

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 34 (1943)
Heft: 3

Artikel: Die Koordination der Isolation in Hochspannungs-Anlagen
Autor: Rump, S.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057699>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 11.01.2026

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:

Secrétariat de l'Association Suisse des Electriciens
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Téléphone 5 17 42
Chèques postaux VIII 8481

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXXIV^e Année

N^o 3

Mercredi, 10 Février 1943

Die Koordination der Isolation in Hochspannungs-Anlagen

Stark gekürzter Auszug *) aus der Preisarbeit, die für den dritten Wettbewerb der Denzler-Stiftung 1938

eingereicht wurde von S. Rump, Zürich **)

621.316.93 : 621.313.048

Die Frage der Koordinierung der Isolation in Hochspannungsanlagen ist in den vergangenen Jahren von vielen Verfassern behandelt worden. Sehr viele Messresultate und Angaben von physikalischem Belang sind zerstreut in der Fachliteratur zu finden.

Die vorliegende Arbeit bezweckt, eine ordnende Uebersicht und die Auswertung der Veröffentlichungen zu geben, wobei aber neben den physikalischen besonders auch die wirtschaftlichen Fragen der Koordination behandelt werden.

Es ergeben sich so neue Gesichtspunkte und Vorschläge, welche sich in der Praxis leicht durchführen lassen. Sie führen zu einer bedeutenden Erhöhung der Betriebssicherheit, ohne eine nennenswerte Verteuerung der Anlagen zu verursachen; sie schaffen klare Verhältnisse mit Rücksicht auf die gewünschte Isolationsfestigkeit und bedeuten daher einen ganz wesentlichen Fortschritt gegenüber den bisher üblichen Grundsätzen.

Bemerkung des Sekretariates des SEV: Die vorliegende Arbeit steht mit den Arbeiten des Fachkollegiums 28 des CES, das zurzeit Leitsätze für die Koordination der Isolationen aufstellt, in keinem Zusammenhang. Es handelt sich um eine persönliche Arbeit des Autors, die den SEV und seine Organe nicht bindet.

La question de la coordination de l'isolement dans les installations à haute tension a déjà été traitée ces dernières années à maintes reprises. De nombreuses mesures et des rapports sur ce sujet se trouvent dispersés dans la littérature technique.

L'auteur de cette étude s'est efforcé de dresser une vue d'ensemble des résultats obtenus et des conditions qui intéressent non seulement l'aspect physique de la coordination, mais également le point de vue économique.

Ces recherches donnent de nouveaux aperçus et fournissent de nouvelles suggestions, dont la réalisation pratique sera facile. Elles conduiront à une augmentation sensible de la sécurité d'exploitation, sans frais supplémentaires importants. Enfin, elles précisent la résistance d'isolement désirable et constituent, de ce fait, un très net progrès par rapport aux principes admis jusqu'ici.

Remarque du Secrétariat de l'ASE: Le présent travail n'est aucunement lié à ceux du Comité technique 28 du CES, qui met actuellement au point des Recommandations pour la coordination de l'isolement. Il s'agit d'un travail personnel de l'auteur, qui n'engage ni l'ASE, ni ses organes.

I. Einleitung

In den heute bestehenden Hochspannungsanlagen treten erfahrungsgemäss Ueberschläge durch Ueberspannungen auf. Um zu vermeiden, dass empfindliche Teile, wie Maschinen, Transformatoren, Durchführungen, Apparate usw. dadurch in Mitleidenschaft gezogen werden, wurde vorgeschlagen, die Isolation der Anlage zu «koordinieren», d. h. abzustufen, so dass unvermeidliche Ueberschläge nur in Luft und an Stellen auftreten, wo keine Materialschäden entstehen. Dadurch können die eventuellen Betriebsunterbrechungen auf ein Minimum reduziert werden.

Diese Forderung ist allbekannt; sie könnte z. B. durch einen sogenannten Grobschutz, d. h. eine Funkenstrecke ohne Seriewiderstand mit einer kleineren Ueberschlagspannung als die der übrigen Teile der Anlage, erreicht werden.

*) Der vollständige Text steht Interessenten beim Sekretariat des SEV zur Verfügung.

**) Siehe Bull. SEV 1942, Nr. 1, S. 27.

Um dieses Problem mit wirtschaftlichen Mitteln zu lösen, d. h. um die Isolatoren, an denen keine Ueberschläge auftreten dürfen, nicht unnötig überdimensionieren oder die Betriebssicherheit durch die Stellen, an welchen die unvermeidlichen Ueberschläge erfolgen sollen, nicht unnötig reduzieren zu müssen, sind folgende Untersuchungen erforderlich:

1. Welche Höhe und welchen zeitlichen Verlauf haben die im Betrieb entstehenden Ueberspannungen?
2. Welche Isolationsfestigkeit haben die Maschinen, Transformatoren, Apparate, Durchführungen usw. bei den unter 1. erwähnten Ueberspannungen?
3. Welche Isolationsfestigkeit haben die Funkenstrecken, die zum Schutze der Anlagen eventuell in Betracht kommen, bei den unter 1. erwähnten Ueberspannungen?

Diese Fragen werden gestützt auf vorliegende Messungen beantwortet und auf Grund dieser Untersuchungen folgende Probleme behandelt:

4. Ist es möglich, die in Anlagen vorhandene Isolation besser auszunützen, so dass die Betriebssicherheit höher wird, ohne die Erstellungskosten zu steigern?

5. Welche Funkenstrecken sind die geeignetsten, um Ueber- und Durchschläge in Anlageteilen zu vermeiden, ohne die Betriebssicherheit unnötig zu reduzieren?

6. Können Lichtbogenschäden durch andere Mittel verhindert werden als durch Funkenstrecken, deren Isolationsfestigkeit kleiner ist als die der anderen Anlageteile?

Am Schluss der Arbeit wird ein Vorschlag zur Durchführung der Koordination aufgestellt, welcher die oben erwähnten Arbeiten in Betracht zieht, so dass alle von der Technik gestellten Anforderungen erfüllt werden.

II. Die im Betrieb auftretenden Ueberspannungen oder elektrischen Beanspruchungen

1. Betriebsbedingte Ueberspannungen

Früher hatte man unter einer Reihe von Ueberspannungen zu leiden, die heute durch richtige Anordnung und Dimensionierung der Anlagen vermieden oder innert zulässiger Grenzen gehalten werden können, z. B. Ueberspannungen durch Öffnen der Sekundärkreise der Stromwandler, durch kapazitive Uebertragung von Hoch- auf Niederspannung, durch Durchbrennen von Generatoren, durch Resonanz-Ueberspannungen usw. Diese haben auf die Bemessung der Isolation keinen Einfluss, so dass wir hier nicht näher darauf einzugehen brauchen.

Ueberspannungen durch Erdschlüsse

Tabelle I enthält die aus der Literatur bekannten max. Höhen der gemessenen Erdschluss-Ueberspannungen. Sie zeigt, dass die Ueberspannungen durch direkte Erdung der Nullpunkte oder durch Löschspulen auf ungefährliche Werte (unter 2mal verkettete Spannung) reduziert werden können, d. h., heute sind die Erdschluss-Ueberspannungen für die Anlagen keine Störungsquellen.

Höhe der Erdschluss-Ueberspannungen als Vielfaches der verketteten Betriebsspannung der Anlage

Tabelle I.

| Autor | Betriebsspannung der Anlage kV | gemessen | Netz | | |
|---|--------------------------------|---|----------|----------|----------------|
| | | | isoliert | gelöscht | direkt geerdet |
| Berger ¹⁾ . . . | 8 | | 2 | | |
| Neuhaus ²⁾ . . | 15...100 | | 2,6 | 1,9 | |
| Subcommittee Edison u. Bell ³⁾ | 140 | beim Versuch mit Oszillogr. mit S. R. . . | 1,7 | 1,2 | |
| " | 140 | im Betrieb mit Oszillogr. mit S. R. . . | 2 | 1,6 | |
| " | 75 | beim Versuch mit Oszillogr. mit S. R. . . | 2,3 | 1,6 | |
| " | | | 3,1 | 1,7 | |
| " | 37,5 | im Betrieb mit Oszillogr. mit S. R. . . | 1,6 | | 0,85 |
| " | 33 | | 1,7 | | 1,3 |
| Maximum aller Angaben | | | 3,1 | 1,9 | 1,3 |
| Bemerkung: Diese Messungen sind teils durch Versuche mit künstlichen Erdschlüssen, teils während des Betriebes durch automatisch registrierende Instrumente gemessen worden. S. R. heisst «Surges-Recorder» (Klydonograph). | | | | | |

¹⁾ Literaturhinweise am Schluss des Artikels.

Schalt-Ueberspannungen

Tabelle II enthält die in Industrieanlagen max. gemessenen Schalt-Ueberspannungen.

Beim Abschalten von leerlaufenden Leitungen entstehen die Ueberspannungen an den Sammelschienen, und zwar durch Rückzündung im Schalter, und nur, wenn keine Leitungen den Sammelschienen angeschlossen bleiben. Wenn die Schlagweite resp. die Isolationsfestigkeit der Unterbrechungsstellen im Schalter rasch vergrößert wird, z. B. durch Vielfach-Unterbrechung oder durch moderne Druckluft-Schnellschalter, treten keine Rückzündungen und infolgedessen keine Ueberspannungen auf, d. h. durch Abschalten von leerlaufenden Leitungen werden in Anlagen mit modernen Schaltern keine Ueberspannungen entstehen.

Max. Höhe der Schalt-Ueberspannungen in 50-Hz-Netzen (wo nichts anderes erwähnt, sind die angegebenen Ueberspannungen gegen Erde)

Tabelle II.

| | Autor | Betriebsspannung d. Anlage od. des betätigten Schalters kV | Ueberspg. als Vielfaches d. verketteten Betriebsspannung | Bemerkung |
|--|---|--|--|--|
| Abschalten von leerlaufenden Leitungen | Kopeliovitch ⁴⁾ Baatz ⁵⁾ Neuhaus ²⁾ " | 55 6...220 100 100 | 2,3 2,3 2,1 2,9 | zw. Phasen |
| Abschalten von leerlaufenden Transformatoren | Kopeliovitch ⁴⁾ " Freiberger ⁶⁾ " " Estorff ⁷⁾ Brown, Boveri | 15 u. 60 — 3 u. 6 30 100 30 30 u. 50 | 2,2 3...3,5 4,7 3,2 1,4 2,5 2,5 | zw. Phasen zw. Phasen zw. Phasen |
| Schaltvorgänge im Betrieb, wahrscheinlich Abschaltungen von leerlaufenden Transf. u. Leitungen | Neuhaus ²⁾ Subcommittee Edison und Bell ³⁾ " | 10...100 140 6...220 | 2,3 2,4 3,3*) | |

*) Maximalwert wahrscheinlich nie gemessen, sondern durch Extrapolation ermittelt. Der max. gemessene Wert ist wahrscheinlich tiefer.

Bemerkung: Ueber die Schaltüberspannungen in Bahnanlagen siehe Wilke ⁸⁾.

Die Ueberspannungen durch Abschalten von leerlaufenden Transformatoren scheinen nur bei gewissen Grössen des Leerlaufstromes in seltenen Fällen aufzutreten und nehmen wahrscheinlich mit der Betriebsspannung, bei welcher geschaltet wird, ab. Trennt man zuerst einen Transformator an der Niederspannungsseite und nachher an der Oberspannungsseite ab, sind in den meisten Fällen keine Ueberspannungen zu erwarten ⁶⁾, ⁹⁾. Ueberschläge würden aber keine weiteren Folgen haben, weil diese am abgeschalteten Transformator auftreten und infolgedessen von keiner Leistungsquelle gespeist werden. Dies setzt voraus, dass keine Windungsschlüsse in den Transformatoren als Folge

von Ueberschlägen entstehen, was für moderne Transformatoren zutrifft.

Will man aus betriebstechnischen Gründen keine Vorschriften für die Reihenfolge des primären und sekundären Abschaltens der Transformatoren machen, oder wenn ausnahmsweise diese Massnahme nicht zum Ziele führen sollte, können die Ueberspannungen durch Einbau von Schutzwiderständen in die Schalter auf eine unschädliche Höhe gebracht werden. Dieses Vorgehen ist wirtschaftlicher als eine allgemeine Erhöhung der Isolationsfestigkeit der Anlage, weil die Schaltüberspannungen, wie gesagt, nur in vereinzelt Anlagen in gefährlicher Höhe auftreten, wo besonders ungünstige Umstände vorliegen.

Nach den vorliegenden Messungen kann mit folgenden max. Schaltüberspannungen in 3phasigen 50-Hz-Netzen gerechnet werden:

Tabelle III.

| Nennspannung kV | 10 | 20 | 30 | 50 | > 50 |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-------|
| Max. Schaltüberspannung | | | | | |
| verkettete Betriebsspg. | | | | | |
| zwischen Phasen | 4,7 | 3,9 | 3,2 | 2,5 | < 2,5 |
| gegen Erde | 3,5 | 3,0 | 2,6 | 2,5 | < 2,5 |

Zeitlicher Verlauf der Erdschluss- und Schaltüberspannungen

Die Erdschlüsse bzw. Schaltüberspannungen haben Frequenzen von einigen hundert bzw. von einigen hundert bis einigen tausend Hz. Diese Ueberspannungen klingen rasch ab, so dass ihre Dauer kürzer als $1/100$ s ist.

