

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 63 (1972)

Heft: 20

Artikel: Die Spannungsfestigkeit praxisbezogener Hochspannungsanordnungen in Luft bei Mischspannungen

Autor: Pieper, M. / Vorwerk, H.-J.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915744>

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: 23.01.2026

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

Die Spannungsfestigkeit praxisbezogener Hochspannungsanordnungen in Luft bei Mischspannungen

Von M. Pieper und H.-J. Vorwerk

621.317.326 : 621.3.027.3

Die Isolierung der Hochspannungsapparate wird normalerweise nicht mit den tatsächlich im Betrieb möglichen Mischspannungen, worunter die Überlagerung von transienten Überspannungen über die Betriebsspannung verstanden werde, geprüft. Da über Versuche mit Mischspannungen bisher erst wenig zuverlässige Unterlagen vorliegen, wurde das Isoliervermögen von Funkenstrecken, Isolatoren und offenen Schaltern bei Schlagweiten teils bis zu 3 m bei Blitz- oder Schaltspannung unter anliegender Wechselspannung bestimmt.

Im grossen und ganzen ist nach den Messergebnissen für das Isoliervermögen die volle Höhe der zusammengesetzten Spannung massgebend. Dabei ist es praktisch ohne Belang, ob mit Mischspannung oder nur mit der reinen Stoss- bzw. Schaltspannung geprüft wird, sofern nur die Maximalwerte übereinstimmen. Die Prüfung von offenen Schaltstrecken zur Nachbildung gewisser möglicher Betriebszustände sollte hingegen mit dem Wechselspannungsanteil an der einen Klemme und der Impulsspannung an der anderen durchgeführt werden.

L'isolation des appareils à haute tension n'est normalement pas vérifiée sous les tensions mixtes qui peuvent réellement se présenter en service, c'est-à-dire compte tenu des surtensions transitoires superposées à la tension de service. Les renseignements au sujet d'essais sous tensions mixtes étant jusqu'ici peu sûrs, le pouvoir d'isolation d'éclateurs, isolateurs et interrupteurs ouverts a été déterminé pour des distances disruptives allant parfois jusqu'à 3 m, lors de surtensions dues à la foudre ou à des manœuvres, sous tension alternative appliquée.

Grosso modo, les résultats de ces mesures ont montré que la pleine valeur de la tension composite est déterminante pour le pouvoir d'isolation. Ce faisant, il importe peu que l'essai ait lieu sous tension mixte ou uniquement sous tension pure de choc ou de manœuvre, à condition que les valeurs maximales correspondent. Par contre, l'essai de distances disruptives ouvertes pour simuler certains états de service possibles devrait avoir lieu avec la part de la tension alternative à l'une des bornes et avec la tension impulsionnelle à l'autre.

1. Einleitung

Der wachsende Energiebedarf führt weltweit zur Anwendung immer höherer Übertragungsspannungen, um die Erzeugerschwerpunkte mit den Verbraucherzentren wirtschaftlich zu verbinden. Heute zielt die Entwicklung bereits auf 1100, 1300 oder sogar 1500 kV als Übertragungsspannung. Mit den höheren Netzspannungen sinkt das Verhältnis Prüfspannung/Betriebsspannung bei Normstoss und Schaltspannung.

Normalerweise werden Normstoss- und Schaltspannungsprüfungen an Isolieranordnungen in Luft ohne Berücksichtigung der Betriebsspannung vorgenommen. Diese Vereinfachung hat sich bisher durchwegs bewährt und unnötige Umtreibe vermieden. Mit zunehmendem Wechselspannungsanteil bei den hohen Übertragungsspannungen stellt sich jedoch immer mehr die Frage nach der wahren Mischspannungsfestigkeit. Unter Mischspannung ist dabei eine aus der betriebsfrequenten Dauerspannung und der transienten Überspannung zusammengesetzte Beanspruchung zu verstehen, wobei im allgemeinen die Phasenlage der Überspannung in bezug auf die Betriebsspannung variieren wird. Bei den transienten Überspannungen handelt es sich um Schalt- oder Blitzstoßspannungen.

Auch bei den niedrigeren Netzspannungen ist im Zuge der fortschreitenden Verfeinerung der Isolationskoordination und der Rationalisierung die genaue Kenntnis des Isoliervermögens der Anlagenteile unter den durch die Praxis gegebenen Beanspruchungen wichtig. Die dazu vorliegenden Unterlagen sind nicht ausreichend, was wohl vor allem auf experimentelle Schwierigkeiten bei solchen Untersuchungen zurückzuführen ist. Die uns vorliegenden Veröffentlichungen über Prüfungen mit Wechselspannung und überlagerter Stoss- bzw. Schaltspannung an Isolieranordnungen in Luft [1; 2; 3; 5; 6; 8]¹⁾, sind keineswegs zahlreich und unterscheiden sich zudem in ihren Aussagen. Es wurden deshalb systematische Untersu-

chungen durchgeführt, wobei die Aufgabe bestand, das Isoliervermögen typischer Anordnungen in Luft, wie Schutzfunkenstrecken, Isolatorenäulen und Trennstrecken offener Schalter, bei Stoss- oder Schaltspannung mit gleichzeitig anliegender Wechselspannung zu ermitteln.

2. Prüflinge

Aus der Vielfalt der in Hochspannungsanlagen anzutreffenden Isolieranordnungen wurden einige typische Luftisolatoren bei Schlagweiten bis zu 3 m ausgewählt, auf die sich prinzipiell alle Varianten hinsichtlich ihres grundsätzlichen Verhaltens zurückführen lassen. Es sind dies:

- a) Stab-Stabfunkenstrecke, senkrecht angeordnet, mit 0,5, 1,0 und 2,0 m Schlagweite. Das untere Ende des oberen, hochspannungsseitigen Vierkantstabes von 10 mm Kantenlänge endete in einer Kugel von 30, 50 oder 125 mm Durchmesser. Die Länge des direkt auf dem Laborboden aufgestellten erdseitigen Stabes gleichen Querschnitts betrug 1 m.
- b) Ring-Stabfunkenstrecke, senkrecht angeordnet, mit waagerechtem Ring von 1,0, 1,5 und 2,0 m Schlagweite (siehe Tab. I).
- c) Stab-Stabfunkenstrecke, waagerecht 2 m über Boden angeordnet, von 1,0 m Schlagweite.
- d) Offene Trennstrecke eines Freiluft-Hochspannungsschalters, mit vier in Serie geschalteten Unterbrechungsstellen.
- e) Erdisolator eines Hochspannungsschalters.

3. Prüfschaltungen

Zur Nachbildung der im Betrieb möglichen Mischspannungen mit den üblichen Spannungserzeugern eines Hochspannungslaboratoriums waren spezielle Prüfschaltungen notwendig.

Die Schaltung gemäß Fig. 1a erlaubt die Überlagerung von Wechsel- und Stoss- bzw. Schaltspannung an ein und derselben Elektrode bei geerdeter Gegenelektrode. In dieser Weise wurden die Messungen an den Prüflingen gemäß a), b) und e) durchgeführt. Der Trennkondensator von 4,4 nF zwischen Prüfling *P* und Stossgenerator *S* ermöglicht die Summenbildung aus Wechsel- und Stoss- bzw. Schaltspannung am Prüf-

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

ling. Seine Kapazität ist so zu wählen, dass einerseits der an ihm auftretende Spannungsabfall der Impulsspannung möglichst klein bleibt, und andererseits die Wechselspannungsquelle nur gering belastet wird. Die Einzelspannungen wurden über kapazitive Spannungsteiler mit Oszillographen aufgezeichnet. Die Schaltungselemente wurden so dimensioniert, dass die Stoss- und Schaltspannungen für den Prüftransformator auf ungefährlicher Höhe blieben.

In der anderen Schaltung nach Fig. 1b wird die Wechselspannung der einen Elektrode zugeführt und die Stoss- bzw. Schaltspannung der anderen. Die zu prüfenden Isolierstrecken gemäss c) und d) werden hierbei mit der Differenz der Teilspannungen beansprucht. Bei ungleichnamiger Polarität der Momentanwerte der Teilspannungen ist die Beanspruchung der Isolierstrecke dann höher als die der Erdisolierung.

