

# Untersuchungen zum praktischen Einfluss der TE-Wiederholrate auf die Scheinbare Ladung bei Teilentladungsmessungen nach IEC 60270

## About the Influence of the PD Repetition Rate on the Apparent Charge Value

Prof. K. Rethmeier, FH-Kiel, kay.rethmeier@fh-kiel.de

Dr. A. Kraetge, R. Hummel, Omicron electronics, Klaus, Austria

### Kurzfassung

Nach IEC 60270 muss die Scheinbare Ladung über eine wiederholratenabhängige Gewichtungsfunktion (Tabelle 1 der Norm IEC 60270:2000) korrigiert bzw. reduziert werden. Hierbei berücksichtigt die Norm, dass einzelne Störpulse nur abgeschwächt in das Messergebnis eingehen sollen, minimal mit bis hinunter auf lediglich 35 % der real gemessenen Ladung. Erst TE-Impulse, die einmal oder mehrfach innerhalb von 20 ms auftreten, werden mit der real gemessenen Scheinbaren Ladung wiedergegeben und gehen somit zu 100 % in das Messergebnis ein.

Diese Gewichtungsfunktion wurde in der Norm scheinbar mit Hinblick auf eine starre Prüffrequenz von 50 Hz spezifiziert, da die TE-Wiederholrate in Absolutzeit, passend zur Netzfrequenz von 50 Hz, angegeben ist (z. B. „50 Pulse pro Sekunde“, „100 Pulse pro Sekunde“ anstatt von „1 Puls pro Periode“, bzw. „2 Pulse pro Periode“). In vielen gerätespezifischen TE-Normen sind jedoch explizit Prüfspannungsfrequenzen in der Größenordnung Millihertz (z. B. Kabel und Statorwicklungen) bis hin zu einigen hundert Hertz (z. B. Transformatoren und Wandler, Hochspannungskabel) zugelassen. So kann es, gerade im kritischen Bereich des TE-Einsatzes mit geringer TE-Wiederholrate, vorkommen, dass eigentlich identische TE-Defekte aufgrund der gewählten Prüfspannungsfrequenz verschieden gewichtet werden (müssen). Bei TE-Pegeln im Bereich des geforderten Grenzwertes kann somit die Prüfspannungsfrequenz für das Bestehen bzw. für das Nichtbestehen einer TE-Prüfung ausschlaggebend sein, was physikalischen nicht haltbar und somit nicht anzustreben ist.

Dieser Beitrag untersucht für identische TE-Fehlstellen unter Variation der Prüffrequenz deren Einfluss auf den TE-Pegel. Ein digitales TE-Messsystem bietet dabei die Möglichkeit, die Gewichtungsfunktion auszuschalten bzw. zu modifizieren. So kann z. B. eine dynamische Anpassung der Gewichtungsfunktion auf die jeweilig detektierte Prüfspannungsfrequenz erfolgen, die trotzdem bei 50 Hz Normkonformität gewährleistet.

### Abstract

The Apparent Charge value has to be weighted in order to suppress single disturbance pulses, as to be found in table 1 of the international standard IEC 60270:2000. Anyway, also PD pulses with low repetition rate will be reduced in its displayed charge value. As this weighting function refers to the number of pulses per time instead of the number of pulses per period, it makes a difference if identical PD faults are measured at low frequencies, as 20Hz, compared to high frequencies, as 400Hz. As a consequence, a PD test can be passed or failed only by a smart selection of the test voltage frequency. By using a fully digital PD measuring system, the IEC-weighting function can be either switched off or altered to refer to the test voltage period instead of the absolute measuring time. For 50Hz, this dynamic weighting is fully compliant to the existing weighting function.

## 1 Einführung

In der Regel bewirken Teilentladungen (TE) eine Materialerosion im Isolierstoff und damit eine Verringerung der Restlebensdauer der gesamten Hochspannungskomponente. Bei Betriebsspannung sollten daher grundsätzlich keine TE vorhanden sein. Durch Fehlerzustände im Netz, oder auch durch reguläre Schalthandlungen, kann es zu temporären Überspannungen kommen, die zur Zündung von TE führen können. Einmal gezündet, können TE auch nach Beseitigung des Fehlerzustandes bei Betriebsspannung weiter bestehen bleiben, da sich, physikalisch bedingt, die TE-Einsatzspannung PDIV und die TE-Aussetzspannung PDEV unterscheiden können. Die Aussetzspannung von bekannten TE-Quellen muss damit

deutlich oberhalb der Betriebsspannung, unter Berücksichtigung des zulässigen Spannungsbandes, liegen.

