

Vor-Ort-TE-Detektion an Kabelendverschlüssen mittels Ankoppelvierpol ohne Koppelkondensator?

On-site PD detection on cable terminations with coupling impedance without coupling capacitor?

Dr. Reinhold Bräunlich, Dr. Thomas Brügger
 Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich, Schweiz, braeunlich@fkh.ch

Kurzfassung

Teilentladungsmessungen an Hochspannungs-Kabelstrecken dienen in erster Linie der Montagekontrolle der Kabelgarnituren. Die TE-Detektion erfolgt an den beiden Kabelendverschlüssen über je einen Ankoppelvierpol (Messimpedanz im Bereich von 50 Ω) und falls vorhanden und zugänglich auch an den Muffen. Bei den Messungen an den Kabelendverschlüssen (KEV) wird der Vierpol in der Regel zwischen dem Kabelschirm und dem geerdeten Sockel des KEV geschaltet. Voraussetzung für eine korrekte Messung der scheinbaren Ladung nach IEC 60270 [1] und IEC 60885 [2], [3] ist, dass ein Hochspannungskoppelkondensator an den KEV angeschlossen wird. Dieser bildet für hohe Frequenzen einen Erdrückpfad mit kleiner Impedanz. Fehlt der Koppelkondensator, weil der KEV sich z.B. auf einem hohen Gerüst oder auf einem Endmast befindet, schliesst sich der TE-Messkreis nur über die sehr kleine Streukapazität des KEV-Hochspannungsanschlusses gegen Erde. Dies stellt eine ausreichende Messempfindlichkeit bei Messfrequenzen im Standardbereich bis 1 MHz und die Kalibrierbarkeit des TE-Messkreises in Frage.

Die mit einem Standard-TE-Erfassungssystem messbare Ladung, wurde für diesen Fall mittels Hochfrequenzersatzschaltbildern der TE-Messkreise mit und ohne Koppelkondensator theoretisch und praktisch untersucht. In Abhängigkeit der Geometrieparameter und der gewählten TE-Messfrequenz wurden die Messfehler in der scheinbaren Ladung quantifiziert, wenn kein Koppelkondensator verwendet wird. Als Messfehler wird der Unterschied in der angezeigten Ladung verstanden, die einerseits ein TE-Impuls zwischen Innenleiter und Deflektor des Kabelendverschlusses und die andererseits die Einspeisung eines Kalibratorimpulses gleicher Ladung über dem Endverschluss erzeugt. Es konnte festgestellt werden, dass im üblichen Bereich der kapazitiven und induktiven Streuimpedanzen eines KEV die Messfehler bei fehlendem Koppelkondensator innerhalb von 50% liegen, wenn der Bandpassfilter des Teilentladungsmessgeräts im Frequenzbereich von 1 MHz bis 5 MHz eingestellt wird. Wichtig ist auch, dass die interne Kapazität des Kalibrators klein ist und 10 pF nicht übersteigt.

Abstract

Partial discharge measurements on cable connections are primarily performed for a quality check of the installation of the cable accessories. Besides sensor measurements at the joints, PD detection is performed on the two terminations by means of coupling devices on each side (measuring impedance in the range of 50 Ω). The coupling impedances are usually connected between the cable shield and the grounded base of the cable termination. For a correct measurement of the apparent charge according to IEC 60270 [1] and IEC 60885 [2], [3] it is prerequisite, that a high voltage coupling capacitor is connected to the termination. The capacitor provides a low impedance ground return path for high frequency signals. If the termination is mounted on a high scaffold or on a terminal tower, the application of a coupling capacitor is not practical. In this case the PD measurement circuit is closed only by a very small stray capacitance from the HV terminal to ground. The sensitivity in the standard frequency range up to 1 MHz is therefore very small and the adjustability of the PD measurement circuit is highly questionable.

