

# Praktische Probleme beim Einsatz der UHF-TE-Diagnostik an Hochspannungskabelsteckern im Betrieb

M. Sc. Denis Denissov, Dr.-Ing. Wolfgang Köhler, Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart  
Dr.-Ing. Thomas Klein, Pfisterer AG, Winterbach, Deutschland

## Kurzfassung

Die Statistik zeigt, dass viele Fehler in Kabelsystemen durch Kabelgarnituren verursacht werden. In diesem Beitrag werden die praktischen Erfahrungen bei on-line UHF-TE-Messungen an Hochspannungskabelsteckern vor Ort diskutiert. Nachgewiesene TE-Aktivität in den Steckern ist ein klares Zeichen dafür, dass diese ausgetauscht werden müssen. Um solche TE-Aktivitäten unter Vor-Ort-Bedingungen und im Betrieb sicher zu erkennen, wird die UHF-TE Diagnostik eingesetzt. Dieses Messverfahren basiert auf dem Empfang von elektromagnetischen Emissionen, die aus der TE-Quelle kommen. Der UHF-Sensor (Monopolantenne) soll möglichst nahe am Prüfling installiert werden und muss effektiv gegen Störungen aus der Umgebung abgeschirmt werden. Die Kalibrierung der UHF Methode bezüglich scheinbarer Ladung ist nicht direkt möglich, sondern nur indirekt durch eine Vergleichsmessung mit dem IEC 60270-Messverfahren. Die Anwendung des Verfahrens vor Ort hat ergeben, dass in manchen Fällen, wo ein hoher Umgebungsstörpegel vorhanden ist, eine sichere Aussage über die TE-Intensität erschwert wird. In solchen Fällen müssen zusätzliche Maßnahmen und Kriterien angewandt werden, um eine sichere Beurteilung der TE-Intensität zu erhalten.

## 1 Einführung

### 1.1 Fehlerstatistik in Kabelnetzen

Die Statistiken der Netzbetreiber zeigen, dass die Mehrheit der Störungen in Energieversorgungssystemen fällt auf Mittelspannungskabelnetze [1]. Diese unterirdischen Kabelnetzwerke verteilen Energie über regionale Distanzen, hauptsächlich in dicht besiedelten und Industriegebieten. Die Gründe für die Ausfälle in den Kabelsystemen sind zu über 60% auf interne Defekte zurückzuführen, während die restliche Fehlerrate im Zusammenhang mit externen Einflüssen (z.B. Erdarbeiten) steht.

Im Gegensatz zu Hochspannungskabeln sind Kabelanschlüssen und Kabelmuffen wesentlich komplexer aufgebaut. Sie bestehen in der Regel aus mehreren dielektrischen Materialien welche höher ausgenutzt werden und reagieren daher empfindlicher auf kleine Störeinflüsse, z.B. Verunreinigungen bei der Montage vor Ort oder geringfügige mechanische Beschädigungen.

### 1.2 Kabelstecksysteme

Steckbare Kabelanschlusstechniken gewinnen auch in der Hochspannungsübertragung gegenüber der konventionellen Anschluss technik zunehmend an Bedeutung. Vorteile, wie einfache Montage vor Ort ohne Öl- bzw. Gasarbeiten, kompakte Bauweise oder die Tatsache, dass keine flüssigen Isolierstoffe verwendet werden, überzeugen Anlagenhersteller und Betreiber.

Beim Einsatz von konventionellen, nassen Anschlüssen ist es nur mit erheblichem Aufwand möglich, den Kabelendverschluss nach dessen Montage elektrisch zu prüfen. Bei den steckbaren Endverschlüssen kann zumindest der Stecker relativ einfach getestet werden, zum Prüfen nach dem Einstecken in die Buchse ist es genauso schwierig wie bei der konventionellen Technik. Um den Anlagenbetreibern die Sicherheit zu bieten, dass sich die Kabelanschlüsse nach der Montage in einwandfreiem Zustand befinden, wurde nach einer Möglichkeit zur TE-Messung ohne Unterbrechung des Betriebs gesucht. Da die UHF-Methode sich hierfür hervorragend eignet, wurde sie auf den Einsatz an Kabelanschlüssen angepasst und mit Laborversuchen ihre Empfindlichkeit überprüft und verbessert. Nach dem Aufbau eines Messsystems für Steckendverschlüsse der 72,5 kV-Ebene wurden Vor-Ort-Messungen an einem Stecker durchgeführt, bei dessen Montage das Kabel erheblich beschädigt wurde. Die Anlage wurde vorübergehend in Betrieb genommen und eignete sich bestens für diese Messungen.

