
Name der Forschungsstelle(n)

IGF-Vorhaben-Nr. / GAG

Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum : _____

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

Normalverfahren

Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

ist beigefügt

liegt bereits vor

wird fristgerecht nachgereicht

Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

**Silikonisolatoren unter Betaungsbeanspruchung –
Betriebsverhalten und Prüfung der Langzeitbeständigkeit**

Inhalt	Seite
Zusammenfassung	3
1. Einführung	4
2. Aufgabe	5
3. Prüfverfahren	5
3.1 Prüflinge	5
3.2 Zyklische Betaung	5
3.3 Haftende künstliche Fremdschichten auf hydrophoben Flächen	6
4. Betaungsversuche	7
5. Auswertung und Beobachtungen bei den Betaungsversuchen	8
5.1 Suspensionsleitfähigkeit und Verschmutzungsgrad	8
5.2 Ableitstromentwicklung	8
5.3 Dauer der Ableitstromaktivität	8
5.4 Leitfähigkeitsverteilung auf den Schirmoberseiten bei Betaungsversuchen	9
6. Ermittlung der im Betrieb zu erwartenden Schichtleitfähigkeit im 400-kV-Netz	9
6.1 Messsystem und Einsatzorte	9
6.2 Ergebnisse	10
7. Folgerungen	10
8. Schrifttum	11
Tabellen	12
Bilder	18

Zusammenfassung

Für den praktischen Einsatz wird die Langzeitbeständigkeit der Silikonisolatoren im Vergleich zur Überschlagsfestigkeit als der wichtigere Gesichtspunkt angesehen. Daher scheint es erforderlich zu überprüfen, wie sich die Silikonoberfläche bei den im Betrieb üblicheren Leitfähigkeiten durch haftende Fremdschichten verhält und entsprechende Verfahren unter Berücksichtigung von Betauung zur Überprüfung des Langzeitverhaltens zu entwickeln. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte mit Hilfe von Laborversuchen untersucht werden, wie das Betriebsverhalten und die Langzeitbeständigkeit von unterschiedlichen Betriebsbedingungen (Mehrfachbefeuchtung durch Betauung, Oberflächenleitfähigkeit von haftenden künstlichen Fremdschichten, Pausenzeiten vor einem Versuch) beeinflusst wird.

Die Betauungsversuche wurden mit einem bereits erprobten Zyklus mit 4 Stunden Abkühlung und 2 Stunden Heizen an vier Typen Mittelspannungs-Silikonisolatoren verschiedener Hersteller durchgeführt. Der Verschmutzungsgrad variierte zwischen sehr geringer bis mittlerer Verschmutzung. Die Pausenzeiten vor Versuchsbeginn für einen möglichen Hydrophobietransfer auf die künstliche Schicht (Regenerationszeiten) lagen zwischen 0 Stunden und 120 Stunden.

Während der Laufzeit des Forschungsvorhabens wurden Messungen mit zwei bereits installierten Systemen im 400-kV-Netz der RWE Net AG durchgeführt, um die im Betrieb auftretenden Schichtleitfähigkeiten zu ermitteln.

Die Regenerationszeiten vor den Betauungsversuchen haben keinen Einfluss auf den Beginn der Ableitstromaktivität. Bei allen Betauungsversuchen wurde Stromaktivität im ersten Zyklus festgestellt, d.h. die Befeuchtung bei Betauung überdeckt eine eventuell vorhandene Hydrophobie.

Die Ableitstromentwicklung für einen Isolatorotyp ist, unabhängig vom Verschmutzungsgrad, von Versuch zu Versuch unterschiedlich. Dies ist vermutlich auf die wechselnde dynamische Veränderung der Verteilung der Oberflächenleitfähigkeit zurückzuführen.

Bei mehrfacher Befeuchtung durch Betauung stellt sich eine extrem ungleichmäßige Verteilung der Oberflächenleitfähigkeit auf den Schirmoberseiten ein. Es entstehen größere Kriechweganteile mit sehr geringer Leitfähigkeit und eine Erhöhung der Leitfähigkeit an den Schirmrändern. Der zu ermittelnde SDD-Wert nach einem Versuch ist auch nach 12 Betauungszyklen nahezu unverändert im Vergleich zu dem Anfangswert, aber die großen Oberflächenanteile mit der geringen Leitfähigkeit unterdrücken die Ableitstromaktivität trotz guter Benetzbarkeit der Isolatoroberfläche. Die Stromaktivität endete in allen Versuchen spätestens im achten Betauungszyklus.

Die während der durchgeführten Versuchsserien aufgetretenen Strombelastungen haben in keinem Fall zu sichtbaren Erosionsspuren geführt.

Die Betriebsmessungen der Schichtleitfähigkeit konnten wegen ausgefallener Datenlogger nicht ausreichend ausgewertet werden. Einzelne Messungen bestätigen frühere Aussagen [3]: die lokale Fremdschichtbelastung an beiden Messorten ist als gering einzustufen, bei den Porzellanoberflächen ist von Schichtleitfähigkeitswerten zwischen 2 μS und 4 μS auszugehen. Eine Alterung der Silikonoberflächen ist nicht zu beobachten.

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) als Forschungsvorhaben Nr. 14582 N "Silikonisolatoren unter Betauungsbeanspruchung – Betriebsverhalten und Prüfung der Langzeitbeständigkeit" gefördert.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde nicht erreicht.

1. Einführung

Silikonelastomere werden in den Netzen der Energieübertragung- und -verteilung weltweit in steigendem Maß eingesetzt. Dies gilt sowohl für den Einsatz als Freileitungsisolatoren im Hoch- und Mittelspannungsbereich als auch für Gehäuse von Überspannungsableitern, Durchführungen, Messwandlern und andere Anwendungen. Die Vorzüge des Materials sind vielfach in der Literatur beschrieben, wobei insbesondere auf das ausgezeichnete Fremdschichtverhalten solcher Isolatoren aufgrund der hydrophoben Eigenschaften des Materials hingewiesen wird.

Aus den früher gemachten Betriebserfahrungen wurde angenommen, dass Silikonisierungen für den Freilufteinsatz geeignet sind, wenn keine lang andauernde Oberflächenbeanspruchung durch Entladungen auftritt. Solche Entladungen wurden dem Vorhandensein von Fremdschichten und den damit entstehenden Oberflächenströmen zugeschrieben, und dieser Tatsache zur Folge beschäftigten sich die in der Vergangenheit durchgeführten Untersuchungen mit dem Entstehen von Oberflächenströmen bei vorhandenen Fremdschichten, den möglichen Schädigungen der Materialoberfläche durch die Oberflächenströme und der hierfür betriebsrelevanten Prüftechnik. Auch die FGH hat sich in mehreren von der AiF geförderten Forschungsvorhaben mit dieser Problematik beschäftigt (AiF-Forschungsvorhaben Nr. 10665 [1], Nr. 11729 [2] und Nr. 13035 [3]). Alle Prüfverfahren gehen davon aus, dass der Hydrophobieverlust durch Oberflächenbeanspruchungen durch Fremdschichten, in der Regel simuliert durch Befeuchtung mit Salznebel, hervorgerufen wird. Dies bedeutet, dass bei allen Verfahren die Annahme zugrunde liegt, dass ein Hydrophobieverlust der Silikonoberfläche im Betrieb nur auftreten kann, wenn leitfähige Schichten mit merklicher Ausprägung vorhanden sind.

In jüngerer Zeit wurden vermehrt Überschlüge an Silikon-Freileitungsisolatoren im 400-kV-Netz beobachtet. Die Überschlüge traten an Isolatoren im ländlich genutzten Inlandgebiet teilweise nach einer sehr kurzen Betriebszeit von einigen Tagen auf, hatten also zu der klassischen Fremdschichtbeanspruchung keinen Bezug. Sie geschahen im normalen Netzbetrieb, so dass Überspannungen ausgeschlossen werden können. In allen Fällen waren jedoch die frühen Morgenstunden betroffen und das Einsatzgebiet liegt in Flussnähe, so dass Feuchtigkeit auf der Oberfläche durch Betauung anzunehmen ist. Die betroffenen Verbundisolatoren stammten von mehreren Herstellern, die sowohl unterschiedliche Materialien von verschiedenen Herstellern als auch unterschiedliche Herstellungsverfahren anwenden.

Oberflächenablagerungen auf aus dem Betrieb ausgebauten Isolatoren, die zu einer merklichen Leitfähigkeit führen könnten, wurden nicht festgestellt. Die Anwendung der üblichen Verfahren zur Bestimmung der Schichtleitfähigkeit, die eine Befeuchtung der Oberfläche durch Besprühen mit Wasser herstellen, erbrachten keine Ergebnisse.

