

Der elektrische Sicherheits-
grad von Wechselstrom-
Hochspannungsanlagen.

+++++

Der Eidgenössischen Technischen Hochschule
in Zürich
zur Erlangung der venia legendi
vorgelegte

H a b i l i t a t i o n s s c h r i f t
von

K. B e r g e r , D r . I n g .
aus Salez - Senwald (St.G.)

Zürich,

Neujahr 1936.

Der elektrische Sicherheitsgrad von Wechselstrom-
Hochspannungsanlagen.

1. Begriffsbestimmung, Geschichtliches und Grundlagen.
2. Der Sicherheitsgrad von Freileitungen.
3. Begrenzung und Lokalisierung der Auswirkungen des ungenügenden Sicherheitsgrades der Freileitungen.
4. Der Sicherheitsgrad von Anlagen (Kraftwerken, Unterwerken, Transformatorstationen und Schaltposten).

1. Begriffsbestimmung, Geschichtliches und Grundlagen.

Der Begriff des elektrischen Sicherheitsgrades ist geschichtlich als Analogon des mechanischen Sicherheitsgrades entstanden. In der Mechanik versteht man unter dem Sicherheitsgrad seit langem das Verhältnis der Bruchspannung oder Elastizitätsgrenze zur grössten auftretenden oder berechneten Beanspruchung. Die gerechneten Werte können dabei statisch oder dynamisch, d.h. mit Einschluss der Trägheitskräfte, berechnet sein. Es ist überdies üblich und im kritischen Fall vorgeschrieben, dass auch vorübergehende

Kräfte (Winddruck, Erschütterungen, plötzlicher Belastungswechsel usw.) in die Berechnung mit einbezogen werden.

Bedenkt man die anfänglich ausschliesslich empirische Entwicklung der Hochspannungstechnik, so versteht man, dass unter dem Sicherheitsgrad von Anfang an das Verhältnis der "Bruchspannung" (Ueberschlagsspannung) oder der kurzzeitig höchstmöglichen "Prüfspannung" zu normalen, von den Maschinen oder Transformatoren erzeugten Betriebs - Wechselfspannung verstanden wurde. Vorübergehende Spannungserhöhungen werden im elektrischen Fall auch dann nicht zur Normalspannung addiert, wenn sie sich notwendig aus dem Betrieb ergeben, wie z.B. Spannungserhöhungen durch plötzliche Entlastung, durch Erd- und Kurzschlüsse, Schaltungen usw. ¹⁾ Alle vorübergehenden Spannungserhöhungen gelten im elektrischen Fall bereits als Ueberspannungen. Der Begriff eines "wahren" Sicherheitsgrades mit Einrechnung auch vorübergehender Beanspruchungen, analog wie beim mechanischen Begriff, hat sich in der Elektrotechnik nie eingebürgert. Es ist daraus verständlich, dass der Begriff der Ueberspannungen in der Elektrotechnik wesentlich mehr Bedeutung erlangen musste als in der Mechanik. Denn ein elektrischer Sicherheitsgrad, der nur wenig grösser ist als 1 und der im allgemeinen kleiner ist als das Verhältnis der grössten vom Betrieb einer elektrischen Anlage erzeugten Ueberspannung zur normalen Betriebsspannung, ist im Grunde genommen nur während des stationären Normalbetriebes ein wahrer Sicherheitsgrad. Er wird aber sein Nichtgenügen sofort demonstrieren, wenn betriebsmässige Zustandsänderungen (Schaltungen, Erd- oder Kurzschlüsse) vorkommen.

Diese Verschiedenheit im Begriff des mechanischen und elektrischen Sicherheitsgrades erhält noch erhöhte Bedeutung durch die verschiedenartige Gefährdung mechanischer und elektrischer Systeme durch kurzzeitige, schlagartige Kräfte. Infolge der Masse jedes mechanischen Baustoffes bedeutet eine sehr kurzzeitige, stossartige Krafteinwirkung auf ein mechanisches System keine wesentliche Koordinatenänderung der Massen und somit wegen der Elastizität jedes Stoffes keine wesentliche Zusatzbeanspruchung. (Nach dem Impulssatz gilt für ein Massenpunkt $m: \int_{t_1}^{t_2} F dt = m \cdot \Delta v$) Ein elektrischer Isolator dagegen, der nur während weniger Mikrosekunden (10^{-6}) einer höhern als der statisch zulässigen elektrischen Spannung ausgesetzt wird, verliert seine isolierenden Eigenschaften: Er wird überschlagen oder durchgeschlagen, d.h. sein Sicherheitsgrad wird überschritten. Bei ihm spielen nur die Elementarmassen einzelner Elektronen und Ionen die Verzögerungsrolle

Diese Unterschiede im Begriff des Sicherheitsgrades wird man sich mit Vorteil vor Augen halten, wenn es sich im Folgenden um Zahlenwerte des elektrischen Sicherheitsgrades handelt. Man wird daraus erkennen, wie knapp der Elektroingenieur von Anfang an gerechnet hat und auch heute noch rechnen muss.

Die ersten Grundlagen zur Bemessung des elektrischen Sicherheitsgrades waren rein empirische. Die ersten nationalen und internationalen Regelungen über Sicherheitsgrade sind noch jung. In der Commission Electrotechnique Internationale (CEI) wurden erstmals 1922 Vorschriften für Freileitungsisolatoren be-

1) Siehe VDE-Vorschrift 1011/1932 vom 1. Januar 1932: Leitsätze für den elektrischen Sicherheitsgrad von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen von 1000 V und darüber.

raten und Belgien die Ausarbeitung von Vorschlägen übertragen. Diese wurden 1927 weiter beraten, sodass 1930 die Annahme einer Formel für die Höhe der minimalen Prüfspannung für Freileitungsisolatoren beschlossen werden konnte. Diese heute noch übliche Formel der CEI 1) verlangt eine minimale Prüfspannung nach folgenden Regeln:

$$\begin{array}{l} U_p = 2U_N + 10 \text{ kV für Freileitungsisolatoren unter Regen} \\ U_p = 2U_N + 1 \text{ kV für Transformatoren und Apparate} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} U_p = 2U_N + 10 \text{ kV für Freileitungsisolatoren unter Regen} \\ U_p = 2U_N + 1 \text{ kV für Transformatoren und Apparate} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{bei 50} \\ \text{Hertz} \end{array}$$

In Deutschland wurde 1932 eine höhere Prüfspannung eingeführt 2), nämlich:

$$U_p = 2,2U_N + 20 \text{ kV} \left\{ \begin{array}{l} \text{Freileitungsisolatoren unter Regen} \\ \text{ebenso Innenraumisolatoren, trocken} \end{array} \right. \left. \vphantom{U_p = 2,2U_N + 20 \text{ kV}} \right\} \begin{array}{l} \text{bei 50} \\ \text{Hertz} \end{array}$$

Die kleinere Prüfspannung nach CEI wird gegenüber diesem vollen Prüfgrad in Deutschland als Minimum eines "eingeschränkten Prüfgrades" noch zugelassen.

In den Vereinigten Staaten von Nordamerika wird der Sicherheitsgrad allgemein nach der Formel bemessen:

$$U_p = 2,25 U_N \left\{ \begin{array}{l} \text{Freileitungsisolatoren unter Regen} \\ \text{Innenraumapparate, trocken} \end{array} \right. \left. \vphantom{U_p = 2,25 U_N} \right\} \begin{array}{l} \text{bei 60} \\ \text{Hertz} \end{array}$$

Die Uberschlagsspannungen von Isolatoren müssen nach den CEI-Vorschriften mindestens 5%, nach den neuen deutschen Vorschriften mindestens 10% höher sein als die verlangten Prüfspannungen.

Die gedankliche Grundlage obiger Formeln war ursprünglich die Vorstellung von der Spannungsverdopplung infolge der Wellenreflexion auf Leitungen und infolge quasistationärer Schwingungen. In der konstanten Zahl sollte die "eigentliche Sicherheit" liegen.

Wissenschaftliche Grundlagen für die Bemessung des elektrischen Sicherheitsgrades ergaben sich erst aus den Erkenntnissen der Uberspannungsforschung. Als Uberspannung wird dabei im Folgenden die zeitlich vorübergehende oder durch anormale Betriebszustände auch dauernd über das Mass der normalen Betriebsspannung hinaus errähte, gesamte Spannung eines Punktes gegen Erde oder gegenüber einem andern Bezugspunkt verstanden. Bis ca. 1920 basierte diese Uberspannungsforschung fast ausschliesslich auf Messungen mit Hilfe von Messfunkenstrecken. Diese liessen wohl die Höchstwerte der bei bestimmten Untersuchungen vorkommenden Uberspannungen erkennen, nicht aber ihren zeitlichen Verlauf. Ueber das Verständnis der Entstehung und Ausbreitung dieser Spannungen war damit nicht sehr viel zu gewinnen. Erst seitdem in den letzten ca. 10 Jahren die genaue Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufs von Uberspannungen mit Hilfe neuartiger Messinstrumente (Kathodenstrahloszillograph, Klydonograph, Blitzstrommesser, Blitzstromteilheitsmesser usw.) möglich wurde, sind diese wissenschaftlichen Grundlagen für den elektrischen Sicherheitsgrad geschaffen worden. Eine kurze zusammenfassende Darstellung dieser Grundlagen lässt sich hier kaum vermeiden: sie ist für den Aufbau der nachfolgenden Vorschläge wesentlich.

Die erste Gruppe von Uberspannungen elektrischer Stromkreise umfasst jene, deren Energiequelle in den Generatoren des Netzes, bzw. den davon gespeisten magnetischen und elektrischen Feldern, insbesondere der Transformatoren

1) CEI Comité 8, Normes pour tensions et courants.

2) Siehe VDE-Vorschrift 1011/1932 vom 1. Januar 1932: Leitsätze für den elektrischen Sicherheitsgrad von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen von 1000 V und darüber.

und Leitungen liegt. Hieher gehören vor allem die bei Erdschluss, Kurzschluss, Drahtbruch und bei Schaltvorgängen entstehenden Ueberspannungen, sowie jene, die durch Resonanz der Eigenfrequenz eines Netzteiles mit der Grundwelle oder einer vorhandenen Oberwelle der Betriebsspannung entstehen können. Mit kleiner werdender und schliesslich verschwindender Betriebsspannung werden auch diese Ueberspannungen kleiner und verschwinden schliesslich. Es muss also möglich sein, die Ueberspannungshöhe U in irgend einem Punkt als Funktion der eingepprägten Betriebsspannung e und der sämtlichen Stromkreis-Parameter und ihren zeitlichen Veränderungen auszudrücken:

$$U = f\left(e, \frac{d}{dt}, L, C, R, \frac{d}{dt} (L, C, R)\right)$$

Die Möglichkeit der mathematischen Funktionsbestimmung ist vor allem bedingt durch die Art der Parameter (L, C, R) : Solange diese als konstant angesehen werden dürfen, d.h. mit $\frac{d}{dt} (L, C, R) = 0$, entstehen Systeme linearer Differentialgleichungen mit Störungsfunktion. Deren Auflösung geschieht auf die klassische Weise durch Ermittlung der allgemeinen Lösung mit nachheriger Bestimmung aller Integrationskonstanten auf Grund der Grenz- oder Randbedingungen. Für die Technik hat diese klassische Methode den grossen Nachteil der Schwerfälligkeit. Für die Fälle harmonisch veränderlicher eingepprägter Kräfte e , d.h. für den Fall stationärer Wechselströme und -Spannungen, ergab sich in der komplexen Vektorrechnung eine Methode, durch die der Ingenieur mit der Lösung der differentiellen Stromkreisgleichungen vertraut wurde. Für die Berechnung von Ueberspannungen ist diese Rechnungsweise aber nur im Falle von stationären Resonanzspannungen brauchbar.

Erst im letzten Jahrzehnt beginnt auch für Ausgleichvorgänge eine für die technischen Bedürfnisse zugeschnittene Rechenmethode sich einzubürgern, deren Bedeutung mit derjenigen der Vektorrechnung verglichen werden kann: Dies ist die Operatorenrechnung nach Heaviside. Mit ihr gelingt die Berechnung der Ausgleichswerte auf analoge Weise wie die Berechnung der stationären Wechselstromwerte, wobei insbesondere die Bestimmung der Integrationskonstante des klassischen Lösungsvorganges wesentlich erleichtert wird. Der speziellen Einfachheit der Vektorrechnung für harmonisch veränderliche eingepprägte Kräfte entspricht eine besondere Einfachheit der Operatorenrechnung für plötzlich einsetzende Kräfte in der Form der Heavisideschen Einheitsfunktion, die vom konstanten Wert 0 zur Zeit $t = 0$ plötzlich auf den konstanten Wert 1 anspringt¹⁾.

Wesentlich schwieriger gestaltet sich die mathematische Aufgabe, wenn die Stromkreisparameter (L, C, R) nicht als konstant gelten dürfen, sondern ihrerseits Funktionen der Zeit oder von Spannungen oder Strömen sind. Die Lösungsmethoden sind zweifellos für die Ingenieure oft zu kompliziert. In vielen Fällen sind überhaupt nur Näherungslösungen möglich. Der Ausweg besteht hier für die Ingenieure im Versuch, nicht nur aus wirtschaftlichen Erwägungen, sondern auch deshalb, weil die Funktionen $f_t(L, C, R)$ der Zeit, Ströme oder Spannungen ihrer-

1) Siehe z.B. E.J. Berg: Heaviside's Operational Calculus as Applied to Engineering and Physics, Mc. Graw-Hill Book Co., N.Y. V. Bush, Operational Circuit Analysis, John Wiley & Sons, N.Y.

seits oft durch Versuch bestimmt werden müssen, da es sich hier um Materialkonstanten (Spulen mit Eisenkern, glimmende Leitungen, Dielektrikum mit Rückstands-bildung, stromabhängige Widerstände usw.) oder um Apparatekonstanten (Zünd- und Entionisierungsgeschwindigkeit des Lichtbogens in Schaltern, Funkenstrecken, Mutatoren usw.) handelt. Die Zahlenwerte für die im praktischen Betrieb von Hochspannungsanlagen vorkommenden Höchstwerte der Ueberspannungen sind aus letztern Gründen bis heute immer noch in erster Linie Erfahrungswerte, die sich entweder aus dem Versuch mit tauglichen Messmitteln oder aus der über lange Zeitabschnitte erstreckten Betriebserfahrung ergeben haben.

Was wir aus der mathematischen Erfassung der Ueberspannungen für den vorliegenden Zweck als wesentlich übernehmen wollen, ist folgendes:

Es muss eine Funktion \bar{U} bestehen, welche sich aus sämtlichen Netzkonstanten und ihrer zeitlichen Variation, sowie aus der zeitlichen Aenderung der dem System eingeprägten Kräfte $\frac{dQ}{dt}$, berechnen lässt. Es ist deshalb logisch begründet, die grösste Ueberspannung inneren Ursprunges als Vielfaches der normalen Betriebsspannung auszudrücken, wenn auch die Höhe dieses grössten Vielfachen noch variieren kann, je nach Grösse und Art der Betriebsspannung, je nach der Betriebsart (z.B. Nullpunkts- oder Polerdung) und nach den Charakteristiken der verwendeten Apparate, Maschinen und Leitungen.

