

Unterdrückung sinusförmiger Störgrößen mit einem adaptiven Filterverfahren

G. König, Universität Stuttgart

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik

Einleitung

Die Teilentladungsmessung (TE-Messung) stellt heute in der Hochspannungstechnik das wichtigste Meßverfahren dar, um den Zustand einer Isolation oder eines Betriebsmittels beurteilen zu können. Normalerweise werden solche Messungen beim Hersteller in abgeschirmten Labors durchgeführt, um bei einer ausreichenden Meßempfindlichkeit eine genügende Unterdrückung externer Störungen zu erreichen. Immer öfter wird gewünscht, Teilentladungsmessungen auch Vor-Ort durchführen zu können, um z.B. die Montage einer Schaltanlage oder das Alterungsverhalten eines Betriebsmittels beurteilen zu können.

Für diesen Einsatzfall müssen geeignete Verfahren entwickelt werden, die mit den unterschiedlichen Störern fertig werden. Während man gegen impulsförmige Störungen, z.B. von thyristorgesteuerten Werkzeugmaschinen, eine Brückenschaltung oder eine Diskriminatorenmethode einsetzen kann, ist man gegenüber mehreren periodischen Störungen, z.B. von Rundfunksendern, ziemlich machtlos.

Der Trend hin zu digitaler Meßtechnik ermöglicht es nun auch für diese Messungen, Methoden, die aus der digitalen Signalverarbeitung bekannt sind, gewinnbringend einzusetzen. Im Folgenden wird nach einer allgemeinen Einführung in Filter für Teilentladungsmeßgeräte ein adaptives Filterverfahren vorgestellt, das alle an einem Meßort vorhandenen periodischen Störsignale automatisch erkennt und diese Frequenzbereiche selektiv ausblendet.

1. Filter für Teilentladungsmessungen

Als Meßgröße einer Teilentladung wird die Ladung eines Stromimpulses angegeben. Dazu muß das Signal, das über den Ankoppelvierpol aus dem Hochspannungskreis ausgekoppelt wird, integriert werden. Das häufigste Verfahren dabei ist, die Bandbreite eines

Meßgerätes zu begrenzen. Man spricht dann von einer *Integration im Frequenzbereich*. Will man periodische Störungen mit diesem Integrationsprinzip unterdrücken, hat man grundsätzlich 2 Möglichkeiten.

1.1 Bandpaß-Filter

Fast alle kommerziell erhältlichen Meßgeräte haben als Integrationsfilter einen Bandpaß mit einem Durchlaßbereich von wenigen kHz. Sie sind als *schmalbandige Meßgeräte* bekannt.

Da nur ein kleiner Frequenzbereich erfaßt wird, erhält man auch nur wenig Information über eine Teilentladung. So kann mit diesem Verfahren nur der Betrag der scheinbaren Ladung, nicht jedoch die Polspolarität gemessen werden. Die Mittenfrequenz bzw. der Durchlaßbereich des Filters soll so gewählt werden, daß ein möglichst ungestörter Frequenzbereich ausgesucht wird. Eine gute Möglichkeit ist dabei, das Filter abstimbar auszuführen.



Bild 1: Übertragungsfunktion eines schmalbandigen Meßgerätes

Für Messungen an Hochspannungstransformatoren werden auch sogenannte Störspannungsmeßgeräte eingesetzt, die nach einem ähnlichen Prinzip arbeiten, aber meistens eine Anzeige in μV haben.

1.2 Bandsperre-Filter

Beträgt die Bandbreite eines Meßgerätes einige 100 kHz, spricht man von einem *breitbandigen Meßgerät*. Hierbei besteht die Möglichkeit zur Unterdrückung periodischer Störungen darin, einen Frequenzbereich durch eine zusätzliche Bandsperre auszublenden. Man behält aber die Vorteile der breitbandigen Messung (mehr Signalenergie wird erfaßt, die Polspolarität kann gemessen werden) bei. Eine Störunterdrückung ist dabei nur möglich, wenn die Sperrfrequenz des Filters genau mit der Frequenz der Störung übereinstimmt.



