

Einleitung

Im Laufe der Zeit entwickelten sich in der Hochspannungstechnik für Freiluftanwendungen neben Isolatoren aus Keramik oder Glas die sogenannten Verbundisolatoren. Ihre Vorteile bestehen zunächst einmal in der einfachen und flexiblen Herstellung. Verbundisolatoren weisen zudem ein wesentlich geringeres Gewicht auf und bieten eine hohe Vandalismussicherheit, da sie nicht splintern. Ihr Name rührt vom Verbund zweier Werkstoffe her: Kunststoffstäbe werden mit Polymeren wie z.B. Silikon¹ ummantelt. Die Hauptaufgaben einer solchen Silikon-Ummantelung bestehen darin, den Kern vor Umwelteinflüssen zu schützen und dem Isolator ein passendes Profil zu geben, d.h. Kriechströme zu minimieren [Hill2001]. Ein besonderes Merkmal dieses Werkstoffs ist seine Hydrophobie: Feuchtigkeit, die im Falle einer durchgehenden Schicht die Isolatoroberfläche leitfähig macht, perlt in Form von Tropfen ab. Dadurch werden Kriechströme verringert.

Besonders herausragende Rollen bei den Materialeigenschaften spielen die Wiederkehr und der Transfer der Hydrophobie. So zeichnet sich Silikon als Werkstoff für Freiluftisolatoren durch die Fähigkeit aus, seine Hydrophobie im Falle eines Verlusts nach einer Erholzeit wiederzugewinnen [Jans1999]. Außerdem wird eine eventuell angelagerte Fremdschicht mit der Zeit hydrophob [Kind2003]. Die Dauer dieser Prozesse kann je nach Beanspruchung einige Stunden oder Tage betragen [Neum2005]. Der bei Freiluftisolatoren sonst übliche Reinigungsaufwand entfällt daher bei Silikonoberflächen.

Aber trotz der mittlerweile langjährigen Erfahrung kommt es gelegentlich zu Zwischenfällen, bei denen ein Überschlag am Isolator zu einer Abschaltung der betroffenen Leitung führt. Als Ursache wird ein Verlust der Hydrophobie vermutet: Bei bestimmten Wetterbedingungen wird die Oberfläche „schrittweise“ durch elektrische Entladungen in Form von Korona und Trockenbandentladungen hydrophiler. Silikon erleidet sowohl physikalische als auch chemische Schädigungen,

¹ „Silikon“ steht für Silikonelastomere

wenn man es „genügend starker“ Koronabelastung aussetzt: Risse in der Oberfläche und zunehmende Benetzbarkeit, also Hydrophobieabnahme, sind die Folgen [Mall2005]. Bei Verlust der Hydrophobie bildet Wasser auf dem Isolator einen Film, der leitfähig ist, da Verschmutzungen gelöst werden. In der Folge entstehen durch Kriechströme örtlich begrenzte Trockenbereiche, in denen es zu Trockenbandentladungen kommen kann. Schließlich besteht die Gefahr der Überbrückung einzelner Schirme bis hin zu einem vollständigen Überschlag.

Doch wann liegt die Ursache eines erfolgten Ausfalls der Isolation im Hydrophobieverlust? Da gewöhnlich mehr als ein paar Stunden bis zu einer Materialanalyse vergehen, könnte eine zeitweilige Hydrophobieabnahme vorgelegen haben, obwohl man bei einer Analyse des Isolators keine Hydrophobieschwächung feststellt. Selbst die verschmutzten Stellen der Oberfläche sind hydrophob.

Die Auslegung von Hochspannungsisolatoren erfolgt nach den Anforderungen von IEC 6071 (Isolationskoordination) und IEC 60815 (Verschmutzung) sowie den mechanischen Anforderungen aus IEC 60826 (Freileitungsbau). Es ist bei der Auswahl und Dimensionierung eines Verbundisolators wichtig, mit einem möglichen Verlust der Hydrophobie zu rechnen. Daher verwendet man meist dieselben Kriechweglängen, die für Keramik- oder Glasisolatoren empfohlen werden. Doch bei Silikonoberflächen könnte der Kriechweg kürzer sein, wenn sichergestellt ist, daß die Hydrophobie dauerhaft bestehen bleibt – oder nicht zu stark abnimmt. Die Abmessungen könnten kleiner werden und damit das Gewicht noch geringer.

