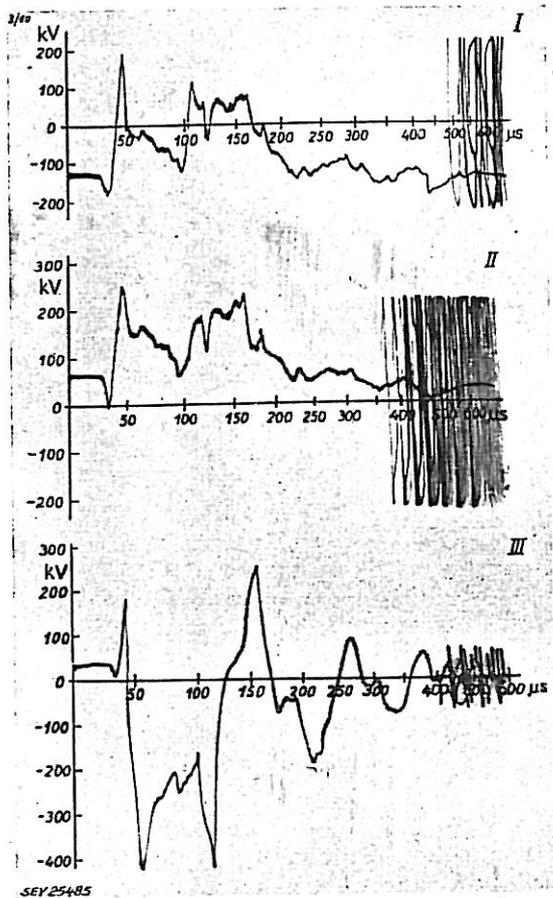


Fig. 7  
3. Beispiel einer Blitz-Überspannung  
I, II, III Phasen des Drehstromnetzes

Aus den vielen Oszillogrammen, die wir in der Schweiz zwischen 1930...1937 mit unserem Eisenbahn-Messwagen gemessen haben, folgen nachstehend drei Beispiele von Überspannungen auf Eisenmastleitungen [2] (Fig. 5...7).

Wie sich diese Überspannungen in der Nähe des Blitzeinschlages auf Kabel und auf Kavernenkraftwerke auswirken, soll am Schluss der Arbeit anhand einiger Beispiele gezeigt werden.

### 2. Innere Überspannungen

#### a) Schalt-Überspannungen an Transformatoren

Die im Bereich kleiner Ströme fallende Charakteristik des Lichtbogens bewirkt Abreissen des Schalterlichtbogens ausserhalb des stationären Stromnulldurchgangs. Der am Schalter plötzlich auf Null reduzierte Strom fliesst im Transformator weiter und muss nun seinen Weg in die am Transformator liegende Kapazität nehmen und diese aufladen. Alle technischen Hochspannungsschalter haben diese unangenehme Eigenschaft in einem gewissen Strombereich, denn alle sind Lichtbogenschalter. Ob in einem bestimmten Fall grosse Leer-schaltüberspannungen auftreten oder nicht, hängt vor allem davon ab, ob der im Verlauf der Abschaltung auftretende Leerlaufstrom des Transformators in das für jeden Schaltertyp charakteristische Abreisgebiet fällt oder nicht. Dabei ist zu beachten, dass im Verlauf der Abschaltung, insbesondere wenn im Verlauf mehrerer Halbwellen Rückzündungen vorkommen, der Leerlaufstrom stark unsymmetrisch und daher viel grösser werden kann als sein stationärer Wert.

Als Hilfsmittel gegen übermässige Überspannungen kommen bisher Parallelwiderstand zum Schalter oder Parallelkondensator zum Transformator in Betracht. Das Unangenehme ist beim Widerstand, dass dieser der Leerlaufimpedanz des Transformators ungefähr angepasst sein muss. Bei richtiger Bemessung ist dieser Schalterwiderstand sehr wirksam. Ein äusserst wertvolles Nebenprodukt desselben ist die Reduktion des asymmetrischen Einschaltstromstosses, der bei modernen Transformatoren bald die Grösse des Kurzschlußstromes erreicht. Nach der Erfahrung des Autors verhindert er Schalterauslösungen durch den Differentialschutz wegen allzu grosser und langdauernder Einschaltströme zuverlässiger als alle heute dazu konstruierten speziellen Differentialrelais, die gegen diesen Einschaltstoss unempfindlich sein sollen.

Ein zweites Mittel gegen zur grosse Überspannungen sind Parallelkondensatoren  $C$  zum Transformator, sofern sie so bemessen sind, dass sie bei der Umlagerung der vollen magnetischen Energie des Transformators  $i^2L/2$  in Kapazitätsenergie  $u^2C/2$  noch keine unzulässig hohe Spannung  $u$  ergeben. Dies heisst, dass die Ladeleistung des Kondensators mindestens  $1/3...1/2$  der Leerlaufleistung des Transformators sein muss. Die Wirksamkeit solcher Kondensatoren wird bei Schaltern, die im Verlauf mehrerer Halbwellen rückzünden, dadurch in Frage gestellt, dass dabei ein asymmetrischer Leerlaufstrom entstehen kann, der ein Vielfaches des stationären Wertes beträgt. In der Praxis kommt

dieser Kapazitätsschutz bei Kavernenkraftwerken in Betracht, wo die Transformator-Oberspannung mit dem abgehenden Kabel einen Block bildet, der nur gesamthaft zu- und abgeschaltet werden kann.