Zum Nachweis der TE-Freiheit von Neukomponenten werden im Herstellerwerk in der Regel TE-Messungen nach der internationalen Norm IEC 60270 durchgeführt. Zur Berücksichtigung des oben beschriebenen Verhaltens schreiben die entsprechenden ergänzenden Normen der einzelnen speziellen Betriebsmittel oft einen Prüfspannungsverlauf mit einer deutlichen Vorbelastung (z.B. 1,7-fache Prüfspannungshöhe) vor der eigentlichen TE-Messung vor, um potenzielle TE-Fehlstellen sicher zu zünden. Die TE-Prüfung gilt als bestanden, wenn entweder eine generelle TE-Freiheit im Rahmen der Messempfindlichkeit nachgewiesen werden kann, oder ein spezifizierter Grenzwert nicht überschritten worden ist.

## 2 Ermittlung des Ladungswertes nach IEC 60270:2000

Die hier relevante Messgröße ist die Scheinbare Ladung der TE-Impulse, nicht die zwangsläufig unbekanntene Ladung, die in der TE-Fehlstelle selbst umgesetzt wird. Diese Scheinbare Ladung ist jedoch auch nicht identisch gleich der Impulsladung der detektierten einzelnen TE-Impulse. Zum einen fasst dieser IEC-Ladungspegel eine Vielzahl von Einzelpulsen zu einem einzigen numerischen Wert zusammen, was der Trägheit eines alten analogen Messsystems mit mechanisch bewegtem Zeiger entspricht. Hier werden die höchsten wiederkehrenden Einzelwerte, die in jeder Prüfspannungsperiode auftreten, berücksichtigt. Die Aktualisierung dieses Anzeigewertes muss dabei mindestens mit einer Zeitkonstante von 440 ms erfolgen, also ca. all 11 Prüfspannungsperioden bei 50 Hz.

Zum anderen muss der ursprünglich gemessene Scheinbare Ladungswert eine vorgegebene Gewichtungsfunktion durchlaufen. Einzeln auftretenden Pulse werden dabei in ihrer darzustellenden Ladungsamplitude zum Teil erheblich reduziert. Tabelle 1 zeigt die in der Norm IEC 60270:2000 geforderte Umrechnung des minimal ( $R_{\min}$ ) bzw. maximal ( $R_{\max}$ ) anzuzeigenden Wertes für TE mit der auf die Zeit  $s$  bezogenen Wiederholrate  $N$ .

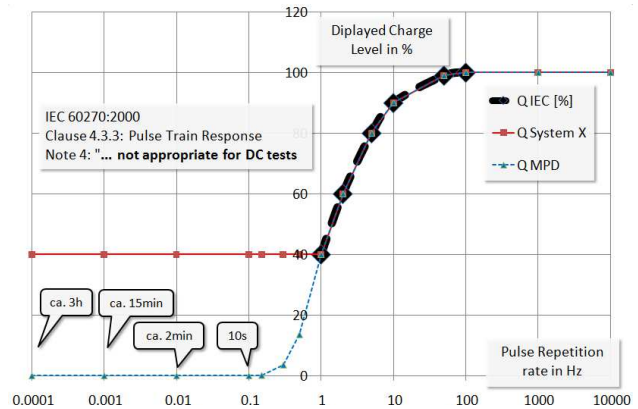
N [1/s]	1	2	5	10	50	$\geq 100$
R min [%]	35	55	76	85	94	95
R max [%]	45	65	86	95	104	105

**Tabelle 1** Gewichtungsfunktion nach Norm [1]

Neben den benannten diskreten Stützstellen ist für TE-Wiederholraten  $N$  von mehr als 100 TE pro Sekunde ein Anzeigewert von 100% (bzw. 95% bis 105%) klar definiert. Jedoch gibt die Norm keinerlei Hinweise, wie die Bereiche zwischen den Stützstellen auswertetechnisch berücksichtigt werden sollen (Stufen oder lineare Approximation), oder, besonders relevant für VLF-TE-Messungen, wie mit TE-Impulsraten von weniger als 1 pro Sekunden umgegangen werden sollen. Hier könnte es einerseits unabhängig von der wirklichen Wiederholrate bei einem Anzeigewert von 40% (35% bis 45%) belassen werden (rote waagrechte Linie in Bild 1), andererseits kann der in der Norm angedeutete Kurvenverlauf stetig und differenzierbar weitergeführt werden (blaue Kurve, Bild 1).