Im Hinblick auf die Materialien bietet die Normung das folgende Bild: Einzelne Kriterien wie mechanische Festigkeit, Widerstand gegen Entflammen und Lichtbögen usw. sind bereits genormt, doch gerade die Punkte „Widerstand gegen Korona und Ozon“ sowie „Hydrophobie“ sind noch offen. Gubanski fordert daher [Guba2005]: „Ein Ziel der Freiluftisolierungs-Forschung muß darin bestehen, ein besseres Verständnis des Verhaltens elektrischer Entladungen und ihrer Wechselwirkungen mit der Isolierstoffoberfläche zu erhalten.“ Die Notwendigkeit derartiger Untersuchungen wird auch bei CIGRE gesehen. Aber genormte Testverfahren für Hydrophobiebeständigkeit und Koronabelastung liegen noch nicht vor [Work2004]. Es ist daher für ein besseres Verständnis der Materialveränderungen wichtig, die Auswirkungen von Korona zu untersuchen. Die Ergebnisse müssen dann mit der tatsächlichen „performance during service“ abgeglichen werden.

Verglichen mit Regen oder Nebel wird die Betauung als besondere Befeuchtungsart eingestuft [FGH2006]. Das Auftreten von Tauschichten im speziellen bzw. von Feuchtigkeit im allgemeinen ist natürlich von mehreren klimatischen und geographischen Gegebenheiten abhängig, wie die örtliche Nähe zu Seen oder Tälern. Außerdem kommt es auch wieder zu einer Verdunstung und damit zu einem Verschwinden der Tropfen. Betauung unter Feldeinwirkung ist ein mehr oder weniger regelmäßig auftretender Vorgang für Freiluftisolatoren. In unseren Breiten findet gewöhnlich – wenn überhaupt – früh morgens eine Betauung statt, die Abfolge ist also täglich. Aber die Einsatzgebiete von Verbundisolatoren umfassen auch tropische Regionen Südostasiens. In tropischen Gebieten gehört die Feuchtigkeit quasi dauernd zu den Umgebungsbedingungen.

Generell kann die Betauungsbelastung als zyklisch angesehen werden, auch wenn die zeitlichen Abstände bis zum erneuten Auftreten keineswegs konstant sein müssen. Ist es zu einer Hydrophobieabnahme gekommen, findet die Selbstheilung der Hydrophobie („Erholung“) statt. Alterung tritt noch nicht auf - oder bleibt in der Frühphase, wodurch eine lange Lebensdauer der Isolation gegeben ist. Jedoch reicht etwa bei dauerhafter oder schnell aufeinander folgender Korona-Belastung die Zeit zur Erholung unter Umständen nicht aus. Ebenso könnten außergewöhnliche Belastungen, die unter Umständen nur zeitweilig vorhanden sind, wie besondere Klimabedingungen, das Einsetzen der Erholung hinauszögern oder sie unterbrechen und somit eine kritische Abnahme der Hydrophobie bewirken.

An Wassertropfen treten Teilentladungen auf, wenn ein genügend hohes elektrisches Feld vorhanden ist. Die hohe relative Permittivität des Wassers „verdrängt“ das elektrische Feld aus den Tropfen. An den Rändern der Tropfen ist die Feldstärke dann überhöht. Dadurch werden die Tropfen verformt [Keim2003, Wind1994, Stra2004]. Die entstehende spitzere Form verstärkt das elektrische Feld nochmals. Örtlich erreicht man so die Einsatzbedingungen für elektrische Teilentladungen. In der Natur geschieht dies bei den Vorgängen, die in Gewitterwolken ablaufen („water-drop corona“, [Daws1969]). In der Technik wird den Auswirkungen von Entladungen an Wassertropfen auf Freiluft-Isolatoren, wie in Abbildung 0.1 zu sehen, ein besonderes Interesse entgegengebracht. Diese Abläufe werden bei der Beschreibung der Alterungsmechanismen von Verbundisolatoren zur Frühphase gerechnet [Jahn2003].

