Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 58 (1967)

Heft: 3

Artikel: Absinken der elektrischen Festigkeit von Funkenstrecken bei steilen Stoßspannungen

Autor: Wiesinger, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916219

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: 09.12.2025

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

Absinken der elektrischen Festigkeit von Funkenstrecken bei steilen Stoßspannungen

Von *J. Wiesinger*, München

621.316.933.1

Bei direkten Einschlägen multipler Blitze in Freileitungen muss mit Spannungssteilheiten bis zu etwa 20 MV/µs gerechnet werden. In die Leitung ziehen Keilwellen ein oder angenäherte Rechteckstosswellen, wenn die Keilwellen durch Überspannungsableiter abgeschnitten werden. Das Ansprechverhalten von Funkenstrecken grosser Schlagweite bei sehr rasch ansteigenden Stosswellen ist bisher weitgehend unbekannt.

Im ersten Abschnitt des Aufsatzes wird an einer 10-cm-Stabfunkenstrecke gezeigt, dass die Vorströme, die die Ausbildung des Entladungskanals einleiten, bei der Beanspruchung mit einer negativen 0,005|550-µs-Welle schon bei einer wesentlich niedrigeren Spannungsamplitude einsetzen als bei der Beanspruchung mit einer 1,7|550-µs-Welle. Analog hierzu liegt die Haltespannung der rasch ansteigenden Welle wesentlich unter der Haltespannung der langsam ansteigenden Welle.

Der Einfluss der Frontdauer der Stoßspannung auf die Stosshaltespannung von prinzipiellen Elektrodenanordnungen mit Schlagweiten von 10...80 cm wird im zweiten Abschnitt diskutiert. Bei den Messungen mit einer negativen 1|50-µs-Welle und einer 0,1|50-µs-Welle ergab sich, dass bei allen untersuchten inhomogenen Elektrodenanordnungen die Stosshaltespannungen der rasch ansteigenden Welle z. T. erheblich unter der der langsam ansteigenden Welle liegen. Der Unterschied in den Haltespannungen ist bei einer bestimmten Anordnung abhängig von der Schlagweite.

Die Keilwellenstosskennlinien verschiedener Anordnungen bis zu Durchschlagzeiten unter 0,1 µs werden in einem dritten Abschnitt angegeben. Bei negativen Keilwellen kann die Stosskennlinie einer inhomogenen Anordnung bei Durchschlagzeiten unter ca. 0,5 µs einen flacheren Verlauf aufweisen als die Kennlinie einer homogenen Anordnung. Beide Stosskennlinien können sich sogar überschneiden: Bei grösseren Durchschlagzeiten spricht die homogene Anordnung an, bei kürzeren Durchschlagzeiten die inhomogene. Diese Tatsache ist für die Isolationskoordination von Bedeutung.

Lors de coups de foudre multiples directs sur des lignes aériennes, il faut compter avec des gradients de tension jusqu'à 20 MV/µs. Dans la ligne se propagent des ondes à front oblique ou des ondes de choc quasi rectangulaires, lorsque les ondes à front oblique sont coupées par des parafoudres. Le comportement à l'amorçage d'éclateurs à grande distance disruptive, dans le cas d'ondes de choc très raides, est encore peu connu.

Dans le premier paragraphe de cet article, on montre que les premiers courants qui amorcent la formation du canal de décharge dans un éclateur à tiges de 10 cm s'établissent déjà, quand il s'agit d'une onde négative 0,005|550 µs, pour une amplitude de tension nettement moins grande que dans le cas d'une onde 1,7|550 µs. De même, la tension de tenue au choc de l'onde à front très raide est bien inférieure à celle de l'onde à front moins raide.

L'influence de la durée du front de la tension de choc sur la tension de tenue au choc de dispositions d'électrodes avec des distances disruptives de 10 à 80 cm est traitée au deuxième paragraphe. Lors des mesures avec une onde négative 1|50 µs et une onde 0,1|50 µs, on a constaté que, pour toutes les dispositions inhomogènes d'électrodes examinées, les tensions de tenue au choc de l'onde à front très raide sont en partie beaucoup plus basses que dans le cas de l'onde à front moins raide. Pour une même disposition, l'écart entre les tensions de tenue dépend de la distance disruptive.

Les caractéristiques de choc par ondes à front oblique de diverses dispositions jusqu'à des durées de claquage de moins de 0,1 µs sont indiquées au troisième paragraphe. Dans le cas d'ondes négatives à front oblique, la caractéristique de choc d'une disposition inhomogène, pour des durées de claquage de moins de 0,5 µs, peut être plus plate que celle d'une disposition homogène. Les deux caractéristiques de choc peuvent même se couper: pour des durées de claquage plus longues, c'est la disposition homogène qui s'amorce et, pour des durées de claquage plus brèves, la disposition inhomogène. Ce fait est important pour la coordination de l'isolement.

1. Einführung

Eine eindeutige Isolationskoordination der einzelnen Anlagenteile ist die Voraussetzung für einen sicheren Netzbetrieb. Es ist deshalb notwendig, das Ansprechverhalten der Isolatoren, Lichtbogenarmaturen, Pegelfunkenstrecken, Ableiter, Trenn- und Schaltfunkenstrecken usw. bei allen möglichen Beanspruchungen, wie sie durch netzfrequente Überspannungen, Schalt- und Blitzüberspannungen hervorgerufen werden, zu kennen.

Bis heute liegen über das Ansprechverhalten der Anlagenteile bei sehr rasch ansteigenden Stoßspannungen, wie sie bei direkten Einschlägen multipler Blitze in Freileitungen vorkommen, praktisch noch keine Messungen vor. Der Grund hierfür ist, dass die Erzeugung steiler Stosswellen im Laboratorium eine besondere Technik erfordert und dass die Messung mit herkömmlichen kapazitiven oder relativ hochohmigen Ohmschen Stoßspannungsteilern in der Regel nicht möglich ist [1] [1]).