### 1.3 Vorteil der zustandsbasierten Wartung von Kabelsystemen

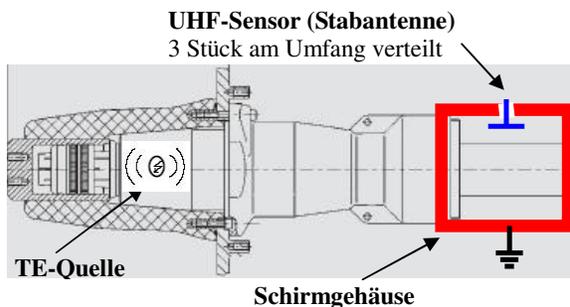
Die Lokalisierung von TE behafteten Kabelgarnituren ist eine wesentliche Voraussetzung um gefährdete Komponenten in Kabelnetzen zu beurteilen. Dadurch wird eine zerstörungsfreie Diagnose ermöglicht und die Unterbrechung der Versorgung wird vermieden. Auf Basis der Messwerte vor Ort können rechtzeitig geeignete Wartungsarbeiten der schadhafte Kompo-

nenen geplant werden ohne größere Folgeschäden wie evtl. bei Netzausfällen, zu riskieren. Diese Vorgehensweise der zustandsbasierten Wartung ist weniger aufwändig und kostengünstiger als die Reparatur nach Schadensereignissen.

## 2 UHF-TE Messung an Hochspannungskabelsteckern

### 2.1 Motivation für die Messungen im Betrieb und das Messprinzip

Der Zweck der selektiven Zustandsbeurteilung von Kabelzubehör ist, Fehler vor ihrer Entstehung vorauszusagen. Die für schadhaft befundenen Teile können dann rechtzeitig ersetzt werden. Dadurch wird das Risiko verringert, dass das Gesamtkabelsystem versagt und es zu Ausfällen der Versorgung kommt. Nachgewiesene TE-Aktivität in den Steckern ist ein klares Zeichen dafür, dass diese ausgetauscht werden müssen. Um solche TE-Aktivitäten unter Vor-Ort-Bedingungen und im Betrieb sicher zu erkennen, wird die UHF-TE Diagnostik eingesetzt. Die Messverfahren basiert auf dem Empfang von elektromagnetischen Emissionen, die aus der TE-Quelle kommen. Der UHF-Sensor (Monopolantenne) soll möglichst nahe am Prüfling installiert werden und muss effektiv gegen Störungen aus der Umgebung abgeschirmt werden, wie in **Bild 1** zu sehen ist.



**Bild 1** Prinzipielle Anordnung zur UHF-TE-Diagnostik an Kabelsteckern

Die Vorteile der unkonventionellen UHF-TE-Messmethode sind die weitgehende Unabhängigkeit von äußeren Störsignalen wie beispielsweise Koronaentladung in Schaltanlagen und die einfache Anwendung. Es wird keine spezielle Prüfanlage benötigt und die Messung erfolgt im Betrieb ohne die Anlage abzuschalten. Die Messausrüstung kann im Wesentlichen im Handgepäck untergebracht werden.

