Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 62 (1971)

Heft: 6

Artikel: Das Durchschlagverhalten von Luftfunkenstrecken mit inhomogenem Feld bei Mischspannungen

Autor: Feser, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915808

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: 13.07.2025

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

Das Durchschlagverhalten von Luftfunkenstrecken mit inhomogenem Feld bei Mischspannungen

Von *K. Feser*, Basel

621.319.51

Es wird die Durchschlagspannung von Luftfunkenstrecken mit inhomogenem Feld bei kombinierten Spannungen (Gleichspannung mit überlagerten Stoßspannungen) untersucht. Aus den Ergebnissen ist die entscheidende Rolle der Vorentladung für den Durchschlagvorgang ersichtlich. Neben dem Einfluss der Gleichspannung auf die 50-%-Durchschlag-Stoßspannung wird auch der Einfluss der Vorbeanspruchung mit einer Gleichspannung auf die Stosskennlinie untersucht. Bei Luftfunkenstrecken grosser Schlagweite treten vor dem Spannungszusammenbruch im Bereich kleiner Durchschlagzeiten ($T_d < 5$ µs) erhebliche Vorströme auf. Die in die Funkenstrecke fliessende Vorstromladung nimmt mit abnehmender Durchschlagzeit zu. Ein Teil dieser Ladung kann durch eine Vorbeanspruchung mit einer Gleichspannung aufgebracht werden, wobei die Stosskennlinie selbst durch die Höhe der Gleichspannung nicht beeinflusst wird.

On examine la tension disruptive pour distances d'éclatement dans l'air à champ non-homogène et à des tensions combinées (tension continue avec tensions de choc superposées). Les résultats illustrent le rôle déterminant de la prédécharge dans le phénomène de la décharge disruptive. En plus de l'influence de la tension continue sur la tension de choc disruptive à 50 %, on examine également l'influence exercée sur la caractéristique de choc par la sollicitation préalable à l'aide d'une tension continue. Dans les distances d'éclatement dans l'air à grande distance disruptive, des courants de prédécharge considérables se manifestent pendant de courtes durées disruptives ($T_d < 5$ µs) avant l'annulation de la tension. La charge appliquée à l'éclateur par le courant de prédécharge augmente à mesure que la durée disruptive diminue. Une partie de cette charge peut être absorbée par une sollicitation préalable avec une tension continue, cependant que la caractéristique de choc-même n'est pas influencée par la hauteur de la tension continue.

Obwohl Kenntnisse über das Durchschlagverhalten inhomogener Feldanordnungen, die im Freileitungs- und Schaltanlagenbau vorherrschen, nur über experimentelle Untersuchungen erhältlich sind, gibt es bis heute noch keine systematischen Forschungen über die Festigkeit der Luft bei kombinierten Spannungsbeanspruchungen. Solche Untersuchungen sind aber Voraussetzung für eine optimale Dimensionierung elektrischer Anlagenteile, da gerade bei den höchsten Betriebsspannungen die Dauerbeanspruchung durch die Betriebsspannung in der Grössenordnung der Überspannung liegen kann. Es ist aber durchaus verständlich, dass das Verhalten der Isolierstrecken von der Dauerbeanspruchung beeinflusst wird.

Systematische experimentelle Forschungen über das Verhalten von Isolieranordnungen in Luft bei Gleich- und überlagerten Stoßspannungen sind bisher nur mit Spannungen unter 100 kV durchgeführt worden [1; 2][1]). Mit dem vorliegenden Beitrag wird das Verhalten von Luftfunkenstrecken mit inhomogener Feldverteilung bei hohen Gleichspannungen (bis 500 kV) und überlagerten hohen Stoßspannungen bis (2000 kV) experimentell untersucht.

Fig. 1
Kombinierte Prüfanlage mit 3-MV-Stossgenerator und 1,4-MV-Gleichspannungsanlage

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Prüfaufbau

Die experimentellen Untersuchungen wurden im Hochspannungsinstitut der Technischen Universität München durchgeführt [3] (Fig. 1). Für die Erzeugung der Gleichspannung stand eine 1,4-MV-Gleichspannungsanlage, bestehend aus einem 1,2-MV-Transformator, einem Gleichrichter und einer Glättungskapazität von 16 nF, zur Verfügung. Die Messung der Gleichspannung erfolgte über einen Ohmschen Spannungsteiler mit einem elektrostatischen Instrument.

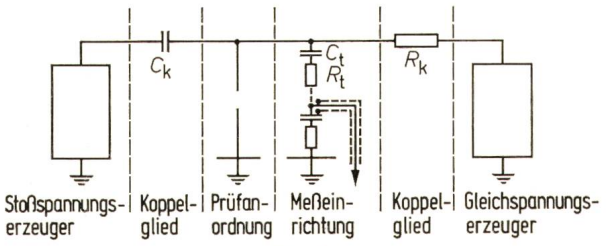


Fig. 2
Prinzipschaltung bei kombinierter Gleich-/Stoßspannungsbeanspruchung
C_k Koppelkondensator 48 nF; C_t Teilerkapazität 291 pF; R_k Koppelwiderstand 4 MΩ; R_t Teilerwiderstand 758 Ω

Die unipolaren Überspannungen wurden mit einem 12-stufigen Marxschen 3-MV-Stossgenerator erzeugt. Die Messung der Stoßspannung erfolgte direkt an der Funkenstrecke mit einem gedämpft kapazitiven Spannungsteiler [4] in Verbindung mit einem Stossvoltmeter.

Das Prinzipschaltbild des gesamten Prüfkreises ist in Fig. 2 wiedergegeben. Durch geeignete Schaltelemente werden die beiden Spannungserzeuger entkoppelt. Die Koppelglieder haben die Aufgabe, eine rückwirkungsfreie Überlagerung der beiden Vorgänge zu gewährleisten. Sie sollen demnach für den eigenen Kreis keinen, für den benachbarten Kreis dagegen einen unendlich hohen Widerstand besitzen.

Als Koppelglied zwischen Stossgenerator und Prüfling wurde ein Kondensator mit einer Kapazität von 48 nF eingebaut, der für die Gleichspannungsanlage als zusätzliche

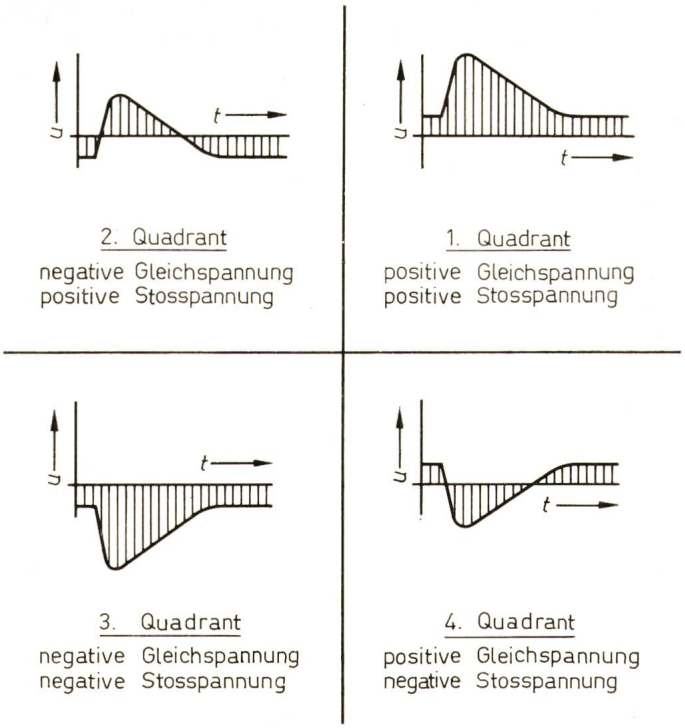


Fig. 3
Schematische Einteilung der Figuren bei Überlagerung zweier Spannungen
t Zeit; *u* Spannung

Glättungskapazität wirkt. Für die Ankopplung der Gleichspannung wurde ein Wasserwiderstand von 4 MΩ verwendet. Mit dieser Schaltung kann jede beliebige Amplitude und Polarität der Gleichspannung mit jeder beliebigen Stoßspannung überlagert werden.

Alle Messungen wurden an einpolig geerdeten, vertikal eingebauten Funkenstrecken vorgenommen. Neben der Stab–Platte-Funkenstrecke, bei der die Vorentladungen auf eine Elektrode beschränkt sind, wurde auch die Stab–Stab-Funkenstrecke untersucht.

In der Stab–Platte-Anordnung wurde eine Aluminiumplatte von 2×2 m² verwendet. Die hochspannungsseitige Stabelektrode bestand aus einem Rohr aus Messing (⌀ = 20 mm). Im Falle der Stab–Stab-Funkenstrecke hatte der erdseitige Stab eine Höhe von 2 m. Der Stabdurchmesser betrug ebenfalls 20 mm. Die Messingstäbe konnten mit verschiedenen Stababschlusselektroden versehen werden (2 cm-Halbkugel, 30°-Spitze, stumpf) [5].

Durchführung und Auswertung der Versuche

Einer bestimmten Polarität und Höhe der Gleichspannung wird eine Stoßspannung überlagert und dabei die Stoßspannung in ihrer Amplitude so verändert, dass die Durchschlagwahrscheinlichkeit von 0...100 % gemessen wird. Die erhaltene Verteilungskurve wird mit mindestens 140 Spannungsstössen ermittelt, wobei die %-Zahlen unter 20 % und über 80 % Durchschlagwahrscheinlichkeit aus statistischen Gründen mit der doppelten Anzahl von Spannungsbeanspruchungen bestimmt werden [6]. Wird der Durchschlagvorgang nur von einem signifikanten Parameter beeinflusst, kann die Durchschlagwahrscheinlichkeit durch eine Normalverteilung angenähert werden. In diesen Fällen ist mit der Angabe der 50-%-Durchschlag-Stoßspannung und der Standardabweichung eine Messung eindeutig gekennzeichnet. Unter bestimmten Voraussetzungen beeinflussen mehrere Parameter das Durchschlagverhalten. Die dann zu beobachtende Mischverteilung kann nach den Gesetzen der Statistik in zwei oder mehr Normalverteilungen zerlegt werden. Die physikalische Ursache der Mischverteilung ist die Änderung der Vorentladung, die bei Funkenstrecken mit inhomogenen Feldern einen wesentlichen Einfluss auf den Durchschlagvorgang ausübt [7; 8].

Die Korrektur der Luftdichte für die gemessenen Spannungswerte erfolgt nach [9]. Eine Feuchtigkeitskorrektur wird nicht durchgeführt.

Für die Darstellung der Durchschlagspannungen U_d einer Anordnung bietet sich eine Einteilung in vier Quadranten an (Fig. 3). Die Durchschlagspannung U_d entspricht dabei der vorzeichenrichtigen Summation von Gleichspannung U_{gl} und 50-%-Durchschlag-Stoßspannung $U_{d\,50\,\%}$. Die vier möglichen Zusammensetzungen der Mischspannungen lassen sich damit wie folgt kennzeichnen:

1. Quadrant: Positive Gleichspannung mit positiver Stossspannung.

2. Quadrant: Negative Gleichspannung mit positiver Stossspannung.

3. Quadrant: Negative Gleichspannung mit negativer Stossspannung.

4. Quadrant: Positive Gleichspannung mit negativer Stossspannung.

In Fig. 3 sind die prinzipiellen Spannungsverläufe in den vier Quadranten mit eingezeichnet.

Versuchsergebnisse

Einfluss der Höhe der Gleichspannung auf die 50-%-Durchschlag-Stoßspannung

In Fig. 4 sind die Durchschlagspannungen in Abhängigkeit von der Gleichspannung bei einem Abstand von 25 cm für die Stab–Platte-Funkenstrecke mit der 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode aufgetragen. Wie dieser Darstellung zu entnehmen ist, bedeuten Parallelen zur Abszisse, dass die Durchschlagspannung unabhängig von der Höhe der Gleichspannung ist. Als Anteil der positiven 50-%-Durchschlag-Stoßspannung ist der Betrag der Spannung von der eingezeichneten 45°-Linie bis zur positiven Durchschlaglinie zu nehmen. Für die negative Polarität ergibt sich entsprechend ein Wert von der 45°-Linie zur negativen Durchschlaglinie. Für eine negative Gleichspannung von —200 kV ist nach Fig. 4 eine positive Stossspannung von 345 kV notwendig, um die positive Durchschlaglinie zu erreichen. Für einen negativen Durchschlag ist eine negative Stoßspannung von —180 kV nötig. In dieser Darstellung ist ein Einfluss der Gleichspannung auf die Durchschlagspannung sofort erkennbar.

Fig. 4 zeigt, dass für eine Vorbeanspruchung der Funkenstrecke mit einer negativen Gleichspannung mit dem Einsetzen der Büschelentladung ein kleiner Spannungssprung verbunden ist, der bei positiver Stoßspannung einen Abfall in der Summenspannung von etwa 12 kV bewirkt, während bei negativen Spannungen eine Spannungszunahme um ca. 22 kV eintritt. Der negative reine Gleichspannungsdurchschlag bringt eine Erniedrigung der Durchschlagspannung.

Wesentlich interessanter ist das Verhalten dieser Anordnung mit positiver Gleichspannung. Der Gleichspannungsdurchschlag erfolgt bei den vorgegebenen Umgebungsbedingungen aus der Glimmentladung. Man erkennt aus Fig. 4, dass mit dem Einsetzen der Glimmentladung bei beiden Polaritäten der Stoßspannung ein Spannungssprung verbunden ist. Bis zur Einsatzspannung der Glimmentladung ist die Durchschlagspannung unabhängig von der Höhe der Gleichspannung.