Die in [3] beschriebenen Ergebnisse des AiF-Forschungsvorhabens Nr. 13035 zeigen, dass die Befeuchtung einer hydrophoben Silikonoberfläche wesentlich von der Art der Befeuchtung (z.B. Nebeltröpfchen oder Betauung) abhängt. Im Gegensatz zur Befeuchtung mit Nebel, bei der sich überwiegend diskrete Tropfen ausbilden (siehe **Bild 1a**), wird bei Betauung die gesamte Isolatoroberfläche mit einer durchgehenden Feuchtigkeitsschicht bedeckt (siehe **Bild 1b**). Dies erfolgt unabhängig vom Silikonmaterial und ist auch bei natürlich verschmutzten Isolatoren festzustellen.

Weiterhin wurde festgestellt, dass bei ungleichmäßiger Verteilung der Hydrophobie entlang eines Isolators die Bedingungen für den Überschlag einer hydrophoben Zone bei Befeuchtung durch Betauung deutlich kritischer sind als bei Nebelung. Dies gilt insbesondere für den Bereich geringer Oberflächenleitfähigkeiten.

Nach dem heutigen Kenntnisstand ist festzustellen, dass eine realitätsnahe, sich wiederholende Befeuchtung durch Betauung bei geringer Verschmutzung die kritischere Beanspruchung im Vergleich zu einer zyklischen Nebelung darstellt. Dieser Vorgang, insbesondere in Verbindung mit geringen Leitfähigkeiten, kommt in der Natur häufig vor. Die Ergebnisse in [3] beruhen auf Laborversuchen,

bei denen die Leitfähigkeit durch in der Luft befindliche Gase erzeugt werden. Im Betrieb sind haftende leitfähige Ablagerungen wesentlich häufiger, wobei die Hydrophobie des Silikonmaterials auf diese Ablagerungen übertragen wird (Hydrophobietransfer) [4]. Da für den praktischen Einsatz die Langzeitbeständigkeit der Silikonisolatoren im Vergleich zur Überschlagsfestigkeit als der wichtigere Gesichtspunkt angesehen wird, scheint es erforderlich zu überprüfen, wie sich die Silikonoberfläche bei den im Betrieb üblicheren Leitfähigkeiten durch haftende Fremdschichten verhält und entsprechende Verfahren unter Berücksichtigung von Betauung zur Überprüfung des Langzeitverhaltens zu entwickeln.

2. Aufgabe

Durch Betauungsversuche im Labor soll zunächst ein Verschmutzungsverfahren festgelegt werden, das eine haftende künstliche Fremdschicht auf der hydrophoben Oberfläche erzeugt. Diese Schicht soll ausreichend stabil sein, damit sie in Langzeitversuchen einer vielfachen zyklischen Befeuchtung durch Betauung standhält.

In nachfolgenden Langzeitversuchen sollen dann die Einflüsse von

- unterschiedlichen Verschmutzungsgraden,
- unterschiedlichen Pausenzeiten vor einem Versuch (Regenerationszeit zum Hydrophobietransfer),
- unterschiedlicher Versuchsdauer

untersucht werden.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu überprüfen, ob die Einflüsse der zyklischen Betauung auf das Langzeitverhalten von Silikonisolatoren durch die bestehenden IEC-Prüfungen abgedeckt werden [5].

Parallel zu den Laborversuchen werden die Messungen im 400-kV-Netz zur Ermittlung der im Betrieb an Silikon- und Porzellanoberflächen auftretenden Leitfähigkeiten fortgeführt [3].

3. Prüfverfahren

3.1 Prüflinge

Als Prüflinge für die Untersuchungen standen Silikon-Leitungsisolatoren von drei Herstellern zur Verfügung. **Bild 2** zeigt die Mittelspannungsprüflinge, in **Tabelle 1** sind die relevanten Bauformdaten zusammengestellt. Die Typen A1 und A2 sind baugleich, sie unterscheiden sich nur im Silikonmaterial. Bereits in früheren Untersuchungen kamen diese Isolator Typen zur Anwendung [3].

Die Bewertung der Oberflächenhydrophobie, z.B. nach unterschiedlichen Regenerationszeiten erfolgte durch den Vergleich der Tropfenbildung auf der Prüflingsoberfläche mit Referenzbildern (siehe **Bild 3**) entsprechend dem in [6] angegebenen Verfahren "C".

3.2 Zyklische Betauung

Entsprechend der Zielsetzung des hier berichteten Vorhabens erfolgte die Befeuchtung durch Betauung. Durch eine zyklische Fremdschichtbeanspruchung bei konstant anstehender Prüfspannung kann eine betriebsrelevante Beanspruchung simuliert werden. Dazu wird nach einer 4-stündigen Kühlphase, an deren Ende der Kunststoffisolator eine Temperatur zwischen 4 °C und 9 °C erreicht hat, in der Prüfwelle Wasser erhitzt, sodass die relative Feuchte während der 2-stündigen Betauungsphase mindestens 96 % beträgt. Die nachfolgende Kühlphase beginnt mit dem Austausch der feuchten Luft in der Prüfwelle für 30 Minuten, danach folgt wieder die Abkühlung.

Die Kühlung der Luft in der Prü fzelle erfolgt durch eine Spezial-Tiefkühltruhe mit einstellbarer Temperatur und einer maximalen Tieftemperatur von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sie dient als Kältespeicher, und das Zu- und Ableitungsrohr sind durch Klappen geschlossen. Der Luftaustausch zwischen Prü fzelle und Tiefkühltruhe erfolgt durch handelsübliche Rohrlüfter, bei deren Betrieb die Klappen durch die Luftströmung geöffnet werden.

Die Aufheizung der Luft in der Prü fzelle, verbunden mit einer schnellen Erhöhung der relativen Feuchte auf Werte $\geq 96\%$, erfolgt durch eine Heizplatte mit einem Wassergefäß.

Nach dem Ende der Erwärmungsphase ist es erforderlich, die feuchte Zellenluft mit der Umgebungsluft der Prü fzelle auszutauschen, um ein schnelles Vereisen der Tiefkühltruhe zu vermeiden. Zu diesem Zweck wird nach der Erwärmungsphase eine Platte im Zellendach pneumatisch geöffnet und die Zellenluft für 30 Minuten mit Hilfe eines Rohrlüfters ausgetauscht. Das Entlüftungsrohr ist durch eine Klappe geschlossen, die sich bei Betrieb des Rohrlüfters öffnet.

Bild 4 zeigt schematisch den beschriebenen Versuchsaufbau für die Betauungsversuche, **Bild 5** die thermisch isolierte Prü fzelle mit Prü flingen, Wassergefäß und Heizplatte. Die Steuerung der Betauungszyklen erfolgt vollautomatisch über Zeitschaltuhren und ein mehrkanaliges Temperaturmesssystem mit individuell für jeden Kanal einstellbaren Schaltpegeln.

Mit umfangreichen Vorversuchen wurden die Einstellungen von Heizleistung und Heizdauer so gewählt, dass für gegebene Umgebungsbedingungen (z.B. Sommer, Winter) in den Betauungsphasen möglichst kein Wasser von den Prü flingen abtropft, damit keine Leitfähigkeit verloren geht. **Bild 6** zeigt als Beispiel Temperatur und relative Feuchte während eines Betauungsversuches.

3.3 Haftende künstliche Fremdschichten auf hydrophoben Flächen

Ziel jedes Verschmutzungsverfahrens für haftende künstliche Fremdschichten ist die Erzeugung einer gleichmäßigen Schicht auf der Isolatoroberfläche. Dies kann z.B. bei Porzellan- oder Glasoberflächen durch eine sorgfältige und intensive Reinigung vor dem Verschmutzen erreicht werden. Bei hydrophoben, also wasserabweisenden Oberflächen lässt sich eine gleichmäßige Schicht nicht erzeugen. Es müssen bei Silikonisolatoren also Maßnahmen erfolgen, die für die Dauer des Verschmutzens und des Trocknens der Schicht die Hydrophobie unwirksam machen, ohne die Materialeigenschaften des Silikons grundsätzlich zu ändern.

Diese Problematik ist in der Literatur vielfach behandelt worden. Üblicherweise gliedert sich eine solche Maßnahme in zwei Schritte:

- die saubere und trockene Oberfläche wird mit einer trockenen Trägerschicht bedeckt, z.B. mit Hilfe eines Schwammes;
- der so behandelte Isolator wird mit einer leitfähigen Suspension begossen oder auch in die Suspension getaucht und trocknet danach unter natürlichen Bedingungen.

Als Trägematerialien kommen Bentonit, Kaolin, Tonoko und auch Kieselgur in Frage. Dabei sind unterschiedliche Kombinationen der Materialien in Trägerschicht und Suspension möglich. In [7, 8, 9, 10] wird darauf hingewiesen, dass bei Verwendung von Kieselgur die kürzeste Regenerationszeit zur Übertragung der Hydrophobie auf Ablagerungen erreicht wird.