Bild 2: Übertragungsfunktion eines Teilentladungsmeßgerätes mit einer zusätzlichen Bandsperre

Schwierig wird es, würde sich mehr als eine periodische Störung an einem Ort negativ auf das Meßergebnis auswirken. Dann müßte für jede einzelne gestörte Frequenz eine Bandsperre eingesetzt werden, und alle Sperrfilter müßten in Reihe geschaltet werden.

2. Der neue Filterentwurf

Mit beiden Filterarten erhält man sicher dann die besten Ergebnisse, wenn man die gestörte(n) Frequenz(en) kennt. Ein idealer Filteralgorithmus muß also selbständig alle Frequenzen erkennen, die durch periodische Signale beeinflusst sind, und genau diese Frequenzbereiche ausblenden. Die Lösung dieser Aufgabe wird von einem Filterverfahren, das auf einer schnellen Fouriertransformation (FFT, Fast Fourier Transform) basiert, bewirkt.

2.1 Systemtheoretische Grundlagen

Wird im Zeitbereich für einen TE-Impuls und eine periodische Störung die gleiche Amplitude am Ausgang des Ankoppelvierpoles angenommen, so unterscheiden sich die Maxima der dazugehörigen Spektraldichtefunktionen um Größenordnungen. Die Energie eines Teilentladungsimpulses ist gleichmäßig über den ganzen Frequenzbereich verteilt, während die Energie einer periodischen Schwingung nur um ihre Frequenz konzentriert ist und dabei eine große Amplitude aufweist. Dieses Merkmal stellt das Kriterium zur Unterscheidung zwischen Teilentladung und Störung und zum Erkennen der gestörten Frequenzen dar.

Signal	Amplitude am Ankoppelvierpol	Maximum der Amplitude der Spektraldichtefunktion
TE-Impuls $\tau = 100 \text{ ns}$	10 mV	1 nVs
periodische Schwingung $f_s = 100 \text{ kHz}$	10 mV	1000 nVs, $\Delta T = 0,1 \text{ ms}$ 10000 nVs, $\Delta T = 1 \text{ ms}$

Bild 3: Amplitudenverhältnisse im Zeit- und im Frequenzbereich

2.2 Filteralgorithmus

Eine Echtzeitdatenverarbeitung ist wegen des hohen Rechenaufwandes nicht möglich. Es wird deshalb zunächst ein Datensatz aufgezeichnet.

Beginnend mit dem Nulldurchgang der Hochspannung wird das Signal vom Ankoppelvierpol abgetastet und für die weitere Verarbeitung zwischengespeichert. Bei einer verwendeten Abtastfrequenz von 1,6384 MHz erhält man in einem 50-Hz-Netz 32 kByte Daten pro Netzperiode. Aus numerischen Gründen muß jedoch noch eine halbe Blocklänge der FFT mehr aufgezeichnet werden.

Der aufgezeichnete Datensatz wird in kleinere Blöcke unterteilt. Ein günstiger Kompromiß zwischen benötigter Rechenzeit und spektraler Auflösung im Frequenzbereich ist eine Blocklänge von 1024 Bytes. Jeder Block wird bei der Unterteilung mit einer Fensterfunktion bewertet und dann durch eine FFT in den Frequenzbereich überführt.

Bei der Kalibrierung wird von allen Spektrallinien, deren Amplitude einen einstellbaren Grenzwert überschreiten, angenommen, daß sie von periodischen Störungen herrühren. Diese Linien und eventuell eine wählbare Anzahl von benachbarten Frequenzlinien werden markiert. Da die periodischen Störungen von Rundfunksendern kommen, ist das Spektrum zeitinvariant. Man hat damit alle gestörten Frequenzbereiche auf einmal erkannt.

Bei einer Messung werden die markierten Spektrallinien ausgeblendet, indem ihre Amplitude einfach auf den Wert *Null* gesetzt wird. Dies ist die eigentliche Filterung. Danach wird der Block über eine inverse Fouriertransformation wieder in den Zeitbereich zurücktransformiert und, um lineare Verhältnisse innerhalb eines Blockes zu erhalten, mit dem inversen Fenster multipliziert.