Berger und *Vogelsanger* [2] haben nachgewiesen, dass bei multiplen Blitzen, d. h. bei negativen Erdblitzen, die aus mehreren Teilentladungen bestehen, mit Steilheiten in der Front der Blitzströme bis zu 80 kA/µs zu rechnen ist. Bei einem direkten Blitzeinschlag in eine Freileitung mit einem Wanderwellenwiderstand $\Gamma = 500\ \Omega$ ergibt sich damit eine maximale Frontsteilheit der erzeugten Stoßspannung:

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = \frac{\Gamma}{2} \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = 20\ \mathrm{MV/\mu s}$$

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Bei einem Scheitelwert des Blitzstromes $i_{\max} = 50$ kA ist der Maximalwert der Stoßspannung:

$$u_{\max} = i_{\max} \frac{\Gamma}{2} = 12{,}5\ \mathrm{MV}$$

Da der Verlauf des Stromes der multiplen Folgeblitze in der Front weitgehend linear ist [2], ziehen in die Leitung keilförmige Stosswellen ein. Wenn diese Keilwellen durch einen Überspannungsableiter, der sich zwischen Leiterseil und Erde befindet, abgeschnitten werden, ergeben sich in erster Näherung sog. Rechteckstosswellen, d. h. sehr rasch ansteigende und relativ sehr langsam abfallende Stoßspannungen. Ihre Front wird durch die Blitzstromsteilheit bestimmt und ihre Rückenhalbwertzeit im wesentlichen durch den Rücken des Blitzstromes. Wird z. B. die oben erwähnte Keilwelle mit einer Steilheit von 20 MV/µs bei 500 kV abgeschnitten, ergibt sich eine Frontdauer der Rechteckstosswelle von 25 ns; die Rückenhalbwertzeit beträgt in der Regel mehrere 10 µs.

Man erkennt, dass bei direkten Einschlägen multipler Blitze örtlich sehr rasch ansteigende Stoßspannungen entstehen können. Im folgenden werden einige Messungen an prinzipiellen Elektrodenanordnungen in Luft bei der Beanspruchung mit rasch ansteigenden Stoßspannungen (Keilwellen und Rechteckstosswellen) aufgezeigt. Es wird auch untersucht, ob von der elektrischen Festigkeit bei der Beanspruchung mit Normstosswellen (z. B. 1,2|50-µs-Welle) auf die Festigkeit bei der Beanspruchung mit sehr rasch ansteigenden Stosswellen geschlossen werden kann.

2. Einfluss der Frontdauer der Stoßspannung auf die Vorströme einer 10-cm-Stabfunkenstrecke

Bei Stoßspannungen bis zu ca. 100 kV wurden an verschiedenen Elektrodenanordnungen mit Schlagweiten bis zu 10 cm bereits Untersuchungen über den Einfluss der Frontdauer auf die Stosshaltespannungen durchgeführt [3]. Hierbei wurden die Anordnungen mit einer 0,005|550-µs-Welle und einer 2,7|550-µs-Welle beaufschlagt. Es wurde u. a. festgestellt, dass die Stosshaltespannung einer senkrecht stehenden 10-cm-Stabfunkenstrecke bei der Beanspruchung mit der negativen 0,005|550-µs-Welle 16 % unter der Stosshaltespannung bei der Beanspruchung mit der 2,7|550-µs-Welle lag. Um dieses Phänomen näher zu durchleuchten, wurden nun die Vorströme der 10-cm-Stabfunkenstrecke bei einer sehr rasch (5 ns) und einer relativ langsam (1,7 µs) ansteigenden Stoßspannung gemessen.

Wie u. a. in [4...5] ausgeführt wurde, müssen vor der Ausbildung eines die Elektroden überbrückenden Entladungskanals Raumladungskanäle geschaffen werden. Die Ausbildung dieser Kanäle bedingt einen Vorstrom, der vor der Hauptentladung, d. h. dem rapiden Zusammenbruch der Funkenstreckenspannung in einigen 10 ns auf die Brennspannung, fliessen muss. Dieser Vorstrom wird aus dem Stosskreis, an den die Funkenstrecke angeschlossen ist, geliefert. Die Messanordnung zur Erfassung des aus der erdseitigen Elektrode austretenden Vorstromes wurde in [5] beschrieben.

Den Generator, an den die Stabfunkenstrecke angeschlossen wurde, zeigt Fig. 1. Dieser Stossgenerator 1, mit dem die Frontdauer der Stoßspannung in einem weiten Bereich variiert werden kann, besteht aus einem Stosskreis und einem Nachkreis. Der Nachkreis dient zur Aufsteilung der durch den Stosskreis gelieferten Stoßspannung. Die Aufsteilfunkenstrecke F_2 ist eine Vielfachplattenfunkenstrecke (Frontdauer der Stosswelle am Prüfling: 5 ns). Wird F_2 kurzgeschlossen, können Stosswellen mit Frontdauern in der Grössenordnung von µs erzeugt werden. Da ein sehr ähnlich aufgebauter Generator bereits in [3] beschrieben ist, soll auf die Schaltung nicht näher eingegangen werden.

Bei den Vorstromuntersuchungen wurde die 10-cm-Stabfunkenstrecke mit einer 0,005|550-µs-Welle und einer 1,7|550-µs-Welle (nach VDE 0433, Teil 3/4.66) positiver und negativer Polarität beansprucht. Die ermittelten Strom- und Spannungsoszillogramme zeigen die Fig. 2a und 2b.