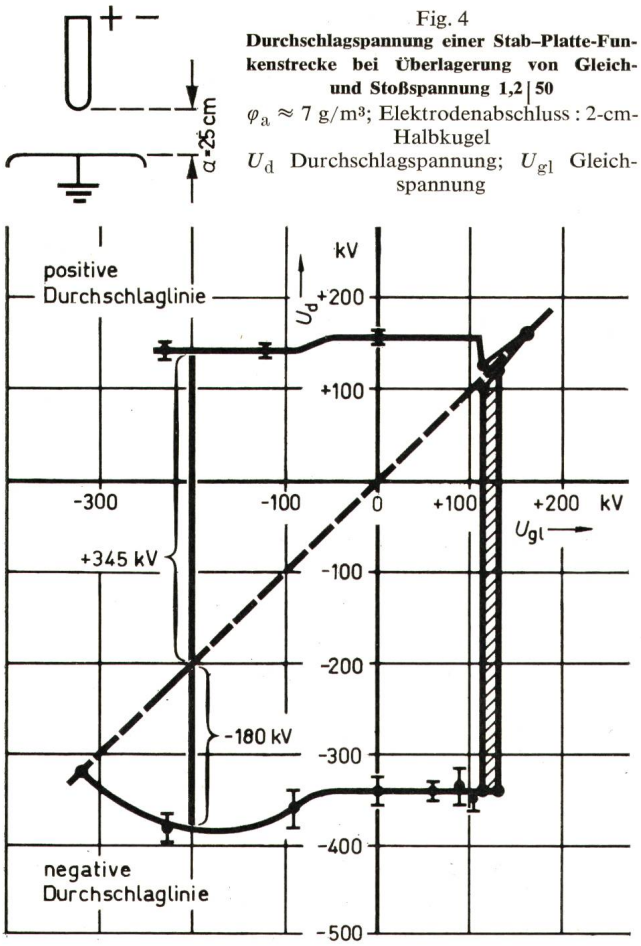


Fig. 4
Durchschlagspannung einer Stab–Platte-Funkenstrecke bei Überlagerung von Gleich- und Stoßspannung 1,2 | 50
$\varphi_a \approx 7$ g/m³; Elektrodenabschluss: 2-cm-Halbkugel
U_d Durchschlagspannung; U_{gl} Gleichspannung

Betrachtet man die Durchschlagwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Durchschlagspannung bei Überlagerung einer positiven Gleichspannung von +115 kV mit einer negativen Stoßspannung, so erkennt man deutlich zwei signifikante Einflussparameter (Fig. 5). Über einen Stoßspannungsbereich von ca. 15 kV bis ca. 440 kV konnte im Mittel eine Durchschlagwahrscheinlichkeit von 35 % ermittelt werden. In Fig. 4 ist dieser Bereich, in dem eine Mischverteilung gemessen wurde, schraffiert dargestellt. Durch die Erhöhung der Gleichspannung auf +135 kV steigt die Durchschlagwahrscheinlichkeit auf ca. 90 %. Der Bereich des Übergangsgebietes bleibt aber erhalten. In diesem Gleichspannungsbereich ($U_{gl} > 105$ kV) führt auch ein kleiner positiver Stoss zum Durchschlag der Funkenstrecke.

Physikalisch sind diese enormen Streuungen mit dem Durchschlag aus der Glimmentladung deutbar. Im Falle eines Durchschlages aus einer Glimmentladung treten Durchschlagzeiten von einigen 100 µs auf, die mit der Laufzeit der positiven Ionen erklärt werden können [10]. Durch die überlagerte Stoßspannung wird die negative Raumladung an der stark gekrümmten Elektrode aus dem Gleichgewicht gebracht und der Durchschlag durch ein entstehendes Stielbüschel eingeleitet. Dies ist möglich, sobald die Spannung über +115 kV beträgt, da für den Stielbüscheldurchschlag bei diesen Bedingungen ($\varphi_a \approx 7$ g/m³) mit einer Spannungsfestigkeit von 4,6 kV/cm gerechnet werden kann. Die Amplitude der Stossspannung ist für die Zerstörung der Glimmschicht nicht entscheidend (Fig. 5).

Diese Ergebnisse werden durch die Messungen von *Jaumann* [11], *Toepler* [12], *Deutsch* [13] und *Rasquin* [1] bestätigt, die ebenfalls im Bereich der Glimmentladung eine grosse Empfindlichkeit der Gleichspannungsfestigkeit gegenüber einer überlagerten Stoßspannung festgestellt haben.

Bei grösseren Abständen erfolgt der Gleichspannungsdurchschlag für die 2-cm-Halbkugel-Elektrode bei positiver Polarität aus der Stielbüschelentladung und bei negativer Polarität aus der Büschelentladung. Man erkennt aus Fig. 6, dass bei negativer Vorbeanspruchung die Höhe der Gleichspannung praktisch keinen Einfluss auf die Durchschlagspannung ausübt. Für beide Polaritäten der Stoßspannung ist die Summendurchschlagspannung etwa konstant. Im Falle der 30°-Spitze als Elektrodenabschluss ist für die positive Durchschlagkennlinie ebenfalls kein Einfluss feststellbar, da der Durchschlag aus der Stielbüschelentladung erfolgt. Im 3. Quadranten zeigt sich sehr deutlich eine Wirkung auf die Durchschlagspannung, die von der Änderung der Vorentladung an der 30°-Spitze hervorgerufen wird. Bis zum Vorentladungswechsel nimmt die Durchschlagspannung um ca. 20 % ab, um nach dem Wechsel in die Büschelentladung wieder anzusteigen und sich dem Wert der Durchschlagspannung mit der 2-cm-Halbkugel als Elektrodenabschluss zu nähern, bei der im untersuchten Bereich keine impulslose negative Vorentladung beobachtet wurde.

Bei der Überlagerung der positiven Spannungen (1. Quadrant) ist eine geringe Abnahme der Durchschlagspannung ab der Einsatzspannung zu beobachten. Der Gleichspannungsdurchschlag ergibt den niedrigsten Wert der Durchschlagspannung.

Wird der positiven Gleichspannung eine negative Blitzstoßspannung überlagert, tritt für die 30°-Spitze ab einer be-

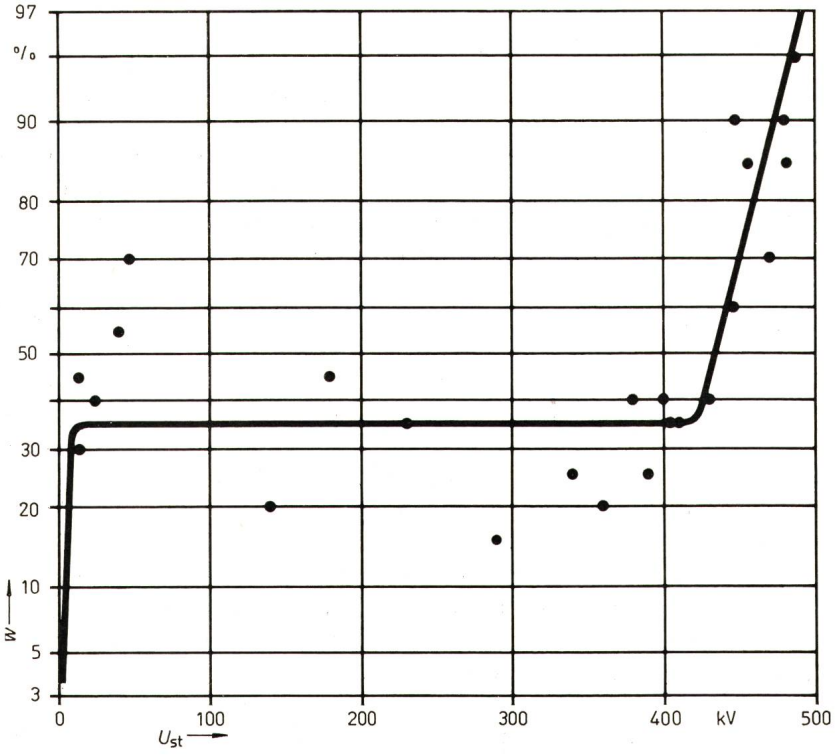


Fig. 5
Durchschlagwahrscheinlichkeit der 25-cm Stab-Platte-Funkenstrecke mit einer positiven Vorbeanspruchung von + 115 kV
U_{st} Stoßspannung; w Durchschlagwahrscheinlichkeit

stimmten Gleichspannung eine erhebliche Absenkung der Durchschlagspannung auf. Die Funkenstrecke ist mit einer positiven Gleichspannung beansprucht, die durch die negative Stoßspannung völlig abgebaut wird. Bei entsprechender Amplitude der negativen Stoßspannung ($U_{st} > U_{gl}$) wird die Funkenstrecke kurzzeitig (einige 10µs) mit einer negativen Spannung beansprucht, die bei diesem Abstand noch nicht zum Durchschlag führt. Die dann wieder abfallende Stoßspannung 1,2|50 bildet zusammen mit der Gleichspannung eine positive Schaltstoßspannung, deren Amplitude durch die Höhe der Gleichspannung gegeben ist. Die Stirnzeit der Schaltstoßspannung wird durch den Spannungsverlauf im Rücken der Blitzstoßspannung bestimmt, während die Rückenzeit der Schaltstoßspannung unendlich ist. Diese entstehende Schaltstoßspannung führt zu einer erheblichen Erniedrigung der Durchschlagspannung. Diese Absenkung tritt besonders bei grossen Schlagweiten auf [5], da dann die positive Schaltstoßspannung infolge der Leaderentladung eine niedrigere Festigkeit als die Gleichspannung aufweist. Nachweisbar ist diese Schaltstoßspannung durch die Messung der Durchschlagzeit, die bei einigen 100 µs liegt. Nach [14] ist dieser Spannungsverlauf beim Kippen der Wechselrichter einer HGÜ möglich, so dass diese Ergebnisse praktische Bedeutung besitzen.

Für einen Abstand von 50 cm ergibt sich für die relative Standardabweichung der Durchschlagspannung U_d bei positiver Polarität der Stoßspannung ein Wert kleiner als 3%. Für die negative Stab–Platte-Funkenstrecken wurden Streuungen bis 8 % ermittelt [5].

Die Durchschlagzeiten gestatten Einblicke in das physikalische Verhalten, die das physikalische Verständnis für ein bestimmtes anomales Verhalten vertiefen. Für beide Polaritäten der Stoßspannung ergeben sich die Mittelwerte der Durchschlagzeiten für die 50-%-Durchschlag-Stoßspannungen der 50 cm Stab–Platte-Funkenstrecke praktisch unabhängig von der Höhe und der Polarität der Gleichspannung zu etwa 10 µs im Falle der positiven Stoßspannung und zu etwa 5 µs im Falle einer negativen Stoßspannung. Wie schon in den Durchschlagkennlinien ist auch in den Durchschlagzeiten kein entscheidender Einfluss von der Höhe der Gleichspannung zu erkennen [5]. Die Ausnahme bildet die Schaltspannungsbeanspruchung mit positiver Gleichspannung und überlagerter negativer Stoßspannung 1,2|50. Für eine Gleichspannung von 235 kV ermittelt sich für die negative Durchschlagstoßspannung der Mittelwert der Durchschlagzeiten zu

$$\overline{T}_d = 270 \pm 60\ \mu s$$

Für den positiven Gleichspannungsdurchschlag ergeben sich Durchschlagzeiten von einigen 100 bis 1000 µs [10].

Für eine Stab–Stab-Funkenstrecke ist in Fig. 7 der Einfluss der Höhe der Gleichspannung auf die Durchschlagspannung wiedergegeben. Ab der Einsatzspannung der Anordnung ist ein deutlicher Einfluss feststellbar. Mit dem Einsetzen der Vorentladungen kann bei negativer Gleichspannung eine erhebliche Spannungsabsenkung beobachtet werden, die auf die Ausbildung der Stielbüschelentladung an der Erdseite zurückgeführt werden kann. Eine weitere Absenkung auf die Höhe

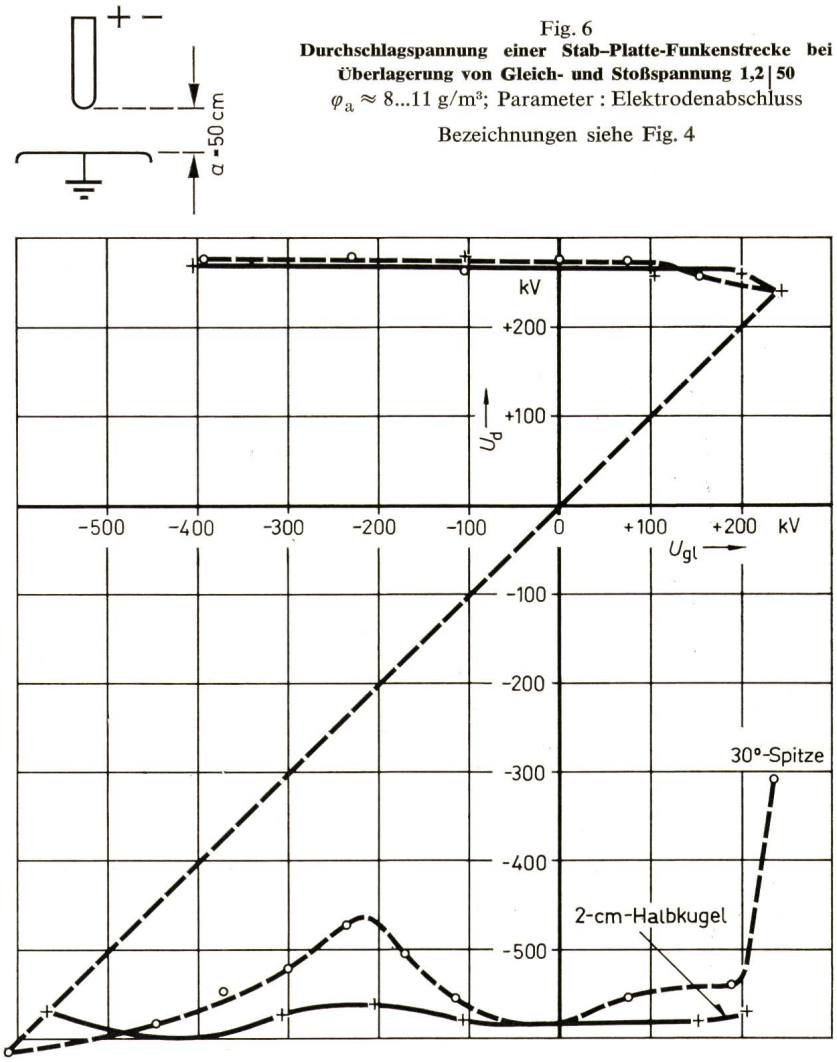


Fig. 6
Durchschlagspannung einer Stab–Platte-Funkenstrecke bei Überlagerung von Gleich- und Stoßspannung 1,2|50
$\varphi_a \approx 8...11$ g/m³; Parameter : Elektrodenabschluss
Bezeichnungen siehe Fig. 4

des negativen Gleichspannungsdurchschlages erfolgt erst, wenn die Gleichspannung bis auf mindestens 90 % der Durchschlaggleichspannung gesteigert wird.