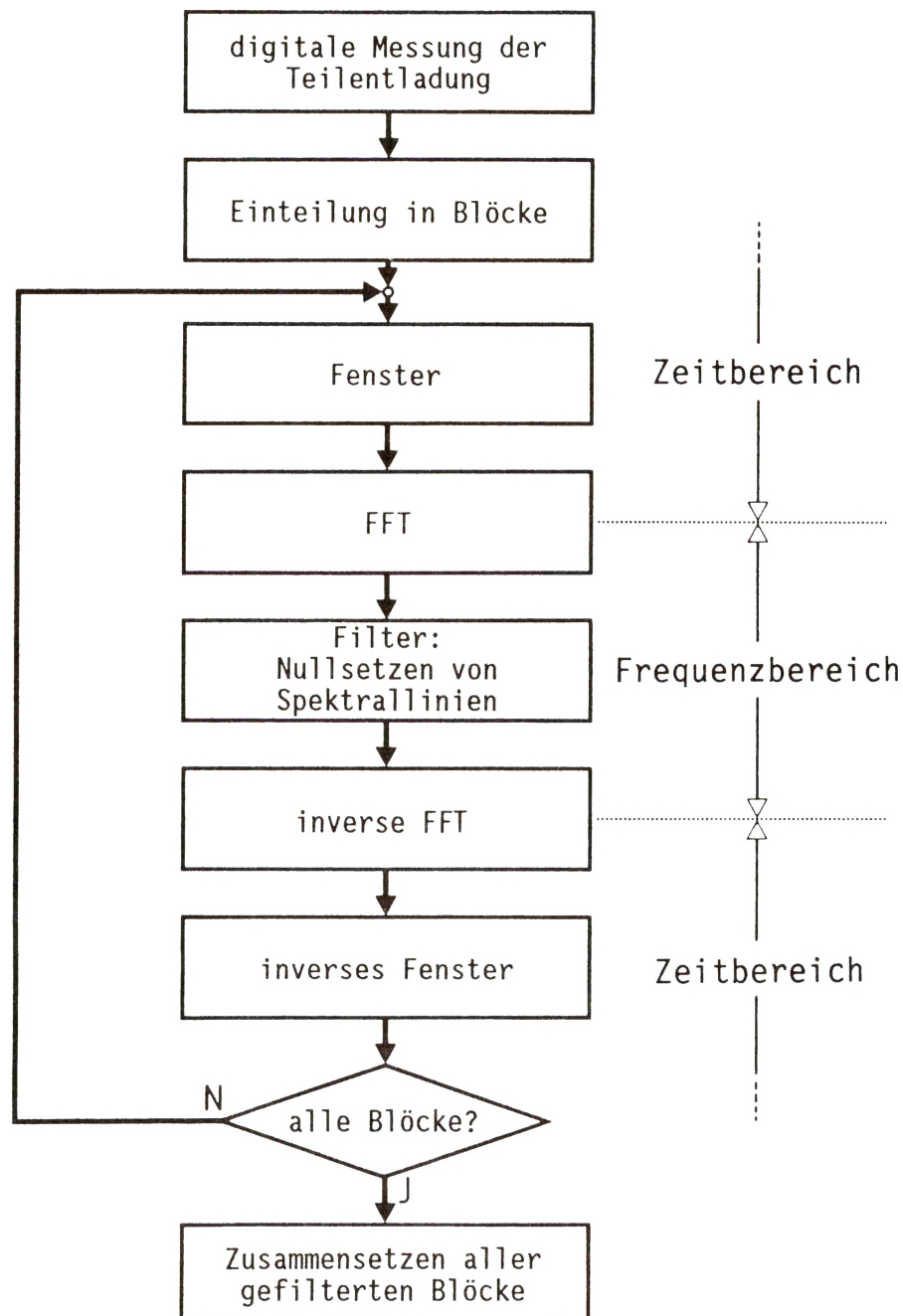


Bild 4: Programmablaufplan des Filters

Die Manipulationen im Spektrum wirken sich nach der Bewertung mit der inversen Fensterfunktion durch deutliche Verzerrungen an den Blockrändern aus. Eine einfache Möglichkeit, diese Schwierigkeit zu umgehen, besteht darin, an beiden Blockrändern jeweils 25 % der Blockgröße abzuschneiden.