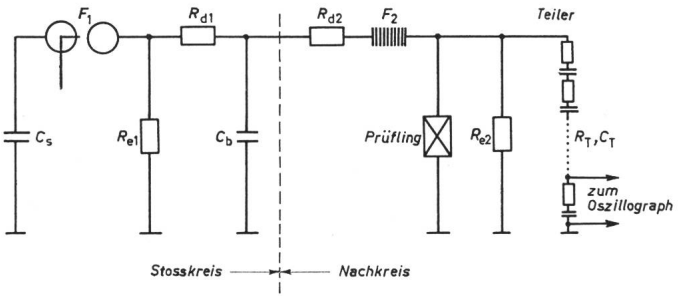

Fig. 1
Schema des Stossgenerators 1
F_1 Zündfunkenstrecke; F_2 Vielfachplattenfunkenstrecke oder Kugelfunkenstrecke; C_s Stosskapazität; C_b Grundbelastungskapazität; C_T Teilerkapazität; R_d Dämpfungswiderstand; R_e Entladewiderstand; R_T Teilerwiderstand; C_s = 30 nF; C_b = 0...3 nF; C_T = 100 pF; R_{d1} = 100...9500 Ω; R_{d2} = 60 Ω; R_{e1} = 50 kΩ; R_{e2} = 45 kΩ; R_T = 1500 Ω

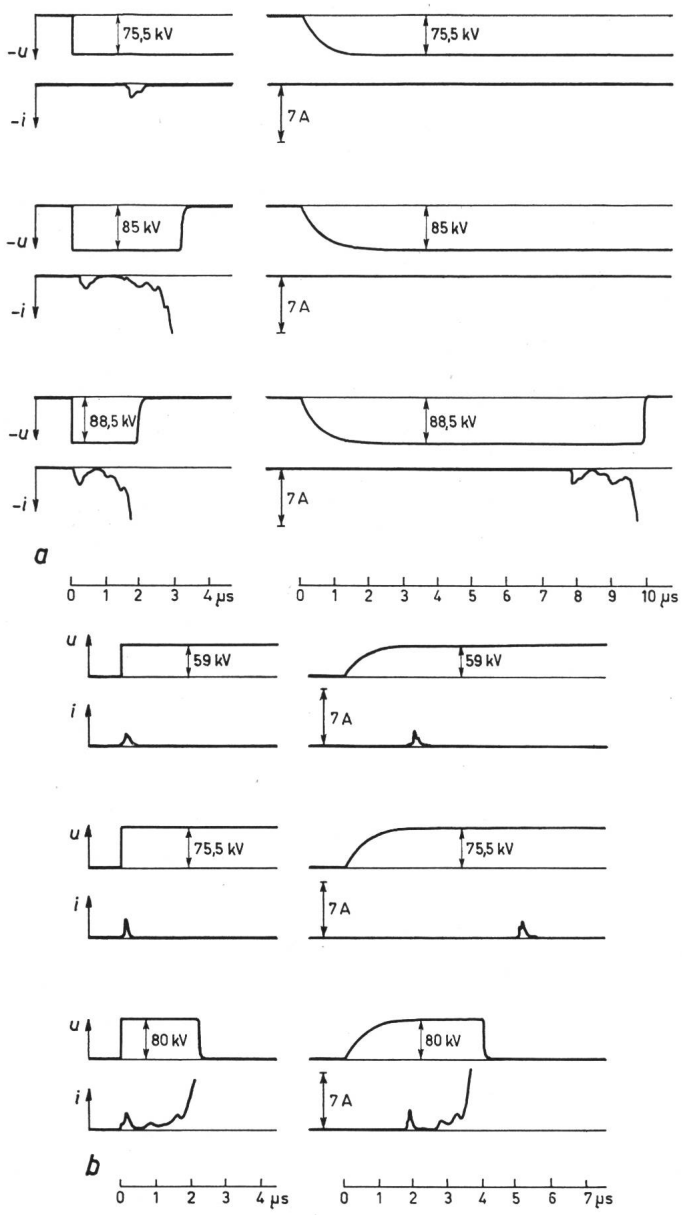

Fig. 2
Vorströme bei verschiedenen steilen Stoßspannungen
a bei negativer Polarität der Stoßspannungen; *b* bei positiver Polarität der Stoßspannungen
u Stoßspannung; *i* Vorstrom; Stabfunkenstrecke, *a* = 10 cm

Bei negativer Polarität der Stoßspannungen (Fig. 2a) werden bei der rasch ansteigenden Welle bereits bei einer wesentlich niedrigeren Spannungsamplitude Vorströme registriert als bei der relativ langsam ansteigenden Welle. Die 0,005|550-µs-Welle bricht sogar schon bei einer Amplitude zusammen, bei der noch keine Vorströme bei der 1,7|550-µs-Welle gemessen werden. Wenn beide Wellen zusammenbrechen, zeigen die Vorströme etwa den gleichen Verlauf.

Bei positiver Polarität der Stoßspannung (Fig. 2b) treten die Vorströme bei beiden Wellenformen etwa bei der gleichen Amplitude der Stoßspannung auf. Der Einsatzverzug nach Auftreten der Spannung ist zwar verschieden, jedoch ist die Erscheinungsform des Vorstromes bei beiden Wellen weitgehend identisch. Beide Wellen brechen auch ungefähr bei der gleichen Spannungsamplitude zusammen.

Während sich also bei den positiven Wellen keine merklichen Unterschiede in den Vorströmen bei der Beanspruchung mit Stosswellen verschiedener Frontdauer ergeben, setzen bei den negativen Stoßspannungen bei der rasch an-

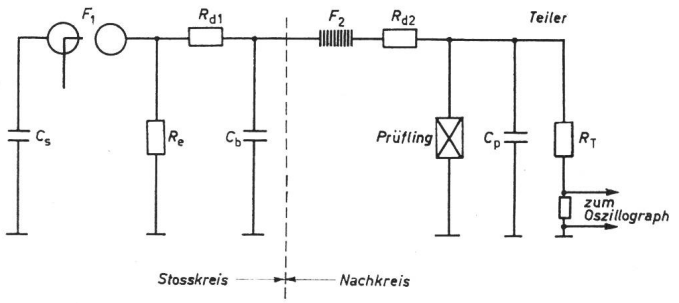

Fig. 3
Schema des Stossgenerators 2
F_1 Zündfunkenstrecke; F_2 Vielfachplattenfunkenstrecke; C_s Stosskapazität; C_b Grundbelastungskapazität; C_p Parallelkapazität des Ohmschen Teilers; R_d Dämpfungswiderstand; R_e Entladewiderstand; R_T Teilerwiderstand
$C_s = 25$ nF; $C_b = 1{,}44$ nF; $C_p = 100$ pF; $R_{d1} = 290\ \Omega$; $R_{d2} = 360\ \Omega$; $R_e = 3500\ \Omega$; $R_T = 20$ kΩ

steigenden Welle die Vorströme bereits bei einer wesentlich geringeren Spannungsamplitude ein als bei der langsam ansteigenden Welle, d. h., die Einsatzfeldstärke der Vorentladungen nimmt mit zunehmender Frontsteilheit der Stosswelle ab. Da der Einsatz der Vorströme den Beginn des Aufbaus des Entladungskanals anzeigt, wird verständlich, dass bei der rasch ansteigenden negativen Welle die Haltespannung bedeutend tiefer liegt als bei der langsam ansteigenden Welle.