Eine Berechnung der Leerschaltüberspannungen von Transformatoren ist nur in den einfachsten Fällen möglich, wo die Verfestigung der Schaltstrecke als eindeutige Zeitfunktion bekannt ist [3]. Bei Schaltern mit unregelmässiger Verfestigung hängt sie in erster Linie vom Rückzündspiel ab, das

sich leider nur beim Luftschalter einigermaßen eindeutig reproduzieren lässt.

Wir haben für das Schalterkomitee der Commission Electrotechnique Internationale (CEI) die Resultate von schweizerischen Versuchen über die Höhe von Schaltüberspannungen an leerlaufenden Transformatoren zusammengestellt [4]. Tab. II zeigt eine Übersicht, aus der die in den verschiedenen Fällen mit Kathodenstrahl-Oszillographen gemessenen Überspannungen ersichtlich sind. Genauere Werte und Einzelheiten sind im Bericht [4] zu finden.

Die Verhinderung der Leerschalt-Überspannungen an Transformatoren durch Ableiter ist energiemässig ohne Schwierigkeit möglich. Schalterwiderstände ermöglichen einen weitergehenden Schutz als Ableiter.

Überspannungen beim Abschalten leerlaufender Transformatoren Tabelle II

Netzspannung $U_N$ kV	Transformatorleistung $P$ MVA	Anzahl Schaltungen	Parallelwiderstand	Überspannung $k \cdot U_{ph}^1$	Schema
150	23,3	60	ja		
150	23,3	20	—		
150	23,3	31	ja		
47	23,3	51	ja		
10/17	3 3x3	111	—		
15	3	13	—		
220	60	43	ja		
50	16,5	20	—		
50	16,5	10	ja		
145	16,5	20	—		
140	3x15	14	—		
46	3x15	13	—		
48	5,75	13	—		
6,2	5,75	9	—		
50	16,5	35	—		
50	16,5	46	ja		
46/53	23,3	47	—		
150	23,3	12	—		

<sup>1)</sup>  $U_{ph}$  Phasenspannung;  $k$  Faktor.

b) Schaltüberspannungen an Leitungen und Kondensatoren

Im Gegensatz zu den Transformatoren ist bei Leitungen und Kondensatoren der Energieinhalt nicht mit dem Strom, sondern mit der Spannung  $u$  verknüpft. Es ist deshalb für den Kondensator ohne Schwierigkeit zulässig, den Ladestrom bei irgend einem Wert plötzlich zu unterbrechen; die Ladung des Kondensators bleibt dann konstant, und mit ihr die Ladeenergie. Falls bei diesem Stromunterbruch die Festigkeit der Schaltstrecke rascher wächst als die wiederkehrende Spannung, so ist die Abschaltung ohne Überspannung ausgeführt. Die wiederkehrende Spannung kann nun allerdings eine Ausgleichskomponente mit der Eigenfrequenz des speisenden Netzes enthalten, wenn dieses induktiv ist, was gewöhnlich der Fall ist. Der netzseitige Vorgang hat dann Ähnlichkeit mit dem Leerschalten von Transformatoren: Überspannungen entstehen auf der speisenden Seite infolge Abreissens des Stroms im Schalterlichtbogen.

Die aus der Literatur wohlbekannten Überspannungserscheinungen auf der Leitungsseite entstehen in der Folge von Rückzündungen mit grossen Spannungssprüngen, z. B. nach einer Strompause von  $+u_{max}$  bis  $-u_{max}$  der Netzspannung, d. h. bei Rückzündungen im Tempo einer Halbwelle. Die jedes Mal einsetzende Netzschwingung kann sich im ungünstigsten Fall theoretisch auf gefährliche Spannungen aufschaukeln. Praktisch ist jedoch der für das Aufschaukeln erforderliche Verlauf der Schalter-Verfestigung so unwahrscheinlich, dass die praktischen Leitungs-Überspannungen mit Rückzündungen selten mehr als das 2,5fache der geschalteten Spannung erreichen. Die Werte hängen jedoch stark von der Netz-Disposition ab. Sie lassen sich nur berechnen, wenn die Verfestigungskurve des Schalters eindeutig bekannt ist. Ohne Rückzündungen im Schalter entstehen auf der Kapazitätsseite theoretisch und nach mehreren Versuchsreihen auch praktisch überhaupt keine nennenswerten Überspannungen, ob es sich um Leitungen oder Kondensatorbatterien handelt. An langen Leitungen bleiben lediglich Wanderwellenschwingungen kleiner Amplitude bestehen. Die weitgehende Vermeidung von Rückzündungen scheint bei Höchst-

spannungsschaltern nur durch Serieschaltung einer genügenden Anzahl seriegelagerter Unterbrechungsstellen möglich zu sein.

Aus dem bereits erwähnten Bericht für die CEI [4] wurden in Tab. III die wichtigsten Resultate kurz zusammengefasst. Es ist daraus ersichtlich, dass sehr oft die Überspannung auf der speisenden Seite grösser ist als auf der Seite der leerlaufenden Leitung. Von besondern Netzdispositionen abgesehen und sofern nicht anomal langsame Schalter verwendet werden, sind die Überspannungen wesentlich kleiner als beim Schalten leerlaufender Transformatoren.