2. Gewitter-Ueberspannungen

Die Gewitterüberspannungen sind von der Betriebsspannung unabhängig, werden aber durch die Isolationsfestigkeit der Anlage begrenzt. Ihre Höhe ist sehr variabel; kleinere Höhen sind jedoch weit häufiger als grössere ^{10), 11), 12), 34)}. Darum sind die Gewitterstörungen in Anlagen kleinerer Spannung resp. schwächerer Isolation häufiger als in Anlagen höherer Betriebsspannungen mit entsprechend höherer Isolation. In 15...30-kV-Anlagen sollen die Gewitterstörungen 4...5mal so häufig sein wie in Anlagen für 60...100 kV ²⁾.

Ueberspannungen durch indirekte Blitzschläge

Bei indirekten Blitzschlägen werden Ueberspannungen durch statische Induktion der Freileitungen induziert ^{13), 14)}. Die max. gemessenen Höhen dieser Ueberspannungen in Durchgangsstationen sind folgende:

Tabelle IV.

| Quelle | kV ca. *) | Bemerkung |
|--------------------------|-----------|----------------------|
| McEachron ¹⁶⁾ | 200 **) | |
| Neuhaus ²⁾ | 185 | 18,5 kV/m Mastenhöhe |
| Berger ¹⁷⁾ | 150...200 | |
| Norinder ¹⁸⁾ | 300...400 | |

*) In Durchgangsstationen. In Kopfstationen erreichen die Ueberspannungen den doppelten Wert.

**) Geschlossen aus der Beobachtung, dass indirekte Blitzschläge in 60-kV-Anlagen und darüber keine Störungen verursachen.

Diese Beobachtungen stimmen miteinander gut überein. Der zeitliche Verlauf dieser Ueberspannungen hängt von dem zeitlichen Verlauf der Gewitterentladungen ab ¹⁵⁾; sie dürften ähnlich sein wie diejenigen der direkten Blitzschläge.

Ueberspannungen durch direkte Blitzschläge

Nach den vorliegenden Messungen dauert eine Blitzentladung bis zu mehreren Hundertstelsekunden. Während dieser Zeit ändert der Blitzstrom zwischen 0 und einigen hundert Ampere, um jedoch auf sehr hohe Werte, bis 100...200 kA, während sehr kurzer Dauer anzusteigen. Meistens bleiben die Blitzströme weit unter diesen Maximalwerten. Stromstösse über 40 kA sind selten und in der Grössenordnung von 10...20 kA relativ häufig. Die Häufigkeit nimmt mit abnehmender Stromstärke zu ^{11), 12), 20), 21), 22), 24), 34)}.

Wird eine Leitung vom Blitz direkt getroffen, so wird das Netz auf sehr hohe Spannung aufgeladen, indem die kleinen Ströme wegen ihrer sehr langen Dauer dem Netz sehr grosse Ladungen zuführen. Da dieser Vorgang langsam ist, genügt direkte Nullpunktserdung von Transformatoren oder die Erdung über Löschspulen, um eine Ladung abzuführen, ohne dass höhere Spannungen entstehen. Dagegen erzeugen die kurzen Stromstösse der Blitzentladungen lokale Ueberspannungen, indem es Zeit braucht, um die durch diese Stösse zugeführten Ladungen abzuleiten, d. h. es sind nur die kurzzeitigen, grossen Stromstösse der Gewitterentladungen, die Störungen hervorrufen ¹⁵⁾.

In Leitungen ohne Erdseil, z. B. Leitungen mit Holzmasten, sind direkte Einschläge in die Leitungseile unvermeidlich. Die Ueberspannungen werden in diesem Falle sehr hoch, gleich dem Blitzstrom mal die Hälfte des Wellenwiderstandes der getroffenen Leitung, weil die Ueberspannungen sich in beiden Richtungen ausbreiten.

Wegen der hohen Isolationsfestigkeit der Holzmasten werden Ueberschläge gegen Erde seltener sein, wogegen Ueberschläge zwischen den Phasen öfters vorkommen, d. h. in solchen Leitungen sind Kurzschlüsse häufiger als Erdschlüsse. In den angeschlossenen Transformatorenstationen oder in vereinzelt Eisenmasten werden die Erdschlüsse leicht entstehen, weil die Ueberspannungswellen, welche sich über die Leitung verpflanzen, wegen der Isolationsfestigkeit der Holzmasten sehr hoch sind.

Erdseile können so angeordnet werden, dass keine direkten Blitzschläge die Leitungseile treffen. Der Blitzstrom wird aber Spannungsabfälle in den Masten und deren Erdwiderständen erzeugen, die unter Umständen grösser werden als die Ueberschlagsspannung der Isolatoren; es gibt dann sogenannte «Rücküberschläge». Durch Verkleinerung der Erdwiderstände wird also die Höhe der Ueberspannungen reduziert ^{11), 19), 29), 34)}.

Da die Blitzströme kurzzeitig sind, ist, streng genommen, der beim stationären Strom gemessene Erdwiderstand der Masten für die Höhe der Ueberspannungen nicht massgebend, sondern der Widerstand bei Stromstössen, wobei die Masten zu be-

rücksichtigen wären. Die Maste sind immer zu kurz, um einen merkbaren Einfluss auf die Ueberspannungen auszuüben und die Erdungen können ohne Schwierigkeit so ausgebildet werden, dass ihre Widerstände bei Stromstößen praktisch gleich sind, wie bei stationären Strömen^{25), 26), 27), 28), 30), 31), 32)}.

Die Erfahrungen zeigen, dass Störungen in Netzen mit gut geerdeten Eisenmasten und Erdseilen vermindert und in Anlagen höherer Betriebsspannungen praktisch vermieden werden können. Wo diese Grenze liegt, hängt von den Bodenverhältnissen ab, d. h. ob die Erstellung guter Erdungen möglich ist oder nicht. Im Flachland mit verhältnismässig feuchtem Boden resp. mit nicht zu tiefem Grundwasser sollte es möglich sein, Anlagen für 50...80 kV Betriebsspannung und darüber störungsfrei zu machen. In Berggegenden mit schlechten Erdungsmöglichkeiten liegt diese Grenze wahrscheinlich höher. Um Störungen praktisch zu vermeiden, genügt es, den Erdwiderstand der Masten so klein zu halten, dass die Stossüberschlagspannung der Isolatoren bei Blitzströmen von 40...60 kA nicht überschritten wird, und zwar, weil grössere Ströme sehr selten sind und die Leitung nur von einem Zweig des Blitzstrahls getroffen wird und somit nur einen Teil des totalen Blitzstromes führt. Der Reduktion der Erdwiderstände ist somit die grösste Aufmerksamkeit zu schenken, besonders da dies mit Rücksicht auf die Gefährdung von Menschen und Tieren sehr erwünscht ist.

Polarität der Gewitter-Ueberspannungen

Polarität der entladenen Gewitterwolken
(bestimmt durch Messungen an Hochspannungsleitungen)

Tabelle V.

| Autor | Land | Anzahl Messungen | Polarität in % | |
|-------------------------------|-------------|------------------|----------------|-------|
| | | | - | + |
| Berger ¹⁷⁾ | Schweiz | 12 | 86 | 14 |
| Lewis u. Foust ³³⁾ | USA | 734 | 93 | 7 |
| Grünwald ³⁴⁾ | Deutschland | 1200 | 85 | 15 |
| Rokkuka ³⁵⁾ | Japan | ? | ca. 97 | ca. 3 |

Messungen der Feldänderungen über der Erdoberfläche und Entladungen gegen Erde und von Wolke zu Wolke zeigen ebenfalls, dass weitaus die meisten Gewitterwolken negativ geladen sind^{18), 24), 36)}.

Daraus folgt, dass weitaus die meisten Ueberspannungen durch direkte Blitzschläge negativ sein müssen. Es ist möglich, dass die Masten die Blitzschläge von negativen Wolken anziehen, während die positiven Blitze eher die Erdoberfläche treffen. Darum sind die negativen Blitzeinschläge in Hochspannungsleitungen häufiger als man nach den gemessenen Feldänderungen über Erde erwarten würde.

Andererseits ist zu erwarten, dass die Ueberspannungen durch indirekte Blitzschläge häufiger positiv sind als negativ. Dies wird aber nur in Anlagen kleinerer Betriebsspannung von Belang sein, da die indirekten Blitzschläge nur in diesen Anlagen eine Störungsquelle darstellen.

Dass die positiven Ueberspannungen in Netzen höherer Betriebsspannung eine untergeordnete Rolle spielen, steht bereits fest. Es liegen Messungen vor, welche in Uebereinstimmung mit der obigen Ueberlegung darauf deuten, dass die positiven Ueberspannungen in Anlagen kleinerer Betriebsspannung eine grössere Rolle spielen als in solchen höherer Betriebsspannung^{22), 38)}. Spätere Messungen³⁹⁾ scheinen jedoch nicht so eindeutig, so dass diese Frage einer näheren Prüfung bedarf.

Zeitlicher Verlauf der Gewitter-Ueberspannungen

Wie bereits erklärt, werden die Gewitter-Störungen durch Stromstösse grosser Höhe und kurzer Dauer verursacht. Diese Stromstösse wachsen mehr oder weniger stetig von 0 bis auf ihren Maximalwert an, worauf sie wieder abklingen.

Die Ueberspannungen an der Ueberschlagstelle sind, wie erwähnt:

$$u = R \cdot i$$

R Erdwiderstand des Mastes

i Blitzstrom im Mast

Der Spannungsanstieg der Ueberspannungen ist:

$$\frac{du}{dt} = R \cdot \frac{di}{dt}$$

d. h. die Anstiegsgeschwindigkeit der Ueberspannungen ist direkt proportional dem Erdwiderstand der Masten und der Anstiegsgeschwindigkeit des Stromes. Wenn der Erdwiderstand klein ist, wird der max. Wert der Ueberspannungen langsam erreicht und umgekehrt.

Nach den vorliegenden Messungen ist die Anstiegsdauer der Ueberspannungen, wie zu erwarten, sehr variabel und kann Werte bis ca. 100 μ s erreichen, beträgt jedoch meistens nur einige μ s. Die Dauer, bis die Ueberspannungen auf ihren halben Wert abgeklungen sind, beträgt bis ca. 200 μ s^{12), 18), 22), 37), 40), 41)}.

Die Ueberschläge in den Anlagen werden praktisch immer während des Anstieges der Ueberspannungen erfolgen, indem diese selten eine Höhe haben dürften, bei der der Ueberschlag erst, nachdem der Maximalwert erreicht oder überschritten ist, eintritt. Wenn eine Ueberspannungswelle von der Einschlagstelle aus sich über die Leitung verpflanzt, wird ihre Höhe durch die Isolatoren begrenzt. Trifft sie eine Schaltanlage kleinerer Isolationsfestigkeit als die Leitung, wird es trotzdem selten vorkommen, dass sie gerade eine solche Höhe hat, dass der Ueberschlag eintritt, nachdem der Maximalwert erreicht oder überschritten ist.

Die Ueberspannungswellen werden bei ihrer Verpflanzung über die Leitung gedämpft, so dass sie ca. 1,5...2 km vom Entstehungsort auf die Hälfte ihres Wertes abgeklungen sind²³⁾. Dies stimmt mit dem überein, dass die Störungen meistens in der Nähe der Ueberschlagstellen lokalisiert bleiben. Für praktische Verhältnisse sind die Freileitungen besser isoliert als die Schaltanlagen, aber trotzdem werden in Durchgangsstationen, welche an Frei-

leitungen mit Eisenmasten und Erdseile angeschlossen sind, verhältnismässig selten Ueberschläge durch durchlaufende Wellen erzeugt. Kopfstationen verhalten sich aber anders, weil die Wellen in denselben auf ihren doppelten Wert reflektiert werden.

Die einzelnen Stromstösse der Blitzentladungen erfolgen in ziemlich grossen zeitlichen Abständen (Grössenordnung einige $\frac{1}{100}$ s oder länger²²⁾, so dass die Wirkung eines Stosses abgeklungen ist, bevor der nächste erfolgt, d. h. eine Ueberlagerung der einzelnen Stösse ist nicht in Betracht zu ziehen. Es kann also jeder Stoss für sich betrachtet werden, gleichgültig, ob die Blitzentladungen nur einen oder mehrere Stösse aufweisen.

III. Die Ueberschlagspannung von Isolatoren in Luft bei den im Betrieb vorkommenden Beanspruchungen

Es ist eine alte Erfahrung, dass die Ueberschlagspannung von Isolatoren gleich derjenigen einer Stab- oder Spitzenfunkenstrecke ist, gleiche Schlagweite in beiden Fällen vorausgesetzt^{42), 43), 44)}. Darum soll zuerst die Festigkeit von Stabfunkenstrecken näher betrachtet werden. Unter Stabfunkenstrecken verstehen wir Stab-Stab- oder Stab-Plattenfunkenstrecken. Die Stäbe bestehen aus mehr oder weniger abgerundeten Metallstangen und verhalten sich wie Spitzen, wie gezeigt werden soll.