Bild 1 verdeutlicht dabei recht anschaulich, dass der Begriff „Scheinbare Ladung“ für VLF-Messungen einer genaueren Definition bedarf und zurzeit nicht wirklich einheitlich definiert ist.

Der Vollständigkeit halber sei der Begriff der Messbaren Ladung genannt. Hier existiert jedoch bis auf einen skalaren Umrechnungsfaktor kein wesentlicher Unterschied zur Scheinbaren Ladung.



**Bild 1** TE-Messsystemabhängige Gewichtungsfunktion

## 3 Bedeutung der Gewichtungsfunktion für die TE-Messung

Sinn und Zweck dieser Gewichtungsfunktion ist es, einzelne, in der Regel Störpulse, nicht übermäßig zu bewerten und den Ausschlag des TE-Messinstruments klein zu halten. Es wird davon ausgegangen, dass „echte“ TE in jeder Periode mindestens einmal zünden und dass es somit dann in jedem Fall zu einer 100%-Bewertung kommt. Die Gewichtungsfunktion kommt damit für „echte“ TE nicht zur Anwendung.

Betrachtet man jedoch den wichtigen Bereich des TE-Einsatzes, so ist mit intermittierenden TE zu rechnen. Die TE-Wiederholrate, betrachtet über einen längeren Zeitraum, kann damit auf Werte von weniger als dem in Tabelle 1 aufgelisteten unteren Wert von „1 pro Sekunde“ fallen. Auch bei TE-Fehlern mit einzelnen normalverteilten TE-Ladungen können die höchsten wiederkehrenden Impulsleistungen ein stochastisches Verhalten aufzeigen und so zu schwankenden TE-Ladungspegeln führen.

Berücksichtigt man jetzt den schon angesprochenen weiten zulässigen Bereich der Prüfspannungsfrequenzen (20 Hz bis 400 Hz oder gar VLF), so wird klar, dass ein und dieselbe TE-Quelle ihr zeitliches Verhalten ändern muss, wenn eine Prüfspannungsperiode verschieden lang dauert. Nach Tabelle 1 würde ein und dieselbe TE-Quelle mit verschiedenen Ladungswerten dargestellt werden müssen, je nach verwendeter Prüfspannungsfrequenz. Dies macht physikalisch keinerlei Sinn, da das Schädigungspotenzial der einzelnen TE-Impulse gleich bleibt. Zudem kann es auch für den Fall von TE im Bereich der geforderten TE-Grenzwerte zu einem Bestehen/Nicht-Bestehen in Abhängigkeit von der Prüfspannungsfrequenz kommen.

## 4 Alternative Gewichtungsfunktion

Die Lösung dieses Problems kann durch einfache Art und Weise durch eine völlige Abschaffung der Gewichtungsfunktion gefunden werden. Alle TE werden gleich bewertet, unabhängig von ihrer Wiederholrate. Die in der Norm

unter Anmerkung 1 angegebene Begründung für die Existenz der Gewichtungsfunktion, die dadurch erzielte Vergleichbarkeit verschiedener Typen von TE-Messgeräten, kann angezweifelt werden. Unter Berücksichtigung der Verbreitung von modernen computerbasierten digitalen TE-Messsystemen kann dieser Einwand generell verworfen werden. Die genaue Impulsladung jedes Einzelimpulses kann als bekannt angenommen werden.

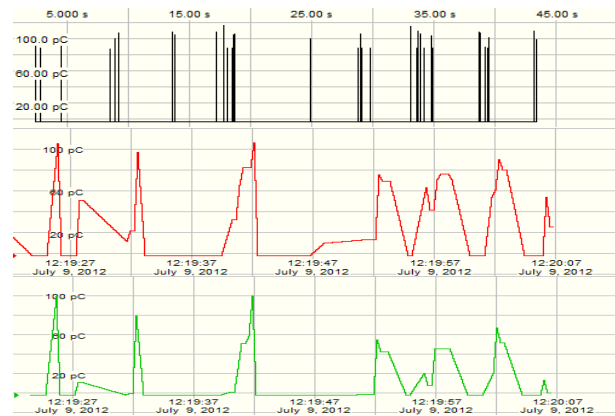
Unter genereller Beibehaltung einer Gewichtungsfunktion kann durch eine geringe Modifizierung der bestehenden Gewichtungsfunktion eine neue gefunden werden, die das beschriebene Problem ebenfalls löst. Bezugsgröße für die TE-Wiederholrate sollte dabei nicht wie bisher die Absolutzeit sein (also 100 TE pro Sekunde), sondern die Prüfspannungsperiode (2 TE pro Periode). Somit wird die Prüfspannungsfrequenz automatisch berücksichtigt bzw. kompensiert. Für eine fixe Prüfspannungsfrequenz von 50 Hz liefern beide Gewichtungsfunktionen identische Ergebnisse, was eine Kompatibilität zur bestehenden Norm garantiert. Tabelle 2 zeigt die neue, dynamische, Gewichtungsfunktion mit lediglich modifizierter erster Zeile.