For the case that no coupling capacitor is provided the measurable charge with a standard PD measuring system was theoretically and practically investigated by means of high frequency equivalent measuring circuit. Depending on the geometric parameters and on the selected PD measurement frequency, the measurement errors of the apparent charge have been quantified in this case. The measurement error is defined here as the difference in the displayed charges that is generated on the one hand by a PD impulse between inner conductor and deflector and on the other hand by feeding a calibrator impulse of the same charge to the HV terminal. For the usual range of capacitive and inductive stray impedances of a cable termination it was found that the measurement error in absence of a coupling capacitor is within 50% when the band-pass filter of the partial discharge measuring device is set in the frequency range from 1 MHz to 5 MHz. For this result it is also important that the internal capacitance of the calibrator does not exceed 10 pF.

1 Einleitung, Problemstellung

Begleitende Teilentladungsmessungen (TE-Messungen) bei Spannungsprüfungen von Kabelstrecken bezwecken in erster Linie die Kontrolle der Montage der Kabelgarni-

turen [4] ... [6]. Bild 1 zeigt schematisch eine Kabelstrecke, an der zur Überprüfung der Endverschlussmontage Teilentladungen an beiden Kabelenden über eine Messimpedanz (50 Ω) angekoppelt werden. Auf der Seite der Kabelstrecke mit der Resonanzeinspeisung wird ein kapa-

zitiver Spannungsteiler aufgestellt (siehe Bild 2). Dieser kann zusätzlich auch als TE-Koppelkondensator dienen. Auf der Gegenseite ist in vielen Fällen ein Anschluss eines zweiten, für die TE-Messung erforderlichen Koppelkondensators nicht möglich, etwa wenn der Kabelendverschluss sich auf einem hohen Gerüst oder auf einem Endmast befindet (Kabelendverschluss links in Bild 1).

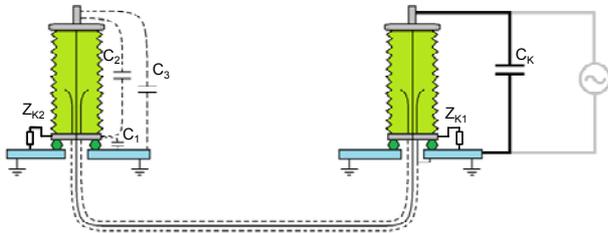


Bild 1 Skizze einer Vor-Ort-Hochspannungsprüfung einer Kabelstrecke mit Teilentladungsmessung an beiden Kabelendverschlüssen. Eingezeichnet sind die Ankoppelimpedanzen Z_{K1} und Z_{K2} . Nur auf der rechten Seite befindet sich ein Koppelkondensator der in der Regel gleichzeitig als kapazitiver Spannungsteiler dient. Die Streukapazitäten $C_1 \dots C_3$ spielen für die die TE-Signalübertragung auf Z_{K2} eine entscheidende Rolle.



Bild 2 Vor-Ort-Serieresonanzprüfung an einer 275-kV-Kabelverbindung mit Teilentladungsmessungen an den Kabelendverschlüssen. Der kapazitive Spannungsteiler dient auf dem sichtbaren Kabelende gleichzeitig als Koppelkondensator.

Fehlt die Koppelkapazität, dann sind die Voraussetzungen für eine kalibrierte Teilentladungsmessung nach der IEC Publikation 60270 strenggenommen nicht erfüllt. Der TE-Messkreis ist in diesem Fall nur über die sehr kleine Streukapazität des Endverschlusses gegen Erde geschlossen (C_3 in Bild 7). Die Bedingungen für eine Quasiintegration des Ladungsimpulses können damit nicht erfüllt werden. Obwohl in diesem Fall aus theoretischen Überlegungen nur ein schmales Empfindlichkeitsband bei hohen Frequenzen erwartet wird, werden bei Vor-Ort-Messungen in der Regel dennoch akzeptable Sensitivitäten festgestellt. Als Grundstörpegel werden typische Werte von 10 ... 20 pC erreicht. Unsicher ist allerdings, mit welchem Fehler der Grundstörpegel und insbesondere

auch die „scheinbaren Ladungen“ einer Teilentladung im Endverschluss gemessen werden.

Um diesen Fragen nachzugehen wurden Untersuchungen im Labor (Abschnitt 2) und vor Ort (Abschnitt 3) durchgeführt. Ausgehend von Messungen am montierten Kabelendverschluss und Vergleichen mit Computersimulationen wurde die Messabweichung von Teilentladungen im Innern des Endverschlusses bestimmt. Im Abschnitt 3 wird auf einen der Testreihen an einer 275-kV-Kabelstrecke näher eingegangen.