3. Einfluss der Frontdauer der Stoßspannung auf die Stosshaltespannung von Elektrodenanordnungen mit Schlagweiten von 10...80 cm

Es lag nahe, die an den Anordnungen mit Schlagweiten bis zu 10 cm durchgeführten Versuche über den Einfluss der Frontdauer der Stoßspannung auf die Stosshaltespannung [3] auszudehnen auf Anordnungen mit grösseren Schlagweiten. Um bei höheren Spannungen eine rasch ansteigende Stosswelle erzeugen zu können, wurde ein 5-stufiger 1-MV-Stossgenerator mit einer maximalen Energie von 12,5 kWs, der zur Erzeugung einer 1|50-µs-Welle dient, mit einem Nachkreis versehen. Den prinzipiellen Aufbau dieses Stossgenerators 2 zeigt Fig. 3. Als Aufsteilfunkenstrecke wurde auch hier eine sehr rasch durchzündende Vielfachplattenfunkenstrecke verwendet. Wegen der gegenüber dem Generator 1 erhöhten Kapazität der Prüflinge, der Parallelkapazität C_p des gesteuerten Ohmschen Spannungsteilers und der grösseren räumlichen Abmessungen konnte am Prüfling nur eine minimale Frontdauer von 0,1 µs erreicht werden. Wenn F_2 kurzgeschlossen wurde, ergab sich die Frontdauer zu 1 µs. Damit konnten Messungen mit einer 0,1|50-µs-Welle und einer 1|50-µs-Welle durchgeführt werden.

Die Elektrodenanordnungen, die als Prüflinge eingesetzt wurden, sind in Fig. 4 zusammengestellt. Es wurden untersucht: Eine Plattenfunkenstrecke (Durchmesser $d = 45$ cm), Kugelfunkenstrecken ($d = 75$ cm und $d = 10$ cm), eine Stabfunkenstrecke, eine Stab-Plattenanordnung und eine Kalotte-Plattenanordnung.

Die prozentuale Differenz ΔU der negativen 50-%-Stosshaltespannungen ($U_{50\,\%}$) bei den beiden Wellenformen ist für die verschiedenen Prüflinge in Fig. 5 aufgetragen. Hierbei ist:

$$\Delta U = \frac{U_{50\,\%\,(1|50\text{— µs-Welle})} - U_{50\,\%\,(0{,}1|50\text{— µs-Welle})}}{U_{50\,\%\,(1|50\text{— µs-Welle})}}\ 100\,\%$$

Man erkennt, dass bei der 75-cm-Kugelfunkenstrecke ΔU bis zu einer Schlagweite von α von 10 cm Null ist, bei der Plattenfunkenstrecke bis zu einer Schlagweite von etwa 20 cm. In diesen Schlagweitebereichen können die beiden Anordnungen als weitgehend homogen angesehen werden. Wenn bei der Plattenfunkenstrecke a grösser als 20 cm wird, ist ein Unterschied in den Haltespannungen feststellbar. Es ist wahrscheinlich, dass die Kurve $\Delta U = f(a)$ für die Plattenfunkenstrecke bei grösseren Schlagweiten noch weiter ansteigt, um schliesslich bei einem bestimmten Wert von a einen Maximalwert zu erreichen.

Aus den in [3] beschriebenen Untersuchungen geht hervor, dass für die 10-cm-Kugelfunkenstrecke bei Schlagweiten kleiner 3 cm ΔU gleich Null ist. Bei $a = 35$ cm ist ΔU aber bereits auf 34 % angestiegen, um dann mit wachsendem a wieder abzunehmen; die Kurve weist also ein Maximum auf.

Auch die Stab-Plattenanordnung, die Kalotte-Plattenanordnung und die Stabfunkenstrecke zeigen ein nach grösseren Schlagweiten hin abnehmendes ΔU. Allerdings ist bei der Stabfunkenstrecke selbst bei a = 50 cm noch ein ΔU von 21 % vorhanden. Während bei der Stab-Platten- und der Kalotte-Plattenanordnung ΔU bei Schlagweiten grösser 55 cm zu Null wird, ist bei der Stabfunkenstrecke ΔU erst bei einer Schlagweite über 90 cm Null.

Man erkennt also, dass bei allen Elektrodenanordnungen, die einen inhomogenen Feldverlauf zwischen den Elektroden aufweisen, die Stosshaltespannung prinzipiell eine Funktion der Frontdauer der Stoßspannung ist. Der Unterschied in den Stosshaltespannungen bei Wellen mit verschiedener Frontdauer erreicht bei einer bestimmten Schlagweite ein Maximum; bei weiter zunehmender Schlagweite nimmt dann der Unterschied wieder ab. Die Schlagweite, bei der der Unterschied ein Maximum ist bzw. bei der der Unterschied wieder verschwindet, ist von der Elektrodenanordnug abhängig.