Überspannungen bei Abschaltversuchen leerlaufender Leitungen in Hochspannungsnetzen

Tabelle III

Netzspannung $U_N$ kV	Leitungslänge km	Anzahl Schaltungen	Überspannung $k \cdot U_{ph}^1)$	Schema
140	48	7		
48	8	14		
138	24,5	17		
$\frac{235}{\sqrt{3}}$	160	12		
220	136...474	8		
220	828	2		
220	19,5...240	12		
220	18	1		
220	214...420	23		
110	35,7 + 15,7 Kab.	8		
220	72...480	24		

<sup>1)</sup>  $U_{ph}$  Phasenspannung; k Faktor.

Die Verhinderung der anomalen Leitungsüberspannungen durch Ableiter bedingt eine Energieaufnahme, die viel höher ist als z. B. beim Schutz leerlaufender Transformatoren. Die Lösung liegt hier nach Auffassung des Autors nicht in der Verwendung von Ableitern, sondern in der Verwendung geeigneter Schalter. Der Autor ist auf Grund des Studiums des vorliegenden Messmaterials zur Auffassung gelangt, dass sich eine Reduktion der Leitungsisolation bei 220 und 380 kV gegenüber dem heute üblichen Mass bei Verwendung günstiger Schalter technisch durchaus erwägen lässt.

c) Erdschluss-Überspannungen

Die Bedeutung von Erdschluss-Überspannungen liegt weniger in ihrer grossen Höhe als in ihrer räumlich grossen Ausdehnung. Das gesamte Netz wird nach Abklingen der Ausgleichsschwingung während der ganzen Erdschlussdauer einer 50-Hz-Spannung gegen Erde unterworfen, die auf den gesunden Phasen der vollen verketteten Spannung

gleichkommt. Die vorübergehenden Ausgleichsspannungen beim Erdschluss erreichen die doppelte verkettete Spannung nur in sehr seltenen Fällen [5; 6]. Da eine solche «Spannungsprüfung» freiwillig wohl in keinem Betrieb durchgeführt wird, fallen eben faule Isolationen beim unfreiwilligen Erdschluss aus. Es ist dies ein typischer Betriebsfall, wo die Störung nicht durch übermässig hohe Überspannung, sondern durch die Schwäche des gealterten Isoliermaterials bedingt ist.

Der Erdschluss ist in diesem Sinn die Spannungsprüfung, die nicht auf Risiko und Verantwortung des Betriebsleiters durchgeführt wird, sondern als Fall «höherer Gewalt». Dies gilt besonders beim aussetzenden Erdschluss, wo das Netz durch jeden Einschwingvorgang zusätzlich «geschüttelt» wird. Für die Ableiter bedeuten die Erdschlüsse, dass ein Ansprechen bei einer mittelfrequenten Ausgleichsspannung von  $2 U_N$  an ihren Klemmen nicht stattfinden darf.

d) Resonanz-Überspannungen

Resonanz-Überspannungen spielen praktisch nur eine Rolle im Zusammenhang mit gesättigten Eisenkernen, vor allem mit induktiven Spannungswandlern. Die Erscheinungsformen dieser Ferro-Resonanz sind äusserst mannigfaltig, da sie mit der Sättigung und Remanenz des Eisens zusammenhängen, und somit nichtlinearer Natur sind [7]. Die Abhilfe geschieht durch Dämpfen oder Verstimmen, wobei beim Verstimmen zu beachten ist, dass der Frequenzbereich der Ferro-Resonanz viel breiter ist, als jener des linearen Kreises ohne Sättigung. Ableiter kommen hiezu nicht in Frage.

e) Zwei Spezialfälle

In einem gelöschten Netz mit Doppel-Erdschluss erfolgt der Nulldurchgang des Kurzschlußstromes mit  $90^\circ$  Phasenverschiebung gegenüber dem Nulldurchgang des Löserspulenstromes. Wird zu dieser Zeit der Schalter zwischen Spule und Netz geöffnet, so bleibt der volle Spulenstrom bestehen. Der zur Spule parallele Kondensator wird dann auf grosse Überspannung geladen, wenn er klein ist [8]. Dieser Fall lässt sich dadurch vermeiden, dass dafür gesorgt wird, dass die Löserspule an den Leitungen angeschlossen bleibt.

Der zweite Spezialfall betrifft den Kurzschluss am Ende langer Leitungen bei schwacher Speisung [9]. Tritt nach einem Nulldurchgang des Kurzschlußstromes im Schalter beim Anstieg der wiederkehrenden Spannung eine Lichtbogenzündung auf, so entstehen in der neuen Stromhalbwellen überlagerte Wanderwellenschwingungen. Wenn der Wanderwellenstrom gleicher Grössenordnung ist wie der betriebsfrequente Kurzschlußstrom, so können durch die Überlagerung beider Ströme im Schalter Nulldurchgänge zu Zeiten entstehen, wo der Transformatorstrom durchaus nicht Null ist. Dieser Vorgang bringt noch keine Überspannung mit sich. Zündet jedoch der Schalter im Tempo der Wanderwellenspannungsspitzen, so entsteht ein taktmässiges Aufschaukeln, das zum Überschlag der Leitung vor allem an deren Enden führen kann.