Im 2. Quadranten tritt ebenfalls mit dem Überschreiten der Einsatzspannung eine Absenkung der Durchschlagspannung ein. Bei weiterer Steigerung der Gleichspannung steigt die Durchschlagspannung geringfügig an. Erst kurz vor dem negativen Gleichspannungsdurchschlag erfolgt ein erheblicher Festigkeitsabfall im Bereich des Durchschlages aus der Büschelentladung. Die Ursache dieser tiefen Durchschlagspannung ist im Aufbau der Raumladung zu sehen. Mit Gleichspannung wird die Raumladung zu jeder Amplitude der Spannung optimal aufgebaut. Der optimale Aufbau der Raumladung benötigt eine gewisse Zeit. Durch die überlagerte Stoßspannung wird die Raumladungsverteilung gestört und dadurch mit dem erneuten Anlegen der Spannung (Schaltspannung) der Durchschlag eingeleitet. Die Durchschlagzeiten liegen in diesem Fall deshalb bei einigen 100 µs.

Bei der Überlagerung von positiven Spannungen nimmt die Durchschlagspannung ab der Einsatzspannung ab, während bei der Überlagerung von positiver Gleichspannung und negativer Stoßspannung kein Einfluss der Durchschlagspannung von der Höhe der Gleichspannung feststellbar ist. Bei anderen Abständen (a = 75 cm, a = 100 cm) ergeben sich im Prinzip die gleichen Ergebnisse [5].

Einfluss der Vorentladung

Wie entscheidend die Vorentladung für den Durchschlagvorgang ist, kann durch die Änderung der Elektrodenform bei

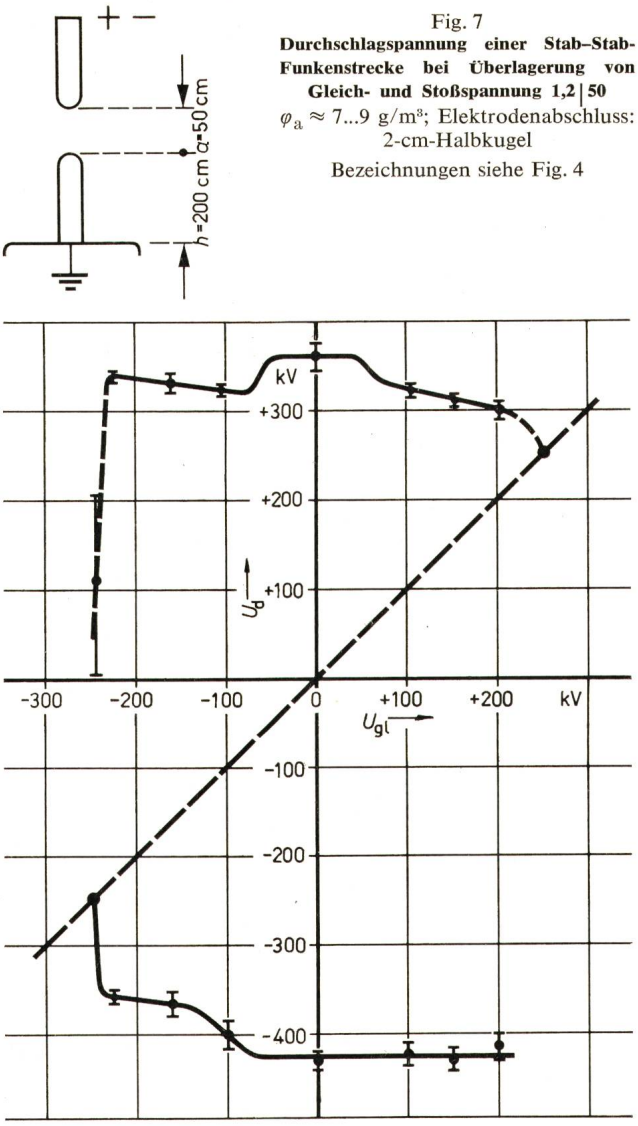


Fig. 7
Durchschlagspannung einer Stab–Stab-Funkenstrecke bei Überlagerung von Gleich- und Stoßspannung 1,2 | 50
$\varphi_a \approx 7...9$ g/m³; Elektrodenabschluss: 2-cm-Halbkugel
Bezeichnungen siehe Fig. 4

konstantem Abstand (a = 25 cm) für die Stab–Platte-Funkenstrecke nachgewiesen werden (Fig. 8). Als Elektrodenabschluss wird die 2-cm-Halbkugel, die 30⁰-Spitze und die stumpfe Elektrode verwendet. Die Existenzbereiche der bei Gleichspannung möglichen Vorentladungen sind sehr verschieden.

An der 30⁰-Spitze kann mit negativer Gleichspannung eine Änderung in der Vorentladung beobachtet werden. Die impulslose Entladung wird von der Büschelentladung abgelöst. Mit positiver Gleichspannung tritt bei diesem Elektrodenabschluss nur die Stielbüschelentladung auf. Entsprechend diesem Vorentladungsverhalten ist für die 30⁰-Spitze bei negativen Spannungen dieser Vorentladungswechsel in der Durchschlagspannung feststellbar. Solange das negative Glimmlicht besteht, sinkt die Durchschlagspannung. In den übrigen Quadranten ist das Verhalten von der Büschelentladung geprägt, die ab der Einsatzspannung eine kleine Erniedrigung der Durchschlagspannung bringt. Mit dem stumpfen Elektrodenabschluss tritt bei den negativen Stoßspannungen bei kleinen Abständen ($a \leq 50$ cm) ein ausgeprägtes Übergangsgebiet auf [5]. Der positive Gleichspannungsdurchschlag erfolgt mit dieser Elektrodenform aus der Glimmentladung. Man erkennt wieder diese Spannungsabsenkung im Bereich der positiven Gleichspannung. Infolge der stabileren Glimmentladung ist die notwendige Amplitude der Stoßspannung zur Zerstörung der Glimmschicht höher. Im 4. Quadranten wird die Absenkung der Durchschlagspannung durch die entstehende Schaltstoßspannung hervorgerufen, wie die Durchschlagzeiten von einigen 100 µs bestätigen.

Für die negativen Stab–Platte-Funkenstrecken wurde mit Stoßspannungsbeanspruchung 1,2|50 ein Übergangsgebiet beobachtet, dessen physikalische Ursache auf die Ausbildung der Vorentladung an der stumpfen Elektrode zurückgeführt wurde [5]. Durch die Gleichspannung mit überlagerter Stossspannung wird dieses Übergangsgebiet bestätigt. Während mit positiver Gleichspannung ab etwa 125 kV die Glimmentladung zerstört wird und damit niedrigere Durchschlagspannungen auftreten, wird mit der Überlagerung von negativen Spannungen die diffuse Glimmbüschelentladung durch die negative Gleichspannung bevorzugt.

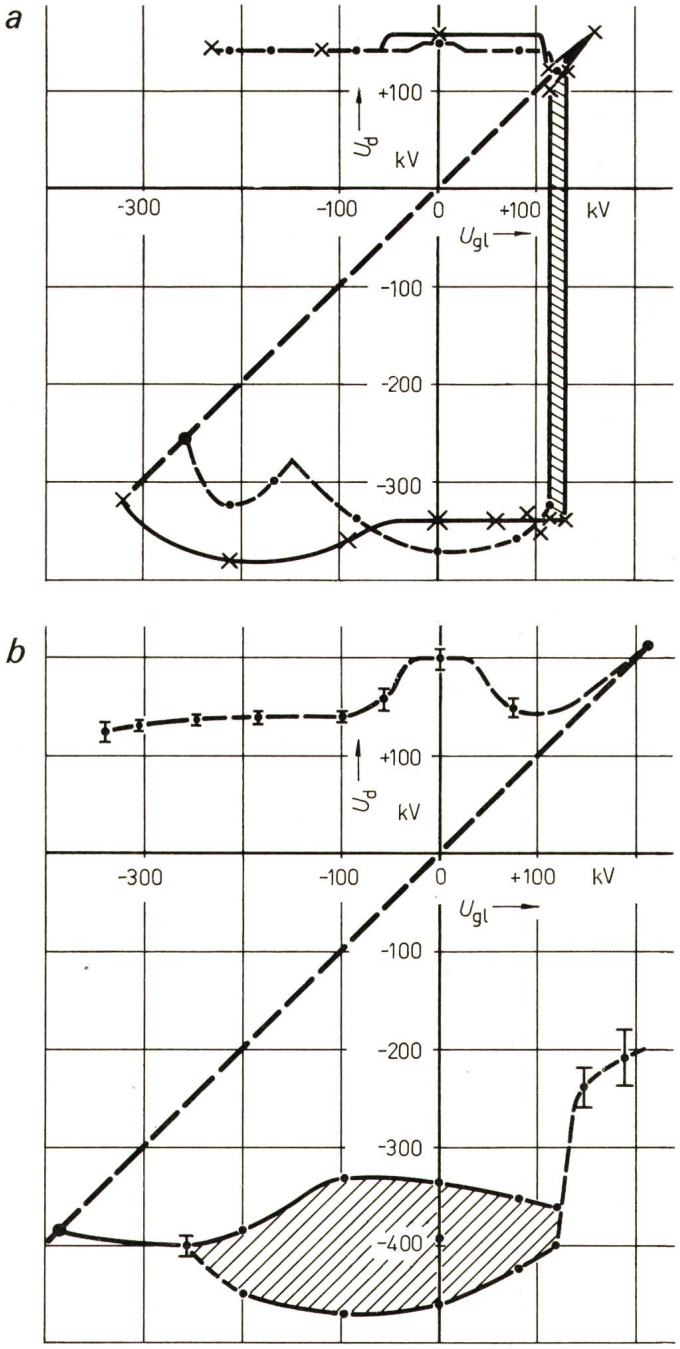


Fig. 8
Durchschlagspannung einer 25-cm-Stab–Platte-Funkenstrecke bei Überlagerung von Gleich- und Stoßspannung 1,2 | 50
$\varphi_a \approx 7...11$ g/m³; Parameter : Elektrodenabschluss
a Elektrodenabschluss: 2-cm-Halbkugel (×); 30⁰-Spitze (•)
b Elektrodenabschluss: stumpf
Bezeichnungen siehe Fig. 4

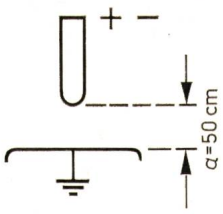
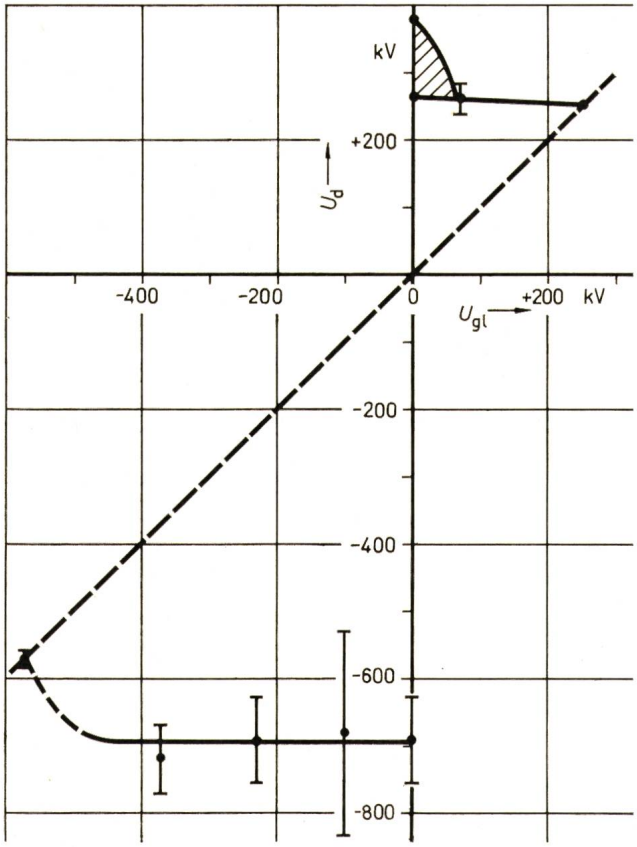


Fig. 9
Durchschlagspannung einer Stab–Platte-Funkenstrecke bei Überlagerung von Gleich- und Stoßspannung 60|525
$\varphi_a \approx 10...11$ g/m³; Elektrodenabschluss: 2-cm-Halbkugel
Bezeichnungen siehe Fig. 4



Für die positiven Stoßspannungen tritt mit dem Einsetzen der Vorentladung durch die Gleichspannung eine Spannungsabsenkung ein.

Vergleicht man die drei Elektrodenformen, so wird der Einfluss der verschiedenen Vorentladungen noch deutlicher.

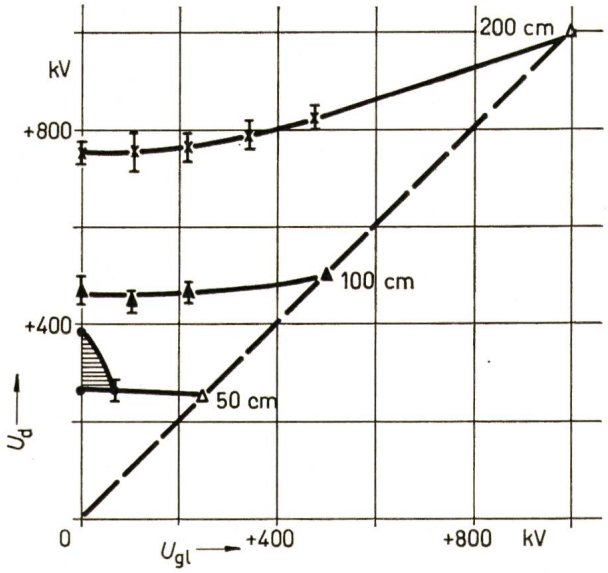


Fig. 10
Durchschlagspannung von Stab–Platte-Funkenstrecken bei Überlagerung von Gleich- und Stoßspannung 60|525
$\varphi_a \approx 7...11$ g/m³; Parameter: Elektrodenabstand
Bezeichnungen siehe Fig. 4

Im Falle gleichen Vorentladungsverhalten sind die Durchschlagspannungen vergleichbar.