Alle Blöcke durchlaufen in der oben beschriebenen Art den Filteralgorithmus und werden danach wieder zu einem einzigen Datensatz zusammengefaßt. Damit nach der Filterung keine Lücken im Datensatz entstehen, werden am Eingang der Filterung die Blöcke so eingeteilt, daß sie sich um jeweils eine halbe Blocklänge überlappen. Damit ist auch erklärt, warum insgesamt eine Netzperiode und eine halbe Blocklänge lang Daten aufgezeichnet werden müssen, um nach der Filterung die Information von genau der Länge einer Netzperiode zu erhalten. Der Anfang einer Periode wird nach der Filterung dabei von Anfang der Hochspannung, eine Periode nach dem Beginn der Aufzeichnung, bestimmt.

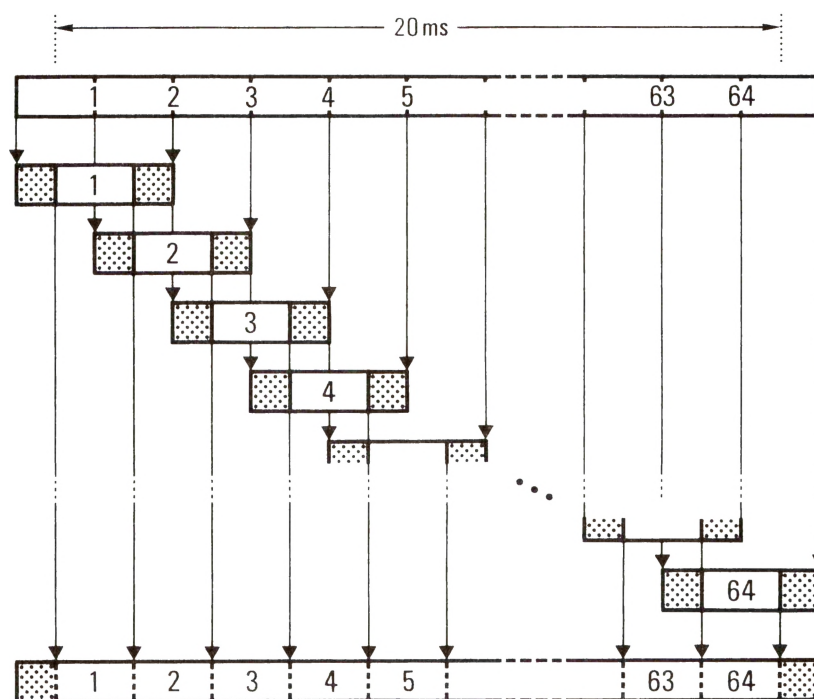


Bild 5: Blockstruktur einer Aufzeichnung

Nachdem alle Blöcke bearbeitet wurden, kann ein Teilentladungsimpuls, der ohne Filter im Rauschen ertrunken wäre, leicht erkannt werden. Der neue Störpegel setzt sich aus den Reststörungen durch die periodischen Signale und durch neue Verzerrungen, deren Ursache in der Filterung des Impulses selbst zu suchen ist, zusammen. In diesem Beispiel wird der Störpegel auf ca 10 % gegenüber dem ursprünglichen Wert reduziert.

3. Kalibrierung

Das oben beschriebene Filter wurde bei Teilentladungsmessungen unter Vor-Ort-Bedingungen in einem ungeschirmten Hochspannungslabor getestet. Der Prüfling war ein 1 nF Kondensator, der von einem 400 kV Hochspannungstransformator mit der Prüfspannung versorgt wurde. Die Teilentladungen wurden über einen Koppelkondensator von 2 nF mit dem dazugehörigen Ankoppelvierpol ausgekoppelt. Zur Kalibrierung wurde ein Impuls von 5 pC in den Aufbau eingespeist.