### 2.2 Labor-Versuchsaufbau

Der gesamte Versuchsaufbau ist in **Bild 2** dargestellt und besteht aus den folgenden Komponenten:

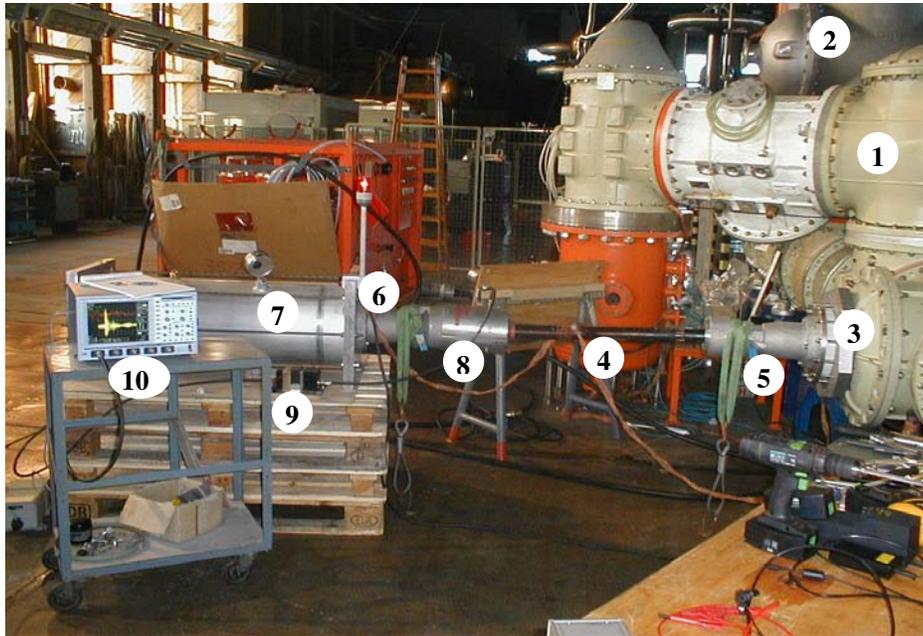
- kommerzielle 525-kV-GIS-Anlage (1),
- Hochspannungsprüftransformator (2),
- Koppelkondensator mit einem IEC60270-konformen TE-Messgerät,
- Adapterflansch mit integrierter Gießharzbuchse (3) und einem 2 m langen Hochspannungskabel (4) mit montierten Kabelsteckern (5,6) und SF<sub>6</sub>-gefülltem Prüfgefäß (7). Einer der beiden Stecker ist fehlerbehaftet (6) und weist TE auf. An diesem Stecker wird ein Schirmgehäuse (8) mit UHF-Sensoren angeordnet. Im Innenraum des Schirmgehäuses sind drei ca. 6 cm lange Monopolantennen so angeordnet, dass sich jede 1-2 cm über der Kabeloberfläche befindet und tangential zum Kabelquerschnitt orientiert ist. Die Antennen sind jeweils um 120° gegeneinander versetzt, um den kompletten Umfang des Prüflings (6) abzudecken. Das von einer Antenne gemessene Signal wird durch einen 40 dB bzw. 60 dB Vorverstärker (9) mit einer Bandbreite von 1-1000 MHz verstärkt und über ein doppelgeschirmtes Koaxialkabel zu einem Digitalspeicheroszilloskop (10) geführt (LeCroy ProWave 7100), wo die Aufzeichnung und Abspeicherung der UHF-Signale sowie deren Auswertung im Frequenzbereich durchgeführt wird.