Die Festigkeit von Stabfunkenstrecken geht aus Fig. 1 hervor^{45), 46), 47), 48), 49), 50)}. Man sieht, dass die 50 %-Stossfestigkeit der Stab-Plattenfunkenstrecke von der Polarität viel stärker abhängig ist

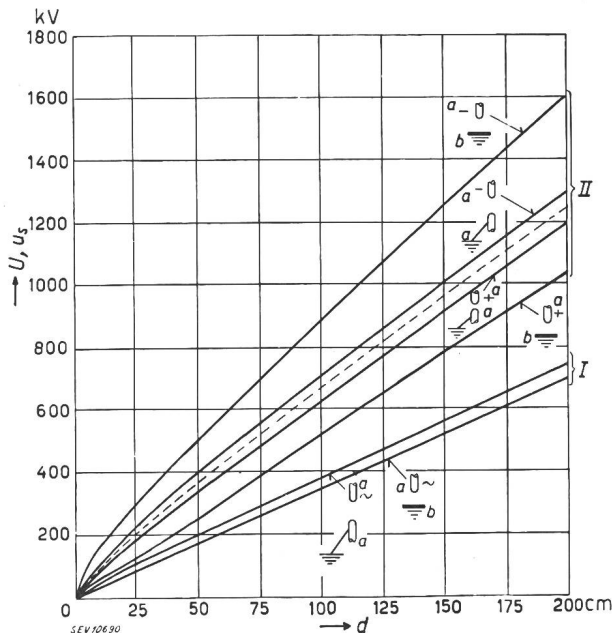


Fig. 1.

Elektrische Durchschlagsfestigkeit von Stab-Stab- und Stab-Plattenfunkenstrecken in Luft

- I. Festigkeit bei Wechselspannung von Industriefrequenz (U Effektivwerte, in kV)
 II. 50% Stossfestigkeit bei positivem und negativem Stoss $\frac{1}{50}$ μ s (u_s Scheitelwerte, in kV)
 d Schlagweite a Stab b Platte

Die Polarität der Stossquelle hat auf die Festigkeit der Stab-Plattenfunkenstrecke einen viel grösseren Einfluss als auf diejenige der Stab-Stab-Funkenstrecke. Wenn die Umgebung auf die Felder der Stäbe der Stab-Stab-Funkenstrecke keinen Einfluss ausüben würden, wäre die Festigkeit von der Polarität der Stossquelle unabhängig, wie die punktierte Kurve angibt.

als diejenige der Stab-Stab-Funkenstrecke. Wenn die Stab-Stab-Funkenstrecke so angeordnet wäre, dass die Umgebung auf die Felder keinen Einfluss hätte, müsste aus Symmetriegründen die Stossfestigkeit von der Polarität der Stossquelle unabhängig sein und Werte nach der punktierten Kurve haben. Daraus geht hervor, dass die negative Stossfestigkeit einer Funkenstrecke durch zweckmässige Gestaltung erhöht werden könnte, jedoch auf Kosten der positiven Stossfestigkeit.

Die in Fig. 1 enthaltenen Stossfestigkeiten sind die sogenannten 50 %-Stossfestigkeiten bei einer Welle von $\frac{1}{50}$ μ s, d. h. die Welle hat eine Frontdauer von 1 μ s und eine Dauer bis zum Rückenhaltwert von 50 μ s und bringt die Funkenstrecke nur bei der Hälfte der Stösse zum Ansprechen, bei der andern Hälfte nicht.

Wie im vorigen Abschnitt gezeigt wurde, haben die im Betrieb auftretenden Ueberspannungswellen praktisch nie eine Höhe, bei welcher der Ueberschlag erst entsteht, wenn das Maximum erreicht

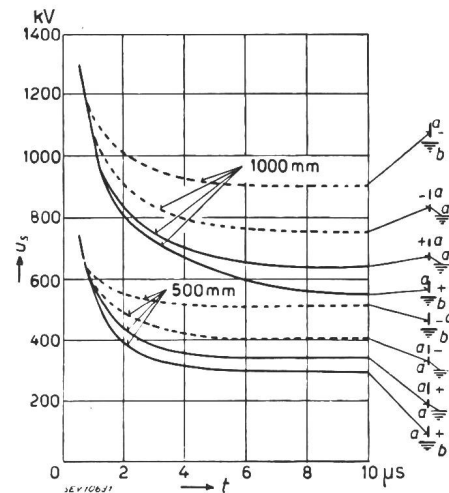


Fig. 2.

Stossfestigkeit der Stab-Stab- und Stab-Plattenfunkenstrecke in Funktion der Beanspruchungsdauer für zwei Schlagweiten

u_s Scheitelwerte in kV t Zeit in μ s

— spannungsführende Elektrode positiv
 --- spannungsführende Elektrode negativ

a Stab b Platte

Die Stossfestigkeit steigt mit abnehmender Beanspruchungsdauer; sie ist bei kurzen Beanspruchungen von der Polarität des Stosses unabhängig. Bei längerer Beanspruchungsdauer ist die Stossfestigkeit von der Zeit unabhängig, aber von der Polarität des Stosses abhängig und zwar stärker bei der Stab-Platten- als bei der Stab-Stab-Funkenstrecke

oder überschritten ist, sondern der Ueberschlag wird während des Anstiegs erzeugt. Die Anstiegsgeschwindigkeit ist sehr grossen Schwankungen unterworfen.

Wann der Ueberschlag eintritt, hängt von der Höhe und Steilheit des Stosses ab. Ist die Höhe des Stosses gleich der 50 %-Stossfestigkeit eines Isolators, erfolgt der Ueberschlag erst nach verhältnismässig langer Zeit (d. h. mehreren μ s). Wenn die Welle höher ist, entsteht der Ueberschlag schneller. Trägt man die Ueberschlagspannung auf in Funktion der Zeit vom Moment an, wo die Welle ansteigt bis zum Moment, wo der Ueberschlag eintritt, erhält man prinzipiell Kurven nach Fig. 2⁴⁵⁾,

46), 47), 79). Bei sehr hohen und steilen Wellen entsteht der Ueberschlag sehr schnell und die Ueberschlagsspannung ist von der Polarität der Welle unabhängig. Bei langsamer ansteigenden Wellen entstehen die Ueberschläge mit Verzögerung und sind von der Polarität mehr oder weniger abhängig.

Kugel die Festigkeit, wenn ihr Durchmesser so gross ist, dass die Anfangsspannung höher ist als die Durchschlagsspannung der Spitzen-Funkenstrecke. Liegt die Anfangsspannung der Kugel-Funkenstrecke unter der Ueberschlagsspannung der Spitzen-Funkenstrecke, wird die Ueberschlagsspannung der Kugel-

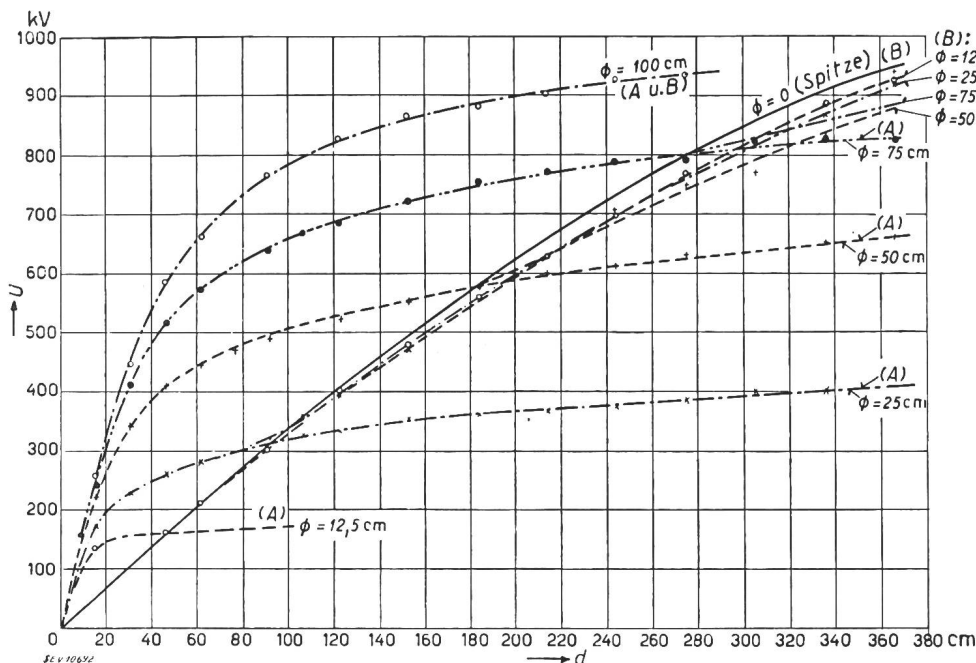


Fig. 3. Elektrische Festigkeit von Kugel-Platte-Funkenstrecken in Funktion der Schlagweite bei Wechselspannung von Industriefrequenz

für verschiedene Kugeldurchmesser
 u_s Scheitelwerte in kV
 d Schlagweite in cm
A Anfangsspannung
B Durchschlagsspannung

Wenn die Anfangsspannung der Kugel-Platte-Funkenstrecke höher als die Durchschlagsspannung der Spitzen-Platte-Funkenstrecke gleicher Schlagweite ist, fällt sie mit der Durchschlagsspannung zusammen.

Die Durchschlagsspannung der Kugel-Funkenstrecke fällt praktisch mit derjenigen der Spitzen-Funkenstrecke zusammen, wenn die Anfangsspannung der Kugel kleiner ist als die Durchschlagsspannung der Spitzen-Funkenstrecke

Abmessungen resp. Kugeln an den Elektroden können die Festigkeit erhöhen. Es fragt sich, wie weit dies in der Praxis zur Erhöhung der Elastizität herangezogen werden kann. Hierüber gibt Fig. 3 Auskunft⁵¹⁾. Für eine gegebene Schlagweite erhöht eine

Funkenstrecke gleich derjenigen der Spitzen-Funkenstrecke. Dies ist dadurch erklärlich, dass die Entladungen in diesem Bereich als Spitzen wirken und an Kugeln gleich sind wie an Spitzen. Dies erklärt auch, dass die Festigkeit einer Stab-Funkenstrecke gleich sein muss wie diejenige einer Spitzen-Funkenstrecke, indem die Stäbe nur sehr kleine Krümmungsradien haben können, die nur bei ganz kurzen Schlagweiten von Belang sind.

Fig. 4 zeigt, dass diese Ueberlegungen nicht allein für die Festigkeit bei Wechselspannung von Industriefrequenz, sondern auch bei Stoss zutreffen⁴⁵⁾.

Aus den Kurven Fig. 3 ist noch ersichtlich, dass es bei grösseren Schlagweiten praktisch nicht mög-

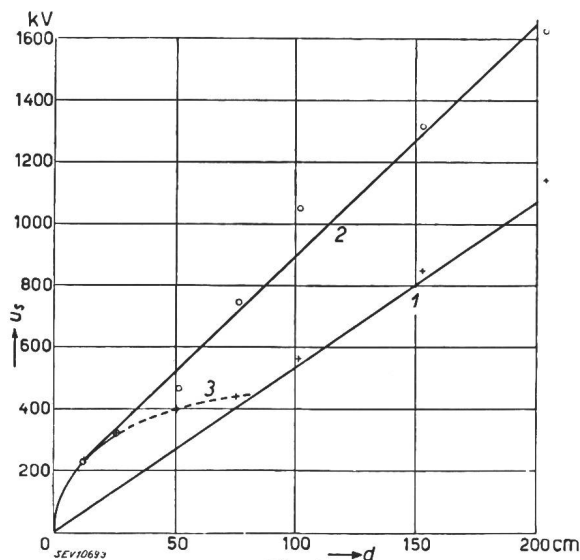


Fig. 4.

50%-Stossfestigkeit von Kugel-Platte- und Spitze-Platte-Funkenstrecken beim Stoss 1,5/40 μ s in Funktion der Schlagweite

u_s Scheitelwerte, in kV d Schlagweite, in cm

Bei positivem Stoss Kurve 1 gültig für Spitze
+ Messpunkte gültig für Kugel

Bei negativem Stoss Kurve 2 gültig für Spitze
o Messpunkte gültig für Kugel

Kugeldurchmesser: 25 cm

Zwischen den Stossfestigkeiten der Spitze- und Kugel-Funkenstrecken sind ähnliche Zusammenhänge wie bei Wechselspannung von Industriefrequenz (Vergl. Fig. 3)

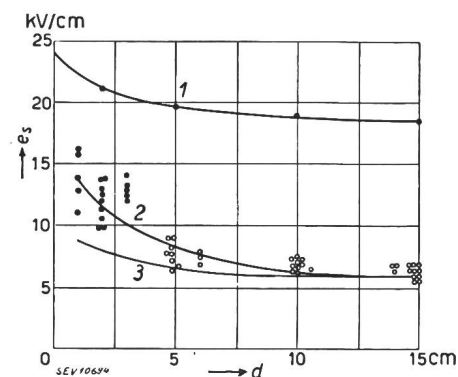


Fig. 5.

Mittlere spez. Festigkeit (e_s) von Luft bei Wechselspannung von Industriefrequenz in Funktion der Schlagweite (d)

1 zwischen Platten,
2 wie 1, jedoch mit 1 Isolierzylinder zwischen den Elektroden,
3 zwischen Spitzen.

Die Spannungsverteilung zwischen den Platten ist linear und wird vom Isolierzylinder nicht beeinflusst. Trotzdem sinkt die Festigkeit über dem Isolierzylinder auf den Wert der Spitze-Funkenstrecke

lich ist, die Armaturen von Isolatoren oder Apparaten so abzurunden, dass die Festigkeit über den Wert der Stab-Funkenstrecke steigt.