Einfluss der Impulsform der Stoßspannung

Neben der Blitzstoßspannung 1,2|50 treten in Energieverteilungsanlagen auch Überspannungen mit Stirnzeiten von 50...200 µs auf. Diese sog. Schaltstoßspannungen haben ein Minimum der Durchschlagspannung zur Folge.

Bei positiver Polarität der Schaltstoßspannung 60|525 tritt für die Stab–Platte-Funkenstrecke mit dem 2-cm-Halbkugel-Elektrodenabschluss bis zu einem Abstand von 1 m ein aus-

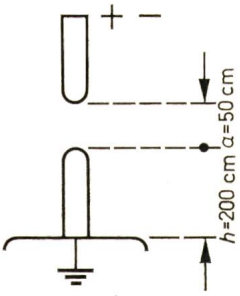
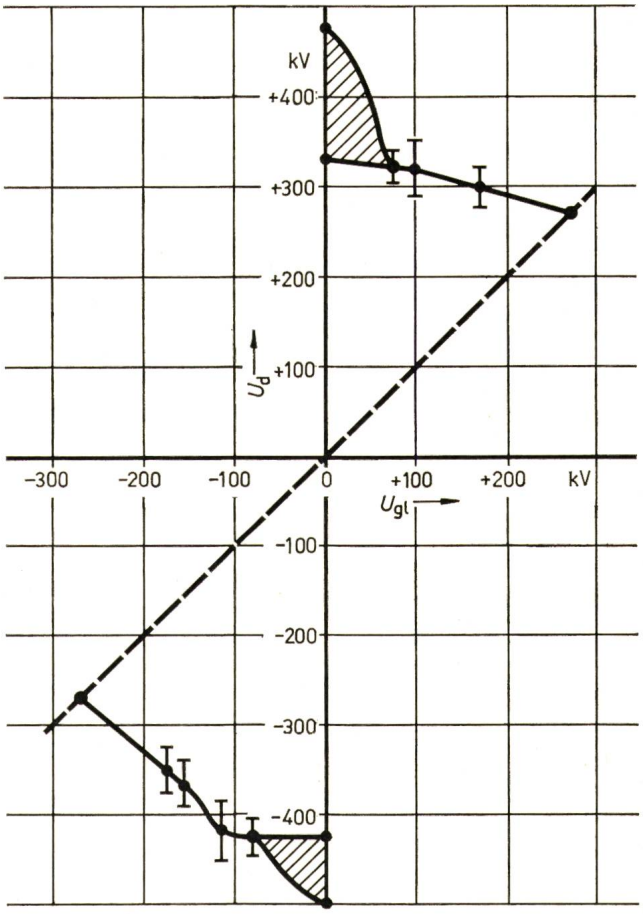


Fig. 11
Durchschlagspannung einer Stab–Stab-Funkenstrecke bei Überlagerung von Gleich- und Stoßspannung 60|525
$\varphi_a \approx 7...10$ g/m³; Elektrodenabschluss: 2-cm-Halbkugel
Bezeichnungen siehe Fig. 4



geprägtes Übergangsgebiet auf [8]. Neben dem Durchschlag aus der Leuchtfadenentladung ist auch der Durchschlag aus der Leaderentladung möglich. Diese Leaderentladung ist für die niedrige Festigkeit von Luftfunkenstrecken gegenüber Schaltstoßspannungen verantwortlich. Durch die Überlagerung einer Gleichspannung tritt ab der Einsatzspannung der Gleichspannung nur noch die Leaderentladung auf, weswegen in Fig. 9 die niedrigere Festigkeit der Mischverteilung mit der Überlagerungsschaltung erhalten wird. Dies ist physikalisch verständlich, da die durch die Gleichspannung hervorgerufene Leuchtfadenentladung bereits der erste Ansatz des Leaders ist.

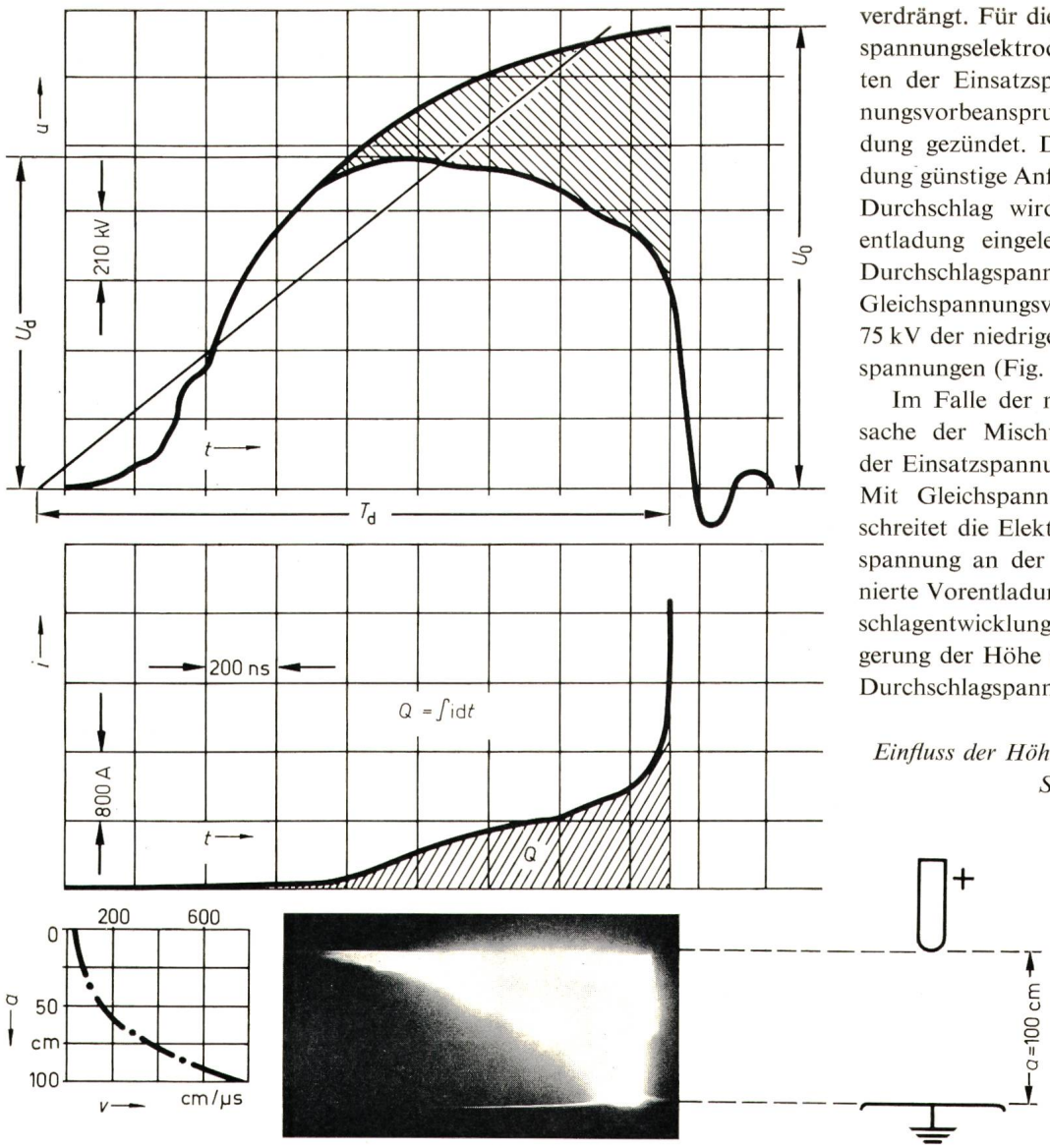


Fig. 12

Spannungsverlauf, Stromverlauf und Entladungserscheinung einer 100 cm Stab–Platte-Funkenstrecke im Bereich der Stosskennlinie

Auswertung der für die Beanspruchung charakteristischen Grössen

a Schlagweite; T_d Durchschlagzeit; *t* Zeit; U_d Durchschlagspannung; U_0 Leerlaufspannung; *u* Spannung; *v* Geschwindigkeit

Für das Entstehen der Leaderentladung bestehen damit günstige Ionisierungsbedingungen.

Für die grösseren Abstände erkennt man (Fig. 10), dass durch die Gleichspannung die Feldverhältnisse verbessert werden und die Festigkeit der Funkenstrecke dadurch ansteigt.

Mit negativer Polarität der Hochspannungselektrode ist kein grosser Einfluss zu erwarten, da für die grösseren Abstände ($a > 50$ cm) die Spannungs-Schlagweite-Kennlinien ebenfalls keinen wesentlichen Einfluss von der Spannungsform zeigen. Ein Einfluss der Höhe der Gleichspannung ist bis 400 kV nicht zu beobachten (Fig. 9). Der Gleichspannungsdurchschlag liegt etwa 17 % tiefer.

Die Stab–Stab-Funkenstrecken besitzen bei der untersuchten Schlagweite von 50 cm bei Schaltspannungsbeanspruchung ausgeprägte Übergangsgebiete [8]. Durch die Vorbeanspruchung mit einer Gleichspannung entstehen in der Gasstrecke definierte Vorentladungsbedingungen. Die Mischverteilung in der Durchschlagwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Durchschlagspannung bei Schaltstoßspannungen wird bei Überlagerung der Spannungen von einer Normalverteilung verdrängt. Für die positive Polarität der Hochspannungselektrode wird durch das Überschreiten der Einsatzspannung mit der Gleichspannungsvorbeanspruchung die Stromfadenentladung gezündet. Damit findet die Leaderentladung günstige Anfangsbedingungen vor und der Durchschlag wird immer durch die Leaderentladung eingeleitet. Deshalb entspricht die Durchschlagspannung mit einer positiven Gleichspannungsvorbeanspruchung ab etwa 75 kV der niedrigeren Festigkeit bei Schaltstoßspannungen (Fig. 11).

Im Falle der negativen Polarität ist die Ursache der Mischverteilung das Überschreiten der Einsatzspannung der erdseitigen Elektrode. Mit Gleichspannungsvorbeanspruchung überschreitet die Elektrodenanordnung die Einsatzspannung an der Anode immer, so dass definierte Vorentladungsverhältnisse für die Durchschlagentwicklung bestehen. Bei weiterer Steigerung der Höhe der Gleichspannung sinkt die Durchschlagspannung etwa linear ab (Fig. 11).

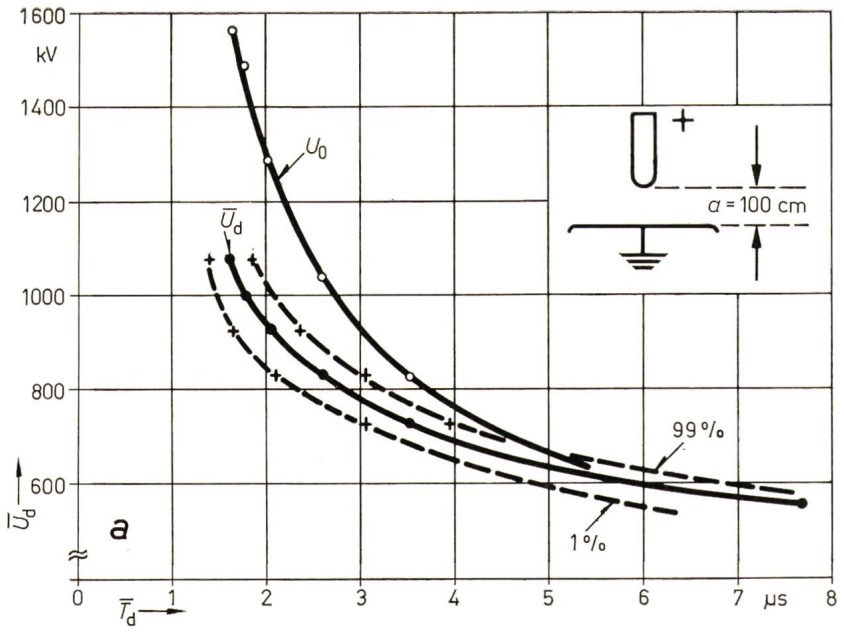
Einfluss der Höhe der Gleichspannung auf die Stosskennlinie

Neben der Verteilungskurve von 0...100 % Durchschlagwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Durchschlagspannung interessiert für eine einwandfreie Isolationskoordination auch das Verhalten von Isolieranordnungen bei überschiessenden Stoßspannungen. Der Zusammenhang zwischen der Durchschlag-Stoßspannung und der Durchschlagzeit wird durch die Stosskennlinien (Definition siehe [15]) dargestellt. Im folgenden wird der Einfluss einer Gleichspannung auf die Stosskennlinien von Luftfunkenstrecken mit inhomogenem Feld bei grösseren Schlagweiten untersucht.

Charakteristische Kennwerte

Mit dem früher beschriebenen Versuchsaufbau wird einer bestimmten Gleichspannung eine Blitzstoßspannung 1,2|50 überlagert. Dabei zeigt sich, dass bei Funkenstrecken mit inhomogenem Feld im Bereich der Stosskennlinie ein erheblicher Vorentladungsstrom den Durchschlag vorbereitet. Es ergeben sich damit erhebliche Schwierigkeiten bei der Auswertung der Ergebnisse, da die Spannungsform durch den Vorentladungsstrom, infolge des Spannungsabfalls am Innenwiderstand der Spannungsquelle, beeinflusst wird.

