Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 72 (1981)

Heft: 3

Artikel: Spannungsfestigkeit von Vakuumschaltern

Autor: Widl, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905069

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: 07.08.2025

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

Spannungsfestigkeit von Vakuumschaltern

Von W. Widl

621.316.542.9

Die physikalischen Vorgänge beim Vakuumdurchschlag werden beschrieben. Anschliessend wird auf die heutigen Prüfmethoden für Mittelspannungs-Vakuumschalter eingegangen, und zweckmässigere Methoden werden vorgeschlagen. Messresultate belegen die theoretischen Überlegungen.

Description des phénomènes physiques de la décharge dans le vide. Puis les méthodes d'essais appliquées actuellement aux disjoncteurs à vide de moyennes tensions sont discutées et des méthodes mieux adaptées sont proposées. Des résultats de mesures confirment les considérations théoriques.

1. Einleitung

Abhängig vom Spannungsbereich und den jeweiligen Randbedingungen können in Vakuumschaltstrecken sehr verschiedenartige Durchschlagsmechanismen wirksam sein. Diese werden in unterschiedlicher Weise vom Abstand, jedenfalls aber sehr wesentlich vom mikroskopischen Oberflächenzustand der Elektroden beeinflusst, also vom Material und von der Beanspruchung der Kontakte durch vorangegangene Schalthandlungen. Auch jeder Durchschlag, ja sogar das blosse Anlegen von Hochspannung kann die Oberflächen und damit die dielektrische Festigkeit der Schaltstrecke erheblich verändern. Da die Entstehung der entscheidenden mikroskopischen Oberflächenstruktur der Kontakte ein Zufallsereignis ist, streut die Spannungsfestigkeit auch unter genau festgelegten Versuchsbedingungen erheblich.

Die völlig anderen Gesetzmässigkeiten des Vakuumdurchschlages erfordern aber auch andere Prüfmethoden als der Durchschlag in Gasen oder Flüssigkeiten. Statistische Versuche sind nur dann sinnvoll, wenn die Kontakte nach jedem Spannungsversuch – selbst wenn er nicht zum Durchschlag geführt hat – erneut durch eine wohldefinierte Schalthandlung formiert werden.

Im folgenden werden die Auswirkungen der verschiedenartigen Durchschlagmechanismen von Vakuumschaltstrecken nach unterschiedlichen Vorbeanspruchungen beschrieben, durch Versuchsergebnisse belegt und daraus praktische Konsequenzen für das Prüfen und Bewerten von Vakuumschaltstrecken gezogen.

2. Die Mechanismen des Vakuumdurchschlags

In einer Vakuum-Schaltkammer können elektrische Entladungen nur im Metalldampf der Elektroden erfolgen. Zur Bildung einer ausreichenden Metalldampfmenge muss mindestens einer Elektrode die erforderliche Energie in entsprechender Weise zugeführt werden. Die Energiezufuhr kann durch Elektronen, Ionen oder geladene mikroskopische Partikel erfolgen.

2.1 Durchschlag zufolge Feldemission

Durch hohe elektrische Feldstärken werden Elektronen aus der Kathode befreit und über den Kontaktspalt beschleunigt. Die Emission erfolgt dabei an bevorzugten Stellen, die eine wesentliche Feldverstärkung und/oder Verringerung der effektiven Austrittsarbeit bewirken. Der Feldemissionsstrom ist nach der quantenmechanischen Theorie von *Fowler* und *Nordheim* berechenbar [1]:

$$I = \frac{1{,}54 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha \cdot U^2 \cdot \beta^2}{d^2\, \Phi\, t^2 \left(3{,}79 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\beta \cdot U/d} \,/\, \Phi\right)} \cdot \tag{1}$$

$$\cdot \exp\left(-\,6{,}83 \cdot 10^9 \, \frac{\Phi^{3/2} \cdot d}{\beta \cdot U} \cdot v\left(3{,}79 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\beta \cdot U/d} \,/\, \Phi\right)\right)$$

U Anliegende Spannung in V
I Feldemissionsstrom in A
d Kontaktdistanz in m
Φ Austrittsarbeit in eV
α Emittierende Fläche in m^2
β Feldverstärkungsfaktor
$v(x)$, $t(x)$: Elliptische Funktionen

Näherung:
$v(x) = 1 - 6{,}31 \cdot 10^{-9}\, x - 1{,}39 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{x}$
$t(x) = 1 + 3{,}25 \cdot 10^{-10}\, x + 5{,}81 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{x}$

Wird für Φ der Wert 4,5 eV eingesetzt, was für die meisten Metalle gilt, so lassen sich α und β aus der gemessenen Stromspannungscharakteristik einer Vakuumisolierstrecke berechnen [2]. Versuche mit vorbelasteten Vakuumschaltern ergeben bei grossen Streuungen Werte um $\alpha = 10^{-16}\ m^2$ und $\beta = 2000$. Figur 1 zeigt eine Stromspannungscharakteristik bei für Vakuumschalter typischen Bedingungen.

Der Feldemissionsstrom kann prinzipiell auf zwei Arten einen Durchschlag auslösen:

a) durch Verdampfung des Emissionszentrums auf der Kathode (Joulsche Wärme, eventuell geringer Beitrag des Nottinghameffekts);

b) durch Verdampfen von Anodenmaterial im Feldelektronenstrahl (vorzugsweise Vorsprünge mit schlechter Wärmeableitung).