Der für die vorstehend betrachteten Ueberspannungen inneren Ursprunges bestehende ursächliche Zusammenhang zwischen Ueberspannung und Betriebsspannung besteht nun aber nicht mehr für alle Ueberspannungen äusseren Ursprunges. Schon wir vom fehlerhaften Uebertritt von Spannungen fremder Anlagen aufeinander ab, so bleiben als Ueberspannungen äusseren Ursprunges nur die atmosphärischen. Die Untersuchungen der letzten Jahre lassen keine Zweifel mehr darüber bestehen, dass auf Freileitungen Spannungen von mehreren Millionen Volt entstehen können, wenn Leitungen auf Holzmasten oder sehr schlecht geerdeten Eisenmasten vom direkten Blitzschlag betroffen werden. Sie zeigen ferner, dass durch rein kapazitive Blitzeinwirkung die Ausbildung von Ueberspannungswellen von wenigen Hundert kV Höhe auf Freileitungen möglich ist. Das Problem der Verhinderung der Entstehung der Ueberspannungen des direkten Einschlages verlangt die Auffangung des Blitzes durch geerdete Metallteile und seine Ableitung nach Erde unter Bildung eines genügend kleinen Spannungsabfalles des Blitzstromes in der Erdung, um den sogenannten "Rücküberschlag" der geerdeten Teile auf die isolierten Leiter der elektrischen Anlage zu vermeiden. Die kapazitiven Ueberspannungswellen infolge Blitzschlags in der Leitungsumgebung können durch Anwendung eines oder mehrerer Erdschleife auf 150 - 200 kV grösste Höhe begrenzt werden. 1)

Es braucht kaum gesagt zu werden, dass die genannten Ueberspannungen nur auf Freileitungen, nicht auf den im Boden verlegten Kabeln entstehen.

Diese Erkenntnisse bedingen ohne Zweifel die prinzipielle Einbeziehung der Wirtschaftlichkeit in die Betrachtungen über den elektrischen Sicherheitsgrad. Denn es ist klar, dass die Massnahmen zur Erreichung voller Sicherheit elektrischer Freileitungen gegenüber Blitzeinwirkungen in vielen Fällen wirtschaftlich unmöglich sind. Es soll daher im Folgenden versucht werden, einen

1) Alle im Folgenden gemachten Spannungsangaben nicht harmonisch veränderlicher Grössen sind gemäss der Empfehlung der CEI in kV gemacht (Momentanwerte, Höchstwerte, Spitzenwerte, Amplitudenwerte). Nur bei Wechselströmen I und Wechselspannungen U sind Effektivwerte benützt und dann auch als solche bezeichnet worden (U_{eff} , I_{eff}). Als elektrischer Sicherheitsgrad wird das Verhältnis des Scheitelwertes der grössten ausgehaltenen Wechselspannung zum Scheitelwert der Betriebsspannung bezeichnet (Wechselstrom-Sicherheitsgrad). Bei Stossbeanspruchung wird das Verhältnis der grössten ausgehaltenen Stossspannung zum Scheitelwert der Betriebsspannung als Stossicherheitsgrad bezeichnet.

den genannten Gesichtspunkten entsprechenden, auf modernen Erkenntnissen beruhenden Vorschlag für die Bemessung des elektrischen Sicherheitsgrades zu skizzieren.

2. Der elektrische Sicherheitsgrad von Freileitungen.

Erstes Erfordernis ist hier das Standhalten unter den vorkommenden atmosphärischen Verhältnissen: Regen, Schneefall, Raureif und Eisbildung, Winddruck Temperaturwechsel, dagegen nur bedingt den Blitzeinwirkungen, wie noch zu besprechen bleibt. Ferner besteht heute Einigkeit darüber, dass die Leitungs-isolation allen Überspannungen innern Ursprungs gewachsen sein soll.

Sämtliche elektrischen Anforderungen sind prinzipiell an den berechneten Isolator zu stellen. Dagegen ist es fraglich, ob der Isolator bei der Prüfung sauber oder verschmutzt sein soll. Die Erfahrung hat gezeigt, dass in Gebieten mit stark staushaltiger oder salziger Luft (Zement- und Schwerindustrie, Meeresküsten) und an Fahrleitungen von Bahnen mit gemischtem Betrieb (teils Dampf- und teils elektrische Traktion) die Sicherheit der Isolation nach den CEI- und sogar nach den verschärften VDE-Leitsätzen nicht mehr genügend ist. Die Schwierigkeiten kommen stets dann zum Vorschein, wenn die Isolatoren mit einer durchgehenden Feuchtigkeitsschicht überzogen werden, wie das bei starkem Nebel und Tauwetter nach Reifbildung oder unter dem Einflusse von ausströmendem Dampf von Lokomotiven der Fall ist.

Es fragt sich, ob diesem Umstand bei den allgemeinen Anforderungen an den Sicherheitsgrad der Leitungen Rechnung zu tragen ist. Die Tatsache, dass es sich dabei um nicht sehr häufig vorkommende Gegenden mit zum voraus erkennbaren Merkmalen handelt und die weitere Tatsache, dass für solche Fälle schon besondere Isolatoren gebaut werden, 1) lassen die allgemeine Berücksichtigung solcher örtlicher Schwierigkeiten nicht als wünschenswert erscheinen.

Die an den Leitungsisolatoren auftretenden Überspannungen müssen nach modernen Erkenntnissen aufgeteilt werden in eine normalfrequente Wechselspannung und eine kurzzeitige Spannungskomponente. Die Wechselspannung erreicht bei metallischem Erdschluss einer Phase eines Systems ohne starre Nullpunktserdung $\pm \pm$ kommen infolge der einphasigen Generatorbelastung und unter Umständen auch wegen des Nullpunktswiderstandes Spannungen vor, die zwischen der Stern-Spannung und der verketteten liegen. Bei plötzlichen Entlastungen und durch die bekannten Leerlauferscheinungen langer Leitungen kommen praktisch Spannungserhöhungen von 20 - 30%, insbesondere bei Anlagen mit hydraulischen Antriebsmotoren, vor. Bei Lichtbogen-Erdschluss ist theoretisch die Möglichkeit des Aufschaukelns der Spannung vorhanden, wenn das Abreißen und Neuzünden des aussetzenden Lichtbogens jeweils im richtigen Phasenmoment erfolgt. Die Praxis zeigt, dass dieses Aufschaukeln in Freileitungsnetzen nicht im theoretisch vorausgesagten Mass vorkommt²⁾

1) F. Obenaus: Mitteilungen der Hermsdorf-Schomburg-Isolatoren G.m.b.H. 1932, Heft 64/65.

2) K. Berger, Bull. SEV 1930, S. 756

++ die verkettete Betriebsspannung. Bei starrer Nullpunktserdung;

indem keine Messungen vorliegen, welche ein Ansteigen der langdauernden ("50 periodigen") Spannungskomponente gegen Erde auf mehr als 2 fache verkettete Betriebsspannung erkennen lassen. In der Regel liegen die durch den Erdschluss auf beide Seiten der Nulllinie versetzten Halbwellen der normalfrequenten Spannung innert der Bandbreite der 1,3 - 1,6 fachen verketteten Spannung, besonders wenn es sich um ein kompensiertes Netz handelt.

Die kurzzeitige Spannungskomponente wird von der durch Erdschlüsse, Kurzschlüsse und Schaltungen angestossenen Eigenschwingung des Netzes oder eines Teils desselben geliefert. Sie entsteht hauptsächlich im Moment, wo ein Lichtbogen neu zündet oder wo er unter Bildung einer Spannungsspitze abgerissen wird. Bei Erdschlüssen entstehen diese kurzzeitigen Spannungskomponenten auch auf den gesunkenen Phasen und bewirken dort kurzzeitige Gesamtspannungen, welche in 8 kV-Netzen 2,4 - 2,6 fache, in 50 kV-Anlagen ca. 2,4 fache, in 100 kV-Anlagen ca. 2 fache verkettete Betriebsspannung erreichen. 1)

Beim Abschalten leerlaufender Transformatoren und Leitungen mittels Oelschaltern entstehen gewöhnlich kurzzeitige Überspannungen von 1,5 - 2,7 facher verketteter Betriebsspannung²⁾, in Ausnahmefällen allerdings noch höhere Spannungen bis zu 3,5 facher verketteter Spannung an Transformatoren bzw. 4,5 facher verketteter Spannung beim Abschalten von Kabeln.⁴⁾

Beim Abschalten von Kurzschlüssen mit Oelschaltern entstehen auf der geschalteten Phase Überspannungen, die in der Regel weniger hoch sind als beim Abschalten leerlaufender Transformatoren und Leitungen. Ein bezüglich Überspannungen besonders wichtiger Fall kommt in Freileitungsnetzen für Höchstspannung und in Kabelnetzen für mittlere Hochspannung vor, wenn der unter Einfluss der Betriebsspannung bei einer Rückzündung im Schalter entstehende Wellenstrom von ähnlicher Grösse ist wie der quasistationäre Kurzschlussstrom. Der Wellenstrom kann dann den Strom im Schalterlichtbogen annullieren und damit auslöschen, zu einer Zeit, wo der Kurzschlussstrom in den speisenden Transformatoren und Generatoren nicht gleich 0 ist. Die normalfrequente Stromhalbwelle wird dadurch im Takt der Wellenschwingung auf der Leitung zerhackt. Dabei können Überspannungen bis zu 3 facher verketteter Betriebsspannung entstehen, die sich nicht nur am Schaltort, sondern über lange Leitungen hin bemerkbar machen. 4)

Bei kleineren Hochspannungen, wo die Wellenströme wesentlich kleiner sind als die quasistationären Kurzschlussströme, kommt diese Erscheinung nicht vor. Es zeigt sich, dass dann die Schaltüberspannungen ganz ausgeprägt lokalen Charakter haben; sie sind nur in der Umgebung des Schalters vorhanden. Die entstehende Netzschwingung ist in der Regel ebenfalls lokaler Natur, da von dem aus konzentrierten Reaktanzen und Netzkapazitäten gebildeten Kettenleiter nur die dem Schalter benachbarten Kettenglieder zu starken Schwingungsamplituden angestossen werden.⁵⁾ Diese Überspannungen erreichen selten höhere Werte als 1,5- 2,5 fache verkettete Betriebsspannung.

1) K. Berger, l.c. H. Neuhaus, AfE 1931, S. 343

2) J. Kopeliowitch, Bull. SEV 1927, S. 513

3) J. Fallou, CIGRE 1925, S. 250

4) K. Berger und H. Habich, Bull. SEV 1929, S. 661

5) E. Juillard, CIGRE 1935, No. 151.

Die vorstehenden Zahlenwerte sind hauptsächlich oszillographischen Untersuchungen, seltener Messungen mit Funkenstrecken, entnommen. Die Kydonographenmessungen zeigen teilweise noch etwas höhere Spannungsspitzen sehr kurzer Dauer. Ihre Messgenauigkeit bzw. die Genauigkeit, der dafür benutzten Spannungsteiler ist aber derart unsicher, dass für den vorliegenden Zweck der Schaffung von Grundlagen für die Bemessung des Sicherheitsgrades nicht darauf abgestellt werden soll.

Bezüglich der Überspannungen äusseren Ursprungs ist festzustellen, dass alle atmosphärischen Überspannungen mit praktisch bedeutender Höhe raumzeitlich gesprochen wellenartigen, rein örtlich gesprochen stossartigen Verlauf aufweisen. Als Stoss wird gemäss den Begriffsbestimmungen der CEI eine unipolare, rasch auf ein Maximum ansteigende und dann ähnlich rasch wieder auf 0 absinkende Spannung eines festen Punktes bezeichnet (Fig. 1). Der ansteigende Teil der Stossspannung (a) wird als Front oder Stirn, der abfallende Teil (b) als Rücken bezeichnet. Der erreichte Spannungshöchstwert (u_m) heisst Amplitude des Stosses. Die Zeit zur Erreichung dieser Amplitude längs einer geradlinigen Ersatzfront, welche durch die Frontpunkte $0,1 u_m$ und $0,9 u_m$ hindurchgeht, heisst schlechthin Frontdauer T_F . Das Verhältnis der Amplitude u_m zur Frontdauer T_F wird als Steilheit des Stosses bezeichnet. Die Zeit bis zur Erreichung des Rückenpunktes mit halber Amplitudenhöhe $\frac{1}{2} u_m$ heisst Zeitdauer bis zum Halbwert T_D .

Die Stossform wird mathematisch dargestellt als Differenz zweier abklingender Exponentialfunktionen:

$$u = E \left\{ e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2} \right\}$$

Der Zusammenhang der Zeitkonstanten T_1 und T_2^u des Anfangswertes E mit der oben definierten Frontdauer T_F und der Zeitdauer bis zum Halbwert T_D und der Amplitude u_m ist einfach zu erkennen.¹⁾

Mit diesen Begriffsbestimmungen kann gesagt werden, dass atmosphärische Überspannungen auf Freileitungen in der Regel als Stösse mit einer Zeitdauer bis zum Halbwert von 10 - 500 μs und einer Frontdauer von ca. 1 bis zu vielen Mikrosekunden in Erscheinung treten. Als Normalwelle für Stossprüfungen ist von der CEI die Welle 1/50 genormt worden (1 μs Frontdauer, 50 μs bis zum Halbwert). Diese Stossform sei im Folgenden schlechthin als Stoss bezeichnet. Halten die Freileitungsisolatoren einer Stossspannung nicht stand, so kommt es zum Übersschlag. Der Stoss wird dadurch abgeschnitten. Letztere Erscheinung ist besonders häufig auf Eisenmastleitungen, weil dort die gesamte Stossspannung vor dem Übersschlag am Isolator selber liegt. Bei Holzstangenleitungen wirkt das Holz gegenüber Stossspannungen wie ein Isolator. Die Holzstangen können deshalb unter Umständen viel mehr Spannung aufnehmen, als die Freileitungsisolatoren selber dies können.