Für die mehrfache Befeuchtung einer haftenden künstlichen Fremdschicht durch zyklische Betauung war es erforderlich, ein Verschmutzungsverfahren mit folgender Zielsetzung festzulegen.

- Reproduzierbare Erzeugung einer möglichst gleichmäßigen trockenen künstlichen Schicht mit gewünschter Leitfähigkeit;

- Möglichst gleichbleibender Verschmutzungsgrad auch bei mehrfacher Befeuchtung durch Betauung. Der Verschmutzungsgrad wird durch den SDD-Wert (Salt Deposit Density) [11] bestimmt;
- Möglichst kurze Regenerationszeit.

Aus den Ergebnissen vielfacher Kurz- und Langzeitversuche wurde unter Beachtung der oben angegebenen Zielsetzung folgendes Verschmutzungsverfahren festgelegt.

- Auf den trockenen Isolator wird mit einem Schwamm eine trockene Trägerschicht aus Bentonit aufgebracht. Überschüssiges Bentonit wird mit einem schwachen Gebläse entfernt.
- Der Isolator mit der Trägerschicht wird mit einer Suspension aus entsalztem Wasser und 40 Gramm Kieselgur je Liter Wasser übergossen. In der Suspension ist die für den gewünschten Verschmutzungsgrad erforderliche Menge Kochsalz gelöst.
- Danach trocknet die Schicht unter natürlichen Bedingungen, d.h. es wird keine forcierte Trocknung durch Lüfter oder durch Heizen durchgeführt.

Durch sorgfältiges und konsequentes Einhalten dieses Verfahrens kommt man den vorgegebenen Zielen ausreichend nahe.

Gleichmäßigkeit der Schicht

Die **Bilder 7 bis 9** zeigen die natürlich getrocknete Schicht auf den hydrophoben Oberflächen der Isolortypen A1, B und C. Neben der optischen Gleichmäßigkeit waren auch die SDD-Werte entsprechend den gewählten Suspensionsleitfähigkeiten innerhalb der bekannten Grenzen reproduzierbar.

Gleichbleibender Verschmutzungsgrad bei mehrfacher Befeuchtung durch Betauung

Die Stabilität der künstlichen Schicht bei mehrfacher Betauung wurde durch den Vergleich der Werte des Verschmutzungsgrades SDD vor und nach einem Versuch beurteilt. Die Werte vor einem Versuch wurden an baugleichen Referenzisolatoren ermittelt, die zusammen mit den Prüflingen verschmutzt wurden. Insgesamt wurden 10 Versuche an den jeweils 4 Isolatoren nach 12 Betauungszyklen ausgewertet (siehe **Tabelle 2**). Dabei lagen für alle Isolortypen die SDD-Werte nach dem Versuch im Bereich $\pm 15\%$ des Anfangswertes, sodass die Schicht als ausreichend stabil auch bei mehrfacher Betauung beurteilt wurde.

Übertragung der Hydrophobie auf die künstliche Fremdschicht

Die Überprüfung der Regenerationszeit erfolgt entsprechend dem in [6] angegebenen Verfahren durch den Vergleich der Tropfenbildung auf den Prüflingen mit Referenzbildern. In allen Fällen zeigten die Isolatoren direkt nach der natürlichen Trocknung eine Tropfenbildung entsprechend der Hydrophobiekategorie (HC) 6. Die Isolatoren wurden danach natürlicher Umgebung ausgesetzt. Die **Bilder 10 bis 13** zeigen, dass bei allen Prüflingstypen nach 24 h eine Verbesserung der Oberflächenhydrophobie auf HC 5 feststellbar war. Nach einer Regenerationszeit von 72 h entsprach die Tropfenbildung in allen Fällen mindestens HC 4. Diese Regenerationszeiten wurden als ausreichend kurz angesehen.

Mit dem so festgelegten Verschmutzungsverfahren wurden die weiteren Betauungsversuche durchgeführt.

4. Betauungsversuche

Für die Versuche standen 2 Gruppen Prüflinge mit entsprechenden baugleichen Referenzisolatoren zur Ermittlung der Verschmutzungsgrades vor einem Versuch zur Verfügung. Zwischen den Versuchen an einer Gruppe lagen mindestens 7 Tage.

Alle Versuche in diesem Forschungsvorhaben wurden bei der Prüfspannung 24 kV durchgeführt. Dadurch ergibt sich eine Längsfeldstärke von 130 kV/m (Scheitelwert), was der Beanspruchung der Silikonisolatoren im 400-kV-Netz entspricht. In **Tabelle 3** sind die wichtigsten Prüfparameter aufgelistet.

Bei den Versuche wurden folgende Größen variiert:

- SDD-Werte von 0,015 mg/cm² bis 0,11 mg/cm² (sehr geringe bis mittlere Verschmutzung);
- Regenerationszeiten (Zeit nach dem Verschmutzen und Trocknen des Isolators bis Versuchsbeginn) von 0 h bis 120 h;
- Versuchsdauer von 8 Zyklen (48 h) und 12 Zyklen (72 h).

Bei jedem Versuch wurden die Prüfspannung und die Ableitströme aufgezeichnet. Zusätzlich wurde der jeweils größte Ableitstrom innerhalb einer Messperiode von 1 Minute erfasst. **Bild 14** zeigt als Beispiel ein Oszillogramm von Isolator Typ C aus dem ersten Betauungszyklus eines Versuches mit SDD = 0,087 mg/cm², Regenerationszeit 72 h und Versuchsdauer 12 Zyklen (**Tabelle 4**, Vers.-Nr. 9). Die Ströme zeigen die für Fremdschichtentladungen typische Kurvenform. **Bild 15** zeigt die zugehörige Aufzeichnung der höchsten 1-Minutenströme des gleichen Versuches über die ganze Versuchsdauer.

In Tabelle 4 sind alle relevanten Daten der auswertbaren Betauungsversuche zusammengestellt.

5. Auswertung und Beobachtungen bei den Betauungsversuchen

5.1 Suspensionsleitfähigkeit und Verschmutzungsgrad

Die **Bilder 16 bis 18** zeigen getrennt für jeden Isolatorotyp die Abhängigkeit zwischen der Suspensionsleitfähigkeit und dem ermitteltem SDD-Wert. Bei konsequenter Einhaltung des festgelegten Verschmutzungsverfahrens zeigen die Messwerte, dass trotz der Erschwernis durch die Hydrophobie des Materials sich die Streuung der SDD-Werte in dem von Porzellan- und Glasisolatoren bekannten Rahmen liegt.

5.2 Ableitstromentwicklung

Grundsätzlich findet man im ersten Zyklus während der Heizphase immer Ableitstromaktivität, die weitere Entwicklung des Ableitstromes ist aber uneinheitlich und kann weder der Tendenz des Verschmutzungsgrades noch irgendeinem Trend im Betauungsversuch zugeordnet werden. Es treten schwankende Stromhöchstwerte in aufeinander folgenden Betauungszyklen auf, und auch die Beendigung der Stromaktivität kann nicht der Anzahl der Zyklen oder den Prüflingstypen zugeordnet werden (siehe Bild 15 und **Bilder 19 a – d**).

Die unterschiedlichen Regenerationszeiten haben keinen Einfluss auf die Ableitstromentwicklung bei den Betauungsversuchen.

5.3 Dauer der Ableitstromaktivität

Die Beobachtungen zeigten, dass auch nach 12 Zyklen die Benetzbarkeit der Isolatoroberflächen gut war (überwiegend HC 6 – hydrophil, siehe **Bild 20**). Die SDD-Werte lagen nach einem Versuch im Bereich $\pm 15\%$ des Anfangswertes (siehe Tabelle 2). Trotzdem zeigen die Stromaufzeichnungen, dass die Stromaktivität spätestens im 8 Zyklus endete.

Zur Aufklärung des unerwarteten Endes der Stromaktivitäten trotz SDD-Werten entsprechend mittlerer Verschmutzung nach den Versuchen und ausreichender Benetzbarkeit wurden weitergehende Messungen durchgeführt.

5.4 Leitfähigkeitsverteilung auf den Schirmoberseiten bei Betauungsversuchen

Mit einem in [11] beschriebenen Schichtleitfähigkeitsmessgerät lässt sich durch mehreren Messungen mit ausreichender Aussagekraft die Verteilung der Leitfähigkeit auf einer feuchten Oberfläche ermitteln (siehe **Bild 21**).

Bei insgesamt sechs Versuchen mit SDD-Werten zwischen $0,065 \text{ mg/cm}^2$ und $0,1 \text{ mg/cm}^2$ wurde vor und nach dem Versuch mit der Messsonde die Verteilung der Schichtleitfähigkeit auf den Schirmoberseiten der jeweils vier Isolatoren ermittelt. Die Versuchsdauer war bei 4 Versuchen 8 Zyklen, sonst 12 Zyklen. Dabei war in jedem Fall die Oberfläche gut benetzbar (HC 5 – 6). Die Ergebnisse sind in **Tabelle 5** zusammengefasst.

