

Forschungsinst. d. FGH e.V.

Name der Forschungsstelle(n)

13035 N / III

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.09.01 bis 31.08.03

Bewilligungszeitraum

**Schlußbericht für den Zeitraum : 01.09.01 bis 31.08.03**

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema : Freiluftverhalten von Silikonisolatoren

Mannheim, 19. Dezember 2003

Ort, Datum

A handwritten blue ink signature, appearing to be a stylized 'H' or a similar character, is placed here.

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

## Freiluftverhalten von Silikonisolatoren

Inhalt	Seite
<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
1. Einführung	4
2. Aufgabe	5
3. Hydrophobieverlust in Laborversuchen an Mittelspannungs-isolatoren	5
3.1 Prüflinge	5
3.2 Prüfverfahren	5
3.2.1 Verfahren mit konstanter Fremdschichtbeanspruchung	5
3.2.2 Verfahren mit zyklischer Fremdschichtbeanspruchung	6
3.2.3 Gleichbleibende Prüfparameter bei beiden Prüfverfahren	7
3.3 Serie 1: Hydrophobieverlust und Ableitstromentwicklung bei konstanter Beanspruchung mit Nebel	7
3.4 Serie 2: Hydrophobieverlust und Ableitstromentwicklung bei zyklischer Beanspruchung mit Betauung	8
3.4.1 Versuchsergebnisse	8
3.4.2 Stromentwicklung während der Betauungsphase	9
3.5 Serie 3: Hydrophobieverlust und Ableitstromentwicklung an natürlich verschmutzten Isolatoren bei zyklischer Betauung	9
4. Nachbildung von ungleichmäßigem Hydrophobieverlust an Hochspannungsisolatoren	9
4.1 Prüflinge	9
4.2 Prüfverfahren	10
4.3 Serie 1: Ermittlung des Einflusses der Verteilung des hydrophoben Anteils der Isolatoroberfläche auf das Überschlagsverhalten	10
4.4 Serie 2: Ermittlung des Einflusses von Oberflächenleitfähigkeit und Befeuchtungsart auf das Überschlagsverhalten unterschiedlich großer Schlagweiten	11
5. Ermittlung der im Betrieb bei Betauung zu erwartenden Schichtleitfähigkeit an bekannten Fehlerorten im 400 – kV – Netz	11
5.1 Messsystem und Einsatzorte	11
5.2 Bisherige Ergebnisse	12
6. Folgerungen	12
7. Schrifttum	14

### Tabellen

### Bilder

## Zusammenfassung

Silikonelastomere werden in den Netzen der Energieübertragung- und -verteilung weltweit in steigendem Maß eingesetzt. In jüngster Zeit wurden in einigen Fällen vermehrt Überschläge an Freileitungsisolatoren im 400-kV-Netz beobachtet, die in ländlich genutzten Inlandgebieten teilweise nach der sehr kurzer Betriebszeit von einigen Tagen auftraten, und daher also zu der klassischen Fremdschichtbeanspruchung keinen Bezug hatten. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte mit Hilfe von Laborversuchen untersucht werden, wie das Überschlagsverhalten von Silikonisolatoren von den unterschiedlichen Betriebsbedingungen (Befeuchtungsart, Oberflächenleitfähigkeit, partieller Hydrophobieverlust) beeinflusst wird.

Schon bei geringer Leitfähigkeit treten bei den für die Versuche gewählten Befeuchtungsarten (kontinuierliche Benebelung – IEC-Versuch bzw. zyklische Betauung) Oberflächenentladungen auf, die zum Hydrophobieverlust beitragen und Erosionsspuren verursachen. Im Gegensatz zu den Versuchen mit kontinuierlicher Benebelung, in denen bei geringen Leitfähigkeiten nicht für alle Prüflinge Entladungsaktivitäten festgestellt wurden, treten bei zyklischer Betauung an allen Prüflingen Oberflächenentladungen auf. Die genaue Beobachtung des Stromes während der Betauungsphase zeigt zu Beginn einen sinusförmigen Verlauf, der auf eine durchgehende, leitfähige Schicht auf der Isolatoroberfläche schließen lässt, d.h. die Hydrophobie wird bei Betauung nicht wirksam. Die Unwirksamkeit der Hydrophobie ist die Ursache, dass schon bei geringen Oberflächenleitfähigkeiten bei allen Prüflingen Entladungen festzustellen sind, die zu Erosionsspuren führen können. Dies gilt auch für Silikonisolatoren mit natürlicher Verschmutzung.

Das Überschlagsverhalten einer hydrophoben Zone ist nahezu unabhängig von der Position oder einer Aufteilung dieser Zone entlang des Isolators. Bei Dampfbefeuchtung und bei Betauung steigt die erforderliche Überschlagsfeldstärke mit abnehmendem Verschmutzungsgrad an. Dabei ändert sich bei Betauung dieser Wert nur gering, bei Dampfbefeuchtung ist eine doppelt so hohe Feldstärke erforderlich.

Die im Betrieb bei Betauung zu erwartenden Leitfähigkeiten liegen für Porzellanoberflächen bei etwa 3  $\mu\text{S}$  und damit bei geringer Verschmutzung. Eindeutige Messwerte für Silikonoberflächen liegen noch nicht vor.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die realitätsnahe zyklische Befeuchtung durch Betauung die kritischere Beanspruchung für Silikonisolatoren im Vergleich zur Dauerbenebelung darstellt. Das gilt insbesondere für geringe Verschmutzung. Da bei Betauung die Hydrophobie nahezu unwirksam ist, unterliegen alle Silikonisolatoren unabhängig von ihren Materialeigenschaften den gleichen Beanspruchungen.

Für den praktischen Einsatz wird die Langzeitbeständigkeit der Silikonisolatoren im Vergleich zur Überschlagfestigkeit als der wichtigere Gesichtspunkt angesehen. Die vorliegenden Versuchsergebnisse sind für eine entsprechende abschließende Beurteilung nicht ausreichend. Einmal fehlen genauere Hinweise über die bei Betauung im Betrieb möglichen Leitfähigkeiten durch Oberflächenentladungen, zum andern ist die Zahl der in diesem Vorhaben durchgeföhrten Versuche und der Bereich möglicher Parametervariationen begrenzt. Für die hier gefundenen neuen Erkenntnisse sind stützende Weiteruntersuchungen zu empfehlen. Dazu gehört auch die Überprüfung der Relevanz bestehender Prüfungen zur Langzeitbeständigkeit und ggf. die Entwicklung neuer Verfahren.

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltssmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) als Forschungsvorhaben Nr. 13035N "Langzeitverhalten von Silikonisolatoren" gefördert.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde 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 Mittespannungsbereich als auch für Gehäuse von Überspannungsableitern, Durchführungen, Messwandlern und andere Anwendungen. Die Vorteile 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 Silikonisolierungen 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 durchgeföhrten 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] und Nr. 11729 [2]).

Über das Verhalten der Silikonoberfläche bei Vorhandensein von Fremdschichten auf der Oberfläche sind die grundlegenden Vorgänge heute weitgehend bekannt. Die Phasen des Hydrophobieverlusts und der Regenerierung bei Pausen in der Fremdschichtbeanspruchung sind weitgehend bekannt, wenn auch eine internationale Einigung über ein betriebsrelevantes Langzeit-Prüfverfahren noch aussteht. Alle Verfahren gehen aber 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 jüngster Zeit wurden vermehrt Überschläge an Freileitungsisolatoren im 400-kV-Netz beobachtet. Die Überschläge traten an Isolatoren im ländlich genutzten Inlandgebiet teilweise nach der sehr kurzen Betriebszeit von einigen Tagen auf, hatten also zu der klassischen Fremdschichtbeanspruchung keinen Bezug. Sie geschahen im normalen Netzbetrieb, so dass auch 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 zwei Herstellern, die sowohl unterschiedliche Materialien von verschiedenen Herstellern als auch unterschiedliche Herstellungsverfahren (Hochtemperatur- und Raumtemperaturvulkanisierung) anwenden.

Oberflächenablagerungen, 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.

Völlig ungeklärt ist z.B. die Frage, welche Vorgänge auf der Oberfläche der Isolatoren zu Überschlägen bei normaler Betriebsspannung führen können. Dies ist insbesondere rätselhaft, weil keramische Isolatoren, d.h. Isolatoren mit hydrophiler Oberfläche, diesen Beanspruchungen ohne negative Auswirkungen standhalten. Diese Beobachtung deutet daraufhin, dass eine ungleichmäßige Hydrophobie auf der Oberfläche zu Erscheinungen führen kann, die wesentlich kritischer sind als bei vollständig hydrophilen Oberflächen. Darüber hinaus scheint immer die dem Mast am nächsten liegende Phase von den Überschlägen betroffen. Da diese Phase wegen der Nähe von geerdeten Teilen die am meisten nichtlineare Potentialverteilung entlang des Isolators aufweist, scheint die kapazitive Feldverteilung mit einer Rolle für das Entstehen der Überschläge zu spielen.

Nähere Informationen über die in dem betroffenen Gebiet vorhandenen, die Entstehung von leitfähigen Schichten evtl. begünstigenden Umgebungsbedingungen liegen nicht vor.

## 2. Aufgabe

In Laborversuchen soll untersucht werden, wie das Überschlagsverhalten von Silikonisolatoren beeinflusst wird durch

- unterschiedliche Befeuchtung (Salznebel – Betauung);
- verschiedene Oberflächenleitfähigkeiten;
- ungleichmäßige Leitfähigkeiten entlang des Isolators (partieller Hydrophobieverlust);
- unterschiedliche dielektrische Feldstärke.

Anhand der Untersuchungsergebnisse sollen kritische Material- und Umgebungsbedingungen bestimmt werden, die in Gebieten geringer Fremdschichtbeanspruchung zu Überschlägen führen können.

## 3. Hydrophobieverlust in Laborversuchen an Mittelspannungsisolatoren

### 3.1. Prüflinge

Als Prüflinge für diese Untersuchung standen Silikon-Leitungsisolatoren von drei Herstellern zur Verfügung. **Bild 1** zeigt die Mittelspannungsprüflinge, in **Tabelle 1** sind die relevanten Bauformdaten zusammengestellt. Die Typen A1 und A2 sind baugleich, sie unterscheiden sich nur im Silikonmaterial.

Die Komponenten der Prüfkreise (Regel- und Mittelspannungstransformator) waren so ausgewählt, dass bei einem ohmschen Laststrom von  $250 \text{ mA}_{\text{eff}}$  die Spannungsabsenkung der Prüfspannung kleiner als 5 % war.

Die Bewertung der Oberflächenhydrophobie erfolgte durch einen Vergleich der Tropfenbildung auf der Prüflingsoberfläche mit Referenzbildern (**Bild 2**) entsprechend dem in [3] angegebenen Verfahren (STRI-Verfahren). Ausgangspunkt einer jeden Bewertung ist immer die Tröpfchenbildung auf der Silikonoberfläche im Neuzustand (**Bild 3**).

Bei einigen in diesem Bericht wiedergegebenen Farbfotografien erscheint derselbe Isolator in unterschiedlichen Farben. Dies ist verursacht durch die zum Zeitpunkt der Aufnahme herrschenden unterschiedlichen Lichtverhältnisse (natürliches Licht, Beleuchtung mit Scheinwerfern, Blitzlichtaufnahmen).

### 3.2. Prüfverfahren

#### 3.2.1. Verfahren mit konstanter Fremdschichtbeanspruchung

Diese Versuche wurden in Anlehnung an den bekannten 1000 h-Versuch entsprechend IEC 61109 [4] durchgeführt. Dabei wird bei konstant anliegender Prüfspannung die Isolatoroberfläche über die gesamte Versuchsdauer permanent mit Nebel beaufschlagt. Abweichend von dem Standardverfahren, bei dem die Prüflinge sowohl vertikal als auch horizontal angeordnet werden, wurde in diesem Vorhaben nur in senkrechter Position geprüft. Entsprechend der Problemstellung wurde die Salzmassenkonzentration des Salzwassers zur Nebelerzeugung von  $10 \text{ kg/m}^3$  zu Werten geringerer Verschmutzung ( $1 \text{ kg/m}^3$  und weniger) reduziert. In **Tabelle 2** sind die Prüfparameter für dieses Verfahren zusammengestellt.

Bei allen Versuchen wurde während der gesamten Versuchsdauer, getrennt für jeden Prüfling, der über die Silikonoberfläche fließende impulsförmige Ableitstrom, der durch Entladungen auf der Isolatoroberfläche verursacht wird, kontinuierlich erfasst, um Einsatzzeit und Intensität dieser Entladungen bestimmen zu können.

### 3.2.2 Verfahren mit zyklischer Fremdschichtbeanspruchung durch Betauung

Im Gegensatz zu dem IEC-Verfahren kann bei konstant anstehender Prüfspannung mit zyklischer Fremdschichtbeanspruchung eine betriebsrelevante Beanspruchung simuliert werden. Eine solche zyklische Beanspruchung kann ebenfalls mit Salznebel erfolgen, wie dies in bereits durchgeführten Forschungsvorhaben geschehen ist [1, 2]. Entsprechend der Problemstellung wurden auch hier geringe Oberflächenleitfähigkeiten verwendet. Die Relevanz dieser Verfahren für die Silikonisolatoren konnte aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen ausreichend festgestellt werden.

Die Zielsetzung des hier berichteten Vorhabens war es, die unterschiedlichen Vorgänge bei Befeuchtung mit Nebel und durch Betauung festzustellen. Aus diesem Grund erfolgte die zyklische Oberflächenbefeuchtung hier durch Betauung. Dazu wird nach einer 4-stündigen Kühlphase, an deren Ende der Kunststoffisolator eine Temperatur zwischen 4 °C und 8 °C erreicht hat, in der Prüfzelle 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 Prüfzelle für 30 Minuten, danach folgt wieder die Abkühlung.

Konstruktion und Aufbau der Prüfzelle für die Betauungsversuche mit dem Volumen 2,34 m<sup>3</sup> erfolgte in Eigenleistung. Die tragende Grundkonstruktion besteht aus Vierkantholz, die Wände werden aus zwei Lagen "Styrodur"-Hartschaumplatten gebildet. Alle Fugen sind mit Silikondichtungsmasse verschlossen. Die Vorderseite der Zelle ist als Tür ausgebildet, die sich beim Einsetzen aufgrund der vorhandenen Führungen ausreichend selbst abdichtet.

Die Kühlung der Luft in der Prüfzelle erfolgt durch eine Spezial-Tiefkühltruhe mit einstellbarer Temperatur und einer maximalen Tieftemperatur von -40 °C. Sie dient als Kältespeicher, und das Zu- und Ableitungsrohr sind durch Klappen geschlossen. Der Luftaustausch zwischen Prüfzelle und Tiefkühltruhe erfolgt durch einen handelsüblichen Rohrlüfter, bei dessen Betrieb die Klappen durch die Luftströmung geöffnet werden.

Die Aufheizung der Luft in der Prüfzelle, verbunden mit einer schnellen Erhöhung der relativen Feuchte auf Werte ≥ 96 %, erfolgt durch eine Heizplatte mit einem Wassergefäß.

Nach dem Ende der Erwärmungsphase ist es erforderlich, die feuchte Zellenluft mit der Umgebungsluft der Prüfzelle 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 Prüfzelle mit Prüflingen und Wassergefäß. Die Steuerung der einzelnen Versuchsphasen erfolgt über Zeitschaltuhren und ein mehrkanaliges Temperatormesssystem mit individuell für jeden Kanal einstellbaren Schaltpegeln.

Der anhand von Ergebnissen aus Vorversuchen festgelegte Verlauf von Temperatur und relativer Feuchte bei zyklischer Fremdschichtbeanspruchung durch Betauung ist in **Bild 6** dargestellt.

Durch Verdampfen von Salzsäure aus einem Glasbehälter, der sich im erhitzen Wasser befindet, erhält man bei Betauung einen leitfähigen Niederschlag auf der Isolatoroberfläche. Aufgrund der relativ kleinen thermischen Zeitkonstante der Silikonisolatoren ist davon auszugehen, das innerhalb der 2-stündigen Betauungsphase sich die Umgebungstemperatur und die Temperatur der Silikonoberfläche angleichen, sodass sich innerhalb dieser Zeitspanne auch die durch Betauung maximal mögliche Leitfähigkeit auf der Oberfläche ausbildet.

In **Tabelle 3** sind die Prüfparameter für die Versuche mit zyklischer Fremdschichtbelastung zusammengestellt.

### 3.2.3 Gleichbleibende Prüfparameter bei beiden Prüfverfahren

Die Dauerversuche zur Ermittlung des Hydrophobieverlustes wurden in allen Fällen bei der Prüfspannung  $24 \text{ kV}_{\text{eff}}$  durchgeführt. Um bei den Versuchen eine möglichst lineare Potentialverteilung entlang der Isolatoren zu erreichen (konstante Längsfeldstärke), wurden die Prüflinge zwischen zwei plattenförmigen Gittern (Abstand 261 mm) angeordnet. Auf der Erdseite wurden die Isolatoren mit künstlichen Elektroden versehen, sodass sich für alle vier Prüflinge etwa die gleiche dielektrische Feldstärke von 130 kV/m (Scheitelwert) ergab.