4. Durchgeföhrte Messungen

Die Isolieranordnungen wurden entweder mit Stoss- oder Schaltspannung für sich allein oder mit Mischspannung geprüft. Dabei wurde so vorgegangen, dass im Überschlagsbereich auf mehreren Spannungsstufen die Überschlagswahrscheinlichkeit mit mindestens 40 Stößen pro Stufe ausgemessen wurde. Die bei derartigen Prüfungen in der Regel zu erwartende Normalverteilung der Messwerte erwies sich zumindest im hier vorzugsweise interessierenden Bereich kleiner Durchschlagswahrscheinlichkeit als gegeben. Die Halbwerte wurden aus der 50%-Überschlagsspannung unter Abzug von zwei Standardabweichungen ermittelt, entsprechend einer Überschlagswahrscheinlichkeit von 2,3 %. Die Wechselspannung wurde für die jeweilige Prüfung konstant gehalten und die

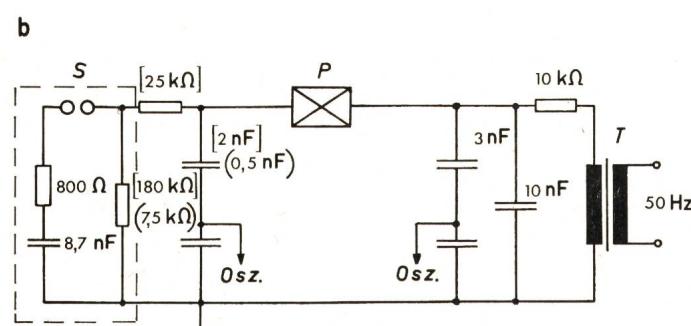
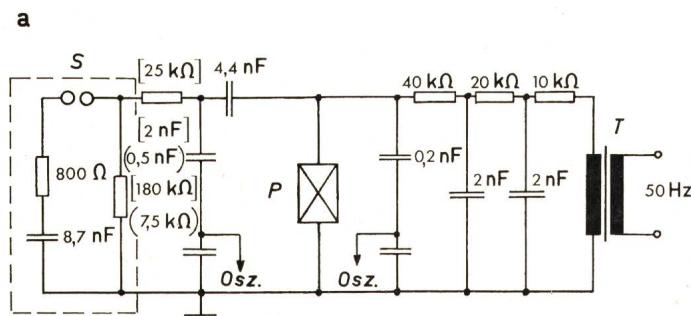


Fig. 1
Prüfschaltung zur Erzeugung von Mischspannungen

- a Dauerspannung und transiente Überspannung am Hochspannungs-pol gegen Erde
- b Wechselspannung an dem einen Pol und transiente Überspannung am Gegenpol der Isolierstrecke

[...]: Schaltelemente nur bei der Schaltspannungsprüfung
(...): Schaltelemente nur bei der Normstossprüfung

S Stossgenerator 2,4 MV, 25 kW

P Prüfling

T 1200-kVA-Prüftransformator

Osz. Oszillograph

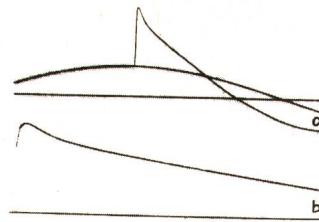


Fig. 2
Positive Schaltspannung im positiven Scheitel der Wechselspannung

Schaltung gemäss Fig. 1a

- a Zusammengesetzte Spannung. Die Wechselspannung ist einmal ohne Schaltspannungsstoss aufgezeichnet, um die Phasenlage des Stosses zu verdeutlichen. Das Überschwingen der resultierenden Spannung auf die entgegengesetzte Polarität ist durch das Zusammenwirken der beiden Spannungsquellen bedingt
- b Form des unter a gegebenen Schaltspannungsstosses mit Hilfe des direkt am Stossgenerator angeschlossenen Spannungsteilers oszillografiert (vgl. Fig. 1a)

Phasenlage der Stösse variiert. Phasenlage und Spannungshöhe wurden oszillographisch kontrolliert.

Der offene Schalter wurde auch unter Normregeln geprüft [Regenmenge (Vertikalkomponente): 1,5 mm/min; Einfalls-winkel: 45°; spezifischer Wasserwiderstand: 10 000 Ωcm].

Die Frontzeit der Schaltspannung wurde vom tatsächlichen Beginn bis zum Scheitel des Schaltspannungsstosses gemessen, die Rückenhalbwertzeit in der für Normstoss üblichen Weise.

In Anlehnung an die CEI-Empfehlungen wurden die Messwerte auf den Normzustand der Luft (Luftdruck 760 Torr, Temperatur 20 °C, absolute Luftfeuchtigkeit 11 g/m³) umgerechnet; nur bei den Schaltspannungsversuchen wurde wegen der darüber noch bestehenden Unsicherheiten keine Korrektur für die Feuchtigkeit vorgenommen. Während der Prüfungen bewegte sich die relative Luftpumpe zwischen 0,93 und 0,97, die absolute Feuchtigkeit zwischen 6,5 und 15 g/m³. Im vorliegenden Fall kommt diesen Korrekturen sowieso keine grössere Bedeutung zu, da ja kaum die Absolutwerte der jeweiligen Durchschlagsspannungen, sondern nur der gegenseitige Vergleich interessierte und überdies darauf geachtet wurde, zusammengehörende Versuche möglichst rasch einander folgen zu lassen, d. h. sie unter noch nahezu ungeänderten Versuchsbedingungen durchzuführen.

5. Messergebnisse

In den Fig. 2 ... 7 sind einige typische Oszillogramme der Spannungsverläufe wiedergegeben. Man beachte, dass in den Fig. 2 ... 4 die Wechselspannung zu Beginn des Impulses keinerlei Störungen erfährt und unter Beachtung der Polarität sich beide Spannungen voll addieren. Auch bei der Überlage rung der Norm-Stossspannung blieb der Verlauf der Wechselspannung ungestört (vgl. Fig. 5 und 6). Lediglich in der Prüfschaltung von Fig. 1b kam es zu einer geringfügigen Beeinflussung (Fig. 7), doch blieb die Störung stets unterhalb 3 %. Mit den hier verwendeten Prüfschaltungen änderte sich die Wechselspannung im Stossmoment somit kaum, wie dies auch den tatsächlichen betrieblichen Verhältnissen entspricht.

Die für Gasisolierstrecken sinnvolle Definition der Mischspannung sei anhand von Fig. 8 erläutert. Alle Spannungsangaben beziehen sich auf Scheitelwerte. Als höchster Wert u der Mischspannung gilt der Maximalwert der zusammengesetzten Spannung, Bezugswert ist das Erdpotential (Nulllinie). Der Wechselspannungsanteil wird mit $u \sim$ bezeichnet und der Stoss- bzw. Schaltspannungsanteil mit u_s Spannungspfeile von

Prüfling	Phasenlage der Stöße	$u \sim$ kV	u_s kV	u kV
		-	595	595
		200	600	600
		200	395	595
		-	528	528
		200	505	505
		200	349	549

Fig. 3
Positive Schaltspannung im negativen Scheitel der Wechselspannung
Schaltung gemäss Fig. 1a

Fig. 4
Positive Schaltspannung im negativen Scheitel der Wechselspannung
Schaltung gemäss Fig. 1b

Fig. 5
Negativer Normstoss im negativen Scheitel der Wechselspannung
Schaltung gemäss Fig. 1a

Fig. 6
Positiver Normstoss im negativen Scheitel der Wechselspannung
Schaltung gemäss Fig. 1a

Fig. 7
Positiver Normstoss im positiven Scheitel der Wechselspannung
Schaltung gemäss Fig. 1b

oben nach unten repräsentieren die positive Polarität und umgekehrt. Demnach setzt sich die Mischspannung stets wie folgt zusammen:

$$u = u \sim + u_s$$

Unter Berücksichtigung der Pfeilung gilt dies auch für Fig. 8b, da $u \sim$ mit negativem Vorzeichen einzusetzen ist, sowie auch für alle anderen Kombinationen.

5.1 Wechselspannung mit überlagerter Schaltspannung

Die in den Fig. 9 und 10 sowie in Tab. I dargestellten Messergebnisse gelten für den Fall, dass einer Elektrode die Mischspannung zugeführt wird und die Gegenelektrode fest geerdet ist. Tab. II dagegen gibt die Messergebnisse für Wechselspannung an der einen Elektrode des Prüflings und Schaltspannung am Gegenpol. Die Werte für reine Wechselspannung wurden durch mehrmaliges rasches Hochregeln der Spannung bis zum Überschlag ermittelt; die Streuung der Messwerte war dabei vernachlässigbar klein.