Auch aus andern Gründen würde eine Abrundung nicht zum Ziel führen. Kurve 1 in Fig. 5 zeigt die spezifische Durchschlagspannung zwischen 2 Platten in Funktion der Schlagweite⁵³). Stellt man aber einen Isolator zwischen diese Platten, so wird die spezifische Festigkeit auf Kurve 2 sinken; die Messpunkte sind eingezeichnet. Kurve 3 stellt die mittlere spezifische Festigkeit zwischen zwei Spitzen dar⁵⁴). Man sieht, dass Isolatoren mit Armaturen, deren Abrundung eine maximale ist, keine höhere Ueberschlagspannung haben als zwischen Spitzen. Dies erklärt sich einfach daraus, dass eine kleine Luftschicht zwischen den Armaturen und den Isolatoren bleibt, welche frühzeitig zu glimmen anfängt, und dass diese Entladungen am Rand der Isolatoren als Spitzen wirken.

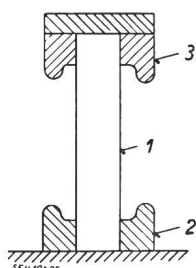


Fig. 6.

1 Isolator. 2 und 3 Armaturen mit vorgeschobenen Elektroden

Die Festigkeit zwischen zwei parallelen Drähten ist ebenfalls erheblich höher als zwischen Spitzen. Bei deren Messung müssen die Drähte abgebogen werden, damit die Enden nicht als Spitzen wirken. Die Drähte könnten auch in Ringe geschlossen werden, so dass sie keine Enden besitzen. Dieses Vorgehen wäre konstruktiv verwendbar, wenn die Armaturen so ausgebildet würden, wie Fig. 6 andeutet.

Fig. 7 zeigt die Festigkeit zwischen parallelen Drähten verschiedener Durchmesser im Vergleich mit der Festigkeit zwischen Spitzen⁵⁵). Wenn die Drähte trocken und sauber sind, liegt für eine gegebene Schlagweite die Festigkeit bedeutend höher als zwischen Spitzen. Die Durchmesser der Drähte haben einen ähnlichen Einfluss auf die Festigkeit wie die Durchmesser der Kugeln (Fig. 3), d. h. bei kleineren Schlagweiten steigt die Festigkeit mit dem Krümmungsradius der Drähte. Bei grösseren Schlagweiten beginnen die Drähte zu glimmen, bevor die Durchschlagfestigkeit erreicht wird, und diese ist vom Durchmesser jedenfalls in erster Annäherung unabhängig.

Werden die Drähte benetzt, z. B. durch Regen, so wird die Anfangsspannung der Drähte beeinflusst, und die Entladungen werden unregelmässig und wirken wie Spitzen. Dadurch sinkt die Durchschlagspannung auf den Wert der Spitzen-Funkenstrecke. Beschmutzung der Elektroden, z. B. durch Öl, oder Korrosion hat dieselbe Wirkung.

Beschmutzung oder Benetzung der Kugel wird sich gleich auswirken wie eine Reduktion des Kugeldurchmessers, d. h. im Bereich, wo die Festigkeit über dem Wert der Spitzen-Funkenstrecke liegt,

hat der Schmutz oder der Staub eine Reduktion zur Folge, und im Bereich, wo die Festigkeit gleich derjenigen der Stab-Funkenstrecke ist, bleibt sie unverändert und kann unter diesen Wert nicht sinken.

Im praktischen Betrieb werden die Elektroden resp. Armaturen immer beschmutzt, oder, was auf das Gleiche herauskommt, korrodiert, so dass wir jedenfalls bei längeren Schlagweiten (über 200... 400 mm) immer mit der Festigkeit der Stab-Funkenstrecke rechnen müssen, und zwar wird diese Festigkeit weder unterschritten, noch überschritten.

Es ist also physikalisch begründet, dass die Ueberschlagspannung aller Isolatoren, wie Hängeketten, Stützer, Kondensatordurchführungen, Isoliermantelwandler usw., ganz unabhängig von der Konstruktion, gleich derjenigen der Stab-Funkenstrecke gleicher Schlagweite ist. Dies gilt sowohl für die Festigkeit bei 50 Hz als auch bei Stoss, ferner auch für die Festigkeit in Funktion der Beanspruchungsdauer. Bei allen diesen Isolatoren kann der Einfluss der Polarität auf Stossfestigkeit in denselben Grenzen geändert werden, wie bei den Stab-Stab- und Stab-Platte-Funkenstrecken. Eine Ausnahme bilden nur die ungesteuerten Durchführungen. Bei kleineren Schlagweiten (bis ca.

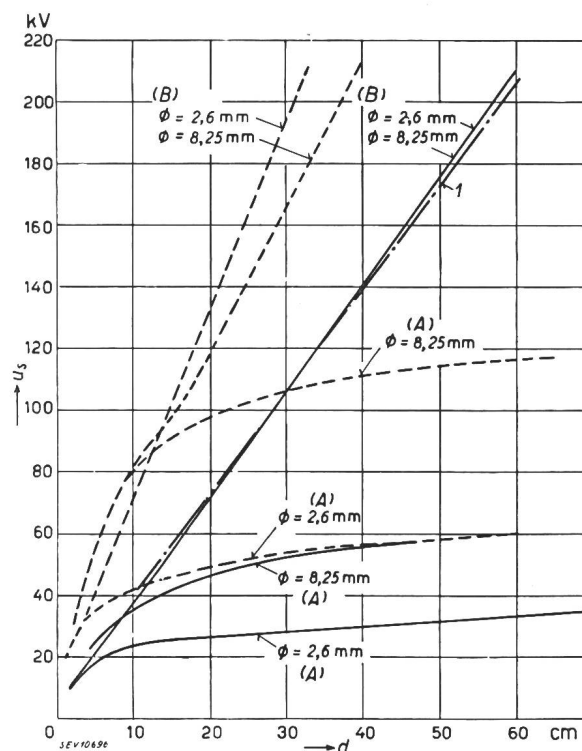


Fig. 7.

Elektrische Festigkeit zwischen parallelen Drähten oder Zylindern in Funktion der Schlagweite für verschiedene Drahtdurchmesser

A Anfangsspannung
B Durchschlagspannung
--- Drähte trocken und sauber
— Drähte nass

1 Festigkeit der Spitze-Spitze-Funkenstrecke

Zwischen Anfangs- und Durchschlagspannung herrschen ähnliche Verhältnisse wie bei Kugel-Funkenstrecken (Fig. 3). Wenn die Anfangsspannung der Drähte kleiner ist als die Durchschlagspannung, ist diese vom Durchmesser weitgehend unabhängig.

Wenn die Drähte nass sind, ist die Durchschlagspannung bei grösserer Schlagweite unabhängig vom Durchmesser und gleich derjenigen der Spitze-Funkenstrecken.

200 mm) ist es vielleicht möglich, die Armaturen so auszubilden, dass die Ueberschlagsspannung trotz Beschmutzungen usw. über den Wert der Stab-Funkenstrecke erhöht wird.

Im Bereich kleinerer Schlagweiten haben oft zufällige Ecken oder Schrauben an den Armaturen Einfluss auf die Stossfestigkeit, so dass der Ueberschlag bei positiver Beanspruchung an einem anderen Orte auftritt, als bei einer negativen, und zwar, weil der Ueberschlag von einer Ecke oder Spitze, die gegenüber der Gegenelektrode positiv ist, erfolgt, so dass die Stossfestigkeit beider Polaritäten den Wert der Stab-Platte-Funkenstrecke beim positiven Stab hat.

Bei grösseren Schlagweiten dürfte es immer möglich sein, die Armaturen so auszubilden, dass der Ueberschlag nach Wunsch entweder einer mehr oder weniger polaritätsabhängigen Stab-Stab- oder einer Stab-Platte-Funkenstrecke entspricht.

Wie in Abschnitt II/2 gezeigt wurde, sind negative Gewitterüberspannungen in Anlagen höherer Spannung weit häufiger als positive. In solchen Anlagen wäre es also erwünscht, die Festigkeit gegen negative Stösse möglichst zu steigern, selbst wenn dies auf Kosten der Festigkeit gegen positive Stösse geschieht. Dies liegt aber, wie erwähnt, im Bereiche der Möglichkeit; es bedingt eine bessere Ausnutzung der Isolatoren, also eine Erhöhung der Betriebssicherheit.

Streuung der elektrischen Festigkeit von Luft

Wenn die Spannungsstösse bei der Messung der Stossfestigkeit langsam erhöht werden, treten von einer bestimmten Höhe an bei vereinzelt Stössen Ueberschläge auf. Erreicht die Welle die 50 % Stossfestigkeit, werden nach Definition 50 % der Stösse Ueberschläge erzeugen, die restlichen 50 % keine. Bei weiterer Erhöhung der Stossspannung wird von einem gewissen Wert an bei jedem Stoss ein Ueberschlag stattfinden, das heisst bei Beanspruchungen von Stosswellen treten die Ueberschläge nicht bei einem bestimmten Wert auf, sondern sie sind einer gewissen Streuung unterworfen. Um z. B. eine Funkenstrecke mit einem Isolator zu koordinieren, d. h. um sicherzustellen, dass ein unvermeidlicher Ueberschlag an der Funkenstrecke, nicht am Isolator auftritt, muss diese Streuung berücksichtigt werden, d. h. für die Koordination genügt es nicht, die Mittelwerte der Stossfestigkeiten in Funktion der Zeit zu kennen, sondern der Streubereich, wie Fig. 8 andeutet, muss bekannt sein.

Nach den aus der Literatur bekannten Messungen scheinen Streuungen von $\pm 5\%$ häufig vorzukommen, während solche von $\pm 10\%$ selten sind^{43), 45), 46), 47), 48), 56)} †). Nach neueren Messungen sollen bei kleineren Schlagweiten noch grössere Streuungen beobachtet worden sein.

Es ist eine Erfahrungstatsache, dass nicht allein die in verschiedenen Laboratorien gemessenen Festigkeiten bei Stoss und 50 Hz Unterschiede auf-

weisen, sondern dass auch die Messungen eines Laboratoriums, welche unter scheinbar den gleichen Umständen gemessen wurden, gegenseitig streuen. Die Ursache dieser Tatsache ist leider unbekannt.

Um die Fehlerquellen so weit als möglich auszuschalten, sollte die Koordination nicht auf Grund der gemessenen Festigkeiten in kV unter Berücksichtigung der Streuung, sondern durch einen direkten Vergleich vorgenommen werden. Dies geschieht dadurch, dass die beiden Gegenstände, z. B. ein Isolator und eine Funkenstrecke, welche zu vergleichen sind, nebeneinander aufgestellt und Stössen verschiedener Höhe ausgesetzt werden. Je nachdem, ob nur der eine oder beide Gegenstände überschlagen, kann beurteilt werden, ob die Festigkeiten gleich oder verschieden sind, d. h. ob das gewünschte Koordinations-Verhältnis vorhanden ist. Fehler, welche die Messungen der Ueberschlagsspannungen aufweisen, werden dadurch überbrückt, so dass die nötige Marge zwischen der Festigkeit der Koordinationsfunkenstrecke *) und derjenigen des Isolators reduziert werden kann.

Einfluss der Kennlinien auf die Koordination

Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, dass die Streuung der Festigkeit zu berücksichtigen ist, wenn Ueberschläge an nicht gewünschten Orten vermieden werden sollen. Da aber die wirkliche Ueberschlagspannung von der Höhe und Dauer der Ueberspannung abhängig ist, muss dieser Schutz nicht allein bei einem bestimmten Stoss gegebener Höhe und Dauer, sondern bei allen möglichen Stössen verschiedener Höhen und Dauern vorhanden sein. Man muss also dafür sorgen, dass die Kennlinien eines Isolators, d. h. die Stossfestigkeit bei positiven und negativen Stössen in Funktion der Dauer über derjenigen der Schutz-Funkenstrecke oder Koordinationsfunkenstrecke liegen.

Will man z. B. einen Isolator mit starker polaritätsabhängiger Stossfestigkeit durch eine Funkenstrecke, deren Stossfestigkeit von der Polarität unabhängig ist, gegen Ueberschläge schützen, so müssen die Kennlinien mit ihren Streubereichen so verlaufen, wie Fig. 8 zeigt. Man sieht, dass die negative Stossfestigkeit des Isolators gar nicht ausgenützt wird. Eine volle Ausnutzung der Festigkeiten beider Polaritäten wird aber erreicht, wenn die Funkenstrecke die gleiche Abhängigkeit der Polarität hat wie der Isolator.

Da die Festigkeit aller Isolatoren mit Ausnahme der ungesteuerten Durchführungen in Funktion der Zeit ähnlich verlaufen wie diejenigen der Stab-Funkenstrecken, genügt es, festzustellen, dass der Schutz im Bereich, wo die Kennlinien parallel mit der Zeitachse verlaufen, bei beiden Polaritäten vorhanden ist, der Schutz wird bei schnell ansteigenden Stössen auch vorhanden sein.

Anders verhalten sich die ungesteuerten Durchführungen, indem ihre Kennlinien viel flacher ver-

*) Koordinationsfunkenstrecken sind die Funkenstrecken, welche in die Anlagen eingebaut werden, um Ueberschläge an unerwünschten Stellen zu vermeiden.

