

# Neue Technologien in der steckbaren Anschluss-technik – Entwicklung einer Steckdurchführung und TE-Diagnose an Hochspannungskabelsteckern

Von Dr. Thomas Klein, Geschäftsführer der PFISTERER Kontaktsysteme GmbH, Winterbach und M. Sc. Denis Denisov

## Einführung

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.

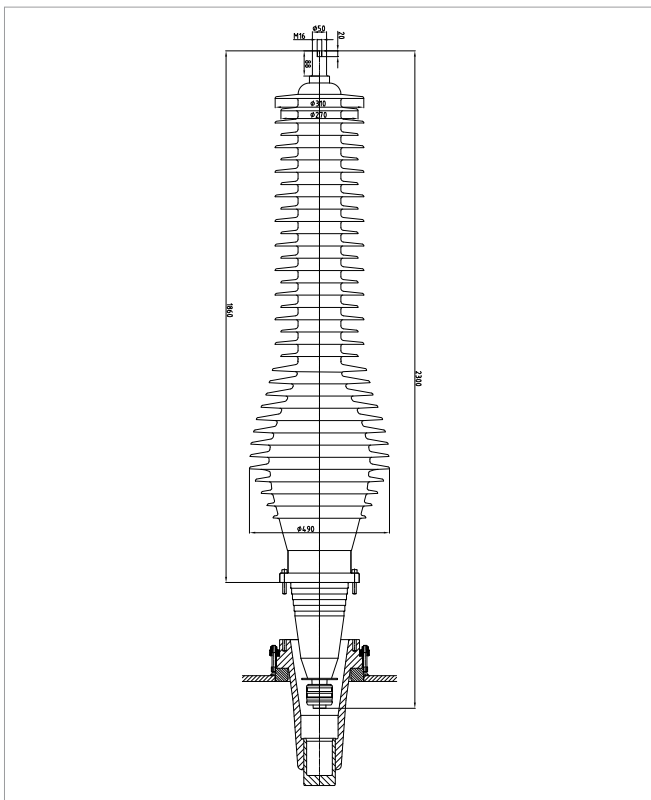
Im Hochspannungsbereich bietet PFISTERER steckbare Kabelendverschlüsse für Spannungsebenen von 72,5 kV bis 245 kV an. Mit der Entwicklung einer steckbaren Durchführung

für 170 kV erweitern sich die Anwendungsmöglichkeiten des Systems erheblich. Es kann nun auch zum Anschluss von Freileitungen an Schaltanlagen oder Transformatoren eingesetzt werden, wobei jederzeit die Möglichkeit besteht, auf Kabelanschlüsse umzurüsten. Im Aufbau der Durchführung kommen Techniken zur Steuerung der elektrischen Feldstärken zur Anwendung, wie sie auch in den Steckern vorzufinden sind. Durch geeignete geometrische Anordnung verschiedener Isoliermedien und Feldsteuerteile wird ein überraschend homogener Potenzialverlauf erreicht.

Neben der Entwicklung dieser neuen Komponente für das Stecksystem wird die Anwendung der UHF TE-Messtechnik bei Kabelanschlüssen vorgestellt. 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 Kunden 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 am HV-Connex 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.

## Entwicklung einer 170-kV Steckdurchführung

Die Abmessungen des Freiluftteils der Durchführung entsprechen den Forderungen der IEC für die 170kV-Ebene. Der für einen Nennstrom von 2500 A ausgelegte Leiter ist gießharzummantelt und an der Oberfläche vollständig mit Silikongummi überzogen. Mit der Beschirmung der Durchführung, wie sie in **Bild 1** dargestellt ist, wird ein spezifischer Kriechweg von 31 mm/kV erreicht. Sie ist für den Einbau in eine Buchse Größe 6 des Connex-Systems konstruiert und besitzt keine flüssigen Isolierstoffe, so dass sie in jeder Lage eingebaut werden kann.