In Fig. 9 sind auf der Abszisse die Wechselspannungsanteile aufgetragen und auf der Ordinate die Schaltspannungsanteile bzw. die Höhe der Mischspannung (Haltespannung) lt. Definition gemäss Fig. 8. Der 1. Quadrant kennzeichnet positive Schaltspannungsstöße im positiven Scheitel der Wechselspannung, der 2. positive Stöße im negativen Scheitel, der 3. negative Stöße im negativen Scheitel und der 4. negative Stöße im positiven Scheitel. Messpunkte auf der Abszisse bzw. Ordinate repräsentieren Haltespannungen bei reiner Wechsel- bzw. Schaltspannung.

Zur Vermeidung von Überschneidungen im interessierenden Augenblick sind die Zeitachsen der beiden Vorgänge etwas gegeneinander verschoben. Die Beeinflussung der Wechselspannung durch den Stoss ist vernachlässigbar und überstieg in keinem Fall 3 %

Wie Fig. 9 zeigt, ist in erster Näherung die Summenspannung u für das Isoliervermögen der untersuchten Stabfunkentstrecke massgebend und zwar weitgehend unabhängig vom Verhältnis $u_s/u \sim$. Allerdings verläuft die u -Kurve nicht genau abzissenparallel. So liegen die Punkte für reine Schaltspannung bzw. Schaltspannung im Nulldurchgang der Wechselspannung durchwegs etwas höher als die Kurve für Mischspannung, wobei dies bei positiver Schaltspannung etwas ausgeprägter als für die andere Polarität ist. Mit Schaltspannungsstößen im gegenpolaren Scheitel der Wechselspannung, im 2. und 4. Quadranten, geht die Summenspannungsfestigkeit deutlich zurück. Von einem ähnlichen Verhalten wurde auch in [2] berichtet.

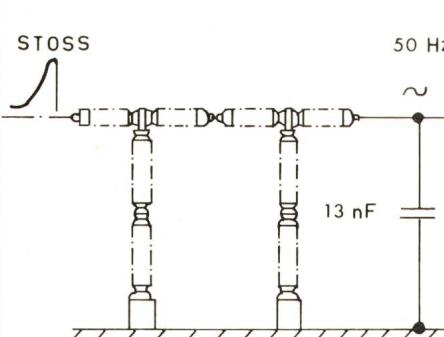
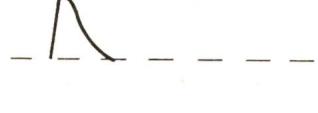
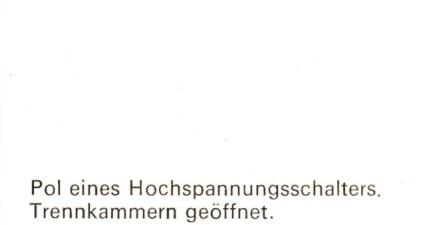
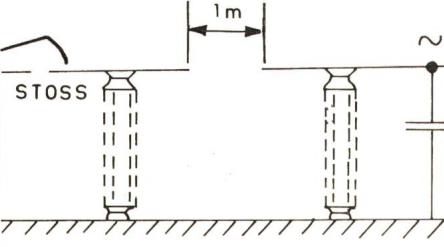
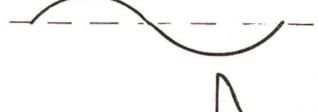
In Fig. 10 ist die Schaltspannungsfestigkeit für verschiedene zusammengesetzte Mischspannungen und unterschiedliche Schlagweiten der Stab-Stabfunkentstrecke dargestellt. Zusätzlich ist der Scheitelwert der angewendeten Wechselspannung

eingetragen, damit der Einfluss der Wechselspannung besser ersichtlich ist. Diese selbst wurde mit zunehmender Schlagweite auch grösser gewählt und zwar derart, dass ungefähr die in der Praxis zu erwartenden Dauerbeanspruchungen nachgebildet wurden. In gleicher Weise wurde auch bei den weiter unten berichteten Messungen vorgegangen. So gehört z. B. zu einer Schutzfunkentstrecke von 1 m Schlagweite eine Netzspannung von etwa 245 kV, was einer Phasenspannung von 200 kV Scheitelwert entspricht.

Fig. 10 lässt erkennen, dass auch bei verschiedenen Schlagweiten die in Fig. 9 dargestellten Zusammenhänge zumindest für positive Schaltspannung bestätigt werden. Während bei den hier gewählten Wechselspannungsanteilen die Summenspannung bei positivem Schaltstoss im positiven Scheitel der Wechselspannung für das Isoliervermögen massgebend ist, liegt bei Stoss im negativen Scheitel, was die Anwendung grösserer Schaltspannungsanteile erfordert, die Summenspannung deut-

*Isolieranordnungen in Luft bei Beanspruchung mit Mischspannungen
50-Hz-Wechselspannung und Schaltspannung 150|1800 μ s*

Tabelle II

Prüfling	Phasenlage der Stöße	$u \sim$ kV	u_s kV	u kV
	 TROCKEN	—	900	900
	 NORMREGEN	245	831	1076
	 Horizontal Stab-Stab-Funkenstrecke.	—	900	900
		245	719	964
		—	525	525
		200	358	558

lich tiefer. Man vergleiche hierzu den Abstand der zwei oberen Kurven in Fig. 10, der kleiner ist, als dem Wechselspannungsanteil (untere Kurve) entspricht.

Auch bei der Ring-Stabfunkentstrecke (vgl. Tab. I), bei welcher sich nun eine stärker gekrümmte Elektrode auf Erdpotential befindet, ist für das Isoliervermögen die Höhe der Mischspannung bestimend. Bei positiver Polarität der Schaltspannung ist kein Unterschied in den Haltespannungen ersichtlich. Dies ist insofern bedeutsam, als im Gegensatz zur Stabfunkentstrecke bei den gewählten Wechselspannungsanteilen nachgewiesen wurde, dass bei der Vorbeanspruchung noch keinerlei Glimmen an den Elektroden auftrat und damit hinsichtlich Raumladungen grundsätzlich andere Verhältnisse herrschten.

Bei der Ausmessung der Trennstreckenfestigkeit (Schaltung Fig. 1b) mit Wechselspannung an der einen und Schaltspannung an der anderen Schalterklemme ergaben sich die in Tab. II aufgeführten Werte. Ausnahmslos liegt die Mischspannungsfestigkeit oberhalb der beim Versuch mit reiner Schaltspannung. Ein derartiges Ergebnis ist auch überall dort zu erwarten, wo das überlagerte Erdfeld (Feld zwischen Hochspannungselektrode und geerdeter Umgebung) gegenüber dem elektrischen Feld zwischen den Elektroden eine nicht zu vernachlässigende Wirkung ausübt. Beim Auftreten von entgegengesetzten gepolten Spannungen ist das Hochspannungspotential an der höher beanspruchten Elektrode niedriger als bei reiner Schaltspannung ($u \sim = 0$, d. h. Gegenelektrode geerdet). Damit ist aber auch das Erdfeld weniger stark, und die Gasstrecke zwischen den Elektroden hat eine höhere Festigkeit. Bei Spannungsanteilen gleicher Polarität ist der umgekehrte Effekt zu erwarten. Bei einem zahlenmässigen Vergleich zwischen den Werten für den Schalter und die Stabfunkentstrecke ist zu er-