Alle Daten vom Ankoppelvierpol wurden mit einem 12 Bit A/D-Umsetzer digitalisiert und zwischengespeichert. Anschließend wurden sie über eine RS232 Schnittstelle an einen IBM-PC übertragen, wo dann die Filterung in einem FORTRAN-Programm ablief.

Die direkt aufgezeichneten Daten vor der Filterung sind noch einmal in Bild 6a dargestellt. Der Grundstörpegel, der sich aus der Überlagerung durch mehrere periodische Störungen von Rundfunksendern zusammensetzt, betrug bei diesem Versuch auch 5 pC, so daß der Kalibrierimpuls vor dem Filter gerade noch erkennbar war (Bild 6a).

Die Frequenzen der einzelnen Sender kann man im Bild 6b ablesen. Sie erscheinen als scharfe Nadeln im Spektrum, wobei die Amplitude der Spektraldichtefunktion für diese Darstellung auf ungefähr 100 pCs begrenzt wurde. Bild 6c zeigt den selben Datensatz nach der Filterung. Der Grenzwert wurde auf 40 pCs eingestellt. Es wurden insgesamt ca 25 % aller Spektrallinien ausgeblendet.

Das veränderte Spektrum wurde dann in den Zeitbereich zurücktransformiert. Hier erscheint nun der Kalibrierimpuls von 5 pC deutlich, während der Grundstörpegel auf unter 1 pC gedrückt wurde. Für die weiteren Messungen wurde nun die Information, welche Frequenzbereiche ausgeblendet werden müssen, konstant gehalten und in Form einer Tabelle zwischengespeichert. So bleibt ein linearer Zusammenhang zwischen den numerischen Zahlenwerten der Rechnung und der physikalischen Größe der Teilentladung erhalten.

4. Erste Ergebnisse

Wie mit jedem anderen Teilentladungsmeßgerät können auch mit diesem Filter die Ergebnisse über der Phasenlage der Hochspannung aufgetragen werden, um eine Aussage über die mögliche Ursache einer Teilentladung machen zu können.

