

# TE-Messung und TE-Ortung bei der Vor-Ort-Prüfung von SF<sub>6</sub>-Anlagen

H.-D. Schlemper, Universität Stuttgart,  
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik

## 1. Einleitung

Gasisolierte, metallgekapselte Schaltanlagen werden nach ihrer Errichtung auf der Baustelle einer Hochspannungsprüfung unterzogen. Sie soll sicherstellen, daß nach der erfolgreichen Stückprüfung der Speditionseinheiten im Werksprüffeld keine neuen Defekte entstanden sind. Neben groben Montagefehlern, wie zum Beispiel losen Schraubverbindungen, können in der SF<sub>6</sub>-Gasisolation auch kleine Verunreinigungen aus leitfähigem Material oder Kratzer auf den Leiterelektroden zum Versagen bei Überbeanspruchungen führen. Fertigung und Montage unterliegen deshalb einer strengen Qualitätskontrolle. Während man sich bei der Stückprüfung im Werk in der Regel auf eine Wechselspannungsprüfung in Kombination mit einer empfindlichen Teilentladungsmessung verläßt, sind für die Prüfungen vor Ort in der IEC 517 /1/ zwei abweichende alternative Verfahren festgelegt:

- A) Wechselspannungsprüfung bei 80% der Nennstehwechselspannung für eine Dauer von einer Minute, optional Stoßspannungsprüfung mit je drei Stößen beider Polaritäten bei 80% der Nennstehspannungen.
- B) Wechselspannungsprüfung für mindestens fünf Minuten mit einer Spannung nicht unter  $U/\sqrt{3}$  in starr geerdeten Netzen bzw.  $U$  in Netzen mit Erdschlußkompensation. Anschließend Stoßprüfung mit je drei Stößen beider Polaritäten mit 80% der Nennstehspannungen.

Verfahren A lehnt sich an die Stückprüfung an. Mit der darin enthaltenen Wechselspannungsprüfung können bewegliche Metallspäne nachgewiesen werden. Erhebungen auf den Leiterelektroden und leitende Partikel auf den Stützisolatoren sprechen dagegen empfindlich bei der Stoßprüfung an. Bei Verfahren B wird die Wechselspannung ausschließlich zum Konditionieren der Anlage verwendet. Das Konditionieren soll Partikel in Gebiete mit geringer Feldstärke bewegen, in denen sie keine Gefahr darstellen.

Mit einer empfindlichen Teilentladungsmessung vor Ort könnten Partikel und andere potentielle Fehlerquellen mit größerer Sicherheit erkannt werden. Gleichzeitig kann durch rechtzeitiges Abschalten ein Prüfdurchschlag vermieden werden. Die Gefahr von Sekundärüberschlägen und der Reparaturaufwand für das Austauschen beschädigter Stützisolatoren

sinkt. Bei ausreichender Meßempfindlichkeit könnte - wie bei der Stückprüfung - auf die Stoßprüfung verzichtet werden. Während bei der Stückprüfung der von der Norm empfohlene Grundstörpegel von 5 pC einfach erreicht werden kann, wird die Empfindlichkeit vor Ort durch Störeinkopplungen in den großvolumigen, ungeschirmten Prüfaufbau reduziert. Die Norm sieht deshalb die Teilentladungsprüfung nur als Option vor und empfiehlt, sie nach Möglichkeit mit den gleichen Grenzwerten wie bei der Stückprüfung durchzuführen.

In den letzten Jahren sind Verfahren zur Störunterdrückung entwickelt worden, die auch bei ungeschirmten Aufbauten empfindliche Teilentladungsmessungen erlauben. Alternative Detektions- und Ortungsmethoden, allen voran die UHF-Methode und die akustische Detektion, haben sich ebenfalls als störsicher herausgestellt. Durch eine Kombination dieser Methoden ist eine sinnvolle Teilentladungsprüfung vor Ort in den meisten Fällen möglich.

Dieser Beitrag gibt zunächst einen kurzen Überblick über die Teilentladungspegel kritischer Defekte. Sie stammen aus Laborexperimenten, denen gezielt die ungünstigsten Bedingungen für die Detektion zugrunde liegen. Aus den Ergebnissen kann abgeschätzt werden, welche Empfindlichkeit für die Teilentladungsprüfung notwendig ist. Anschließend werden die erreichbaren Empfindlichkeiten bei der elektrischen Teilentladungsmessung diskutiert, und der Einsatz von Störunterdrückungsverfahren an einem Beispiel besprochen.

Die akustische Detektion und Ortung von Fehlern mit Ultraschallsensoren stellt eine wichtige Ergänzung und Alternative zur elektrischen Teilentladungsmessung dar. Ihre Empfindlichkeiten sind vergleichbar. Der zweite Teil des Beitrags stellt Methodik und Empfindlichkeit der akustischen Detektion dar und berichtet von den Erfahrungen bei Vor-Ort-Prüfungen an 123 kV-GIS-Anlagen in Kombination mit elektrischer Teilentladungsmessung.

## 2. Notwendige Empfindlichkeit der Teilentladungsmessung

Nachweisen kann man kritische Defekte dann, wenn ihr Teilentladungspegel bei der Prüfspannung den Grundstörpegel überschreitet. Die Teilentladungspegel hängen von Parametern wie Gasdruck, Position und Form der Fehlstelle ab. Eine einfache Aussage über deren Höhe ist wegen der großen Zahl der Parameter und dem Fehlen geeigneter theoretischer Modelle nicht möglich. Anhaltswerte liefern "worst-case"-Experimente. Dabei werden für eine gerade noch kritische Größe des Fehlers alle konstruktiven Parameter so variiert, daß sich der geringste Teilentladungspegel ergibt. Unterschreitet der Grundstörpegel diesen Teilentladungspegel bei entsprechender Prüfspannung, sind mit großer Wahrscheinlichkeit alle kritischen Fehler dieses Typs detektierbar. Ein solches Experiment wurde für Spitzen auf dem Hochspannungsleiter durchgeführt. Für Partikel auf Stützisolatoren ist ein ähnliches Experiment in Vorbereitung.