†) Zum Teil mir brieflich mitgeteilt.

laufen als diejenigen der Stab-Funkenstrecken. Für diese Isolatoren muss festgestellt werden, ob der Schutz bei den steilsten vorkommenden Stössen vorhanden ist. Er wird dann auch bei langsamer ansteigenden Wellen gewährleistet sein.

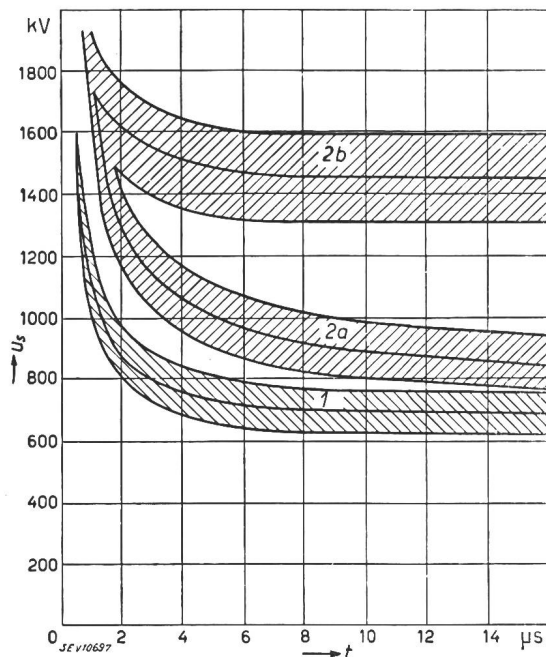


Fig. 8.

Koordination eines Stützisolators, dessen Stossfestigkeit von der Polarität des Stosses ähnlich wie die Stab-Platte-Funkenstrecke stark abhängig ist, mit einer polaritätsunabhängigen Stab-Stab-Funkenstrecke

Stossfestigkeit mit zugehörigem Streubereich in Funktion der Beanspruchungsdauer und zwar von:

- 1 Stab-Stab-Funkenstrecke (Koordinationsfunkenstrecke)
Schlagweite = 1000 mm
- 2 Stützisolator
 - a bei positiven Stössen
 - b bei negativen Stössen

Die polaritätsunabhängige Koordinationsfunkenstrecke reduziert die negative Stossfestigkeit weit mehr als erforderlich. Die beste Ausnutzung des Isolators würde eine Koordinationsfunkenstrecke geben, deren Stossfestigkeit ebenso stark von der Polarität abhängig wäre, wie der Isolator

Einfluss durch Regen und Verschmutzung

Bisher wurde stillschweigend angenommen, dass die Isolatoren trocken und sauber sind. Im Betrieb kommt es aber vor, dass die Isolatoren beschmutzt oder von Regen benetzt sind. Der Grad der Verschmutzung und die Stärke der Regen sind sehr grossen Schwankungen unterworfen. Früher war man der Auffassung, dass die Stossfestigkeit von Isolatoren in Luft von Schmutz und Regen unabhängig sei. Wanger⁵⁷⁾ hat neuerdings nachgewiesen, dass dies leider nicht zutrifft und dass die Stossfestigkeit besonders bei negativen Stössen merkbar herabgesetzt werden kann, und zwar ist diese Reduktion von der Stärke des Regens und der Verschmutzung usw. abhängig. Wie weit diese Messungen auf praktische Verhältnisse übertragbar sind, bleibt noch abzuklären. Besonders ist zu untersuchen, mit welchem Grad von Verschmutzung und Regen im Betrieb unter den verschiedenen Verhältnissen zu rechnen ist.

Einflüsse durch Veränderungen in der Atmosphäre

Die elektrische Festigkeit von Luft ist bekanntlich von Temperatur und Barometerstand sowie von der Luftfeuchtigkeit abhängig. Es wird allgemein angenommen, dass die Festigkeit entsprechend dem Parschen Gesetz mit der Luftdichte, d. h. mit Barometerstand und absoluter Temperatur proportional ist. Dies ist innert den praktisch vorkommenden Schwankungen in der Atmosphäre annähernd richtig. Ueber den Einfluss der Feuchtigkeit liegen zahlreiche Messungen vor, die gegenseitig sehr grosse Abweichungen aufweisen, so dass die Grundlage für die Umrechnung der gemessenen Feuchtigkeit auf eine einheitliche Luftfeuchtigkeit unsicher ist^{58), 59), 60), 61)}. Für die Koordination der Isolatoren und Funkenstrecken spielt dies eine untergeordnete Rolle, da die Änderungen für alle in Frage kommenden Isolatoren und Stab-Funkenstrecken jedenfalls annähernd gleich gross sind, d. h. wenn die Festigkeit der Isolatoren durch Änderungen in der Atmosphäre geändert wird, so ändert die Festigkeit der Koordinationsfunkenstrecke im gleichen Mass und das Verhältnis bleibt sich gleich.

Die Feuchtigkeit der inneren Isolation von Transformatoren, Generatoren usw. ist im Gegensatz zur Luft von den atmosphärischen Verhältnissen unabhängig, was bei der Koordination ihrer Isolation mit Funkenstrecken zu berücksichtigen ist. Praktisch wird es jedoch nicht vorkommen, dass die Festigkeit der Isolatoren und Funkenstrecken wesentlich über derjenigen liegt, welche bei den in den Normen festgelegten Bedingungen gemessen wurden. Trotzdem ist eine Vernachlässigung nicht zulässig.

IV. Die Festigkeit der inneren Isolation von Transformatoren, Maschinen, Apparaten

Die innere Isolationsfestigkeit von Transformatoren mit der üblichen Oelisolation mit und ohne Barrieren, in Abhängigkeit der Beanspruchungsdauer, verläuft prinzipiell nach Fig. 9. Im Zeitintervall «a—b» ist die Festigkeit von der Beanspruchungsdauer unabhängig.

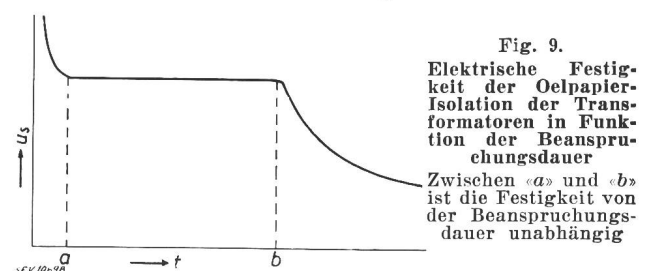


Fig. 9.

Elektrische Festigkeit der Oelpapier-Isolation der Transformatoren in Funktion der Beanspruchungsdauer

Zwischen «a» und «b» ist die Festigkeit von der Beanspruchungsdauer unabhängig

spruchungsdauer unabhängig. Für Zeiten kleiner als «a» oder grösser als «b» ist die Festigkeit von der Dauer abhängig.

Tabelle VI enthält eine Reihe von Messungen über die Isolationsfestigkeit der Transformatorenisolation, d. h. Oel mit oder ohne Barrieren sowie ölgetränktem Papier und Transformerboard. Der Bereich, in welchem die Festigkeit von der Beanspruchungsdauer unabhängig ist, ist in der letzten

Kolonne angeführt. Für Oel allein ist dieses Intervall kleiner; es wird aber durch die Barrieren erheblich verlängert.

In Transformatoren hoher Spannung wird die Oelisolation so weit als möglich durch Barrieren unterteilt, während dies für Transformatoren kleiner Betriebsspannung weniger der Fall ist, d. h. die Grenzen «a» und «b» (Fig. 9) sind von der Isolationsart abhängig. Für höhere Betriebsspannungen ist

$$«a» = \text{ca. } 2...3 \mu\text{s und } «b» = \text{ca. } 0,01...0,1 \text{ s}$$

und für Transformatoren kleinerer Betriebsspannung
 $«a» = \text{ca. } 6...8 \mu\text{s und } «b» = \text{ca. } 0,001...0,1 \text{ s}^{80), 81)}.$

Ueber die Festigkeit der Isolation von Maschinen liegen nur sehr wenige Messungen vor; es scheint aber, dass sie eine ähnliche Gesetzmässigkeit aufweist wie diejenige der Transformatoren-Isolation^{77), 78)}.

Die Festigkeit der Transformatoren-Isolation,

d. h. Festigkeit von Oel mit und ohne Barrieren sowie von ölgetränktem Transformerboard und Papier

Tabelle VI

| Art der Isolation | Autor | Schlagweite mm | Mittl. Gradient (Scheitelwert) bei Durchbruch in kV/cm, Mittelwerte | | Beansprggs- dauer bei welcher die Festigkeit annähernd konstant ist μs |
|--|---------------------------------------|-------------------|--|--|---|
| | | | 60 Hz u. 1-min-Be- anspr'g. | Stoss b., neben- erwähnter Be- anspr'gsdauer | |
| Oel mit Transfor- matoren- board- Barrie- ren | Montsinger ⁶²⁾ | 3,18 | 190 | 500 | 1...10 ⁴ |
| | Bellaschi u. Teague ⁶³⁾ | 12,4 | 105 | 235 | 0,35... >40 |
| | Bellaschi u. Vogel ⁶⁴⁾ | 25,4 | — | — | — |
| | Vogel ⁶⁵⁾ | 25,4 | 155 | 350 | 2... >13 |
| | " | 25,4 | 165 | 350 | 2... > 6 |
| | " | 25,4 | 190 | 430 | 2... >13 |
| | Montsinger ⁶⁶⁾ | 25,4 | — | 240 | 2...? |
| | " | 12,7 | — | 295 | 2...? |
| | " | 15,6 | 96 | 210 | 3...? |
| | " | 63,5 | 47 | 125 | 3...? |
| Oel- Papier*) | Brown Boveri | 12 | — | 450 | — |
| Transfor- matoren- board in Oel getränkt | Montsinger ⁶⁷⁾ | 1,6 | 250 | 800 | 1...10 ⁵ |
| | Bellaschi u. Teague ⁶⁸⁾ | 1,42 | 330 | 950 | 0,5...10 ⁴ |
| | " | 3,18 | 200 | 700 | 1...10 ⁴ |
| | Vogel ⁶⁸⁾ | 1,6 | 345 | 1080 | — |
| | " | 3,18 | 245 | 570 | — |
| | " | 6,35 | 190 | 565 | — |
| Oel | Bellaschi u. Teague ⁶³⁾ | 6,35 | 90 | 205 | 7...10 ³ |
| | " | 12,7 | 60 | 155 | 7...10 ³ |
| | " | 25,4 | 43 | 110 | 10...500 |

*) Transformator mit Spreizflansch-Isolation.

Bemerkung: Die Isolation des Oelkabels besteht auch aus ölgetränktem Papier, ähnlich wie die Transformatoren-Isolation. Die Kabel sind wegen ihrer regelmässigen Form viel leichter zu isolieren als die Transformatoren; darum ist ihre Stossfestigkeit höher, und zwar 600...1000 kV/cm (Scheitelwert), bei Isolationsdicke von 3...24 mm und von der Polarität unabhängig.

60) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76)

Die Durchschlagfestigkeit von Isolatoren aus Porzellan und Hartpapier ist nach den vorliegenden Erfahrungen höher als die Ueberschlagspan-

nung in Luft, d. h. die heute üblichen Isolatoren sind in sich koordiniert. Wenn ausnahmsweise Durchschläge oder Defekte auftraten, konnten sie meines Wissens immer auf Fehler in der Isolation oder Konstruktion zurückgeführt werden.

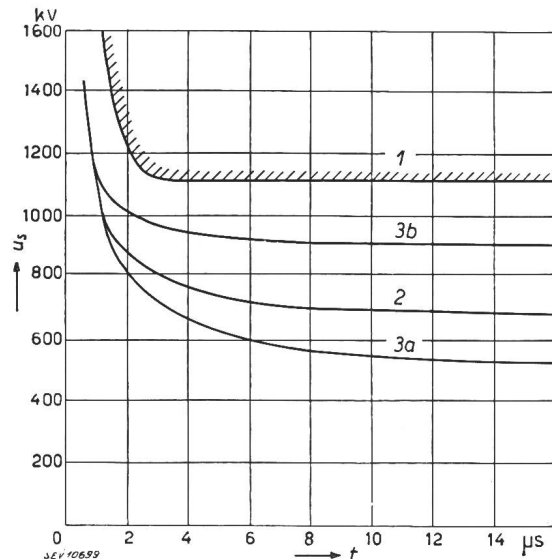


Fig. 10.

Koordination eines Transformators mit einer Stab-Funkenstrecke

Stossfestigkeit (u_s) in Funktion der Beanspruchungsdauer (t)

1 Minimale Stossfestigkeit des Transformators
 2 Stossfestigkeit einer polaritätsunabhängigen Stab-Stab-Funkenstrecke (Schlagweite 1000 mm)
 3 Stossfestigkeit einer Stab-Platte-Funkenstrecke, Schlagweite 1000 mm

a bei positiven Stössen
 b bei negativen Stössen

Streubereich der Festigkeit nicht eingezeichnet
 Die Stab-Stab-Funkenstrecke reduziert die Stossfestigkeit der Anlage mehr als der Schutz des Transformators erfordert. Die negative Stossfestigkeit der Stab-Platte-Funkenstrecke bedingt eine bessere Ausnutzung der Transformatorenisolation weil die Gewitterüberspannungen weit häufiger negativ als positiv sind

Wie gezeigt wurde, eignet sich die Stab-Funkenstrecke besonders gut als Koordinations-Funkenstrecke für Isolatoren. Wenn ein Transformator höherer Betriebsspannung durch eine Stab-Funkenstrecke geschützt werden soll, müssen ihre Kennlinien einander gegenüber so liegen, wie Fig. 10 zeigt. Klarheitshalber ist der Streubereich der Kennlinien der Stab-Funkenstrecken nicht eingezeichnet. Man sieht, wenn die Stab-Funkenstrecke die Transformatoren bei sehr steilen Stössen schützt, ist auch ein Schutz bei langsamer ansteigenden Stössen vorhanden, und zwar unabhängig vom Einfluss der Polarität auf die Festigkeit der Funkenstrecke.