Unabhängig vom Isolatorotyp sind die Anfangsverteilungen vergleichbar. Die Messwerte nach einem Versuch mit mehrfacher Befeuchtung durch Betauung zeigen eine extrem ungleiche Verteilung der Schichtleitfähigkeit. Der größte Teil der Schirmoberseite zeigt sehr kleine Schichtleitfähigkeitswerte, im Randbereich gehen die Werte deutlich über die Anfangswerte hinaus. Auch diese Verteilungen sind unabhängig vom Isolatorotyp vergleichbar.

Durch die so lokal entstehenden Anteile des Kriechweges mit sehr geringer Leitfähigkeit wird schließlich die Ableitstromaktivität unterdrückt.

6. Ermittlung der im Betrieb zu erwartenden Schichtleitfähigkeit im 400-kV-Netz

6.1 Messsystem und Einsatzorte

In Verbindung mit RWE NET AG wurde die bereits installierte Messung der Fremdschichtbelastung von Isolatoren im Betrieb fortgesetzt.

Die Messung erfolgt mit Hilfe von sechs künstlichen Elektroden sowohl an original Silikonschirmen als auch an glasierten Porzellanoberflächen (siehe **Bild 22a**). Die Messingelektroden sind an senkrechten und waagrechten Flächen montiert. Bei den waagrechten Flächen befinden sich Elektroden auf den Oberseiten und auch auf den geschützten Unterseiten.

Die Messung selbst erfolgt mit programmierbaren Datenloggern (siehe **Bild 22b**). Jede Einheit enthält eine 12 V-Batterie, die in vorwählbaren Intervallen für sechs Sekunden auf die Messsonde geschaltet wird. Der während dieser Zeit fließende Strom wird gemessen und gespeichert. Parallel zu den Leitfähigkeitsmessungen werden mit gleicher Technik die Temperatur und die relative Feuchte gemessen und gespeichert.

Vor Ablauf der maximalen Messdauer, die von dem gewählten Messintervall und den Speicherplatz der Messeinheiten abhängt, werden die Einheiten mittels PC ausgelesen und für die nächste Messdauer gestartet.

Die Messeinrichtungen sind an zwei Masten des 400-kV-Netzes des RWE westlich von Bingen montiert (siehe **Bild 23**). Mast 234 steht in einer Senke (siehe **Bild 24**), Mast 221 befindet sich auf einer Hügelkuppe (siehe **Bild 25**). **Bild 26** zeigt als Beispiel die in Höhe der unteren Isolatorenketten an Mast 234 montierten Messsonden.

6.2 Ergebnisse

Die Messungen erfolgten in der Zeit vom 17. Januar 2007 bis 10. April 2008. Es zeigte sich schon sehr bald, dass die Fehlerhäufigkeit gegenüber der früheren Messung stark angestiegen ist. Dies war bedingt durch den teilweisen Ausfall und auch durch komplettes Versagen einzelner Datenlogger. Eine verlässliche Datenauswertung war somit nicht möglich. Soweit Daten ausgewertet werden konnten bestätigten sie die früheren Aussagen.

An beiden Standorten zeigen die Porzellanoberflächen deutlich höhere Werte als die Silikonoberflächen. Dabei sind nahezu ausnahmslos die oberliegenden Sonden auf dem Porzellan betroffen. Dabei sind Werte $> 7 \mu\text{S}$ auf dicke Wasserschichten zwischen den Elektroden zurückzuführen.

Insgesamt ist die lokale Fremdschichtbelastung an beiden Messorten als gering einzustufen. Eine Alterung der Silikonoberfläche ist nicht zu beobachten.

7. Folgerungen

Betauungsversuche

Es wurde ein Verschmutzungsverfahren erarbeitet, das die Vorgaben für eine haftende künstliche Fremdschicht auf hydrophoben Silikonoberflächen ausreichend erfüllt:

- Reproduzierbare Erzeugung einer möglichst gleichmäßigen trockenen künstlichen Schicht mit gewünschter Leitfähigkeit;
- Auch bei mehrfacher Befeuchtung durch Betauung liegt der Verschmutzungsgrad, angegeben durch den SDD-Wert (Salt Deposit Density) nach einem Versuch, im Bereich von $\pm 15\%$ des Anfangswertes;
- Schon nach einer Regenerationszeit von 24 Stunden ist eine Wiederherstellung der Oberflächenhydrophobie von überwiegend HC 6 auf HC 5 festzustellen.

Die Regenerationszeiten vor den Betauungsversuchen haben keinen Einfluss auf den Beginn der Ableitstromaktivität. Bei allen Betauungsversuchen wurde Stromaktivität im ersten Zyklus festgestellt, d.h. die Befeuchtung bei Betauung überdeckt eine eventuell vorhandene Hydrophobie.

Die Ableitstromentwicklung für einen Isolatorotyp ist von Versuch zu Versuch unterschiedlich. Dies ist vermutlich auf die wechselnde dynamische Veränderung der Oberflächenleitfähigkeit zurückzuführen.

Bei mehrfacher Befeuchtung durch Betauung stellt sich eine extrem ungleichmäßige Verteilung der Oberflächenleitfähigkeit auf den Schirmoberseiten ein. Es entstehen größere Kriechweganteile mit sehr geringer Leitfähigkeit und eine Erhöhung der Leitfähigkeit an den Schirmrändern. Der zu ermittelnde SDD-Wert nach einem Versuch ist auch nach 12 Betauungszyklen nahezu unverändert im Vergleich zu dem Anfangswert, aber die großen Oberflächenanteile mit der geringen Leitfähigkeit unterdrücken die Ableitstromaktivität trotz guter Benetzbarkeit der Isolatoroberfläche.

Die während den durchgeführten Versuchsserien aufgetretenen Strombelastungen haben in keinem Fall zu sichtbaren Erosionsspuren geführt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das angewendete Prüfverfahren mit Betauung für Langzeitversuche an Silikonisolatoren in dieser Art nicht geeignet ist, da das Verfahren selbst nach wenigen Zyklen eine strommäßige Belastung der Prüflingsoberfläche verhindert. Eine Aussage über das Langzeitverhalten von Silikonisolatoren unter Betauung ist mit diesem Verfahren nicht möglich.

Im Betrieb zu erwartende Schichtleitfähigkeiten

Durch den teilweisen Ausfall und auch durch komplettes Versagen einzelner Datenlogger war eine verlässliche Datenauswertung nicht möglich. Soweit Daten ausgewertet werden konnten bestätigten sie die früheren Aussagen.

Insgesamt ist die lokale Fremdschichtbelastung an beiden Messorten als gering einzustufen, bei den Porzellanoberflächen ist von Schichtleitfähigkeitswerten zwischen 2 μS und 4 μS auszugehen. Eine Alterung der Silikonoberfläche ist nicht zu beobachten.

8. Schrifttum

- [1] Technischer Bericht der FGH Nr. 291, 1999: Oberflächenverhalten von Freiluftgeräten mit Kunststoffgehäusen
- [2] Technischer Bericht der FGH Nr. 293, 2001: Langzeitverhalten von Silikonisierungen
- [3] Technischer Bericht der FGH Nr. 297, 2004: Freiluftverhalten von Silikonisolatoren.
- [4] Kindersberger J., Kuhl M.: Effect of hydrophobicity on Insulator Performance. 6th International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, 1989, Paper 12.01
- [5] VDE 0441-1000, November 2006: Polymerisolatoren für Innenraum- und Freiluftanwendungen über 1 kV – Allgemeine Begriffe, Prüfverfahren und Annahmekriterien
- [6] IEC TS 62073, 2003: Guidance for the measurement of wettability of insulator surfaces
- [7] Liang Xidong, Wang Shaowu, Huang Lenceng, Shen Qinghe, Cheng Xueqi: Artificial Pollution Test and Pollution Performance of Composite Insulators. 7th ISH, London, UK, August 23-27, 1999, Paper 4.337.P2
- [8] Gutman I., Hartings R., Åsröm U., Gustavsson D.: Procedure to obtain a realistic Degree of Hydrophobicity on artificially polluted Silicone Rubber Insulators. 12th ISH, Bangalore, India, August 20-24, 2001, Paper 5-2
- [9] Wang Shaowu, Liang Xidong, Cheng Zixia, Wang Xun, Li Zhi, Zhou Yuanxiang, Yin Yu, Wang Liming, Guan Zhicheng: Hydrophobicity changing of Silicone Rubber Insulators in Service. CIGRE Session 2002, Paris, France, Paper 15 305
- [10] Li Zhenyu, Liang Xidong, Zhou Yuanxiang, Yin Yu, Li Xuesong: Hydrophobicity Changes of SIR Composite Insulators on Multi-Stress Ageing Test. 14th ISH, Beijing, China, August 25-29, 2005
- [11] IEC 60507, 1991: Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems

Tabellen

Tabelle 1 **Abmessungen der Silikon-Mittelspannungsisolatoren**

Typ	A1	A2	B	C
Isolierlänge (mm)	275	275	350	300
Kriechweglänge (mm)	765	765	830	720
Strunkdurchmesser (mm)	30	30	22	22
Schirmdurchmesser (mm)	91	91	160	120
Schirmabstand (mm)	30	30	70	50
Schirmanzahl	8	8	4	5
Silikonmaterial	HTV 1	HTV 2	HTV	LSR

Tabelle 2 Vergleich der SDD-Werte vor und nach Betauungsversuchen

Lfd. Nr.	Suspension bei 20 °C (mS/cm)	Isolatortyp	SDD (mg/cm ²)		Abweichung vom Anfangswert (%)
			Anfangswert (Referenzisolatoren)	Nach Versuch	
1	3,04	A1	0,0210	0,0227	8,1
		B	0,0247	0,0225	-8,9
		C	0,0194	0,0221	13,9
2	3,05	A2	0,0230	0,0218	-5,2
		B	0,0206	0,0208	1
		C	0,0244	0,0212	-13
3	7,31	A2	0,0539	0,0556	3,1
		B	0,0458	0,0508	11
		C	0,0382	0,0432	14
4	7,42	A1	0,0367	0,0407	10,9
		B	0,0311	0,0348	11,9
		C	0,0365	0,0318	-12,9
5	19,5	A1	0,0742	0,0733	-1,2
		B	0,0678	0,0779	14,9
		C	0,0700	0,0718	2,6
6	21	A2	0,0819	0,0857	4,6
		B	0,0709	0,0687	-3,1
		C	0,0869	0,0952	9,6
7	22	A1	0,0707	0,0724	2,4
		B	0,0895	0,0948	5,9
		C	0,0919	0,0838	-8,8
8	24	A2	0,0818	0,0889	8,7
		B	0,0894	0,0908	1,6
		C	0,0984	0,0877	-10,9
9	24	A2	0,0708	0,08	13
		B	0,0965	0,0843	-12,7
		C	0,0966	0,0932	-3,5
10	27,4	A1	0,0877	0,0936	6,7
		B	0,1017	0,1024	0,7
		C	0,0966	0,1	3,5

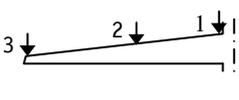
Tabelle 3 Prüfparameter der Betaungsversuche

Prüfspannung	24 kV
Anordnung	senkrecht
Potenzialverteilung	nahezu linear durch 2 Steuer- gitter
Längsfeldstärke	130 kV / m (Scheitelwert)
Zyklusdauer	6 h (4 h Kühlen, 2 h Heizen)
Versuchsdauer	max. 12 Zyklen (72 h)

Tabelle 4 Daten der Betaungsversuche (Versuche in zeitlicher Reihenfolge)

Ver.-Nr.	Suspensionsleitfähigkeit bei 20 °C (mS / cm)	Referenzisolator	SDD (Referenzisolator) (mg / cm ²)	Regenerationszeit vor dem Versuch (h)	Versuchsdauer (Zyklen)	Dauer der Ableitstromaktivität A1/A2 – B – C (Zyklen)	Höchster Ableitstrom im Versuch A1/A2 – B – C (mA)
1	7,31	A2	0,0539	0	12	2 / 2	1 / 1,3
		B	0,0458			1	1
		C	0,0382			1	1,5
2	7,42	A1	0,0367	0	12	2 / 2	1 / 1
		B	0,0311			1	1,5
		C	0,0365			2	1,2
3	3,05	A2	0,0230	0	12	keine Strommessung	
		B	0,0206				
		C	0,0244				
4	3,04	A1	0,0210	0	12	1 / 1	1 / 1
		B	0,0247			1	1,6
		C	0,0194			2	1,9
5	23,5	A2	0,0870	0	12	1 / 1	1 / 1
		B	0,0745			2	1,5
		C	0,0884			2	4
6	22,7	A1	0,0860	0	12	2 / 1	1,5 / 17
		B	0,0735			1	2
		C	0,0874			2	29
7	23,9	A2	0,0795	0	12	3 / 2	3 / 1,7
		B	0,0794			3	2,5
		C	0,0923			2	8
8	24	A2	0,0818	24	12	2 / 7	5,3 / 11
		B	0,0894			7	1
		C	0,0984			7	17,5
9	24,2	A2	0,0745	72	12	1 / 4	5 / 13
		B	0,0720			2	7
		C	0,0870			7	23
10	23,1	A1	0,0830	0	12	2 / 6	2 / 14
		B	0,0994			1	52
		C	0,0935			4	53
11	26,7	A2	0,0833	72	12	1 / 3	1,5 / 4
		B	0,0802			1	1,5
		C	0,0920			7	8
12	27,4	A1	0,0877	120	8	1 / 3	1,5 / 2,5
		B	0,1017			2	1
		C	0,0966			7	3,5
13	24	A2	0,0708	0	12	3 / 2	1,5 / 11
		B	0,0965			2	10
		C	0,0966			2	19
14	22	A1	0,0707	20	8	1 / 2	14 / 25
		B	0,0895			2	1,5
		C	0,0919			2	6
15	19	A2	0,0652	0	8	1 / 2	8,5 / 3
		B	0,0710			4	4
		C	0,0789			2	6
16	19,5	A1	0,0742	16	8	1 / 1	2 / 2
		B	0,0678			keine Strommessung	
		C	0,0700			1	36
17	21	A2	0,0819	0	12	1 / 3	7 / 52
		B	0,0709			1	20
		C	0,0869			3	86

Tabelle 5 Ergebnisse der Schichtleitfähigkeitsmessung bei mittlerer Verschmutzung

Lfd. Nr.	Schichtleitfähigkeit (μS)					
						
	vor Versuch			nach Versuch		
	1	2	3	1	2	3
1	15 - 20		2 - 4		29	
2	14 - 20		1 - 4		32	
3	14 - 21		0 - 4		29	
4	12 - 17		1 - 5		29	
5	14 - 22		2 - 3		30	
6	15 - 21		0 - 4		30	

Bilder



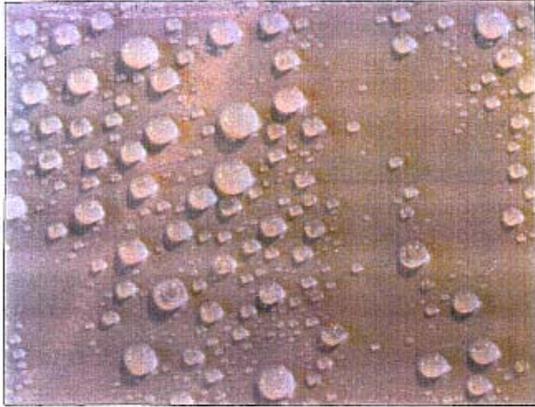
a) Befeuchtung durch Nebel

b) Befeuchtung durch Betauung

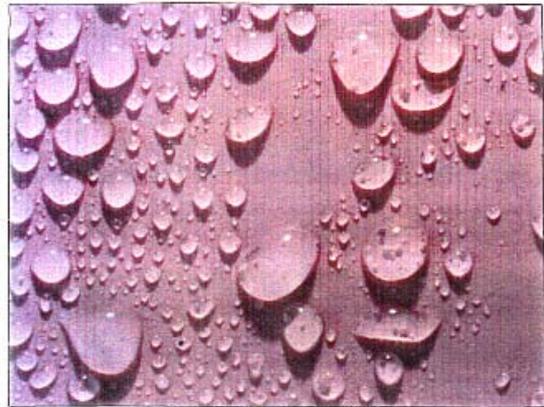
Bild 1 Vergleich der Oberflächenbefeuchtung durch Nebel und durch Betauung