Die für beide Prüfverfahren sich ergebenden gleichbleibenden Prüfparameter sind in **Tabelle 4** zusammengestellt. **Bild 7** zeigt die versuchsrelevante Anordnung der Prüflinge am Beispiel der Prüfzelle für die Betauungsversuche.

### 3.3 Serie 1: Hydrophobieverlust und Ableitstromentwicklung bei konstanter Beanspruchung mit Nebel

Ziel der Versuche war die Feststellung, welcher Hydrophobieverlust sich allein durch eine permanente Benebelung ohne Leitfähigkeit einstellt, und inwieweit bereits eine geringe Leitfähigkeit zu Hydrophobieverlust und Ableitströmen führt. Die Versuche wurden an nicht vorbeanspruchten Isolatoren durchgeführt.

Zunächst wurde ein Versuch durchgeführt, bei dem Nebel ohne Leitfähigkeit aus demineralisiertem Wasser erzeugt wurde. Erwartungsgemäß traten keine messbaren Ableitströme auf. Eine Kontrolle nach einer Versuchsdauer von 114 Stunden zeigt einen deutlichen Hydrophobieverlust an allen Prüflingen (**Bild 8**). Dieser Verlust nahm bis zum Versuchsende nach 785 Stunden zu, wie das Beispiel an Prüfling C zeigt (**Bild 9**).

Für den zweiten Versuch in dieser Serie wurde Nebel aus Wasser mit der Salzmassenkonzentration  $1 \text{ kg/m}^3$  erzeugt, was geringer Verschmutzung entspricht. Der Hydrophobieverlust war vergleichbar mit dem Erscheinungsbild im ersten Versuch. Zusätzlich traten während der Versuchsdauer von 1000 Stunden Ableitströme auf, die an den Prüflingen B und C zu leichten Erosionspuren führten. Das **Bild 10** gibt die Entwicklung der höchsten Ableitströme innerhalb von 15 Minuten,  $i_{\text{höchst } 15}$ , während des Versuches wieder, die **Bilder 11** bis **13** zeigen die Erosionsspuren an den Prüflingen B und C.

Die Versuchsergebnisse der Serie 1 sind in der **Tabelle 5** zusammengestellt.

### 3.4 Serie 2: Hydrophobieverlust und Ableitstromentwicklung bei zyklischer Beanspruchung mit Betauung

#### 3.4.1 Versuchsergebnisse

Ziel dieser Versuche war, den Einfluss der Befeuchtung durch Betauung auf das Hydrophobieverhalten der Silikonoberfläche zu ermitteln. Betauung kommt in der Natur häufig vor und ist insbesondere in den Morgenstunden zu beobachten. Da bei Betauung der Isolator sich nicht in einem Tröpfchennebel befindet, sondern sich die Feuchtigkeit in der Luft auf der kälteren Oberfläche niederschlägt, wurde der Ausbildung des Wasserniederschlages auf der hydrophoben Oberfläche besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

Am Ende der 4-stündigen Kühlphase ist der komplette Isolator sicher auf eine Temperatur zwischen +4 °C und +8 °C abgekühlt. In der Erwärmungsphase wird die Umgebungstemperatur ausreichend schnell auf Temperaturen über +15 °C erhöht, gleichzeitig steigt die relative Feuchte schnell auf Werte > 94 % an. Aufgrund der kleinen thermischen Zeitkonstante des Kunststoffisolators wird während der 2-stündigen Warmphase mit Sicherheit das Maximum der Betauung erreicht, danach erfolgt wieder die Abtrocknung der Isolatoroberfläche. Die Beobachtung in Vorversuchen zeigte, dass der Isolator zu Beginn der nächsten Erwärmungsphase wieder abgetrocknet ist. Die Versuche wurden jeweils an neuen, nicht vorbelasteten Prüflingen durchgeführt.

Der erste Versuch der Serie 2 wurde ohne leitfähige Betauung durchgeführt, es wurde normales Leitungswasser erhitzt. Hierbei war ein deutlicher Unterschied in der Oberflächenbenetzung zwischen Benebelung mit Defensoren und Betauung festzustellen.

**Bild 14** zeigt im direkten Vergleich an dem Prüflingstyp C die Befeuchtung durch Nebel (Bild 14a) und durch Betauung (Bild 14b) in den Versuchen ohne Leitfähigkeit. Bei ausreichender Temperaturdifferenz zwischen Isolatoroberfläche und der Umgebungsluft mit hoher relativer Feuchte bilden sich keine diskreten Tropfen aus, da mögliche wasserfreie Flächen sofort wieder betauen. Dieses Befeuchtungsbild lässt vermuten, dass die Hydrophobie auf eine durch Betauung erzeugte Wasserschicht keinen oder nur geringen Einfluss hat. Dieses Verhalten kann entscheidend das Betriebsverhalten von Silikonisolatoren beeinflussen.

Erwartungsgemäß traten bei dem ersten Betauungsversuch aufgrund der fehlenden Leitfähigkeit während der gesamten Versuchsdauer von 1260 Stunden keine messbaren Ableitströme auf. Im nachfolgenden Versuch wurde die zusätzliche Leitfähigkeit durch Verdampfen von 30 prozentiger Salzsäure erzeugt, die in einem separaten Gefäß beim Aufheizen des Wassers mit erwärmt wurde.

Der zweite Versuch der Serie 2 wurde nach 740 Stunden beendet. An allen vier Prüflingen wurden Ableitströme gemessen. Schon kurz nach Versuchsbeginn, also ohne eine deutliche Verzögerung, traten Ströme von 1 mA auf. An allen vier Prüflingen war ein deutlicher Hydrophobieverlust feststellbar. Ebenso waren an allen Isolatoren leichte Erosionsspuren festzustellen.

In **Tabelle 6** sind die Ergebnisse der zwei Betauungsversuche zusammengestellt. **Bild 15** zeigt die Entwicklung der höchsten Ableitströme innerhalb von 15 Minuten. In **Bild 16** ist die Stromentwicklung an Isolator C für den Versuchszeitraum 550 h – 600 h dargestellt. Es ist gut zu erkennen, wie die Ableitstromentwicklung den Betauungsphasen folgt.

**Bild 17** zeigt die Tropfenbildung beim Ansprühen der gereinigten Oberflächen nach Ende des Versuches. Die Erosionsspuren an den vier Prüflingen sind in den Bildern **18** und **19** dargestellt.

### 3.4.2 Stromentwicklung während der Betauungsphase

Bei der Befeuchtung einer hydrophoben Oberfläche durch Betauung stellt sich die Frage, inwie weit die Hydrophobie eine großflächige Wasserschicht zulässt. Zur Klärung dieser Frage wurden besonders die Kurvenform und die Amplitudenentwicklung des Stromes über die Oberfläche ab Beginn der Betauungsphase beobachtet. Die Versuche wurden bei der Prüfspannung 24 kV und mit der Zugabe von Salzsäure erzeugten Leitfähigkeit des Taus durchgeführt.

Nach einer Betauungszeit von ca. 15 Minuten bis 20 Minuten treten messbare Oberflächenströme mit Amplituden von etwa  $150 \mu\text{A}$  auf (**Bild 20a**). Diese Ströme sind an allen vier Prüflingen messbar, die Kurvenform ist sinusförmig. Aus den größten gemessenen Stromwerten bei sinusförmiger Kurvenform lassen sich die Schichtleitfähigkeiten der betauten Oberfläche abschätzen. Diese liegen zwischen  $0,03 \mu\text{S}$  und  $0,05 \mu\text{S}$ , also bei Werten geringster Verschmutzung (**Tabelle 7**). Bei weiterer Betauung steigen die Amplituden der sinusförmigen Ströme an, bis sich im Bereich des Spannungsmaximums Gleitentladungen ausbilden und die Kurvenform den für Fremdschichtteillichtbögen typischen Verlauf zeigt (**Bild 20b**, nach 25 Minuten Prüfling C). Nach 32 Minuten ist bei größeren Amplituden diese Kurvenform an allen vier Prüflingen feststellbar (**Bild 20c**). Je nach Zustand der Silikonoberfläche verringern sich nach 45 Minuten bis 50 Minuten die Stromamplituden, oder die Stromentwicklung zeigt typische Ableitströme mit deutlich größeren Amplituden (**Bild 21**).

### 3.5 Serie 3: Hydrophobieverlust und Ableitstromentwicklung an natürlich verschmutzten Isolatoren bei zyklischer Betauung

Ziel dieser Versuche war festzustellen, wie sich die Stromentwicklung bei Betauung von natürlich verschmutzten Silikonisolatoren verhält, bei denen die Oberflächenleitfähigkeit durch das Lösen der abgelagerten Salze erfolgt. Als Prüflinge standen Mittelspannungsableiter zur Verfügung, die seit mehreren Jahren spannungslos der natürlichen geringen Verschmutzung im Freigelände der FGH ausgesetzt waren (**Bild 22**). Der Versuch wurde bei der Prüfspannung 24 kV durchgeführt, der Strom über die Oberfläche wurde getrennt vom Strom durch die MO-Scheiben erfasst..

Die **Bilder 23 und 24** zeigen die Stromentwicklung vom Beginn der Betauungsphase über die Dauer von 35 Minuten. Die Stromamplitude hängt natürlich von der Oberflächenleitfähigkeit ab.

Die Bilder zeigen, dass sich auch hier ein sinusförmiger Strom einstellt, der mit andauernder Betauung in der Amplitude zunimmt. Die aus diesen Strömen abgeschätzten Schichtleitfähigkeiten liegen bei den Prüflingen E und F um den Faktor 10 niedriger als die bei dem salzsäurehaltigen Tau. Prüfling G (Oberfläche hydrophil) zeigt mit  $0,08 \mu\text{S}$  einen deutlich höheren Wert (Tabelle 7), aber auch dieser Wert zählt zu geringster Verschmutzung. Teillichtbögen sind bei diesen Versuchen daher nicht aufgetreten. **Bild 25** zeigt die Tröpfchenbildung auf den natürlich verschmutzten Silikonisolatoren nach dem Betauungsversuch.

## 4. Nachbildung von ungleichmäßigem Hydrophobieverlust an Hochspannungsisolatoren

### 4.1 Prüflinge

Diese Versuche wurden an drei gleichen Hochspannungsisolatoren durchgeführt (**Bild 26**). In **Tabelle 8** sind die Abmessungen des Isolatortyps zusammengestellt.

## 4.2 Prüfverfahren

Im Labor erreicht man eine ungleichmäßige Verteilung der Leitfähigkeit längs des Isolators, indem ein Teil der Oberfläche mit einer künstlichen Fremdschicht hydrophil gemacht wird, die Restoberfläche bleibt hydrophob. Das Verfahren zum Aufbringen einer künstlichen, haftenden Fremdschicht auf Silikonisolatoren ist bekannt und erprobt [2]. Bild 27 zeigt als Beispiel die nach dem STRI-Verfahren befeuchtete Oberfläche:

- die untere Isolatoroberfläche ist künstlich verschmutzt und hydrophil,
- der obere Teil ohne Fremdschicht ist vollkommen hydrophob.

Die Versuche wurden bei der konstanten Prüfspannung 71 kV durchgeführt. Folgende Prüfparameter wurden variiert:

- hydrophobe Zone zusammenhängend und aufgeteilt,
- hydrophobe Zone zusammenhängend in der Mitte und an den Enden des Isolators,
- Länge der hydrophoben Zone,
- Verschmutzungsgrad
- Befeuchtungsart: Dampf in Anlehnung IEC 60507 [5] mit unterschiedlichen Dampfraten und Betauung.

## 4.3 Serie 1: Ermittlung des Einflusses der Verteilung des hydrophoben Anteils der Isolatoroberfläche auf das Überschlagsverhalten

Ziel dieser Versuche war festzustellen, wie das Luftüberschlagsverhalten, also die Überbrückung der Schlagweite der hydrophoben Zone, von der Verteilung dieser Zone entlang der Isolatorlänge abhängt. Die Schlagweite ist die kürzeste Luftstrecke zwischen den Fußpunkten eines Teillichtbogens. Nach der Überbrückung der Schlagweite wird der Restkriechweg mit der leitfähigen Fremdschicht mit nahezu der gesamten Prüfspannung beansprucht. Ein Fremdschichtüberschlag dieser Reststrecke wird nur erfolgen, wenn die Kriechstrecke für die Fremdschichtbeanspruchung nicht ausreichend ist.

Unter Zugrundelegung des für einen Wechselspannungsüberschlag nötigen Gradienten von 450 kV/m (Scheitelwert) und der gewählten Prüfspannung 71 kV<sub>eff</sub> lässt sich zunächst die Anfangsschlagweite der hydrophoben Zone bestimmen mit der Annahme, dass die Schlagweite vor der Überbrückung von der gesamten Spannung beansprucht wird.

$$\text{Schlagweite} = \frac{71 \times \sqrt{2} \text{ kV}}{450 \text{ kV/m}} = 0,223 \text{ m} ;$$

Dieser Wert ließ sich wegen der vorgegeben Geometrie des Isolators nicht exakt einhalten, da als Begrenzung der hydrophoben Zone möglichst eine klar definierte Linie, z.B. eine Schirmkante oder das Ende eines Strunkteiles, verwendet werden soll. Aus diesem Grund wurde der Wert 0,235 m gewählt.

In orientierenden Versuchen mit Dampfbefeuchtung (Prüfzelt 2 m x 3,45 m x 3 m, Dampfrate 0,96 kg/(h x m<sup>3</sup>)) wurden zusammenhängende hydrophobe Zonen am spannungsseitigen Ende, in der Mitte des Isolators und am erdseitigen Ende untersucht. Weiterhin wurde auch der Einfluss von mehrfach unterbrochenen Zonen berücksichtigt.

Die Ergebnisse dieser Versuche lassen den Schluss zu, dass die Lage und Aufteilung der hydrophoben Zone entlang des Isolators ohne große Bedeutung für das Überschlagsverhalten dieser Zone ist.

Die weiteren Versuche wurden daher zur Vereinfachung des Verschmutzens der Isolatoren mit einer zusammenhängenden hydrophoben Zone am erdseitigen Ende durchgeführt.

#### **4.4 Serie 2: Ermittlung des Einflusses von Oberflächenleitfähigkeit und Befeuchtungsart auf das Überschlagsverhalten unterschiedlich großer Schlagweiten**

Ziel dieser Versuche war die Ermittlung von Grenzbedingungen, bei denen noch ein Überschlag des hydrophoben Anteils erfolgt. Der Verschmutzungsgrad ist in SDD-Werten (Salt Deposit Density [5]) angegeben.

Für die Verschmutzungsgrade

$$\text{SDD} = 0,01 \text{ mg/cm}^2 \text{ (sehr leichte Verschmutzung)}$$

und

$$\text{SDD} = 0,1 \text{ mg/cm}^2 \text{ (leichte bis mittlere Verschmutzung)}$$

wurden die Prüfparameter folgendermaßen variiert:

- fünf unterschiedliche Schlagweiten s zwischen 0,092 m und 0,28 m;
- Dampfbefeuchtung mit drei unterschiedlichen Dampfraten zwischen 0,96 kg/(h x m<sup>3</sup>) und 0,19 kg/(h x m<sup>3</sup>);
- Befeuchtung durch Betauung.

Die Ergebnisse der Versuche sind in **Tabelle 9** zusammengefasst, die jeweiligen Minimalbedingungen für eine Überbrückung der hydrophoben Zone sind farblich unterlegt.

Es ist klar ersichtlich, dass Mindestwerte für die Befeuchtung und die Oberflächenleitfähigkeit notwendig sind. In allen Versuchen, bei denen Überbrückungen festgestellt wurden, ergaben sich die Minimalbedingungen bei der Befeuchtung durch Betauung (**Bild 28**).

### **5. Ermittlung der im Betrieb zu erwartenden Schichtleitfähigkeit an bekannten Fehlerorten im 400-kV-Netz**

#### **5.1 Messsystem und Einsatzorte**

In Verbindung mit RWE NET AG wird eine Messung der Fremdschichtbelastung von Isolatoren im Betrieb durchgeführt.

Die Messung erfolgt mit Hilfe von sechs künstlichen Elektroden sowohl an original Silikonschirmen als auch an glasierten Porzellanoberflächen (**Bild 29a**). 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 Messeinheiten (**Bild 29b**). 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 (**Bild 30**). Mast 234 steht in einer Senke (**Bild 31**), Mast 221 befindet sich auf einer Hügelkuppe (**Bild 32**). **Bild 33** zeigt als Beispiel die in Höhe der unteren Isolatorenketten an Mast 234 montierten Messsonden.

## 5.2 Bisherige Ergebnisse

Die Messungen wurden Mitte April 2003 begonnen, und bis Mitte Oktober 2003 wurden vier Ablesungen durchgeführt. Mit Hilfe der gemessenen Stromwerte  $i$  und des Formfaktors  $F = 0,2$  der Messsonden kann als Verschmutzungsgrad die Schichtleitfähigkeit  $\kappa$  bestimmt werden [5].

$$\kappa = F \times i / u_{mess};$$

In den **Bildern 34 bis 41** sind die Ergebnisse der Betriebsmessungen, getrennt nach Silikon- und Porzellanflächen dargestellt.