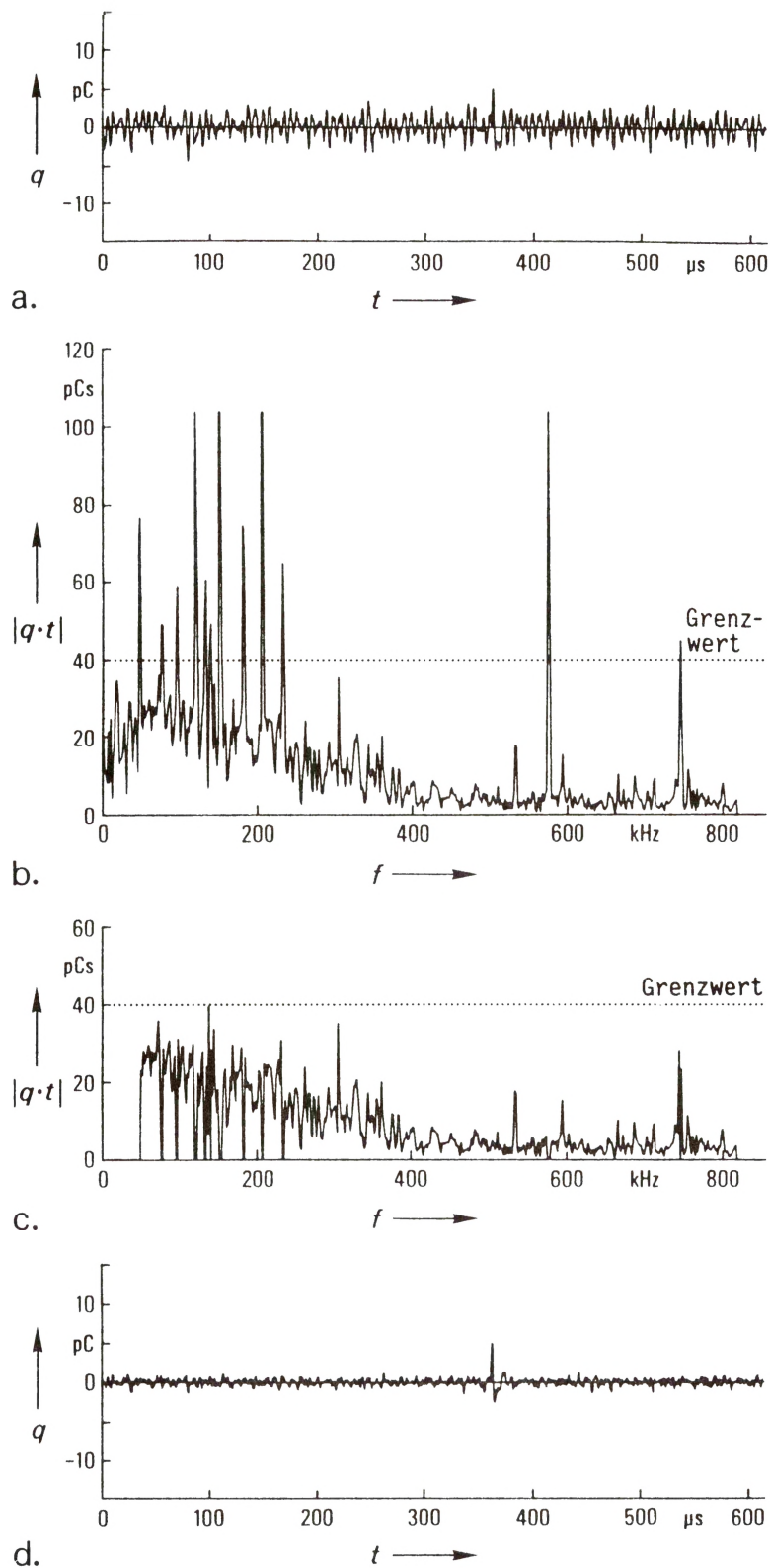


Bild 6: Beispiel für die Wirkungsweise des Filters
a. Zeitbereich vor der Filterung
b. Frequenzbereich vor der Filterung
c. Frequenzbereich nach der Filterung
d. Zeitbereich nach der Filterung

Die folgenden Bilder zeigen diese Darstellung. Dabei wird im Hintergrund jeweils der aktuelle Grundstörpegel ohne das Filter, im Vordergrund die Ergebnisse nach dem Filter gezeigt. In Bild 7 ist nochmals der Kalibrierimpuls zu sehen. Die Störunterdrückung betrug in diesem Beispiel ca. 20 dB.

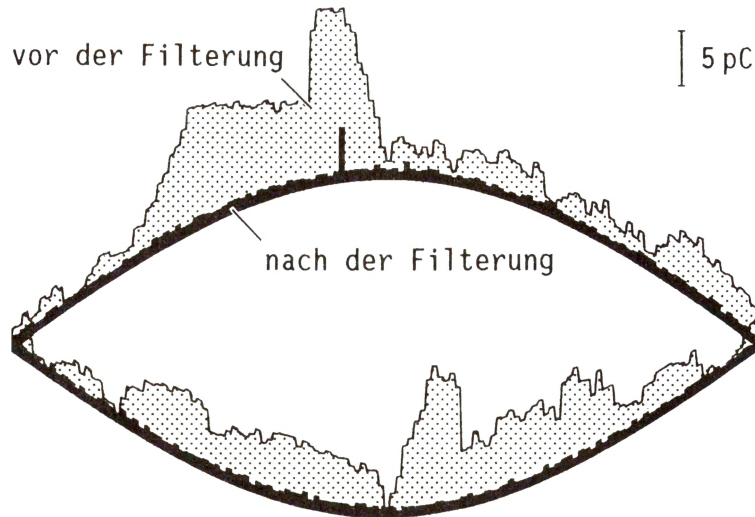


Bild 7: Grundstörpegel und Kalibrierimpuls 5 pC ohne Hochspannung

In der gleichen Anordnung wurden auch Untersuchungen mit Hochspannung durchgeführt. Bis zu einer Spannung von 35 kV war sowohl der Aufbau, als auch der Prüfling teilentladungsfrei. Der Grundstörpegel konnte durch das Filter unter 1 pC gehalten werden.