Anhand von Fig. 12 sollen die charakteristischen Kennwerte erläutert werden. Mit Hilfe dieser Kennwerte ist eine Interpretation der Versuchsergebnisse möglich. Man erkennt aus Fig. 12, dass für die eindeutige Kennzeichnung des Experiments, neben der Durchschlagspannung U_d und der Durchschlagzeit T_d, die zusammen die Durchschlagkennlinie



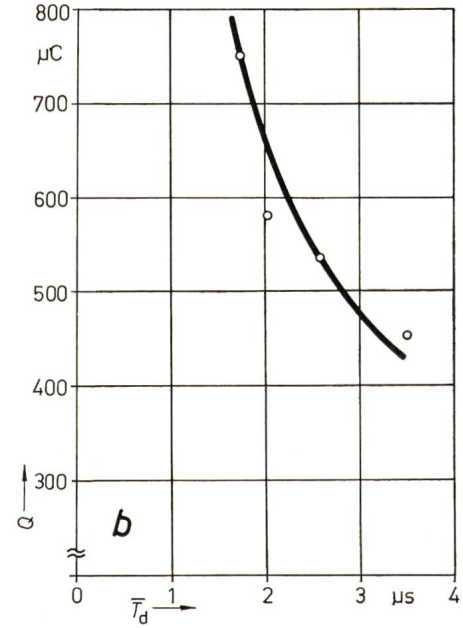


Fig. 13
Stosskennlinie, Leerlaufkennlinie und Ladungskennlinie einer positiven 100-cm Stab–Platte-Funkenstrecke in Abhängigkeit von der Durchschlagzeit
a Stosskennlinie und Leerlaufkennlinie; *b* Ladungskennlinie; *Q* Ladung; U_0 Leerlaufspannung; U_d Durchschlagspannung; T_d Durchschlagzeit

(Stosskennlinie) bilden, auch die Leerlaufspannung U_0 und die durch die Vorentladung in die Funkenstrecke eingebrachte Ladung $Q = \int i \, dt$ erfasst werden müssen. Der Innenwiderstand der Spannungsquelle bedingt einen Spannungsverlauf am Prüfling, der infolge des Vorentladungsstromes von einigen 100 A um einige 100 kV von der ideellen Leerlaufspannung, d. h. der Spannung ohne Prüfling, abweicht. Aus den Oszillogrammen wurde deshalb die Durchschlagspannung, die Durchschlagzeit und die Leerlaufspannung im Durchschlagmoment mit Hilfe eines genormten Oszillogrammes ausgewertet. Als Durchschlagmoment wurde der plötzliche rasche Spannungszusammenbruch gewählt. Die zugehörige Bildwandleraufnahme (Fig. 12) zeigt, dass in diesem Moment die Schlagweite durch den leitfähigen Kanal überbrückt wird. Ausserdem steigt der Strom in diesem Moment zum Kurzschlußstrom an. Die Ladung wurde aus dem Stromverlauf integriert.

Eine Schwierigkeit bei der Auswertung der Durchschlagzeit ist die Wanderung des Zeitnullpunktes [16]. Aus diesem Grund wurde die charakteristische Schwingung in der Stirn der Stoßspannung für die Eichung des Zeitnullpunktes verwendet. Alle Zeiten werden von dieser Schwingung aus ausgewertet und durch die Addition eines konstanten Betrages auf den Zeitnullpunkt umgerechnet. Jeder Punkt der Stosskennlinie ist aus mindestens 10 Spannungsbeanspruchungen nach statistischen Methoden ermittelt.

Einfluss einer Gleichspannung auf die Stosskennlinie

In Fig. 13 ist die Stosskennlinie, die Leerlaufkennlinie und die Ladungskennlinie der 100 cm Stab–Platte-Funkenstrecke bei positiver Blitzstoßspannung in Abhängigkeit von der Durchschlagzeit wiedergegeben. Bei Durchschlagzeiten unter 6 μs erfolgt durch den Vorentladungsstrom eine Absenkung der Leerlaufspannung, so dass Leerlaufspannung und Durchschlagspannung abweichen. Man erkennt aus Fig. 13 deutlich, dass die für das Vorschieben und Aufheizen des Durchschlagkanals einzubringende Ladung mit kleiner werdender Durchschlagzeit erheblich zunimmt. Dies ist verständlich, da sich mehrere Kanäle gleichzeitig entwickeln. Bei einer Durchschlagzeit von 2 μs ermittelt sich eine Vorstromladung von etwa 650 μC. Die Durchschlagspannung beträgt ca. 940 kV.

Vorentladungsströme von einigen 100 A wurden auch bei Steilstoßspannungsbeanspruchung (0,03|43 μs) von Luftfunkenstrecken beobachtet [17]. Auch in diesen Fällen muss eine Vorstromladung von einigen 100 μC in die Funkenstrecke eingebracht werden.

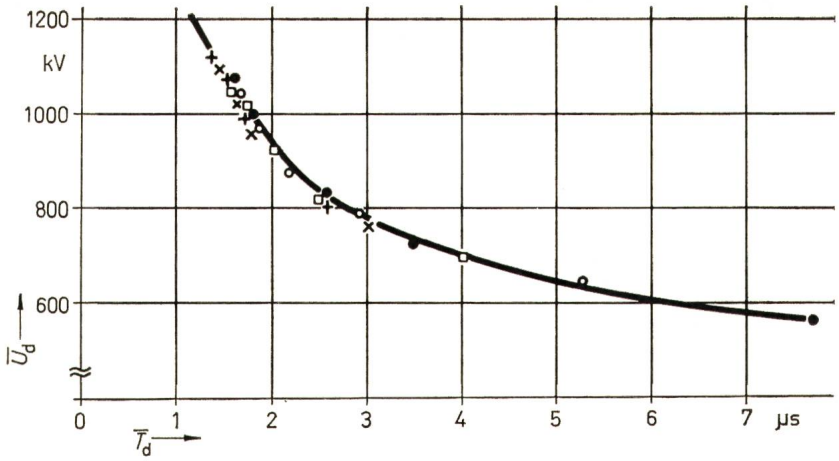
Wird die Funkenstrecke durch eine Gleichspannung vorbeansprucht und dieser Gleichspannung eine Blitzstoßspannung überlagert, so erkennt man aus Fig. 14, dass die Durchschlagspannung dieser 100 cm Stab–Platte-Funkenstrecke durch die Gleichspannungsvorbeanspruchung praktisch nicht beeinflusst wird, obwohl mit einer Gleichspannung von 400 kV bereits erhebliche Vorentladungen (Stielbüschelentladung) auftreten. Beeinflusst wird dagegen die Leerlaufspannung (Fig. 15) und damit die Ladungskennlinie. Mit der Gleichspannung von 400 kV wird ein bestimmter Ladungsbedarf bereits gedeckt. Diese Abhängigkeit weist auch darauf hin, dass zum Durchschlag einer Funkenstrecke mit inhomogenem Feld eine bestimmte Ladung notwendig ist. Ein Einfluss auf die Durchschlagspannung durch die Vorbeanspruchung kann nur dann erwartet werden, wenn die Änderung der Impulsform der Stoßspannung durch den Spannungsabfall am Innenwiderstand einen Einfluss auf den Durchschlagvorgang nimmt, da ja bekanntlich die Spannungsform unter bestimmten Voraussetzungen einen Einfluss auf die Durchschlagspannung ausübt [18].

Auch im Falle der 100 cm Stab–Stab-Funkenstrecke wird für beide Polaritäten der Stoßspannung die Durchschlagspannung nicht wesentlich durch die Höhe der Gleichspannung beeinflusst (Fig. 16a und b). Eine geringfügige Abnahme der Festigkeit mit steigender Gleichspannung wird durch die Symmetrierung der Funkenstrecke durch die Vorentladungen bei Gleichspannung bedingt. Bekanntlich hat eine Stab–Stab-Funkenstrecke mit Gleichspannung bei beiden Polaritäten etwa die gleiche Durchschlagspannung wie eine positive Stab–Platte-Funkenstrecke.

Fig. 14
Einfluss der Höhe der Gleichspannung auf die Stosskennlinie der positiven 100-cm Stab–Platte-Funkenstrecke

● Gleichspannung 0 kV
○ Gleichspannung 117,5 kV
□ Gleichspannung 210 kV
x Gleichspannung 330 kV
+ Gleichspannung 400 kV

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 13



In Fig. 17 ist für eine negative Stab–Platte-Funkenstrecke der Einfluss der Höhe der Gleichspannung auf die Stosskennlinie wiedergegeben. Die Durchschlagspannung wird durch die Vorbeanspruchung auch in diesem Fall praktisch nicht beeinflusst. Beeinflusst wird dagegen wiederum die Leerlaufkennlinie, da die Vorstromladung für diese Funkenstrecke ebenfalls einige 100 µC beträgt. Ein Teil dieser Ladung kann durch die Gleichspannung eingebracht werden.

Der Ladungsbedarf beim Durchschlag einer Stab–Stab-Funkenstrecke ist bei konstanter Schlagweite nur etwa halb so gross wie bei einer Stab–Platte-Funkenstrecke (Fig. 18). Ein Polaritätseinfluss ist weder für die Stab–Platte- noch für die Stab–Stab-Funkenstrecke feststellbar.

Praktische Folgerungen

Für den Nachweis der Stossfestigkeit eines Gerätes wird das elektrische Betriebsmittel einer reinen Stossprüfung unterzogen. Die Messungen zeigen, dass bei Luftfunkenstrecken die Festigkeit durch die Vorbeanspruchung mit der Gleichspannung beeinflusst werden kann. Da im praktischen Betrieb die Überspannung immer der Gleichspannung überlagert sein wird, ist zu prüfen, inwieweit eine reine Stoßspannungsprüfung die Kennwerte einer Isolierstrecke richtig zu beschreiben vermag. Es zeigt sich, dass die Durchschlagspannung von Luftfunkenstrecken mit inhomogenem Feld wesentlich beeinflusst werden kann, wenn durch die Gleichspannung eine Glimmentladung aufgebaut wird. Bei impulsförmigen Vorentladungen wird die Durchschlagspannung nicht entscheidend verändert.

Für eine gesicherte Dimensionierung der Anlagenteile ist die Kenntnis der Festigkeit aller Isolierstrecken gegenüber den möglichen Spannungsbeanspruchungen abzuschätzen. Isolierstrecken in Öl werden bei kombinierten Spannungsbeanspruchungen merklich durch die Vorbeanspruchung beeinflusst [19]. Dies kann zur Folge haben, dass eine reine Stossspannungsbeanspruchung ohne Schwierigkeiten von einer Isolieranordnung gehalten wird; im Betrieb dagegen durch eine geringere Überspannung ein Durchschlag eintritt. Im Falle einer Schutzfunkenstrecke, z. B. an einem Transformator, kann durch die Vorbeanspruchung die Durchschlagspannung der inneren Isolation, z. B. in Öl, unter dem Wert der Durchschlagspannung der Pegelfunkenstrecke liegen [19].

Wie die Ergebnisse weiter zeigen, kann eine Luftfunkenstrecke mit inhomogenem Feld eine wirksame Spannungsabsenkung hervorrufen. Da bei kürzeren Durchschlagzeiten die Vorströme erheblich zunehmen, wird eine Pegelfunkenstrecke besonders bei steilen Spannungsbeanspruchungen, z. B. bei Naheinschlägen von Blitzentladungen, eine Spannungsabsenkung der einziehenden Überspannung am zu schützenden Anlagenteil bewirken [17].

Für die Untersuchung und Prüfung von Isolieranordnungen in Luft mit inhomogenem Feld bewirkt die für den Durchschlag notwendige Vorstromladung von einigen 100 µC/m, dass der Innenwiderstand der Spannungsquelle die Durchschlagspannung beeinflussen kann. Hierbei ist auch der Einfluss auf den Durchschlagvorgang durch die Änderung der Spannungsform am Prüfling infolge des Vorentladungsstromes zu beachten.

Zusammenfassung

Für die Überlagerung von Gleichspannung mit unipolaren Überspannungen ist zusammenfassend folgendes festzuhalten:

1. Eine durch die Gleichspannung aufgebaute Glimmentladung wird durch eine überlagerte Stoßspannung zerstört. Reicht die Höhe der Gleichspannung für einen Stielbüscheldurchschlag aus (5 kV/cm bei Normalbedingungen), folgt der impulsförmigen Spannungsbeanspruchung der Durchschlag, wobei die Höhe der Stoßspannung für den Durchschlagvorgang nicht entscheidend ist. Die gemessenen Durchschlagzeiten von einigen 100 µs deuten an, dass der Durchschlag durch die positiven Ionen eingeleitet wird.