### Mast 234 (in einer Senke, Bilder 34, 36, 38, 40)

Erwartungsgemäß zeigen die Messsonden auf den Porzellanoberflächen deutlich höhere Werte der Schichtleitfähigkeit als bei Silikon. Dabei traten Messwerte bei Porzellan nur bei der waagrecht oben angeordneten Sonde auf. Die Schichtleitfähigkeitswerte  $\geq 5 \mu\text{S}$  traten überwiegend in den Morgenstunden zwischen 3<sup>00</sup> Uhr und 7<sup>00</sup> Uhr auf. Die hohen Werte  $> 7 \mu\text{S}$  deuten darauf hin, dass sich bei der waagrecht oben angeordneten Sonde eine dickere Wasserschicht zwischen den Elektroden ausbildet.

### Mast 221 (auf einer Hügelkuppe, Bilder 35, 37, 39, 41)

Auch hier liefern die Sonden auf Porzellan die höheren Messwerte. Die großen Werte traten überwiegend in den Abend- und Nachtstunden auf, Werte  $< 5 \mu\text{S}$  sind über den ganzen Tag verteilt. Vereinzelt traten Messwerte an den waagrecht unten angeordneten Sonden sowohl am Porzellan als auch am Silikon auf. Dies ist auf die Lage des Mastes auf einer Hügelkuppe zurückzuführen.

Für beide Messorte ist festzustellen, dass die lokale Verschmutzung als gering einzustufen ist. Eine Alterung der Silikonoberflächen ist nicht zu beobachten.

Die Messungen werden im Jahr 2004 fortgeführt.

## 6. Folgerungen

### **Hydrophobieverlust und Ableitstromentwicklung**

Bei kontinuierlicher Beanspruchung mit Nebeltröpfchen (IEC-Verfahren) entsteht ein Hydrophobieverlust bereits bei Verwendung von entsalztem Wasser ohne Oberflächenströme. Dies ist bei zyklischer Betauung ohne Leitfähigkeit wegen der wesentlich geringeren Feuchtigkeitsmengen nicht feststellbar.

Schon bei geringer Leitfähigkeit treten bei beiden Befeuchtungsarten Oberflächenentladungen auf, die zum Hydrophobieverlust beitragen und Erosionsspuren verursachen. Im Gegensatz zu den Versuchen mit kontinuierlicher Benebelung, in denen bei geringen Leitfähigkeiten nicht für alle Prüflinge Entladungsaktivitäten festgestellt wurden, treten bei zyklischer Betauung an allen Prüflingen Oberflächenentladungen auf. Die genaue Beobachtung des Stromes während der Betauungsphase zeigt zu Beginn einen sinusförmigen Verlauf, der auf eine durchgehende, leitfähige Schicht auf der Isolatoroberfläche schließen lässt, d.h. die Hydrophobie wird bei Betauung nicht wirksam. Je nach Oberflächenzustand (lokaler Hydrophobieverlust, Trockenzenenzbildung, Leitfähigkeit) geht der sinusförmige Strom zurück, oder es bilden sich Oberflächenentladungen mit um mehrere Größenordnungen höheren Amplituden aus. Die Unwirksamkeit der Hydrophobie ist die Ursache, dass bei allen Prüflingen Entladungen festzustellen sind. Dies gilt auch für Silikonisolatoren mit natürlicher Verschmutzung.

### **Einfluss von ungleichmäßigem Hydrophobieverlust auf das Überschlagsverhalten der hydrophoben Restoberfläche**

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Überschlagsverhalten einer hydrophoben Zone nahezu unabhängig von der Position oder einer Aufteilung in mehrere Abschnitte entlang eines Isolators ist.

Bei beiden für diese Versuche gewählten Befeuchtungsarten (Dampfbefeuchtung und Betauung) steigt mit abnehmendem Verschmutzungsgrad (mittlere bis sehr geringe Verschmutzung) die für einen Überschlag erforderliche Feldstärke. Dabei ist der Anstieg bei Befeuchtung durch Betauung deutlich geringer. Die Überschlagsfeldstärke bei sehr geringer Verschmutzung und Betauung beträgt nur 50 % des Wertes bei Dampfbefeuchtung.

### **Im Betrieb zu erwartende Schichtleitfähigkeiten**

Die für den Zeitraum 14. April 2003 bis 15. Oktober 2003 ausgewerteten Betriebsmessungen deuten bei beiden Messorten auf eine geringe Verschmutzung hin. Messwerte  $> 0 \mu\text{S}$  liegen nur von den waagrecht angeordneten Sonden vor. Die charakteristischen Werte für die Porzellanoberflächen liegen bei  $3 \mu\text{S}$ , die hohen Spitzen sind wahrscheinlich überwiegend durch zwischen den Elektroden stehendes Wasser verursacht.

Eine Alterung der Silikonoberflächen in dem beschriebenen Zeitraum kann nicht beobachtet werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die realitätsnahe zyklische Befeuchtung durch Betauung die kritischere Beanspruchung für Silikonisolatoren im Vergleich zur Dauerbenebelung darstellt. Das gilt insbesondere für geringe Verschmutzung. Da bei Betauung die Hydrophobie nahezu unwirksam ist, unterliegen alle Silikonisolatoren unabhängig von ihren Materialeigenschaften den gleichen Beanspruchungen.

Mit dem augenblicklichen Stand der Kenntnisse wird die Betauung im Vergleich zur Benebelung als die kritischere Beanspruchung der Silikonisolatoren angesehen:

- Es tritt bereits bei sehr geringer Leitfähigkeit sofort bei Einsetzen der Betauung ein Oberflächenstrom auf, der bei Abtrocknung zur Ausbildung von Trockenzenen führt, die Entladungen hervorrufen können.
- Der Isolatorüberschlag wird begünstigt durch den bei Betauung in den hydrophoben Zonen entstehenden Austrocknungseffekt, der die Überschlagsspannung dieser Zonen herabsetzt. Die

Höhe der Überschlagsspannung hängt dann von der Oberflächenverschmutzung in den hydrophilen Zonen ab.

Für den praktischen Einsatz wird die Langzeitbeständigkeit der Silikonisolatoren im Vergleich zur Überschlagfestigkeit als der wichtigere Gesichtspunkt angesehen. Hierfür hat sich Betauung als deutlich kritischer erwiesen als eine Benebelung. Die vorliegenden Versuchsergebnisse sind für eine abschließende Beurteilung nicht ausreichend. Einmal fehlen genauere Hinweise über die bei Betauung im Betrieb möglichen Leitfähigkeiten durch Oberflächenentladungen, zum andern ist die Zahl der in diesem Vorhaben durchgeführten Versuche und der Bereich möglicher Parametervariationen begrenzt. Für die hier gefundenen neuen Erkenntnisse sind stützende Weiteruntersuchungen zu empfehlen.

Die in Hochspannungsmasten eingesetzten Messeinrichtungen zur Registrierung der im Betrieb auftretenden Schichtleitfähigkeiten wurden in ihren Messbereichen so ausgelegt, dass sie für die üblichen Werte der Oberflächenverschmutzung über  $1 \mu\text{S}$  ausreichen. Die Untersuchungen mit Betauung und Salzsäure haben aber gezeigt, dass wesentlich geringere Schichtleitfähigkeiten bereits für die Zerstörung der Silikonoberfläche verantwortlich sein können. Die Messeinrichtungen sind hinsichtlich dieser Erkenntnisse zu verbessern

Es ist auch erforderlich, für die Betauungsbeanspruchung von Silikonisolatoren sowohl das Betriebsverhalten zu untersuchen als auch die Relevanz der bestehenden Prüfungen zur Langzeitbeständigkeit zu überprüfen und ggf. neue Verfahren zu entwickeln.

## 7. Schrifttum

- [1] AiF-Forschungsvorhaben 10665: Metallocidalbleiter in Kunststoffgehäusen, 1996 – 1998.
- [2] AiF-Forschungsvorhaben 11729: Langzeitverhalten von Silikonisolierungen, 1998 – 2000.
- [3] STRI – Guide 92/1: Hydrophobic Classification Guide. Swedish Transmission Research Institute, Ludvika, 1992.
- [4] IEC Standard 61109 (1992): Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater 1000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria.
- [5] IEC Standard 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** Prüfparameter bei den Versuchen mit konstanter Beanspruchung durch Salznebel.

Prüfspannung (kV)	24
Befeuchtung	konstant mit Defensoren
Wasserdurchfluss (l/(h x m³))	0,4
Zellengröße (L x B x H / V)	1,5 m x 1,5 m x 2 m / 4,5 m³
Versuchsdauer	max. 1000 h

**Tabelle 3** Prüfparameter bei den Versuchen mit zyklischer Beanspruchung durch Betauung.

Prüfspannung (kV)	24
Befeuchtung	zyklische Betauung
Zyklusdauer (h)	6 (4 h Kühlen, 2 h Heizen)
Zellengröße (L x B x H / V)	0,96 m x 1,4 m x 1,74 m / 2,34 m³
Versuchsdauer	ca. 1000 h

**Tabelle 4** Gleichbleibende Prüfparameter bei beiden Prüfverfahren.

Prüfspannung	24 kV
Anordnung	senkrecht
Potentialverteilung	nahezu linear durch zwei Steuergitter
Längsfeldstärke	130 kV/m (Scheitelwert)
Fremdschichtbelastung	entsprechend geringer Verschmutzung
Kriechweglängen	A1 = A2 = 750 mm; B = C = 620 mm;
Spezifische Kriechweglängen	A1 = A2 = 18 mm/kV; B = C = 15 mm/kV;

**Tabelle 5** Ergebnisse der Versuche mit konstanter Fremdschichtbeanspruchung (Serie 1).

Salzmassenkonzentration des Wassers zur Nebelerzeugung	entsalztes Wasser				1 kg/m³			
Versuchsdauer ( h )	785				1000			
Prüfling	A1	A2	B	C	A1	A2	B	C
Hydrophobieverlust	ja				ja			
Höchster Ableitstrom (mA)	keine messbaren Ableitströme		<0,5	2,2	31	66		
Erosionsspuren	nein			nein	nein	ja	ja	

**Tabelle 6** Ergebnisse der Versuche mit Betauung (Serie 2).

Leitfähigkeit der Feuchtigkeit in der Luft	keine				durch Verdampfen von Salzsäure			
Versuchsdauer ( h )	1260				740			
Prüfling	A1	A2	B	C	A1	A2	B	C
Hydrophobieverlust	nein				ja			
Höchster Ableitstrom (mA)	keine messbaren Ableitströme		13,4	3,7	19,2	35,9		
Erosionsspuren	nein			ja				

**Tabelle 7** Aus Betauungsversuchen bei sinusförmiger Kurvenform des Stromes ermittelte Schichtleitfähigkeiten.

Prüfling	Fremdschicht	Höchster Oberflächenstrom (mA)	Abgeschätzter Formfaktor	Schichtleitfähigkeit ( $\mu\text{S}$ )
A1	Salzsäure	0,23	5,58	0,04
A2		0,32	5,58	0,05
B		0,20	5,51	0,03
C		0,30	6,05	0,05
E	natürliche Verschmutzung	0,034	3,80	0,004
F		0,020	2,86	0,002
G		0,730	3,63	0,080

**Tabelle 8** Abmessungen des Silikon-Hochspannungsisolators.

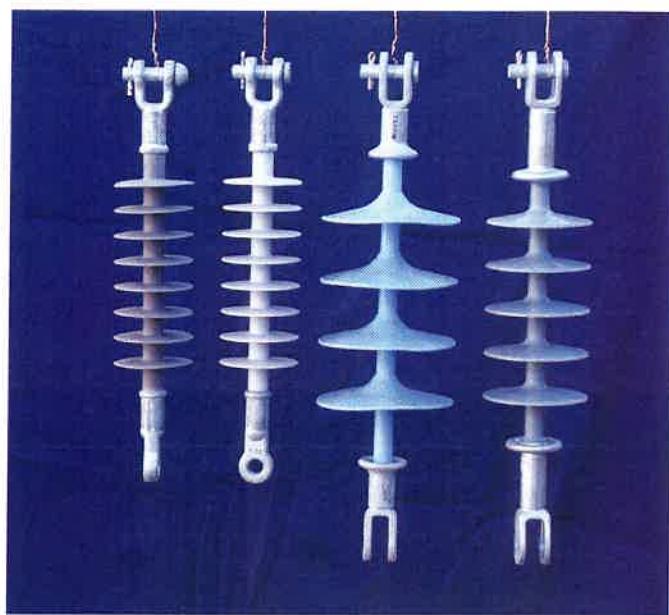
Isolierlänge (mm)	790
Kriechweglänge (mm)	2370
Strunkdurchmesser (mm)	37
Schirmdurchmesser (mm)	147
Schirmabstand (mm)	47
Schirmanzahl	17
Silikonmaterial	HTV

**Tabelle 9** Ergebnisse der Versuche zur Ermittlung des Überschlagverhaltens von Hochspannungsisolatoren mit ungleichmäßiger Verteilung der Oberflächenleitfähigkeit.

Verschmutzungsgrad	Befeuchtungsart	Schlagweite s des hydrophoben Anteiles (m)				
		0,092	0,137	0,185	0,235	0,280
SDD = 0,1 mg/cm <sup>2</sup>	Dampf 0,96 kg/(h x m <sup>3</sup> )	-	63 mA	20 mA	0 mA	-
	Dampf 0,58 kg/(h x m <sup>3</sup> )	-	-	50 mA	0 mA	-
	Dampf 0,19 kg/(h x m <sup>3</sup> )	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA	-
	Betauung bei 98 % r.F.	-	-	> 80 mA	93 mA	0 mA
SDD = 0,01 mg/cm <sup>2</sup>	Dampf 0,96 kg/(h x m <sup>3</sup> )	10 mA	0 mA	0 mA	0 mA	-
	Dampf 0,58 kg/(h x m <sup>3</sup> )	7 mA	0 mA	0 mA	0 mA	-
	Dampf 0,19 kg/(h x m <sup>3</sup> )	0 mA	-	-	-	-
	Betauung bei 98 % r.F.	> 8 mA	> 10 mA	27 mA	0 mA	-
Feldstärke $71 \times \sqrt{2} / s$ (kV/m)		1091	733	542	427	358

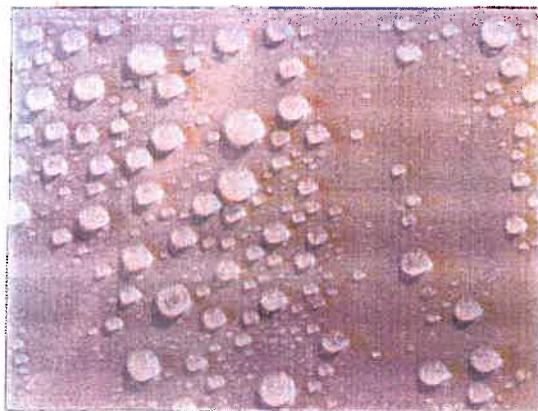
— : Versuche nicht erforderlich.