Laboruntersuchungen dieser Phänomene geschehen grundsätzlich auf zweierlei Weise: Zum einen werden Wassertropfen gezielt auf den Isolierstoff aufgebracht und dann der Hochspannung ausgesetzt. Ein Unterschied zur Betriebs-Wirklichkeit besteht darin, die Tropfen ohne Anwesenheit eines elektrischen Feldes zu plazieren. Zum anderen werden Isolatoren in Nebelkammern unter Hochspannung gesetzt und dann benebelt bzw. besprüht. Während in diesem Fall gegenüber dem ersten eine Gleichzeitigkeit der Einflußgrößen E-Feld und Wassertropfen vorliegt, handelt es sich in beiden Fällen um Wassertropfen, die als solche auf den Isolator gebracht werden. Sie bleiben gewissermaßen aufgrund einer Kollision auf der Oberfläche, so wie es sicherlich auch in natura bei Regen geschieht. Doch im Falle der Betauung bilden sich die Wassertropfen, wenn feuchte Luft kondensiert. Die Tropfen wachsen auf der Oberfläche. Aber kann man diesen Vorgang im Labor reproduzieren? Bisherige Untersuchungen fanden in einer „inversen Klimakammer“ statt [Quin1993, Lope2001]: Anstelle einer Temperaturregelung der Umgebungsluft wird der Prüfkörper aktiv gekühlt, damit es zur Betauung kommt. Zum einen ist dazu eine Anpassung des Prüflings notwendig, um eine Kühlflüssigkeit durchzuleiten, zum anderen besteht die Tauschicht ununterbrochen.



Abbildung 0.1: Leuchterscheinungen der Wassertropfenkorona am Strunk eines Verbundisolators

Für eine realitätsnähere Nachbildung erfolgt in dieser Arbeit eine zyklische Betauung in einem Klimaschrank bei gleichzeitiger elektrischer Beanspruchung. Dabei geht es um die Modellbildung, unter welchen Bedingungen Tautropfen Teilentladungen verursachen. Für die Anwender ist es bei der Auslegung und dem Design von Isolatoren von Bedeutung, welchen Einfluß die Feldrichtung besitzt. Um diesen Punkt zu klären, werden Modellprüfkörper in zwei unterschiedlichen Feld-Konfigurationen getestet. Ein Beispiel wird in Abbildung 0.2 gezeigt. Der Frage, wie sich

Wassertropfenkorona auf die Silikonoberfläche auswirkt, soll im Hinblick auf eine Zustandsbewertung der Hydrophobie nachgegangen werden. Ziel ist es, die Effekte der Wassertropfenkorona auf die Hydrophobie unter Laborbedingungen beschleunigt zu untersuchen.

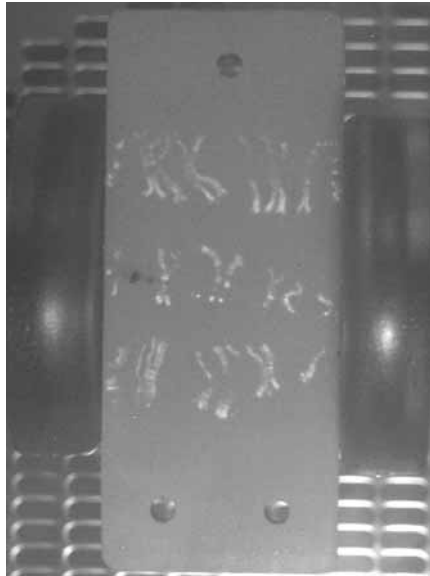


Abbildung 0.2: Leuchterscheinungen der Wassertropfenkorona auf einem Silikon-Probekörper mit tangentialer Feldbelastung zwischen eingegossenen Elektroden