

**Dipl.-Ing. Stefan Bühler**

**„Der Einfluß der Temperatur und der absoluten Feuchtigkeit auf das Durchschlagverhalten inhomogener Luftfunkenstrecken bei negativen Stoßspannungen“**

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Feser

Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. K. Schumacher

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Juli 1998

Kurzfassung:

Die atmosphärische Luft ist einer der am häufigsten verwendeten Isolierstoffe in der Hochspannungstechnik. Luft enthält außer verschiedenen Gasen wie Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid immer auch gelöstes Wasser. Zusammen mit der Temperatur beeinflusst Wasser auf vielfältige Weise die elektrischen Entladungen und damit die Isolationsfähigkeit der Luft. In der Hochspannungstechnik müssen deshalb diese klimatischen Einflüsse berücksichtigt werden. Auf empirischem Wege sind in der Vergangenheit Korrekturgleichungen entwickelt und Korrekturfaktoren bestimmt worden, die es ermöglichen sollen, gemessene Durchschlagspannungen bei Kenntnis der Temperatur, des Luftdrucks und der Feuchtigkeit auf Standardbedingungen (20°C, 101,3 kPa, 11 g Wasser pro Kubikmeter Luft) umzurechnen.

Bei negativen Stoßspannungen bestehen diesbezüglich noch große Wissenslücken. Das liegt zum einen daran, daß für die Dimensionierung von Betriebsmitteln die positive Stoßspannung die wichtigere ist, zum anderen liegt es in den komplizierten Entladungsvorgängen bei negativer Polarität begründet. Die Aussagen in der Literatur zur Klimaabhängigkeit der 50%-Durchschlagspannung  $U_{50}$  sind nicht einheitlich und zum Teil widersprüchlich. Besonders bei inhomogenen Funkenstrecken besteht noch ein großer Forschungsbedarf.

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluß der Temperatur und der absoluten Feuchtigkeit auf das Durchschlagverhalten einer inhomogenen Stab-Platte Anordnung untersucht. Ziel ist, die in den Richtlinien vorgeschlagenen Korrekturfaktoren zu verifizieren bzw. neue vorzuschlagen. Insbesondere werden Ursachen für die aufgezeigten Widersprüche dargelegt.

In einer kurzen Übersicht werden die wichtigsten Arbeiten zum Themenbereich Klimabeeinflussung genannt und deren Ergebnisse vorgestellt. Es folgen theoretische Grundlagen der elektrischen Entladungen und der zugrundeliegenden physikalisch-chemischen Prozesse. Die Versuchseinrichtungen mit der Stoßspannungsquelle, der Versuchsfunkenstecke, der Klimaprüfzelle sowie der Meßeinrichtungen werden in einem eigenen Abschnitt vorgestellt.

Nach diesen einleitenden Kapiteln werden die experimentellen Ergebnisse zur Beeinflussung der 50%-Durchschlagspannung  $U_{d50}$  durch die Temperatur und die Feuchtigkeit vorgestellt. Alle Versuche fanden in derselben Klimaprüfzelle mit einer inhomogenen Stab-Platte Anordnung und negativen Stoßspannungen statt. Der Stabdurchmesser betrug immer 20 mm, der Abstand zur Platte lag bei 300 mm bzw. 350 mm. Den Stababschluß bildete entweder ein Halbkugelabschluß mit einem Radius von 10 mm oder ein 30°-Kegelabschluß mit abgerundeter Kegelspitze (Radius 1 mm).

Bei negativer Blitzstoßspannung 1,2/50  $\mu\text{s}$  wird nachgewiesen, daß die 50%-Durchschlagspannung bei beiden Stababschlüssen mit zunehmender Temperatur abnimmt, wobei die Temperaturabhängigkeit von der Form des Stababschlusses bestimmt ist. Während beim Halbkugelabschluß die in den VDE-Normen ([VDE, 1978], [VDE, 1994]) vorgeschlagenen Temperaturkorrekturfaktoren zutreffen, ist die Beeinflussung beim Kegelabschluß geringer. Es wird gezeigt, daß die Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten in den jeweils entstehenden Entladungen begründet liegt.

Der Einfluß der absoluten Luftfeuchtigkeit bei negativer Blitzstoßspannung 1,2/50  $\mu\text{s}$  wird bei Temperaturen von 20°C, 40°C und 60°C untersucht. Bei 20°C führt zunehmende Feuchtigkeit zu einer nahezu linearen Abnahme der 50%-Durchschlagspannung. Bei 40°C und 60°C kann der untersuchte Feuchtebereich weiter ausgedehnt werden. Dabei zeigt sich, daß auch hier eine Abhängigkeit von der Form des Stababschlusses bzw. von den Vorentladungen besteht. Ist die absolute Feuchtigkeit höher als etwa 15 g Wasser pro Kubikmeter Luft, so muß die Temperaturkorrektur beim Kegelabschluß wie beim Halbkugelabschluß erfolgen. Wird der Feuchteeinfluß alleine betrachtet, so ergibt sich bei 40°C nur beim Kegelabschluß eine ausgeprägte Abnahme der 50%-Durchschlagspannung. Bei 60°C hat sich bei beiden Abschlüssen ein nicht monotonen Verhalten ergeben. Die Spannung nimmt bis zu etwa 40 g Wasser pro Kubikmeter Luft ab, um dann bei weiterer Feuchtigkeitserhöhung wieder zuzunehmen.