Eine Stab-Stab-Funkenstrecke, deren Festigkeit von der Polarität unabhängig ist, wird die Festigkeit bei langsam ansteigenden Wellen unnötig reduzieren, während dies bei der Stab-Platte-Funkenstrecke bei negativen Gewitterüberspannungen nicht der Fall ist. Bei positiven Ueberspannungen wird die Festigkeit der Anlage jedoch mehr reduziert als bei einer polaritätsunabhängigen Stab-Stab-Funkenstrecke. D. h. die Stab-Platte-Funkenstrecken bedingen eine bessere Ausnutzung der Transformatorenisolation höherer Spannung ähnlich wie bei den Isolatoren, weil die negativen Ueberspannungen weit häufiger sind als die positiven.

Die Festigkeit der Transformatoren kleinerer Spannung steigt wie gesagt schon bei kleinerer Beanspruchungsdauer als 6...8 μ s. Darum würde eine Stab-Stab-Funkenstrecke, deren Stossfestigkeit von der Polarität unabhängig und als Schutz für die Isolatoren in Anlagen kleinerer Spannung die geeignetste ist, die beste Ausnützung der Transformatorenisolation bedingen.

V. Der Ueberspannungsschutz und die Koordination

Die innere Isolation der Transformatoren, Maschinen usw. wird durch die Koordinationsfunkenstrecken geschützt. Ueberschläge an diesen können Kurzschlüsse und damit Abschaltungen verursachen. Wenn die Ueberschläge nur einphasig erfolgen, werden sie in gelöschten Netzen von selber verschwinden und keine weiteren Folgen haben. Bei Ueberschlägen an zwei oder drei Phasen, oder in einem geerdeten Netz an einer Phase, entstehen Kurzschlüsse, die abgeschaltet werden müssen und somit Betriebsunterbrüche bedingen.

Nach den Betriebserfahrungen sind in zirka 70...75 % aller Störungen die Ueberschläge nur einphasig^{52), 53)}, d. h. in gelöschten Netzen sind die Betriebsunterbrüche trotz Ansprechen der Koordinationsfunkenstrecke stark reduziert.

Eine weitere Reduktion der Betriebsunterbrüche könnte durch Ueberspannungsableiter mit spannungsabhängigen Widerständen erreicht werden, weil diese das Ansprechen der Koordinationsfunkenstrecken vermeiden.

Der Schutzwert der Ableiter ist durch die Festigkeit der Anlagen begrenzt, d. h. wenn die Ableiterströme über einen gewissen Wert ansteigen, wird die Spannung über den Ableitern schliesslich einen Ueberschlag an den Koordinationsfunkenstrecken oder Isolatoren hervorrufen. Wegen der starken Spannungsabhängigkeit der Ableiterwiderstände würde aber eine kleine Erhöhung der Ueberschlagspannung der Anlage eine erhebliche Zunahme des zulässigen Ableiterstromes und damit des Schutzwertes der Ableiter zur Folge haben. Es ist also erwünscht, die Festigkeit der Koordinationsfunkenstrecken möglichst hoch zu wählen. Eine Erhöhung der Festigkeit der Isolatoren durch eine Erhöhung der Schlagweiten bedeutet eine Verteuerung. Es ist aber, wie schon erwähnt, möglich, bei gegebener Schlagweite der Isolatoren die negative Stossfestigkeit zu erhöhen, jedoch auf Kosten der positiven. Da aber die negativen Gewitterüberspannungen in Anlagen höherer Betriebsspannung weit häufiger sind als die positiven, wird trotzdem durch diese Massnahme eine Erhöhung des Schutzwertes der Ableiter erreicht.

Nach den bisher allgemein vorhandenen Meinungen wollte man durch die Koordinationsfunkenstrecke Ueberschläge in den Schaltanlagen an beliebigen Orten vermeiden und dadurch eine Zerstörung der Isolatoren durch Kurzschluss-Lichtbogen verhindern. Moderne Schalter mit den zugehörigen Relais schalten aber eventuelle Kurzschlüsse

so rasch ab, dass die Lichtbogen keinen Schaden verursachen.

Kurzschlüsse entstehen nicht ausschliesslich durch Ueberspannungen, sondern auch durch Fremdkörper, wie Tiere, Werkzeuge oder durch mechanische Defekte, so dass die Relais und Schalter trotz den Koordinationsfunkenstrecken zum Abschalten von Kurzschlüssen an beliebigen Orten der Schaltanlage vorgesehen werden müssen.

Da einerseits keine Schäden in Anlagen mit schnell arbeitenden Schaltern und Relais durch Kurzschlüsse zu befürchten sind und andererseits der Schutzwert der Ableiter wesentlich gesteigert wird, fragt es sich, ob man auf einen Einbau von Koordinationsfunkenstrecken kleinerer Festigkeit als die der Isolatoren nicht besser verzichtet.

Dieses Vorgehen würde keine neue Praxis bedeuten, indem die meisten heutigen Anlagen, jedenfalls für Innenraum, keine Koordinationsfunkenstrecke besitzen und die Transformatoren durch die Isolatoren gegen innere Durchschläge geschützt werden. Wenn man aber auf den Schutz der Isolatoren durch Koordinationsfunkenstrecke nicht verzichten und den Schutzwert der Ableiter nicht beeinträchtigen will, müssten die Isolatoren eine höhere Festigkeit, d. h. eine längere Schlagweite haben, was mit Kosten verbunden wäre.

VI. Die Koordination

Der Zweck der Koordination der Isolation in Hochspannungsanlagen ist, Materialschäden als direkte oder indirekte Folgen von Ueberspannungen, welche längere Betriebsunterbrüche und kostspielige Reparaturen verursachen, zu vermeiden. Es ist anzustreben, dass dies weder die Anlage verteuert, noch die Betriebssicherheit reduziert oder die Anzahl Betriebsunterbrüche und Störungen erhöht.

Heute kommen nur Stab-Funkenstrecken, d. h. die Stab-Stab- oder die Stab-Platte-Funkenstrecke als Koordinationsfunkenstrecke in Frage.

In Abschnitt III, IV und V ist gezeigt, dass die Stab-Platte-Funkenstrecke in Anlagen höherer Spannung*) die beste Ausnützung sowohl der Isolatoren als auch der Transformatorenstationen gestattet und den Schutz der Ableiter mit spannungsabhängigen Widerständen erhöht, ohne die Preise dieser Teile zu beeinflussen, während die Stab-Stab-Funkenstrecke in Anlagen kleinerer Spannung besser geeignet ist, um die vorhandene Isolation möglichst voll auszunützen.

Sollte es mit Rücksicht auf die Anordnung der Anlage nicht möglich sein, die Polaritätsabhängigkeit der Isolatoren auf den Wert der Stab-Platte-Funkenstrecke zu steigern, so empfiehlt es sich, eine Stab-Stab-Funkenstrecke als Koordinationsfunkenstrecke zu wählen, deren Stossfestigkeit nur so stark von der Polarität abhängig ist wie die der Isolatoren, um diese möglichst gut auszunützen.

Die Stossfestigkeit der Isolation der Maschinen ist leider ziemlich unbekannt, so dass eine nähere

*) Als Anlagen höherer Spannung werden solche für Spannungen über etwa 50 kV betrachtet.

Besprechung ihrer Koordination nicht möglich ist. Die zugrundegelegten Gesichtspunkte sind jedoch die gleichen wie für Transformatoren.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Isolatoren üblicher Konstruktion überschlagen, bevor ein Durchschlag auftritt, so dass sie in sich koordiniert sind.

Ueberschläge zwischen den Polen eines offenen Schalters und zwischen Phasen dürfen nicht vorkommen, damit Störungen nicht von einem Betrieb auf einen andern übertragen und Kurzschlüsse möglichst vermieden werden.

Diese Isolationsstrecken sind mit Ausnahme der Isolation zwischen den Kontakten der Oelschalter in Luft. Da die Festigkeit von Pol zu Pol und Phase zu Phase unter Oel der üblichen Oelschalterkonstruktion erheblich grösser ist als diejenige in Luft, erübrigt sich eine nähere Besprechung.

Die Schlagweite in Luft zwischen den Polen eines offenen Schalters und zwischen Phasen ist den gleichen Gesetzen unterworfen, wie die Stab-Funkenstrecke. Nur ist es nicht möglich, ihre Festigkeit in gleichem Masse von der Polarität abhängig zu machen wie bei der Stab-Funkenstrecke.

In Anlagen höherer Spannung werden die Phasenabstände meistens grösser gewählt als die Schlagweite gegen Erde, so dass sie genügend Gewähr gegen Ueberschläge bieten, selbst wenn die Koordinationsfunkenstrecke stark polaritätsabhängig wäre. In Anlagen kleinerer Spannung wird aus Spargründen oft die gleiche Schlagweite zwischen Phase gewählt wie gegen Erde. In diesen Anlagen ist, wie gesagt, die Stab-Stab-Funkenstrecke als Koordinationsfunkenstrecke die geeignetste, so dass die Polaritätsabhängigkeit dieser Funkenstrecke eine ähnliche ist wie zwischen Phasen und keine grösseren Phasenabstände benötigt werden als diejenigen gegen Erde, um die Koordination zu gewährleisten. Jedenfalls scheint die heutige Praxis keine Schwierigkeiten zu bieten, da weitaus die meisten Ueberschläge, wenn nicht alle, gegen Erde und nicht zwischen Phasen erfolgen.

Die Schlagweite über einen offenen Schalter ist von der Konstruktion abhängig und der Preis des Schalters steigt mit ihr. Bei modernen Schaltern, z.B. Druckluftschnellschaltern mit sichtbaren Trennstellen in Luft, ist dieser Preiseinfluss jedoch nicht sehr erheblich. Dagegen dürfte der dadurch bedingte grössere Platzbedarf für Innenraumschalter mehr ins Gewicht fallen. Nach den vorliegenden Unterlagen scheint es, dass die Schlagweite über dem offenen Schalter grösser gewählt werden muss, wenn die Stab-Platte- und nicht die Stab-Stab-Funkenstrecke als Koordinationsfunkenstrecke gewählt wird.

Es geht daraus hervor, dass weder die Isolatoren, noch die Transformatoren teurer zu stehen kommen, wenn die Stab-Platte-Funkenstrecke als Koordinationsfunkenstrecke verwendet wird. Wegen der dadurch erreichten besseren Ausnützung der Isolationsfestigkeit der Isolatoren und Transformatoren dürfte die kleine Verteuerung, welche

durch die erhöhte Schlagweite über offenem Schalter entsteht, sich rechtfertigen.

Im obigen ist nur von der Koordination der Schaltanlage die Rede, während die Koordination der Freileitungen und Kabel ausser Acht gelassen wurde. Bei Freileitungen ist dafür zu sorgen, dass die Isolatoren nicht durchschlagen, sondern nur überschlagen. Nach den Erfahrungen wird dies von den üblichen Freileitungsisolatoren erfüllt, so dass eine Koordination bereits vorhanden ist. Defekte durch Kurzschluss-Lichtbogen an den Hängeketten werden durch die heute üblichen, schnell arbeitenden Relais und Schalter vermieden.

In reinen Kabelnetzen treten keine Gewitter-Ueberspannungen auf, so dass die Koordination in solchen Anlagen mehr oder weniger gegenstandslos ist. Trotzdem empfiehlt es sich aus Sicherheitsgründen, die Anlagen zu koordinieren. Für Kabel gelten übrigens sinngemäss dieselben Ueberlegungen wie für Transformatoren.

Die Wahl der Isolationsstufen

Wir haben gesehen, dass die Kennlinien der zu koordinierenden Teile einander möglichst angepasst werden müssen, um die Isolation möglichst gut auszunützen. Die Spanne der Festigkeit der zu koordinierenden Teile ist auch von der Streuung der Stossfestigkeit abhängig und lässt sich nicht ändern (siehe Abschnitt III).

Je mehr Isolationsstufen gewählt werden, desto grösser wird die Spanne zwischen dem effektiven Isolationsniveau der ganzen Anlage und der Festigkeit der höchsten Isolationsstufe. Dies hat zur Folge, dass entweder die Betriebssicherheit der Anlage reduziert oder die Erstellungskosten erhöht werden. Keines von beiden ist erwünscht.

Früher hatte man mehrere Stufen vorgeschlagen, heute werden im allgemeinen nur 4 Stufen vorgeesehen, und zwar:

1. Höchste Stufe für die Isolation der Transformatoren, Maschinen usw.,
2. Stufe für die Isolatoren in Luft,
3. Stufe für die Koordinationsfunkenstrecke,
4. Stufe für die Ueberspannungsableiter.