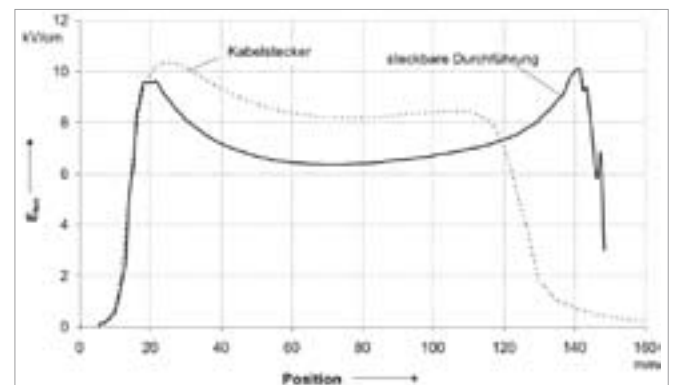


**Bild 1: Abmessungen der Steckdurchführung Größe 6, 170 kV**

Die Verbindung des Gießharzkörpers mit dem Innenleiter sowie dem Flansch der Durchführung gewährleistet die mechanische Festigkeit. Die geforderten Biegekräfte von 2500 N werden problemlos beherrscht.

Der steckbare Teil der Durchführung ist ähnlich wie ein Kabelstecker aufgebaut. Die im Silikon eingegossenen leitfähigen Feldsteuerelemente sorgen für einen homogenen Feldverlauf entlang der Edelfuge.

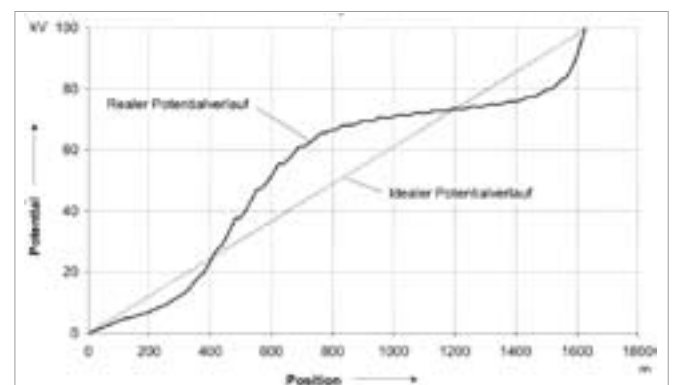
**Bild 2** zeigt den Vergleich der Tangentialfeldstärken. Es wird außerdem deutlich, dass die erreichte Maximalfeldstärke der Steckdurchführung den höchsten Wert im Kabelanschluss-teil nicht übersteigt.



**Bild 2: Verlauf der Tangentialfeldstärke entlang der Edelfuge im Steckteil der Durchführung und im Kabelstecker, normiert auf 100 kV**

Im Freiluftteil der Durchführung wurden die Geometrien von Innenleiter, Gießharzisolierung sowie Silikonisolierung so aufeinander abgestimmt, dass im Gießharz bei 750 kV Prüfblitzstoßspannung sich eine Maximalfeldstärke von 17,5 kV/mm ergibt. Dieser Wert liegt deutlich unter dem maximal zulässigen für Hochspannungsgießharze.

Obwohl keine Kapazitätsbeläge zur Feldsteuerung in die Isolierung eingebracht wurden, besitzt die Durchführung einen weitgehend homogenen Potenzialverlauf entlang der Oberfläche im Freiluftteil. In **Bild 3** ist dieser dargestellt.



**Bild 3: Potenzialverlauf entlang des Freiluftteils der Durchführung, normiert auf 100 kV**

## UHF-TE-Messung an Hochspannungskabelsteckern

Die Statistik zeigt, dass die meisten Fehler in Kabelsystemen durch Kabelgarnituren verursacht werden, also durch Muffen, Stecker und Endverschlüsse [Smit 02]. In diesem Teil des Beitrages werden die praktischen Erfahrungen bei online UHF-TE-Messungen an Hochspannungskabelsteckern vor Ort diskutiert.

### Motivation für die Messungen vor Ort

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. Das Messverfahren basiert auf dem Empfang von elektromagnetischen Emissionen, die aus der TE-Quelle kommen. Der Kopplungssensor (Monopolantenne) soll möglichst nahe am Prüfling installiert werden und muss effektiv gegen Störungen aus der Umgebung abgeschirmt werden, wie in **Bild 4** zu sehen ist. Die Vorteile der unkonventionellen UHF-TE-Messmethode sind die weitgehende Unabhängigkeit von äußeren Störsignalen vor Ort und die Tatsache, dass das Messsystem keine Verbindung zur Hochspannung benötigt.