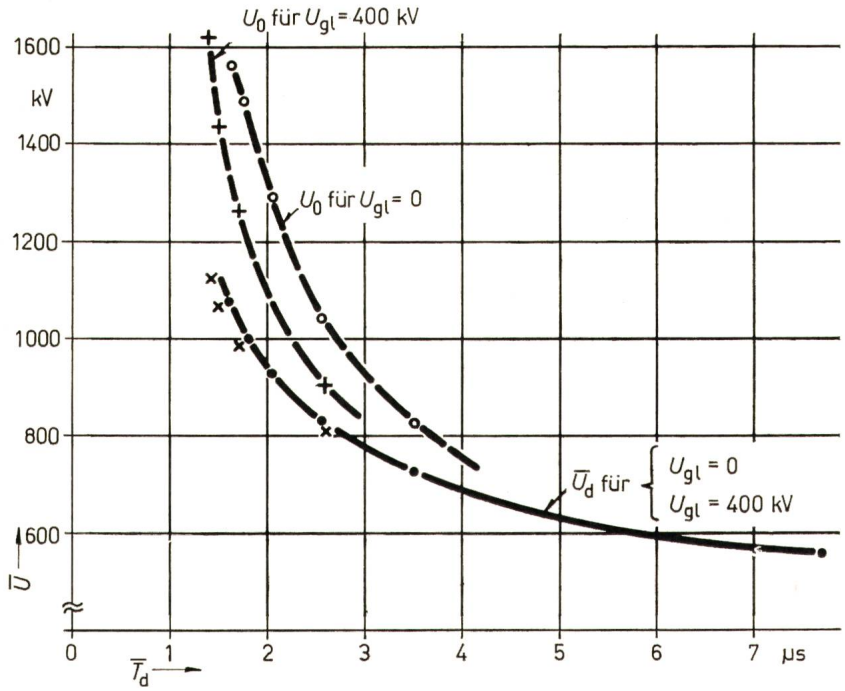


Fig. 15
Einfluss der Höhe der Gleichspannung auf die Leerlaufkennlinie der positiven 100-cm Stab–Platte-Funkenstrecke

$\overline{U}$ Spannung

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 12

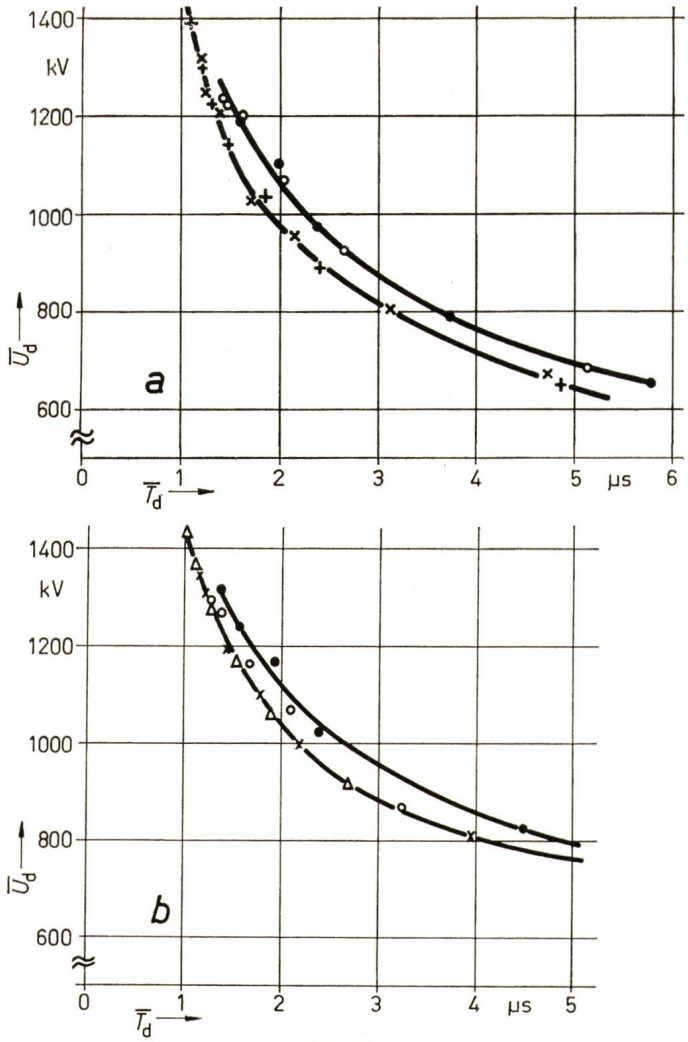


Fig. 16

Einfluss der Höhe der Gleichspannung auf die Stosskennlinie der 100-cm Stab–Stab-Funkenstrecken

a positive Spannung

● U_{gl} = 0 kV x U_{gl} = 274 kV
o U_{gl} = 138 kV + U_{gl} = 396 kV

b negative Spannung

● U_{gl} = 0 kV x U_{gl} = 244 kV
o U_{gl} = 102 kV Δ U_{gl} = 393 kV

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 13

2. Für die impulsförmigen Vorentladungen ist für die Stab–Platte-Funkenstrecke der Einfluss der Vorbeanspruchung auf die Durchschlagspannung vernachlässigbar. Für die Stab–Stab-Funkenstrecke ist ab der Einsatzspannung eine Spannungsabsenkung zu beachten.

3. Für gleiche Vorentladungsbedingungen ist kein Einfluss der Elektrodenform auf die Durchschlagspannung feststellbar.

4. Durch die definierten Vorentladungsbedingungen bei Gleichspannungsvorbeanspruchung treten keine Mischverteilungen in der Durchschlagwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Durchschlagspannung auf.

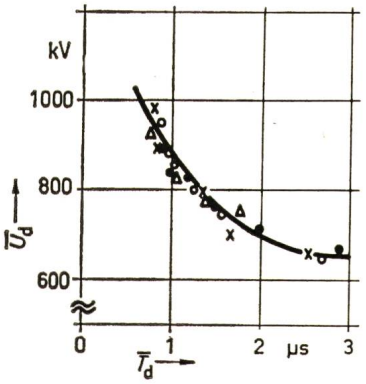


Fig. 17

Einfluss der Höhe der Gleichspannung auf die Stosskennlinie der negativen 50-cm Stab–Platte-Funkenstrecke

● U_{gl} = 0 kV
o U_{gl} = 119 kV
x U_{gl} = 252 kV
Δ U_{gl} = 374 kV

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 13

5. Die Stosskennlinie wird durch die Vorbeanspruchung mit einer Gleichspannung praktisch nicht beeinflusst, obwohl Vorstromladungen von einigen 100 μC/m in die Funkenstrecke vor dem Durchschlag eingebracht werden müssen. Die Leerlaufspannung wird dagegen erheblich beeinflusst.

Schlussbemerkung

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Universität München. Der Verfasser dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die grosszügige Unterstützung.

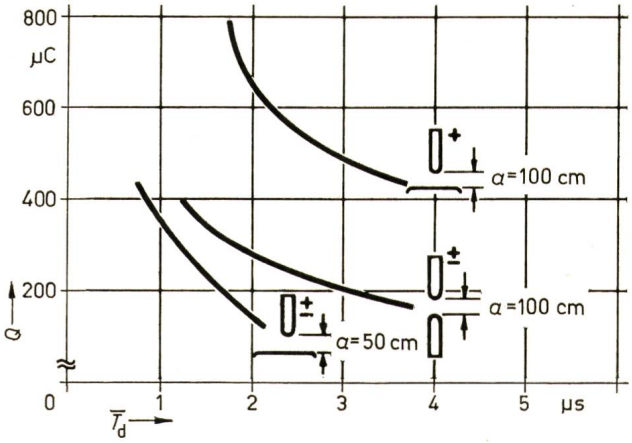


Fig. 18

Ladungskennlinien in Abhängigkeit von der Durchschlagzeit

Parameter: Anordnung

Bezeichnungen siehe Fig. 13

Literatur

[1] *W. Rasquin:* Der Einfluss sprunghafter Spannungsänderungen auf das Durchschlagverhalten von Luft bei Elektrodenanordnungen mit inhomogener Feldverteilung. ETZ–A 88(1967)3, S. 74...79.

[2] *W. Rasquin:* Einfluss von Vorbeanspruchungen auf die Durchschlag-Stoßspannungen von Elektroden-Anordnungen in Luft. ETZ–A 90(1969)17, S. 415...420.

[3] *H. Prinz:* Feuer, Blitz und Funke. München, Bruckmann, 1965.

[4] *W. Zaengl:* Ein neuer Teiler für steile Stoßspannungen. Bull. SEV 56(1965)7, S. 232...240.

[5] *K. Feser:* Inhomogene Luftfunkenstrecken bei verschiedener Spannungsbeanspruchung. Dissertation, Technische Hochschule, München 1970.

[6] *T. Suzuki* a. o.: Parallel multigap flashover probability. Trans. IEEE PAS 88(1969)12, p. 1814...1823.

[7] *K. Feser:* Über das Durchschlagverhalten der negativen Stab-Stab-Funkenstrecke mit Stoßspannungen 1,2/50. ETZ–A 91(1970)6, S. 321...325.

[8] *K. Feser:* Inhomogene Funkenstrecken in Luft bei Beanspruchung mit Schaltstoßspannungen. Bull. SEV 61(1970)16, S. 711...719.

[9] Erzeugung und Messung von Hochspannungen. Teil I: Bestimmungen für die Erzeugung und Anwendung von Wechsel- und Gleichspannungen für Prüfzwecke. VDE Vorschrift 0433 Teil 1/1.66

[10] *K. Feser:* Über den Gleichspannungsdurchschlag inhomogener Luftfunkenstrecken grosser Schlagweite. Ztschr. Angewandte Physik 29(1970)1, S. 56...60.

[11] *G. Jaumann:* Einfluss rascher Potentialänderungen auf den Entladungsvorgang. Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-naturwissenschaftliche Classe, Abtheilung IIa 97(1888)–, S. 765...805.

[12] *M. Toepler:* Grenzspannungen und Funkenspannungen bei symmetrischer Versuchsanordnung für Gleichspannung und für kurzdauernde Spannungsstösse mit vollbekanntem zeitlichen Verlaufe. Arch. Elektrotechn. 17(1926)4, S. 389...412.

[13] *W. Deutsch:* Über den Einfluss hochfrequenter Schwingungen auf die positive Spitzenentladung. Annalen der Physik 5/26(1936)3, S. 193...218.

[14] *J. Holtz:* Digitalrechnerprogramm zur Nachbildung einer Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung. ETZ-A 90(1969)9, S. 195...199.

[15] Erzeugung und Messung von Hochspannungen. Teil 3: Bestimmungen für die Erzeugung und Anwendung von Stoßspannungen und Stoßströmen für Prüfzwecke. VDE Vorschrift 0433 Teil 3/4.66.

[16] *F. Heilbronner* und *M. G. Kratzenstein:* Zur Definition der Stosskennlinie bei Durchschlägen in der Stirn der Stoßspannungen. ETZ–A 90(1969)23, S. 607...609.

[17] *J. Wiesinger:* Funkenstrecken unter Steilstoßspannungen und ihre Bedeutung für die Isolationskoordination. Bull. SEV 60(1969)15, S. 672...682.

[18] *J. Wiesinger:* Funkenstrecken unter Blitz- und Schaltstoßspannungen. ETZ-A 90(1969)17, S. 407...411.

[19] *K. Feser* und *M. G. Kratzenstein:* Das Durchschlagverhalten einer Stab-Stab-Funkenstrecke in Isolieröl bei Mischspannungen. ETZ-A 90(1969)24, S. 623...628.

Adresse des Autors:

Dr.-Ing. *K. Feser,* Emil Haefely & Cie. AG, Postfach, 4052 Basel 28.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Elektrische Energie-Technik und -Erzeugung
Technique et production de l'énergie

Spaniens Elektrizitätsversorgung

621.31(46) 14.1.71

1970 war es das 25. Mal, dass die Unidad Eléctrica SA (UNESA), der die 26 führenden Versorgungsunternehmen Spaniens angehören, ihre ausgezeichnet redigierte Memoria Estadística Eléctrica herausgebracht hat, die einen guten Einblick in den derzeitigen Stand und die zukünftige Entwicklung der spanischen Elektrizitätsversorgung vermittelt. Wie daraus hervorgeht, hat sich der Stromkonsum gegenüber dem Vorjahr mit einer Zuwachsrate von 13,6 % erfolgreich weiterentwickelt, so dass im Jahre 1969 insgesamt 52 Mrd. kWh — entsprechend einer Prokopfquote von 1250 kWh — bereitgestellt werden mussten. Davon sind nahezu 60 % aus hydraulischer Energie und der Rest aus thermischer Energie erzeugt worden, mit einem allerdings noch unbedeutenden Anteil von 1,6 %, der aus dem seit Ende 1968 in Betrieb befindlichen ersten Kernkraftwerk José Cabrera (Fig. 1) zugespeist wurde. Rund 30 % der allspanischen Stromerzeugung sind auf der Ebene interprovinzialer Lastverschiebungen und rund 5 % im internationalen Stromclearing, vorzugsweise mit Frankreich, abgewickelt worden.

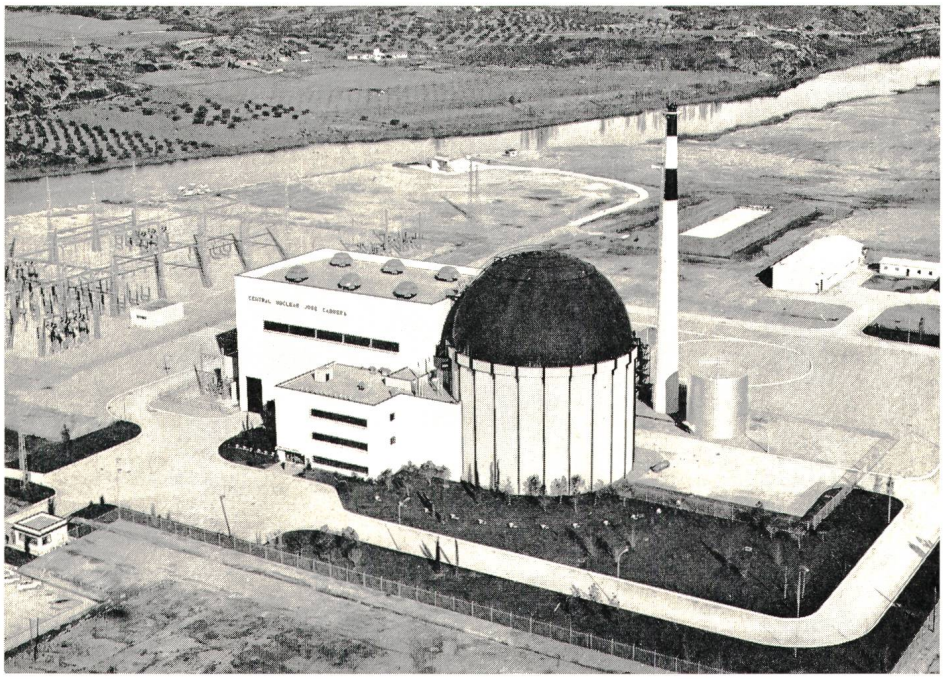


Fig. 1
160-MW-Kernkraftwerk José Cabrera mit Druckwasserreaktor

Es ist klar, dass sich der wachsende Stromverbrauch vor allem in der Bereitstellung neuer Kraftwerkleistung dokumentiert hat: So ist auf der hydraulischen Seite der erste Maschinensatz des vorerst grössten Wasserkraftwerkes Alcántara mit rund 1200 MW nahe der portugiesischen Grenze fertiggestellt worden (Fig. 2). Auf der thermischen Seite wurde der erste 377-MW-Turbosatz des im Norden gelegenen Kraftwerkes Santurce in Betrieb gesetzt (Fig. 3). Die gesamte Kraftwerkleistung des Jahres 1969 ist mit 15 660 MW ausgewiesen, woraus sich eine mittlere Jahresbenutzungsdauer von 3300 h ergibt.