Die Festigkeit der Isolation über offene Schalter und zwischen Phasen wird entweder in Stufe 1 oder 2 eingereiht.

Dieser Abstufung liegen folgende Ueberlegungen zu Grunde:

Die Ueberspannungsableiter sollen die Betriebsunterbrüche reduzieren. Die Koordinationsfunkenstrecke soll Ueberschläge an den Isolatoren und deren Zerstörung durch Lichtbogen vermeiden, wenn der Schutz der Ableiter nicht genügt, und die Isolatoren sollen die Transformatoren, Maschinen usw. gegen innere Defekte schützen, sofern die Koordinationsfunkenstrecke aus irgendeinem Grunde ausser Betrieb sein sollte.

Wie in Abschnitt V erklärt, besteht die Möglichkeit, die Koordinationsfunkenstrecke wegzulassen und dadurch den Schutzwert der Ableiter, also die Betriebssicherheit der Anlage, ohne Mehrko-

sten zu erhöhen, was mit der heutigen Praxis für Innenraumanlagen übereinstimmen würde.

Die innere Isolationsfestigkeit der Transformatoren wird nach der bisherigen Praxis sowohl für Freiluft wie für Innenraum gleich gewählt; sie bedingt in beiden Fällen den gleichen Schutz gegen innere Defekte.

Wo sollen die Koordinationsfunkenstrecken eingebaut werden?

Wenn die Koordinationsfunkenstrecke als Schutz der Isolation nicht weggelassen wird, sind prinzipiell zwei Möglichkeiten vorhanden:

1. Die Apparate, Transformatoren usw. werden mit den angebauten Koordinationsfunkenstrecken versehen, um zu gewährleisten, dass die Koordination immer vorhanden ist, und man sich nicht auf das Vorhandensein von Koordinationsfunkenstrecken anderswo in der Anlage verlassen muss.
2. Die Koordinationsfunkenstrecken werden an einem Ort eingebaut, wo die Lichtbogen keinen Schaden verursachen, zur Vermeidung von Ueberschlägen an beliebigen Orten in der Schaltanlage. Es ist aber dafür zu sorgen, dass jeder Teil, der von der übrigen Anlage abgetrennt werden kann, seine Koordinationsfunkenstrecke besitzt. Z. B. muss jede abgehende Leitung mit Koordinationsfunkenstrecken versehen werden, für den Fall, dass der Schalter offen ist.

Die nötige Isolationsfestigkeit der einzelnen Teile ist unabhängig davon, ob man die eine oder die andere Anordnung wählt. Es steht also dem projektierenden Ingenieur frei, die eine oder die andere Methode zu wählen, ohne dass dies auf die Dimensionierung der Isolatoren usw. einen Einfluss hat.

Einfluss des Regens auf die zu wählende Isolationsstufe

Wie im Abschnitt III erwähnt, wird die Stossfestigkeit der Freiluftisolatoren durch Regen und Schmutz herabgesetzt. Wieviel, steht jedoch nicht eindeutig fest, und ist wahrscheinlich von den Verhältnissen abhängig.

Nach der heutigen Praxis werden die Schlagweiten der Freiluftisolatoren wegen Regen und Verschmutzung grösser gewählt als diejenigen der Innenraumisolatoren, aber die Koordinationsstrecken müssen mit Rücksicht auf die Festigkeit der Transformatoren auf das Niveau der Innenraumisolatoren eingestellt werden, d. h. der erwähnten Reduktion der Festigkeit ist schon Rechnung getragen. Sollte die Festigkeit ausnahmsweise unter das Niveau der Koordinationsfunkenstrecke sinken, muss mit Ueberschlägen an den Isolatoren gerechnet werden. Dies würde in Anlagen mit schnell arbeitenden Relais und Schaltern keine weiteren Folgen haben, da die Kurzschlüsse abgeschaltet werden, bevor eine Zerstörung eintritt. Eine Aenderung der heutigen Abmessungen der Isolatoren für Freiluft ist auf Grund der vorliegenden Unterlagen nicht zu empfehlen.

VII. Die Durchführung der Koordination

Wir haben gesehen, dass die Koordination darauf hinausläuft, schwache Stellen in der Anlage zu schaffen, wo unvermeidliche Ueberschläge erfolgen können, so dass andere Teile geschützt und

Materialschäden vermieden werden. Diese schwachen Stellen werden zweckmässig durch Koordinationsfunkenstrecken dargestellt.

Es wird darum vorgeschlagen, dass der projektierende Ingenieur die gewünschte Isolationsstufe durch eine Koordinationsfunkenstrecke gegebener Konstruktion und Schlagweite festlegt.

Nach unserer Feststellung (Abschnitt III) wird der Konstrukteur aus der Schlagweite der Koordinationsfunkenstrecke schliessen können, welche Schlagweite er für die zu liefernden Isolatoren vorsehen muss.

Bei den Abnahmeversuchen werden die gewählten Funkenstrecken und die zu liefernden Isolatoren, Apparate usw. nebeneinander aufgestellt und Stoßspannungen beliebiger Höhe und Form ausgesetzt. Es kann dann ohne Rücksicht auf die atmosphärischen Verhältnisse und unvermeidlichen Messfehler festgestellt werden, ob die Isolatoren die gewünschte Festigkeit haben, d. h.

1. ob ihre Festigkeit grösser als diejenige der gewählten Koordinationsfunkenstrecke ist, für den Fall, dass man an den Isolatoren keine Ueberschläge gestattet, oder
2. ob ihre Festigkeit nicht kleiner als diejenige der gewählten Koordinationsfunkenstrecke ist, für den Fall, dass man Ueberschläge an den Isolatoren gestattet, und diese die schwächsten Stellen der Anlage darstellen, und zwar, um entweder die Erstellungskosten zu reduzieren, oder den Schutzwert der Ableiter zu erhöhen.

Es empfiehlt sich aber, auch für den zweiten Fall die Koordinationsfunkenstrecke in den Anlagen einzubauen, um das Isolationsniveau genau festzulegen, so dass die Transformatoren nicht gefährdet werden, wenn aus irgendeinem Grunde grössere Isolatoren verwendet werden sollten als vorgesehen.

Für Freiluftanlagen werden die Isolatoren mit Rücksicht auf Regen und Beschmutzung immer eine so hohe Stossfestigkeit haben, dass sie durch die Koordinationsfunkenstrecke gegen Ueberschläge geschützt werden; die Koordinationsfunkenstrecken müssen nämlich mit Rücksicht auf die Transformatoren die gleiche Schlagweite haben wie für Innenraum.

Durch die Wahl der Funkenstrecke kann der projektierende Ingenieur festlegen, in welchem Masse die Stossfestigkeit von der Polarität abhängig sein soll, und er muss die Anordnung in der Anlage entsprechend treffen.

Dieses Vorgehen würde ganz eindeutig zeigen, ob die gewünschte Festigkeit vorhanden ist oder nicht.

Um festzustellen, ob die Schlagweite über dem offenen Schalter und zwischen den Phasen für die Koordination genügt, wird in gleicher Weise vorgegangen.

Für Transformatoren wäre es erwünscht, in ähnlicher Weise festzustellen, ob sie die nötige Festigkeit haben. Leider ist es nicht sicher, ob die Transformatorenisolation durch eine solche Prüfung nicht geschwächt wird, also ihre Betriebssicherheit nicht leidet. Eventuelle Defekte durch diese Prüfung können nach den heutigen Kenntnissen nicht mit Sicherheit festgestellt werden. Darum ist es vorläufig nicht ratsam, diese Prüfung für Transformatoren

einzuführen, sondern man muss sich in dieser Beziehung, wie bisher, auf die Erfahrung des Herstellers verlassen.

Für die Ableiter ist der Beweis zu erbringen, dass der garantierte Ableiterstrom erreicht wird, ohne dass die gewählte Koordinationsfunkenstrecke zum Ansprechen kommt. Wenn die Koordinationsfunkenstrecke stark polaritätsabhängig ist, kann für das Ableiten negativer Spannungen ein grösserer Ableitstrom garantiert werden als bei positiven Ueberspannungen, wenn der Schutzwert voll ausgenutzt werden soll.

VIII. Schlusswort

Diese Arbeit war schon im Frühjahr 1938 zur Veröffentlichung bereit. Da aber die Denzler-Stiftung einen Wettbewerb über die Koordination ausgeschrieben hatte, wurde die Veröffentlichung verschoben, um dem Wettbewerb nicht zuvorzukommen. Als Nichtschweizer konnte ich mich am Wettbewerb nicht beteiligen. Ich wurde aber aufgefordert, meine Arbeit «hors concours» einzureichen. Trotzdem hat man mir einen Extrapreis zukommen lassen, für welchen ich dem SEV meinen besten Dank ausspreche.

Die Anfänge dieser Arbeit liegen mehr als 20 Jahre zurück. Damals hatten die elektrischen Anlagen sehr unter Gewitterstörungen zu leiden. Um dem abzuweichen, liess Dr. M. Schiesser in Zusammenarbeit mit einer Reihe schweizerischer Elektrizitätswerke in grossem Ausmasse Gewitterstörungen untersuchen. Ich war mit diesen Untersuchungen betraut. Die Erfahrungen, welche ich damals sammelte, bilden die Grundlage meiner Arbeit, welche im Dienst bei Brown, Boveri ausgeführt wurde. Darum ist es mir eine angenehme Pflicht, meiner Firma, und ganz besonders Herrn Dr. Schiesser für die Unterstützung bestens zu danken.

In gleicher Weise bin ich allen Betriebsleitern der Elektrizitätswerke, welche bei der Abklärung der Gewitterstörungen in den früheren Jahren behilflich waren, zu Dank verpflichtet. Sie haben keine Mühe gescheut, sondern mit dem grössten Interesse mitgeholfen, um alle Einzelheiten bei den Störungen abzuklären. Ich hoffe, dass meine Arbeit für diese Herren als Dank für ihre wertvolle Mithilfe von Nutzen sein werde.

Die ursprüngliche Arbeit, welche am Denzler-Wettbewerb eingereicht wurde, ist bedeutend umfangreicher. Für die Veröffentlichung hat die Redaktion des «Bulletin» mir nur beschränkten Platz zur Verfügung stellen können, so dass sehr einschneidende Kürzungen nötig waren. So musste ich auf die Dokumentation meiner Ueberlegungen, welche sich zum Teil auf umfangreiche statistische Unterlagen stützten, weitgehend verzichten, und die meisten Fragen konnten nur gestreift werden. Sollte aber jemand nähere Erläuterungen wünschen, stehe ich gerne zur Verfügung. Bei der Umarbeitung wurde die während der letzten Jahre erschienene Literatur berücksichtigt.

Die in dieser Arbeit vertretenen Meinungen dürfen weder mit denjenigen meiner Firma, noch

mit denjenigen des Koordinationskomitees des CES und des SEV verwechselt werden. Sie wird als Diskussionsbeitrag veröffentlicht, wofür ich selber die Verantwortung trage.