### Labor-Versuchsaufbau und Ergebnisse

Das folgende **Bild 4** zeigt die prinzipielle Anordnung mit dem Kabelstecker und dem UHF-Sensor.

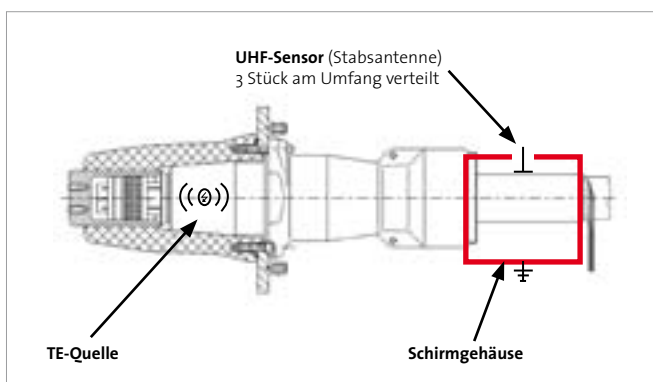


Bild 4: Prinzipielle Anordnung zur UHF-TE-Diagnostik an Kabelsteckern

Das Schirmgehäuse dient zu Abschirmung externer Störsignale und ist am Ende des Steckers (Größe 4, bis zu 72 kV) um das Kabel angebracht, wie es in **Bild 4** und **5** zu sehen ist.

Der gesamte Versuchsaufbau ist in **Bild 5** dargestellt und besteht aus den folgenden Komponenten:

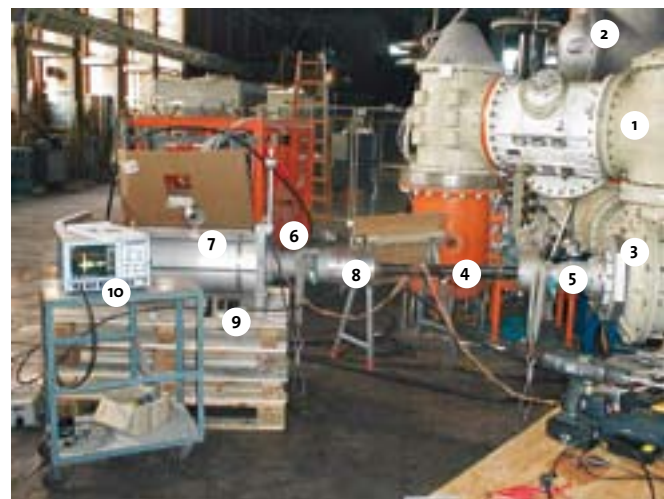


Bild 5: Laborversuchsaufbau zur UHF-TE-Diagnose an Hochspannungskabelstecksystemen

Kommerzielle 525-kV-GIS-Anlage (1), Hochspannungsprüftransformator (2), Koppelkondensator mit einem IEC-60270-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 Sensoren angebracht. Im Innenraum des Schirmgehäuses sind drei 5 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 angeordnet, um den kompletten Umfang des Prüflings (6) abzudecken. Das von einer Antenne gemessene Signal wird durch einen 40-dB-Vorverstärker (9) mit einer Bandbreite von 1 - 1000 MHz verstärkt und über ein Koaxialkabel zu einem Digitalspeicheroszilloskop (10) geführt (LeCroy ProWave 7300).