Während für Mechanismus a) vorwiegend die Emissionsstromdichte und somit die Feldstärke an der Kathode massgebend ist, spielt bei b) auch die Energie der auftreffenden Elektronen (also die anliegende Spannung) eine Rolle. Tatsächlich erfolgt der Durchschlag bei höheren Spannungen (bzw. Kontaktdistanzen) bereits bei kleineren Emissionsströmen, die Auswirkung auf die Durchschlagspannungen ist jedoch wegen des exponentiellen Zusammenhanges zwischen Strom und Feldstärke an der Kathode gering. Für praxisorientierte Betrachtungen in einem relativ engen Spannungsbereich (Mittelspannungs-Vakuumschalter) ist eine Unterscheidung zwischen diesen beiden Mechanismen daher nicht nötig. Der Durchschlag erfolgt bei Erreichen einer kritischen mikroskopischen Feldstärke an einem Emissionszentrum auf der Kathode. Da die emittierenden mikroskopischen Strukturen sehr klein gegenüber der Kontaktdistanz sind, ist die mikroskopische Feldstärke proportional zur makroskopischen Feldstärke. Die Durchschlagspannungen steigen daher im Bereich des feldemissionsbestimmten Durchschlags annähernd linear mit der Kontaktdistanz.

Die thermische Zeitkonstante der durch den Feldemissionsstrom verdampften mikroskopischen Gebilde ist sehr klein (ns), so dass der Durchschlag sehr schnell erfolgt. Es kann daher nicht damit gerechnet werden, dass die Stoßspannungsfestigkeit höher ist als die Wechselspannungsfestigkeit.

2.2 Durchschlag zufolge Lawineneffekts

Eine Lawinenentladung kommt zustande, wenn positive Ionen an der Kathode negative Ionen herausschlagen und diese negativen Ionen an der Anode wieder positive Ionen erzeugen. Durch ein solches Lawinenspiel kann schliesslich ausreichend Material verdampft werden, um einen Durchschlag einzuleiten. Führt die Lawinenentladung nicht zum Durchschlag, so werden die entstehenden Stromimpulse als Mikroentladungen bezeichnet. Allgemein wird jedoch angenommen, dass dieser Entladungsmechanismus nur bei Vorhandensein adsorbierter Gasmoleküle auf den Metalloberflächen zustande kommen kann, dass also Lawinenentladungen bei gasfreien Elektrodenoberflächen unmöglich sind. Tatsächlich treten bei Vakuumschaltröhren, die ohnedies entgast werden müssen, im untersuchten Mittelspannungsbereich weder Mikroentladungen noch eindeutig durch Lawineneffekte verursachte Durchschläge auf.

2.3 Partikeldurchschlag

Geladene Partikel können von einer Kontaktoberfläche durch elektrostatische Kräfte abgerissen und über den Kontaktspalt beschleunigt werden. Dabei kann das Partikel auf verschiedene Weise einen Durchschlag auslösen [3].

Geht man davon aus, dass das Partikel der Elektrode eine bestimmte Energie zuführen muss, um einen Durchschlag zu bewirken, so müssten die Durchschlagspannungen etwa mit der Wurzel aus der Kontaktdistanz steigen. Die Ladung Q des Partikels ist nämlich proportional der an der Kontaktoberfläche herrschenden Feldstärke E und die Energie $Q \cdot U$ des am gegenüberliegenden Kontakt ankommenden Partikels somit proportional $E \cdot U$ oder U^2/d (d Kontaktdistanz, U anliegende Spannung). Da im Gegensatz dazu die Durchschlagspannung beim feldemissionsbestimmten Durchschlag annähernd linear mit der Kontaktdistanz steigt, ist mit Partikeldurchschlägen generell erst bei höheren Kontaktdistanzen bzw. Spannungen zu rechnen.

Sind auf den Kontaktoberflächen keine lose haftenden Partikel vorhanden, so erfolgt der Durchschlag unter Umständen erst bei sehr hohen Spannungen, wenn die elektrostatischen Kräfte ausreichen, um Materialteile aus den Kontakten herauszureissen. Diese dadurch gegebene hohe Spannungsfestigkeit darf bei Vakuumschaltern aber keinesfalls erwartet werden, da bei Schalthandlungen immer mit dem Entstehen einer mehr oder weniger grossen Anzahl loser Partikel gerechnet werden muss.

Ein Partikel benötigt für die Überquerung eines Kontaktspaltes von 10 mm mindestens einige 10 µs. Bei Versuchen mit Blitzstoßspannung treten daher im allgemeinen keine Partikeldurchschläge auf.

3. Das dielektrische Verhalten von Mittelspannungs-Vakuumschaltern

In dem relevanten Bereich von Kontaktdistanzen zwischen 10 und 20 mm bzw. Durchschlagspannungen zwischen etwa 30 und 150 kV stellt der Durchschlag zufolge Feldemission den dominierenden Mechanismus dar [4; 5]. Partikeldurchschläge treten nur unter besonderen Bedingungen (nach Kurzschlußstromabschaltungen) und bei hohen Spannungen auf, sofern nicht eher ein Durchschlag durch Feldemission erfolgt. Da Partikeldurchschläge ausserdem bei Blitzstoßspannung unwirksam sind, begrenzen sie die Nennspannung bei Mittelspannungs-Vakuumschaltern im allgemeinen nicht.

Die Spannungsfestigkeit von Mittelspannungs-Vakuumschaltern wird also durch Emissionszentren auf der Kathode bestimmt. Die Erfahrung zeigt, dass die effektivsten Emissionszentren beim stromlosen Aufreissen von Schweißstellen gebildet werden [2; 5]. Ausschaltlichtbögen zerstören diese Zentren und verbessern daher die Spannungsfestigkeit. Besonders hohe Durchschlagspannungen ergeben sich nach leistungsschwachen Durchschlägen, da diese gezielt die stärksten Emissionszentren vernichten. Aus diesem Grund täuschen wiederholte Durchschlagsversuche eine viel zu hohe Spannungsfestigkeit vor.