Bei negativer Schaltstoßspannung 50/2600  $\mu\text{s}$  ist bei beiden Stababschlüssen die gleiche Temperaturkorrektur vorzunehmen. Hierbei treffen die Empfehlungen der VDE-

Normen ([VDE, 1978], [VDE, 1994]) zu. Nicht mehr zutreffend sind sie bei der Feuchtekorrektur. Messungen bei 20°C und 60°C zeigen, daß die Veränderung der 50%-Durchschlagspannung mit zunehmender Feuchtigkeit zum einen wieder vom Stababschluß und zum anderen vom betrachteten Feuchtigkeitsbereich abhängt. Die Spannungszunahme bei zunehmendem Wassergehalt kann bei beiden Temperaturen bis zu Feuchtigkeiten von etwa 20 g Wasser pro Kubikmeter Luft linearisiert werden. Bei 60°C und höheren Feuchtigkeiten nimmt die Spannung bis zu einem Maximum bei etwa 50 g Wasser pro Kubikmeter Luft zu und danach wieder ab.

Die Vergrößerung der Scheitel- und Rückenhalbwertzeit auf 200/2800 µs bzw. 350/3000 µs ergibt beim untersuchten Halbkugelabschluß keine normalverteilten Durchschlagwahrscheinlichkeiten mehr, so daß keine 50%-Durchschlagspannung  $U_{df50}$  bestimmt werden kann. Aus reproduzierbaren hohen Wahrscheinlichkeitswerten wird deshalb ersatzweise eine fiktive 50%-Durchschlagspannung  $U_{df50}$  bestimmt und die Auswirkungen von Temperatur und Feuchtigkeit auf diese ermittelt.

Bei negativer Schaltstoßspannung 200/2800 µs kann die in beiden VDE-Normen ([VDE, 1978], [VDE, 1994]) vorgeschlagene lineare Temperaturkorrektur erfolgreich auf die fiktive 50%-Durchschlagspannung  $U_{df50}$  angewendet werden. Für die zugrundeliegende Mischverteilung wird nachgewiesen, daß sich die Durchschlagzeiten in zwei Gruppen einteilen lassen, deren Anteile an der Grundgesamtheit der Durchschläge mit der Temperatur und der Feuchtigkeit variieren.

Bei negativer Schaltstoßspannung 350/3000 µs besteht die Mischverteilung aus drei verschiedenen Entladungsgruppen, deren Anteile ebenfalls von der Temperatur und der Feuchtigkeit beeinflusst werden. Die Untersuchungen dazu fanden bei 7 g, 11 g und 25 g Wasser pro Kubikmeter Luft statt. Zunehmende Temperatur führt bei 25 g Wasser pro Kubikmeter Luft zu einem Anstieg der fiktiven 50%-Durchschlagspannung  $U_{df50}$ , während bei 7 g und 11 g Wasser pro Kubikmeter Luft kein Temperatureinfluß auf die fiktive 50%-Durchschlagspannung festgestellt werden kann. Zur Bestimmung des Feuchteinflusses auf die Vorentladungen werden deren Einsatzzeiten und die einfließende Ladung gemessen und statistisch ausgewertet. Es ergeben sich charakteristische elektrische Entladungsfolgen, die eindeutig bestimmten Vorentladungsformen zuzuordnen sind, wobei sich auch die relativen Auftretshäufigkeiten der unterschiedlichen Vorentladungen mit dem Klima ändern. UV-Fotografien machen die Auswirkungen dieser Klimaänderungen auf die Vorentladungen sichtbar. Die Auswertung der elektrischen Ladungsmessungen zeigt, daß aber kein kausaler Zusammenhang zwischen den Vorentladungen und signifikant frühen oder späten Durchschlägen besteht.

Der letztendlich zum Durchschlag führende Prozeß ist offensichtlich nicht an den Typ der Vorentladung gebunden.

Im Anhang wird ergänzend die in dieser Arbeit verwendete statistische Logitanalyse vorgestellt, mit der die 50%-Durchschlagspannung  $U_{d50}$  berechnet wird. Gegenüber grafischen Methoden besitzt dieses Verfahren große Vorteile. Es ermöglicht, objektiv und statistisch gesichert nachzuprüfen, ob eine Verteilung auch hinreichend einer Normalverteilung entspricht und sie entsprechend ausgewertet werden darf. Darüber hinaus kann mit diesem Verfahren bei annähernd normalverteilten Durchschlagversuchen für jede beliebige Durchschlagwahrscheinlichkeit  $p$  außer der entsprechenden Durchschlagspannung auch das zugehörige 95%-Konfidenzintervall bestimmt werden.