**Bilder**



A1      A2      B      C

**Bild 1** Silikon-Mittelspannungsisolatoren.



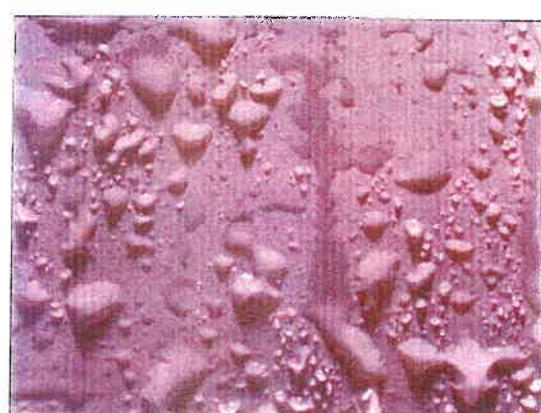
HC 1



HC 2



HC 3



HC 4



HC 5



HC 6

**Bild 2** Typische Beispiele von Oberflächen und Hydrophobieklassen von 1 bis 6 (natürliche Größe) [3].



Prüfling A1



Prüfling A2

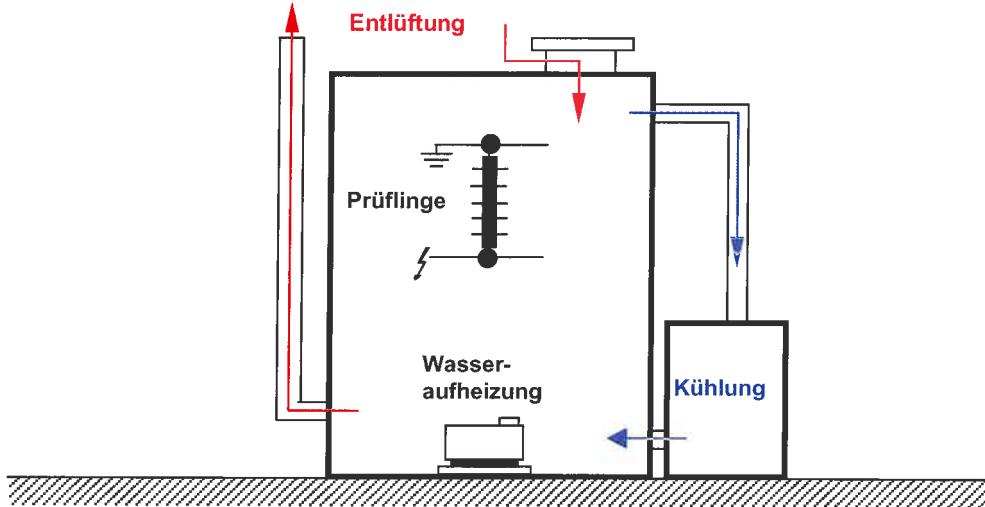


Prüfling B



Prüfling C

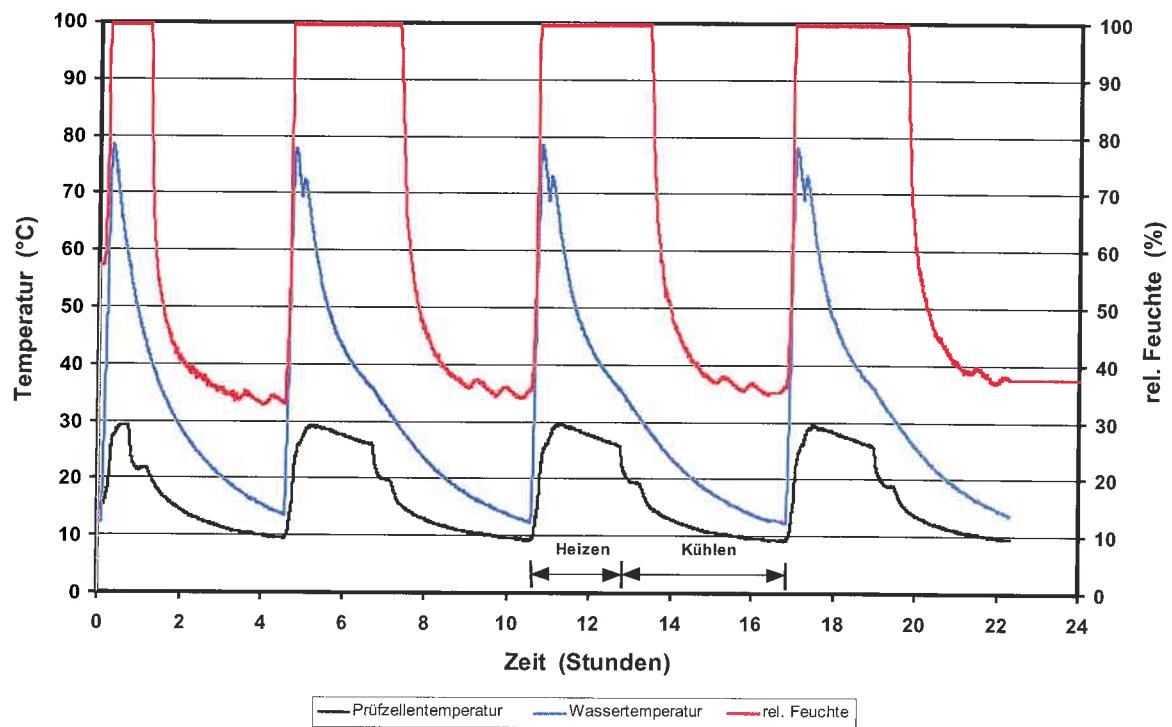
**Bild 3** Tröpfchenbildung auf den Silikonoberflächen im Neuzustand.



**Bild 4** Prinzipieller Aufbau der Prüfzelle für die Betauungsversuche.



**Bild 5** Isolierte Prüfzelle für Betauungsversuche mit Prüflingen und Wasserbehälter.



**Bild 6** Befeuchtungszyklen bei Betauung bei anstehender Prüfspannung.



**Bild 7** Anordnung der Mittelspannungsisolatoren für die Dauerversuche am Beispiel der Betauungsversuche.



Prüfling A1



Prüfling A2



Prüfling B

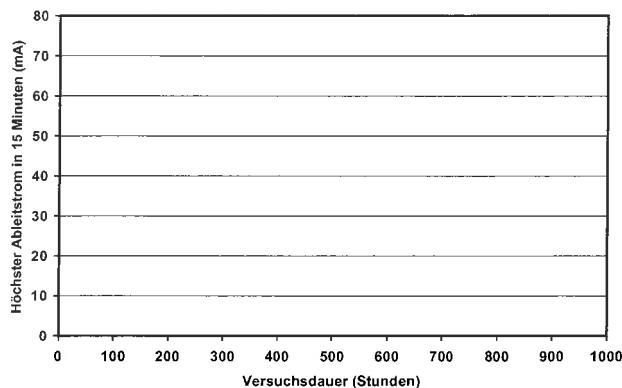


Prüfling C

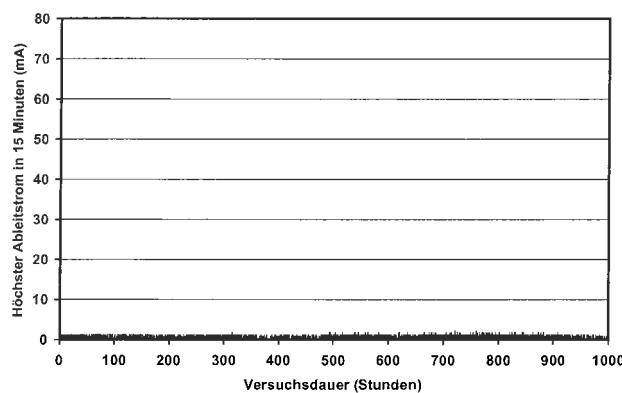
**Bild 8 Serie 1:** konstante Fremdschichtbeanspruchung mit Nebel ohne Leitfähigkeit.  
Hydrophobieverlust nach einer Versuchsdauer von 114 Stunden.



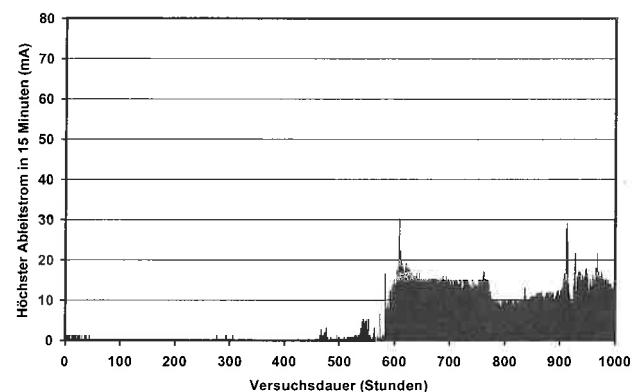
**Bild 9** Serie 1: konstante Fremdschichtbeanspruchung mit Nebel ohne Leitfähigkeit.  
Hydrophobieverlust bei Prüfling C nach einer Versuchsdauer von 785 Stunden.



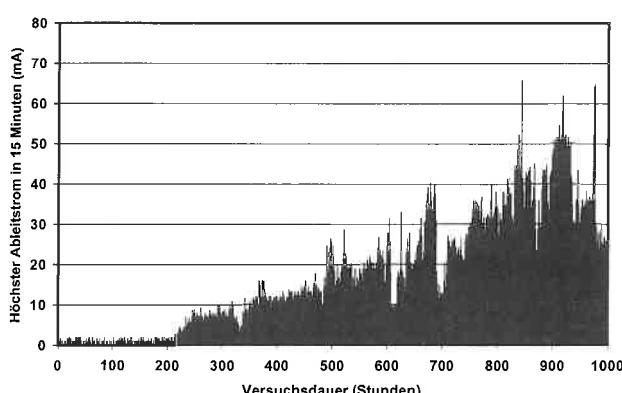
Prüfling A1



Prüfling A2

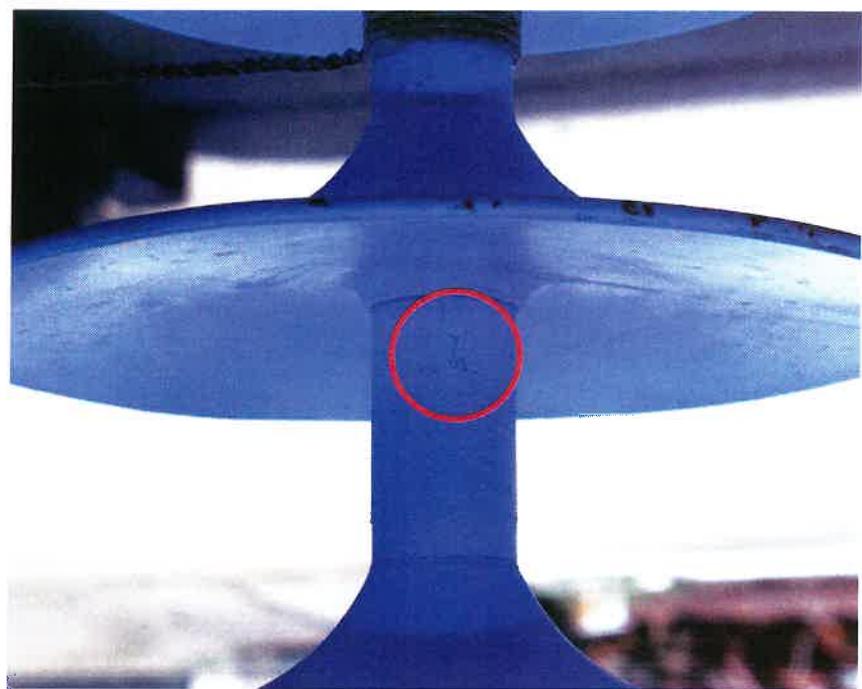


Prüfling B

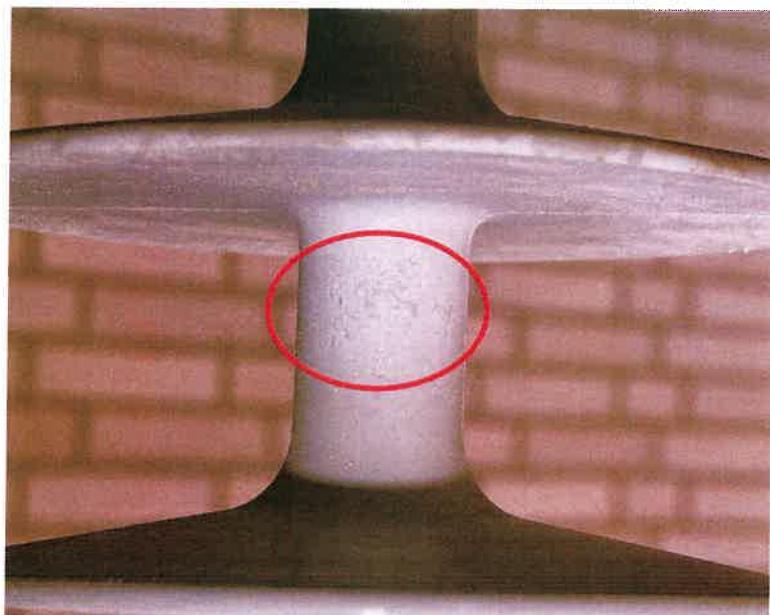


Prüfling C

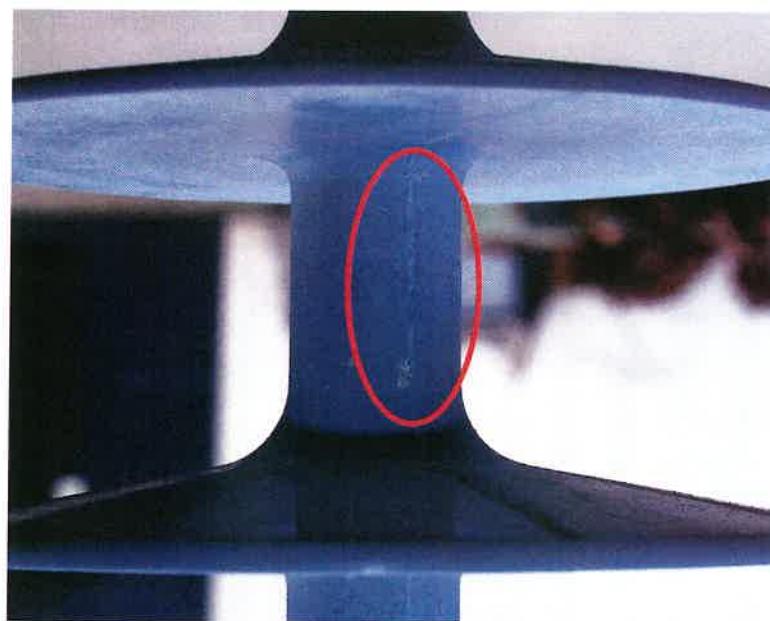
**Bild 10** Serie 1: konstante Fremdschichtbelastung mit Nebel geringer Leitfähigkeit.  
Ableitstromentwicklung an allen vier Prüflingen.



**Bild 11** Prüfling B, Oberfläche gereinigt: leichte Erosionsspuren nach Ende des Versuches.



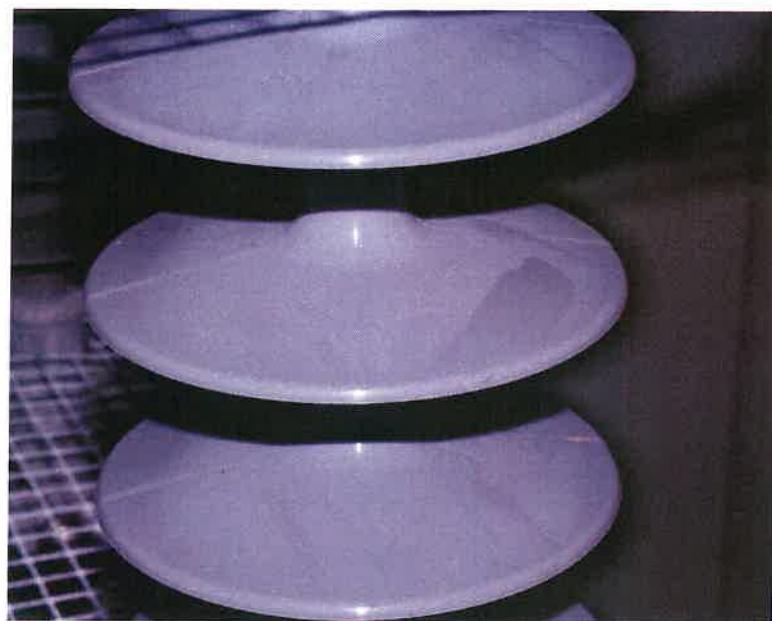
**Bild 12** Prüfling C, Oberfläche gereinigt: leichte Erosionsspuren nach Ende des Versuches.



**Bild 13** Prüfling C, Oberfläche gereinigt: leichte Erosionsspuren nach Ende des Versuches.

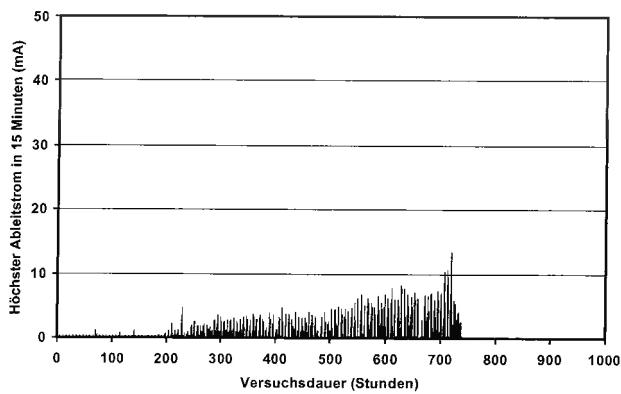


a) Befeuchtung durch Nebel

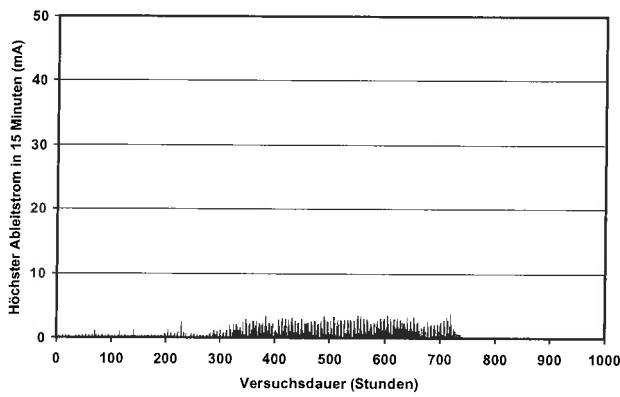


b) Befeuchtung durch Betauung

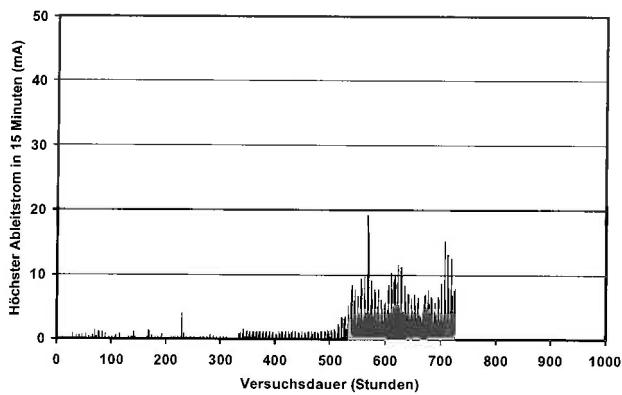
**Bild 14** Vergleich der Oberflächenbefeuhtung durch Nebel und Betauung an Prüfling C.