Da der Durchschlag wegen der geringen thermischen Zeitkonstante der emittierenden Spitzen sehr schnell erfolgt, ist die Stoßspannungsfestigkeit nicht höher als die Wechselspannungsfestigkeit. Da in den entsprechenden Vorschriften (IEC Publ. 56) aber eine höhere Stoßspannungsfestigkeit gefordert wird, kann die Wechselspannungsfestigkeit eines Vakuumschalters im allgemeinen nicht voll ausgenutzt werden.

Statistische Streuungen der Spannungsfestigkeit treten aus zweierlei Gründen auf:

a) Die Entstehung mikroskopischer emittierender Gebilde bei Schalthandlungen stellt ein Zufallsereignis dar, d.h., eine wohldefinierte Schalthandlung bestimmt lediglich eine Verteilungsfunktion von Durchschlagspannungen. Versuche zeigen im allgemeinen annähernd eine Normalverteilung mit einer Standardabweichung um 15 %.

b) Bei längerem Anliegen von Spannung (Betriebsspannung am offenen Schalter) führen Oberflächendiffusionsvorgänge zu zufälligen Veränderungen an den Emissionszentren. Die mittlere Emissionsfähigkeit sinkt dabei in den ersten Sekunden und bleibt dann gleich. Trotzdem können die überlagerten statistischen Schwankungen irgendwann zu einer Oberflächenstruktur führen, die einen Durchschlag verursacht.

Die rechnerische Untersuchung dieses statistischen Effekts nach [6] geht von der Annahme aus, dass die Durchschlagwahrscheinlichkeit spätestens einige Sekunden nach Anlegen der Spannung (nach Erreichen eines konstanten Mittelwertes der Emissionsfähigkeit) in jedem Zeitintervall Δt gleich gross und nur von der anliegenden Spannung abhängig ist. Dann ergibt sich:

$$W = e^{-\alpha \cdot T} \qquad (2)$$

W Wahrscheinlichkeit dafür, dass bis zur Zeit T nach Anlegen der Spannung kein Durchschlag erfolgt

T Zeit (bei Wechselspannung muss $T \gg 20$ ms sein)

α Durchschlagwahrscheinlichkeitsdichte ($\alpha \cdot \Delta t$ ist die Durchschlagwahrscheinlichkeit für das Zeitintervall Δt).

Versuche zeigten die näherungsweise Gültigkeit dieser Formel. Die Schwierigkeit liegt jedoch in der Bestimmung der Funktion $\alpha(U)$ (U anliegende Spannung), da entsprechende Langzeitversuche sehr aufwendig sind. In [6] wird eine Funktion $\alpha = \alpha_0 \cdot (U - U_0)^2$ vorgeschlagen, wobei für $U < U_0$ $\alpha = 0$ gilt. Dies würde eine hundertprozentige Sicherheit für Spannungen $< U_0$ bedeuten. Eigene Versuche (siehe Abschnitt 5) deuten eher auf einen exponentiellen Zusammenhang der Form $\alpha = \alpha_0 e^{kU}$ hin.

In der Praxis sind beide statistischen Effekte a) und b) wirksam, d.h., nach der zufälligen Bildung von Emissionszentren zufolge einer Schalthandlung unterliegen diese weiteren zufälligen Veränderungen unter dem Einfluss der Betriebsspannung. Dabei verbessert sich die Spannungsfestigkeit in den ersten Sekunden, fällt aber bei längerem Anliegen von Spannung aus den erwähnten statistischen Gründen wieder etwas ab. Als grobe Faustformel kann gelten, dass ausreichende

Langzeitspannungsfestigkeit etwa 30% unter der Durchschlagspannung gegeben ist, die mit einer mit 10 kV/s gesteigerten Wechselspannung gemessen wurde. Bei Stoßspannung sind diese statistischen Effekte unwirksam (kurze Dauer der Beanspruchung). Die Verringerung der mittleren Emissionsfähigkeit in den ersten Sekunden einer Wechselspannungsbeanspruchung verbessert daher bleibend die Stoßspannungsfestigkeit [7].

Die Wirksamkeit der bei einer Schalthandlung entstehenden Emissionszentren hängt auch wesentlich vom Kontaktmaterial ab. Als härteste Beanspruchung ist bei allen Materialien das Aufreissen von Schweißstellen zu betrachten. Die Entstehung solcher Schweißstellen bei Einschaltvorgängen ist wegen der Hautschichtfreiheit der Kontakte bei allen bekannten Kontaktmaterialien unvermeidbar; zudem können bereits minimale Verschweissungen, die kaum messbare Aufreisskräfte verursachen, die Spannungsfestigkeit wesentlich herabsetzen. Generell entstehen beim Aufreissen von Schweißstellen bei härteren Kontaktmaterialien weniger effektive Emissionszentren. Zum Beispiel ist Cu/W-Sintermaterial spannungsfester als Cu/Cr-Sintermaterial und letzteres wieder spannungsfester als eine Cu/Bi-Legierung.