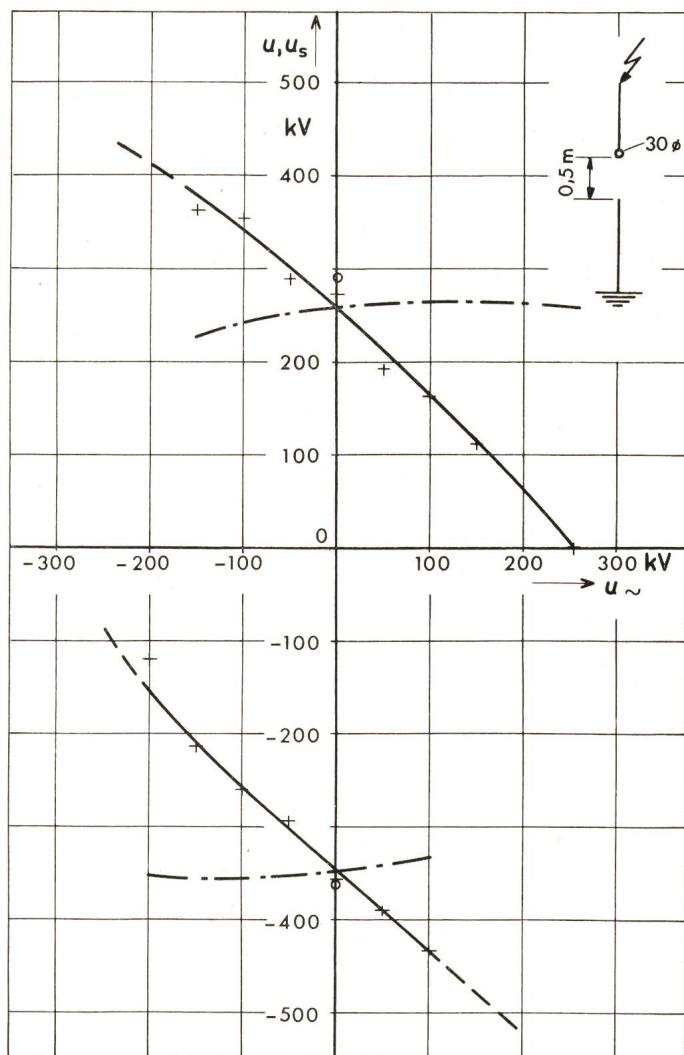
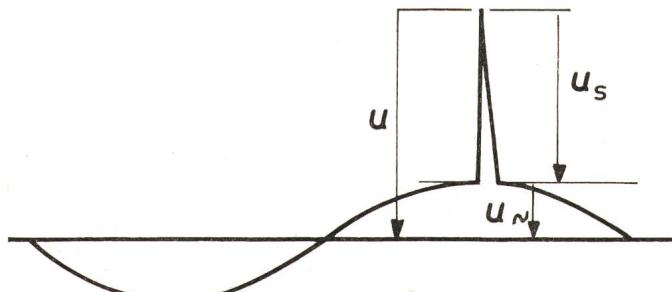


Fig. 9
Haltespannungen einer einseitig fest geerdeten Stabfunkentstrecke,
 $d = 0,5$ m, bei Mischspannungen (50-Hz-Wechselspannung
und Schaltspannung 100 | 1000)

- + Schaltspannungsstoß im Scheitel der Wechselspannung
- Schaltspannungsstoß im Nulldurchgang der Wechselspannung
- Mischspannung u , (vgl. Fig. 8), zusammengesetzt aus Wechsel- und Schaltspannung

a



b

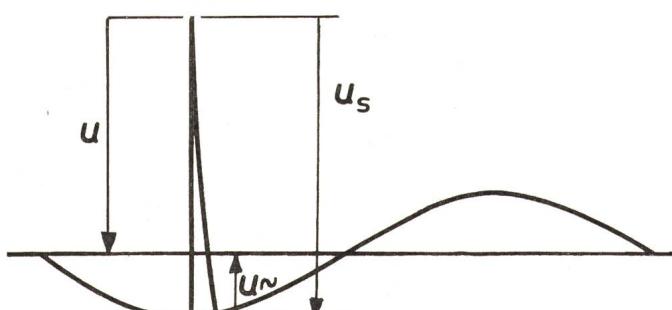


Fig. 8

Definition der Mischspannung und ihrer Anteile

a positiver Stoß im positiven Wechselspannungsscheitel
b positiver Stoß im negativen Wechselspannungsscheitel

kennen, dass beim Schalter der Festigkeitszuwachs dank der besseren Spannungsaufteilung auf die einzelnen Unterbrechungsstellen und damit einer gleichmässigeren Feldaufteilung im Raum zwischen den Elektroden noch grösser ausfällt.

Die Standardabweichungen, bezogen auf den Schaltspannungsanteil, lagen bei sämtlichen Versuchen zwischen 1,3 und 6,4 %.

5.2 Wechselspannung mit überlagerter Blitzstoßspannung

Die Messergebnisse sind den Fig. 11...16 und den Tabellen III und IV zu entnehmen.

In Fig. 11 ändern sich in beiden Fällen die für die Summenspannung u erhaltenen Werte bei unterschiedlichen Wechselspannungsanteilen fast nicht; die elektrische Festigkeit der Stab-Stabfunkentstrecke ist somit unabhängig von der Zusammensetzung der Mischspannung.

Das gleiche Verhalten wurde auch für die Ring-Stabfunkentstrecke festgestellt (vgl. Fig. 14), obwohl für diese Anordnung

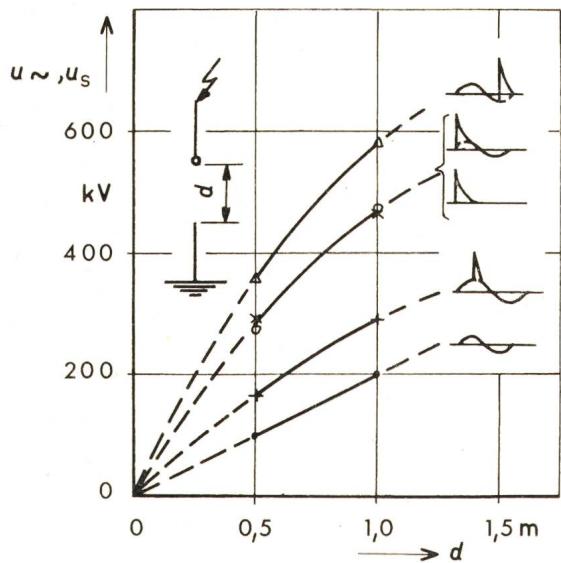


Fig. 10

Haltespannungen von einseitig geerdeten Stabfunkentstrecken bei Beanspruchung mit Mischspannungen 50-Hz-Wechselspannung und positive Schaltspannung 100/1000 μ s

- + Wechselspannungsanteil
- + Schaltspannungsanteil u_s , positiver Schaltspannungsstoß im positiven Scheitel der Wechselspannung
- reine Schaltspannung, positive Polarität
- x u_s , positiver Stoß im Nulldurchgang der Wechselspannung bei nachfolgender positiver Halbwelle
- △ u_s , positiver Stoß im negativen Scheitel der Wechselspannung

Die am hochspannungsseitigen Stab angesetzte Kugel hatte bei 0,5 m Schlagweite einen Durchmesser von 30 mm, bei 1,0 m dagegen einen von 50 mm

die an Hochspannung liegende Elektrode grossflächiger und mit grösseren Krümmungsradien ausgebildet ist, was eine bedeutende Erhöhung der Glimmleinsetzspannung bewirkt. Mit negativer Stoßpolarität wurden niedrigere Haltespannungen als bei der Stab-Stabfunkentstrecke ermittelt, weil nunmehr eine stärker gekrümmte Elektrode auf der Erdseite liegt. Da die Messwerte in den Tabellen III und IV für eine technisch relevante Anordnung bei den verschieden zusammengesetzten Mischspannungen weniger als 4 % voneinander abweichen, gilt auch hier die Aussage, dass lediglich die Höhe der Mischspannung u für das Isoliervermögen massgebend ist.