### 2.3 Nachweis der Empfindlichkeit des UHF-TE-Messverfahrens

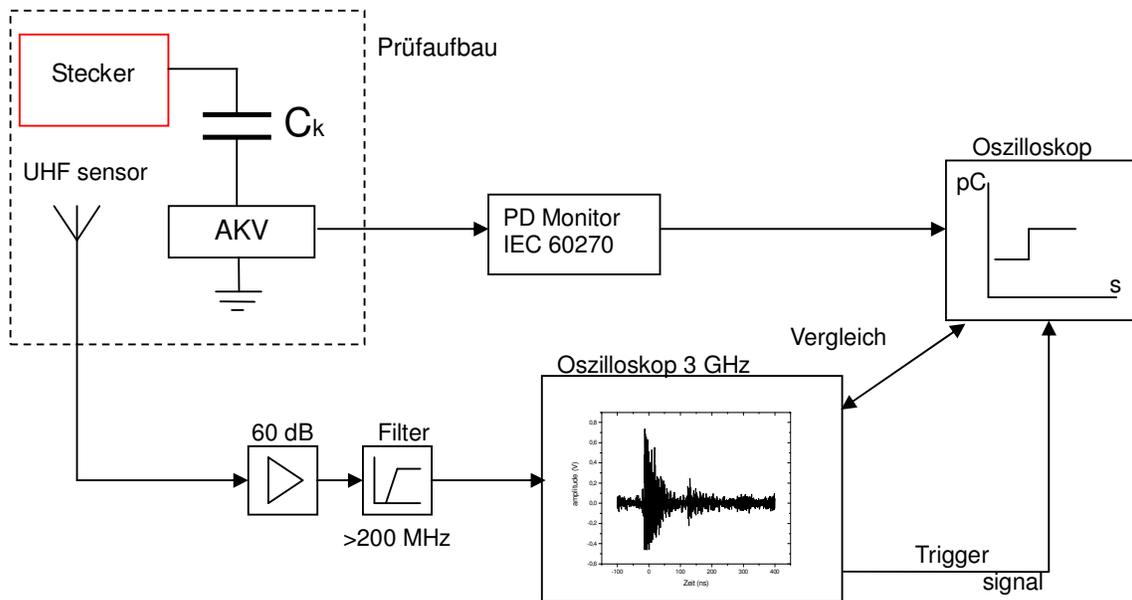
Die Kalibrierung der UHF Methode bezüglich scheinbarer Ladung ist nicht direkt möglich, sondern nur indirekt durch eine Vergleichsmessung mit dem IEC 60270-Messverfahren [4], wie in **Bild 3** zu sehen ist. Dabei wird im Labor parallel zur UHF-Messung eine IEC-konforme TE-Bewertung vorgenommen, um die UHF-Messung grob zu kalibrieren. Dieser so ermittelte „Kalibrierfaktor“ wird zur späteren Abschätzung der gemessenen TE-Aktivität vor-Ort verwendet. Durch diesen Vergleich wird auch die Empfindlichkeit der UHF-Methode nachgewiesen. Der TE-Intensität wurde durch die Änderung der angelegten Spannung variiert. Es stellte sich heraus, dass mit dem UHF-TE-Messverfahren in der vorliegenden Anordnung noch TE-Pegel von ca. 4 pC erfasst werden können.

Um die Empfindlichkeit und das Signal/Rauschverhältnis dieses Messverfahrens zu zeigen und auch um den Vergleich zum IEC 60270 zu haben wurde folgender Versuch gemacht:

Es wurde während ca. 10 s das TE-Signal eines IEC 60270 Messgerätes und das UHF-Signal aufgezeichnet. Die Messung erfolgte im Peak-Detect-Modus des Oszilloskops und die Prüfspannung wurde zuerst von 62 kV (keine TE) auf 72 kV (mit TE) gesteigert und anschließend wieder auf 62 kV abgesenkt (siehe **Bild 4**). Der TE-Pegel direkt nach dem TE-Einsatz betrug



**Bild 2** Laborversuchsaufbau zur UHF-TE-Diagnose an Hochspannungskabelstecksystemen



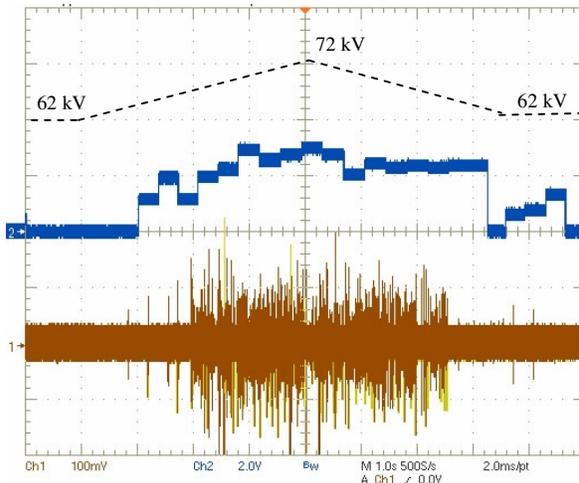
**Bild 3** Prinzipschaltbild zur Empfindlichkeitsprüfung