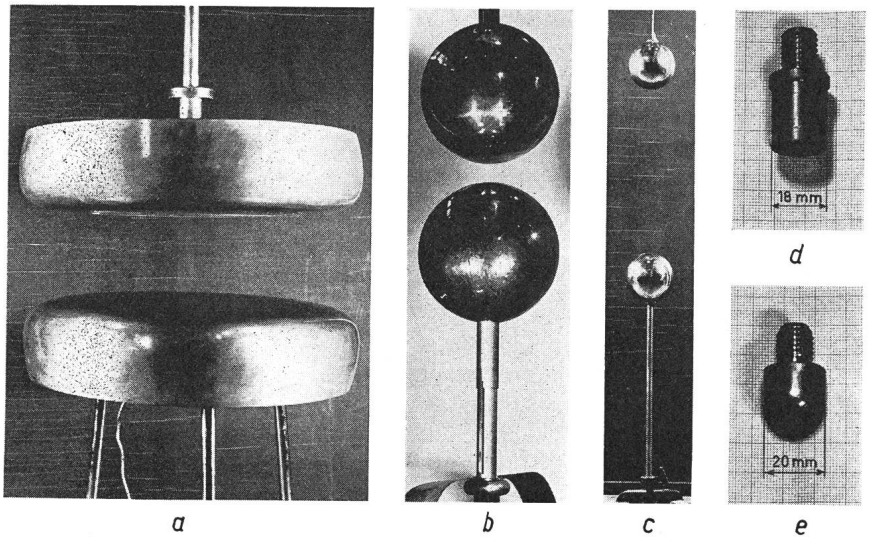

Fig. 4
Elektrodenanordnungen
a Plattenfunkenstrecke, $d = 45$ cm; *b* Kugelfunkenstrecke, $d = 75$ cm; *c* Kugelfunkenstrecke, $d = 10$ cm; *d* Stabelektrode; *e* Kalottenelektrode

Es muss noch erwähnt werden, dass die hier angegebenen Messungen nicht unmittelbar mit den Ergebnissen in [3] verglichen werden können, da die Frontdauer der steilen Wellen sich in beiden Fällen erheblich unterscheidet. Es kann auf Grund der Untersuchungen an den Funkenstrecken mit Schlagweiten bis zu 10 cm erwartet werden, dass auch bei den Elektrodenanordnungen mit Schlagweiten zwischen 10 und 80 cm ΔU noch erheblich grösser wird, wenn die Frontdauer der steilen Wellen auf einige 10 ns herabgesetzt wird.

Wenn positive Stoßspannungen verschiedener Frontdauer an die oben genannten Elektrodenanordnungen gelegt wurden, konnten keine wesentlichen Unterschiede in den Haltespannungen festgestellt werden.

Da im allgemeinen die Stosshaltespannungen einer Anordnung abhängig von der Frontdauer der Stoßspannung ist, kann von der Festigkeit bei der Beanspruchung mit Normstosswellen nicht auf die Festigkeit bei der Beanspruchung mit sehr rasch ansteigenden Wellen geschlossen werden. Gemäss den Ausführungen in [3] ist auch für die Funkenstrekken mit Schlagweiten bis zu 80 cm eine Berechnung der Stosskennlinien bei sehr unterschiedlicher Frontdauer der Stosswellen nach den bis heute bekannten Ansätzen nicht möglich.

4. Keilwellenstosskennlinien

Mit den Stossgeneratoren 1 und 2 (Fig. 1 und 3) können auch angenäherte Keilwellen unterschiedlicher Steilheit erzeugt werden. Hierzu wird an die Prüflinge eine stark überschiessende Stoßspannung angelegt, die weit in der Front zusammenbricht. Mit dem Generator 1 wurden unterschiedlich rasch ansteigende Keilwellen realisiert durch den Einsatz einer Vielfachplattenfunkenstrecke (Durchzündzeit: einige ns) bzw. einer Kugelfunkenstrecke (Durchzündzeit: ca. 60 µs) im Nachkreis, bei kurzgeschlossener Aufsteilfunkenstrecke F_2 durch Variation der Grösse von C_b und R_{d1}. Bei dem Generator 2 wurde die Frontdauer durch den Einsatz bzw. die

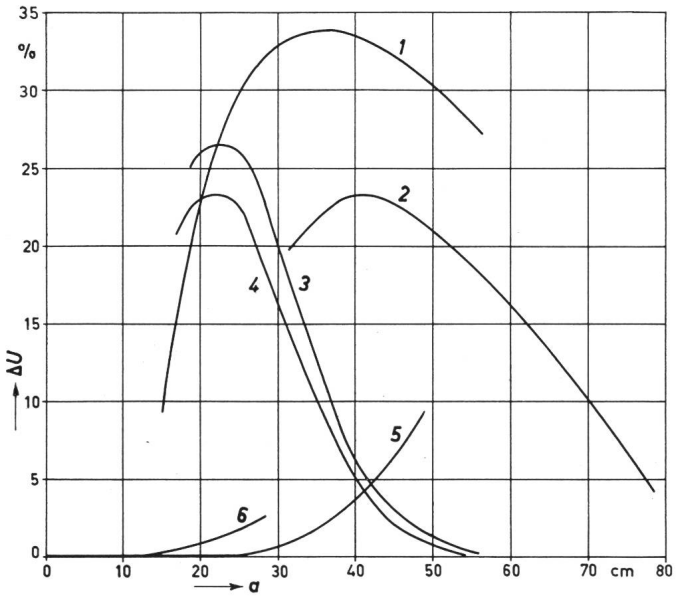

Fig. 5
Differenz der 50-%-Stosshaltespannungen bei einer negativen 1|50-µs-Welle und einer 0,1|50-µs-Welle
ΔU prozentuale Differenz der Haltespannungen; *a* Schlagweite; *1* Kugelfunkenstrecke, $d = 10$ cm; *2* Stabfunkenstrecke; *3* Stab-Plattenanordnung, Platte geerdet ; *4* Kalotte-Plattenanordnung, Platte geerdet; *5* Plattenfunkenstrecke, $d = 45$ cm; *6* Kugelfunkenstrecke, $d = 75$ cm