N [1/Periode]	0.02	0.04	0.1	0.2	1	>=2
R min [%]	35	55	76	85	94	95
R max [%]	45	65	86	95	104	105

**Tabelle 2** Modifizierte Gewichtungsfunktion, kompatibel zu 50 Hz

## 5 Umsetzung im TE-Messsystem

Für die Untersuchungen des Einflusses der TE-Wiederholrate auf das Messergebnis kam ein volldigitales TE-Messsystem zum Einsatz, welches TE-Impulse sowohl nach der ungewichteten Impulsladung (wie sie bei DC-TE-Messungen angezeigt werden muss), wie auch gewichtet nach gültiger Norm (bezogen auf die Zeit), aber auch modifiziert bzw. dynamisch gewichtet (bezogen auf die Perioden der Prüfspannung) messen kann. Über eine einfache Software-Checkbox kann dabei die dynamische Gewichtung (Dynamic Weighting) aktiviert und somit zwischen beiden Gewichtungsfunktionen umgeschaltet werden. Über eine Datei-Exportfunktion sind dazu die real gemessenen, also ungewichteten Impulswerte jedes einzelnen TE-Impulses zugänglich. Bild 2 zeigt exemplarisch die drei Messkurven (ungewichtet, dynamisch gewichtet, nach Norm gewichtet) für den TE-Pegel eines intermittierenden TE-Fehlers nahe der TE-Einsatzspannung, gemessen bei 16,7 Hz. Die deutlich erkennbaren Unterschiede in den Verläufen bzw. der Höhe der drei Kurven verdeutlichen das Problem.



**Bild 2** Q-Pegel-Vergleich: oben/schwarz ungewichtet; mittig/rot dynamisch gewichtet auf reale Prüfspannungsfrequenz; unten/grün gewichtet nach Norm

## 6 Auswahl der Prüfspannungsfrequenzen

Verschiedene Normen lassen aus verschiedenen Gründen unterschiedliche Prüfspannungsfrequenzen zu. Zur Erregung von Prüflingen mit magnetischem Kern (Wandler, Trafos) muss zwangsläufig eine Frequenz oberhalb der Betriebsfrequenz gewählt werden, um die Sättigung des Kerns bei Spannungen oberhalb der Nenn- oder Auslegungsspannung zu vermeiden. In der Regel sind hier Prüfspannungsfrequenzen von bis zu 400 Hz (z.B. IEC 60076-3) zulässig, ohne dass die Norm dabei eine Kompensation des zu erreichenden TE-Grenzwertes, wohl aber der Stehspannungsprüfzeit (Reduktion bei höheren Frequenzen!), vornimmt.

Wird die Prüfhochspannung nach dem Resonanzprinzip erzeugt, so können festgelegte Prüfspannungsfrequenzen von 50 Hz bzw. 60 Hz nur durch einstellbare Induktivitäten erzeugt werden. Verwendet man Drosseln mit festem Induktivitätswert, was enorme Vorteile bei Anschaffungspreis, Wartung, Betriebsverhalten usw. hat, so stellt sich in Abhängigkeit der kapazitiven Last eine feste Prüfspannungsfrequenz ein. Um die Nutzung dieser billigeren frequenzvariablen Resonanzanlagen (FTRC) zu erlauben, wurde z.B. in den „Kabelnormen“ ein Prüfspannungsfrequenzbereich von 49 Hz bis 61 Hz (IEC 60840) bzw. 20 Hz bis 300 Hz (IEC 62067) zugelassen.

Zur Reduzierung des Prüfleistungsbedarfs von kapazitiven Lasten, gerade bei Vor-Ort-Messung an Kabelanlagen, sind auch VLF-Prüfspannungen mit in der Regel 0,1 Hz geeignet (s. auch IEC 60060). In der Norm finden diese Very-Low-Frequency-Prüfspannungen bei Mittelspannungskabeln, aber auch bei Statoren von Hochspannungsmaschinen (IEC 60034-27), Berücksichtigung.