Bild 2 Silikon-Mittelspannungsisolatoren



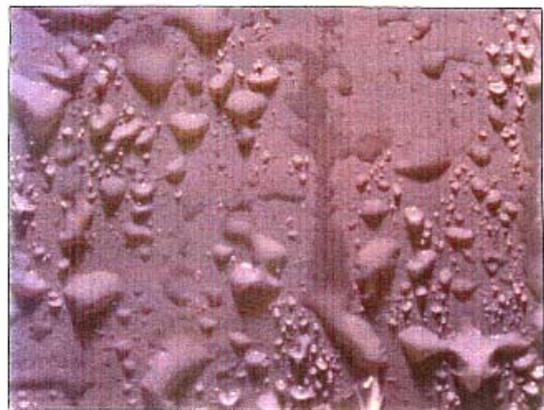
HC 1



HC 2



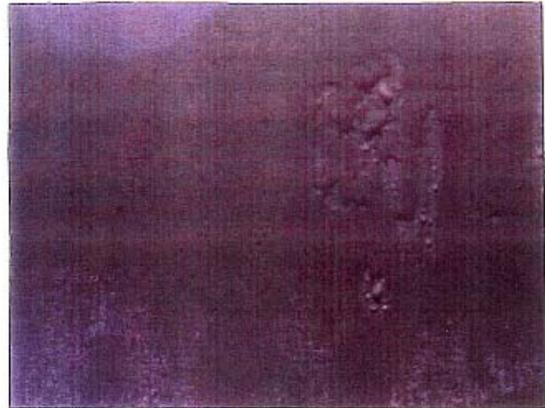
HC 3



HC 4



HC 5



HC 6

Bild 3 Typische Beispiele von Oberflächen und Hydrophobieklassen von 1 bis 6 (natürliche Größe) [6]

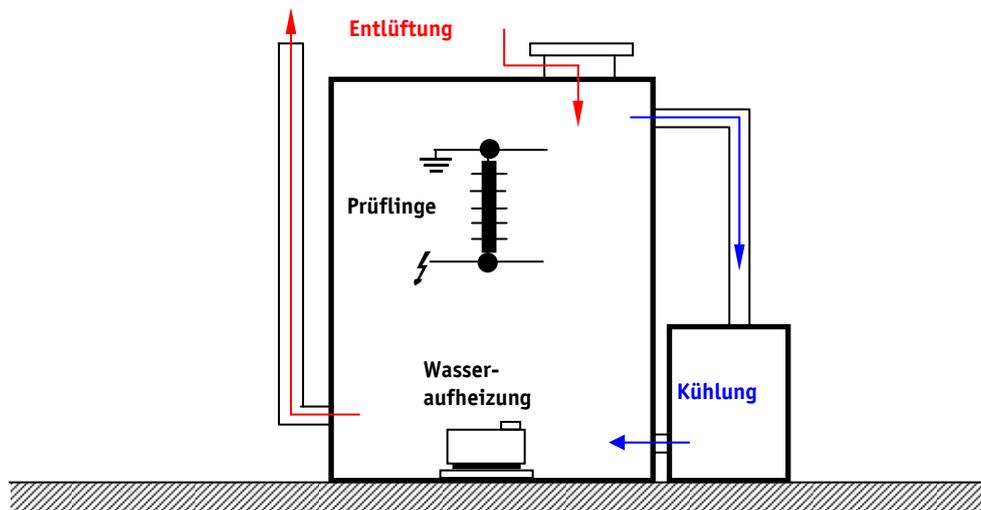


Bild 4 Prinzipieller Aufbau der Prüfzelle für die Btauungsversuche



Bild 5 Isolierte Prüfzelle für Btauungsversuche mit Prüflingen und Wasserbehälter