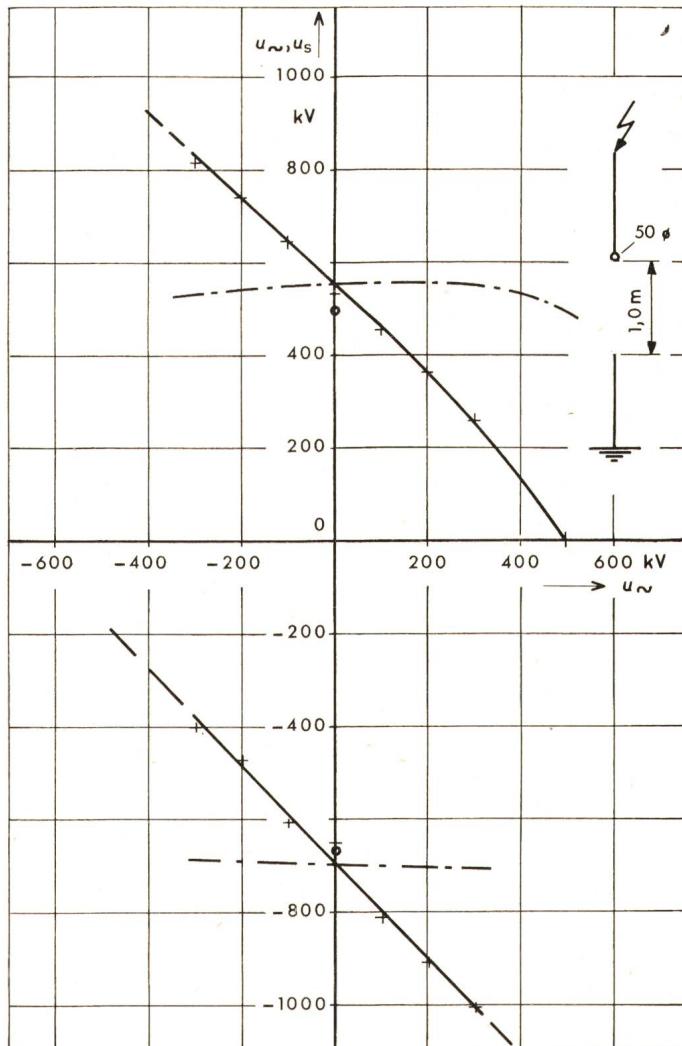
Mit hohem zunehmendem Wechselspannungsanteil wurde ein Absinken der Mischspannungsfestigkeit festgestellt. Dies hängt mit dem inhomogenen Charakter der untersuchten Feldformen (Stoßfaktor > 1) zusammen. Es muss ja eine mit dem wachsenden Wechselspannungsanteil Hand in Hand gehende Festigkeitsabnahme vom höheren Wert für die reine Stoßspannung auf den niedrigeren der reinen Wechselspannung erfolgen. Diese Abnahme macht sich aber erst für $u_s/u \sim < 1$ bemerkbar.

Aus den Fig. 12, 13, 15 und 16 lässt sich entnehmen, dass unabhängig von der Zusammensetzung der Mischspannung die Summenspannung u massgebend ist, und zwar sowohl bei positiver als auch bei negativer Stoßpolarität. Es ist die Stoßspannungsfestigkeit für verschiedene Schlagweiten der Prüflinge dargestellt, wobei die Zusammensetzung der Mischspannung unterschiedlich gewählt wurde. Zur unteren Kurve der Stoßspannungsfestigkeit (+) ist der Wechselspannungsanteil u_\sim zu addieren und von der oberen Kurve (Δ) zu subtrahieren, um die Haltespannung für Mischspannung zu erhalten. Unabhän-

gig von der Schlagweite fällt diese Mischspannungsfestigkeit im grossen ganzen mit der Kurve für reine Stoßspannung (o) bzw. Stoßspannung im Nulldurchgang der Wechselspannung (x) zusammen. Auch eine Vergrösserung der am hochspannungsseitigen Stab aufgesetzten verrundenden Kugel führte zu keinen anderen Resultaten, obwohl dadurch die Einsetzspannung für Glimmentladungen heraufgesetzt wird. Selbstverständlich wird mit der grösseren Kugel insgesamt die Festigkeit leicht erhöht.

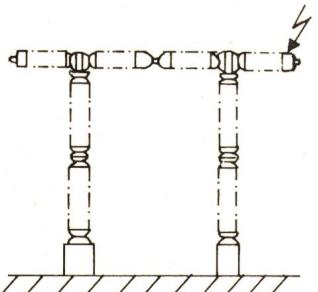
Zusammenfassend gilt somit, dass beim geerdeten Prüfling auch im Fall der Stoßspannungsüberlagerung über die Betriebsspannung das Isoliervermögen im wesentlichen durch die Summenspannung u bestimmt wird, wobei dem Verhältnis u_s/u_\sim nur eine untergeordnete Rolle zukommt.

Im Falle der Schaltentstrecke und Spannungen an beiden Klemmen ergab sich das auch schon für Schaltspannung gefundene Verhalten (s. Tab. IV). Bei gegenpolaren Spannungsanteilen wurde für positive und negative Stoßpolarität die höhere Festigkeit ermittelt. Dieses Verhalten ist auf Grund



Haltespannungen einer Stabfunkentstrecke, $d = 1,0$ m, bei Beanspruchung mit Mischspannungen

- + Stoß im Scheitel der Wechselspannung
- o Stoß im Nulldurchgang der Wechselspannung. Der Stoß hatte die gleiche Polarität wie die beginnende Halbwelle, $u_\sim = 200$ kV
- Mischspannung u

Prüfling	Phasenlage der Stöße	$u \sim$ kV	u_s kV	u kV
		-	1207	1207
		200	1228	1228
		200	999	1199
		200	1418	1218
		-	1183	1183
		200	1175	1175
		200	968	1168
		200	1394	1194

Pol eines Hochspannungsschalters.
Trennkammern geschlossen,
Prüfung der Isolation gegen Erde.

der quantitativen Unterschiede in den Haltespannungen weniger durch eine günstigere Spannungsaufteilung auf die einzelnen Unterbrechungsstellen als durch den Einfluss des Erdfeldes bedingt.

6. Auswertung und Schlussfolgerungen

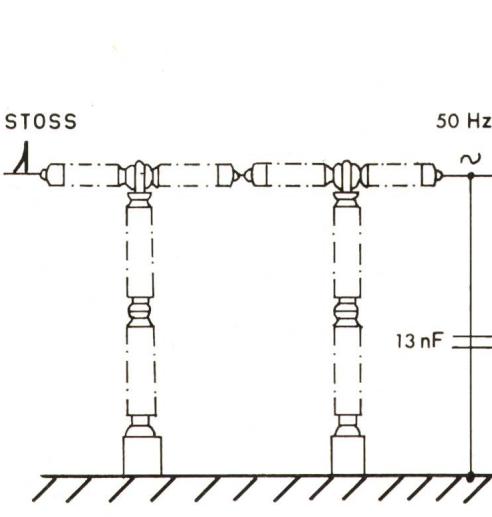
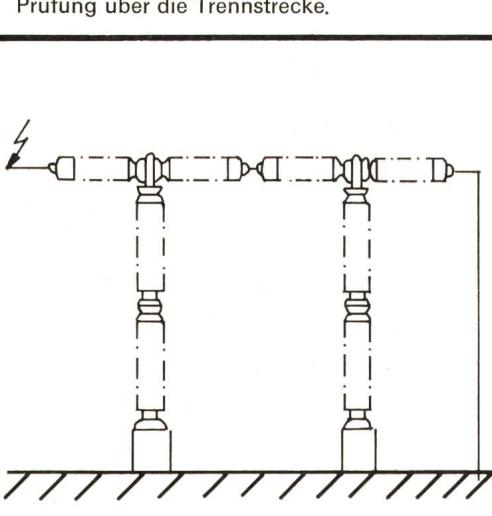
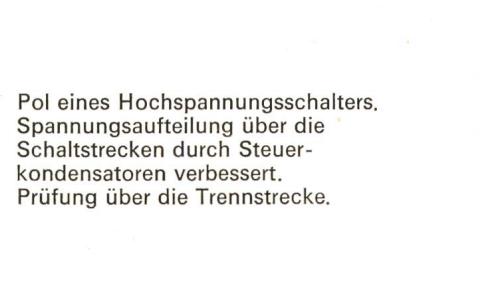
Die Versuche mit Mischspannungen haben damit gezeigt, dass für das Isoliervermögen einer Anordnung in Luft mit einerseitig geerdeter Elektrode allein die Grösse der Mischspannung u massgebend ist. Im grossen ganzen ist es dabei gleichgültig, ob nur mit Stoß- oder Schaltspannung geprüft wird, oder ob die Prüfspannung auch einen gewissen Wechselspannungsanteil enthält. Vor allem gilt dies für Wechselspannungsanteile von der Höhe der in der Praxis vorkommenden Werte. Es gilt somit, dass die Stoß- oder Schaltspannungsfestigkeit im Masse der aufgedrückten Vorspannung zurückgeht, sofern bei der gerade bestehenden Phasenlage die Teilspannungen sich addieren. Jedoch bleibt selbst ein grösserer Wechselspannungsanteil ohne Einfluss, wenn die transiente Spannung im Nulldurchgang der Wechselspannung erscheint. Mit wachsender Nennspannung der Hochspannungsnetze werden zur Sicherstellung ausrei-

chender Isolierung grössere Schlagweiten notwendig, und die Wechselspannungsanteile nehmen dann entsprechend zu.