Für die durchgeführten Messreihen wurden neben den Standardfrequenzen von 50 Hz und 60 Hz auch Untersuchungen bei 0,05 Hz, 0,1 Hz (beide VLF), 16,7 Hz („Bahnstrom“), 30 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz und 400 Hz durchgeführt, um den oben angesprochenen weiten Frequenzbereich messtechnisch abzudecken.

## 7 Prüfspannungsquellen mit variabler Frequenz

Zur Erzeugung von sinusförmiger frequenzvariabler Hochspannung kam für den Frequenzbereich von 16,7 Hz bis 400 Hz ein mobiles Universal-Trafoprüfsystem zum Einsatz. Mit der optionalen Geräteerweiterung zur  $\tan \delta$ -Messung konnten so sinusförmige Prüfspannungen bis maximal  $12 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  ausgegeben werden. Für kleinere Prüfspannungsfrequenzen waren aufgrund der Kernsättigung des internen Hochspannungstrafos zum Teil nur verringerte Prüfspannungspegel möglich.

Zur Erzeugung der VLF-Prüfspannungen wurde ein mobiles Prüf- und Messsystem für Mittelspannungskabel verwendet, welches nahezu beliebig kleine Prüfspannungsfrequenzen einschließlich DC ausgeben konnte. Die Obergrenze für die Prüfspannungsfrequenz betrug hier 0,1 Hz. Da dieses Gerät anstelle eines Hochspannungstrafos gesteuerten DC-Kaskaden nutzt, bestand für diese kleinen Frequenzen kein Kernsättigungsproblem. Bild 3 zeigt beide Spannungsquellen.



Bild 3 Mobile Prüfspannungsquellen CPC/Frida

## 8 Überlegung zur Reproduzierbarkeit von Versuchsreihen

Für Vergleichsuntersuchungen ist die Frage der Reproduzierbarkeit von Messergebnissen von erheblicher Bedeutung. Diese ist für TE-Versuche nahezu nie gegeben, wie die Grafik in Bild 4 verdeutlicht. Hier wurde in vier direkt aufeinander folgenden Messreihen der TE-Pegel einer klassischen Gleitanordnung über 60 Sekunden aufgezeichnet. Sowohl die Messwerte innerhalb einer Messreihe, wie auch die Messwerte verschiedener Messreihen variieren stark und haben eine Spanne von 200 pC bis 440 pC.

Als Gründe für die starken Abweichungen sind hier stochastische Einflüsse, wie das Vorhandensein eines Startelektrons für den Entladungsprozess, wie auch die Veränderung der TE-Fehlstelle durch die TE selbst (Restladungen auf der Isolatoroberfläche, Temperatureinfluss usw.) zu nennen.

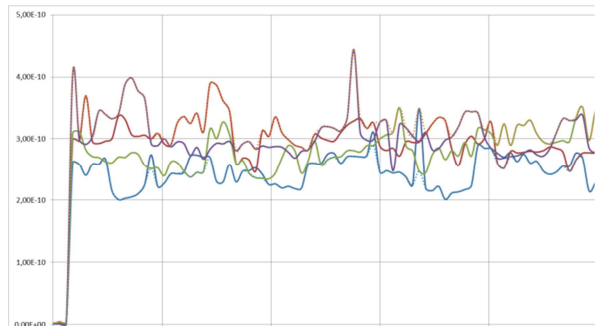


Bild 4 Schlechte Reproduzierbarkeit bei TE-Versuchen

Mit dieser Feststellung muss man folgern, dass der sinnvolle Vergleich des TE-Pegels einer definierten TE-Fehlstelle durch vielzählige Messreihen bei sequenziellem Vorgehen nicht möglich ist. Eine schrittweise Veränderung der Prüfspannungsfrequenz führt also nicht zu gesicherten Erkenntnissen über diesen Parameter.

Um auf ein und dieselbe Datenbasis zurückgreifen zu können, muss für jede TE-Fehlstelle ein Referenzdatensatz erzeugt werden, der durch die Software des TE-Messsystems mit verschiedenen simulierten Prüfspannungsfrequenzen erneut „gemessen“ werden kann. So kann gezielt durch die Variation des einen im Fokus stehenden Parameters (Prüfspannungsfrequenz) der Einfluss auf die auszugebende Impulsladung untersucht werden.