2 Messungen an einem Hochfrequenzmodell eines Kabelendverschlusses

Um die Parameter des Ersatzschaltbilds eines Kabelendverschlusses zu studieren, wurde ein Tischmodell eines Kabelendverschlusses in etwa 3x verkleinertem Massstab aufgebaut. Da nur die Hochfrequenzeigenschaften entscheidend waren, konnte auf die Verwendung realistischer Isolationsmaterialien verzichtet werden. Für das Modell wurden die Streuinduktivitäten und Streukapazitäten aus Metallplatten und Rohren nachgebildet. Bild 3 zeigt schematisch den Laborversuchsaufbau und Bild 4 eine Fotografie davon. Dargestellt sind die Einspeisung eines TE-Kalibratorimpulses sowie die Messung des Eingangs- und Ausgangssignals.

An diesem Modell konnten mit RLC-Messbrücken die Kapazitäten und Induktivitäten bestimmt und auch Impulsverläufe und Frequenzgangmessungen durchgeführt werden. Bei allen Versuchen wurden sowohl der Spannungsverlauf am Kalibrator mit einer Differenzialsonde sowie das Ausgangssignal am Ort der TE-Messimpedanz oszillographisch erfasst.

Die Impulsausbreitung in der Ersatzschaltung aus den ermittelten Parametern (Bild 5) wurde mit einem Schaltungssimulationsprogramm (Micro-Cap von Spectrum Software Inc.) berechnet. Die Mess- und Berechnungsergebnisse wurden im Zeitbereich und Frequenzbereich verglichen.

Der Verlauf des Ausgangssignals am Ort der TE-Koppelimpedanz ist in Bild 6 dargestellt, wobei der oszillographisch erfasste Verlauf dem Simulationsresultat gegenübergestellt wird.

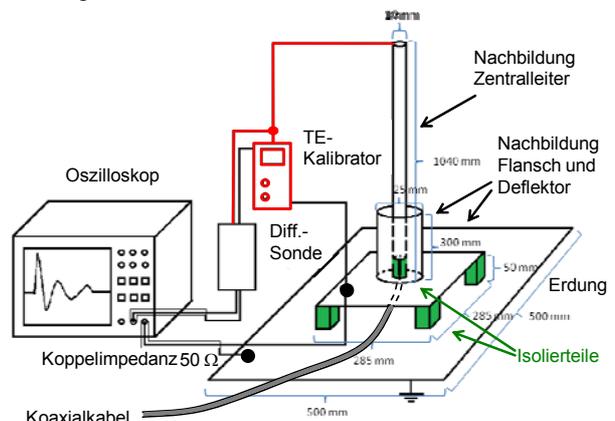


Bild 3 Skizze des Labormodells für das Studium der Modellbildung.

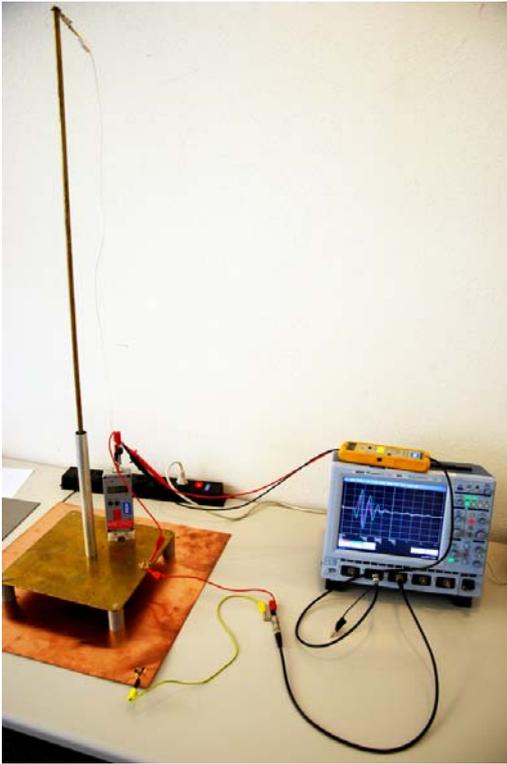


Bild 4 Fotografie des Labormodells.