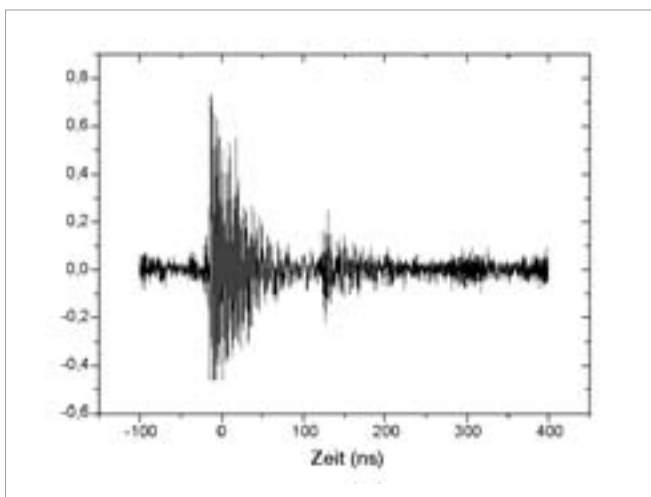
**Nachweis der Empfindlichkeit des UHF-TE-Messverfahrens**

Die Kalibrierung der UHF-Methode bezüglich scheinbarer Ladung ist nicht direkt möglich, sondern nur indirekt durch eine Vergleichsmessung mit dem IEC-60270-Messverfahren. 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.

**Nachweis der räumlichen Selektivität des UHF-TE-Messverfahrens**

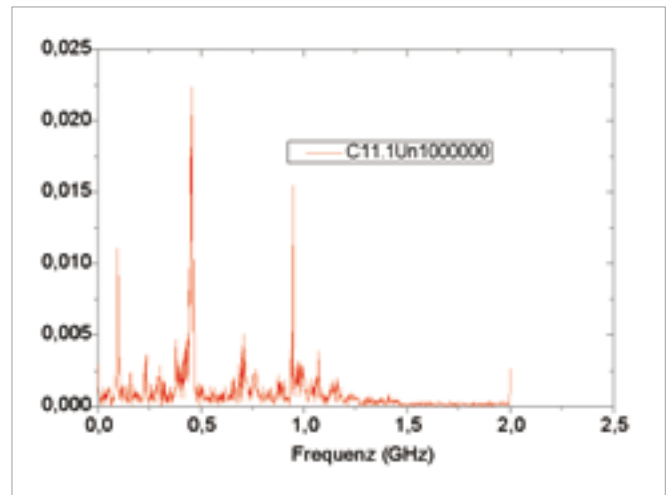
Um zu zeigen, dass mit diesem Messverfahren nur interne TE-Signale aus dem Steckerbereich erfasst werden, wurden gezielt externe Teilentladungen in der angeschlossenen GIS-Anlage erzeugt. Dazu wurden an einer Drahtspitze relativ starke Koronaentladungen generiert. Sogar bei TE-Pegeln von ca. 200 pC (gemessen nach IEC-60270) wurden keine schnellen Impulse innerhalb der Manschette detektiert, d. h. das UHF-Messsystem detektiert nur Impulse, deren Ursprung Teilentladungen im Kabelstecker sind.

**Bild 6** zeigt einen TE-Impuls, der im Labor an dem defekten Stecker aufgezeichnet wurde (Messbandbreite 1 GHz).



**Bild 6:** TE-Impuls von 35 pC bei 78 kV, gemessen im Laboraufbau mit einer Bandbreite von 1 GHz

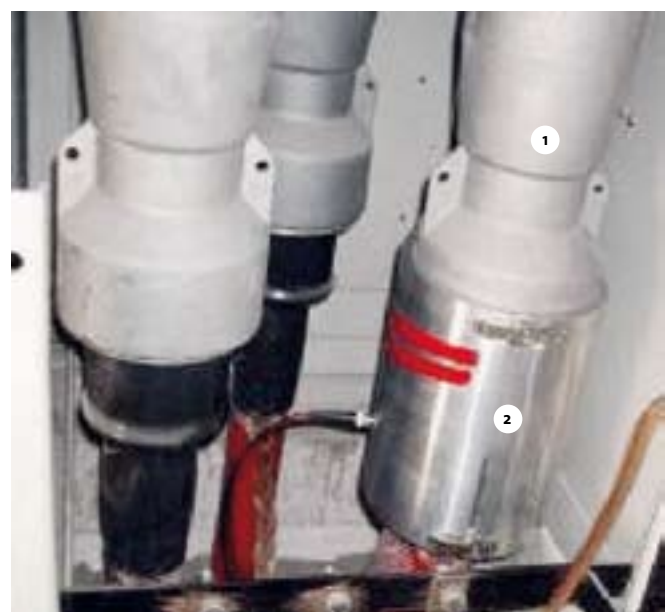
Das Frequenzspektrum von diesem Impuls ist in **Bild 7** dargestellt.