Bei Kurzschlußstromabschaltungen werden durch den kontrahierten Vakuumlichtbogen zahlreiche Partikel verschiedenster Grösse erzeugt, die ideale Vorbedingungen für einen Partikeldurchschlag bieten. Versuche zeigten tatsächlich, dass in diesem Fall die Wechselspannungsfestigkeit verringert wird, ohne dass effektivere Emissionszentren erzeugt worden wären [4; 5]. Für die Praxis ist dieser Fall aber meist nicht von Bedeutung, da die Beeinträchtigung der Spannungsfestigkeit geringer ist als durch das Aufbrechen von Schweißstellen. Ausserdem verfügt der Vakuumschalter hier noch über ungenützte Reserven, da die in den Vorschriften geforderte Wechselspannungsfestigkeit wesentlich niedriger liegt als die Stoßspannungsfestigkeit und letztere ja nicht verringert wird. Erfahrungsgemäss stellt der Partikeldurchschlag erst bei höheren Spannungen (Nennspannung pro Element > 30 kV) ein ernstliches Problem dar. Dort setzt er aber eine praktische Grenze für eine weitere Erhöhung der Nennspannung, da nun alle Isolationsdistanzen mindestens quadratisch mit der Spannung erhöht werden müssten.

4. Prüfung von Vakuumschaltern

Eine Hochspannungsprüfung nach den geltenden Vorschriften (IEC Publ. 56) liefert keine für die Praxis verwertbaren Ergebnisse, da weder der wesentliche Einfluss der letzten Schalthandlung noch die starke Streuung der Spannungsfestigkeit berücksichtigt werden. Strenggenommen müssten Versuchsserien bestehend aus jeweils einer Schalthandlung und einem Hochspannungstest für alle Arten von Schalthandlungen und Prüfspannungen durchgeführt werden. Da die härtesten Beanspruchungen meist bekannt sind (im allgemeinen symmetrisches Einschalten auf den höchsten zulässigen Kurzschlußstrom gefolgt von stromlosem Öffnen und nachfolgende Stoßspannungsbeanspruchung), würde die Prüfung dieses Schaltfalls ausreichen[1]). Versuche zeigten jedoch, dass diese Kombination im allgemeinen nicht beherrscht wird (siehe Abschnitt 5). Es kann also nicht erwartet werden, dass Vakuumschalter die in IEC Publ. 56 geforderte Spannungsfestigkeit nach allen zulässsigen Schalthandlungen tatsächlich aufweisen.

Andererseits erscheint die angegebene Beanspruchungskombination jedoch unrealistisch. Nach dem stromlosen Öffnen des verschweissten Schaltkontaktes wird nämlich entweder zunächst die Betriebsspannung an den Schalter gelegt, durch deren Einfluss die Spannungsfestigkeit der Schaltstrecke bis zum Auftreten des Spannungsstosses verbessert wird [2; 7], oder es bleibt der Stossdurchschlag bei nicht anliegender Betriebsspannung ohne Folgen. Als praktisch härteste Schaltfälle sind deshalb anzusehen: Einschalten auf Kurzschluss gefolgt von stromlosem Öffnen und anschliessend

a) Beanspruchung durch die beim Einschalten von Wechselspannung über dem Schalter auftretende Schaltüberspannung;

b) Stoßspannungsbeanspruchung nach längerem (etwa 1 min) Anliegen der Betriebsspannung.

Eine Prüfung der Beanspruchung nach a) wäre mit Schaltspannung durchzuführen. Können Partikeldurchschläge ausgeschlossen werden, so kann diese Prüfung auch mit Blitzstossspannung durchgeführt werden. Nach b) kann nur mit Mischspannung geprüft werden (Nennwechselspannung mit überlagerter Blitzstoßspannung; die Stoßspannungsprüfung kann auch nach dem Abschalten der Wechselspannung erfolgen). Eine Reduzierung des Prüfaufwandes in diesem Fall wäre erst nach ausreichender Erfahrung mit Mischspannungsprüfungen bei Vakuumschaltern möglich. Insbesondere ist zu beachten, dass die Wechselspannungsvorbelastung nur mit Nennspannung und bei der vollen Kontaktdistanz erfolgt, da höhere Wechselspannungsbelastung durch Verstärkung der Oberflächendiffusionsvorgänge die Stoßspannungsfestigkeit verbessert. Bei Prüfung der Schaltfälle a) und b) bleibt der absolut härteste Schaltfall unberücksichtigt, nämlich Einschalten auf Kurzschluss, stromloses Öffnen, Einschalten der Betriebsspannung über dem offenen Schalter und Blitzeinschlag während der ersten Perioden. Dieser Fall erscheint aber sehr unwahrscheinlich.

Anzustreben wäre also eine Prüfvorschrift für Mittelspannungs-Vakuumschalter, die den Einfluss von Schalthandlungen und die statistischen Streuungen der Spannungsfestigkeit ausreichend berücksichtigt. Ausserdem müssten für Vakuumschalter eigene Isolationsvorschriften geschaffen werden, die unwahrscheinliche Schaltfälle nicht berücksichtigen. Wird aber darauf Wert gelegt, dass der Vakuumschalter alle denkbaren Schaltfälle beherrscht, so wären konstruktive Änderungen nötig (höhere Kontaktdistanzen).

5. Messungen an kommerziellen Vakuumschaltröhren

Sechs Typen von Vakuumschaltröhren mit Cu/Bi- bzw. Cu/Cr-Kontakten wurden nach verschiedenen Schalthandlungen (Ausschaltlichtbögen, stromloses Öffnen nach verschiedenen Einschaltvorgängen) mit Wechselspannung (gesteigert mit 10 kV/s) bzw. Stoßspannung (50 kV/µs) geprüft. Details über Prüfmethode und Versuchsanlage sind aus [5] zu entnehmen. Als Durchschlagspannung wird bei Wechselspannung der Scheitelwert der Periode vor dem Durchschlag bezeichnet, bei Stoßspannung der Spannungswert unmittelbar vor dem Durchschlag. Zur Vermeidung von Aussenüberschlägen befan-

[1]) Die Kurzschlußstromabschaltung ist für Mittelspannungs-Vakuumschalter meist keine kritische Belastung, da dadurch nur die Wechselspannungsfestigkeit etwas verringert, die Stoßspannungsfestigkeit dagegen sogar verbessert wird [4; 5].