Da im untersuchten Schlagweitenbereich die Festigkeit bei Schaltspannung ungefähr mit der bei Wechselspannung, beim Vergleich der Scheitelwerte, übereinstimmt, hat sich auch mit hohen Wechselspannungsanteilen keine Einbusse an Mischspannungsfestigkeit ergeben. Wird die Schaltspannungsfestigkeit mit U_{HS} und die Wechselspannungsfestigkeit mit U_{HW} bezeichnet, so verhalten sich Funkenstrecken bekanntlich derart, dass bei den kleinen Schlagweiten $U_{HS}/U_{HW} > 1$ und bei den grösseren Schlagweiten $U_{HS}/U_{HW} < 1$ ist (vgl. [7]). Daraus ist abzuleiten, dass bei den kleineren Schlagweiten mit hohen Wechselspannungsanteilen die Mischspannungsfestigkeit ab- und bei den grösseren Schlagweiten zunimmt. Aus Fig. 9 ist zu entnehmen, dass mit $u \sim = 0$ bzw. Schaltspannungstoß im Nulldurchgang der Wechselspannung leicht höhere Haltespannungen bestehen als dem glatten Kurvenverlauf entspräche. Dies wird teilweise von anderen Angaben bestätigt, allerdings bei weit kleineren Schlagweiten. Nach [3] verminderte schon eine geringe Vorbeanspruchung mit Wechselspannung das Isoliervermögen leicht, und zwar unabhängig von der

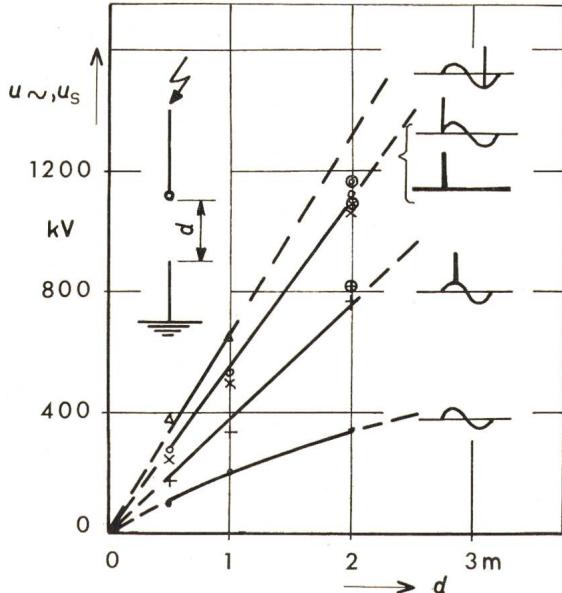
Trennstreckenfestigkeit eines Hochspannungsschalters bei Mischspannungen
50-Hz-Wechselspannung und Stoßspannung $1,3|44 \mu\text{s}$

Tabelle IV

Prüfling	Phasenlage der Stöße	$u \sim$ kV	u_s kV	u kV
 <p>STOSS</p> <p>50 Hz</p> <p>13 nF</p>		-	1195	1195
 <p>Pol eines Hochspannungsschalters. Prüfung über die Trennstrecke.</p>		200	1225	1225
 <p>Pol eines Hochspannungsschalters. Spannungsaufteilung über die Schaltstrecken durch Steuer- kondensatoren verbessert. Prüfung über die Trennstrecke.</p>		200	1088	1288
		200	1376	1176
		-	1206	1206
		200	1226	1226
		200	1114	1314
		200	1320	1120
		-	1279	1279
		200	1270	1270
		200	1061	1261
		200	1485	1285
		-	1265	1265
		200	1275	1275
		200	1044	1244
		200	1493	1293

Phasenlage des Stosses. Bei Stoss im Nulldurchgang der Wechselspannung wurden bei mehreren der hier durchgeföhrten Versuche jedoch eher höhere Haltespannungen ermittelt, die sogar oberhalb der bei reiner Schaltspannungsbeanspruchung liegen. Ob dieses grundsätzlich verschiedene Verhalten den unterschiedlichen Schlagweiten oder/und Elektrodenanordnungen zuzuordnen ist, bleibe dahingestellt. Die Unterschiede sind quantitativ gering, so dass sie vielleicht von einem wissenschaftlichen Interesse sein mögen, doch keinesfalls eine praktische Bedeutung besitzen. Dagegen sei auf ein Phänomen aufmerksam gemacht, das sich bei den hier untersuchten Schlagweiten noch nicht sehr stark auswirkt, aber in Höchstspannungsanlagen u. U. wohl Beachtung verdient. Mit Schaltspannung im gegenpolaren Scheitel der Wechselspannung sinkt die Mischspannungsfestigkeit mit steigendem Wechselspannungsanteil zunehmend unter die Festigkeit für reine Schaltspannungsbeanspruchung. Dies könnte bei der Isolationsbemessung in Ultrahochspannungsanlagen zu einem sehr massgeblichen Kriterium werden, da ja gerade dort das Verhältnis $u \sim /u_s$ hohe Werte hat. Es bleibt in dieser Hinsicht speziellen Untersuchungen, wie sie mit modernen Hilfsmitteln der Messtechnik zur Ergründung der Vorgänge bei Schaltspannungsbeanspruchungen bereits begonnen wurden [7], vorbehalten, tiefer in die physikalischen Zusammenhänge vorzudringen, um anhand der Gegebenheiten den Weg zu technisch und wirtschaftlich brauchbaren Lösungen zu öffnen.

Bei Mischspannungen mit Blitzstoßspannungsanteilen liegen wohl vor allem auf Grund der kürzeren Einwirkdauer bei



Haltespannungen von Stabfunkentstrecken bei Beanspruchung mit Mischspannungen

50-Hz-Wechselspannung und positiver Stoss 1,5 | 33

- $u \sim$ Wechselspannungsanteil
- + Stossanteil u_s , positiver Stoss im positiven Scheitel der Wechselspannung
- reine Stoßspannung, positive Polarität
- \times u_s , positiver Stoss im Nulldurchgang der Wechselspannung bei nachfolgender positiver Halbwelle
- \triangle u_s , positiver Stoss im negativen Scheitel der Wechselspannung

Die am hochspannungsseitigen Stab angesetzte Kugel hatte bei 0,5 m Schlagweite einen Durchmesser von 30 mm, bei 1,0 und 2,0 m dagegen einen von 50 mm. Die eingekreisten Punkte +, \times , ○ wurden mit einer aufgesetzten Kugel von 125 mm Durchmesser erhalten

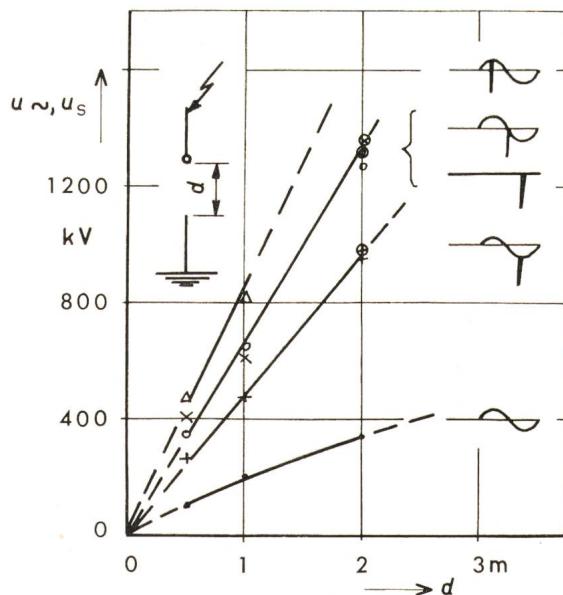


Fig. 13
Haltespannungen von Stabfunkentstrecken bei Beanspruchung mit Mischspannungen

50-Hz-Wechselspannung und negativer Stoss 1,5 | 33

$u \sim$ Wechselspannungsanteil

- + Stossanteil u_s , negativer Stoss im negativen Scheitel der Wechselspannung
- reine Stoßspannung, negative Polarität

- \times u_s , negative Stoßspannung im Nulldurchgang der Wechselspannung bei nachfolgender negativer Halbwelle

- \triangle u_s , negativer Stoss im positiven Scheitel der Wechselspannung

Die am hochspannungsseitigen Stab angesetzte Kugel hatte bei 0,5 m Schlagweite einen Durchmesser von 30 mm, bei 1,0 und 2,0 m dagegen einen von 50 mm. Die eingekreisten Punkte wurden mit einer aufgesetzten Kugel von 125 mm Durchmesser erhalten