In beiden erwähnten Spezialfällen entstehen Überspannungen dadurch, dass der Schalterstrom Nulldurchgänge aufweist, die in Induktivitäten (Transformatoren) gleichzeitig nicht vorhanden sind. Die Überspannung kommt durch das Zusammenwirken von Lichtbogenschalter und Netz zustande, wobei der Schalter pflichtgemäss beim Nulldurchgang löscht. Im ersten Fall lässt sich die Überspannung auch ohne Rückzündung nicht vermeiden; im zweiten Fall entsteht wie beim Leitungsschalten eine Überspannung erst im Verlauf von Rückzündungen. Dabei ist lediglich das gefährliche Tempo der Zündungen verschieden. Es ist entweder von der Grössenordnung der Netzfrequenz oder der Wanderwellenfrequenz. Auch in diesen Spezialfällen empfiehlt es sich, die Überspannungen nicht mit Ableitern, sondern durch Behebung der Ursachen zu bekämpfen.

## II. Überspannungsschutz

### 1. Allgemeines

Die Stationsisolation soll auch nach der Neufassung der Regeln für die Koordination der Isolation des SEV so dimensioniert sein, dass sie den üblichen Schalt- und Erdschlussüberspannungen standhält. Ein Schutz ist in erster Linie gegen atmosphärische Überspannungen erforderlich. Die auf der Freileitung entstehenden atmosphärischen Überspannungen gelangen zu den Stationen und dürfen dort keinen Schaden verursachen. Die Höhe der Wellen kann auf Holzstangenleitungen ein hohes Vielfaches der Stationsisolation betragen. In solchen Fällen drängen sich Ableiter mit grossem Ableitvermögen auf.

Auf Eisenmastleitungen begrenzen die Leitungsisolation und die Dämpfung zwischen Einschlagstelle und Station die Überspannungen. In Durchgangsstationen mit mindestens drei Eisenmastleitungen an der gleichen Sammelschiene ist daher kein Schutz nötig.

Heute besteht die Tendenz, vom Ableiterschutz zu verlangen, dass er auch die anomal hohen Schaltüberspannungen infolge des Leerschaltens von Transformatoren unschädlich machen soll. In den USA geht eine weitere Tendenz dahin, dass von Höchstspannungsableitern auch verlangt wird, übermässige Überspannungen, die beim Abschalten leerlaufender Leitungen mittels schlecht geeigneter Schalter entstehen, durch den Ableiter begrenzen zu lassen.

### 2. Spannungsintervall zwischen Ableiter und Isolation

Gegenüber der ersten Auflage der Regeln für die Koordination der Isolation des SEV sind die Zahlenwerte der Ansprech- und Restspannungen der Ableiter bei den höhern Nennspannungen um etwa 10% höher gesetzt worden. Während früher die höchstzulässige Ableiterspannung das 0,75fache der 50%-Spannung der Luftisolation betrug, liegen die heutigen Ableiterspannungen beim 0,8fachen der Prüfstoßspannung (Haltespannung) des Isoliermaterials. Formell ist ein Abstand von 25% gewahrt worden, nur bezogen sich diese 25% früher auf das

obere, heute aber auf das untere Niveau, was einer Reduktion des Intervalls gleichkommt. Dafür sind andererseits nicht mehr beide 50%-Spannungen festgelegt, sondern die sichere Ansprechspannung des Ableiters (für 100%-Ansprechen) und die Haltespannung der Isolation (kein Überschlag, kein Defekt), was die klarere und sichere Lösung darstellt, solange nicht versteckte «Toleranzen» eingeführt werden.

Die neuen höhern Ableiterspannungen, die sich wieder stark den seinerzeit von der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) vor Bestehen der Koordination eingeführten Zahlenwerten nähern (siehe Tab. IV),

Ableiter Ansprech- und Restspannungen nach Regeln des SEV  
Tabelle IV

Nennspannung $U_n$	Leitsätze für den Schutz elektrischer Anlagen gegen atmosphärische Überspannungen Publ. Nr. 163 des SEV 1942	Regeln für die Koordination der Isolation Publ. Nr. 183 des SEV 1948	Regeln für die Koordination der Isolation Publ. Nr. 183 des SEV 1956	Nennspannung $U_n$
kV	kV	kV	kV	kV
10	54	54	55	12
20	93,5	86	95	24
30	133	116	125	36
45	192	165	185	52
60	255	206	245	72,5
80	—	270	—	—
110	467	367	410	123
150	637	495	560	170
220	935	720	800	245

können dadurch verantwortet werden, dass die international festgelegten und auch bei in der Schweiz eingeführten Prüfstoßspannungen des Materials gegenüber den frühern SEV-Werten etwa 10% höher gelegt wurden. Auf Grund der zahlreichen Stossversuche, welche die FKH in Anlagen durchgeführt hat, halten wir diesen minimalen Abstand von 25% der Ableiterspannungen oder 20% der Stossprüfspannung des Materials für das unumgänglich notwendige Minimum. Dies schon deshalb, weil wir mit dem Ableiter nicht nur die innere Isolation der Transformatoren, sondern auch die Luftisolation vor Überschlägen schützen wollen. Nach den Regeln für Koordination der Isolation des SEV soll dies auch in Höhenlagen bis 1000 m ü. M. noch gelten. Dort ist aber bekanntlich die Luftdichte schon etwa 13% und damit die Überschlagsspannung in Luft schon etwa 12% kleiner als der Garantiewert. Da die Ableiterspannungen unabhängig von den Luftdichten sind, so bleibt dann statt 20% praktisch noch ein Intervall von 8%. Dies ist ein äusserstes Minimum, sofern Überschläge auch dann verhindert werden sollen, wenn nicht nur ein Isolator, sondern eine Vielzahl solcher geschützt werden soll [10] und wenn sich der Ableiter nicht direkt am zu schützenden Isolator befindet, sondern z. B. im Leitungsfeld statt am Transformator, oder am andern Ende eines kurzen Kabels, wie noch an einem Beispiel gezeigt wird.