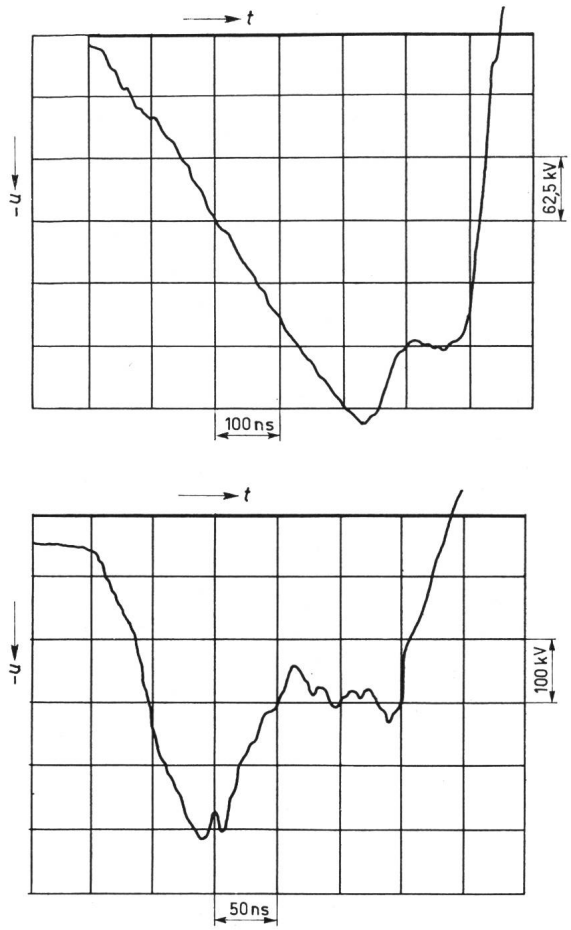

Fig. 6
Abgeschnittene Keilwellen
Plattenfunkenstrecke, $d = 45$ cm, $a = 13{,}5$ cm

Überbrückung der Aufsteilfunkenstrecke F_2 und durch eine verschieden hohe Ladespannung des Generators variiert.

Negative Keilwellen, die durch den Stossgenerator 2 erzeugt wurden und durch die Plattenfunkenstrecke bzw. die Stab-Plattenanordnung abgeschnitten wurden, zeigen die Fig. 6 und 7. Man erkennt, dass der Verlauf des Zusammenbruches bei beiden Anordnungen sehr verschieden ist. Der Grund hierfür ist in den unterschiedlichen Vorentladungen und den damit verbundenen Vorströmen zu suchen (vergl. auch [4...9]).

Wie im Abschnitt *1* angedeutet wurde, sind die Vorströme eine notwendige Voraussetzung für die Hauptentladung, d. h. den endgültigen Zusammenbruch der Funkenstrecke. Das zeitliche Integral über den Vorstrom, die Vorstromladung, bezogen auf die Schlagweite, beträgt bei Stabfunkenstrecken mit mehreren Meter Schlagweite ca. 300 µC/m [9]. Für andere Elektrodenanordnungen liegen bisher noch kaum Richtwerte vor. Orientierende Messungen des Verfassers haben gezeigt, dass bei Kugelfunkenstrecken die Vorströme geringer sind als bei Stabfunkenstrecken, bei Plattenfunkenstrecken mit grosser Flächenausdehnung ($d = 45$ cm) jedoch wesentlich grösser. Dies mag darauf zurückzuführen sein, dass bei Plattenfunktenstrecken die Durchschlagbedingungen an sehr vielen Punkten gleichzeitig erfüllt sind und sich deshalb an vielen Stellen Vorentladungskanäle ausbilden.

Der Vorstrom i bewirkt einen Rückgang der Stoßspannung an der Funkenstrecke durch den Spannungsfall am

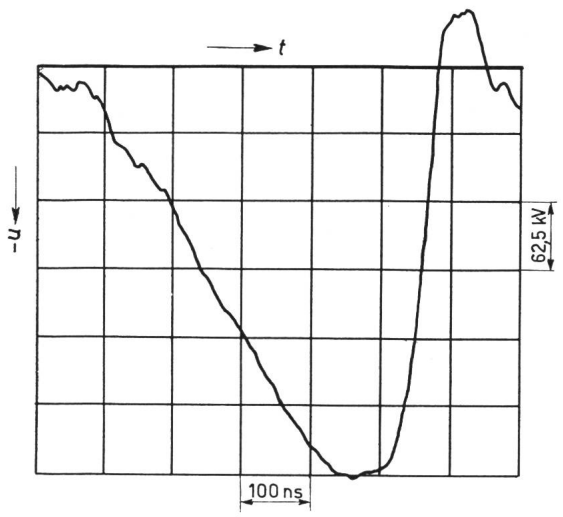

Fig. 7
Abgeschnittene Keilwelle
Stab-Plattenanordnung, Platte geerdet, a = 15 cm

«Innenwiderstand» der Stoßspannungsquelle. Im wesentlichen wird der Spannungsrückgang bei dem Generator *2* hervorgerufen durch den Spannungsfall am Dämpfungswiderstand R_{d2}:

$$\delta u_R = i\, R_{d2}$$

und eine teilweise Entladung der Grundbelastungskapazität C_b:

$$\delta u_C = \frac{1}{C_b} \cdot \int i \cdot dt$$

Da der Spannungsrückgang durch die Vorströme vom Innenwiderstand der Stoßspannungsquelle abhängt, werden sich bei verschiedenen Generatoren verschiedene Zeiten bis zum endgültigen Spannungszusammenbruch ergeben.

Die Spannungseinbrüche durch die Vorströme machen eine Aufstellung von Keilwellenstosskennlinien schwierig. Da diese Stosskennlinien eine eindeutige Beziehung zwischen dem Spannungsanstieg du/dt, dem Scheitelwert der Stoßspannung U_d und der Zusammenbruchzeit T_d angeben sollen, $du/dt = U_d/T_d$, wurden die Oszillogramme nach dem aus Fig. 8 ersichtlichen Verfahren ausgewertet.