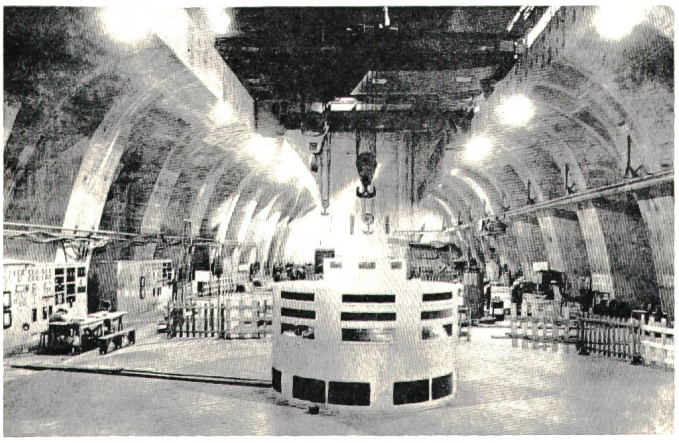


Fig. 2
Maschinenhaus Alcántara mit 4 Maschinensätzen zu je 289 MW

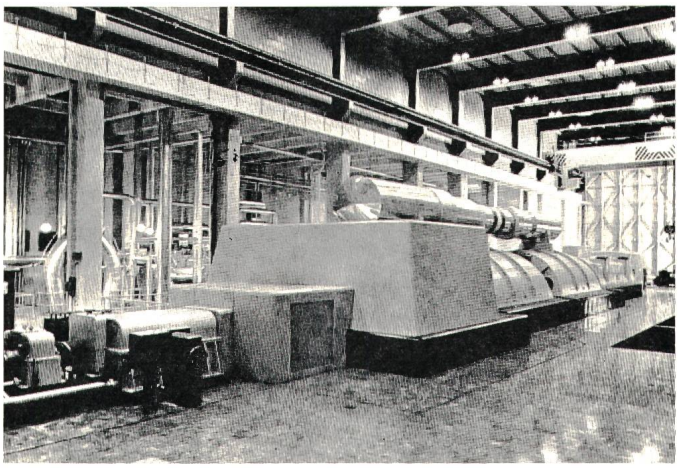


Fig. 3
377-MW-Turbosatz des Kraftwerkes Santurce

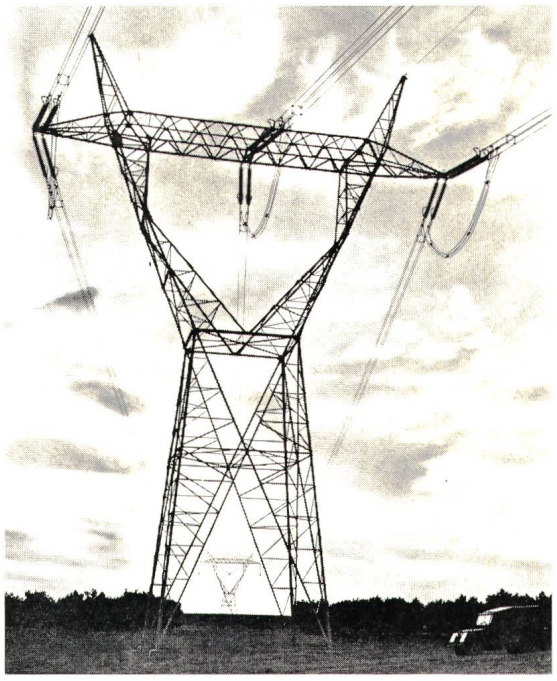


Fig. 4
380-kV-Abspannmast mit Viererbündel

Ohne Zweifel werden in den nächsten Jahren erhebliche Anstrengungen erforderlich sein, um die für das Jahr 1981 prognostizierte Kraftwerkleistung von 39 000 MW zu erreichen. Zu diesem Zeitpunkt wird angenommen, dass 43 % der Gesamtleistung auf hydraulische Energie, 35 % auf thermische Energie und 22 % auf Kernenergie entfallen werden. Im Zuge wachsender Netzleistung wird auch die Einheitenleistung grösser werden müssen, was für das im Bau befindliche Ölkraftwerk Castellón mit 2 Turbosätzen von je 500 MW bereits zutrifft. Zugleich ist aber auch erkannt worden, dass die Versorgungssicherheit eines grossen Netzverbandes in nicht unerheblichem Masse von der zur Verfügung stehenden Pumpspeicherreserve abhängig ist. Mit zu den interessantesten Anlagen dieser Art gehört die am Rio Tormes gelegene Pumpspeicherkaverne Villarino mit 4 x 135 MW gesamter Erzeugerleistung, die bis Ende dieses Jahres in Betrieb sein soll. Der dazugehörige Speicher mit 2,6 Mrd. m³ Stauraum wird von einer 197 m hohen Bogenmauer mit 3400 m Kronenlänge abgeschlossen, wonach es möglich sein sollte, die vorgesehene Jahresproduktivität von 1,2 Mrd. kWh zu erreichen. Die für 402 m Nutzgefälle ausgelegten Turbinenpumpen werden mit einer besonderen Umschaltautomatik versehen, so dass das Kraftwerk mit seiner vollen Leistung innerhalb von 5 min. von Turbinenbetrieb auf Pumpenbetrieb oder umgekehrt umgesteuert werden kann. Aber auch das 26 000 Streckenkilometer umfassende Hochspannungsnetz wird weiter ausgebaut werden müssen, insbesondere auf der 380-kV-Netzebene, die inzwischen eine Länge von 1600 km erreicht hat (Fig. 4).

Abschliessend sei dem Berichter die Bemerkung gestattet, dass ihm im vergangenen Frühjahr im Verlaufe einer UNIDO-Sondermission die Möglichkeit geboten war, einige Kraftwerkanlagen zu besichtigen, die sowohl in der dargebotenen Technik als auch im Hinblick auf das verwirklichte Gesamtkonzept einen sehr guten Eindruck hinterlassen haben. Es ist zu wünschen, dass dies auch für die Zukunft so bleiben möge — im Sinne einer weiterhin erfolgreichen Versorgung des Landes mit Elektrizität.

Prof. Dr. *H. Prinz*, München

Stand der Arbeiten bei den Zemmkraftwerken der Tauernkraftwerke AG

621.311.21(436)

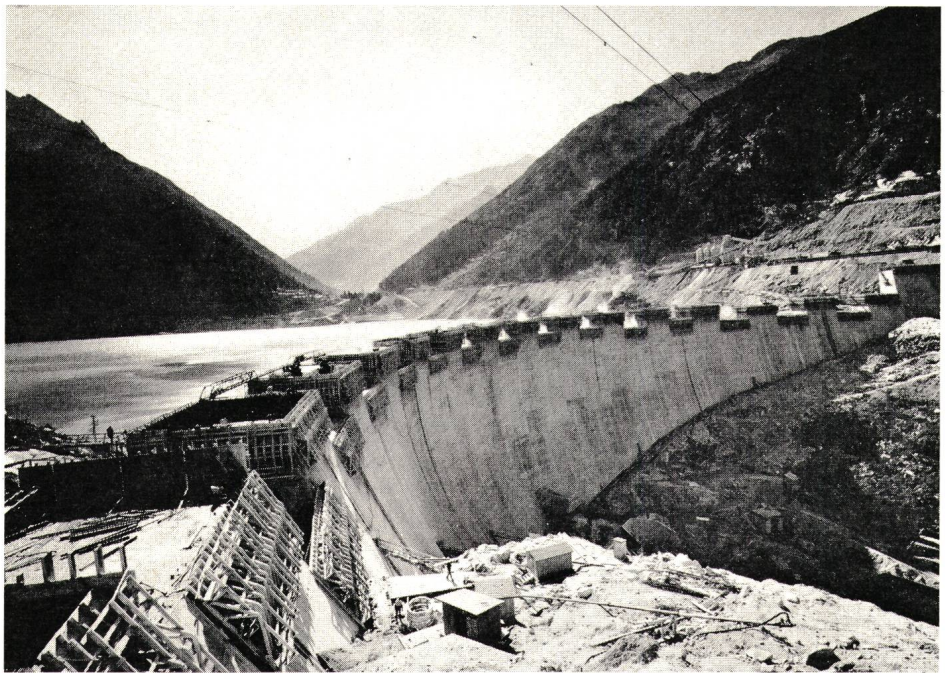


Fig. 1
Schlegeissperre

Die Inbetriebnahme des ersten Maschinensatzes im Kraftwerk Rosshag am 14. Oktober 1970 gibt Anlass, einen kurzen Bericht über den Stand der Arbeiten bei den Zemmkraftwerken zu geben.

Bereits im Juli des vergangenen Jahres wurde im Kraftwerk Mayrhofen die erste Maschine in Betrieb genommen. In der Folgezeit wurden auch die weiteren vier Maschinensätze fertig montiert und haben mit der Stromerzeugung begonnen. Bis Mitte November 1970 wurden aus dem Kraftwerk Mayrhofen mehr als 400 Mill. kWh in das österreichische Verbundnetz geliefert.

Mit der Inbetriebnahme des Kraftwerkes Mayrhofen waren naturgemäss auch alle Anlagen der Unterstufe, nämlich der Stillupspeicher, der Druckstollen, der Druckschacht und die Verteilrohrleitung sowie die 220-kV-Freiluftschaltanlage in Mayrhofen in Betrieb gegangen.

Im kommenden Jahr sollen die Anlagen der Oberstufe mit dem Schlegeisspeicher und dem Kraftwerk Rosshag fertiggestellt werden. In der Schlegeissperre (Fig. 1) sind bis jetzt 820 000 m³ Beton eingebracht worden und bis zur Fertigstellung im nächsten Jahr müssen noch 160 000 m³ verarbeitet werden. Von der Behörde wurde bereits ein Teilstau genehmigt; im Schlegeisspeicher sind derzeit rund 50 Mill. m³ Wasser gestaut, die für die Energieerzeugung im kommenden Winter zur Verfügung stehen.

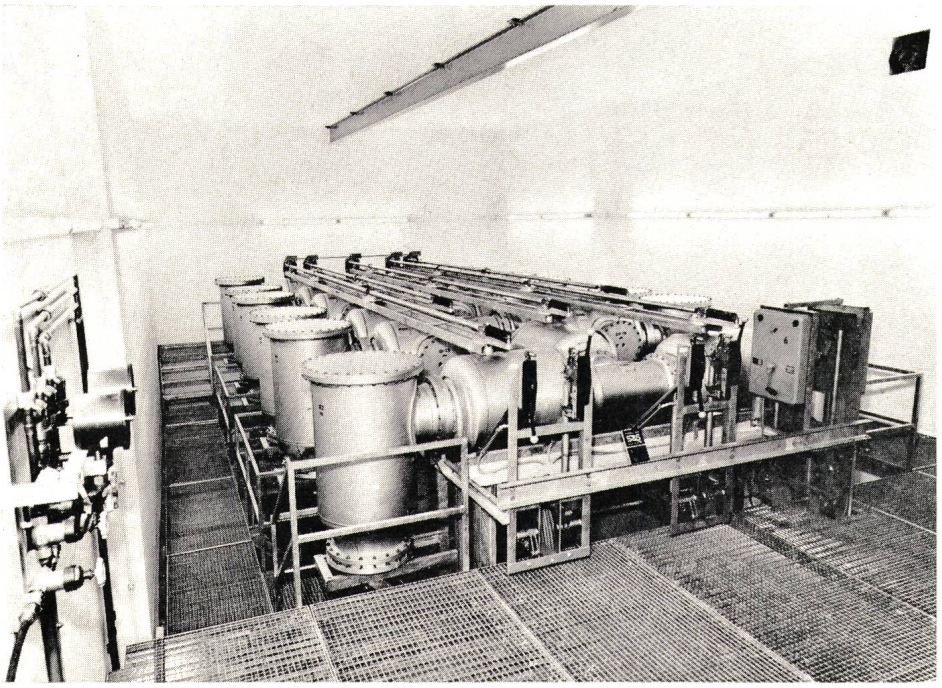


Fig. 2
SF_6-220-kV-Schaltanlage im Maschinenhaus Rosshag der Zemmkraftwerke
5 dreipolige Trennschalter

Mit der Inbetriebnahme des zweiten Maschinensatzes wird spätestens im Januar 1971 gerechnet.

Es soll hier im besonderen auf eine 220-kV-Innenraum-Schaltanlage (SF 6-Anlage) hingewiesen werden (Fig. 2), die, soweit es sich um derart hohe Spannungen handelt, zu den ersten in Europa zählt. Diese Anlage ist mit der Inbetriebnahme des ersten Maschinensatzes unter Spannung gegangen und steht seitdem klaglos in Betrieb.

Bemerkenswert ist die Konstruktion der bei den Maschinensätzen vorgesehenen Francis-Turbinen, die für ein statisches Gefälle von rund 650 m ausgelegt wurden. *F. Nyvelt,* Salzburg

Gezeiten-Versuchskraftwerk in der UdSSR

621.311.21—827(47)

[Nach *L. B. Bernstein:* Das Gezeiten-Versuchskraftwerk Kislogubskaja. ÖZE 23(1970)12, S. 708...712]

Die Ausnützung der Gezeitenenergie an den Küsten des Weissen Meeres lässt eine Produktion von 40 TWh pro Jahr möglich erscheinen. Die harten klimatischen Bedingungen in dieser Gegend erschweren aber die Ausführung solcher Bauvorhaben erheblich. Das erste russische Gezeitenkraftwerk wurde deshalb nach einem unkonventionellen Verfahren erstellt, das sich speziell beim Bau von Unterwassertunneln bewährt hat. Dabei wird das ganze Kraftwerkgebäude samt den technischen Einrichtungen als schwimmfähiger Block ausgebildet, anschliessend mit Schleppschiffen nach der Staustelle befördert und dort abgesenkt. Diese Methode erlaubt es, den grössten Teil der Arbeiten in einem Trockendock unter klimatisch kontrollierbaren Bedingungen auszuführen.

Als Einbaustelle wurde eine natürliche Meerenge von 50 m Breite, ca. 110 km nördlich von Murmansk, gewählt. Die Staufläche beträgt etwas mehr als einen Quadratkilometer, die Differenz zwischen Ebbe- und Flutspiegel ist mit ca. 4 m eher klein. Bei optimalen Verhältnissen ergibt sich ein Durchfluss von 300 m^3/s.