In der schweizerischen Praxis wirkt sich der paradoxe Umstand sehr günstig aus, dass unsere wich-

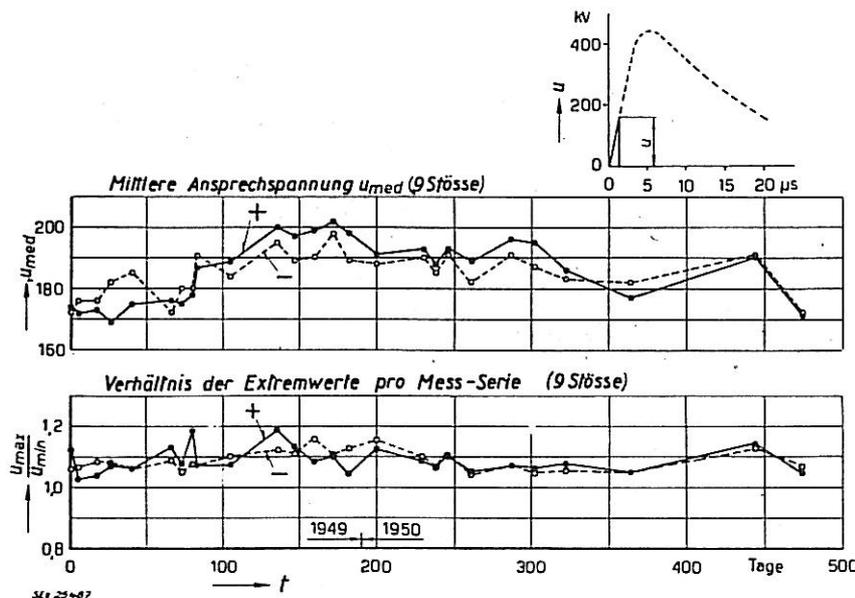
tigsten kleinsten Betriebsspannungen nicht den von der CEI und vom SEV genormten Werten entsprechen, sondern ca. 20% tiefer liegen, z. B. 8 und 16 kV, ebenso 50 kV. Da die Ableiter sehr leicht der Betriebsspannung angepasst werden können, erhöht sich das Spannungsintervall bis zum 10-, 20- oder 60-kV-Material glücklicherweise ganz wesentlich. Der Autor glaubt, dass der gute Erfolg unseres Ableiterschutzes hiedurch wesentlich mitbedingt ist.

### 3. Beschreibung einiger Ableiter

Alle modernen Ableiter beruhen auf der Verwendung von körnigem SiC, das bei minutiös durchgeführter Fabrikation ventilartige Eigenschaften



Fig. 8  
Siliziumkarbid-Kristall



SEV 25487

bei grossen Stromdichten züchten lässt. Fig. 8 zeigt einen SiC-Kristall, das Rohmaterial aller Ableiter-Widerstände.

Wesentliche Eigenschaften des Ableiters sind: Ansprech- und Restspannung, Charakteristik des Ansprechens und jene des Widerstandes, Betriebssicherheit und Konstanz der Ansprechspannung über Jahre (Fig. 9 und 10).

### 4. Schutzfunkenstrecken

Schutzfunkenstrecken sind nicht verpflichtet, den durch Überspannung entstandenen Lichtbogen zu löschen. Nach unserer Erfahrung beschränkt sich ihre Anwendung fast ausschliesslich auf Höchstspannungsnetze. Es handelt sich dabei fast durchwegs um Eisenmastleitungen einerseits und relativ gut isolierte Freiluftstationen, die gegen zulaufende Wellen geschützt werden sollen. Die günstigste Einbaustelle liegt auf den paar ersten Masten vor der Station. Sofern diese Strecke einen zuverlässigen Erdseilschutz gegen direkte Blitzschläge in die Phasen und andererseits gute Masterdungen aufweist, welche den Rücküberschlag verhindern, lässt sich trotz des verzögerten Ansprechens der Schutzfunkenstrecke ein recht guter Stationsschutz erreichen. Dies gilt insbesondere für Stationen mit einer gewissen Erdkapazität (z. B. Kabelzuleitungen). Der Polaritätseinfluss der Funkenstrecke lässt sich durch entsprechende Anordnung der geerdeten Elektrode praktisch zum Verschwinden bringen. Der Regen hat auf die Ansprechspannung der Stabfunkenstrecke praktisch überhaupt keinen Einfluss, wenn nur dafür gesorgt ist, dass das abfliessende Wasser die Schlagweite nicht als Faden überbrückt, d. h. durch Vermeidung vertikaler Schlagweiten. Der Nachteil der Schutzfunkenstrecken gegenüber Ableitern besteht bekanntlich in ihrer grösseren Ansprechverzögerung. Soll das Ansprechen in  $1 \mu s$  erfolgen, so ist eine Spannungsspitze erforderlich, die das 1,5...2-fache der 50%-Spannung beträgt. Diese Spitze braucht sich in der Praxis durchaus nicht auszuwirken; vor allem tut sie es dann nicht, wenn sie über eine auch nur kleine Kapazität läuft, die sie unter starker Spannungssenkung verschluckt.

