

**«Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die  
Schaltspannungsfestigkeit der atmosphärischen  
Luft im Ultrahochspannungsbereich  
bei positiver Polarität»**

ABHANDLUNG

zur Erlangung  
des Titels eines Doktors der technischen Wissenschaften  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von  
**BÜSCH WERNER**  
Dipl. El. Ing. TH Graz  
geboren am 24. Juni 1943  
von Österreich

Angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr.-Ing. W.S. Zaengl, Referent  
Prof. Dr.-Ing. K. Ragaller, Korreferent

## ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Schaltspannungsfestigkeit der atmosphärischen Luft im Ultrahochspannungsbereich bei positiver Polarität des angewendeten Spannungsimpulses untersucht. Der Grossteil der Ergebnisse bezieht sich auf Stabplatte Elektrodenanordnungen.

Um den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Durchschlagsspannung abzuklären, wurde die Wirkung des Wasserdampfgehaltes der Luft auf die elementaren Erzeugungs- und Verlustprozesse von Ladungsträgern und auf den zugehörigen Entladungsmechanismus untersucht. Dazu wurde die Arbeit, wie folgt, gegliedert:

Im ersten Teil wird über das grundsätzliche Entladungsverhalten von Luftisolierungen im Ultrahochspannungsbereich berichtet. Neben den Eigenschaften der beiden wesentlichen Entladungsarten, der positiven Streamer- und Leaderentladung, und deren Ausbreitungsmechanismen wird das Entladungsphänomen beschrieben. Zunächst wird der Einfluss der Schlagweite, der Stirnzeit des angewendeten Spannungsimpulses und der Form der Hochspannungselektrode auf das Entladungsbild abgeklärt, sodann der Einfluss der Luftfeuchtigkeit betrachtet.

Im zweiten Teil der Arbeit werden dann physikalische Elementarprozesse untersucht, die im Zusammenwirken mit dem Wasserdampfgehalt der Luft den Ausbreitungsmechanismus des aufgezeigten Entladungsphänomens in feuchter Luft beeinflussen können. Solche Prozesse sind die Elektronenanlagerung an  $O_2$  Moleküle (Bildung negativer Ionen), der Elektronenablöseeffekte von negativen Ionen und die Verzögerung bzw. Unterdrückung der Elektronenablösung von negativen Ionen durch  $H_2O$  Moleküle. Es wird ein Weg zur Abschätzung der Lebensdauer von negativen Sauerstoffionen in feuchter Luft angegeben. Die so ermittelten Lebensdauerwerte werden dann mit der Zeitdauer experimentell beobachteter Entladungsphänomene verglichen, wodurch eine Beurteilung der Bedeutung der einzelnen Prozesse für die Entladungsausbreitung möglich wurde. Als einziger Ionisationsprozess, der vom Wasserdampfgehalt der Luft stark beeinflusst erscheint, wird die Photoionisation in feuchter Luft betrachtet. Im nächsten Schritt werden Experimente über die räumlich-zeitliche Entla-

dungsentwicklung analysiert, die durch natürliche Aenderung der klimatischen Bedingungen bei unterschiedlichen Werten der Luftfeuchtigkeit durchgeführt wurden.

Aufgrund dieser Ergebnisse, der aufgezeigten Wirkung der Luftfeuchtigkeit auf elementare physikalische Prozesse und der eingangs erläuterten Entladungsmechanismen, wird schliesslich der Versuch unternommen, den Effekt der Luftfeuchtigkeit auf die bei sehr langen Luftfunkenstrecken auftretenden Entladungsphänomene physikalisch zu interpretieren. Es wird insbesondere ein qualitatives Modell zur Ausbreitung des positiven Leaders in feuchter atmosphärischer Luft entwickelt. Damit lassen sich Reilluminationen und Ruckstufen (Restrikes) des Leaderkanals erklären.

Im dritten Teil der Arbeit wird aufgrund der vorher untersuchten physikalischen Prozesse die Wirkung der Luftfeuchtigkeit auf die makroskopischen Durchschlagsparameter dargelegt. Es werden Effekte, wie die Verschiebung des Minimums der bekannten U-Kurven und die nichtlineare Abhängigkeit der 50% Durchschlagsspannung von der absoluten Luftfeuchtigkeit aufgezeigt und Konsequenzen für die Hochspannungsversuchstechnik bzw. für die Dimensionierung von Luftisolierungen im Ultrahochspannungsbereich diskutiert. Die erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass die absolute Luftfeuchtigkeit unter vielen Bedingungen als zusätzlicher Dimensionierungsparameter für Luftisolierungen im Ultrahochspannungsbereich berücksichtigt werden muss.

## SUMMARY

The investigations presented in this work deal with the effect of air humidity on the dielectric strength of long air gaps representative of UHV configurations subjected to positive switching impulses. Most results were obtained with rod-plane electrode arrangements.

In order to elucidate the effect of air humidity on the breakdown voltage, the influence of water vapour content of air on elementary electron production and loss processes associated with air discharges and on the corresponding breakdown mechanism was investigated.

The work is subdivided into three parts:

The first part deals with the typical discharge behaviour of very long air gaps. Besides considerations of the general characteristics of the fundamental types of discharge, the positive streamer and leader discharge, and of their propagation mechanisms, a description of the overall discharge phenomena is given. After clarifying the influence of diverse parameters (e.g. applied time-to-crest, electrode spacing and size of electrode) the effect of air humidity is examined.

The second part is an investigation of those elementary physical processes which may be influenced by water vapour content and which determine the propagation of the discharge. Such processes are a) the electron attachment to oxygen molecules (formation of negative ions), b) the electron detachment from negative ions and c) the effect of stabilisation of negative ions by water vapour. A method for estimating the life time of negative oxygen ions in humid air is presented. The resulting values of life time are then compared to the time scale of discharge phenomena experimentally observed in a stressed gap. In this way the importance of the considered processes for the discharge propagation could be assessed. Photoionization is considered to be the only ionization process likely to be greatly influenced by water vapour.

As the next step experiments are analysed which are devoted to spacial and temporal discharge development under naturally occurring atmospheric conditions. On the basis of the above experiments and the physical processes discussed an attempt was made to provide a physical interpretation of the effect of air humidity on the breakdown phenomena occurring in very long air gaps. In particular, a qualitative model for propagation of the positive leader in humid air at atmospheric pressure is proposed. For instance, with this model the reilluminations and restrikes observed during leader development can be explained.

Taking the discharge physics into account, the effect of absolute air humidity on the macroscopic breakdown parameters is given in the third part. Phenomena such as the shift of the minimum of the U-curve and the nonlinear dependence of the 50% breakdown voltage on humidity are presented. Consequences for HV testing procedures and for UHV air insulation design are discussed. The results obtained underline that for many conditions absolute air humidity should be taken into consideration as an additional significant parameter in UHV air insulation design.