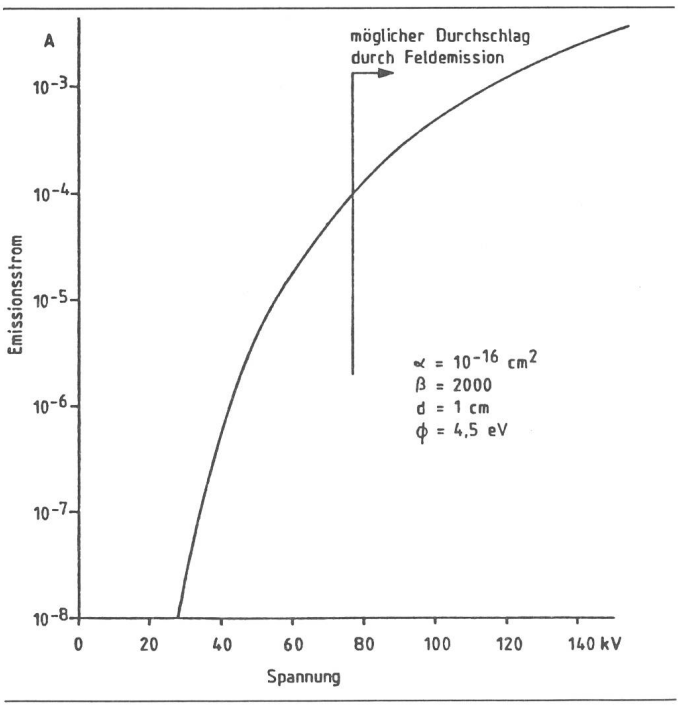

Fig. 1 Stromspannungscharakteristik einer Vakuumisolierstrecke unter für Vakuumschalter typischen Bedingungen

den sich die Röhren in einem Ölgefäss. Ausser der Spannung wurde auch der Vorstrom (Feldemissionsstrom) gemessen und die Spannung U_{-4} berechnet (Spannung, die 10^{-4} A Feldemissionsstrom bewirkt, nach [8]). Diese Daten ermöglichen Aussagen über den Durchschlagsmechanismus, da bei feldemissionsbedingtem Durchschlag eine Korrelation zwischen den Durchschlagspannungen und den U_{-4}-Spannungen bestehen muss. Ausserdem stellt U_{-4} eine Art Grenzspannung für feldemissionsbedingte Langzeitdurchschläge dar, da der Emissionsstrom für Spannungen $< U_{-4}$ steil auf unkritische Werte abfällt (Fig. 1).

Jede Versuchsserie bestand aus 25 Einzelversuchen (jeweils eine Schalthandlung und ein Hochspannungsversuch). Es werden die 10-, 50- und 90%-Werte (Quantile) aus dem Wahrscheinlichkeitsnetz statt der Mittelwerte und Standardabweichungen angegeben, da die Verteilungen manchmal unsymmetrisch waren.

Es wurde versucht, alle Röhren unter äquivalenten Bedingungen zu prüfen, um Vergleiche anstellen zu können. Von wesentlichem Einfluss war neben der Kontaktdistanz vor allem die Prellcharakteristik beim Einschalten. Die Kontaktkraft vergrösserte zwar die Schweisskräfte, hatte aber keinen wesentlichen Einfluss auf das dielektrische Verhalten des offenen Schalters. Die Versuchsbedingungen betrugen: Ausschaltgeschwindigkeit 1 m/s, Einschaltgeschwindigkeit 1 m/s, Kontaktkraft 500 N (bei Röhre 4: 800 N).

Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass im Bereich des feldemissionsbestimmten Durchschlages die Durchschlagspannungen bei Blitzstoßspannung stets etwas unter denen bei Wechselspannung liegen [4; 5]. Es wurden daher hauptsächlich Wechselspannungsversuche ausgeführt (die durch die Aufnahme des Feldemissionsstromes mehr Information pro Versuch bieten); die Stoßspannungsfestigkeit wurde nur in einzelnen Versuchsserien kontrolliert.

Es war nicht möglich, alle Röhren in gleicher Weise durch Einschaltvorgänge zu belasten, da bei den Röhren 1 bis 3 die geforderte Prelldauer nicht realisiert werden konnte (weiches Kontaktmaterial). Bei diesen Röhren wurde daher nur der Einfluss des Vorzündlichtbogens bei Vorzünddistanzen bis 2,5 mm untersucht; diese Vorzünddistanz ist im Hinblick auf die gemessenen Werte der Spannungsfestigkeit realistisch. Dabei wurde der Vorzündlichtbogen bei Erreichen der vorgegebenen Kontaktdistanz durch einen Hochspannungsimpuls gezündet, um die Streuungen nicht durch Einführung eines weiteren Zufallsereignisses zu erhöhen.