Stoßspannungen etwas andere Verhältnisse vor. Mit überwiegendem Wechselspannungsanteil sinkt die Mischspannungsfestigkeit ab. Abgesehen davon bleibt für die verschiedensten Kombinationen von Stoss- und Wechselspannung die Mischspannungsfestigkeit konstant. Da in Hochspannungsanlagen bis zu den höchsten Netzspannungen in den für die Dimensionierung entscheidenden Mischspannungen der Stoßspannungsanteil gegenüber dem Wechselspannungsanteil überwiegt, kann für die Auslegung der Isolation die reine Stoßspannungsfestigkeit herangezogen werden, sofern nicht sowieso schon die zu erwartenden Schaltspannungshöhen massgebend sind. Im 2. Quadranten der Fig. 11 ist ein leichtes Absinken der Mischspannungsfestigkeit mit wachsendem Wechselspannungsanteil zu erkennen, bis schliesslich der Wert der reinen Stoßspannungsfestigkeit erreicht wird. Für $u \sim = 0$ (fehlende Wechselspannung oder auch Stoss im Nulldurchgang der Wechselspannung) ist außerdem eine gewisse Tendenz zu etwas tieferen Haltespannungen vorhanden, als wenn mit kleinen Wechselspannungsanteilen und Stoss im Scheitel geprüft wird. Diese Unterschiede sind jedoch so gering, dass ihnen für die Praxis keine weitere Bedeutung beizumessen ist.

Ein grösserer Einfluss der Wechselspannungsvorerregung, wie er gemäss einer anderen Veröffentlichung [1] eigentlich erwartet wurde, liess sich nicht nachweisen, obwohl die Höhe der Wechselspannung und die Oberfläche der Hochspannungselektrode so verändert wurden, dass ein Teil der Messungen auch bei sprühender Elektrode erfolgte. Eine Erklärung für diese Unterschiede dürfte in den unterschiedlichen Prüfkreisen

zu suchen sein. Bei den hier berichteten Messungen blieb, wie schon erwähnt, die Wechselspannung im Stoßmoment praktisch unbeeinflusst, während dagegen z. B. bei den Versuchen nach [1] beim Stoß die Wechselspannung weitgehend auf Null zurückgegangen sein muss, weil dann über die Entladewiderstände des Stoßgenerators die Wechselspannungsquelle nahezu kurzgeschlossen war. Selbst noch in neueren Veröffentlichungen [8; 9] wird dem mit Wechsel- bzw. Gleichspannung vorbeanspruchten Prüfling der Stoß über eine Funkenstrecke zugeführt, wobei es natürlich gleichfalls im Stoßmoment zu einem weitgehenden Zusammenbruch der Dauerspannung kommt. In der Praxis bleibt hingegen die Wechselspannung in ihrer vollen Höhe erhalten. Nur ein Prüfkreis mit Kondensatorkopplung erscheint daher zur korrekten Durchführung von Mischspannungsversuchen geeignet.

Wird statt Wechselspannung mit Gleichspannung gearbeitet, so ist im Gegensatz zu den hier mit Wechselspannung erhaltenen Ergebnissen ein Einfluss der Art der Vorentladung auf das Isoliervermögen erkennbar [4].

Bei Mischspannungen mit Wechselspannung an der einen und Impulsspannung an der anderen Elektrode – in bezug auf die Erde handelt es sich wegen der waagerechten Anordnung

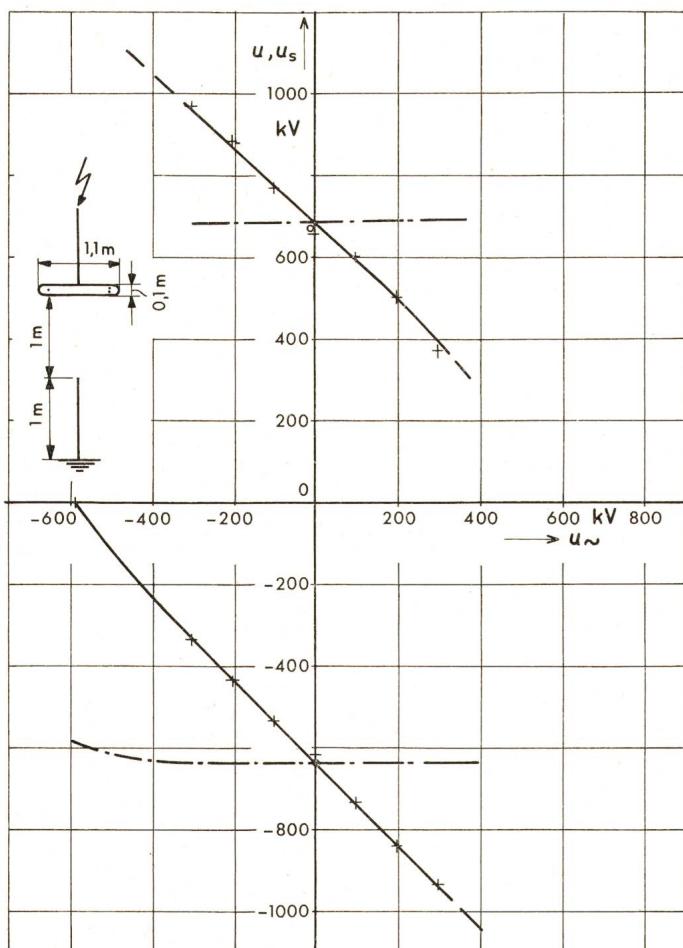


Fig. 14
Haltespannungen einer Ring—Stabfunkentstörstrecke bei Beanspruchung mit Mischspannungen

50-Hz-Wechselspannung und Stoßspannung 1,5|33

- + Stoß im Scheitel der Wechselspannung
- Stoß im Nulldurchgang der Wechselspannung
- Der Stoß hatte die gleiche Polarität wie die beginnende Halbwelle, $u_{\sim} = 200 \text{ kV}$
- Mischspannung u

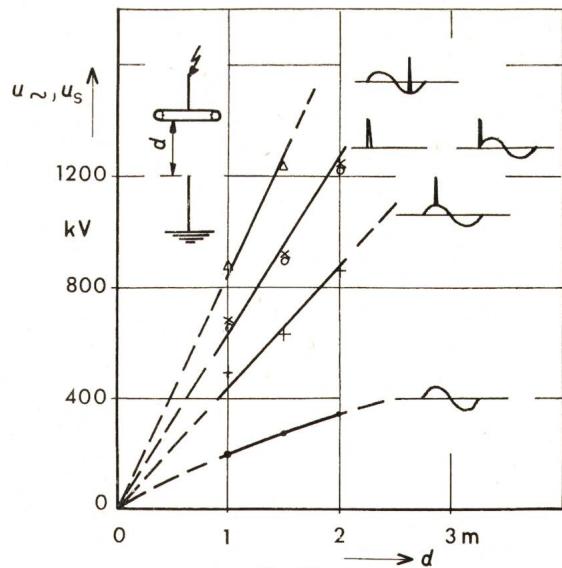


Fig. 15
Haltespannungen einer Ring—Stabfunkentstörstrecke bei Beanspruchung mit Mischspannungen

50-Hz-Wechselspannung und positiver Stoß 1,5|33

- u_{\sim} Wechselspannungsanteil
- + Stoßanteil u_s , positiver Stoß im positiven Scheitel der Wechselspannung
- reine Stoßspannung, positive Polarität
- \times u_s , positiver Stoß im Nulldurchgang der Wechselspannung bei nachfolgender positiver Halbwelle
- \triangle u_s , positiver Stoß im negativen Scheitel der Wechselspannung

um eine weitgehend symmetrische Isolieranordnung – sind die hier mitgeteilten Ergebnisse mit anderen gut vergleichbar [5; 6]. Kleinere Unterschiede bestehen wohl vor allem infolge unterschiedlicher Erdfelder.