Der zu wählende Sicherheitsgrad der Freileitung hängt nun vor allem

1) L. V. Bewley, Traveling Waves on Transmission Systems 193. S. 23.
John Wiley & Sons, N.Y.

von der Häufigkeit und Höhe der vorkommenden atmosphärischen Ueberspannungswellen ab: Aus den nachstehenden reproduzierten Häufigkeitskurven (Fig.2 und 3), die an hochisolierten, mit 1 oder 2 Erdseilen versehenen Uebertragungsleitungen auf Eisenmasten gemessen wurden, geht ein hyperbelähnlicher Verlauf hervor: Kleine Ueberspannungen sind viel häufiger als grosse. In einem bestimmten Netzpunkte kommen pro Jahr nach den in der Schweiz oszillographisch gemessenen Kurven etwa vor: 1)

ca.	100-230	Ueberspannungen mit mehr als	30 kV	Höhe im	Messpunkt
"	50-140	"	"	"	"
"	20- 30	"	"	"	"
"	1- 8	"	"	"	"

Dabei ist allerdings die Ueberspannung als Ueberschreitung des Momentanwertes der Betriebsspannung gezählt. Die Addition dieser Werte zum Scheitelwert der Betriebsspannung würde also ein zu schlimmes Bild ergeben, das nur dann richtig wäre, wenn alle auf die Leitung einwirkenden Blitze gerade in solchen Momenten vorkämen, wo die Betriebswechselspannung durch ihren Scheitelwert hindurchgeht, was natürlich nicht der Fall ist. Dagegen ist aus der Tabelle ohne weiteres die Abstufung der Häufigkeit verschieden höher atmosphärischer Ueberspannungen in einem festen Netzpunkt ersichtlich.

Wie hoch soll nun eine Freileitung isoliert werden? Auch bei einer Ueberschlagsspannung unter Stoss ("Stossüberschlagsspannung") von mehr als 200kV wird es noch zu Leitungsüberschlägen kommen. Ihre Häufigkeit wäre überdies grösser als aus der Tabelle ersichtlich ist, weil am Ort der Blitzeinwirkung auf der Leitung die Ueberspannung unter Umständen ganz wesentlich höher ist als im Messpunkt, für den obige Tabelle gemessen wurde. Dieser Unterschied ist besonders gross für Spannungen, die höher liegen als die Glimmspannung der Leitung, weil die Dämpfung durch Glimmverluste ausserordentlich stark ist. Für hohe Ueberspannungen auf der Leitung gibt nicht die Ueberspannungsmessung in einem bestimmten Netzpunkt, sondern die Registrierung der Anzahl starker Blitzeinwirkungen, besonders der direkten Blitzeinschläge auf der Leitung selber, Anhaltspunkte. Man darf nach den bisherigen Messungen und Statistiken annehmen, dass eine Hochspannungsleitung von 100 km Länge in Europa und Nordamerika jährlich von 1 bis 10 Blitzeinschlägen betroffen wird. Die Zahl schwankt je nach der betrachteten Leitung, aber auch von Jahr zu Jahr für dieselbe Leitung ganz beträchtlich.

Die bei Blitzeinschlägen in die Masterdung abgeführten Ströme schwanken von wenigen 1000 bis gegen 100'000 A. Folgende Tabelle zeigt die Häufigkeit verschieden hoher Strommaxima im Blitzkanal nach den bisher vorliegenden Untersuchungen:

1) K. Berger, Bull. SEV 1932 S. 291.
K. Berger, Bull. SEV 1934 S. 226.
K. Berger, Bull. SEV 1936, noch nicht veröffentlicht.

Blitzströme	bis 10 kA	11-20 kA	21-30 kA	31-40 kA	41-50 kA
Anzahl Messungen) 1933 + 1934)	44	46	45	38	22 ¹⁾
	12	12	12	12	8 ²⁾
Blitzströme	51-60 kA	61-70 kA	71-80 kA	81-100 kA	grösser als 100 kA
Anzahl Messungen) 1933 + 1934)	10	8	2	7	0 ¹⁾
	1	0	1	0	1 ²⁾

Bei Erdungswiderständen der einzelnen Masten von z.B. 20 Ω wird der grösste Teil der Blitzeinschläge, nämlich alle jene, die mehr als 10 kA Strom über die Erdung schicken, einen Leitungsisolator mit 200 kV Ueberschlagsspannung noch zum Ueberschlag bringen, wenn auch der Mast oder das Erdseil den Blitz auffängt. Von der Korrektur durch die Schirmwirkung des Erdseils ist dabei abgesehen. ³⁾ Es ist ersichtlich, dass nur Höchstspannungsleitungen, vielleicht in Ausnahmefällen noch Leitungen für 80 kV Betriebsspannung, im eigentlichen Sinne des Wortes blitzsicher gebaut werden können. Nur für sie kann das Produkt des grössten Blitzstromes im Mast mit dem Erdungswiderstand einen kleineren Betrag als die Stossüberschlagsspannung der Leitungsisolatoren ergeben. Für Leitungen mittlerer und kleiner Hochspannung kommt sowohl die Herstellung der erforderlichen guten Masterdungen wie auch die erforderliche Höchstspannungsisolierung zu teuer zu stehen.

Ausser den vorstehenden Gesichtspunkten, welche die Gefährdung der Leitung durch Ueberspannungen betreffen, ist nun andererseits die Bedeutung der Fälle von Einfluss, in denen der Sicherheitsgrad der Leitungen nicht mehr genügt. In diesem Sinne sind vor allem folgende Gesichtspunkte massgebend:

- a) Die Bedeutung eines Ausfalls der Leitung bei Gewitter. Dabei spielen mit das Vorhandensein von Doppelleitungen, die Zuverlässigkeit eines selektiven Relais-Systemes, die Stabilität des Parallelbetriebes, die Möglichkeit der sofortigen Beschaffung von Ersatzenergie beim Leitungsausfall usw.

1) H. Grünwald, CIGRE 1935, Bericht Nr. 326.

2) W. Lewis, CIGRE 1935, Bericht Nr. 315.

3) Müller-Hillebrand, ETZ 1931, S. 726.

- b) Umfang und Art einer Leitungsbeschädigung durch Blitzeinwirkung. Hier fragt sich zunächst, ob die ausgefallene Leitung sofort wieder in Betrieb genommen werden kann oder nicht. Wichtig ist möglichst strahlh Abschaltung der gestörten Leitung d.h. kurze Relais- und Schaltoreigenzeiten, Stossicherheit der Leitungsisolatoren gegen Durchschlag, Lichtbogensicherheit der Isolatoren (eventuelle Anwendung von Lichtbogenarmaturen), Vermeidung von Kopfrissen und Abschmelzen der Isolatorenköpfe durch den Lichtbogen, Verhinderung des Lichtbogenansatzes auf Leitungsseilen usw.
- c) Die Bedeutung eines lediglich einphasigen Überschlages der Leitung. Erfahrungsgemäss erfolgen bei Höchstspannungsleitungen $2/3 - 3/4$ aller Überschlüsse durch Blitzschlag einphasig. Bei starrer Nullpunktserdung hat auch dieser einphasige Überschluss eine Abschaltung der Leitung zur Folge, bei Nullpunktserdung über Löschspulen oder hohe Widerstände dagegen bleibt der einphasige Überschluss ohne Folgen für den Betrieb.

Aus den genannten Gesichtspunkten und Erfahrungen heraus ist der folgende Vorschlag der Bemessung des Sicherheitsgrades von Freileitungsisolatoren begründet (Fig. 4 und 5).

1. Jeder Freileitungsisolator muss einer Stossprüfspannung u_p vom 3-fachen Betrag des Scheitelwertes der Betriebsspannung (Nennspannung) standhalten, ohne zu überschlagen.
Begründung: Stossartige Überspannungsmaxima bei Erdschluss- und Schaltvorgängen.
2. Freileitungsisolatoren für weniger als 50 kV Betriebsspannung (Nebenspannung) müssen einer höhern Stossprüfspannung standhalten, und zwar im Minimum einer Stossspannung entsprechend der Geraden AP (Fig. 4), welche den Punkt A ($0,50\sqrt{2}$) mit dem Punkt P ($50, 150\sqrt{2}$) verbindet.
Begründung: Stossüberspannung durch Blitzeinwirkung. Die Isolationshöhe $50\sqrt{2}$ kV macht die Leitungsisolation entsprechend den Häufigkeitskurven bereits gegen einen grossen Teil aller Blitzeinwirkungen unempfindlich. Die Höhe $150\sqrt{2}$ kV stellt das ungefähre Maximum der durch kapazitive Blitzeinwirkung erzeugten Überspannung auf gebräuchlichen Leitungen dar. Höher isolierte Leitungen sind nur noch durch direkten Blitzeinschlag gefährdet. Das Ansteigen der Linie AP ist darin begründet, dass mit steigender Betriebsspannung auch die Betriebssicherheit der Leitung, entsprechend ihrer grössern Energieübertragungsmöglichkeit ansteigen soll.
3. Diese Anforderungen bezüglich Stossicherheit werden ergänzt durch eine Prüfung bei Normalfrequenz: Jeder Freileitungsisolator soll einer Wechselstromprüfung bei einer Prüfspannung $U_p = 2 U_N + 10$ kV während 1 Minute ohne Überschluss standhalten.
Begründung: Normalfrequente Überspannungen bei Erdschlussbetrieb, bei vorübergehenden Spannungserhöhungen durch plötzliche Entlastung, durch kapazitive Spannungserhöhung usw.

Zu 1 - 3: Die vorstehenden Anforderungen sind grundsätzlich an den berechneten, aber sauberen Freileitungsisolator zu stellen, der ausserdem zugleich mechanisch

beansprucht werden soll. Letztere Bedingung kann wegfallen, wenn kein Zweifel besteht, dass dies keinen Unterschied ergibt. Für die Stossprüfung darf die Berechnung weggelassen werden, wenn sonst Schwierigkeiten bei der Prüfung entstehen, weil erfahrungsgemäss die Berechnung keinen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Stossüberschlagsspannung hat.

4. Die Stossicherheit der kompletten Leitungsisolatoren soll durch eine Stossprüfung mit einer hohen Stossspannung mit der Steilheit von ca. $500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ festgestellt werden. Dabei wird der Isolator in der Front der Stossspannung überschlagen. Er soll dabei nach einer mässigen Anzahl Stösse keinen Schaden nehmen. Trotzdem in diesem Falle der Sicherheitsgrad der Leitungsisolatoren überschritten wird, gehört diese Beanspruchungsart zur Betrachtung über den Sicherheitsgrad, weil das Vorkommen dieses Falles wirtschaftlich begründet ist. Die genauen Zahlenwerte für die Steilheit des Spannungstosses können erst auf Grund eines ausgedehnten Forschungsmaterials über Blitzstromsteilheiten festgesetzt werden.

Zu 1, 2 und 4 : Die Stossprüfungen sind nur für Freileitungsisolatoren auf Eisen- und Betonmasten erforderlich. Für Isolatoren auf Holzmasten ohne geordnete Metallstützen können sie weggelassen werden, weil dort keine Stossbeanspruchung auftritt. Sofern Leitungsisolatoren mit Lichtbogenarmaturen versehen sind, gelten die genannten Minimalprüfspannungen für die betriebsmässig armierten Isolatoren.

Die Kurven des vorgeschlagenen Minimalsicherheitsgrades für Freileitungen sind in Fig. 5 graphisch dargestellt worden.

Zusammenfassend wird hier nochmals bemerkt, dass der vorstehend gegebene Vorschlag eine Minimalforderung an den elektrischen Sicherheitsgrad von Freileitungen darstellt, welche Forderung durch die Erkenntnisse des letzten Jahrzehnts technisch und wirtschaftlich gerechtfertigt wird. Die meisten modern gebauten Freileitungen sind auf rein empirischer Grundlage bereits zu dem genannten oder einem höheren Sicherheitsgrad gelangt. Nachdem aber heute die Ueberspannungserkenntnisse wesentlich erweitert sind, scheint es begründet und nicht mehr verfrüht, die Grundlagen des elektrischen Sicherheitsgrades klarer und damit sicherer zu gestalten.

Der wahre elektrische Sicherheitsgrad, der in Analogie zum mechanischen Sicherheitsgrad als das Verhältnis der Ueberschlagsspannungen des Systems zur höchsten vorkommenden Ueberspannung zu definieren ist, beträgt bei obiger Bemessung gegenüber Ueberspannungen inneren Ursprungs mit Ausnahme seltener Spezialfälle etwas mehr als 1. Gegenüber Ueberspannungen atmosphärischen Ursprungs ist er in vielen Fällen kleiner als 1, nämlich stets dann, wenn es sich nicht um Leitungen höchster Spannung mit besonders guten Masterdungen und wirksamen Erdseilen handelt (Blitzsichere Leitungen). Für diese Fälle einer "force majeure" sind besondere Sicherheitsmassnahmen nötig, die sich grundsätzlich darauf beziehen, die Auswirkung des zu kleinen wahren Sicherheitsgrades der Leitung möglichst zu beschränken. Ueber diese Aufgabe wird im nächsten Kapitel gesprochen.

3. Begrenzung und Lokalisierung der Auswirkungen des ungenügenden Sicherheitsgrades der Freileitungen.

Es ist bereits bei den Freileitungen darüber gesprochen worden, welche Massnahmen dahin wirken, einen infolge zu kleiner elektrischer Sicherheit der Leitung entstehenden Uberschlag und besonders einen Kurzschluss auf der Leitung für diese selber möglichst unschädlich zu machen. Die Begrenzung der störenden Auswirkung eines vorübergehenden Leitungsausfalles für das übrige Netz ist eine vielgestaltige Aufgabe, die insbesondere mit der Art des Relais-Schutzes und der Raschheit der verwendeten Schalter, mit der Stabilität der parallel arbeitenden Generatoren mit ihren Antriebsmotoren und Reglern, ferner mit der Art der Betriebsführung auf Doppelleitungen und Ringleitungen zusammenhängt. Diese Aufgabe deckt sich mit dem allgemeinen Problem, einen vorübergehenden Leitungsfehler für die Betriebsführung möglichst bedeutungslos zu machen. Darauf kann hier nicht eingegangen werden.

Dagegen ist es eine spezifische Frage des elektrischen Sicherheitsgrades, auf welche Weise die bei einem Blitzschlag in die Leitung entstehenden Uberspannungen für die übrige elektrische Anlage unschädlich gemacht werden. Es ist dabei zu bedenken, dass die Höhe der von Einschlagsherd ausgehenden Uberspannungswellen bei Eisenmastleitungen höchstens gleich der Stossüberschlagsspannung der Freileitungsisolatoren, bei Holzstangenleitungen dagegen gleich der Stossüberschlagsspannung der Holzstangen werden kann. Die Gefahr der sich ausbreitenden Uberspannungswellen besteht erfahrungsgemäss vor allem darin, dass in den angeschlossen Anlagen weitere Uberschläge entstehen, deren Auswirkung wesentlich unangenehmer ist als jene des Kurzschlusses auf der Leitung allein. Die Wahrscheinlichkeit von Anlage-Uberschlägen ist besonders gross in Anlagen, die an Holzstangenleitungen angeschlossen sind, weil der Sicherheitsgrad der Holzstangenleitung gegenüber Stossspannungen ein hohes Vielfaches des Sicherheitsgrades der Apparate einer Anlage ist. Aber auch an Eisenmastleitungen besteht in den angeschlossenen Kopfstationen eine Uberschlagsgefahr wegen der Wellenreflexion. Dagegen ist erfahrungsgemäss die Gefahr in Anlagen mit mehreren an derselben Sammelschiene angeschlossenen, auf Eisenmasten verlegten Leitungen nur noch klein. Eine Gefahr zweiten Grades liegt sodann auch in der Steilheit der in die Anlage eindringenden Wellen. Praktisch kommt dieser Gefahr jedoch bei weitem nicht dieselbe Bedeutung zu wie der Gefährdung durch die Uberspannungshöhe und durch die daraus sich ergebenden Uberschläge.