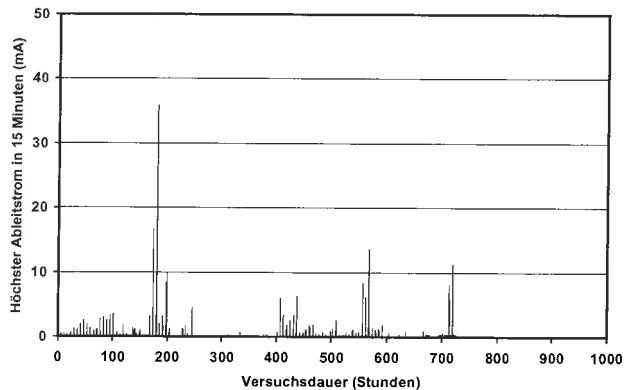
Prüfling A1



Prüfling A2

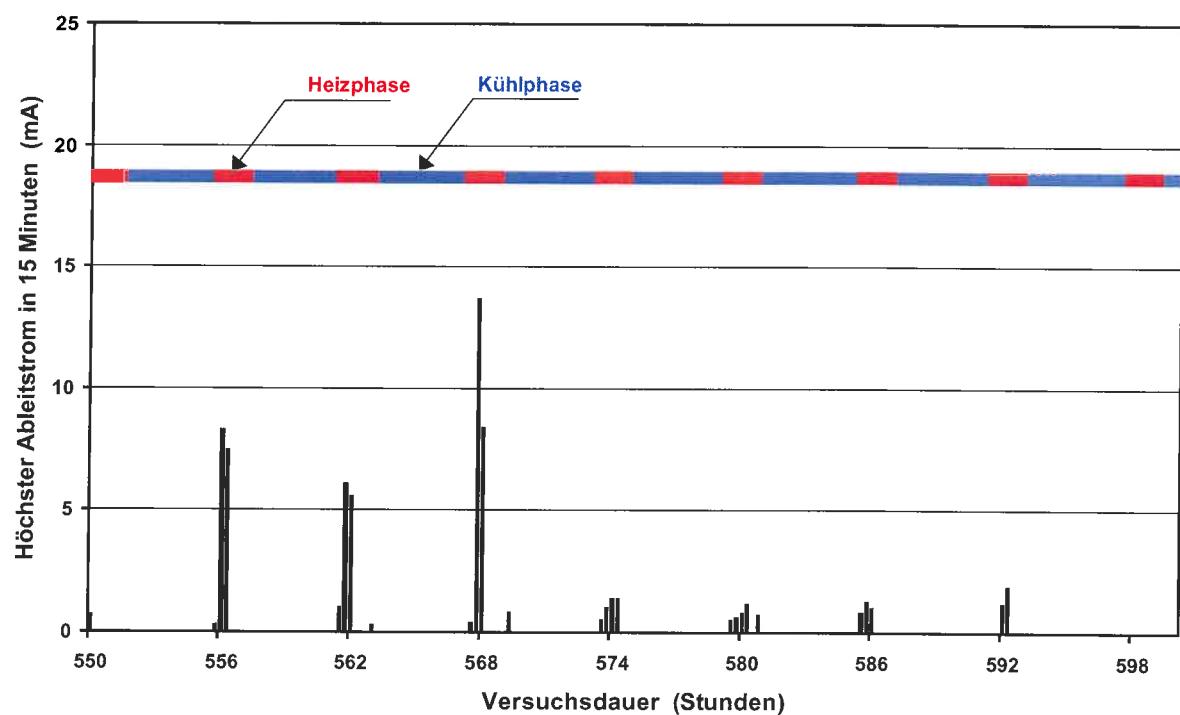


Prüfling B



Prüfling C

**Bild 15 Serie 2: Betauung mit Feuchtigkeit mit geringer Leitfähigkeit.  
Ableitstromentwicklung an allen vier Prüflingen.**



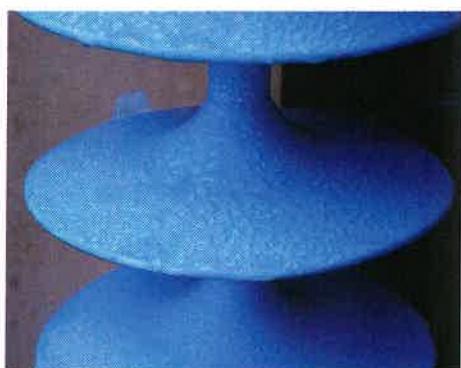
**Bild 16** Ableitstromentwicklung bei Prüfling C während des zweiten Betauungsversuches.



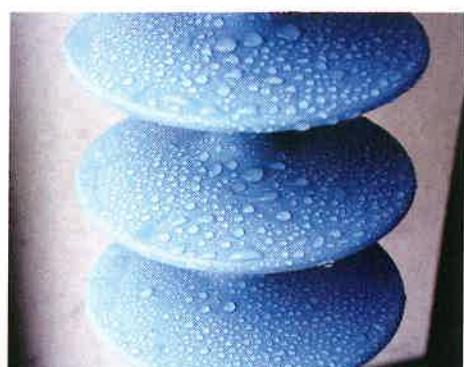
Prüfling A1



Prüfling A2

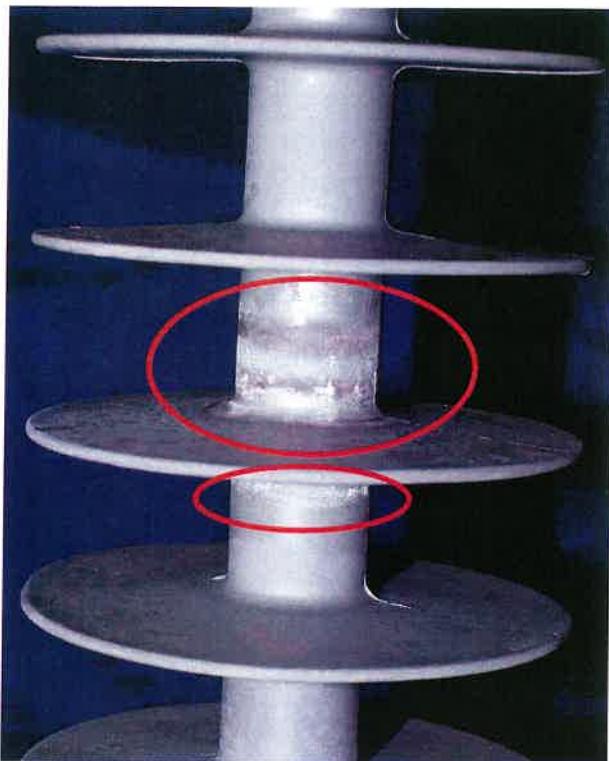


Prüfling B

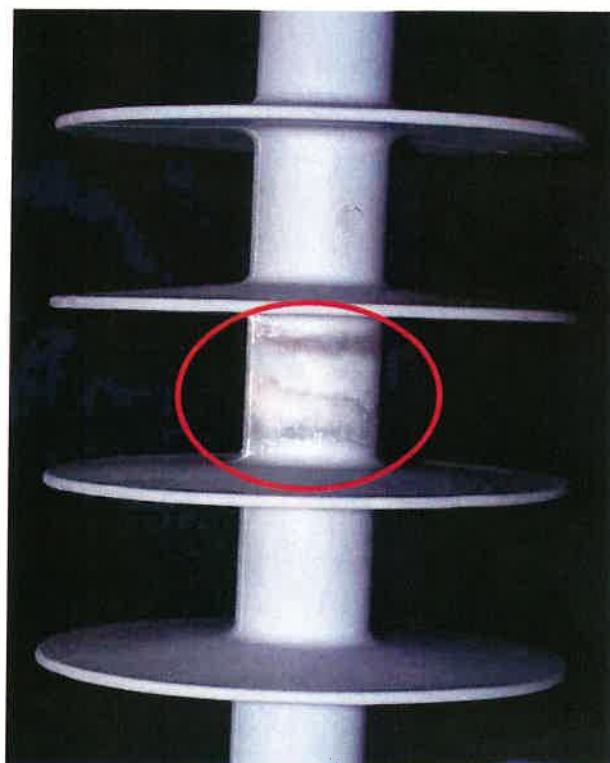


Prüfling C

**Bild 17 Serie 2: Betauung mit geringer Leitfähigkeit. Hydrophobie der gereinigten Oberflächen nach dem Ansprühen mit Wasser.**