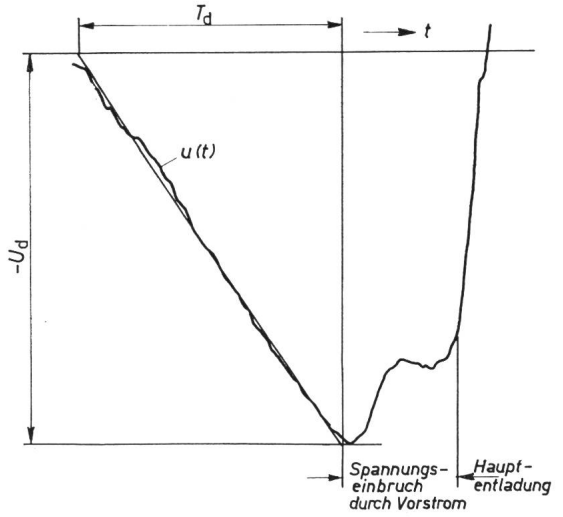

Fig. 8
Zur Ermittlung der Keilwellenstosskennlinien
U_d Scheitelwert der Stoßspannung; T_d Zeit bis zum Durchschlag; u Stoßspannung

Interessante Keilwellenstosskennlinien zeigen die Fig. 9 und 10. Die Kennlinien in Fig. 9 sind gemäss der «responsetime» der Messanordnung des Generators *1* korrigiert [1]. In Fig. 10 sind die korrigierten und unkorrigierten Kennlinien aufgetragen; die «responsetime» der Messanordnung des Generators *2* betrug 10 ns, die Rechteckstossantwort hatte nach ca. 100 ns ihren Endwert erreicht.

In Fig. 9 ist die Stosskennlinie einer Stab-Plattenanordnung für negative Keilwellen der Kennlinie eines Überspannungsableiters der Reihe 10 gegenübergestellt. Man erkennt, dass die Stosskennlinie der Stab-Plattenanordnung bei Durchschlagzeiten unter 0,5 µs wesentlich flacher verläuft als die des Ableiters. Eine ähnliche Tendenz wird aus Fig. 10 ersichtlich: Die Stab-Plattenanordnung weist einen flacheren Kennlinienverlauf auf als die Plattenfunkenstrecke, deren Schlagweite so bemessen ist, dass das Feld zwischen den Platten praktisch homogen ist. Bei den inhomogenen Elektrodenanordnungen bewirkt offenbar das Absinken der Festigkeit bei steilen Wellen (Abschnitt *2*), das der Anstiegstendenz der Stosskennlinien bei kürzeren Durchschlagzeiten entgegensteht, den unerwartet flachen Verlauf der Stosskennlinien.

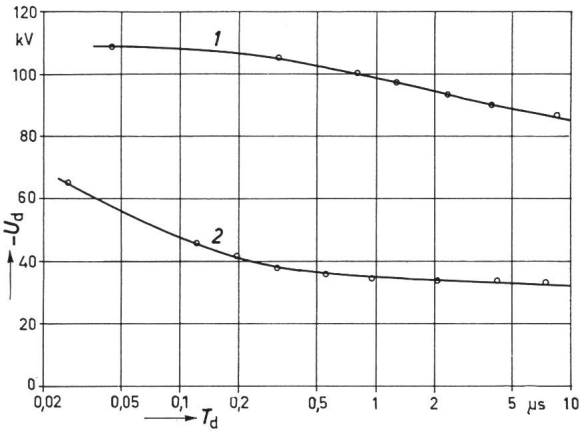

Fig. 9
Keilwellenstosskennlinien
$-U_d$ Mittelwert der negativen Durchschlagspannung; T_d = Zeit bis zum Durchschlag; *1* Stab-Plattenanordnung, Platte geerdet, a = 3 cm; *2* Überspannungsableiter, Reihe 10

Es ist allgemein bekannt, dass inhomogene Elektrodenanordnungen im µs-Bereich der Durchschlagzeiten eine steilere Stosskennlinie besitzen als homogene (z. B. hat eine Stabfunkenstrecke eine steilere Kennlinie als eine Kugelfunkenstrecke). Es lässt sich deshalb bei entsprechenden Schlagweiten der Anordnungen ein Schnittpunkt der Stosskennlinien feststellen, der dadurch zustande kommt, dass bei kürzeren Zeiten die Kugelfunkenstrecke anspricht, bei längeren Durchschlagzeiten die Stabfunkenstrecke.

In Fig. 10 wird nun gezeigt, dass bei bestimmten Elektrodenanordnungen und steilen negativen Stosswellen auch eine Umkehr dieser Tatsache möglich ist. Auch hier überschneiden sich die Stosskennlinien der (homogenen) Plattenfunkenstrecke und der (inhomogenen) Stab-Plattenanordnung. Aber bei Durchschlagzeiten unter 0,4 µs spricht hier die Stab-Plattenanordnung an, bei Durchschlagzeiten über 0,4 µs die Plattenfunkenstrecke. Das bedeutet, dass die Plattenfunkenstrecke bei kurzen Durchschlagzeiten und rasch ansteigenden Keilwellen die Stab-Plattenanordnung nicht mehr zu schützen vermag, obwohl bei Durchschlagzeiten im µs-Bereich ihre Ansprechspannung eindeutig unter der der Stab-Platten-

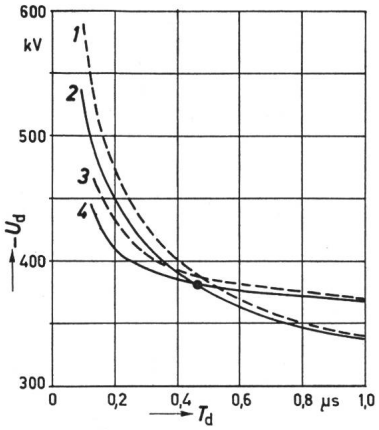

Fig. 10
Keilwellenstosskennlinien
$-U_d$ Mittelwert der negativen Durchschlagspannung; T_d Zeit bis zum Durchschlag; *1* Plattenfunkenstrecke, a = 13,5 cm, d = 45 cm, korrigiert ; *2* wie *1*, jedoch unkorrigiert; *3* Stab-Plattenanordnung, Platte geerdet, a = 15 cm, korrigiert; *4* wie *3*, jedoch unkorrigiert

anordnung liegt. Diese Tatsache, die analog auch für einen Überspannungsableiter und eine inhomogene Anordnung gelten kann, ist für die Isolationskoordination von Bedeutung.