Die Massnahmen zur Vermeidung dieser sekundären Uberschläge in den Anlagen selber sind die folgenden:

- 1) Dämpfung der Uberspannungswellen zwischen dem Einschlagsherd und der Anlage.
- 2) Absorption der Uberspannungswellen zwischen dem Einschlagsherd und der Anlage mit Hilfe einer passend bemessenen Kabelstrecke.
- 3) Ableitung der Uberspannungswellen in der Anlage und Umwandlung der Wellenenergie in Wärme mittels sogenannter Ableiter.
- 4) Absorption der Uberspannungswellen in der Anlage mittels einer Kapazität.
- 5) Koordination der Sicherheitsgrade von Anlage und Freileitung.

Zu 1): Die Dämpfung der Ueberspannungswellen beim Durchlaufen einer Dämpfungsstrecke vor der Anlage kann grundsätzlich durch nicht reversible Ueberführung der Wellenenergie in Wärme, Licht, chemische Energie usw. geschehen. Am nächsten liegt die Benutzung der Glimmverluste auf der Leitung zur Verminderung der Wellenhöhe. Denkbar ist auch die Ausbildung besonderer Leitungsseile mit stark frequenzabhängigen Verlusten auf einer Teilstrecke vor der Anlage.

Die Bedingungen, die an eine Dämpfungsstrecke zu stellen sind, sollen anhand der Fig. 6 erläutert werden. Mit AB sei die Dämpfungsstrecke bezeichnet, welche mit Vorteil zugleich in dem Sinne blitzsicher bebaut wird, dass direkte Blitzeinschläge dort von Erdseilen und Masterdungen störungslos aufgenommen werden. Im Abfrangpunkt A der Dämpfungsstrecke wird die grösstmögliche Wellenhöhe U_0 vorausgesetzt, welche von der Leitung her eintreffen kann. Sofern die Leitung auf Eisenmasten verlegt ist, ist das eine Welle, deren Höhe etwas unterhalb der Stossüberschlagsspannung der Leitungsisolatoren liegt. Beim Durchlaufen der Dämpfungsstrecke AB muss diese Welle so stark gedämpft werden, dass im Punkt B nur noch eine Höhe U_e vorhanden ist, welche der Anlage T unbeschädlich ist. Falls es sich um eine Kopfstation handelt, muss die Endhöhe weniger als die halbe Stossüberschlagsspannung der Anlage T betragen, weil sonst in Folge der Wellenreflexion in T die Ueberschlagsspannung erreicht wird. Für Durchgangsstationen dürfte die Endhöhe U_e die einfache Stossüberschlagsspannung der Anlage T nicht erreichen. Dies gilt auch, wenn in der Anlage Transformatoren mit direkt geordnetem Nullpunkt angeschlossen sind, da auch solche die Spannungshöhe infolge der grossen Steilheit der auftreffenden Ueberspannungswellen nur um einige Prozent abzusenken vermögen. ¹⁾

Aus den amerikanischen Dämpfungsmessungen geht hervor, dass ohne künstliche Dämpfungsvergrösserung auf Freileitungen sehr hoher Betriebsspannungen ein Abfall der Spannungsamplitude $U_e/U_0 = 1/2 - 1/3$ eintritt, wenn eine hohe Welle 5 - 10 km Freileitung durchlaufen hat. Fig. 7 zeigt zusammenfassend das Resultat solcher Dämpfungsmessungen, bei denen als Dämpfung ganz vorwiegend die Koronaverluste eine Rolle spielen. ²⁾

Aus der Länge der erforderlichen Dämpfungsstrecke scheint es wahrscheinlich, dass es gelingen würde, Dämpfungsstrecken mit künstlich vergrösserter Korona-Dämpfung so zu bauen, dass eine genügende Reduktion der Wellenhöhe auf 1 - 2 km Lauflänge zustande käme. Diese Methode ist grundsätzlich für hohe Betriebsspannungen geeignet. Für kleinere Betriebsspannungen kommt eine Dämpfung durch induzierte Sekundärströme, bezw. durch Stromverdrängung in schlechtere Leiter, in Frage. Da in den Ueberspannungswellen grosse Stromänderungsgeschwindigkeiten $\frac{di}{dt}$ vorhanden sind, ist der nötige Unterschied gegenüber den Stromänderungsgeschwindigkeiten der betriebsmässigen Wechselströme vorhanden, um frequenzabhängige Verluste in den Leitern der Dämpfungsstrecke auf Ueberspannungswellen dämpfend einwirken zu lassen. Wellendämpfung ist auch denkbar durch Zurückwerfen der Wellen auf die Leitung mittels im Zug der Leitung und vor den Anlagen eingebauter Drosselspulen. Mit der Reflexion jeder Welle durch Drosselspulen ist aber notwendigerweise eine Spannungserhöhung verbunden, weil die Reflexion auf der Umsetzung der magnetischen in elektrische Wellenenergie beruht. Wenn die Spulen sich wirklich induktiv und nicht etwa kapazitiv verhalten, so

1) G. Fröhlich, CIGRE 1935, Bericht Nr. 137.

2) L.V. Bewley, l.c.

so schaffen sie automatisch eine weitere Ueberschlagsgefahr an der Stelle ihres Einbaues oder in ihrer Nähe. Induktiv wirkende Spulen sind daher grundsätzlich für die Vermeidung von Ueberschlägen infolge Ueberspannungswellen ungeeignet. Kapazitive Anordnungen kommen unter Punkt 2 und 4 zur Sprache.

Zu 2): Die Absorption der Ueberspannungswellen mittels eines Kabels zwischen Freileitung und Anlage beruht auf der Aufspeicherung der von der Welle mitgeführten Ladung in der Kabelkapazität C. Die Verhältnisse lassen sich rechnerisch vollständig erfassen, sobald der zeitliche Verlauf und die Höhe der zulaufenden Ueberspannungswellen bekannt sind. Jede zugeführte Ladung Q bewirkt eine Spannungsänderung $\Delta U = \frac{Q}{C}$ im Kabel. Das bis zur Erreichung dieses Ladungszustandes ablaufende Wellenspiel beim Uebertritt der Welle aus der Freileitung ins Kabel ist von untergeordneter Bedeutung und überdies vollständig abgeklärt.

Zwischen einer Eisenmastleitung und einer zu schützenden Anlage ist eine Kabellänge von annähernd 1 km notwendig. Zwischen einer Holzstangenleitung und der zu schützenden Anlage kann die Kabeldimensionierung nur dann in zuverlässiger Weise vorgenommen werden, wenn die Höhe der aus der Holzstangenleitung zulaufenden Welle durch ein Stück Leitung mit Eisenmastcharakter begrenzt wird.

Zu 3): Ableitung der Ueberspannungswellen in der Anlage mit Hilfe von Ableitern ist die betrieblich meist einfachste Methode zur Vermeidung von Ueberschlägen in den Anlagen selber. Sämtliche modernen Ableiter beruhen auf der Verwendung von strom- bzw. spannungsabhängigen Widerständen. Je nach der Stärke dieser Abhängigkeit nähern sich die Ableitereigenschaften denjenigen eines elektrischen Ventils, welches seine Klemmenspannung nicht über einen Maximalwert ansteigen lässt, der zwischen der 2,5 - 3,5 fachen Betriebsspannung liegt. Bei einer Halbwertdauer (siehe Fig. 1) der abgeleiteten Stosströme von 30 μ s vermögen sie Stromamplituden von 750 - 5000 A abzuleiten. Werden solche Ableiter mit höheren als den zulässigen Stosströmen beansprucht, so vermögen sie in der Regel die Anlage noch vor Ueberschlägen zu schützen, aber sie gehen dabei zu Grunde und verursachen Erdschluss oder Kurzschluss, wenn nicht besondere Vorkehrungen dagegen getroffen werden. Die Ableiter für kleinere Stosströme sind dementsprechend als eine Art Versicherungsprämie zu betrachten, welche wohl Ueberschläge verhindern, aber dabei auch gelegentlich zu Grunde gehen können und somit neu bezahlt werden müssen. Ableiter für hohe Stosströme sind betriebssicherer. Ihrer allgemeinen Anwendung steht aber der höhere Preis zum Teil hindernd im Wege. Letzteres gilt besonders für hohe Betriebsspannungen, wo solche Ableiter sehr teuer und deshalb in Anbetracht des seltenen Vorkommens direkter Blitzeinschläge in die Leitung in Stationsnähe unwirtschaftlich werden.

Zu 4): Die Absorption der Ueberspannungswellen mittels einer Kapazität in der Anlage vorgeschaltetes Kabel. Statt der Kabel werden in der Anlage in der Regel konzentrierte Kapazitäten (Stosskondensatoren) verwendet. Wie dort ist die zuverlässige Bemessung nur in solchen Stationen möglich, die an Eisenmastleitungen oder wenigstens über eine Eisenmaststrecke an Holzstangenleitungen oder wenigstens über eine Eisenmaststrecke an Holzstangenleitungen abgeschlossen + selber entspricht derjenigen durch ein der Anlage *

sind. Die nötige Grösse der Kapazität beträgt mindestens einige Zehntel μF .¹⁾

Im Nachteil der zeitlich begrenzten Ladungsaufnahmefähigkeit eines Kondensators bis zur Erreichung seiner höchstzulässigen Klammenspannung liegt bei näherem Zusehen kein prinzipieller Unterschied gegenüber dem Ableiter, weil auch bei diesem die zulässige Stosstromamplitude mit grösserer Stosstromdauer sinkt. Auch beim Ableiter kann eine annähernde Konstante in dem Produkt Stromamplitude \times Halbwertdauer des Stromes festgestellt werden, d.h. eine maximale aufgenommene oder abgeführte Ladung.

Die Absorptionsmethoden (Punkt 2 und 4) haben gegenüber der Ableitermethode den Vorteil der gleichzeitigen starken Verminderung der Ueberspannungsteilheit.

Zu 1 - 4 : Alle 4 Methoden sind grundsätzlich zur Unschädlichmachung der Ueberspannungswellen geeignet, sofern deren Ursprung nicht allzu nahe bei der Schutzanordnung gelegen ist. Tritt letzterer Fall ein (Blitzschlag innert einiger Hundert Meter Entfernung in die Leitung vor der geschützten Anlage), so schaukelt sich der Stosstrom im Takt der doppelten Laufzeit auf der Strecke zwischen Einschlagspunkt und Schutzanordnung zu Stromamplituden auf, die wesentlich höher liegen als der anfängliche Wellenstrom. Je nach der Bemessung von Ableitern oder Kapazitäten wird einmal die Grenze erreicht, wo der Ableiter zu Grunde geht oder die Kapazität eine zu hohe Spannung erreicht, sodass ihr Schutzwert nicht mehr genügt. Alle 4 Schutzmöglichkeiten bedingen deshalb die Einführung einer blitzsicheren Schutzstrecke vor der zu schützenden Anlage, innert welcher Blitzeinschläge nur im Masten oder Erdseile erfolgen, ohne dabei die Phasenleiter in Mitleidenschaft zu ziehen. Bei der Dämpfungsstrecke nach Punkt 1 kann diese selber als blitzsichere Schutzstrecke ausgebaut werden.

Zu 5): Die Koordination der Sicherheitsgrade von Freileitung und Anlage entspringt dem Wunsch, ohne teure Apparate zur Verhinderung von Ueberschlägen in den Anlagen infolge von Ueberspannungswellen auszukommen. Diese Forderung ist in erster Linie wirtschaftlich begründet. Ueberschläge in einer bestimmten Anlage als Folge von Blitzeinschlägen in die abgehenden Leitungen sind relativ selten, besonders in Anlagen hoher Betriebsspannung um besonders in Anlagen an Eisenmastleitungen. Die Gefahrenzone von Einschlägen, d.h. die grösste Entfernung eines Einschlags in eine Leitung, welcher noch zum Ueberschlag in der Anlage führt, beträgt für sehr hohe Betriebsspannungen nur noch einige Kilometer, wie aus Fig. 7 ersichtlich ist. Gerade für Anlagen hoher Spannung sind aber Schutzapparate teuer, besonders dann, wenn sie auch bei nahen Blitzeinschlägen die Anlage schützen und dazu einen hohen Stosstrom aufnehmen sollen. Eine andere Abhilfe ist in diesem Falle wirtschaftlich angezeigt.

Unter der Koordination (Zuordnung, Angleichung, Abstufung) der Sicherheitsgrade wird eine Abstufung der Isolation verstanden, welche bezweckt, Ueberschläge in Anlagen infolge eindringender Ueberspannungswellen zu verhindern, oder, wenn dies nicht möglich ist, sie ausschliesslich an einer bestimmten Stelle entstehen zu lassen. Es gibt demgemäss eine Koordinierung der Isolation von Freileitung und

1) Siehe z.B. Lundholm, Ericson-Review 1935/1. Die dort berechneten Kapazitätswerte sind jedoch für hohe Betriebsspannungen etwas zu knapp bemessen.

und Anlage und eine solche zwischen den Teilen ein und derselben Anlage. Nur die erstere steht hier zur Diskussion.

Die Höhe der Ueberspannungswellen wird begrenzt durch den Stossicherheitsgrad der Freileitung, auf Eisenmastleitungen also durch die Stossüberschlagsspannung der Isolatoren allein. Soll diese Welle in der Anlage keine Ueberschläge zur Folge haben, so müssen folgende Bedingungen erfüllt sein.

- 1) Kopfstationen, die an Eisenmastleitungen angeschlossen sind, müssten mindestens den doppelten Stossicherheitsgrad der Leitung aufweisen.
- 2) Durchgangstationen mit 2 an denselben Sammelschienen angeschlossenen, auf Eisenmasten verlegten Leitungen müssten mindestens gleichen Stossicherheitsgrad aufweisen wie die Leitung.
- 3) Durchgangstationen mit mehr als zwei an denselben Sammelschienen angeschlossenen, auf Eisenmasten verlegten Freileitungen sind durch Ueberschläge nicht gefährdet, wenn ihr Stossicherheitsgrad gleich demjenigen der Freileitungen ist.
- 4) Kopf- und Durchgangstationen, die an Holzstangenleitungen angeschlossen sind, müssten einen Stossicherheitsgrad aufweisen, der von gleicher Grössenordnung ist wie jener der Holzstangen.