Die Versuchsergebnisse sind in den Figuren 2a bis 2f zusammengefasst. Von links nach rechts sind Versuche nach in dielektrischer Hinsicht immer härteren Schalthandlungen aufgetragen. Alle Röhren zeigten im wesentlichen das in Abschnitt 3 beschriebene Verhalten. Dennoch ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen 1 bis 3 (Cu/Bi-Kontakte) und 4 bis 6 (Cu/Cr-Kontakte). Bemerkenswert ist besonders:

– Die Röhren 1 bis 3 zeigen nach allen Vorbelastungen feldemissionsbedingtes Durchschlagsverhalten. Bei den Röhren 4 bis 6 traten nach Ausschaltlichtbögen (teilweise auch noch nach stromlosem Schalten) nur sehr kleine Feldemissionsströme vor dem Durchschlag auf, die Durchschlagspannungen lagen bei Stoßspannung noch höher als bei Wechselspannung. Die Spannungsfestigkeit war in diesem Fall also ausgezeichnet und wurde vermutlich erst durch Partikeldurchschläge begrenzt.

– Spätestens nach dem Einschalten des Nennstromes und folgendem stromlosen Aufreissen der Schweißstelle tritt bei

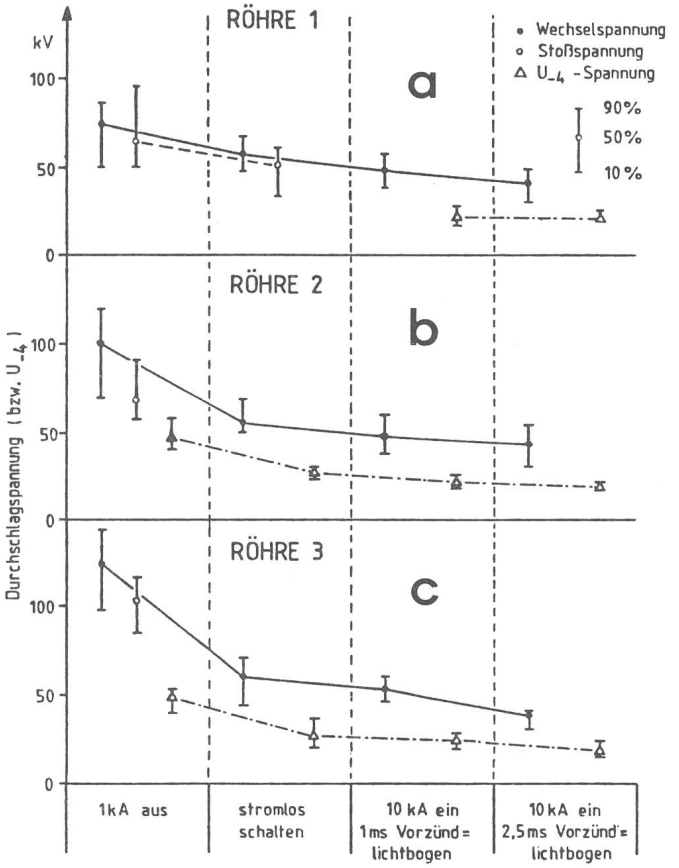

Fig. 2a–2c Durchschlagspannungen und U_{-4}-Spannungen von verschiedenen Vakuumschaltröhren nach Ausschaltlichtbögen, stromlosem Schalten und Einschalten verschiedener Ströme, gefolgt von stromlosem Öffnen (Scheitelwerte)
Cu/Bi-Kontakte, Kontaktdistanz 10 mm

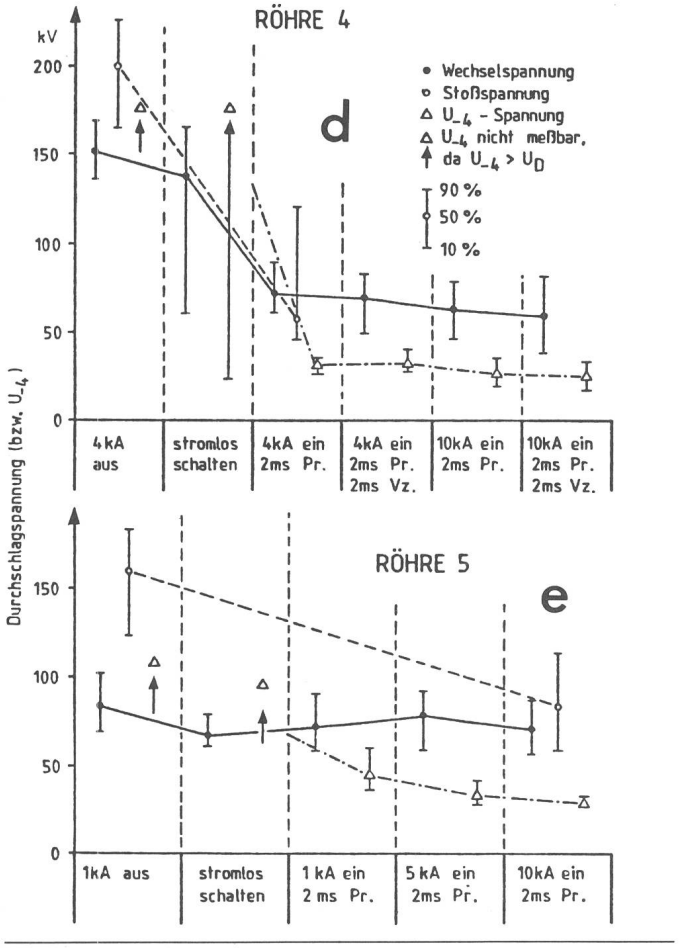

Fig. 2d, 2e **Gleich wie Fig. 2a–2c, jedoch Cu/Cr-Kontakte**
Pr. = Prellen; Vz. = Vorzündlichtbogen