### 5. Kabel und Kondensatoren

Für beide Elemente ist zu sagen, dass sie praktisch aus andern Gründen als jenen des Überspannungsschutzes verwendet werden,

Fig. 9  
1. Beispiel eines Überspannungsableiter-Dauerversuches  
 $S(u_{med}) = \pm 8,9\%$   
 $S(u_{med})$  Gaußsche Streuung der mittleren Ansprechspannung;  $u_{med}$  Scheitelwert der mittleren Ansprechspannung;  $u$  Ansprechspannung;  $t$  Zeit

dass sie aber einen wertvollen Beitrag an diesen Schutz leisten. In den neuen Regeln für die Koordination der Isolation des SEV hat die Bedeutung

dieser Elemente nicht geändert, dagegen nimmt ihre praktische Bedeutung ohne Zweifel rasch zu. Beschränken wir uns auf zwei Beispiele, welche zwei häufig gestellte Fragen theoretisch beantworten sollen.

Das erste Beispiel betrifft den Schutz eines Kavernenkraftwerkes mit Hilfe von Schutzfunkenstrecken auf den ersten Masten vor dem Übergang von der Freileitung zum Kabel.

Fig. 11 zeigt den Spannungsverlauf am Ende des Kabels, das heisst am Transformator, sofern eine sehr hohe und steile Welle durch den Blitzeinschlag in eine Phase beim ersten Mast oder un-

Schutzniveau eingestellt ist. Die Spannungsspitze  $u_0$  beträgt dann 1,5...2mal die 50%-Spannung, d. h. 1,5...2faches Schutzniveau. Der Mast soll so gut ge-

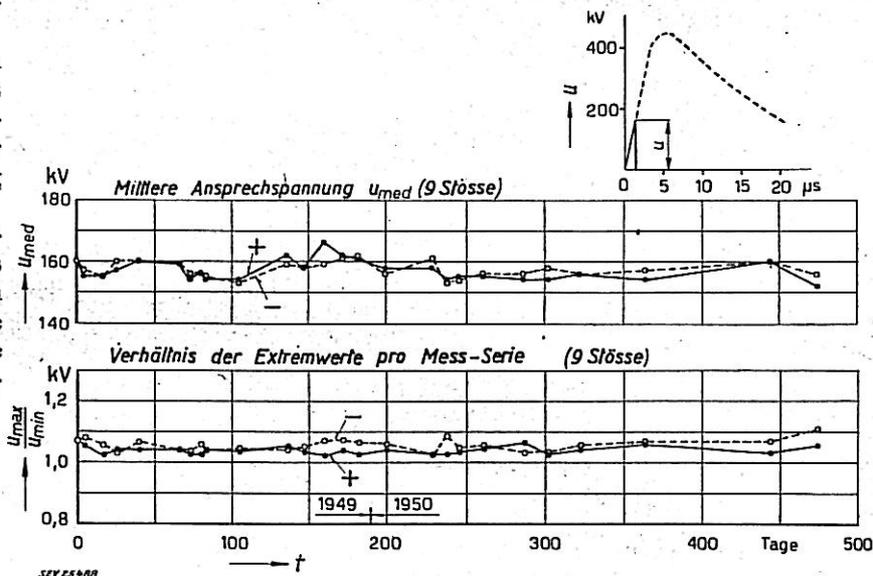


Fig. 10  
2. Beispiel eines Überspannungsableiter-Dauerversuches  
 $S(u_{med}) = \pm 4,4\%$   
Bezeichnungen siehe Fig. 9

weit davon entsteht. Die Spannung ist so steil angenommen, dass sie nach  $1 \mu s$  zum Überschlag der dortigen Schutzfunkenstrecke führt, die normal auf das

erdet sein, dass die Spannung nach dem Überschlag praktisch auf den Wert Null absinkt. Die erste Welle im Kabel ist von durchaus ungefährlicher Höhe. Im Verlauf des Wellenspiels, das hier mit Hilfe des ausführlichen «Wellenfahrplans» dargestellt ist, entsteht eine Spannung, die noch durchaus erträglich ist. Dies gilt um so eher, als die kurzen Spitzen im Kabel durch die Verluste ausgegli-

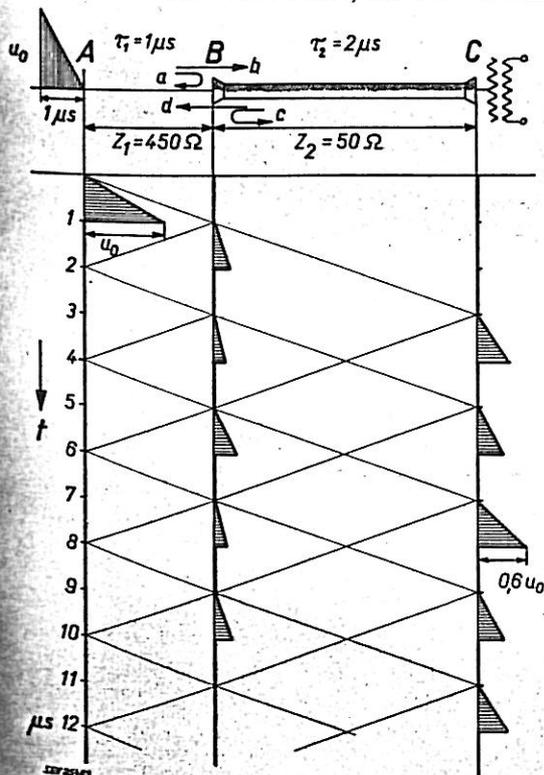


Fig. 11  
Schutzfunkenstrecke vor einem Kavernenkraftwerk  
 $t_a(u_0) = 1 \mu s$