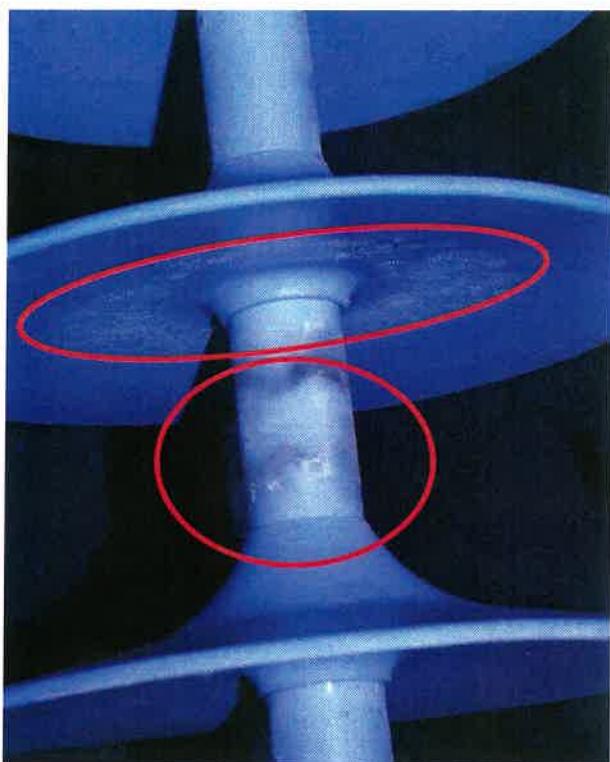


Prüfling A1

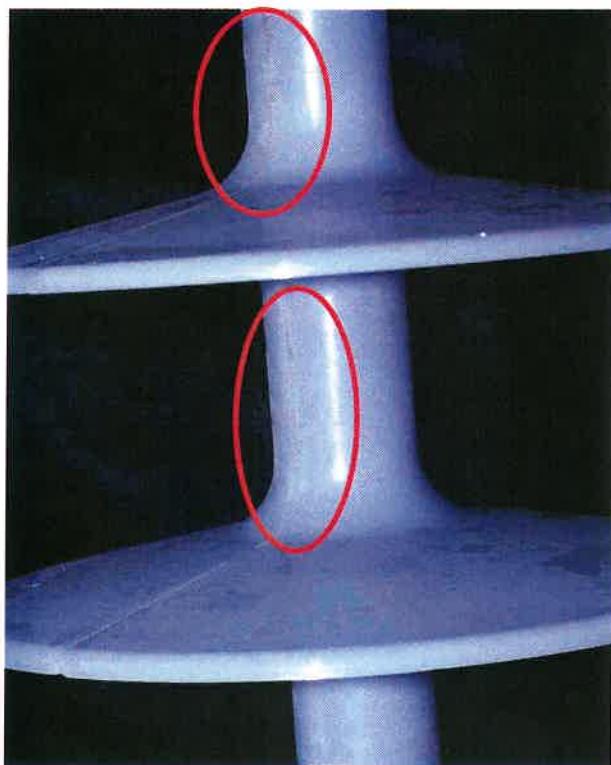


Prüfling A2

**Bild 18** Serie 2: Betauung mit geringer Leitfähigkeit. Erosionsspuren an den Isolatoren A1 und A2 nach Versuchsende.

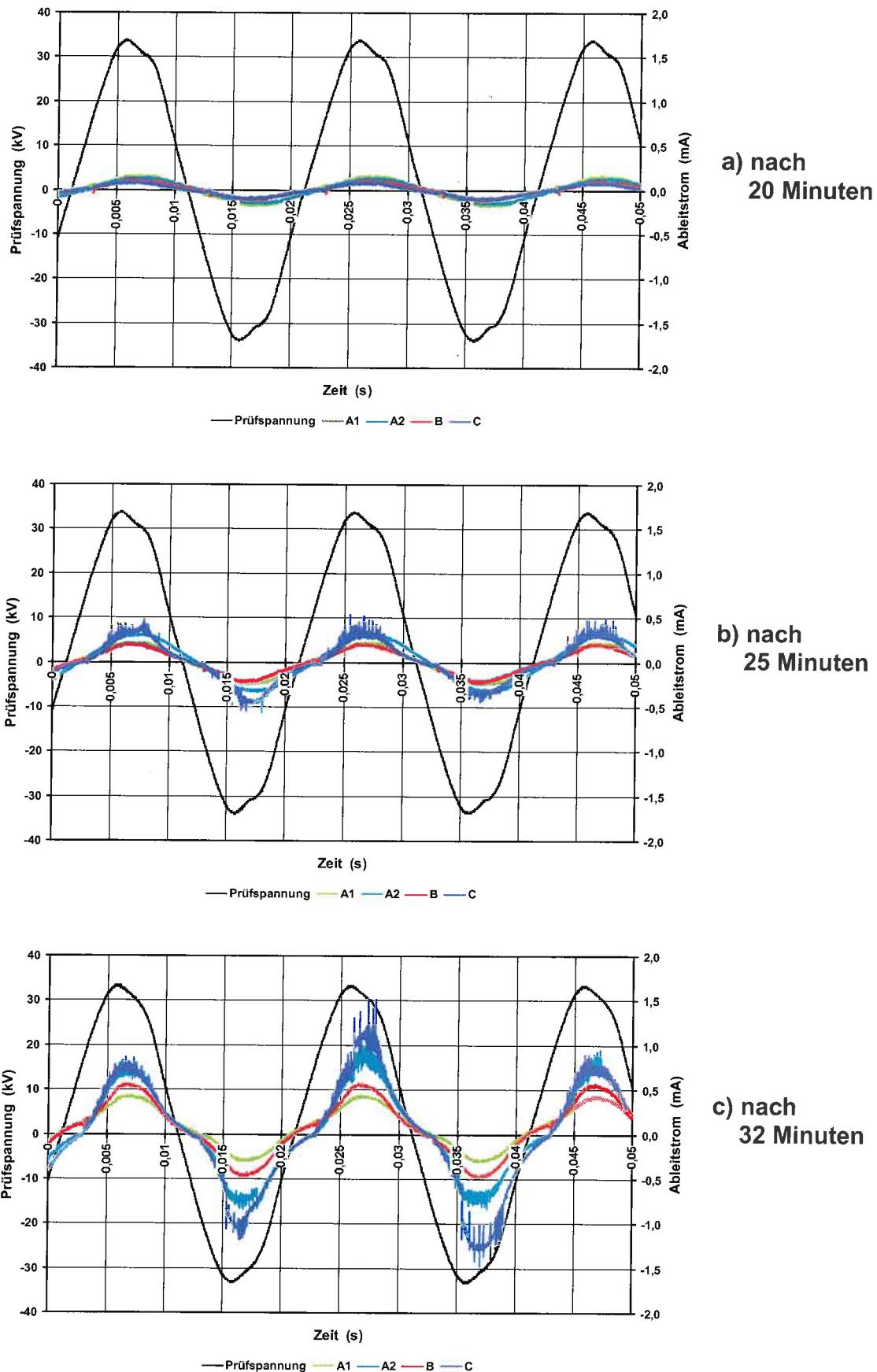


Prüfling B

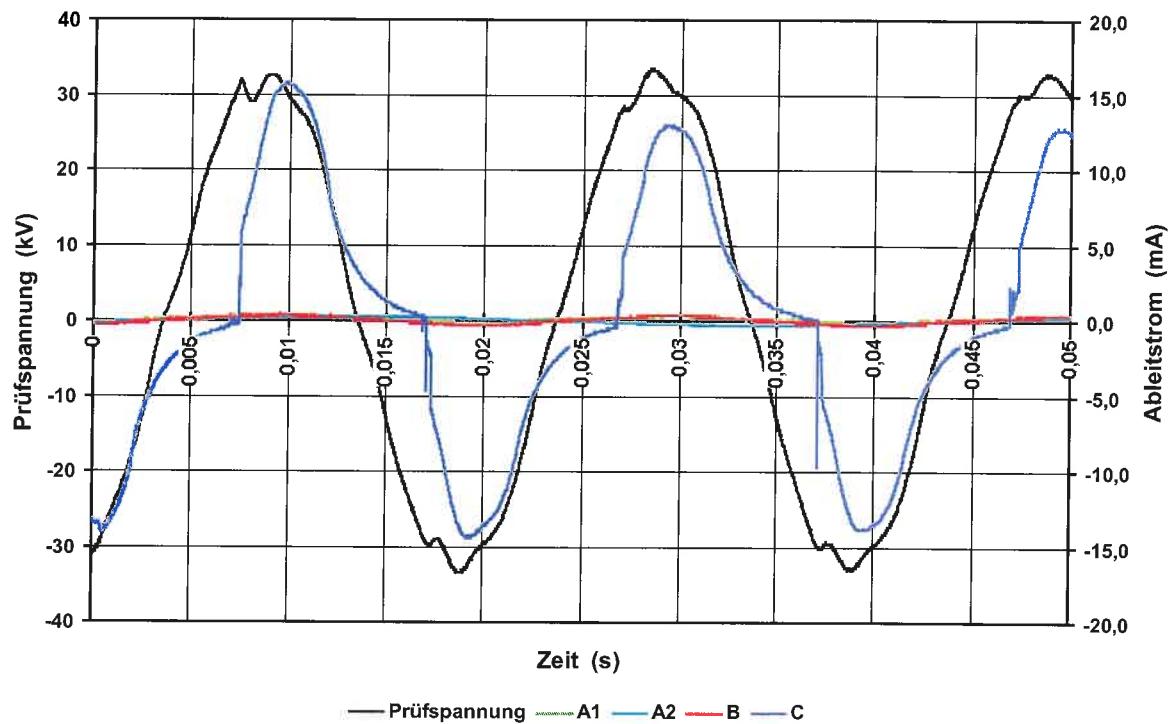


Prüfling C

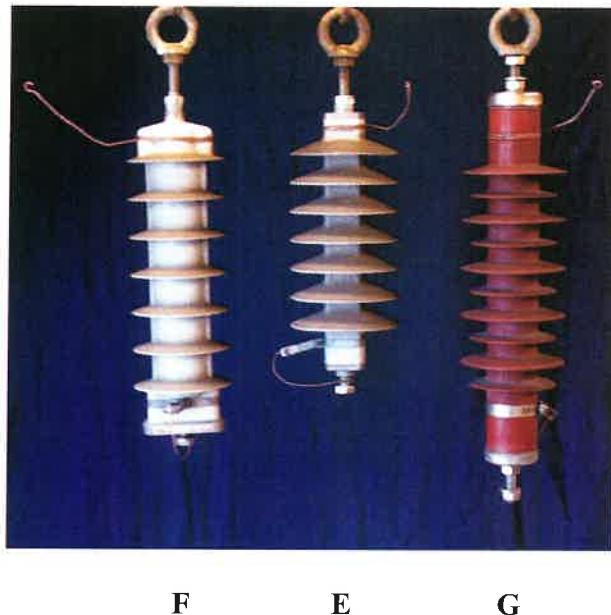
**Bild 19 Serie 2: Betauung mit geringer Leitfähigkeit. Erosionsspuren an den Isolatoren B und C nach Versuchsende.**



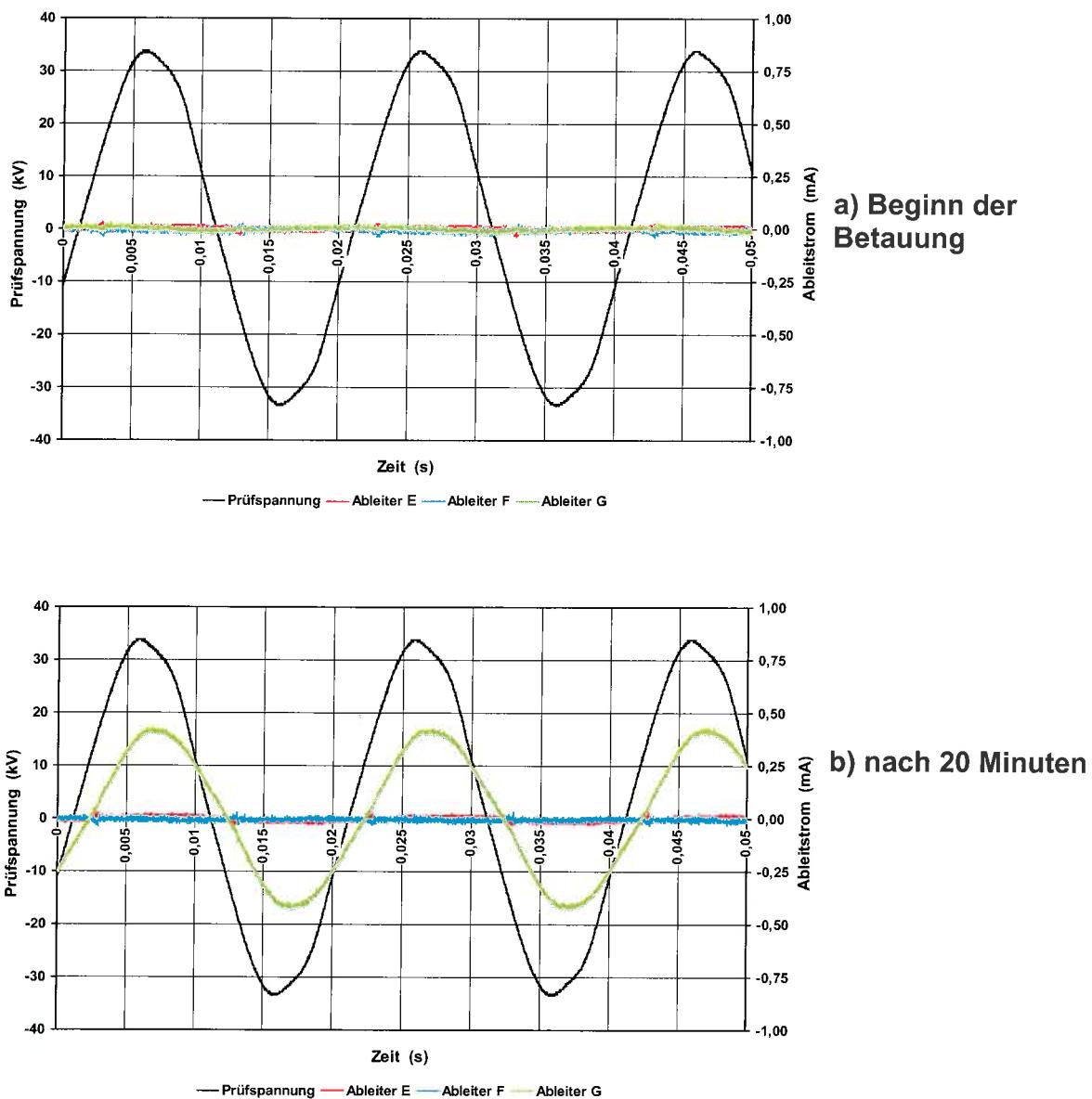
**Bild 20** Ableitstromentwicklung während der Betauungsphase.



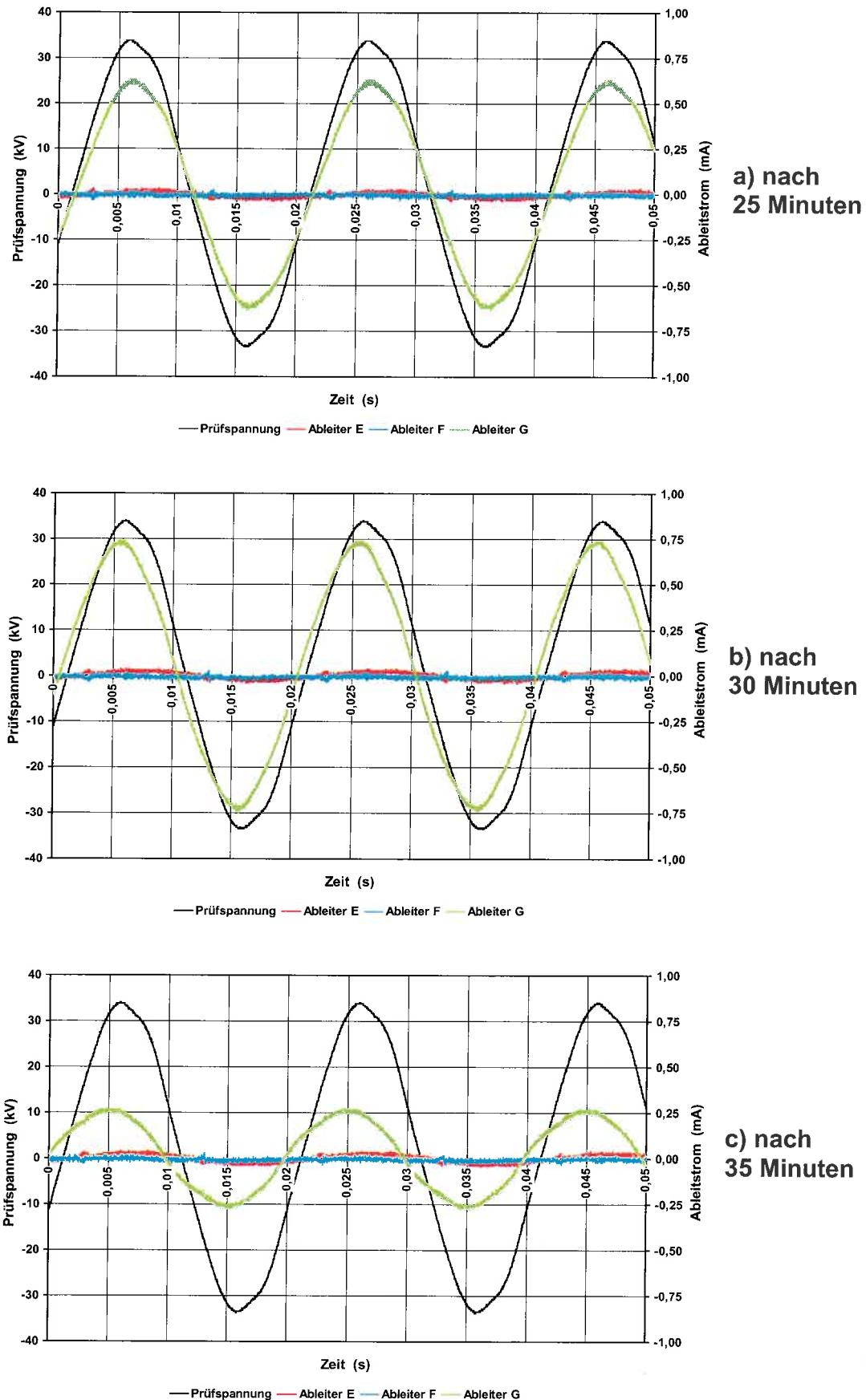
**Bild 21** Ableitstromentwicklung während der Betauungsphase: Beispiel für Teillichtbögen mit größerer Amplitude am Prüfling C (nach 35 Minuten).



**Bild 22** Natürlich verschmutzte Mittelspannungsableiter als Prüflinge für einen Betauungsversuch.



**Bild 23** Natürliche verschmutzte Silikonisolatoren: Ableitstromentwicklung während der Betauungsphase



**Bild 24** Natürlich verschmutzte Silikonisolatoren: Ableitstromentwicklung während der Betauungsphase.



Ableiter E



Ableiter F



Ableiter G

**Bild 25** Tröpfchenbildung auf den natürlich verschmutzten Silikonisolatoren nach dem Betauvungsversuch.

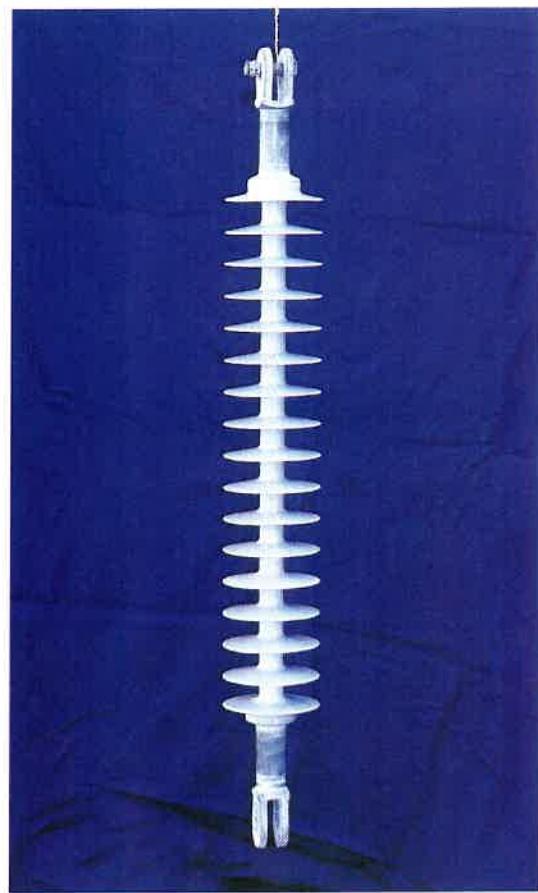
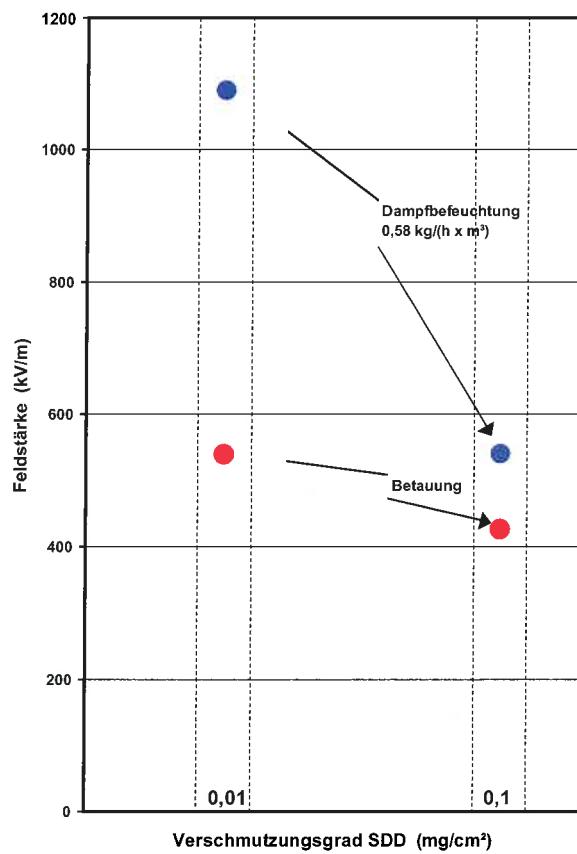


Bild 26 Silikon-Hochspannungsisolator.



Bild 27 Ungleichmäßige Verteilung der Oberflächenleitfähigkeit im Laborversuch.



**Bild 28** Minimalbedingungen zur Überbrückung einer hydrophoben Zone bei unterschiedlichen Leitfähigkeiten.



a) Anordnung der Messsonden

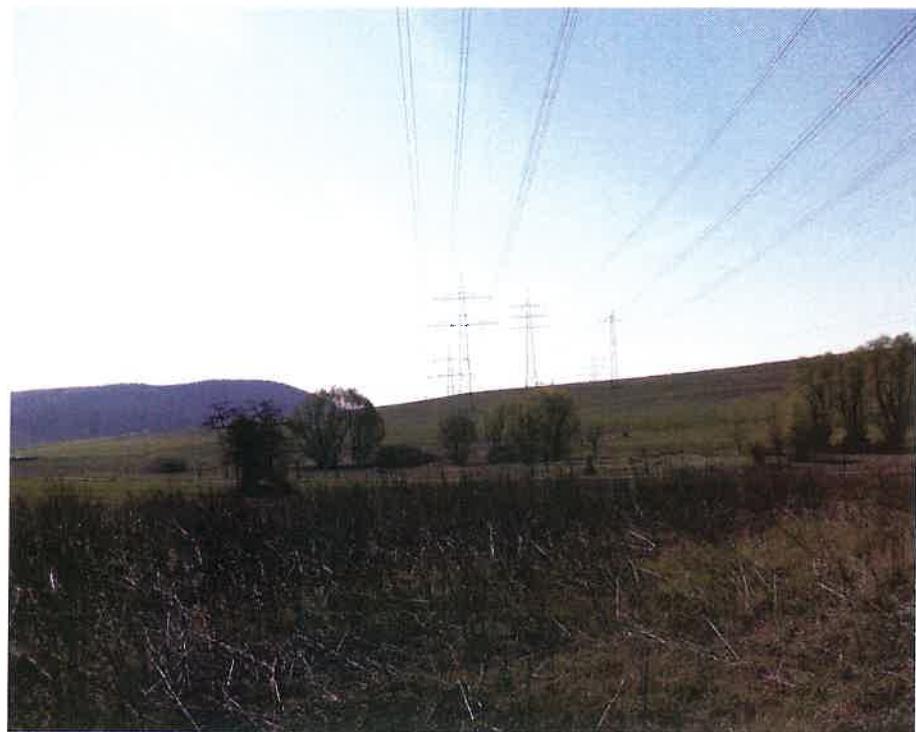


b) Messeinheiten

**Bild 29** Messsystem zur Erfassung der Fremdschichtbeanspruchung im Betrieb.



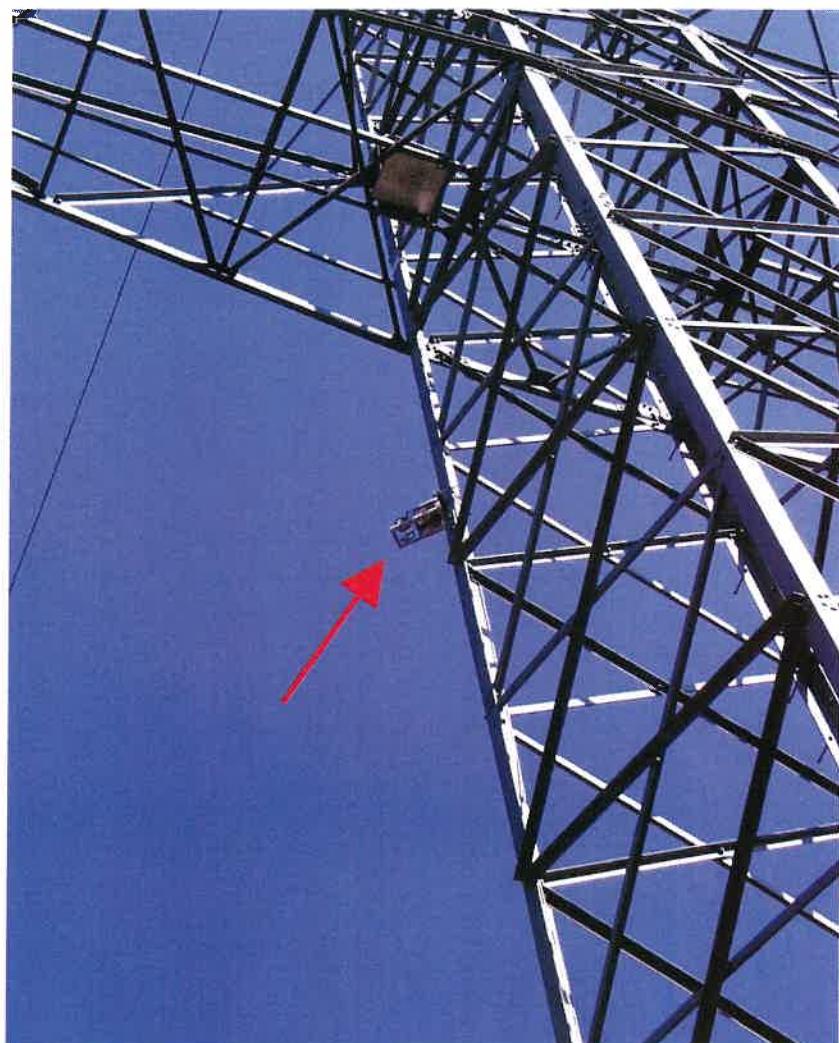
**Bild 30** Maststandorte für die Betriebsmessung im 400-kV-Netz.