Literaturverzeichnis

- ¹⁾ K. Berger: Untersuchungen mittels Kathodenstrahloszillograph der durch Erdschluss hervorgerufenen Ueberspannungen in einem 8-kV-Verteilnetz. Bulletin SEV 1930, S. 756.
- ²⁾ H. Neuhaus: Ueberspannungsmessungen mit dem Klydonographen. Arch. f. Elektrotechn., Bd. 25 (1931), S. 333.
- ³⁾ Subcommittee on Development and Research. Edison elect. Inst. and Bell Telephon System: Overvoltages on Transmissions Lines due to Ground Faults as Affected by Neutreal Impedance. Eng. Report Nr. 30, 15. Nov. 1934.
- ⁴⁾ J. Kopeliowitch: Les surtensions de déclenchement et particulièrement celles des transformateurs à vide. Bulletin SEV 1927, S. 513.
- ⁵⁾ H. Baatz: Vorgänge beim Abschalten leerlaufender Hochspannungsleitungen. VDE-Fachberichte 1935, S. 35.
- ⁶⁾ H. Freiburger: Ueberschläge in Schaltanlagen beim Abschalten von Transformatoren. VDE-Fachberichte 1935, S. 32.
- ⁷⁾ W. Estorff: Neue Wege in der Auswahl der Isolation auf Grund der Beanspruchungen im Betrieb. ETZ 1941, S. 365 und 391.
- ⁸⁾ G. Wilke: Ueberspannungen in elektrischen Bahnanlagen und ihre Bekämpfung. Elekt. Bahnen 1939, S. 148.
- ⁹⁾ Cautius: VDE-Fachberichte 1935, S. 34.
- ¹⁰⁾ I. W. Gross und J. H. Cox: Lightning Investigation on the Apparachian Electric Power Comps Transmissions System. Elect. Engng. 1931, S. 478.
- ¹¹⁾ H. Grünewald: Bestimmung der Einschlagstellen und der Stromverteilung bei Blitzschlägen in Eisenmasten und Erdseilen. CIGRE 1935, Bericht 326.
- ¹²⁾ K. B. McEachron: Lightning to the Empire State Building. Elect. Engng. Trans. 1941, S. 885.
- ¹³⁾ A. Roth: Schutz gegen Ueberspannungen in Höchstspannungsanlagen. Bulletin SEV 1921, S. 321.
- ¹⁴⁾ S. Rump: Statistische Untersuchungen über Störungen in elektrischen Anlagen durch Blitzschläge. Brown-Boveri-Mitt. 1922, S. 234.
- ¹⁵⁾ S. Rump: Frequenz des Blitzes. Bulletin SEV 1926, S. 407.
- ¹⁶⁾ K. B. McEachron: La Protection de lignes et des appareils contre les effets de la foudre. CIGRE 1935, Bericht 334.
- ¹⁷⁾ K. Berger: Resultate der Gewittermessungen in den Jahren 1934/35. Bulletin SEV 1936, S. 145.
- ¹⁸⁾ H. Norrinder: Lightning Currents and their Variations. J. Franklin-Inst., Bd. 220, S. 69; und: Indirekte Blitzüberspannungen in Kraftleitungen. ETZ 1938, S. 105.
- ¹⁹⁾ H. Schulze: Erdseil erhöhter Blitzschutzwirkung und Betriebssicherheit der Freileitungen. ETZ 1939, S. 847.
- ²⁰⁾ W. W. Lewis: Les effets de la foudre sur les lignes de transport. CIGRE 1935, Bericht 315.
- ²¹⁾ Ph. Sporn und I. W. Gross: Expulsion Protectives Caps on 132 kV Lines. Elect. Engng. 1935, S. 66.
- ²²⁾ C. E. Wagner und G. D. McCann: Lightning Phenomena. Elect. Engng. 1941, S. 374, 438 und 483.
- ²³⁾ Ph. Sporn und W. L. Lloyd: Lightning Investigation J. Amer. Inst. Electr. Engrs. 1930, S. 259.
- ²⁴⁾ C. E. R. Bruce und R. H. Golde: The Lightning Discharge. J. Inst. Elect. Engrs., Bd. 88, Part. II, Heft 6, S. 487.
- ²⁵⁾ V. Aigner: Die Entwicklung der Blitze und ihr Einfluss auf das luftelektrische Feld. Diss. Tech. Hochschule Berlin 1933.
- ²⁶⁾ V. Aigner: Das Verhalten gestreckter Erder bei Stossbeanspruchungen. ETZ 1933, S. 1233.
- ²⁷⁾ V. Aigner: Bemessung von Bodenseiten zur Herabsetzung von Masterdungswiderständen bei Stoßspannungen. Elekt. Wirtschaft 1936, S. 332.
- ²⁸⁾ H. Baatz: Ueber den wirksamen Widerstand von Erden bei Stossbeanspruchung. ETZ 1938, S. 1263.
- ²⁹⁾ G. Löfgren: Erfahrungen über Erdung von Hochspannungsleitungen. ETZ 1938, S. 1387.

- ³⁰⁾ P. L. Bellaschi: Impulse and 60 Cycle Characteristics of Driven Grounds. *Elect. Engng. Trans.* 1941, S. 123.
- ³¹⁾ J. R. Eaton: Grounding Electric Circuits Effectively. *Gen. Elect. Rev.* 1941, S. 397 und 451.
- ³²⁾ R. Davis und J. E. M. Johnston: The Surge Characteristics of Tower and Tower Footing Impedances. *J. Inst. Elect. Engrs.*, Bd. 88, Part II, S. 453.
- ³³⁾ W. W. Lewis und C. M. Foust: Lightning and Investigation on Transmission Lines — VII. *Elect. Engng. Trans.* 1940, S. 227.
- ³⁴⁾ H. Grünwald: Untersuchungen über Gewitterstörungen und Gewitterschutz in Freileitungsanlagen. *CIGRE* 1939, Bericht 323.
- ³⁵⁾ H. Rokkaku: Lightning on Transmission lines. *CIGRE* 1939, Bericht 321.
- ³⁶⁾ J. C. Jensen: The Breaching of Lightning and the Polarity of Thunderclauds. *J. Franklin-Inst.* 1933, S. 707.
- ³⁷⁾ W. W. Lewis und C. M. Foust: Lightning Investigation on Transmission Lines — IV. *Elect. Engng.* 1934, S. 1180.
- ³⁸⁾ K. B. McEachron und W. A. McMorris: Discharge Currents in Distribution Arresters. *Elect. Engng.* 1935, S. 1395.
- ³⁹⁾ I. W. Gross und W. A. McMorris: Lightning Currents in Arresters at Stations. *Elect. Engng. Trans.* 1940, S. 417.
- ⁴⁰⁾ H. Neuhaus und R. Striegel: Der Verlauf von Wanderwellen in elektrischen Maschinen. *Arch. Elektrotechn.* 1935, S. 702.
- ⁴¹⁾ K. Berger: Die Gewittermessungen der Jahre 1932 und 1933 in der Schweiz. *Bulletin SEV* 1934, S. 213.
- ⁴²⁾ H. Müller: Das Verhalten der Isolatoren gegen Ueberspannungen verschiedenen zeitlichen Ablaufes. *Hescho-Mitt.*, Heft 53/54, S. 1679; Heft 57/58, S. 1807; Heft 66/67, S. 2079.
- ⁴³⁾ J. Rebhan: Die Sicherheit elektrischer Anlagen gegenüber Stoßspannungen. *ETZ* 1937, S. 1177.
- ⁴⁴⁾ J. H. Hagenguth: Short Time Spark-Over of Caps. *Elect. Engng.* 1937, S. 67.
- ⁴⁵⁾ P. L. Bellaschi und W. L. Teague: Impulse and 60 Cycle Strength of Air. *Elect. Engng.* 1934, S. 1638.
- ⁴⁶⁾ P. L. Bellaschi und W. L. Teague: Characteristics of Short Rod Caps. *Electr. J.* 1935, S. 56.
- ⁴⁷⁾ P. L. Bellaschi: Impulse Voltage Chopped on Front. *Electr. Engng.* 1936, S. 985.
- ⁴⁸⁾ EEL-NEMA: Flashover Characteristics of Rod Caps and Insulators. *Electr. Engng.* 1937, S. 712.
- ⁴⁹⁾ T. E. Allibone: International Comparison of Impulse-Voltage Tests. *J. Inst. Elect. Engrs.*, Bd. 81 (1937), S. 741.
- ⁵⁰⁾ P. Jacottet: Stossüberschlagsversuche an Stabfunkenstrecken. *ETZ* 1937, S. 628.
- ⁵¹⁾ B. L. Goodlet, F. S. Edwards und F. R. Perry: Dielectric Phenomena at high Voltages. *J. Inst. Elect. Engrs.*, Bd. 69 (1931), S. 695.
- ⁵²⁾ E. F. Rendell und H. D. Gaff: *Trans. S. Africa Inst. Elect. Engrs.* 1933, S. 258 (und *ETZ* 1935, S. 313).
- ⁵³⁾ A. Schwaiger: Die Ueberschlagspannung des Porzellans. *ETZ* 1922, S. 875.
- ⁵⁴⁾ A. Roth: *Hochspannungstechnik*. Springer, Berlin 1927, S. 204, Tabelle 39.
- ⁵⁵⁾ F. W. Peek jun.: *Dielectric Phenomena in high Voltages Engineering*. McGraw-Hill Book Co., New York und London 1915 und 1920.
- ⁵⁶⁾ A. Matthias: Stosskennlinien von Hochspannungs-Isolatoren verschiedener Bauart. *Elekt. Wirtschaft* 1936, S. 103.
- ⁵⁷⁾ W. Wanger: La tension de contournement sous ondes de choc de différentes durées, des isolateurs salis et sous pluie. *CIGRE* 1939, Bericht 209.
- ⁵⁸⁾ W. Weicker: Umrechnung der Ueberschlagsspannungen von Hochspannungs-Isolatoren auf einheitliche Luftverhältnisse, insbesondere gleiche Luftfeuchtigkeit. *Hescho-Mitt.* 1936, Heft 74/75, S. 2357.
- ⁵⁹⁾ W. Weicker: Zusammenfassende Uebersicht der bisherigen Untersuchungen über den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Ueberschlagspannung von Hochspannungs-Isolatoren. *Arch. Elektrotechn.* 1942, S. 418.
- ⁶⁰⁾ G. Pfestorf und K. H. Strauss: Die Aenderung der Ueberschlagspannung von Hochspannungs-Isolatoren im Bereich normaler atmosphärischer Luftfeuchtigkeit. *Arch. Elektrotechn.* 1941, S. 740.
- ⁶¹⁾ T. Nischi und Y. Nakajima: Effect of Humidity and Dry Flash-over Voltages of Porcelain Insulators. *Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research*. Tokio, Oktober 1938, Bd. 34, Nr. 837, S. 1213.
- ⁶²⁾ V. M. Montsinger: *Elect. Engng.* 1937, S. 479.
- ⁶³⁾ P. L. Bellaschi und F. L. Teague: Dielectric Strength of Transformer Insulation. *Elect. Engng.* 1937, S. 164.
- ⁶⁴⁾ P. L. Bellaschi und F. J. Vogel: Insulations Coordination of Transformers — II. *Elect. Engng.* 1934, S. 870.
- ⁶⁵⁾ F. J. Vogel: La résistance aux impulsions de l'isolement de transformateurs. *CIGRE* 1935, Bericht 138.
- ⁶⁶⁾ V. M. Montsinger: Coordination of Power Transformers for Steep-Front Impulse Waves. *Elect. Engng. Trans.* 1938, S. 183.
- ⁶⁷⁾ V. M. Montsinger: Breakdown Curve for Solid Insulation. *Elect. Engng.* 1935, S. 1300.
- ⁶⁸⁾ F. J. Vogel: *Electr. Engng.* 1936, S. 402.
- ⁶⁹⁾ P. E. Schneeberger: Allgemeine Kabeltechnik. *Bulletin SEV* 1938, S. 213.
- ⁷⁰⁾ K. Buss und W. Vogel: Stoßspannungsversuche an Hochspannungskabeln. *VDE-Fachberichte* 1935, S. 61.
- ⁷¹⁾ H. W. Leichsenring und Ch. Held: Die Gewittersicherheit von Hochspannungskabelanlagen. *Elekt. Wirtschaft* 1940, S. 156.
- ⁷²⁾ C. M. Foust und J. A. Scott: Some Impulse Voltage Break-down Tests on Oil-Treated Paper-Insulation Cables. *Elect. Engng. Trans.* 1940, S. 389.
- ⁷³⁾ L. J. Komives: Impulse Strength as a Measure of Cables. *Elect. Engng. Trans.* 1941, S. 929.
- ⁷⁴⁾ R. Davis: The Impulse Electric Strength of High-Voltage Cable. *J. Inst. Elect. Engrs.*, Bd. 89, Part II, S. 52.
- ⁷⁵⁾ J. H. Hagenguth: *Elect. Engng. Trans.* 1940, S. 391.
- ⁷⁶⁾ R. W. Achinson: *Elect. Engng. Trans.* 1940, S. 392.
- ⁷⁷⁾ R. Jost: Ueber die Durchschlagsfestigkeit einiger fester Isolierstoffe bei Beanspruchungen von langer bis ganz kurzer Dauer. *Arch. Elektrotechn.*, Bd. 23 (1929), S. 305.
- ⁷⁸⁾ W. G. Standring: The Electric Strength of Solid Dielectrics under Impulse Voltage. *J. Inst. Elect. Eng.*, Bd. 88, Part. II (1941), S. 360.
- ⁷⁹⁾ P. H. McAuley: Flash-over Characteristics of Insulations. *Elect. J.* 1938, S. 273.
- ⁸⁰⁾ P. L. Bellaschi und F. L. Vogel: Vacuum Filling Boosts Dielectric Strength. *Elect. Wld.*, 14. Jan. 1939, S. 156.
- ⁸¹⁾ P. L. Bellaschi: Coordination and Protection of Station Insulation against Lightning. *CIGRE* 1939, Bericht 317.
- ⁸²⁾ M. Dutoit und S. Rump: Statistique des perturbations de service et des avaries dans les installations de transport de force. *CIGRE* 1925, Bd. 2, S. 840.
- ⁸³⁾ Ph. Sporn und I. W. Gross: Lightning Performance of 132-kV-Lines. *Elect. Engng.* 1934, S. 1195.

50 Jahre Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE)

621.3 (06)(43)

Am 22. Januar dieses Jahres waren 50 Jahre seit der Gründung des VDE verflossen. Bei der Bedeutung dieser Vereinigung, die inzwischen zum grössten elektrotechnischen Fachverband der Welt geworden war, scheint es angemessen, dass auch an dieser Stelle kurz Rückschau gehalten wird auf die Gründung und Entwicklung des VDE sowie auf die überaus zahlreichen und umfangreichen Arbeiten, die dieser Verband während der 50 Jahre seines Bestehens geleistet hat. Es darf dies an dieser Stelle um so eher geschehen, als das Samenkorn zum VDE gelegentlich des Internationalen Elek-

trotechniker-Kongresses und der Internationalen Elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt a. M. im Jahre 1891 gepflanzt wurde¹⁾, deren wesentlichster Bestandteil die denkwürdige Lauffener Uebertragung gewesen war, an deren Gelingen die schweizerische Praxis und schweizerische Fachleute so hervorragenden Anteil hatten²⁾. Damals ging den deutschen Mitgliedern des Kongresses seitens einer Anzahl namhafter Persönlichkeiten, unter denen besonders J. Berli-

¹⁾ Bulletin SEV 1931, Nr. 18, S. 458.

²⁾ Bulletin SEV 1941, Nr. 18, S. 425.