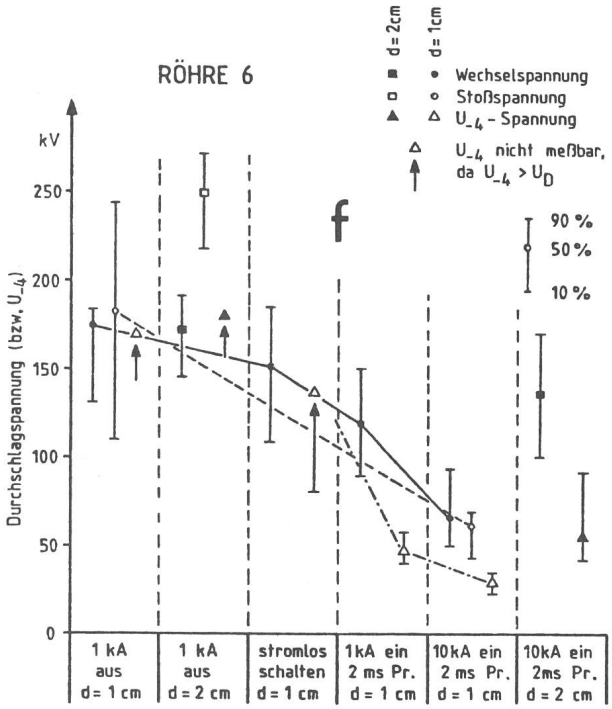

Fig. 2f **Wie Fig. 2e, jedoch Kontaktdistanz 10 mm bzw. 20 mm**

allen Schaltröhren feldemissionsbestimmter Durchschlag mit wesentlicher Verringerung der Durchschlagspannung besonders bei Stoßspannung auf. Auch in diesem Bereich zeigen aber die Röhren 4 bis 6 höhere Spannungsfestigkeit als die Röhren 1 bis 3, was durch schwächere Feldemission bedingt ist.

– Die Messungen mit Röhre 6 bei doppelter Kontaktdistanz (20 mm) zeigten, dass die Spannungsfestigkeit im Bereich des feldemissionsbestimmten Durchschlages (also im kritischen Bereich) aufs Doppelte ansteigt. Nach Nennstromausschaltungen erhöht sich lediglich die Stoßspannungsfestigkeit wesentlich, bei Wechselspannung tritt nur eine geringe Zunahme der Durchschlagspannungen auf (Partikeldurchschlag). Die starke Verringerung der dielektrischen Festigkeit durch das Aufbrechen von Schweißstellen kann also durch Vergrösserung der Kontaktdistanz noch wirksam bekämpft werden.

Zusätzliche Versuche sollten Aufschluss über das dielektrische Langzeitverhalten geben, das von Vakuumschaltern erwartet werden kann. Die Versuche wurden mit Röhre 5 bei 10 mm Kontaktdistanz ausgeführt. Auf Schalthandlungen zwischen den einzelnen Hochspannungsversuchen wurde verzichtet, um vom gleichen Ausgangszustand ausgehend nur den Einfluss der angelegten Spannung (Effekt (b) in Abschnitt 3) zu erfassen. Es wurden 5 Versuchsserien mit 5 verschiedenen Spannungen durchgeführt. Bei jedem Einzelversuch wurde die Spannung mit 10 kV/s bis zum vorgegebenen Wert gesteigert und der Zeitverzug vom Erreichen dieses Wertes bis zum Durchschlag gemessen.

Figur 3 zeigt die Summenhäufigkeiten des so gemessenen Verzuges. Der Häufigkeitsmaßstab ist logarithmisch geteilt, wodurch die Messergebnisse bei Gültigkeit von Gleichung 2 für jede Spannung auf einer Geraden durch den Punkt (0, 1) liegen müssten, die in der linken oberen Ecke beginnt (wenn die Spannung 0 s anliegt, ist die Wahrscheinlichkeit für «kein Durchschlag» gleich 1). Legt man solche Geraden durch die Messpunkte, so kann man für jede Gerade (Spannung) den Wert α ermitteln. Die Werte von α sind in Figur 4 über der

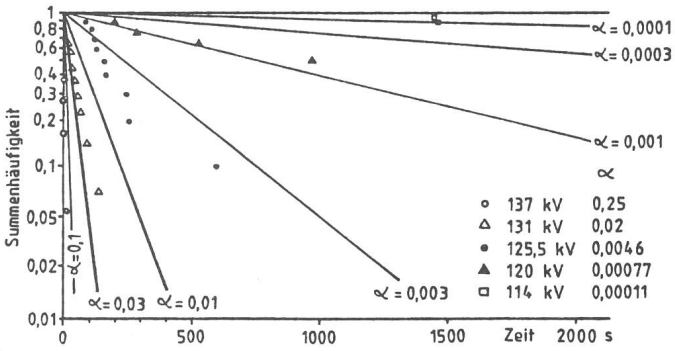

Fig. 3 **Summenhäufigkeit für «kein Durchschlag bis zur Zeit *T*» in Abhängigkeit von der Dauer der Wechselspannungsbeanspruchung für verschiedene Spannungen**
Zum Vergleich sind Linien konstanter Durchschlagswahrscheinlichkeitsdichte eingetragen. Röhre 5, 10 mm Kontaktdistanz, keine Vorbeanspruchung durch Schalthandlungen.
α Durchschlagswahrscheinlichkeitsdichte nach Gl. (2)

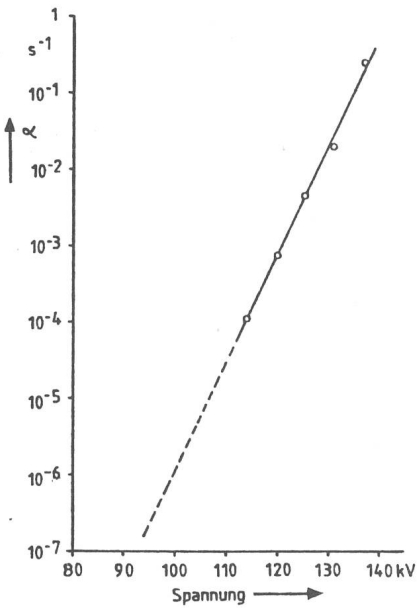

Fig. 4 Durchschlagswahrscheinlichkeitsdichte α in Abhängigkeit von der Spannung, Auswertung von Fig. 3