Die Simulationen auf Basis der Ersatzschaltung des Labormodells mit den gemessenen Streuinduktivitäten und Kapazitäten (Bild 5) haben weitgehende Übereinstimmung mit den Messungen der Impulsverläufe ergeben (Bild 6).

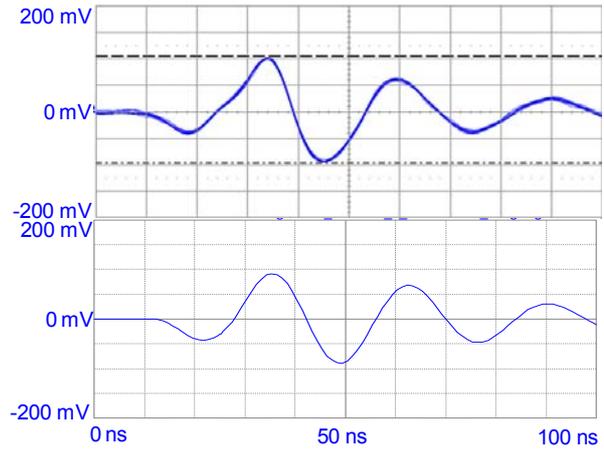


Bild 6 Ausgangssignal an der 50-Ω-Koppelimpedanz des Labormodells bei Einspeisung eines Kalibratorimpulses (siehe Bild 3). Vergleich des gemessenen mit dem digital simulierten Verlauf.

3 Untersuchungen an einem 275-kV-Kabelendverschluss

Feldmessungen im Rahmen der beschriebenen Untersuchungen wurden unter anderem an einer 275-kV-Kabelstrecke durchgeführt, an der im Jahr 2013 eine Hochspannungsabnahmeprüfung ausgeführt wurde. Dabei wurden die Messempfindlichkeit und die Kalibrierbarkeit der Teilentladungsmessung an einem Endverschluss ohne Koppelkondensator untersucht. Bild 7 zeigt den Endverschluss mit angeschlossenem Ankoppelvierpol zwischen Kabelschirm (Endverschluss-Bodenflasch) und dem geerdeten Podest.

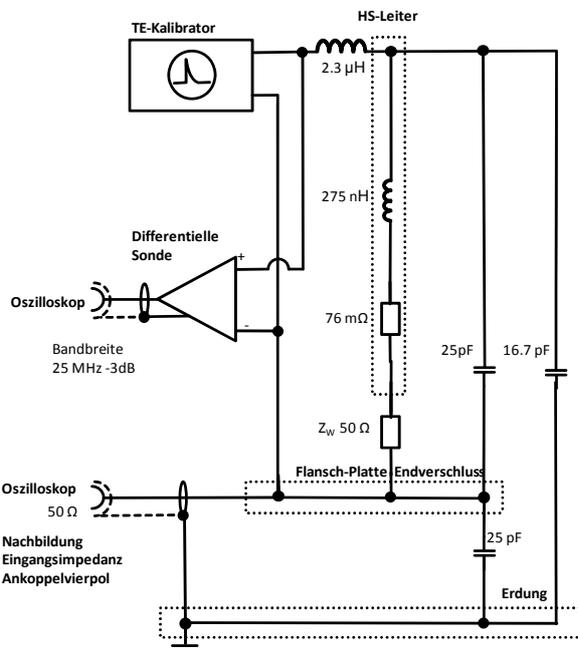


Bild 5 Einfaches Ersatzschaltbild mit angeschlossenem TE-Kalibrator für die Versuche am Hochfrequenzmodell im Labor.



Bild 7 Kabelendverschluss mit Ankoppelvierpol zwischen Kabelschirm und Erdung.

An den montierten Hochspannungskabelendverschlüssen waren keine Messungen der Streukapazitäten möglich.

schlusses nur eine geringe Empfindlichkeit erreicht wird. Die Pegel-Bewertung von inneren Teilentladungen aufgrund der Kalibration ist in diesem Bereich aber korrekt.