Die Maschinenhalle, ein Stahlbetonkasten von 600 m^2 Grundfläche und 15 m Höhe, ist auf einer Sohle von 20 cm Dicke aufgebaut und im Bereich der Wasserführungen und Turbinen durch Schotte versteift. Decken und Wände teilen den hydraulischen Teil vom elektrischen ab. Das Gesamtgewicht inklusive Einrichtungen beträgt 5200 t, der Tiefgang erreicht bei diesem Gewicht 8,30 m. Da die natürliche Wassertiefe an der Einbaustelle nur 5 m beträgt, musste mittels eines schwimmenden Greiferkrans eine Baugrube ausgehoben werden. Diese Arbeit und das Einbringen einer Sand-Kies-Unterlage, welche von Tauchern in der Baugrube eingeebnet werden musste, erwiesen sich als besonders kostspielig. Nach Abschluss der Arbeiten im Baudock wurde die Grube geflutet, eine Fahrrinne ausgebaggert und der Tiefgang des Schwimmkörpers durch Beigesellen von Pontons verringert. Das Einschwimmen und Absenken in die vorbereitete Baugrube war ein schwieriges Manöver, das nicht auf Anhieb gelang.

Die elektrische Ausrüstung besteht zur Zeit aus einer einzigen umkehrbaren Rohrturbine französischer Bauart. Der Synchrongenerator wird über ein Planetengetriebe (72/600 U./min) angetrieben und leistet 400 kVA. Die Anlage ist für den Einbau einer zweiten Maschinengruppe vorbereitet.

Zahlreiche Detailprobleme, wie solche der Beanspruchung des Bauwerks durch Temperaturschwankungen im Bereich der wechselnden Wasserstände, der Wasserdichtheit, Frostbeständigkeit und des Schutzes gegen Algenbewuchs und Korrosion mussten für den Versuchsbau studiert und gelöst werden. Durch das neuartige Bauverfahren sollen auch steckengebliebene Projekte für Gezeitenkraftwerke wieder in den Bereich der wirtschaftlichen Realisierbarkeit rücken. *P. Strauss*

Elektrische Lichttechnik, Lampen
Technique de l'éclairage, lampes

Temperaturmessung mit Laserlicht

Die Temperaturmessung in Gasen ist dann ein schwieriges Problem, wenn keine mechanischen Sonden wie Thermoelemente und dgl. verwendet werden können. Dies ist z. B. in der Umgebung eines Lichtbogens der Fall, denn Sonden besitzen einerseits eine zu schwache räumliche Auflösung und stören anderseits den Lichtbogen. Im Brown Boveri Konzern-Forschungszentrum wurde ein Verfahren entwickelt, um mit Hilfe eines Laserstrahls störungsfrei das Temperaturfeld in der Nähe eines Lichtbogens auszumessen. Dabei benutzt man den Effekt, dass ein Lichtstrahl beim Durchlaufen von Bereichen verschiedener Temperatur in Richtung des Temperaturgradienten abgelenkt wird. Dieser Zusammenhang ist auch Ursache der Fata Morgana. Durch Ausmessung der Ablenkungen von Laserstrahlen, die an verschiedenen Stellen die Umgebung des Bogens abtasten, lässt sich die Temperaturverteilung quantitativ bestimmen. Verwendet man als Anzeige für die Laserstrahlen eine Kamera mit hoher Zeitauflösung, dann kann auch der zeitliche Verlauf der Temperatur bei instationären Vorgängen ermittelt werden.

Für eine erfolgreiche Anwendung dieser Methode ist eine hohe Intensität des Lichtstrahls bei geringer Dicke erforderlich. Diese Voraussetzungen sind in idealer Weise beim Laser erfüllt. Das Verfahren arbeitet bis zu Temperaturen von einigen 1000 °C. Bei noch höheren Temperaturen leuchtet das Gas selbst. Diese Strahlung lässt sich spektral zerlegen. Aus der Intensität und der Breite der Spektrallinien kann die Temperatur direkt bestimmt werden.

Beleuchtungsanlagen als Teil von Energiespendern in Gebäuden

628.977.2

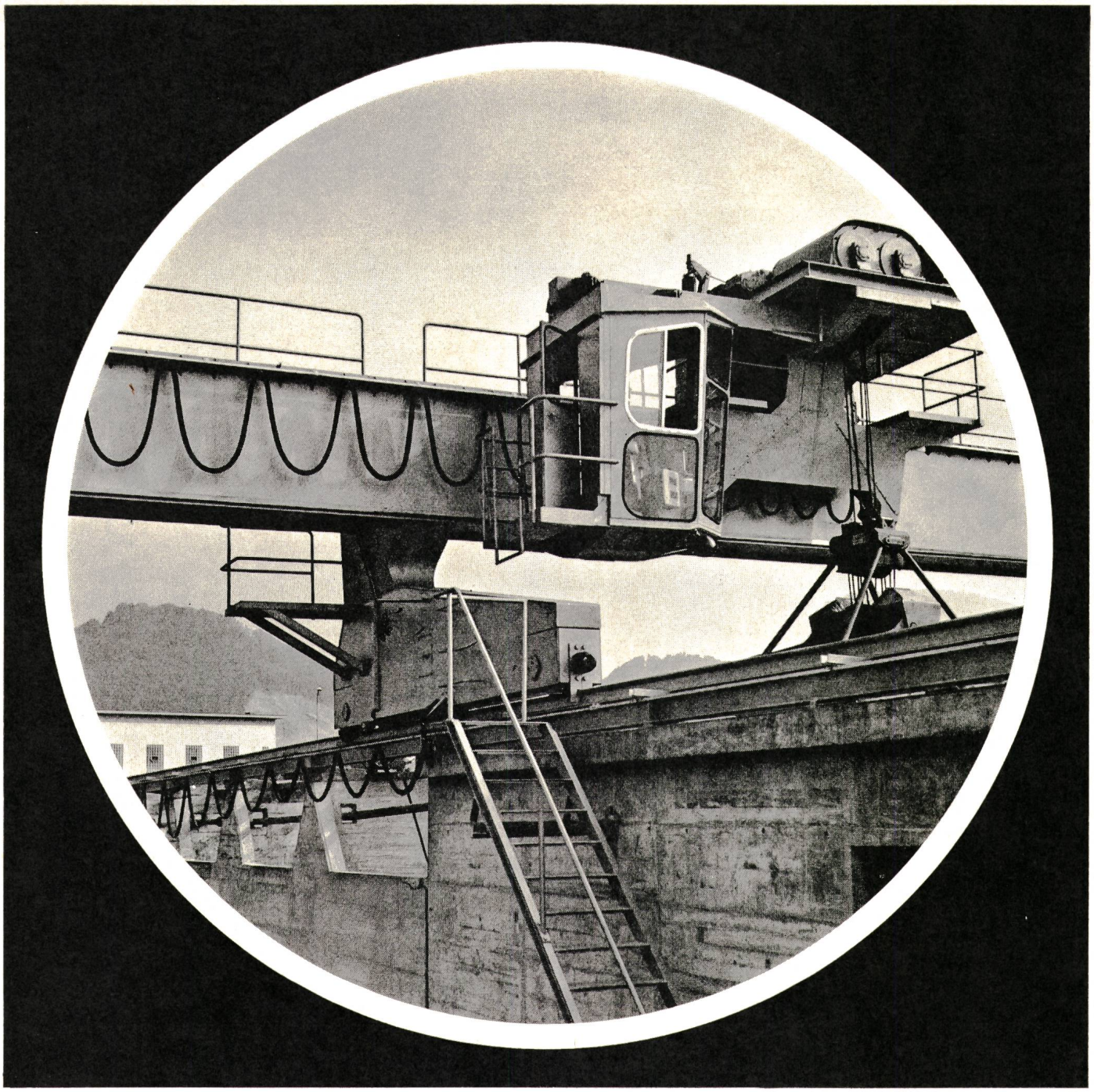
[Nach *H. W. Bodmann:* Light and the Total Energy Input to a Building. Light and Lighting 63(1970)9, S. 240...249]

Bürogebäude mit tausend Beschäftigten, die meist in breiten Grossraumbüros arbeiten, sind heute keine Seltenheit mehr. Diese Leute brauchen Frischluft und Licht, die thermischen, akustischen und visuellen Gegebenheiten im Gebäudeinnern müssen daher grundlegenden Anforderungen entsprechen. Oft ist auch eine Abschirmung von Verkehrslärm und Luftverschmutzung notwendig. Bei der Gebäudeplanung ist daher durch eine sinnvolle Kombination aller Energiespender ein wirtschaftlicher Gesamtenergie-Haushalt anzustreben.

Da tiefe Grossraumbüros nur in Fensternähe ausreichend Tageslicht erhalten, ist die künstliche Beleuchtung in den inneren Zonen auch tagsüber stets eingeschaltet und ein wesentlicher Energieträger. Der mittlere Energiebedarf von Fluoreszenzlampen beträgt ca. 0,02 W/lm und eine Fluoreszenzlampe von 40 W nimmt mit dem Vorschaltgerät 50 W Leistung auf, gibt aber davon nur etwa für 8 W Licht ab, der Rest ist Wärme. Bei Berücksichtigung des Leuchtenwirkungsgrades und Lichtstromrückganges im Laufe der Lebensdauer muss für eine mittlere Beleuchtungsstärke von 1000 lx mit einer installierten Leistung von ca. 50 W/m^2 Bodenfläche gerechnet werden. Mit Hochdruck-Gasentladungslampen, die bei verbesserter Farbwiedergabe auch in Innenräumen eingesetzt werden, ist eine bessere Energiebilanz zu erzielen.

Mit belüfteten Leuchten kann erreicht werden, dass nur 15...20 % der aufgenommenen Energie in den Raum abgestrahlt wird. Die von den Leuchten abgeführte Energie, ebenso wie die durch Fenster und Wände eingestrahlte Sonnenenergie, kann über das Belüftungssystem zur Heizung, Kühlung oder Warmwasserzubereitung benutzt werden. In Nordamerika kommen in den meisten neuen Bürogebäuden, Supermärkten, fensterlosen Fabriken und auch in Schulen integrierte Systeme für Beleuchtung, Kühlung und Heizung zur Anwendung, wobei die Beleuchtung die konventionellen Heizsysteme meist ganz ersetzt. Nach einem Messergebnis bei einem Gebäude mit solch einem integrierten System setzte sich der gesamte Wärmegewinn an einem heissen Tag wie folgt zusammen: 35,9 % aus künstlicher Beleuchtung, 25,4 % aus Sonneneinstrahlung durch Fenster und Wände, 22,4 % aus Wärmepumpe, 6,2 % aus elektrischen Maschinen, 5,3 % aus Ventilation, 4,8 % von Menschen. *H. Hauck*

Fortsetzung auf Seite 341
Suite à la page 341



Störungsfreier Betrieb bei härtester Beanspruchung!

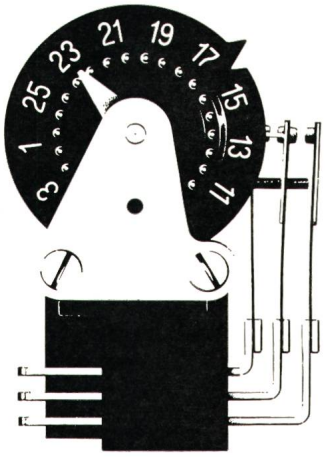
Dätwyler-Krankabel sind hochwertige Hängekabel für Krananlagen, Transportanlagen und bewegliche Betriebseinrichtungen im Freien oder in Räumen. Dank ihrer spezifischen Konstruktion garantieren sie einen störungsfreien, zuverlässigen Betrieb. Dätwyler-Krankabel können raumsparend montiert werden, sind aber trotzdem rasch und sicher auszufahren. Ihr Mantel besteht entweder aus PVC oder Butyl. Sie sind von höchster Alterungs- und Witterungsbeständigkeit. Selbst tiefe Temperaturen beeinträchtigen ihr einwandfreies, mechanisches Funktionieren keineswegs. Dätwyler hat für jeden Verwendungszweck das perfekte Hängekabel, vom modernen, flachen Schleppkabel für Normal- oder Spezialanwendungen bis zum Rundkabel mit Zugentlastung. Alle diese Typen haben ihre Bewährungsprobe in zahlreichen Anlagen unter härtesten Betriebsbedingungen bestens bestanden. Interessiert Sie dieses Dätwyler-Produkt? Wir senden Ihnen gerne Unterlagen: Telefon 044 - 2 13 13.

Krankabel Dätwyler

Dätwyler AG, Schweizerische Kabel-, Gummi- und Kunststoffwerke, 6460 Altdorf-Uri, Telefon 044 - 2 13 13

3539 S

Ab 00.30 wird Strom gespart...



... und doch wird den Straßenbenützern nicht zugemutet, bei völliger Dunkelheit nach Hause zu gehen: man schaltet über eine Landis & Gyr-Rundsteueranlage auf Halbnacht-Beleuchtung. Ohne zusätzliche Leitungen, einfach durch Überlagerung tonfrequenter Impulse auf das Netz, sprechen die Rundsteuerempfänger in den Kandelabern auf die zugeordneten Befehle an, je nachdem welche Beleuchtung gerade benötigt wird: Ganz- oder Halbnachtbeleuchtung, zeitlich unabhängig von einem festen Programm. Diese Anpassungsfähigkeit ist von Vorteil in Sonderfällen wie Festanlässen, Beleuchtung von Monumenten, bei Nebel und Gewittereinbruch oder gar in Kriegszeiten (totale Verdunkelung).

Die Steuerung der Straßenbeleuchtung ist nur eine von vielen Anwendungen der Landis & Gyr-Rundsteuerung, die in der modernen Netzführung immer mehr zum Einsatz kommt. Sie wird auch verwendet für: Steuerung von Doppeltarifzählern, Maximumzählern, Heißwasserspeichern, Waschmaschinen, Schaufensterbeleuchtung, Alarmierung von Polizei, Feuerwehr oder EW-Personal usw. In der Schweiz stehen bereits über 300 Landis & Gyr-Rundsteueranlagen im Betrieb.

LANDIS & GYR

LANDIS & GYR AG
ZUG SCHWEIZ

Elektrizitätszähler
Fernwirktechnik
Wärmetechnik
Rundsteuerung
Kernphysik