Man erkennt, dass eine Koordination der Sicherheitsgrade zwischen Freileitung und Anlage zum Zweck der Verhinderung von Anlage-Ueberschlägen nur im Falle von Durchgangstationen mit zwei oder mehr Leitungen aus Eisenmasten praktisch möglich ist. In allen andern Fällen, vielleicht abgesehen von denjenigen kleiner Hochspannung, kommt der erforderliche Sicherheitsgrad einer Anlage bei gleichbleibendem Sicherheitsgrad der Leitung stets mit einer Verminderung der Anzahl Ueberschläge durch Ueberspannungen äussern Ursprungs verbunden sein, aber eine begründete und zugleich praktisch durchführbare Höhe des Sicherheitsgrades der Anlage lässt sich auf Grund des Koordinationsprinzips nicht allgemein angeben.

Umgekehrt kommt eine Schwächung der Leitungsisolation unter das in Kapitel 2 angegebene Mass aus den dort genannten Gründen nicht in Frage. Ist dagegen eine ankommende Freileitung wesentlich höher isoliert als gemäss dem in Kapitel 2 genannten Minimum (Holzstangenleitung!), so kann es vorteilhaft sein, die Leitungsisolation in Stationsnähe auf jenes Minimum herabzusetzen, um so die Höhe der in die Station eindringenden Wellen zu begrenzen. Diese Massnahme wird hauptsächlich dann als nötig empfunden, wenn in der Station Ueberspannungsschutzapparate mit kleinem Ableitvermögen angeschlossen sind, oder wenn die Koordination der Anlagenisolation und die Charakteristik allfällig verwendeter Koordinationsfunkenstrecken es erfordert. Der Vorteil dieser Art Koordination von Anlage und Leitungsendisolation liegt in der Möglichkeit, die übrige Leitung ohne Rücksicht auf die Anlage höher isolieren zu können. Diese Massnahme ist in der Regel nötig, wenn es sich darum handelt, Leitungen auf Eisenmasten für mittlere und Höchstspannung angenähert oder vollkommen blitzsicher zu machen. Da dies jedoch einen Spezialfall erhöhten Sicherheitsgrades betrifft, der das allgemein zu fordernde Minimum des Sicherheitsgrades nicht beeinflusst, ist hier nicht der Ort, darauf einzutreten.

4. Der elektrische Sicherheitsgrad von Anlagen.

Ohne Zweifel ist die Wahl des Sicherheitsgrades der Anlagen eine wesentlich komplexere Angelegenheit als bei den Freileitungen, handelt es sich doch um die mannigfachsten Apparate, Transformatoren, Schalter, Messwandler, Sicherungen, Durchführungs- und Stützisolatoren, Generatoren und Motoren, deren Isolationshöhe die Kosten der Anlage, besonders bei hohen Betriebsspannungen, wesentlich beeinflusst. Ueberdies ist zu bedenken, dass die Ausführung eines bestimmten äusseren Sicherheitsgrades von Apparaten auch deren entsprechende innere Durchbildung erfordert, denn nach altbewährter Konstruktionsregel soll der innere Sicherheitsgrad unter allen Umständen höher sein als der äussere, sodass bei elektrischer Ueberbeanspruchung schlimmstenfalls äussere Ueberschläge entstehen, aber keinesfalls innere Defekte.

Ein weiterer Grundsatz, der heute allgemeine Gültigkeit erlangt hat, wird von der bereits bei den Freileitungen genannten Forderung gebildet, dass eine Hochspannungsanlage den Ueberspannungen innern Ursprungs, d.h. den bei Schaltungen, Erdschlüssen, Kurzschlüssen, Teilresonanzen usw. entstehenden Ueberspannungen, ohne Ueberschlag standhalten soll. Aus wirtschaftlichen Gründen müssen jedoch für die vorliegenden allgemeinen Vorschläge von Minimalanforderungen die Fälle anormal höher, ausnahmsweise vorkommender und in der Regel relativ einfach reduzierbarer Ueberspannungen ausgenommen werden. Als Beispiele seien genannt die zufällige genaue Resonanzlage ganzer Netze mit der Betriebsfrequenz, kapazitive Selbsterregung leerlaufender Netze, anormale Kipp-Ueberspannungen einpolig oder nicht allpolig angeschlossener Messwandler u. dergl.

Aus den bereits im Kapitel 2 genannten Grössen der erfahrungsgemäss vorkommenden Ueberspannungsmaxima ergibt sich für die Erfüllung des obigen Grundsatzes als Minimalforderung eine Stossicherheit vom 3 fachen Betrag der Betriebsspannung der Anlage nach der Formel:

$$u_p = 3 \sqrt{2} \cdot U_N$$

Für Anlagen kleiner Hochspannung (< 50 kV Betriebsspannung) sollte dieses Minimum im Hinblick auf die kleinere wirtschaftliche Bedeutung eines etwas höheren Sicherheitsgrades auf 3 - 4 fache Betriebsspannung festgesetzt werden. Diese Forderung wird sich auch aus andern Gründen noch ergeben.

Für Anlagen mit abgehenden Freileitungen ist nun die Einwirkung der von Freileitungen her zulaufenden Ueberspannungswellen auf die Bemessung des Anlagensicherheitsgrades zu untersuchen.

a) Anlagen ohne Schutz gegen Eindringen von Ueberspannungswellen.

Wie gezeigt wurde, besteht nur im Fall der Durchgangsstation mit mindestens zwei auf Eisenmasten verlegten Leitungen Gewähr für Vermeidung von atmosphärischen Ueberschlägen, und zwar unter der Voraussetzung, dass die Anlage mindestens gleich hoch isoliert ist wie diese Freileitungen. Die Erfahrung

hat diesen theoretischen Schluss bestätigt. Sie hat ausserdem gezeigt, dass auch in Kopfstationen und Anlagen an Holzstangenleitungen die Ueberschlags-häufigkeit wesentlich zunimmt, wenn die Isolation der Anlage schwächer bemessen ist als jene der Leitungen. Der Vorschlag scheint daher gerechtfertigt, jede ohne Ueberspannungsschutz ausgerüstete Anlage mindestens mit dem für Eisenmastleitungen gleicher Betriebsspannung geforderten Minimal-sicherheitsgrad auszuführen, d.h. nach den Kurven der Fig. 5. Die minimale Stossprüfspannung für Anlagen mit abgehenden Freileitungen jeglicher Art wird wie in Fig. 4 auf $50 \sqrt{2}$ kV festgesetzt.

Die wirtschaftlichen Auswirkungen dieses Vorschlages ergeben sich etwa aus folgenden Ueberlegungen:

Bei den kleinen Betriebsspannungen von etwa 8 - 16 kV wird bereits heute in den grössern Werksbetrieben Material der 16 kV- und 24 kV-Reihen verwendet, dessen Stossicherheit ungefähr derjenigen des 8 kV und 16 kV-Materials nach den Fig. 4 und 5 entspricht. Die Betriebserfahrung hat ergeben, dass sich der finanzielle Mehraufwand in diesem Spannungsbereich lohnt, weil die Anzahl Störungen dadurch wesentlich herabgesetzt wird. Diese Praxis besteht vor allem für kleine und grosse Transformatorenanlagen nicht aber für Generatoren und sämtliche Apparate mit Luftisolation wie z.B. luftgekühlte Transformatoren und Messwandler. Für die luftisolierten Messwandler für kleinere Hochspannung hat die Praxis schon längst den Ausweg im Ersatz durch ölisolierte Wandler gefunden. Der wirtschaftliche Mehraufwand ist in dieser Hinsicht bedeutungslos. Bedankt man, dass für eine Stossprüfspannung von $50 \sqrt{2}$ kV ca. 3mm in Luft erforderlich sind, und dass auch zwischen Spitzen in Luft 5 - 6 mal grössere Distanzen durchschlagen werden wie in Oel¹⁾, so erkennt man, dass die Schwierigkeiten für Luft viel grösser sind als unter Oel. Infolgedes sehr hohen Stossfaktors des Oeles von 2 - 2,2 geben bereits enge Oelschlitze die geforderte Minimal-Stossicherheit.²⁾ Als Stossfaktor wird das Verhältnis der Durchschlags-spannung bei Stoss zu derjenigen bei Wechselspannung bezeichnet. Was sodann luftgekühlte Transformatoren anbetrifft, so werden solche für grössere Leistung heute für den Betrieb an Freileitungen kaum mehr gebaut.

Wichtiger ist die Frage der Generatoren und Motoren für Hochspannung. Bei diesen kommt die Oelisolation der Statorwicklung heute nicht in Betracht. Andererseits ist infolge des ungünstigen Verhaltens der Generatorwicklungen gegenüber Stossspannungen eine Isolation von der geforderten Höhe von mindestens $50 \sqrt{2}$ kV mit bedeutenden Mehrkosten verbunden. Der von der Praxis eingeschlagene Ausweg besteht darin, wertvolle Generatoren nicht direkt, sondern nur über Transformatoren auf Freileitungsnetze arbeiten zu lassen. Bedenkt man, dass sich mit dieser Anordnung oft auch betriebliche Verbesserungen (unabhängige Spannungsregulierung, grössere Kurzschlussicherheit usw.) erreichen lassen und dass letztere ein zuverlässiger Ueberspannungsschutz der gefährdeten Generatoren auch mit Verwendung von Schutzapparaten nur sehr schwer möglich ist, so scheint dieser Ausweg der

1) L.E. Machkilleisson, CIGRE 1935, Bericht Nr. 226.

2) F.J. Vogel, CIGRE 1935, Bericht Nr. 138

J. Kopeliwitsch u. P. Fourmarier, CIGRE 1935, Bericht Nr. 353

+ Schlagweite zwischen Kugeln in Oel, dagegen ca. 25 mm

einzig richtige zu sein. Die Generatorenisolation kann deshalb auf die Höhe des Sicherheitsgrades der übrigen Hochspannungsanlage keinen beschränkenden Einfluss ausüben; sie ist gesondert zu betrachten.

Für Oelschalter bedingen die Lichtbogenvorgänge wesentlich reichlicher Bemessung der Oelschichten, als sie zur Erreichung der vorgeschlagenen Stossfestigkeit nötig sind. In der Regel werden heute bei Hochspannungen von 8 - 24 kV Oelschalter mit höherer elektrischer Sicherheit verwendet, als den CEI-Empfehlungen und der 3 fachen Stossicherheit entspricht. Dass oft höhere elektrische Sicherheit verlangt wird als sogar den VDE-Regeln für kleine Hochspannungen entspricht, zeigt auch die deutsche Praxis, die ausser der Reihenspannung eines Schalters noch eine "Isolationsreihenspannung" eingeführt hat. Die Bemessung der Stossicherheit nach "ig.4 und 5" entspricht ungefähr dem, was die Praxis als wertvoll empfindet und in vielen Fällen bereits in die Tat umgesetzt hat. Für Druckluftschalter bilden die vorgeschlagenen Sicherheitsgrade keine wesentlichen Schwierigkeiten. Auf Wasserschalter muss für die Zukunft kaum Rücksicht genommen werden.

Von den Durchführungs- und Stützisolatoren genügen die letztern bereits meistens den vorgeschlagenen Anforderungen, Dagegen ist die Rolle der Durchführungen noch zu erwähnen. Durchführungen haben sich in vielen Hochspannungen als schwache Punkte bezüglich Gewitterüberspannungen erwiesen. Diese Schwierigkeiten haben dazu geführt, dass an der Gesamtkonferenz der CEI im Jahre 1927 eine Erhöhung des elektrischen Sicherheitsgrades speziell für Durchführungen vorgeschlagen und diskutiert wurde. Seither sind die Stossmessungen zur Beurteilung des elektrischen Sicherheitsgrades üblich geworden. Dabei zeigt sich, dass die Stossüberschlagsspannungen der Durchführungen oft kleiner sind als jene der Stützer, insbesondere gegenüber den praktisch wichtigen Spannungsstössen negativer Polarität. Die Schwierigkeiten mit Durchführungen sind in der Tat in einer ungenügenden, relativ kleinen Sicherheit der Durchführungen begründet, die aber bei Wechselstromprüfung nicht sicher zum Vorschein kommt, sondern nur bei Stossprüfung. Durch den Aufbau der Sicherheitsgrade auf Grundlage des Stossbeanspruchung scheint es, dass die Schwierigkeiten mit den Durchführungen ohne weiteres verschwinden werden, wenn für sie mindestens dieselbe Sicherheit verlangt wird wie für Stützer. Eine besondere, höhere Stossicherheit für Durchführungen zu verlangen, scheint nicht berechtigt zu sein. Die Anpassung der Durchführungen, und von diesen Besonders der compoundgefüllten Typen, an die Erfordernisse der Stossicherheit kann aber kaum umgangen werden. Dass die aufzuwendenden Mehrkosten als wirtschaftlich empfunden werden, zeigt die genannte Bestrebung der Praxis, den Sicherheitsgrad, speziell der Durchführungen, erhöhen zu wollen.

Aus der kurzen Betrachtung, die naturgemäss an dieser Stelle nicht abschliessend und vollständig sein kann, lässt sich die Festlegung des Stossicherheitsgrades auf die Kurven der Fig. 4 und 5 für alle ohne Ueberspannungsschutzapparate ausgerüsteten Anlagen rechtfertigen.

Es sei nochmals daran erinnert, dass damit erst eine relative, keine absolut Sicherheit gegenüber Ueberschlägen durch äussere Ueberspannungswellen erreicht wird, wenn es sich um Anlagen handelt, die an Holzstangenleitungen angeschlossen sind, oder um Kopfstationen an Eisenmastleitungen. Zu betrachten bleiben jene Anlagen, die zur Vermeidung der restlichen Ueberschläge mit einem Ueberspannungsschutz nach Punkt 1 - 4 des Kapitels 3 oder zur Störungsbegrenzung mit einer "schwachen Stelle" und koordinierter Isolation ausgerüstet werden.

b) Anlagen mit Ueberspannungsschutz.