Zusammenfassend lassen sich die Ergebnisse der Untersuchung wie folgt darstellen:

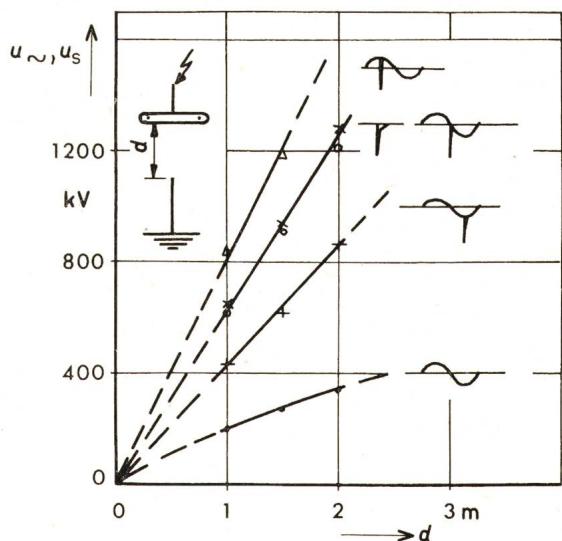


Fig. 16
Haltespannungen einer Ring—Stabfunkentstörstrecke bei Beanspruchung mit Mischspannungen

50-Hz-Wechselspannung und negativer Stoß 1,5|33

- u_{\sim} Wechselspannungsanteil
- + Stoßanteil u_s , negativer Stoß im negativen Scheitel der Wechselspannung
- reine Stoßspannung, negative Polarität
- \times u_s , negativer Stoß im Nulldurchgang der Wechselspannung bei nachfolgender negativer Halbwelle
- \triangle u_s , negativer Stoß im positiven Scheitel der Wechselspannung

a) Bei geerdeten Prüfanordnungen ist ausschliesslich die Maximal-(Summen-)Spannung u für die elektrische Festigkeit massgeblich, nicht aber deren Zusammensetzung aus Wechselspannungs- und Impulsanteilen.

b) Die bisherige Art und Weise der Prüfung von Isolieranordnungen in Luft mit reinen Schalt- bzw. Stoßspannungen ist für den Nachweis ausreichenden Isoliervermögens gut geeignet. Die in der Praxis zu erwartenden Beanspruchungen werden so in ausreichendem Masse berücksichtigt. Für Höchstspannungs- und Ultrahochspannungsanlagen zeichnet sich jedoch eine gewisse Erniedrigung der Schaltspannungsfestigkeit bei Vorkommen der Überspannung im gegenpolaren Scheitel der Wechselspannung ab. Hier besteht die Notwendigkeit zu weiteren Untersuchungen.

c) Die Nachbildung besonderer Verhältnisse an geöffneten Schaltern, wie z. B. Wechselspannung auf einer Seite und Stoss- bzw. Schaltspannung auf der anderen Seite des Schalters, erlaubt keine Vereinfachung der Prüfung in der Art, dass immer nur allein mit Schalt- oder Stoßspannung und geerdeter Gegenelektrode geprüft wird. Es sind die tatsächlich im Betrieb zu erwartenden Verhältnisse nachzubilden, ansonsten nicht zutreffende Anforderungen an das Isoliervermögen des Schalters gestellt werden. Das im englischen Sprachgebrauch unter der Bezeichnung «Bias Test» bekannte Prüfverfahren bei Schaltern lässt sich somit nicht durch Weglassen des Wechsel- bzw. Gleichspannungsanteils bei gleichzeitiger Erhöhung der Impulsspannung vereinfachen, es sei denn, die Ersatz-Prüfspannung würde eine angemessene Reduktion erfahren.

d) Bei Anlagen für die Energieübertragung mit ultrahohen Spannungen empfiehlt es sich, die Isolierung zwischen den Phasen für Prüfspannungen zu dimensionieren, die etwa um das 0,7fache der Betriebsspannung (gegen Erde) höher sind.

Die Verfasser danken Dr.-Ing. habil. B. Gänger, Chef des Hochspannungslaboratoriums und -Prüffeldes der AG Brown Boveri & Cie. in Baden, für die Förderung der Untersuchung und der Unternehmung für die Erlaubnis zur Veröffentlichung.

Literatur

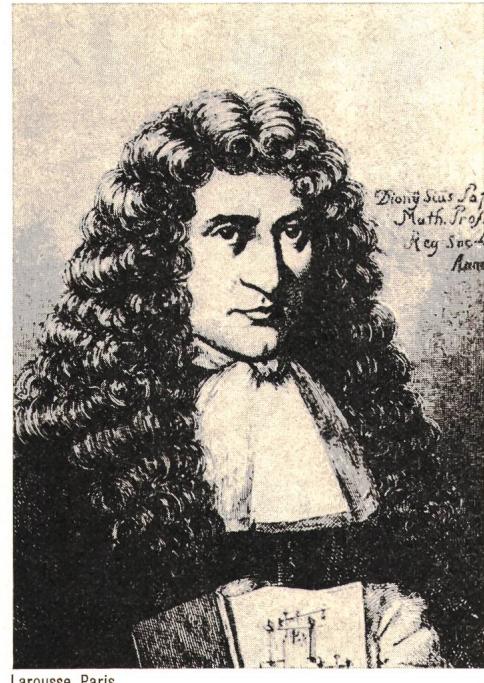
- [1] R. Strigel: Über die 50 %-Überschlagsstoßspannung wechselspannungsreger Schutzfunkentstrecken. Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus den Siemens-Werken 21(1942/1943)1, S. 118...139.
- [2] T. Udo, T. Tada and Y. Watanabe: Switching surge sparkover characteristics of air gaps and insulator strings under nonstandard conditions. Trans. IEEE PAS 87(1968)2, p. 361...367.
- [3] W. Rasquin: Einfluss von Vorbeanspruchungen auf die Durchschlag-Stoßspannungen von Elektroden-Anordnungen in Luft. ETZ-A 90(1969) 17, S. 415...420.
- [4] K. Feser: Das Durchschlagverhalten von Luftröhrenstrecken mit inhomogenem Feld bei Mischspannungen. Bull. SEV 62(1971)6, S. 320...329.
- [5] E. W. Boehne et G. Carrara: Tenue de l'isolation des lignes des postes à t.h.t. aux surtensions de manœuvre. Rapport CIGRE No. 415, 1964.
- [6] T. Udo: Switching surge sparkover characteristics of air gaps and insulator strings under practical conditions. Trans. IEEE PAS 85(1966)8, p. 859...864.
- [7] B. Gänger: Elektrische Festigkeit von Luftsicherstellen bei hohen Schaltspannungen. Bull. SEV 62(1971)4, S. 227...236.
- [8] N. L. Lushnicoff and T. M. Parnell: The effects of pollution and surface discharges on the impulse strength of line insulation. Trans. IEEE PAS 90(1971)4, p. 1619...1627.
- [9] Y. Watanabe: Switching impulse flashover characteristics of thin wire gaps. Trans. IEEE PAS 90(1971)5, p. 2301...2305.

Adresse der Autoren:

Manfred Pieper, AG Brown, Boveri & Cie., Abt. UTY, 5400 Baden und Hans-Joachim Vorwerk, 3063 Ittigen bei Bern.

DENIS PAPIN

1647–1712



Larousse, Paris

auf den Lehrstuhl für Mathematik an die Universität Marburg. Papin nahm gerne an, aber bald zeigte es sich, dass seine Projekte für eine Taucherglocke, ein Unterseeboot, Maschinen für Salinen und vor allem die Dampfmaschine beim Landgrafen auf kein grosses Interesse stiessen. Nachdem er sich 1691 verheiratet hatte, entwarf er eine Dampfmaschine, mit der eine Schiffsschraube angetrieben werden konnte. Da ihn die Tätigkeit in Marburg je länger je weniger befriedigte, reifte in ihm der Entschluss, mit seiner Familie nach England zurückzukehren und zwar auf einem Dampfschiff eigener Konstruktion. In London wollte er dann seine Arbeiten der Royal Society vorlegen. Wie er mit der Schwierigkeit der Herstellung grosser Zylinder fertig geworden war, weiss man nicht. Die Fulda-Schiffer, die fürchteten, die Dampfmaschine mache sie brotlos, sollen sein in Münden im Bau befindliches Schiff zerstört haben.

1707 fuhr Papin dann allein nach London. Trotzdem er viele interessante Arbeiten vorlegen konnte, verwehrte ihm die Royal Society deren Veröffentlichung. Seine wenigen Mittel schwanden dahin, er geriet in Vergessenheit und starb in grösster Armut, man weiss nicht, wo und wann. Sein letzter Brief datiert vom Jahre 1712.

In seiner Heimat erinnerte man sich später des grossen Papin, der seiner Zeit so weit voraus geeilt war. 1859 wurde in Blois seine Statue enthüllt.

H. Wüger