ca. 10 pC und konnte im UHF-Signal deutlich abgesetzt vom Rauschen erkannt werden. Auch die schwächeren TE-Impulse am Ende der Aufzeichnung wurden vom UHF-Verfahren klar detektiert. Die Nachweisgrenze lag im Mittel bei weniger als 5 pC scheinbarer Ladung (nach IEC 60270).

## 3 Messergebnisse

### 3.1 Prinzipielle Störeinflüsse

Bei Labormessungen ist der erreichbare Störpegel relativ gering. Dennoch gibt es auch hier von außen eingekoppelte Störsignale, z.B. durch das D2-Netz (Handy) oder durch andere Funkdienste [5].



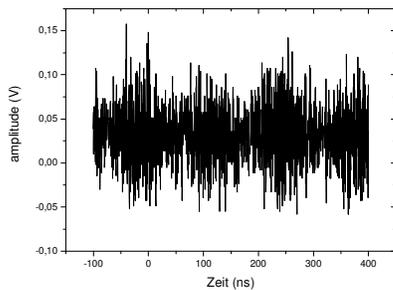
**Bild 4** Peak-detect-Aufzeichnung der TE-Aktivität (Dauer 10 s)  
 Kanal 1: UHF-Signal 100 mV/div,  
 Kanal 2: TE-Signal nach IEC 60270 mit 20 pC/div.  
 Prüfspannungsverlauf als punktierte Kurve: gesteigert von 62 kV auf 72 kV und anschließend wieder zurück

Es hat sich generell als günstig erwiesen, Frequenzen unterhalb von ca. 200 MHz zu unterdrücken, da in diesem Frequenzbereich viele Störsignale vorhanden sind (UKW, Power Line Coupling, etc.). Dies wird durch den Einsatz von Hochpassfiltern und durch die richtige Dimensionierung der UHF-Stabantennen erreicht.

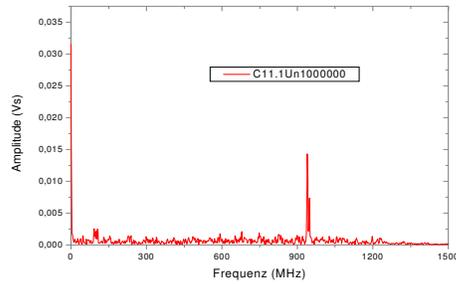
Das D2-Signal von ca. 900 MHz liegt jedoch voll im Durchlassbereich der Filter. Es kann jedoch klar zugeordnet werden und wird bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Das UHF-Signal wird auch wesentlich durch die geometrischen Abmessungen der Steckergehäuses beeinflusst. Diesen ist prinzipiell ein schwingfähiges Gebilde und hat ausgeprägte Resonanzfrequenzen, welche im aufgezeichneten UHF-Signal zu erkennen sind, da diese Resonanzen durch das hochfrequente TE-Signal im Stecker angeregt werden.

**Bilder 5 und 6** zeigen eine Nullmessung im Labor, d.h. es lag keine Spannung an (Zeitsignal und Frequenzspektrumsdarstellung).



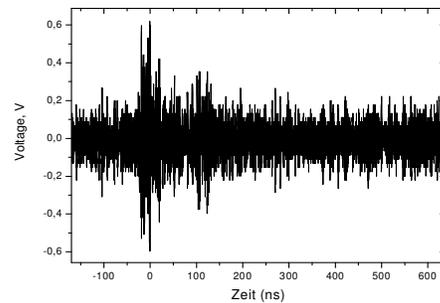
**Bild 5** Nullmessung im Labor, 60 dB verstärkt