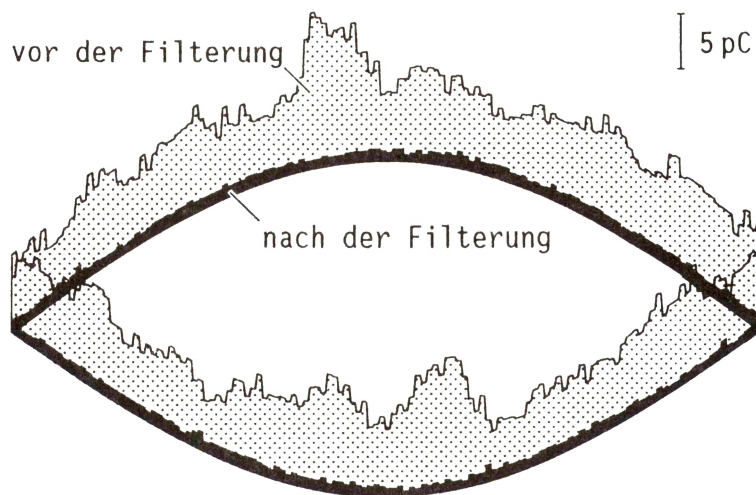


Bild 8: Grundstörpegel bei 35 kV

Die Einsatzspannung für den Prüfling lag bei 37 kV. Kurz über dieser Spannung traten Teilentladungen mit einer scheinbaren Ladung von 5 pC auf. Im Oszillogramm erscheinen die Entladungen hauptsächlich um den Scheitel der Prüfspannung, was typisch für Entladungen in Öl ist.

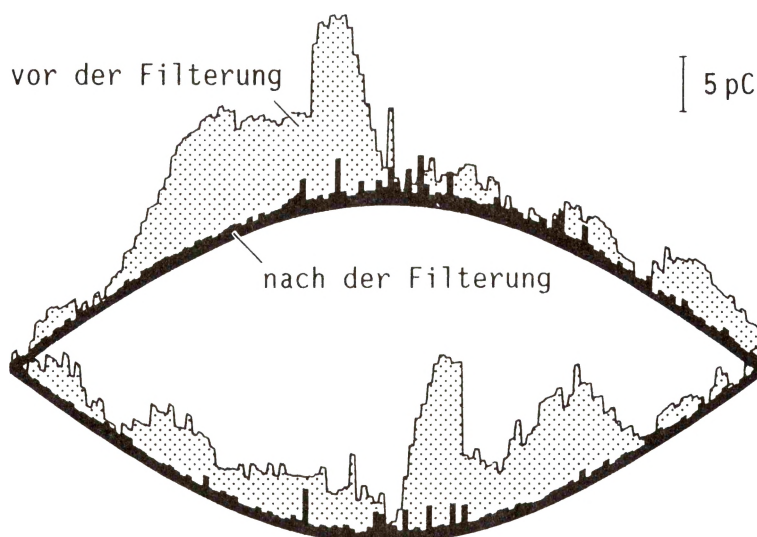


Bild 9: Teilentladungen im Prüfling bei 40 kV Hochspannung

5. Zusammenfassung

Will man Teilentladungsmessungen außerhalb geschirmter Laboratorien durchführen, treten viele Probleme durch externe Störungen auf. Dieser Beitrag beschreibt eine Möglichkeit, alle hochfrequenten periodischen Störungen, z.B. von Rundfunksendern, zu eliminieren. Zusammen mit Methoden zur Unterdrückung impulsförmiger Störungen kann man dann sehr empfindliche Vor-Ort-Messungen durchführen.

Das Filter erkennt automatisch alle gestörten Frequenzbereiche und blendet diese selektiv aus. Für die Filterung kann bei einer Rechenzeit von ca. 5 Minuten jeder IBM-PC eingesetzt werden. Bei einer schnelleren Version, die am Institut gerade aufgebaut wird, wird für die Fouriertransformation ein Signalprozessor eingesetzt. Die Rechenzeit verkürzt sich damit auf unter 500 Millisekunden, so daß von einer "Quasi-Echtzeitdatenverarbeitung" gesprochen werden kann.