Das Erscheinen wirksamer und zuverlässiger Ueberspannungsschutzapparate und Anordnungen, insbesondere der modernen Ableitern hat die theoretische Möglichkeit geschaffen, den Sicherheitsgrad der geschützten Anlage vollständig unabhängig von jenem der angeschlossenen Freileitungen zu wählen, indem der Ueberspannungsschutz automatisch jede übermässige Ladung nach Erde abführt und damit die Spannung der Anlage gegen Erde auf einen charakteristischen Wert begrenzt. Diese Grenzspannung (Ansprech- und Restspannung des Ableiters) bestimmt dann die minimale Höhe des nötigen Stossicherheitsgrades der Anlage. Mit den heute erhältlichen Ableitern sind Grenzspannungen von 2,5 - 3,5 facher Betriebsspannung möglich, solange die abgeleiteten Ströme das zulässige Mass (1000 - einige Tausend A) nicht übersteigen. Bei Ueberbeanspruchung steigt die Spannung im Ableiter je nach der verwendeten Ableitertypen weiter an. Für diese Erscheinung, sowie für Teilreflexionen, die zwischen dem Ableiter und entfernten Teilen der Anlage entstehen, ist aber ein zusätzlicher Sicherheitsgrad erforderlich, der gerade bei kleinen Betriebsspannungen und bei räumlich ausgedehnten Anlagen erheblich ins Gewicht fällt. Nachdem bei 25 kV Betriebsspannung gemäss den Vorschlägen ein Stossicherheitsgrad von der Grösse 4 erreicht ist (siehe Fig.5), ist es begründet, die Anforderungen an den Sicherheitsgrad für kleinere Betriebsspannungen geschützter Anlagen zu reduzieren. Gedenkt man, dass eine minimale Schlagweite auch mit Rücksicht auf Staub, Schmutz, Feuchtigkeit, Insekten usw. nötig ist, so scheint eine Stossprüfspannung gemäss der Formel

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot u_p = 3 U_N + 25 \text{ kV}$$

im Bereich von 0 - 25 kV Nennspannung am besten den verschiedenen Anforderungen zu entsprechen. In der für den Sicherheitsgrad von Anlagen entworfenen Fig. 9 sind die Kurven der Prüfspannungen 1 und 1 a, sowie der entsprechenden Sicherheitsgrade 4 und 4a für Anlagen mit und ohne modernen Ueberspannungsschutz eingetragen worden.

Mit modernen Ableitern lässt sich demgemäss bei Betriebsspannungen unter 25 kV etwas an der aufgewendeten Stossisolation sparen. Die Bedeutung der Ableiter liegt aber weniger in dieser Ersparnis an aufzuwendender Isolation, als in der Erzielung höherer Betriebssicherheit, durch Vermeidung aller Ueberschläge in Anlagen. In dieser Beziehung kommt den Ableitern zweifellos, insbesondere in Anlagen an Holzstangenleitungen, Bedeutung zu.

c) Anlagen mit koordinierter Isolation und "schwacher Stelle".

Die Auswirkung der koordinierten Isolation soll an einer Höchstspannungsanlage betrachtet werden, die nicht mit Ueberspannungsschutz ausgerüstet ist und von der Leitungen ausgehen, die selber nicht blitzsicher sind (Holzstangenleitungen oder Eisenmastleitungen mit hohen Erdungswiderständen). Die seltenen Ueberschläge, die in der Anlage infolge von Blitzeinschlägen in der Anlage an einer bestimmten Stelle erfolgen und die Isolation der gesamten Anlage ist derart zu bemessen oder abzustufen, dass an keiner andern Stelle ein Ueberschlag oder eine Beschädigung entsteht. Diese Bedingung erfordert eingehendes Studium nicht nur der äussern, sondern auch der innern Isolation aller verwendeten Apparate, insbesondere der Transformatoren.¹⁾

Aus allen bisher bekannt gewordenen Charakteristiken von Luft- und Oelisolierungen geht nun hervor, dass die Stossfestigkeit der innern Transformatorisolation bei sehr kurzer Beanspruchungszeit weniger zunimmt als jene der Isolatoren und Funkenstrecken in Luft, mit Ausnahme der Kugelfunkstrecken.²⁾ Die Kurven der Fig. 8 zeigen das grundsätzliche Verhalten von Isolatoren in Luft und von Transformatorenisolation unter Oel (Kurven 1 und 2). Beim stossichern Transformator liegt die Kurve 1, die sich allgemein auf innere Defekte bezieht, durchwegs über der Kurve 2. Der verschiedenartige Charakter beider Kurven bedingt entweder eine grosse Reserve der innern Sicherheit bei langdauernder Beanspruchung oder ein Versagen der innern Isolation bei sehr kurzdauernder Stossbeanspruchung.

Soll der Transformator durch eine Koordinationsfunkenstrecke geschützt werden, so muss ihre Charakteristik durchwegs unterhalb der Kurve 2 liegen, wie z.B. gemäss Kurve 3. Leider ist die bisher zu diesem Zweck verwendete Stabfunkenstrecke (Rod-Gap) deshalb ungünstig, weil sie bei hohen Stossspannungen gegenüber Isolatoren (Durchführungen) relativ grossen Ueberschlagsverzug aufweist, wie die Kurven 2 & 3 andeuten. Bei ihr besteht deshalb die Gefahr des ungenügenden Schutzes bei hohen, steilen Ueberspannungstössen oder dann einer bei langdauernden Stössen unzulässig tiefen Ansprechspannung. Letzteres bedingt eine umso reichlichere, schlecht ausgenützte Transformatorisolation. Die praktische Bedeutung der Koordinationsfunkenstrecke für die Zukunft hängt deshalb davon ab, ob es gelingt, einfache Koordinationsfunkenstrecken mit passender oder einstellbarer Charakteristik zu finden.

Für die Frage des Sicherheitsgrades der Anlage ist ersichtlich, dass selbst unter Voraussetzung der günstigsten Charakteristik einer Koordinationsfunkenstrecke diese ca. 10% tiefere Stossüberschlagsspannung aufweisen muss als der schwächste Anlageteil. Da in diesem Fall aber auch die Funkenstrecke bei allen Ueberspannungen innern Ursprungs nicht ansprechen darf, ist für die Anlage eine ca. 10% höhere Sicherheit erforderlich als für die Funkenstrecke. Bei einer grössten Höhe der innern Ueberspannungen vom 3 fachen Betrag der Betriebsspannung ist somit für die koordinierte Anlage ein minimaler Stossicherheitsgrad vom Betrag 3,3 erforderlich. Nur für sehr hohe Betriebs-

1) Dallaverde, 5^e Congrès de l'UIPD 1934, Zürich, Rapport III-B-5.

2) K.B.Mc. Echeron, CIGRE 1935, Bericht Nr. 334

F. Brand CIGRE 1935, Bericht Nr. 136

F.J. Vogel CIGRE 1935, Bericht Nr. 138.

spannungen (> 100 kV) dürfte mit Rücksicht auf die wirtschaftliche Bedeutung der Isolationshöhe und die erhöhte Dämpfung von Ueberspannungen durch Glimmverluste die höchstzulässige Ueberspannung auf 2,7 fache Betriebsspannung und dementsprechend der minimale Stossicherheitsgrad der Anlage auf 3 festgesetzt werden. Eine Unterschreitung der 3 fachen Sicherheit lässt sich keinesfalls empfehlen.

d) Vergleich der vorliegenden mit andern modernen Vorschlägen über den elektrischen Sicherheitsgrad von Anlagen.

Allgemeine Vorschläge für die Bemessung des Stossicherheitsgrades liegen noch nicht vor. Dagegen sind Vorschläge in den USA gemacht worden für Transformatoren und deren Koordinationsfunkenstrecken. Das Bedürfnis dafür war dort dringender als in Europa, weil die seit 1915 üblich gewordene starre Nullpunktserdung in Verbindung mit vermindelter Transformatorsicherheit (Reduktion der Prüfspannung von $2\sqrt{3}$ auf $(1 + \sqrt{3})$ mal Sternspannung) vermehrte Defekte an Transformatoren nach sich zog.¹⁾

Die neuen Vorschläge für die Stossprüfung von Transformatoren verlangen die Einstellung der Koordinationfunkenstrecken an Transformatoren auf 3,34 - 3,5 fache Nennspannung bei 115 - 287 kV Nennspannung (Betriebsspannung), und 3,6 - 4 fache Nennspannung bei 34 - 92 kV Nennspannung. Für die Durchführungen sind die Stossüberschlagsspannungen 3 - 10% höher.²⁾ Nach einem Vorschlag der Westinghouse El. & M. Co. werden die Koordinationfunkenstrecken etwas höher eingestellt, nämlich auf 3,45 - 3,7 fache Nennspannung bei 115 - 230 kV Nennspannung, und auf 3,85 - 4,4 fache Nennspannung bei 34 - 92 kV Nennspannung, nämlich entsprechend den Vorschlägen für die Durchführungen.³⁾ Die amerikanischen Vorschläge für Transformatoren und Durchführungen sind zum Vergleich mit dem vorliegenden Vorschlag in Fig. 9 eingetragen worden (Kurve 2 und 3).

In Europa werden auf Grund der 1923 erschienenen Normen des VDE und des SEV Sprungwellenproben an Transformatoren durchgeführt. Diese eignen sich aber nicht für die Beurteilung des äusseren Sicherheitsgrades, da bei ihnen lediglich eine Windungsprobe bezweckt ist, und da ausserdem bei der Prüfung eine kleinere als die praktisch vorkommende Sprungwellenhöhe, dafür aber eine grössere Anzahl Prüfstösse, verwendet wird.

Zusammenfassend geht aus der vorliegenden Betrachtung über Sicherheitsgrade hervor, dass unter allen Umständen ein minimaler Stossicherheitsgrad von Wechselstrom-Hochspannungsanlagen vom Betrag 3 erforderlich ist, um den technischen Beanspruchungen und den Anforderungen, die heute an die Betriebssicherheit elektrischer Anlagen gestellt werden, gerecht zu werden. Gemäss den Kurven der Fig. 9 steigt dieser Sicherheitsgrad bei Betriebshochspannungen unter 50 kV an und zwar in einem Mass, das bei Betriebsspannungen unter 25 kV davon abhängig ist, ob die Anlage mit oder ohne modernen Ueberspannungsschutz betrieben wird.

1) F. Brand, l.c.

2) AIEE,-Standards 134, P. 1595, oder Mc. Eachron, CIGRE 1935, Bericht No. 334.

3) F.J. Vogel, l.c.

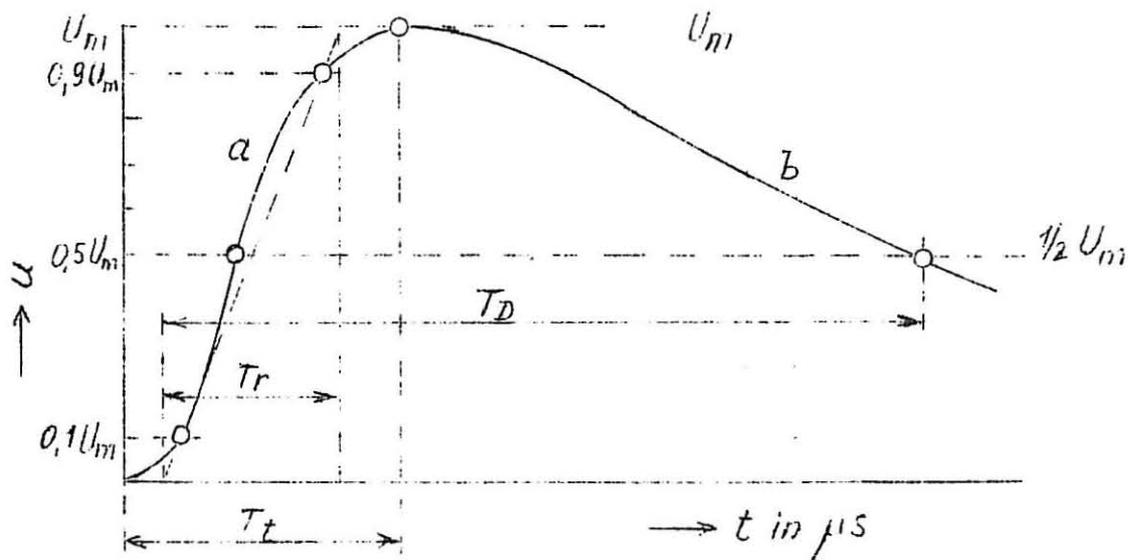


Fig. 1. 1 = Kurvenform einer Stossspannung, nach CEI.
 a = Front (Stirn) der Stossspannung.
 b = Rücken der Stossspannung.
 u_m = Amplitude der Stossspannung. kV
 T_t = Gesamte Frontdauer der Stossspannung. μs
 T_r = Frontdauer der Stossspannung. μs
 T_D = Zeitdauer bis zum Halowert. μs