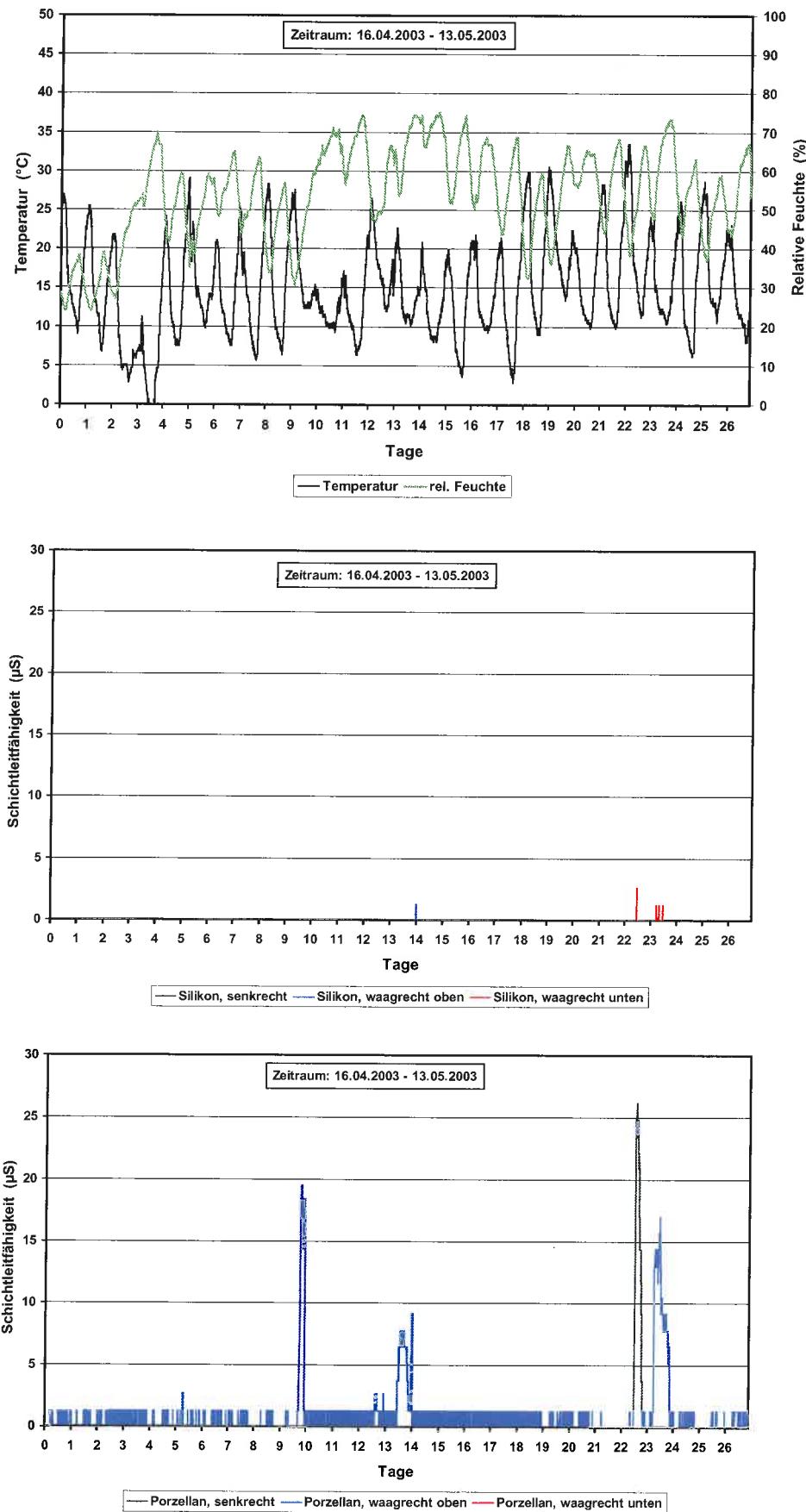
**Bild 31** Blick von Mast 234 nach Süden.



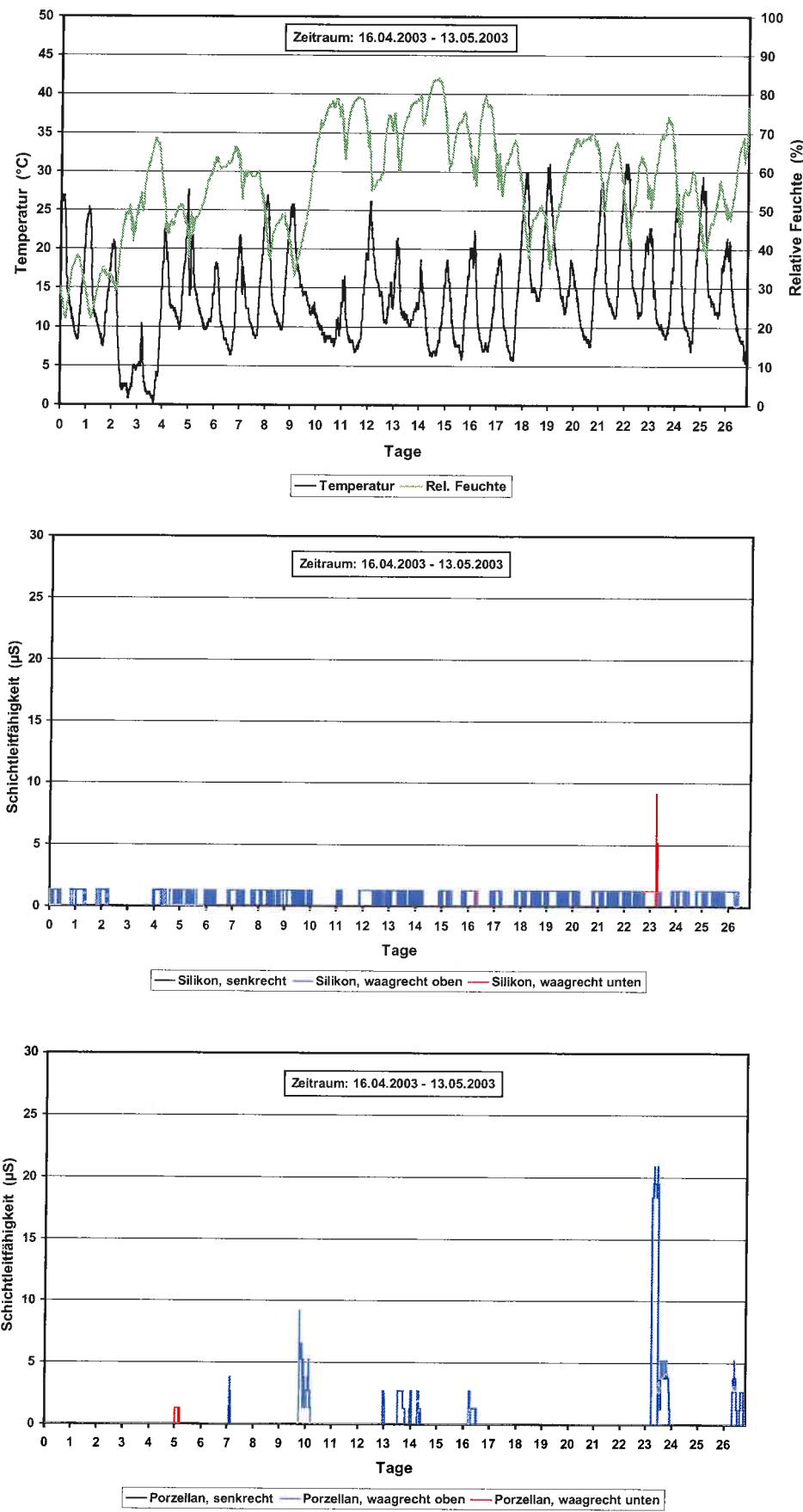
**Bild 32** Blick von Mast 221 nach Süden.



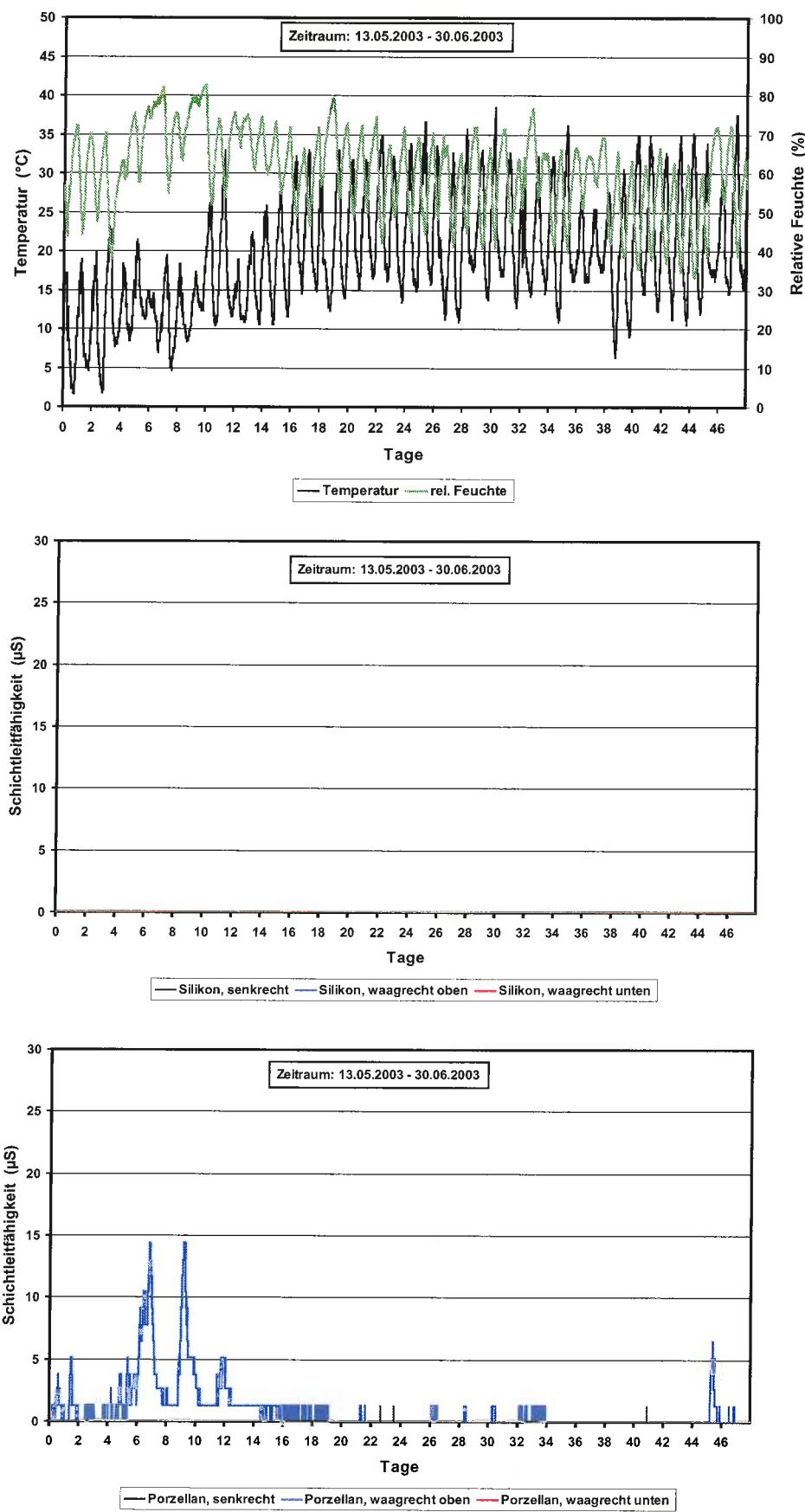
**Bild 33** Messsonden an Mast 234.



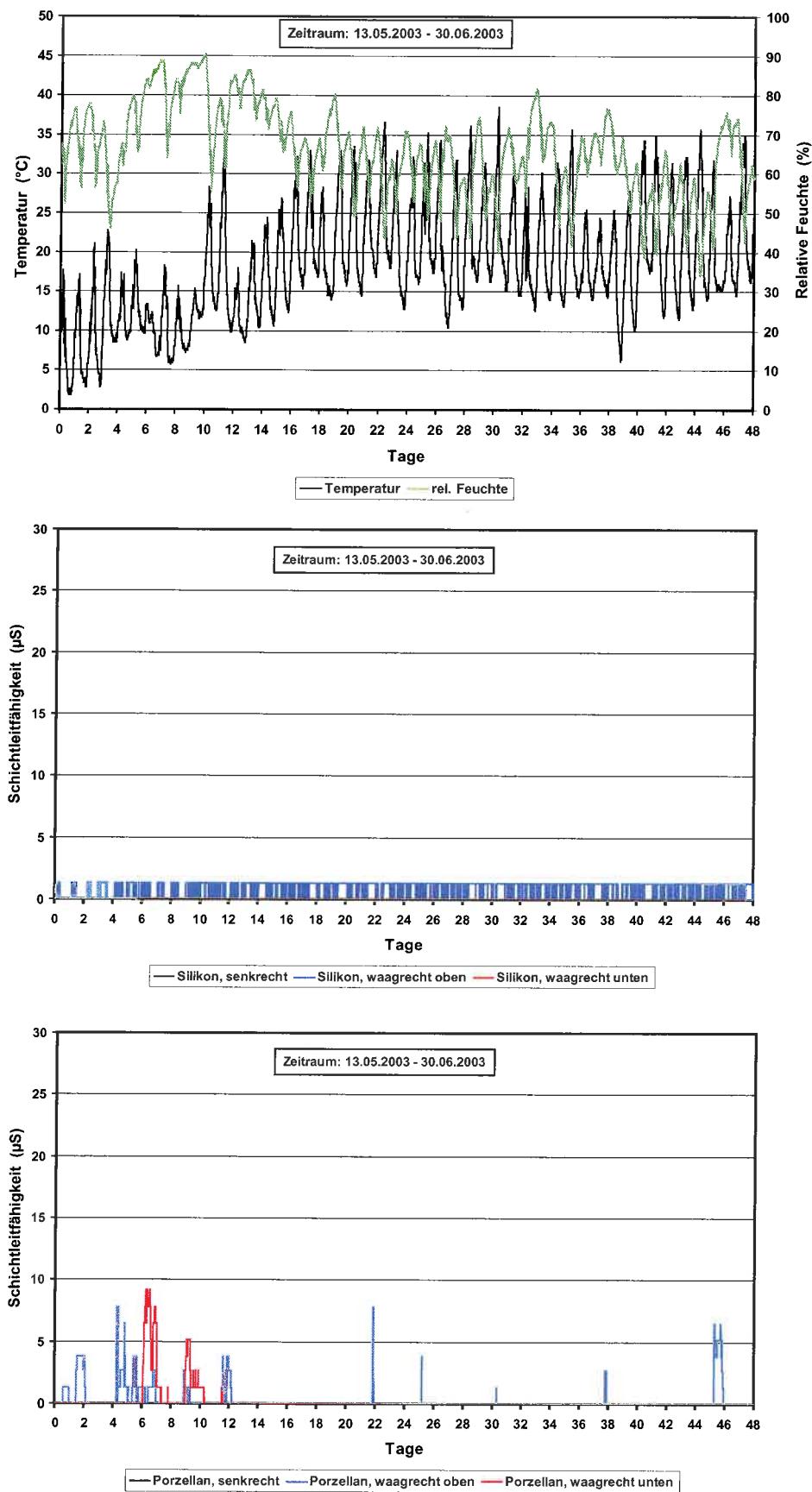
**Bild 34** Mast 234: Schichtleitfähigkeitsmessung im Zeitraum 16.04.2003 bis 13.05.2003.