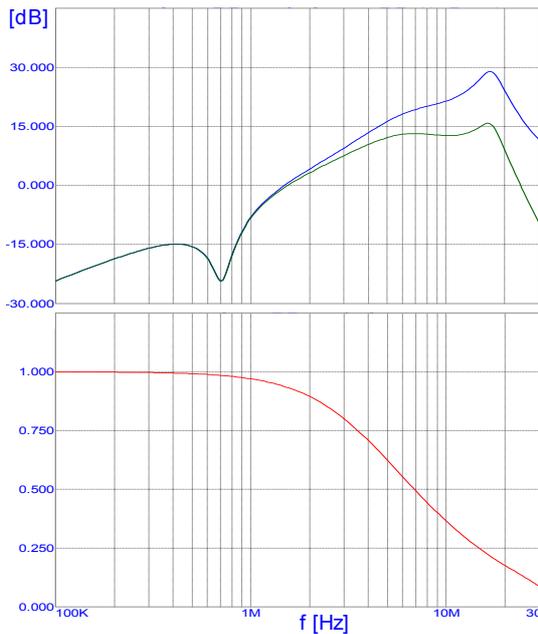


Bild 11 Simulationen der Transferfunktion (Ausgangsspannung zu TE-Strom $U_A/I_Q/1\Omega$, (siehe Gleichung 1) Grafik oben:

Blaue Spur: Transferfunktion Ausgangsspannung zu Kalibratorstrom

Grüne Spur: Transferfunktion Ausgangsspannung zu TE-Strom am Deflektor

Grafik unten:

rote Spur: Verhältnis der Ausgangsspannungen für TE-Strom und Kalibratorstrom. Dieses Verhältnis entspricht dem Messfehler in der „Scheinbaren Ladung“, wenn der Endverschluss ohne Koppelkondensator wie üblich kalibriert wurde.

Als wichtiger Parameter, der die Streureaktanzen und –kapazitäten bestimmt, wurde die Länge bzw. die Nennspannung des Kabelendverschlusses variiert (Tabelle 1).

l [m]	ΣL [μH]	Innenleiter-Segment [μH]	L_1 [μH]	C_{31} [pF]	C_{32} [pF]	C_{33} [pF]
1.5	3.43	0.55	1.78	8.89	8.88	8.87
2	4.38	0.73	2.18	10.68	10.66	10.64
2.5	5.34	0.92	2.59	12.40	12.37	12.34
3	6.29	1.10	2.99	14.07	14.02	13.99
3.5	7.24	1.28	3.39	15.69	15.62	15.58
4	8.20	1.47	3.80	17.28	17.19	17.14
4.5	9.15	1.65	4.20	18.84	18.73	18.66
5	10.10	1.83	4.60	20.37	20.23	20.16

Tabelle 1 Berechnete Streuinduktivitäten und Streukapazitäten für verschiedene Endverschlusslängen (erste Spalte), welche für die numerische Simulation benötigt wurden. Gelb markiert ist der Referenzendverschluss gemäß Ersatzschaltung Bild 8.

Bild 12 zeigt das Resultat dieser Parameterstudie. Wie erwartet sinkt die Frequenz, bei der noch bei einem festgelegten Fehler gemessen werden kann mit zunehmender Länge des Kabelendverschlusses ab.