A Standort des vom Blitz betroffenen Mastes, 300 m vom Punkt B entfernt; B Kabelanfang; C Kabelende; a Reflektionsfaktor für Wellen aus AB; b Brechungsfaktor für Wellen aus AB; c Reflektionsfaktor für Wellen aus BC; d Brechungsfaktor für Wellen aus BC;  $\tau_1$  Laufzeit einer Welle auf AB;  $\tau_2$  Laufzeit einer Welle im Kabel BC;  $u_0$  Überschlagsspannung beim Mast A;  $Z_1$  Wellenwiderstand der Freileitung AB;  $Z_2$  Wellenwiderstand des Kabels BC; t Zeit;  $t_a(u_0)$  Zeit bis zum Überschlag

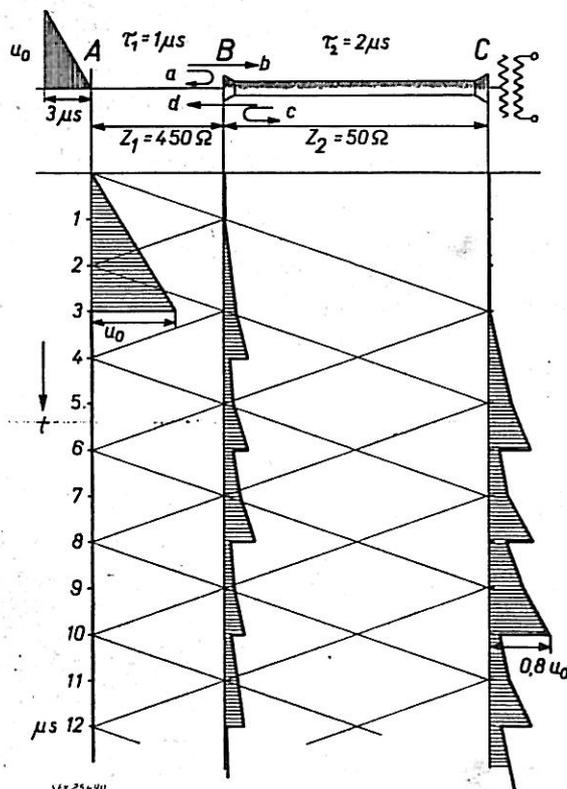


Fig. 12  
Schutzfunkenstrecke vor einem Kavernenkraftwerk  
 $t_a(u_0) = 3 \mu s$

Bezeichnungen siehe Fig. 11

chen werden. Die Überspannung wird mit wachsender Kabellänge im Vergleich zur Spannweite bis zum Blitzeinschlag immer kleiner. Sie wird grösser mit flacherer Welle auf der Freileitung, wie dies Fig. 12 zeigt.

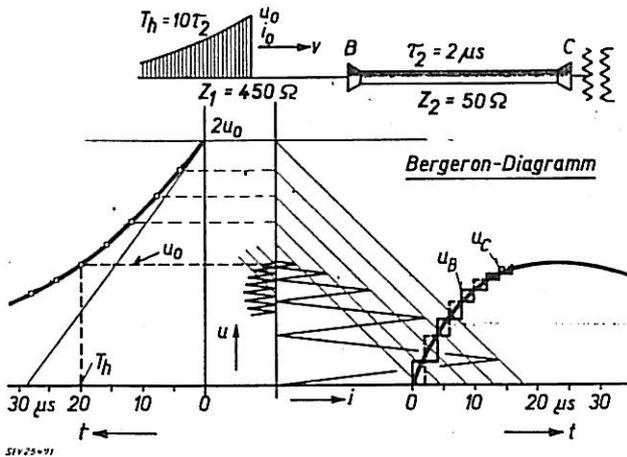


Fig. 13

Beanspruchung eines Kabels am Leitungsende (Kavernenkraftwerk) durch Blitzwelle mit  $T_h = 10 \tau_2$ .  $T_h$  Halbwertzeit der Blitzwelle;  $u_0, i_0$  Amplituden der Blitzwelle;  $u$  Spannung;  $u_B, u_C$  Spannungen in den Punkten B und C;  $v$  Wellengeschwindigkeit. Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 11