Spannung aufgetragen. Bei logarithmischer Teilung des Massstabes für α ergibt sich eine Gerade, was einem Zusammenhang der Form $\alpha = \alpha_0 \cdot e^{kU}$ entspricht. Gestrichelt ist eine (allerdings problematische) Extrapolation zu sehr kleinen Werten von α eingezeichnet. Messungen in diesem Bereich sind sehr zeitaufwendig, da jeder Einzelversuch Tage bis Wochen dauern müsste. $\alpha = 10^{-7}$ etwa würde eine 10%ige Durchschlagswahrscheinlichkeit in 12 Tagen bedeuten.

Diese Versuche sollten die Grössenordnung aufzeigen, in der sich dielektrische Langzeiteffekte bei Vakuumschaltern bewegen. Danach kann als grobe Schätzung angegeben werden, dass die 10%-Durchschlagspannung für 1 Monat etwa 30% unter der 10%-Durchschlagspannung für 1 min liegt. Um genauere Informationen zu erhalten, müssten mehr Versuche über längere Zeiträume mit durch Schalthandlungen vorbelasteten Kontakten durchgeführt werden.

6. Zusammenfassung

Das dielektrische Verhalten von Vakuumschaltern unterscheidet sich grundlegend von dem gas- oder flüssigkeitsisolierter Schalter, da andere Durchschlagsmechanismen wirksam sind. Die Nennspannung wird bei Mittelspannungsschaltern fast ausschliesslich durch feldemissionsbestimmte Durchschläge nach dem Aufbrechen von Schweißstellen begrenzt. Daraus ergeben sich folgende dielektrische Eigenschaften:

– die Spannungsfestigkeit hängt von der vorhergehenden Schalthandlung stark ab, kritisch ist das stromlose Aufreissen von Schweißstellen

– die Spannungsfestigkeit streut stark

– die Stoßspannungsfestigkeit ist etwas niedriger oder höchstens gleich der Kurzzeit-Wechselspannungsfestigkeit

– es treten Langzeiteffekte auf, die Durchschläge noch lange nach Anlegen der Spannung bewirken können

– die Spannungsfestigkeit steigt für alle Spannungsarten fast linear mit der Kontaktdistanz.

Durch diffuse Ausschaltlichtbögen oder Durchschläge kann die Spannungsfestigkeit wesentlich erhöht werden; es treten dann auch andere Durchschlagsmechanismen auf (Partikeldurchschlag). Dieser Konditionierungseffekt darf aber während der Prüfung nicht ausgenutzt werden, da das Auftreten von Verschweissungen im Betrieb nicht zu vermeiden ist und beim Aufreissen der Schweißstellen effektive Feldemissionszentren entstehen.

Bei der dielektrischen Prüfung von Vakuumschaltern muss jeder Hochspannungsprüfung eine Schalthandlung vorangehen; die Spannungsfestigkeit ist also als Funktion dieser Schalthandlung zu sehen. Ausserdem muss eine ausreichende Anzahl von Versuchen ausgeführt werden, da die Ergebnisse stark streuen. Im allgemeinen führen jene Schalthandlungen zur stärksten Reduktion der Spannungsfestigkeit, welche auch die stärksten Verschweissungen bewirken; die Auswahl der härtesten Belastung ist also leicht möglich.

Literatur

[1] *S. Flügge:* Handbuch der Physik. Band XXI: Elektronen-Emission. Gasentladungen I. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1956.

[2] *K. Fröhlich* and *W. Widl:* Determination of the microscopic field enhancement factor β of prestressed vacuum interrupter contacts. Quatorcième Conférence Internationale sur les Phénomènes d'Ionisation dans les Gaz, Grenoble 1979. Rapport C 7–407.

[3] *G. A. Farrall:* Conduction and breakdown in vacuum. Digest of Literature on Dielectrics 41(1977), p. 266...309.

[4] *K. Fröhlich:* On the steady state breakdown voltage of a vacuum interrupter. Proceedings of the Eighth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 1978, paper E6.

[5] *W. Widl:* Spannungsfestigkeit von Vakuumschaltern nach verschiedenen Schalthandlungen. Dissertation der Technischen Universität Wien, 1980.

[6] *M. Hrabovsky:* Statistical behaviour of field-emission initiated vacuum breakdown. Proceedings of the Fifth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum 1972, p. 93...97.

[7] *H. Günther* und *R. Fiebig:* Der Einfluss der Wechselspannungsvorbeanspruchung auf Durchschlagblitzspannung einer Vakuumschaltstrecke. Wissenschaftlich-Technische Mitteilungen des IPH (Institut «Prüffeld für Hochleistungstechnik») (1979)21, S. 10...12.

[8] *B. Jüttner:* Erzeugung von Feldemissionszentren durch Lichtbögen auf Kathoden von Vakuumbogenlöschkammern. Wissenschaftlich-Technische Mitteilungen des IPH (Institut «Prüffeld für Hochleistungstechnik») (1978)19, S. 15...20.

Adresse des Autors

Dr. *Wolfgang Widl*, Technische Universität Wien, Ordinariat für Schalterbau, Gusshausstrasse 25, A-1040 Wien.