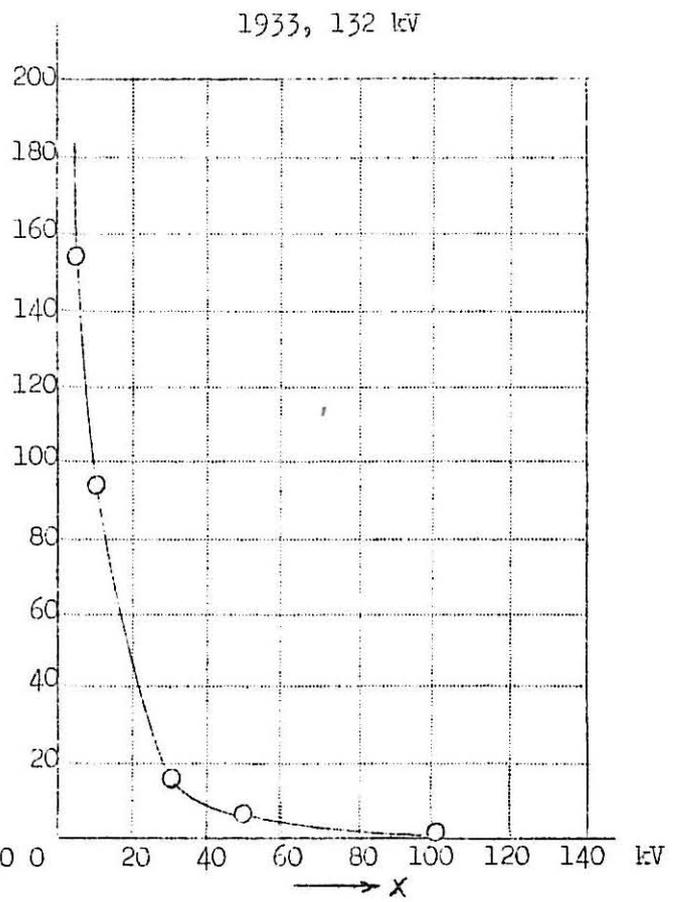
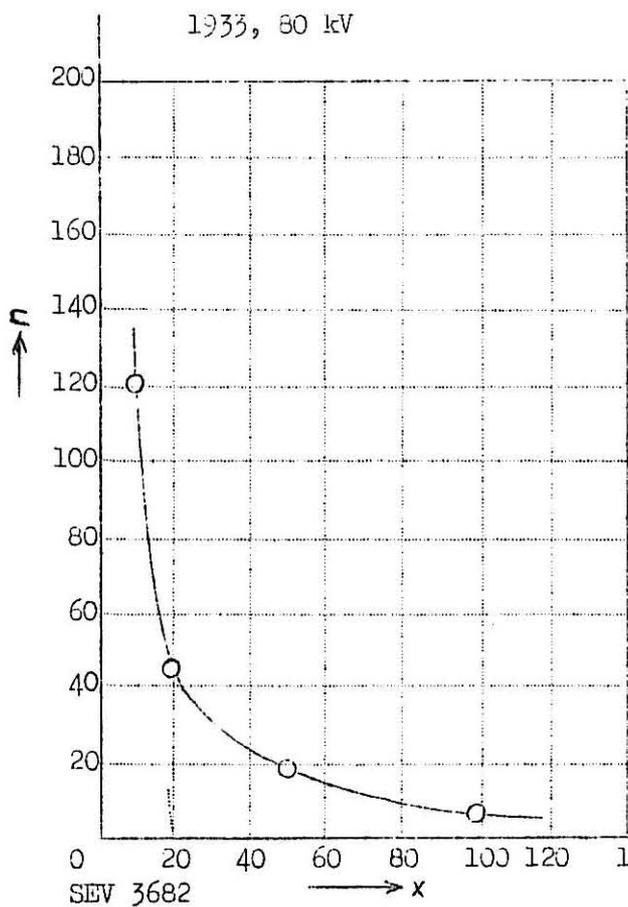
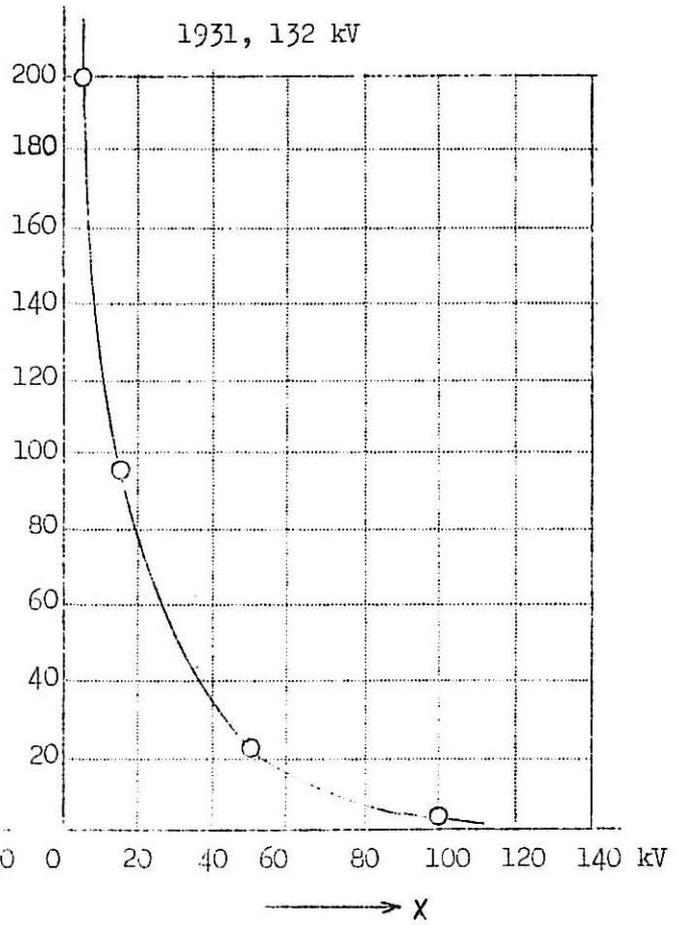
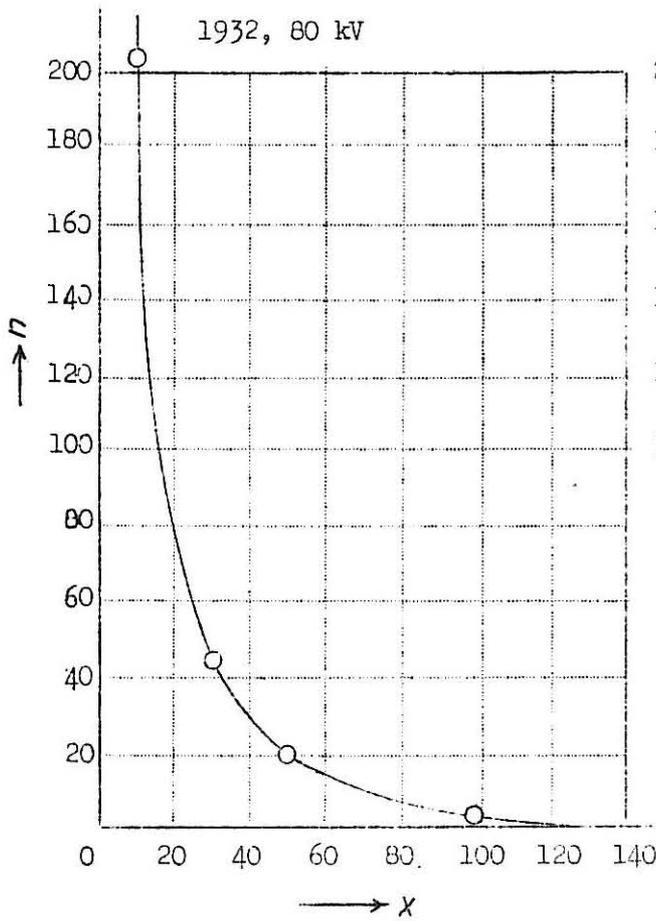


Fig. 2. Legende siehe Fig. 3.

SEV 3682

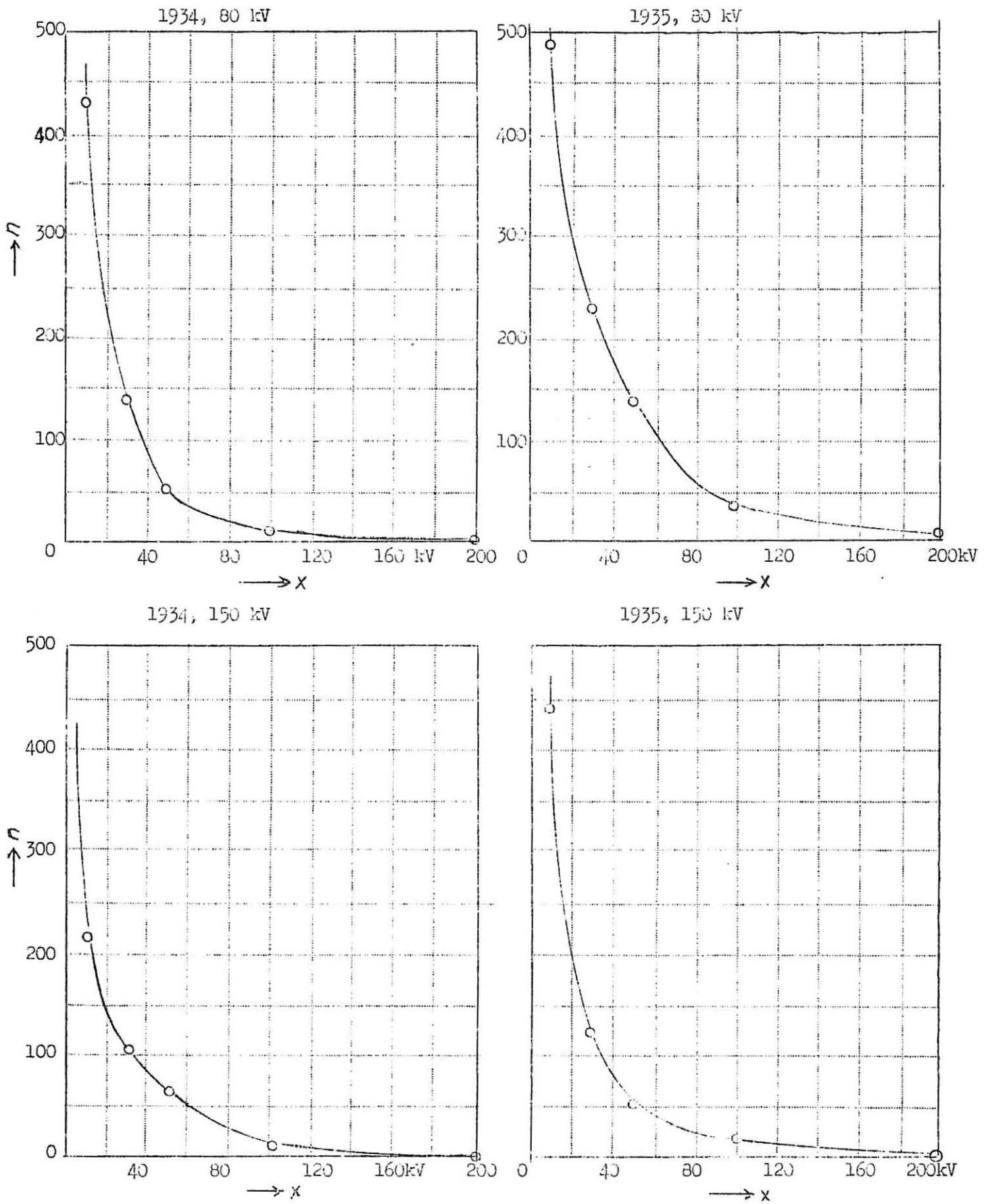


Fig. 3. Häufigkeitskurven oszillographisch gemessener atmosphärischer Ueberspannungen an bestimmten Messpunkten verschiedener Hochspannungsnetze.

Abzisse x = Amplituden der Ueberspannungen, die der momentan vorhandenen Betriebsspannung vom Gewitter überlagert werden.

Ordinate n = Anzahl der Ueberspannungen, deren Höhe den Abszissenwert überschreitet, pro Jahr und Messpunkt.

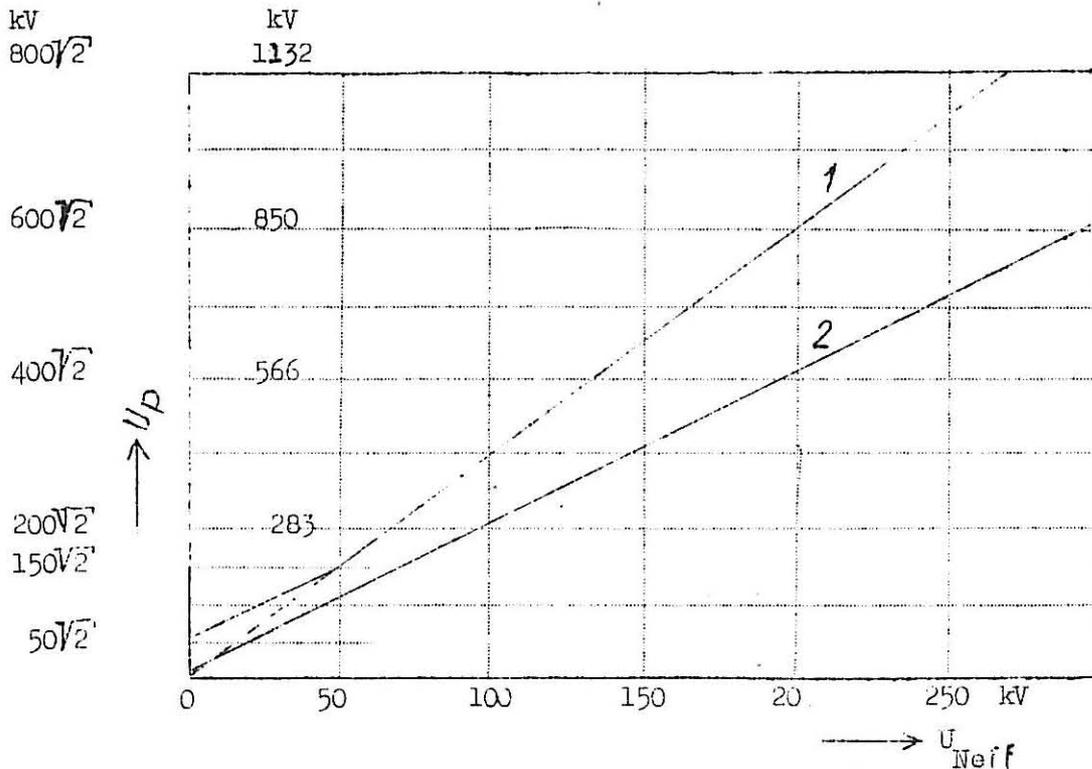


Fig. 4. Minimale Prüfspannungen von Freileitungsisolatoren
 1= Vorschlag minimaler Stoss-Prüfspannungen für Freileitungsisolatoren mit geerdeten Stützen.
 2= Minimale Wechselstrom-Prüfspannung für Leitungsisolatoren gemäss den Empfehlungen der CEI.

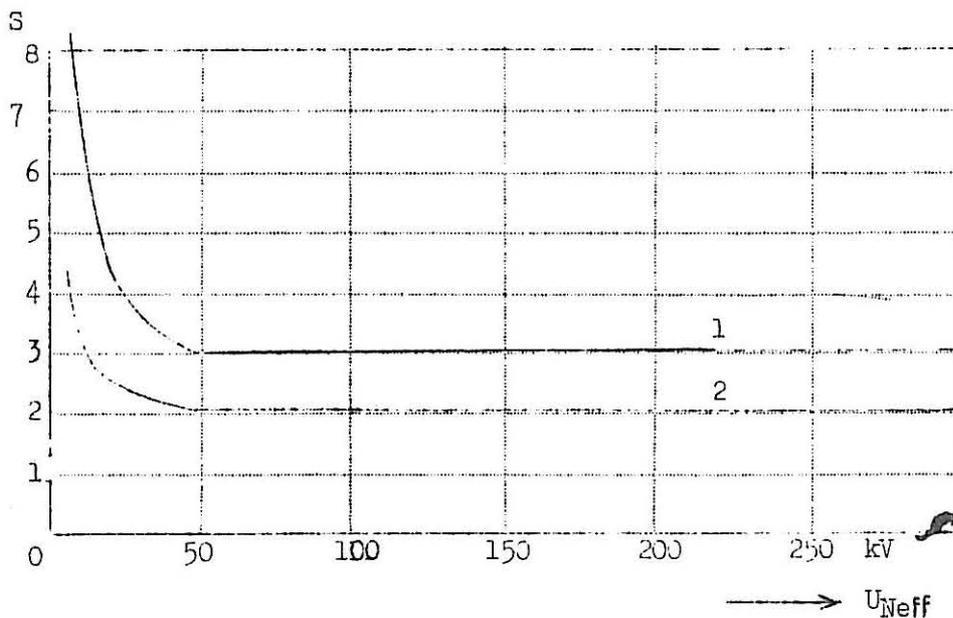


Fig. 5. Minimale Sicherheitsgrade für Freileitungsisolatoren, gemäss den Prüfspannungen der Figur 4.
 1 = Vorschlag minimaler Stoss-Sicherheit von Freileitungsisolatoren mit geerdeten Stützen.
 2 = Minimaler Wechselstrom-Sicherheitsgrad von Freileitungsisolatoren gemäss den Empfehlungen der CEI.