Der gefährlichste Fall ist nicht jener der grossen Steilheit und der dadurch bedingten erhöhten Ansprechspannung der Funkenstrecke, sondern jener der Welle, die gerade noch über die Funkenstrecke durchschlüpft, ohne sie zum Ansprechen zu bringen. Fig. 13 zeigt diesen Fall. Die Lösung der Aufgabe ist hier mit Hilfe eines Diagramms konstruiert, das von Bergeron 1937 angegeben wurde, und das für die Lösung ähnlicher Fragen ausserordentlich wertvoll und einfach ist [11]. Es wird im Beispiel eine Spannung am Transformator erreicht, die gerade ungefähr dem Schutzniveau  $u_0$  entspricht. Bei grösserer Wellendauer und gleichbleibender Kabellänge würde der Schutz ungenügend. Zusammenfassend darf gefolgert werden, dass im Fall naher Blitzeinschläge die Schutzfunkenstrecke dem Ableiter am Mast überlegen ist, währenddem für lange und flache Blitzwellen infolge entfernter Einschläge Ableiter und Schutzfunkenstrecken ungefähr gleichwertig sind. In allen Fällen wirkt der Schutz auf den letzten Masten besser als am Kabelanfang. Fig. 13 gibt auch Auskunft über die oft gestellte Frage, ob im Fall einer Station mit kurzen Kabelzuführungen der Ableiter am anlageseitigen oder freileitungsseitigen Ende des Kabels anzuschliessen sei. Aus der Lösung nach Bergeron ersieht man das treppenförmige Entstehen der Kabelspannungen für eine Blitzwelle, deren Halbwertzeit die 10fache Laufzeit im Kabel beträgt. Wo soll nun der Ableiter angeschlossen sein?

Je nach der Wellenhöhe und der Einstellung des Ableiters spricht einmal der Ableiter am Kabelanfang, das andere Mal am Kabelende zuerst an. Bezweckt der Ableiter den Schutz der Station, so ist er dort anzuschliessen. Ist dies nicht möglich, und muss er somit am Kabelanfang angeschlossen

werden, so ist am Kabelende mit einer um eine Stufe höheren Spannung zu rechnen, d. h. mit etwa 15% von  $u_0$  mehr als am Ableiter. An Eisenmastleitungen ist  $u_0$  durch die Leitungsisololation begrenzt, an Holzstangenleitungen nur durch die Holzstangen.

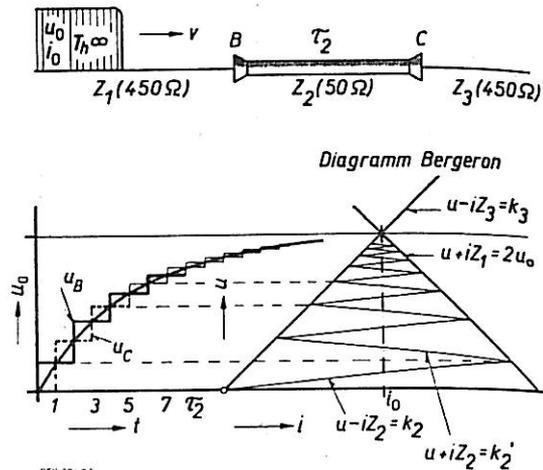


Fig. 14

Beanspruchung eines Kabels im Leitungszug durch lange Blitzwelle ( $T_h \gg \tau_2$ ).  $u, i$  Spannung und Strom;  $Z_1, Z_2, Z_3$  Wellenwiderstände. Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 11...13

Schliesslich zeigt Fig. 14 die Beanspruchung eines Kabelstückes im Zuge einer Freileitung durch eine sehr lange Blitzwelle, das heisst für den schlimmsten Fall. Die Spannung schaukelt sich in Bruchteilen von  $u_0$  auf bis auf den Endwert von  $u_0$ . Das Kabel wird somit samt seinen Endverschlüssen nicht höher beansprucht als mit  $u_0$ , das heisst mit der von der Leitungsisololation begrenzten Spannung. Handelt es sich um eine Eisenmastleitung, so dürfte der Fall praktisch für modernes Material immer gefahrlos sein. Für Holzstangenleitungen dagegen kann dies nicht gesagt werden, weil die Höhe von  $u_0$  beträchtlich sein kann, so dass eventuell schon die erste Stufe beim Kabeleingang zum Überschlag führt. Die Begrenzung von  $u_0$  auf Werte des Schutzniveaus mittels Eisenmasten oder einzelnen Funkenstrecken verhindert die Überspannungsfähigung des Kabels.

Das Problem der Überspannungen und des Schutzes ist auch heute noch sowohl theoretisch wie praktisch ausserordentlich reizvoll und vielseitig. Die Neufassung der Koordinationsregeln trägt dem Stand der Erkenntnisse weitgehend Rechnung. Sie dürfte u. E. für die nächsten Jahre eine gute Grundlage für die Praxis der Hochspannungsbetriebe bilden.

Literatur

- [1] Baatz, H.: Blitzeinschlag-Messungen in Freileitungen. ETZ Bd. 72(1951), Nr. 7, S. 191...198.
- [2] Berger, K.: Die Messeinrichtungen für die Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV Bd. 46(1955), Nr. 5, S. 193...201.  
Berger, K.: Resultate der Blitzmessungen der Jahre 1947...1954 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV Bd. 46 (1955), Nr. 9, S. 405...424.
- [3] Berger, K. und R. Pichard: Die Berechnung der beim Abschalten leerlaufender Transformatoren, insbesondere mit Schnellschaltern, entstehenden Überspannungen. Bull. SEV Bd. 35(1944), Nr. 20, S. 560...570.

Fortsetzung des allgemeinen Teils auf Seite 483  
Es folgen «Die Seiten des VSE»

Anh der Ko von So schlags deutun zitätsie

Es schen Abflu. mome nächst setzt vorau Flussg z. B. Da Abflu. forn is Kalifc rend so das durch müsep ten n in we Nevada landw Lauf Bergfi wobei norma hätte Frühj Hilfe Schne fliesse mona des W den l gnose einern wässe Be forn die n Verdr

Prof. I