## 9 Künstliche TE-Fehlstellen

Zur Abdeckung möglichst vieler TE-Fehlerarten wurden verschiedene Modellfehlstellen erzeugt und untersucht.

### 9.1 Korona

Die Koronaentladung auf Hochspannungspotenzial in Luft gilt als Referenz-TE-Fehlstelle schlechthin. Die Phasenlage in der PRPD-Darstellung liegt bei  $270^\circ$  und der TE-Pegel ist nahezu spannungsunabhängig. In der Praxis kommen Korona-TE bei schlecht abgeschirmten Metallkanten am Prüfling oder im Messkreis selbst vor.

Die Nachbildung der Fehlstelle erfolgte mit einer Metallspitze über einer geerdeten Plattenelektrode (Bild 5).

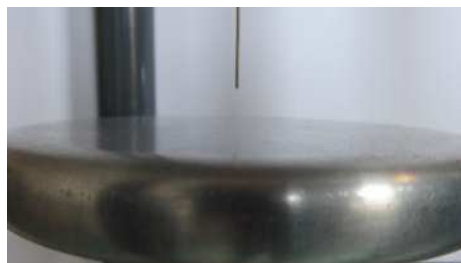
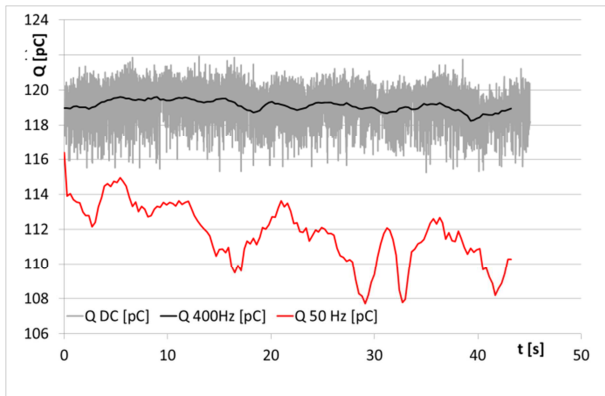


Bild 5 TE-Fehlstelle „Korona“

Bild 6 zeigt den Ladungstrend der bei einer Prüfspannungsfrequenz von 400 Hz (z.B. Transformatorprüfung) aufgenommenen Koronafehlstelle nach verschiedenen Auswertemethoden.



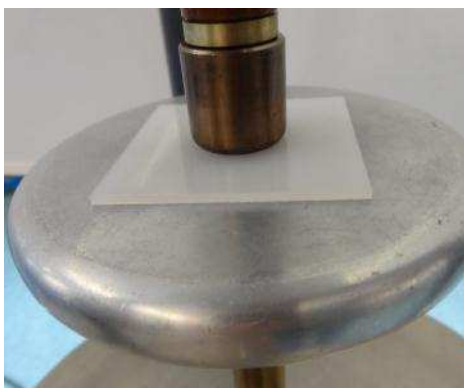


**Bild 6** Ladungstrend „Korona“, 400 Hz

Die obere graue Kurve zeigt die einzelnen TE-Impulse in der real gemessenen Ladung. Die schwarze, eingebettete Kurve zeigt den nach IEC anzugebenden Ladungsmesswert, der die Einzelimpulse recht gut mittelt und daher gut beschreibt. Die rote Kurve zeigt den simulierten Ladungstrend, wie er bei identischem TE-Fehlverhalten (gleiche Anzahl von TE pro Periode) bei einer 50 Hz-Messung statt 400 Hz-Messung aufgetreten wäre. Es ist zu erkennen, dass die TE-Ladung bei einer 50 Hz-Messung ca. 5 pC bis 15 pC niedriger ermittelt worden wäre, da die Anzahl der TE-Ereignisse pro Sekunde gefallen wäre (Bewegung nach links auf dem Kurvenast der „Pulse Train Response“). Bei Verwendung der dynamischen Gewichtungsfunktion wird dieser Effekt kompensiert; die Werte für die 50 Hz-Messung und für die 400 Hz-Messung wären identisch.