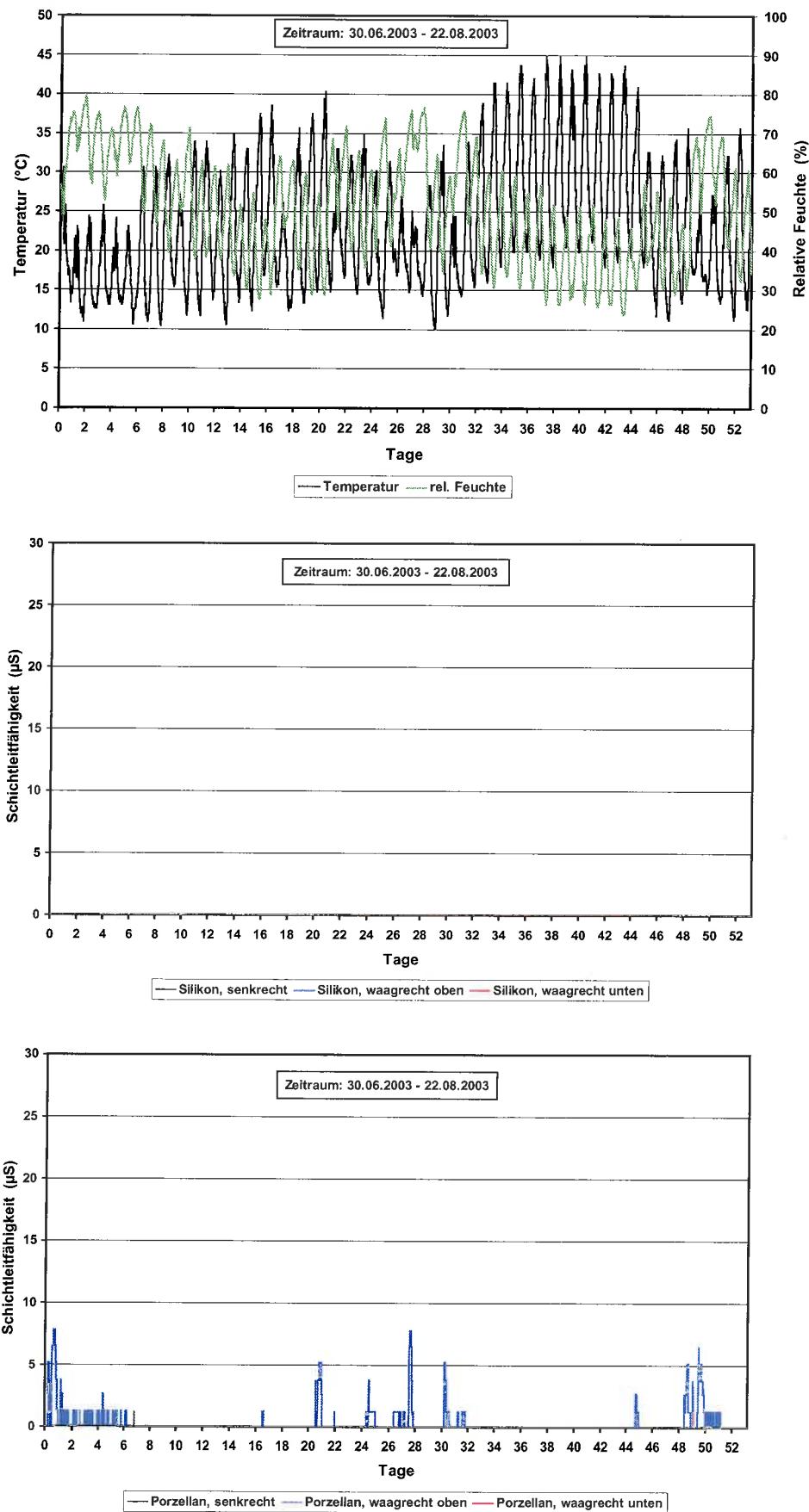
**Bild 35** Mast 221: Schichtleitfähigkeitsmessung im Zeitraum 16.04.2003 bis 13.05.2003.



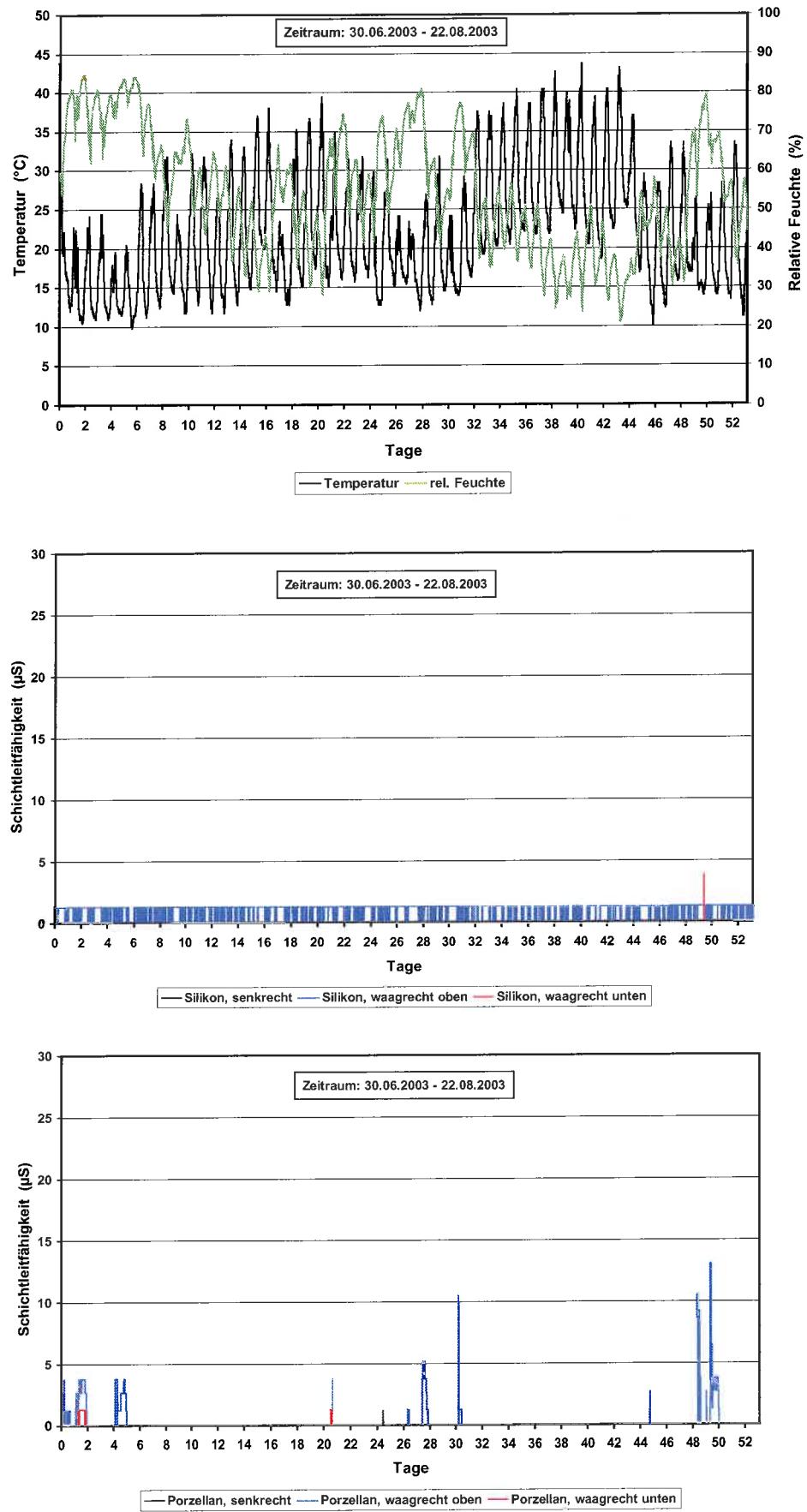
**Bild 36** Mast 234: Schichtleitfähigkeitsmessung im Zeitraum 13.05.2003 bis 30.06.2003.



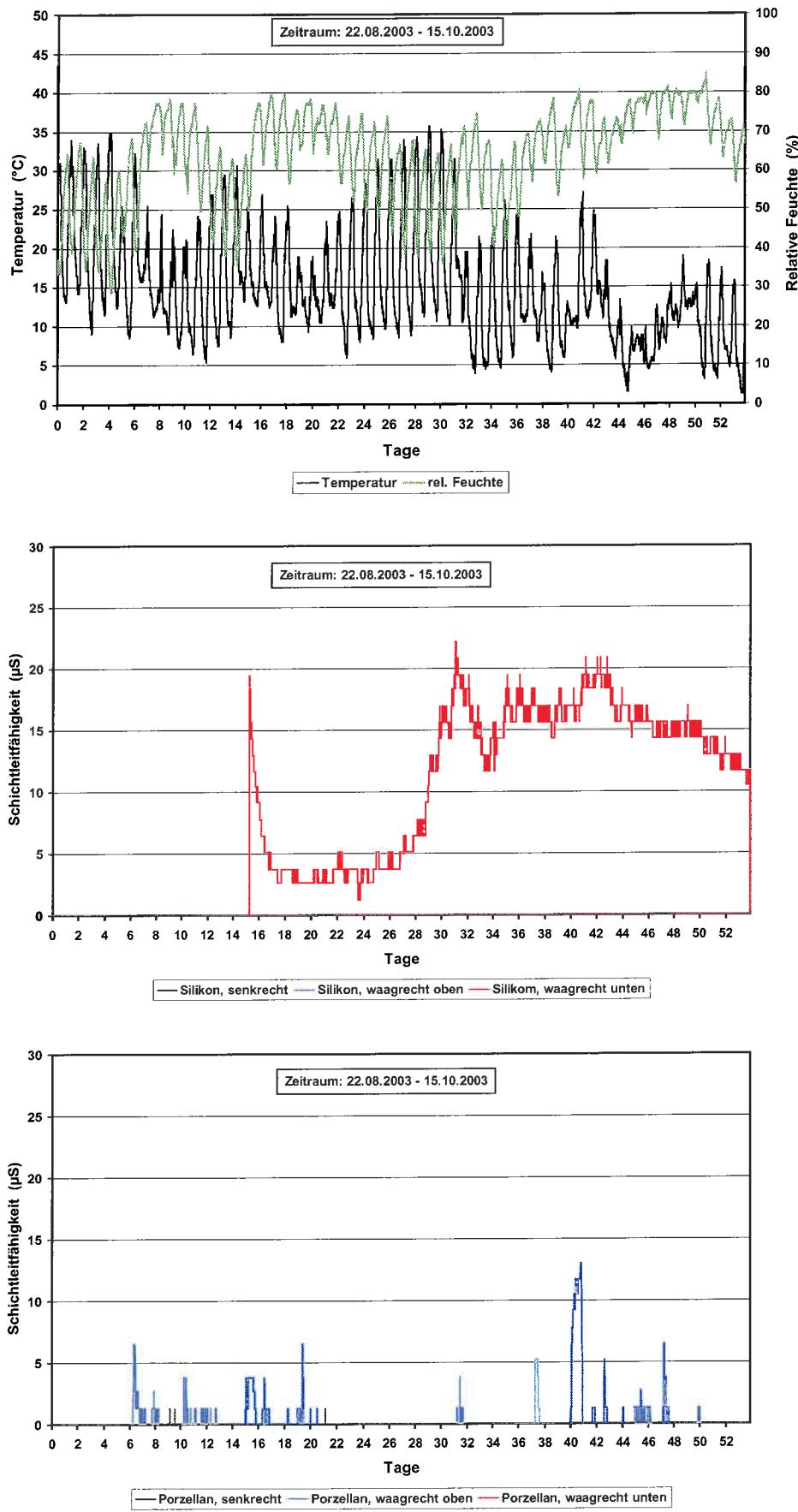
**Bild 37** Mast 221: Schichtleitfähigkeitsmessung im Zeitraum 13.05.2003 bis 30.06.2003.



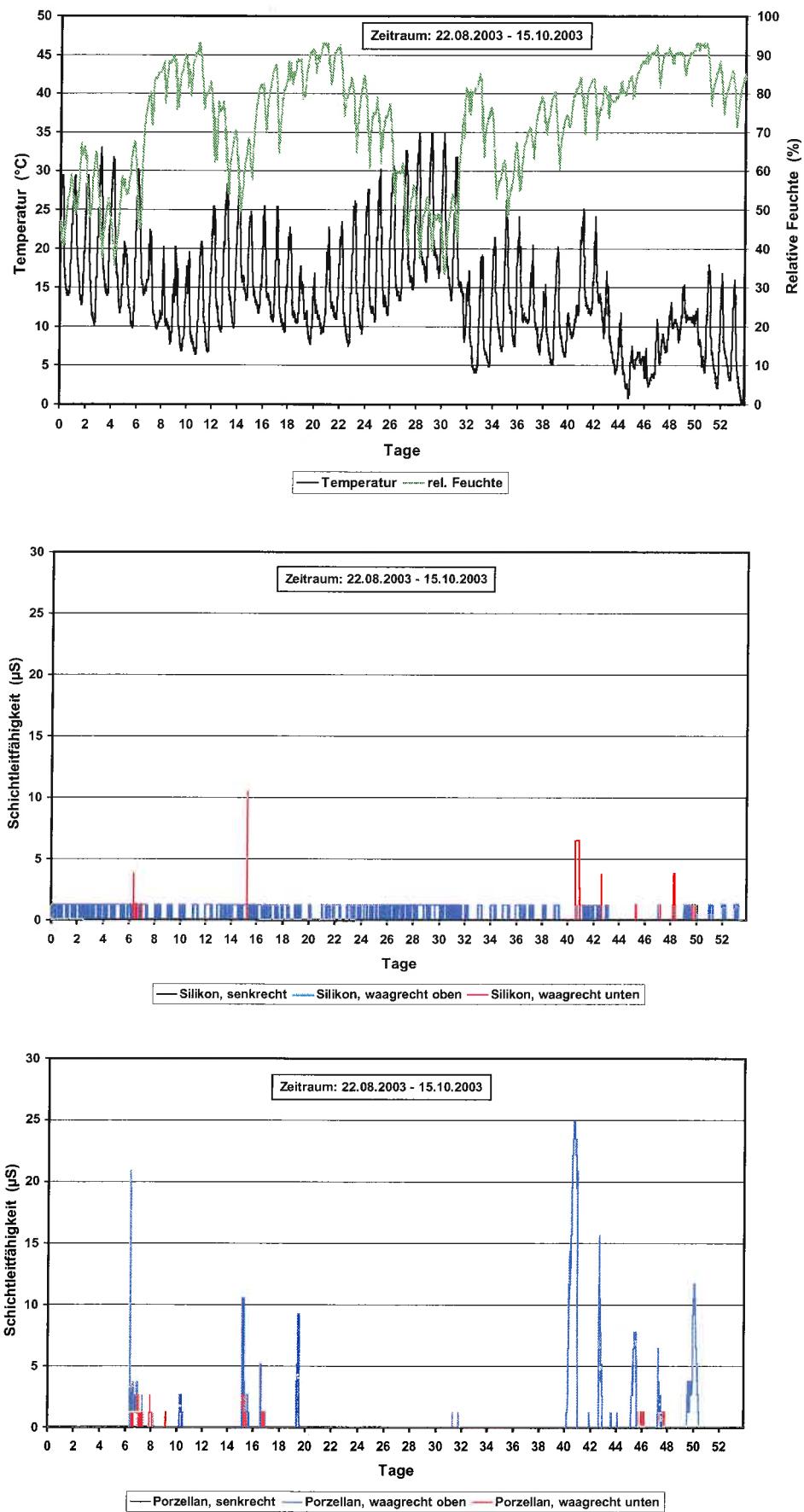
**Bild 38** Mast 234: Schichtleitfähigkeitsmessung im Zeitraum 30.06.2003 bis 22.08.2003.



**Bild 39** Mast 221: Schichtleitfähigkeitsmessung im Zeitraum 30.06.2003 bis 22.08.2003.



**Bild 40** Mast 234: Schichtleitfähigkeitsmessung im Zeitraum 28.08.2003 bis 15.10.2003.



**Bild 41** Mast 221: Schichtleitfähigkeitsmessung im Zeitraum 28.08.2003 bis 15.10.2003.