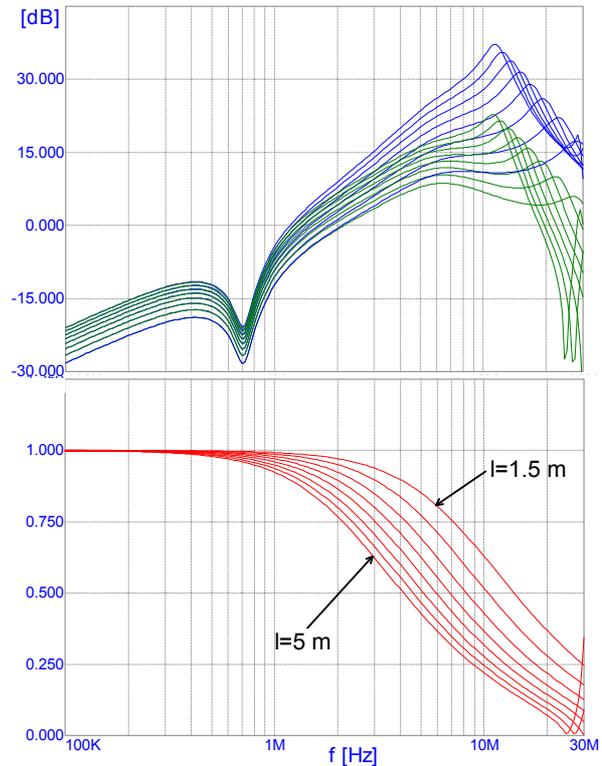


Bild 12 Simulationen der Transferfunktion: Ausgangsspannung zu TE-Strom $U_A/I_Q/1\Omega$. Die Endverschlusslänge wurde entsprechend Tabelle 1 von 1.5 m bis 5 m variiert.

Grafik oben:

Blaue Spur: Transferfunktionen Ausgangsspannung zu Kalibratorstrom

Grüne Spur: Transferfunktion Ausgangsspannung zu TE-Strom am Deflektor

Grafik unten:

rote Spur: Verhältnis der Ausgangsspannungen für TE-Strom und Kalibratorstrom. Dieses Verhältnis entspricht dem Messfehler in der „Scheinbaren Ladung“, wenn der Endverschluss ohne Koppelkondensator kalibriert wurde.

4 Schlussfolgerung

Für den Parameterbereich der untersuchten Kabelendverschlüsse bis zu einer Länge von 4 m konnte ein maximaler Messfehler von 50% ermittelt werden, wenn der Bandpassfilter für die TE-Messung im Frequenzbereich von 1 MHz bis 5 MHz eingestellt wird und die Kalibratorkapazität 10 pF nicht übersteigt. Dies bedeutet, dass die gemessene Ladung eines TE-Impulses zwischen Innenleiter und Deflektor um maximal 50% von der Messung einer gleichen Ladung abweicht, die durch einen aussen angeschlossenen Kalibrator erzeugt wird.

Zum Vergleich: Wenn mit einem Ankoppelkondensator einer Kapazität von 1 nF breitbandig gemessen wird, so

liegt der Messfehler in der scheinbaren Ladung einer TE am Deflektor unter 25 %, wenn die Verbindungsstange zwischen Kondensator und Endverschluss die Länge von 6 m nicht überschreitet. Die entsprechenden Untersuchungen sind aus Platzgründen hier nicht wiedergegeben.

5 Anmerkung

Die Messungen und Simulationen für diese Arbeit wurden von zwei Praktikanten durchgeführt, die über die internationale Studentenaustauschorganisation IAESTE vermittelt worden waren: Im Sommer 2012 Herr Ossi Bergius aus Finnland und im Sommer 2013 Herr Szilárd Lipták aus Ungarn. Die Autoren bedanken sich für die wertvolle Arbeit der beiden sehr versierten und motivierten Studenten.

6 Literatur

- [1] "High-voltage test techniques - Partial discharge measurements." IEC Publication 60270, 2000.
- [2] IEC Publ. 60885-2 "Electrical test methods for electric cables, Part 3: Partial discharge test", 1. ed. 1988
- [3] IEC Publ. 60885-3 "Electrical test methods for electric cables, Part 3: Test methods for partial discharge measurements on lengths of extruded power cable", 1. ed. 1988
- [4] Bas Gökçen „Electric field analysis in stress controlled high voltage cables“; MSc thesis submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Electrical and Electronics Engineering, January 2005
- [5] Lemke E., Strehl T., Weissenberg W.; Herron J.; „Practical Experiences in on-site PD Diagnosis Tests of HV Power Cable Accessories in Service“ IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation; Ontario; June 11-14th 2006
- [6] Gulski, E.; Lemke E., Gamlin M., Gockenbach E., Hauschild W., Pultrum E.; "Experiences in partial discharge detection of distribution power cable systems"; Electra Vol. 208 (2003), pp 35-43.
- [7] Schmale M., Puffer R., Rethmeier R., „Teilentladungsmessung zur Zustandserfassung an Endverschlüssen eines 220-kV Erdkabels“; ETG VDE Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“; Fulda; 15./16. November 2012