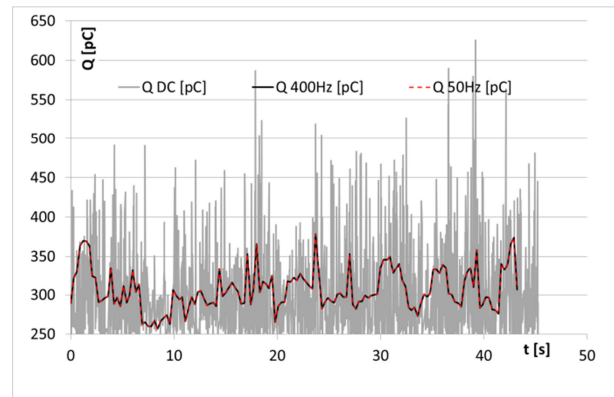
## 9.2 Gleitanordnung

Größere TE-Pegel und eine erheblich größere Anzahl von TE-Impulsen pro Periode, verteilt nahezu über die gesamte Phase der Prüfwechselfspannung, können durch Gleitanordnungen (s. Bild 7) erzeugt werden. Die tangentiale E-Feldkomponente an der Isolierstoffoberfläche sorgt dabei für einen einfachen Ladungsträgertransport bei geringer Prüfspannungshöhe.



**Bild 7** TE-Fehlstelle „Gleitpol“

Bild 8 zeigt den Ladungstrend einer Gleitanordnung. Wieder bildet der IEC-Ladungswert die realen TE-Ladungen gut ab.



**Bild 8** Ladungstrend „Gleitpol“, 400 Hz

Für eine TE-Messung bei 50 Hz mit identischem TE-Verhalten (gleiche Anzahl von TE-Impulsen pro Periode) zeigte sich keine Abweichung von der schwarzen 400 Hz-Normkurve, was durch die ohnehin hoher Anzahl von TE-Ereignissen zu begründen ist. Eine Reduktion der TE-Wiederholrate auf ein Achtel (50 Hz / 400 Hz) führt immer noch zu mehr als 100 TE-Pulsen pro Sekunde und liegt damit im Bereich des Korrekturfaktors „1“ (s. Tab. 1). Die Verwendung der dynamischen Gewichtungsfunktion bleibt hier ohne Einfluss.

## 9.3 Hohlraum-TE

Gasgefüllte Hohlräume in festen oder flüssigen Dielektrika sorgen aufgrund von Feldverdrängung (hier: Feldverdrängung in den Hohlraum hinein), mehr jedoch wegen der meist erheblich reduzierten elektrischen Festigkeit für TE. Als Modellfehlstelle wurde eine Luftblase zwischen zwei Kunststoffplatten in Öl eingebracht (s. Bild 9).



**Bild 9** TE-Fehlstelle „Hohlraum“

Aufgrund der hier festgestellten hohen TE-Rate verhielt sich das Ladungsverhalten analog zur Fehlstelle „Gleitpol“, d.h., bei einer 50 Hz-TE-Messung hätte sich derselbe Ladungswert wie bei der 400 Hz-Messung ergeben.

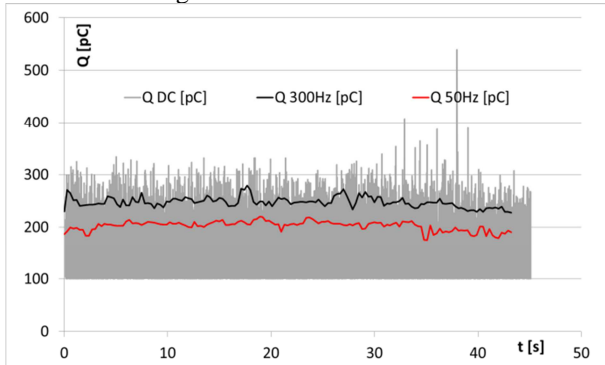
## 9.4 Beschädigte Leitschicht

Zur Nachbildung eines realen TE-Fehlers (mechanische Beschädigung des Kabelmantels beim Einziehen bis hinunter zur äußeren Leitschicht) wurde die äußere Leitschicht eines Mittelspannungskabels beschädigt (s. Bild 10).



**Bild 10** TE-Fehlstelle „Leitschicht“

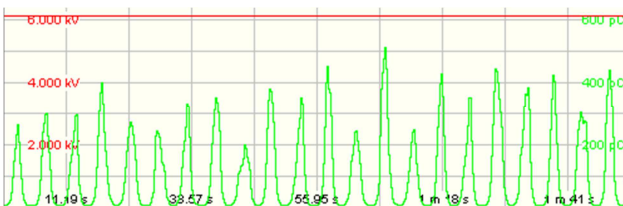
Bild 11 zeigt den TE-Ladungswert für die Leitschicht-Fehlstelle mit verschiedenen Auswertemethoden, aufgenommen bei 300 Hz Prüfspannungsfrequenz. Neben den realen Ladungswerten in grau ist wieder die Normladung in schwarz zu erkennen. Bei einer 50 Hz-TE-Messung wäre es bei identischem TE-Fehlverhalten (gleiche Anzahl von TE pro Periode) zu einem geringeren TE-Pegel gekommen (s. rote Kurve). Bei Verwendung der dynamischen Gewichtungsfunktion wird dieser Effekt kompensiert; die Werte für die 50 Hz-Messung und für die 300 Hz-Messung wären identisch.