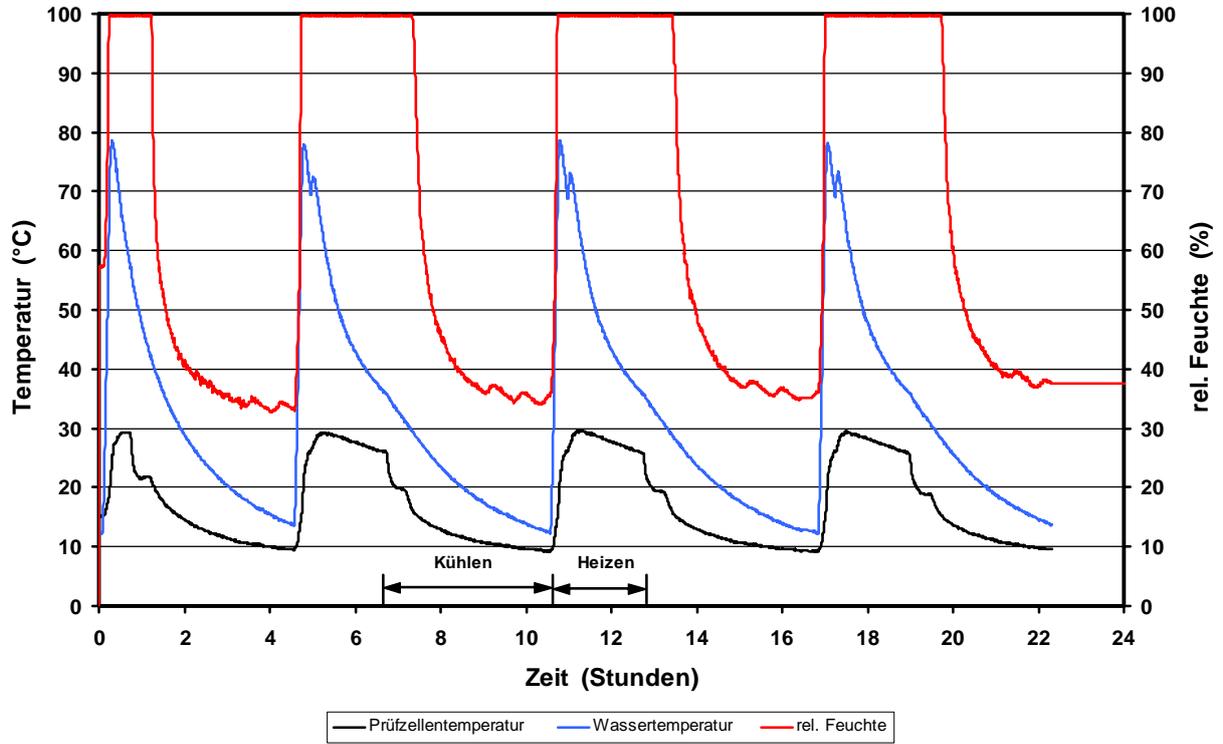


Bild 6 Befeuchtungszyklen bei Betaung mit anstehender Prüfspannung



**Bild 7 Isolator Typ A1:
Gleichmäßigkeit der trockenen Schicht**



**Bild 8 Isolator Typ B:
Gleichmäßigkeit der trockenen Schicht**



**Bild 9 Isolator Typ C:
Gleichmäßigkeit der trockenen Schicht**



a) nach 24 h: HC 5



b) nach 72 h: HC 4

Bild 10 Isolator Typ A1: Verbesserung der Oberflächenhydrophobie



a) nach 24 h: HC 5



b) nach 72 h: HC 4

Bild 11 Isolator Typ A2: Verbesserung der Oberflächenhydrophobie



a) nach 24 h: HC 5



b) nach 72 h: HC 3 - 4

Bild 12 Isolator Typ B: Verbesserung der Oberflächenhydrophobie



a) nach 24 h: HC 5



b) nach 72 h: HC 4

Bild 13 Isolator Typ C: Verbesserung der Oberflächenhydrophobie

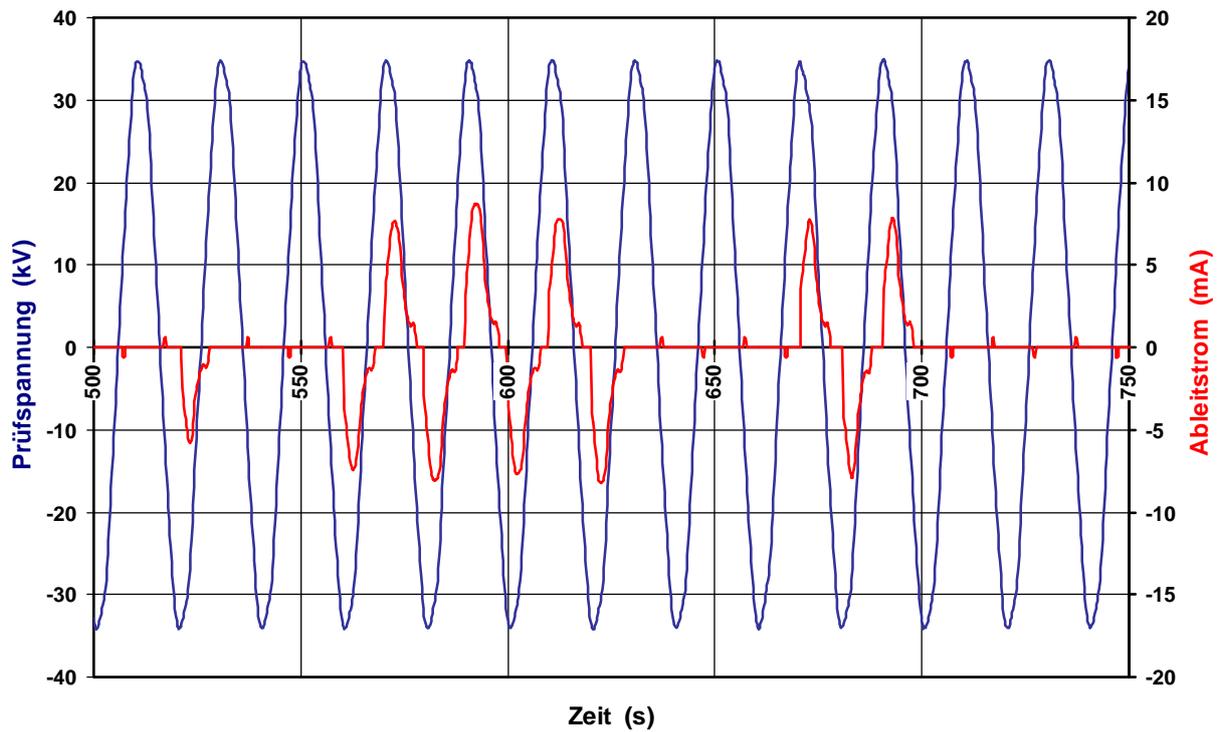


Bild 14 Isolator Typ C: Ableitstrom in einem Betauungsversuch

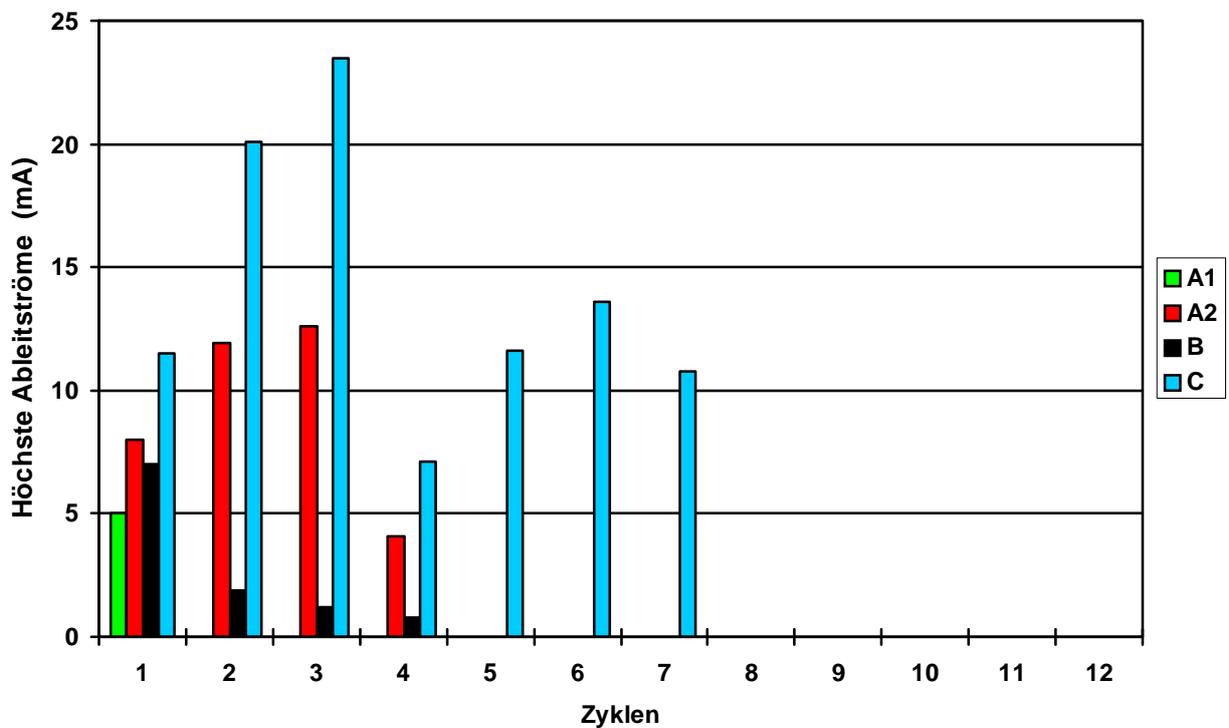


Bild 15 Ableitstromentwicklung während eines Betauungsversuches mit 4 Prüflingen (siehe auch Tabelle 4, Versuch Nr. 9)