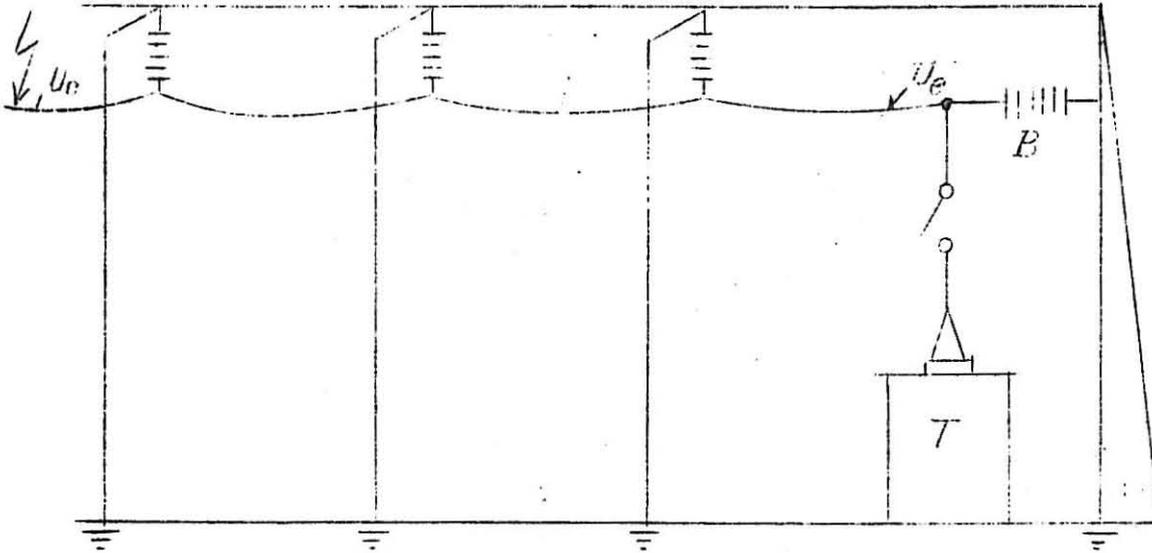


Fig. 6. Schemata einer Dämpfungsstrecke für Überspannungen.
 A B = Blitzsichere Dämpfungsstrecke
 T = Durch die Strecke A B geschützter Transformator.

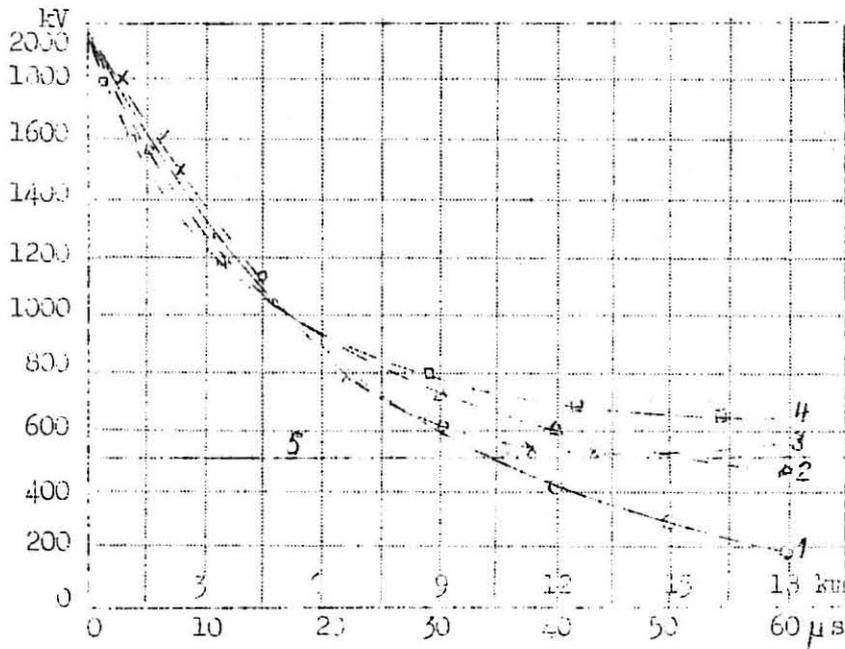


Fig. 7. Dämpfungskurven nach amerikanischen Messungen (Aus L.V. Bewlây, Traveling Waves on Transmission Systems, 1933, Fig. 27).

- 1 = Exponentielle Dämpfung $e = E e^{-t/\tau}$
 - 2 = Formel nach Foust u. Wenger $e = E / (Et + 1)$
 - 3 = Formel nach Skilling $at = (E - e) + e_0 \ln \frac{E - e_0}{e - e_0}$
 - 4 = Auf Grund quadratisch mit der Spannung ansteigender Glimmverlâste
 - 5 = Glimmspannung der Leitung
- Annahmen für alle Gesetze: Anfangsspannung $E = 2000$ kV,
 Glimmspannung $e_0 = 500$ kV, Kurvenpunkt (1000 kV, 17,5 μ s).
 a, b u. k sind empirische Konstanten.

$$bt = \frac{E - e}{E - e_0} \frac{e_0}{e - e_0} + \ln \frac{E - e_0}{e - e_0}$$

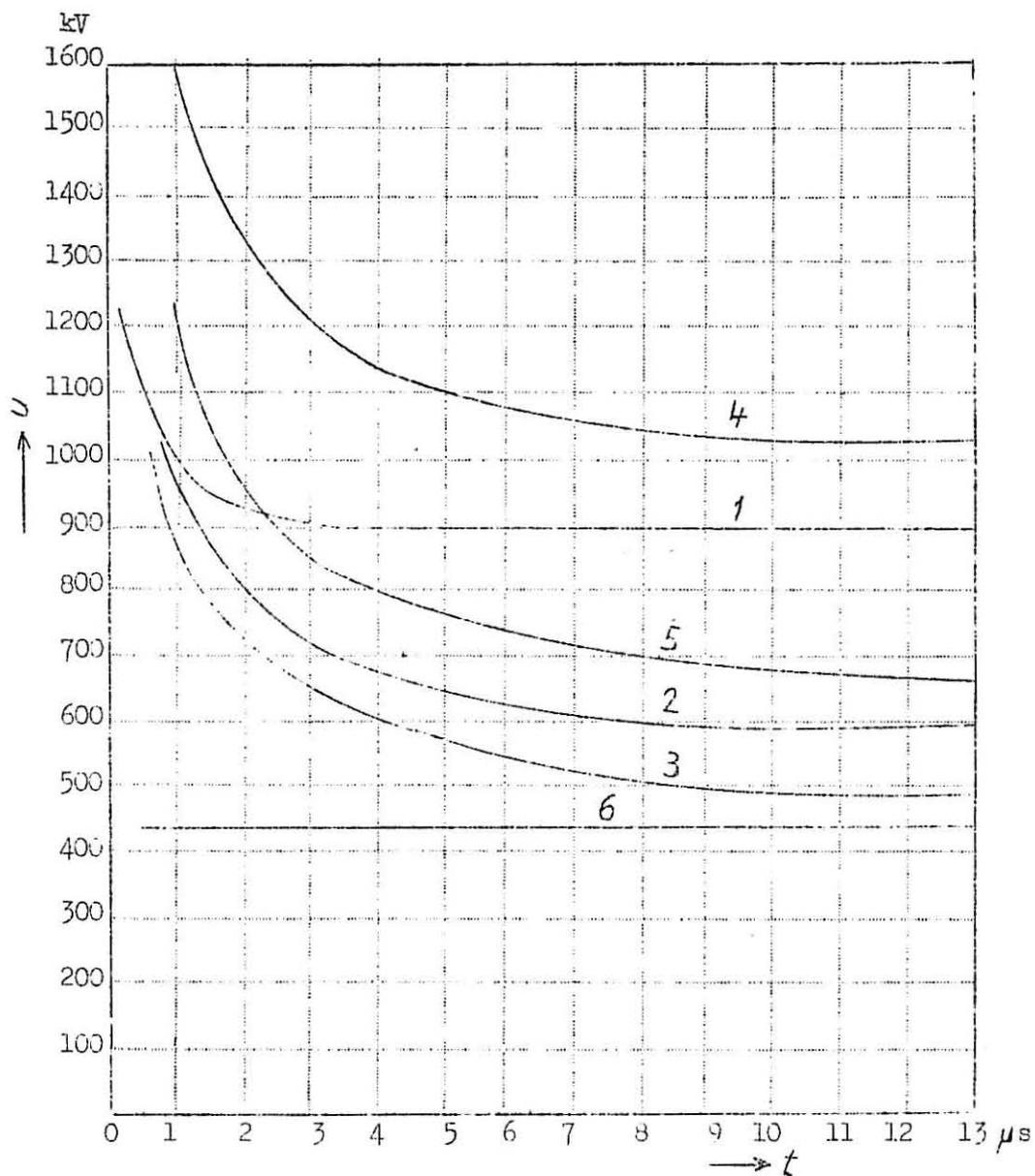


Fig. 8. Koordinierte U -isolation mit Koordinations-Funkenstrecke.

1. = Stoss-Durchschlagsspannung eines Transformatoren-Modells nach F.J. Vogel, CIGRE 1935, Bericht No. 138.
- 2 = Stoss-Ueberschlagsspannung der mit Rücksicht auf die innere Transformatoren-Festigkeit (Kurve 1) grösstzulässigen Transformatoren-Durchführung.
- 3 = Stoss-Ueberschlagsspannung einer Spitzenfunkenstrecke mit ca. 72 cm Schlagweite als grösstzulässiger Koordinationsfunkenstrecke.
- 4 = Stossüberschlagsspannung einer 152 cm-Spitzenfunkenstrecke
- 5 = Stossüberschlagsspannung einer 103 cm-Spitzenfunkenstrecke nach J.J. Torok, Trans. AIEE, Vol 49, S.866.
6. = Scheitelwert der Durchschlagsspannung bei Prüfung mit Wechselstrom während 1 Minute.

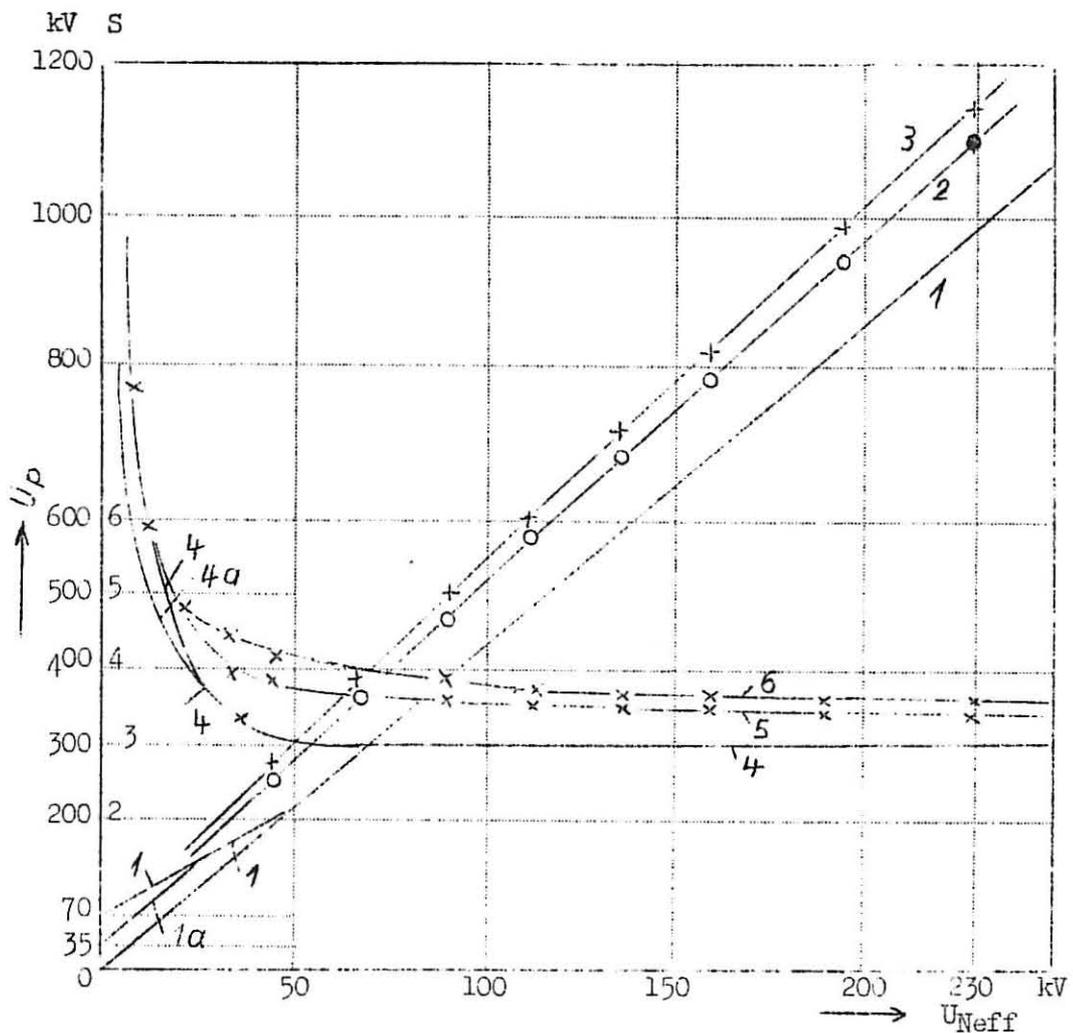


Fig. 9. Vergleich der vorliegenden Vorschläge für den minimalen Stoss-sicherheitsgrad von Hochspannungsanlagen mit den Vorschlägen des amerikanischen Untercomites für Transformatoren zu Stoss-Überschlagsspannungen von Transformatoren-Koordinationsfunkenstrecken und Durchführungen.

- 1 = Vorschlag für die Stossprüfspannung von Hochspannungs-Anlagen mit Freileitungen, $u_p = \sqrt{2} \cdot 3 \cdot U_N$ für $U_N > 50$ kV, $u_p = \sqrt{2} \cdot (2 \cdot U_N + 50 \text{ kV})$ für $U_N < 50$ kV-
- 1a = Vorschlag der verminderten Stossprüfspannung für Anlagen mit modernen Überspannungs-Schutzapparaten, $u_p = \sqrt{2} \cdot (3 \cdot U_N + 25 \text{ kV})$ für $U_N < 25$ kV.
- 2 = Stoss-Überschlagsspannung von Koordinationsfunkenstrecken an Transformatoren
- 3 = Stoss-Überschlagsspannung von Transformatoren und Durchführungen
- 4 = Vorschlag des Stoss-Sicherheitsgrades von Hochspannungs-anlagen mit Freileitungen, gemäss Kurve 1.
- 4a = Vorschlag des verminderten Stoss-Sicherheitsgrades für Anlagen mit modernen Überspannungs-Schutzapparaten, gemäss Kurve 1a.
- 5 = Aus Kurve 2 gerechneter Sicherheitsgrad von Koordinationsfunkenstrecken an Transformatoren.
- 6 = Aus Kurve 3 gerechneter Sicherheitsgrad von Transformatoren-Durchführungen.

+ gemäss AIEE Standards Dez. 1934, P. 1595.