**Bild 11** TE-Fehlstelle „Leitschicht“

## 10 VLF-Ladungstrend

In der Regel fasst der nach IEC ermittelte TE-Ladungswert die TE-Aktivität mehrerer Prüfspannungsperioden zu einem einzelnen numerischen Wert zusammen (20 ms Periodendauer im Vergleich zu einer Abtastzeit von  $\leq 440$  ms). Bei VLF-Prüfspannungen kehrt sich diese Beziehung um: Die Ermittlung des Ladungswertes muss nach Norm mehrfach pro Prüfspannungsperiode erfolgen (10 s Periodendauer zu  $\leq 440$  ms Abtastzeit). Hieraus ergibt sich zwangsläufig, dass es innerhalb einer einzelnen Periode zu starken Schwankungen bis hinunter zum Anzeigewert „Null“ kommen kann (s. Bild 12).



**Bild 12** Schwankung der Ladungsanzeige bei VLF-Messungen im Takt der beiden VLF-Halbwellen

## 11 Zusammenfassung

Die Gewichtungsfunktion nach IEC 60270:2000 soll gemessene Impulse mit geringer Wiederholrate (hauptsächlich vereinzelte Störpulse) im angezeigten IEC-Wert klein halten. Jedoch hat diese Gewichtungsfunktion zwangsläufig auch einen Einfluss auf relevante TE-Impulse, die mit geringer Wiederholrate auftreten. Dies ist immer der Fall bei intermittierender TE-Aktivität nahe der TE-Einsatzspannung, sowie bei TE mit breiter Streuung bei den Einzelimpuls Ladungen. Hier gehen nach Norm die höchsten wiederkehrenden Impulse in den anzuzeigenden Ladungswert ein, was bei einer angenommenen Normalverteilung der Ladungswerte auch wieder auf wenige große Pulse hinauslaufen kann. Da die Gewichtungsbewertung die TE-Aktivität in einem bestimmten Zeitraum bewertet, und sich nicht auf eine bestimmte Anzahl von Prüfspannungsperioden bezieht, wird sie der Tatsache nicht gerecht, dass die TE-Rate bei kleinen Prüfspannungsfrequenzen zwangsläufig geringer ist. Eine Abwertung des TE-Pegels, alleine bedingt durch „geschickte“ Wahl der Prüfspannungsfrequenz, kann nicht im Sinne der Norm sein und sollte überdacht werden. Neben der generellen Abschaffung der Impulsgewichtung (bei DC-TE-Messungen kann man auch ohne diese Gewichtung leben) kann eine Verbesserung durch den Wechsel von der zeitbasierten Bewertung hin zur periodenbasierten Bewertung erfolgen. Die in diesem Beitrag vorgestellte dynamische, sich auf die Prüfspannungsfrequenz beziehende Gewichtung kann dies leisten und sorgt für eine einheitliche TE-Bewertung über das gesamte gängige Prüffrequenzspektrum. Für die Betriebsfrequenz von 50 Hz ist die dynamische Gewichtung voll konform zu der jetzt gültigen Normgewichtung, so dass es dort zu keinerlei Unterschieden zwischen historischen und zukünftigen Messungen kommen kann.

Für TE-Messungen mit VLF-Prüfspannung ist die Scheinbare Ladung nach IEC nur bedingt anwendbar. Hier müsste der Ladungswert über mehrere Perioden (in Anlehnung an 50 Hz als Referenz über ca. 22 Perioden, also knapp 4 Minuten) ermittelt bzw. geglättet werden, was derzeit in den Normen nicht abgebildet ist.

## 12 Danksagung

Ein spezieller Dank gilt den Herren Becker, Naumann, Sievers und Wedemeyer für die gewissenhafte Durchführung der einzelnen Messungen im Rahmen ihrer studentischen Projektarbeit im Studienschwerpunkt Hochspannungstechnik an der Fachhochschule Kiel.

## 13 Literatur

- [1] IEC 60270:2000 VDE 0434:2001-08: “High-voltage test techniques - Partial discharge measurements”, Genf, 2000