5. Schlussbemerkung

Die Untersuchungen wurden im Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Hochschule München durchgeführt. Dipl.-Ing. *O. Haas, N. Patzner* und *R. Pistor* dankt der Verfasser für die Mitarbeit bei den Messungen.

Literatur

[1] *W. Zaengl* und *K. Feser:* Ein Beitrag zur Berechnung des Übertragungsverhaltens von Stoßspannungen. Bull. SEV 55(1964)25, S. 1249...1256.

[2] *K. Berger* und *E. Vogelsanger:* Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 56(1965)1, S. 2...22.

[3] *J. Wiesinger:* Einfluss der Frontdauer der Stoßspannung auf das Ansprechverhalten von Funkensrecken. Bull. SEV 57(1966)6, S. 243...246.

[4] *G. M. Petropoulos, C. Menemenlis* and *P. Menemenlis:* Effect of the Electrode Surface Conditions on the Impuls Breakdown of Non-Uniform Field Gaps. Dielectrics 1(1962)2, S. 66...80.

[5] *J. Wiesinger:* Stoßstromionisierte Funkenstrecken. Bull. SEV 57(1966)4, S. 139...149.

[6] *C. F. Wagner:* Der Blitz und sein Einfluss auf das Verhalten von Freileitungen. ETZ-A 84(1963)16, S. 517...530.

[7] *C. F. Wagner* and *A. R. Hileman:* Effect of Predischarge Currents upon Line Performance. Trans. IEEE Power Apparatus and Systems 82(1963)65, S. 117...131.

[8] *C. F. Wagner:* Application of Predischarge Currents of Parallel Electrode Gaps. Trans. IEEE Power Apparatus and Systems 83(1964)9, S. 931...944.

[9] *C. F. Wagner* and *A. R. Hileman:* Mechanism of Breakdown of Laboratory Gaps. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 80(1961)56, S. 604...622.

Adresse des Autors:
Dr.-Ing. *Johannes Wiesinger,* Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Hochschule München, Arcisstrasse 21, D - 8 München 2.

Neues aus dem Gebiet der HF-Halbleitertechnik, insbesondere der Leistungstransistoren

Vortrag, gehalten an der 29. Hochfrequenztagung des SEV am 27. Oktober 1966 in Luzern,

von *W. Guggenbühl,* Zürich

621.382.3

Nach einer kurzen Beschreibung der modernen Transistorherstellungsverfahren und Bauformen werden die Frequenzgrenze und ihre Abhängigkeit von Trägertransportprozessen und Geometrie diskutiert. Der zweite Abschnitt behandelt Probleme der Leistungstransistoren im Hochfrequenzgebiet und konstruktive Massnahmen zur Verbesserung ihrer Eigenschaften. Im dritten Teil wird die Wirkungsweise zweier potentieller Mikrowellenleistungserzeuger der Zukunft besprochen. Während die Gunn-Diode einen neuartigen negativen Widerstandseffekt ausnützt, ist mit der Read-Diode die Realisierung eines der klassischen Röhren-Laufzeitdiode analogen Bauelementes auf Halbleiterbasis gelungen.

Une courte description des méthodes récentes de fabrication et des formes constructives modernes des transistors est suivie d'une discussion au sujet de la limite de fréquence et de sa relation aux procédés de transmission à onde porteuse et au point de vue géométrique. Le deuxième chapitre traite des problèmes relatifs aux transistors de puissance dans le domaine de la haute fréquence et des dispositions constructives en vue d'améliorer leurs propriétés. La troisième partie est consacrée au mode opératoire de deux générateurs de puissance à micro-ondes prévus dans l'avenir. Cependant que la diode-Gunn exploite un récent effet de résistance négative, la diode-Read a, sur la base des semiconducteurs, permis la réalisation d'un élément constructif analogue à la diode à modulation de vitesse.

1. Einleitung

Im folgenden werden einige Tendenzen und Neuentwicklungen aus dem Gebiet der Hochfrequenz-Halbleitertechnik behandelt. Sie schliessen sich an ein Referat über Transistoren [1][1]) an, das anlässlich einer früheren Tagung des SEV gehalten wurde. In Anbetracht der Fülle der seither auf diesem Gebiet geleisteten Arbeit ist eine Beschränkung auf einige spezielle Fragen unerlässlich. Als zentrales Thema sei die Leistungserzeugung gewählt, und dabei spezielles Gewicht auf die Hochfrequenzformen des bipolaren Transistors sowie auf einige neue Halbleiter-Schaltelemente für das Mikrowellengebiet gelegt. Der Name «Hochfrequenz» soll im Rahmen dieser Übersicht den Grenzfrequenzbereich der betreffenden Bauelemente, d.h. das Gebiet des frequenzbedingten Verstärkungsabfalls, bezeichnen. Eine zahlenmässige Fixierung des Begriffes «hohe Frequenz» ist deshalb nicht möglich, so ist der Hochfrequenzbereich der Transistoren im Laufe der Jahre von einigen Hundert Kilohertz bis über 1000 MHz «aufgestiegen». Von dieser Weiterentwicklung der Transistoren soll zunächst die Rede sein, insbesondere im Hinblick auf Elemente mit grosser Verlustleistung. Im zweiten Teil werden neue Wege zur Leistungserzeugung jenseits der Frequenzgrenze der Transistoren behandelt.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Frequenzgrenze moderner Transistoren

Die Fortschritte der Transistortechnik der letzten Jahre ist eng mit den modernen Verfahren der Halbleitertechnologie verknüpft. Während die grundlegenden Überlegungen zum Aufbau des sog. Flächentransistors, wie sie 1950 von *W. Shockley* formuliert wurden, im wesentlichen noch immer gültig sind,