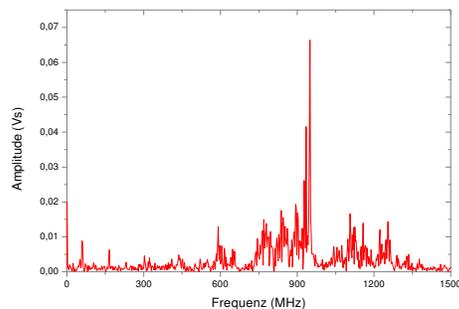
**Bild 6** Frequenzspektrum der Nullmessung

Man erkennt nur einen Mobilfunkstörer im Spektrum. Eine Messung mit anliegender Hochspannung sieht bei einem gesunden Stecker genau gleich aus.

**Bild 7** zeigt eine Labormessung eines TE-behafteten Steckers. Man erkennt im Frequenzbereich (siehe **Bild 8**) eine klare Veränderung. Es gibt eine relativ breitbandige Anhebung des Dichtespektrums im Bereich von ca. 600 bis 1000 MHz welche auf interne TE zurückzuführen ist. Ebenso sind einzelne Resonanzstellen zu erkennen, welche hauptsächlich vom Steckergehäuse und den lokalen Erdungsverhältnissen verursacht werden.



**Bild 7** TE-Impuls von einem TE-behafteten Stecker, 35 pC bei 75 kV



**Bild 8** Frequenzspektrum des TE-Impulses im Labor

Ein wichtiger Aspekt ist die passende Wahl der Verstärkung des Vorverstärkers. Diese ist so zu wählen, dass sich ein möglichst großer Signalrauschabstand ergibt. Hierbei sind das Grundrauschen des Oszilloskops, die lokalen Umgebungsstörungen und die maximale Ausgangsspannung des Vorverstärkers zu berücksichtigen. In jedem Fall müssen Übersteuerungs-

effekte des Vorverstärkers und des Oszilloskops vermieden werden.

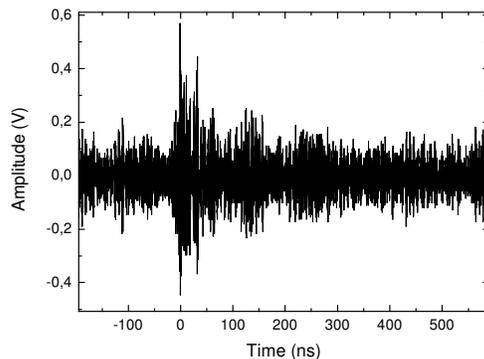
### 3.2 Vor-Ort-Versuchsaufbau und Ergebnisse

Vor-Ort-TE-Messungen wurden an Kabelsteckern im Bereich eines Kabelabganges an einer GIS durchgeführt, während die Anlage in Betrieb war. Das metallische Abschirmgehäuse wurde nacheinander auf alle 3 Kabelstecker montiert (Größe 4, bis zu 72,5 kV), wie es in **Bild 9** zu sehen ist. Dabei wurden jeweils die Signale aller 3 Sensoren nacheinander aufgezeichnet und ausgewertet.



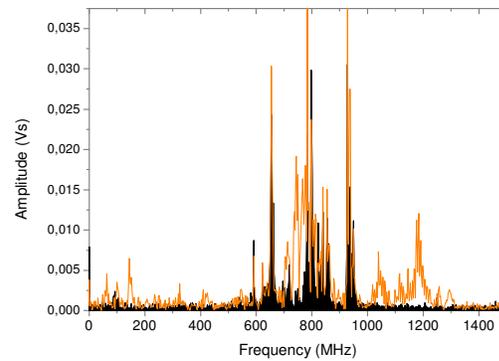
**Bild 9:** Vor-Ort-Messaufbau:  
1. Stecker, 2. Schirmgehäuse mit Sensoren

**Bild 10** zeigt einen typischen schnellen Impuls, der vor Ort an einem TE behafteten Stecker aufgezeichnet wurde. Das Frequenz-Spektrum von diesem Impuls und das Spektrum des Grundrauschens sind in **Bild 11** dargestellt.