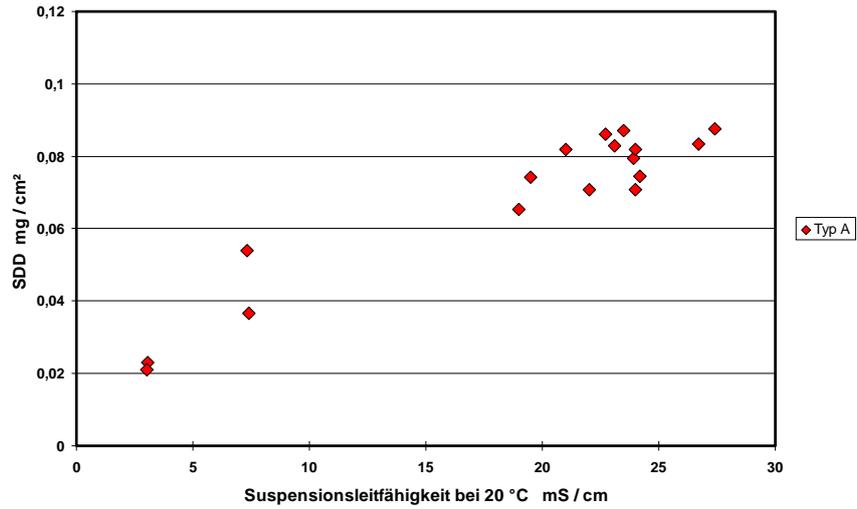


Bild 16 Isolator Typ A: Suspensionsleitfähigkeit und Verschmutzungsgrad

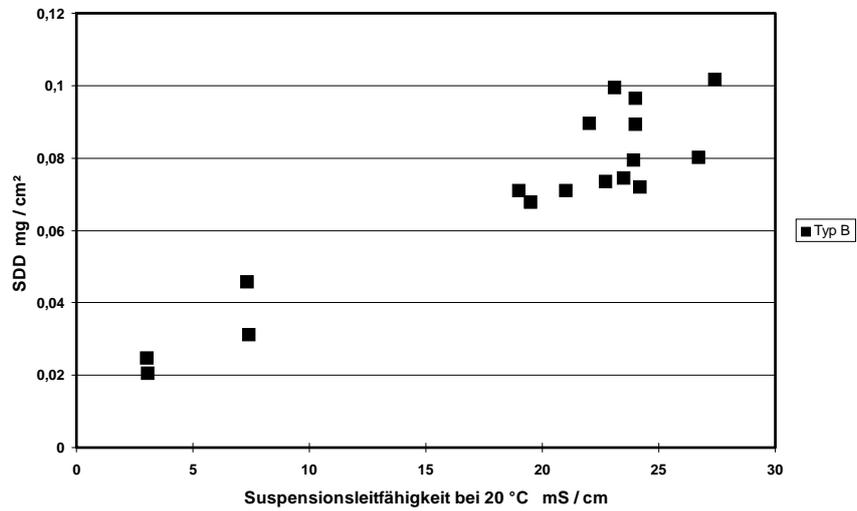


Bild 17 Isolator Typ B: Suspensionsleitfähigkeit und Verschmutzungsgrad

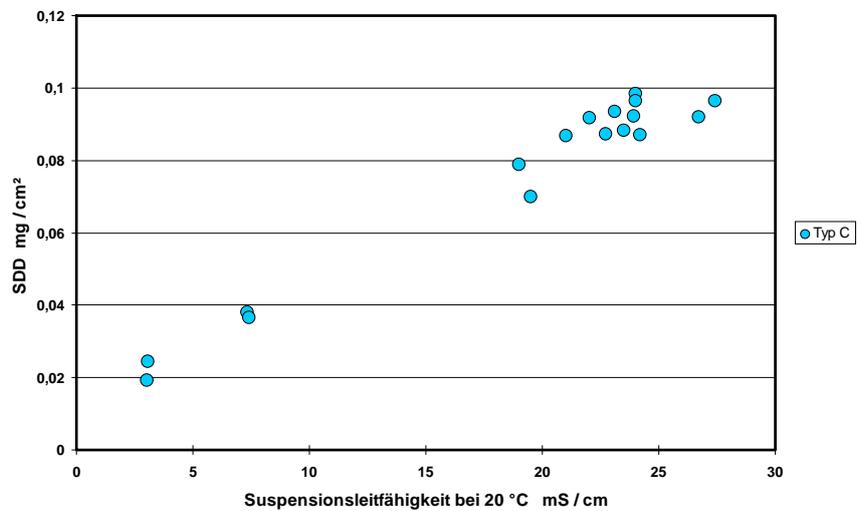
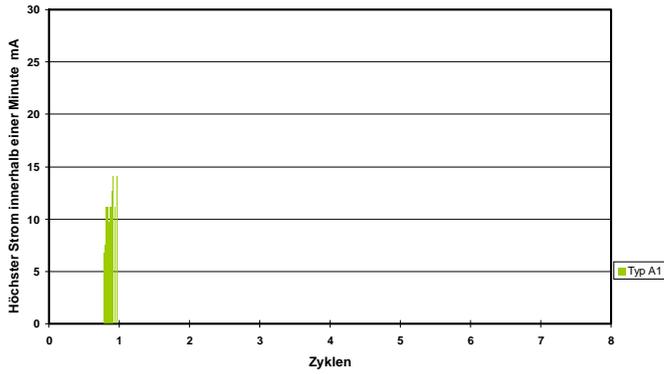
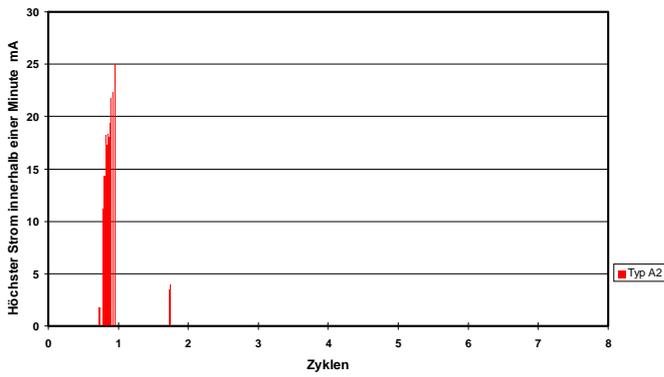


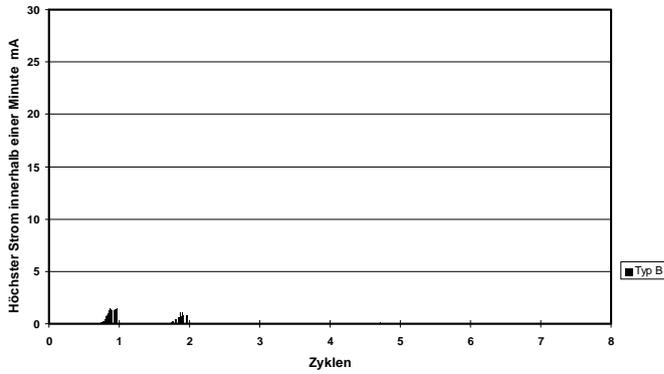
Bild 18 Isolator Typ C: Suspensionsleitfähigkeit und Verschmutzungsgrad



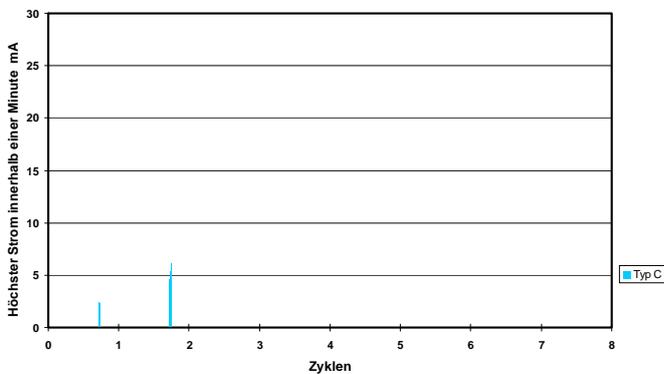
a) Isolator Typ A1
SDD = 0,0707 mg / cm²



b) Isolator Typ A2
SDD = 0,0707 mg / cm²



c) Isolator Typ B
SDD = 0,0895 mg / cm²



d) Isolator Typ C
SDD = 0,0919 mg / cm²

Bild 19 Ableitstromentwicklung in Versuch 14 (siehe Tabelle 4)

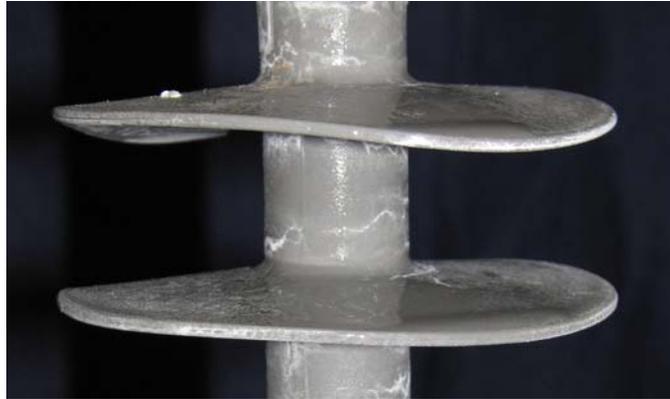
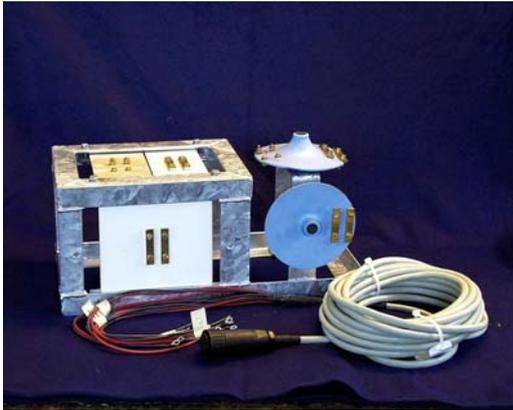


Bild 20 Isolator Typ A1: Beispiel für die Benetzbarkeit der der Isolatoroberfläche nach 12 Btauungszyklen (HC 5 – 6)



Bild 21 Beispiel für die Messung der Schichtleitfähigkeit



a) Anordnung der Messsonden



b) Datenlogger

Bild 22 Messsystem zur Erfassung der Fremdschichtbeanspruchung im Betrieb



Bild 23 Maststandorte für die Betriebsmessung im 400-kV-Netz



Bild 24 Blick von Mast 234 nach Süden



Bild 25 Blick von Mast 221 nach Süden

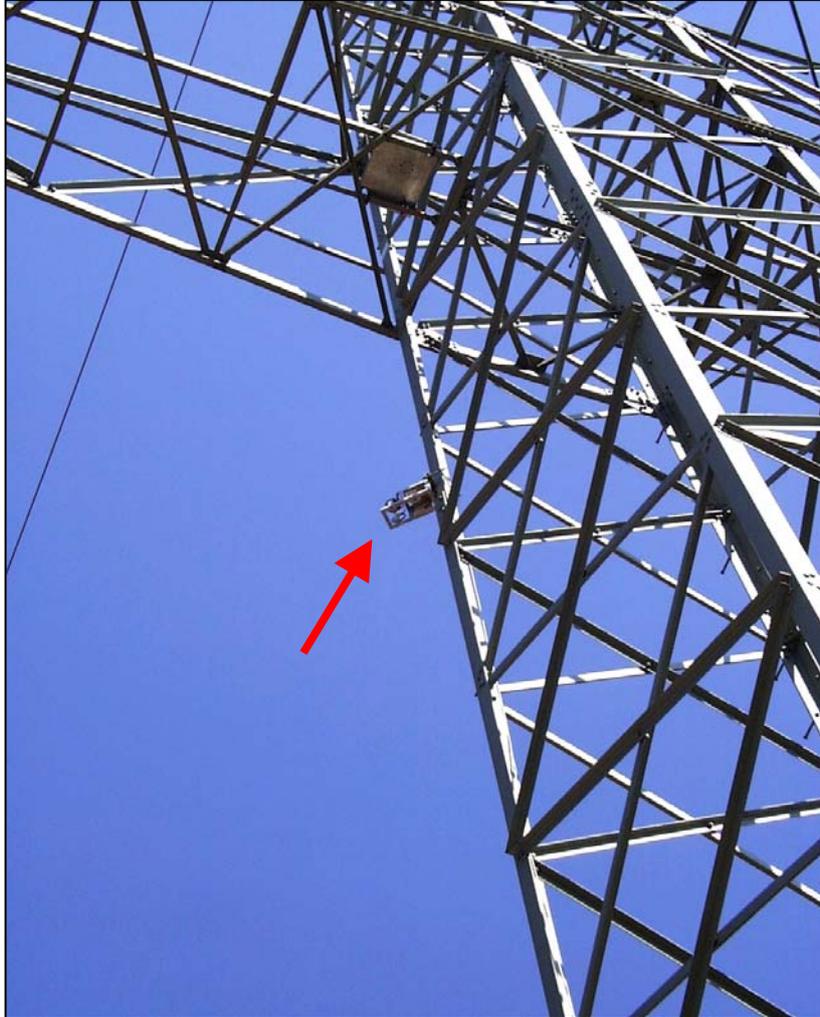


Bild 26 Messsonden an Mast 234