**Bild 7:** Frequenzspektrum des TE-Impulses

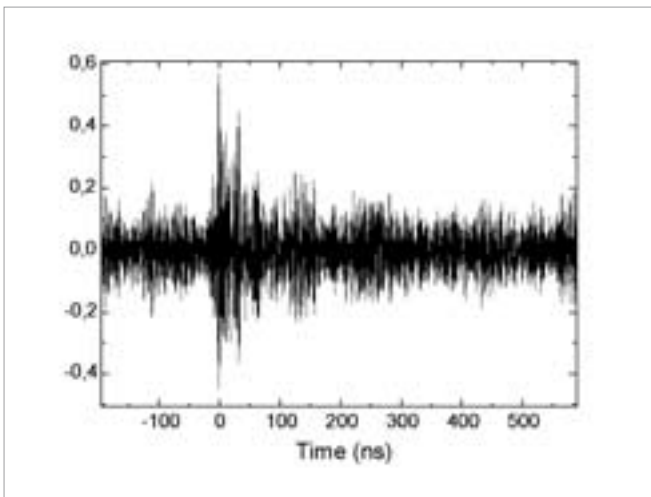
**Vor-Ort-Versuchsaufbau und Ergebnisse**

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 kV), wie es in **Bild 8** zu sehen ist. Dabei wurden jeweils die Signale aller 3 Sensoren nacheinander aufgezeichnet und ausgewertet.



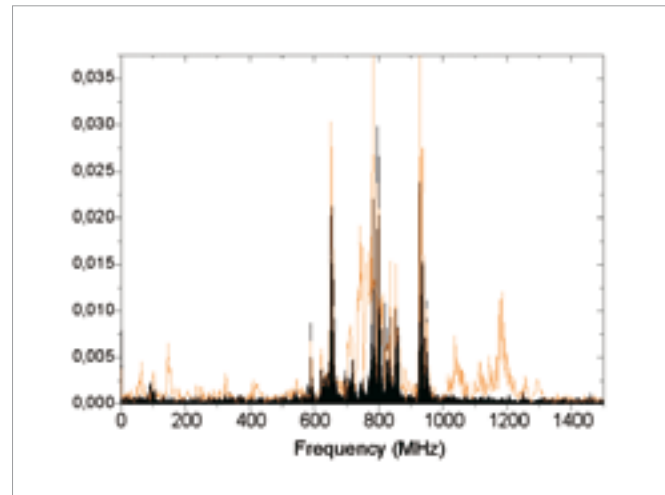
**Bild 8:** Vor-Ort-Messeaufbau: 1. Stecker, 2. Schirmgehäuse

**Bild 9** zeigt einen typischen schnellen Impuls, der vor Ort an einem TE behafteten Stecker aufgezeichnet wurde (Messbandbreite 3 GHz).



**Bild 9:** Typischer schneller Impuls eines Steckers, gemessen vor Ort mit einer Bandbreite von 3 GHz

- 60 Das Frequenzspektrum von diesem Impuls und das Spektrum des Grundrauschens sind in **Bild 10** dargestellt. Abgesehen von Rundfunk- und Handysignalanteilen gibt es mehrere signifikante Spektralbereiche, die in diesem Fall auf interne Teilentladungen schließen lassen [A-med 98].



**Bild 10:** Frequenzspektrum des Impulses (hell) im Vergleich zum Hintergrundrauschen (dunkel)

#### Anwendung in der Praxis

Die obigen Labormessungen haben gezeigt, dass das vorgestellte Messverfahren geeignet ist, um im Betrieb TE in Kabelsteckern empfindlich zu detektieren.

Die Anwendung des Verfahrens Vor-Ort hat ergeben, dass in manchen Fällen, wo ein hoher Umgebungsstörspegel 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.

## Literatur

[Smit 02]

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)

[Ahmed 98]

Ahmed N.H., Srinivas N.N. “On-line Partial Discharge Detection in Cables” (IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 2 , 181-188, 1998)