**Bild 10** Typischer schneller Impuls eines Steckers, gemessen vor Ort mit einer Bandbreite von 3 GHz

Abgesehen von den oben genannten bekannten Störfrequenzen gibt es in **Bild 11** mehrere signifikante Spektralbereiche, die in diesem Fall auf interne Teilentladungen schließen lassen [2].



**Bild 11** Frequenzspektrum des Impulses (hell) im Vergleich zum Hintergrundrauschen (dunkel)

### 3.3 Probleme beim Vor-Ort-Einsatz

Die UHF-Methode hat sich für die Zustandsbewertung von Kabelstecksystemen vor Ort prinzipiell als gut geeignet erwiesen. Dennoch traten bei den Messungen vor Ort die folgenden praktischen Probleme auf:

- Durch die teilweise sehr kompakte Anordnung der Steckanschlüsse an der GIS war es manchmal sehr schwierig, das rel. Große Schirmgehäuse zu montieren. Manche Stecker konnten deswegen auch gar nicht gemessen werden.

- Bei Messorten mit sehr hohen Umgebungsstörepegeln ist das System zwar einsetzbar, jedoch wird eine sichere Bewertung der Messungen deutlich erschwert. Wesentliche Verbesserungen konnten dabei durch Hochpassfilter sowie Schirmungs- und Erdungsmaßnahmen am Messaufbau erreicht werden.

Um die Schwierigkeiten bei der Montage des Schirmgehäuses zu eliminieren, wurde ein spezieller „mobiler“ UHF-Sensor wie in **Bild 12** verwendet.



**Bild 12** „Mobiler“ Sensor im Einsatz

Der Sensoraufbau ist in **Bild 13** gezeigt.

Der Sensor hat keine Abschirmung gegen Störungen aus der Umgebung, deswegen liegt die Empfindlichkeit bei der Vergleichsmessung mit dem IEC 60270-Messverfahren nur im Bereich von 10 pC.



**Bild 13** Sensoraufbau: Stabantenne in der PVC-Hülle

## 4 Zusammenfassung

Die UHF-TE-Messmethode konnte erfolgreich zur TE-Diagnose von Hochspannungskabelsteckern vor Ort eingesetzt werden. Die Messungen können dabei im normalen Betrieb, ohne die Anlagen abzuschalten, durchgeführt werden.

Die Nachweisgrenze für die TE-Pegel liegt dabei im Bereich von 5 pC.

Aufgrund des hohen Messfrequenzbereiches ist das Messverfahren ist ausreichend selektiv, d.h. es wird nur die TE in der Nähe des Sensors gemessen. Teilentladungen an weiter entfernten Objekten werden wegen der frequenzabhängigen Dämpfung wesentlich schwächer bewertet.

Die Störsignaleinkopplung durch Störer in der Umgebung muss besonders beachtet werden. Durch „Nullmessungen“ und durch den Einsatz von Filtern oder Schirmungs- und Erdungstechniken ist in den meisten Fällen jedoch eine sichere Aussage über das TE-Verhalten der untersuchten Objekte möglich.

## 5 Literatur

- [1] Smit J.J., Gulski E., Wester F. „Economical and technical aspects of advanced PD diagnostics to support condition based maintenance of HV assets“, IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation, 1110-1115, 2002
- [2] T. Klein, D. Denissov, W. Köhler, S. Markalous "Neue Technologien in der steckbaren Anschluss-technik – Entwicklung einer Steckdurchführung und TE-Diagnose an Hochspannungskabelsteckern "- Stuttgarter Hochspannungssymposium, Stuttgart, 2006
- [3] F. Petzold, M. Beigert, A. Bövingloh: Vor-Ort-TE-Diagnose an Energiekabeln mit Oscillating Voltage, Elektrizitäts-Wirtschaft, Jg. 105, Heft 9 2006
- [4] Partial Discharge measurements, IEC 60270, Third Edition 1998-06
- [5] Elektromagnetische Felder im Alltag, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Erste Auflage, Karlsruhe, 2002