### 2.1 Spitzen auf dem Hochspannungsleiter

Spitzen auf dem Hochspannungsleiter können durch Bearbeitungsfehler oder mechanische Beschädigungen entstehen. Sie sind oft scharfkantig und führen wegen Koronastabilisierung bei der Wechselspannungsprüfung nicht zum Durchschlag. Gleichzeitig begrenzt die Koronastabilisierung den Teilentladungspegel über einen weiten Spannungsbereich. Die geringsten Pegel treten bei extrem scharfkantigen Spitzen auf, wenn der Gasdruck so gewählt wird, daß sich die größte Erhöhung der Wechseldurchschlagsspannung durch Koronastabilisierung ergibt.

Die Teilentladungspegel solcher Störstellen wurden experimentell ermittelt [2]. Als Störstelle wurde ein scharfkantig geschliffener Draht mit einem Durchmesser von 0,3 mm senkrecht auf der Leiterelektrode montiert. Die Durchschlagsspannung erreicht bei dieser Störstelle ihr Maximum bei einem Gasdruck von 300 kPa (Fig. 2). Die kritische Drahtlänge wurde mit Blitzstoßspannungen gemessen. Für übliche GIS-Konstruktionen (maximale Feldstärke von 150 kV/cm bis 230 kV/cm bei BIL) erfolgt ein Durchschlag bei der Blitzstoßprüfung ab einer Drahtlänge von etwa 0,7 mm bis 1 mm.

In Fig. 1 sind die Teilentladungspegel für eine Drahtlänge von 4, 2 und 1 mm dargestellt. Auf der Abszisse ist der Scheitelwert der Feldstärke am Innenleiter ohne Störstelle aufgetragen. Der Teilentladungspegel ist über einen weiten Feldstärkebereich sehr gering. Bei der kritischen Länge von 1 mm beträgt er bei Nennstehwechselspannung nur 1,8 pC, gemessen an einer 525 kV-GIS. Bei GIS für niedrigere Nennspannungen mißt man höhere Pegel, da sich die scheinbare Ladung etwa umgekehrt zum BIL der Anlage skaliert. Eine Spitze mit größerem Radius zeigt dagegen ein völlig anderes Verhalten. Durch die fehlende

Koronastabilisierung steigt der Teilentladungspegel rasch an und die Isolationsstrecke schlägt schon bei geringen Feldstärken durch.

Unter diesen ungünstigen Bedingungen ist eine Meßempfindlichkeit von 1 pC bei **Nennstehwechselspannung** notwendig, um eine kritische scharfkantige Erhebung auf dem Innenleiter zu erkennen.

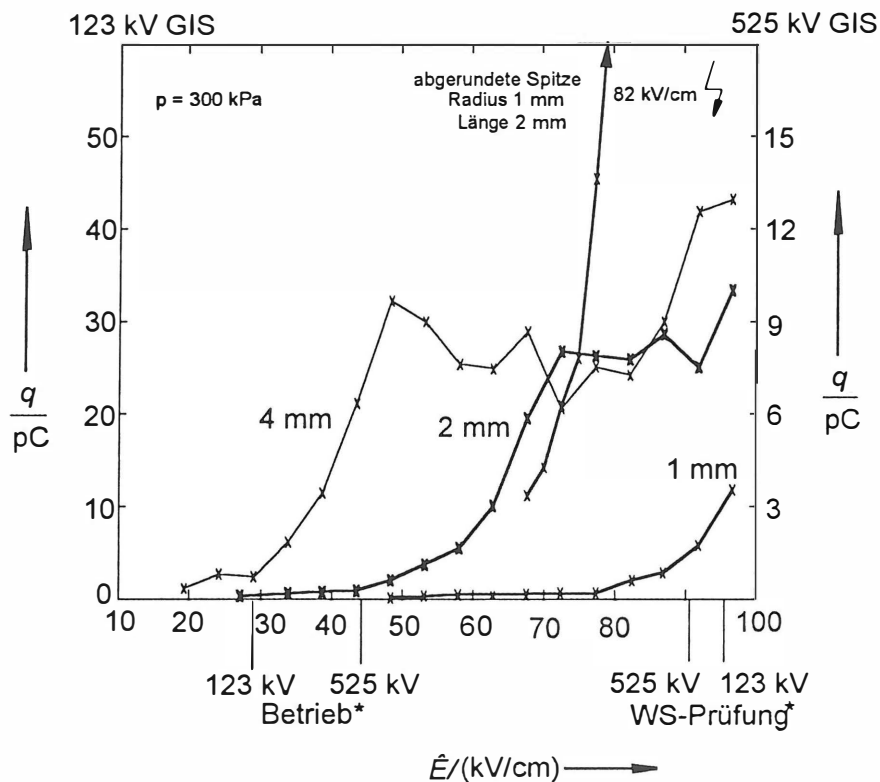


Fig. 1

Teilentladungspegel einer scharfkantigen Störstelle in Abhängigkeit von der Innenleiterfeldstärke. Der rechte Maßstab gilt für eine Messung an einer Anlage mit 525 kV Nennspannung, der linke für 123 kV Nennspannung.

\* Die Feldstärken für den Betrieb und die Wechselspannungsprüfung sind für eine koaxiale Sammelschiene angegeben, die für eine Maximalfeldstärke von 160 kV/cm bei Blitzstoßspannung dimensioniert wurde.

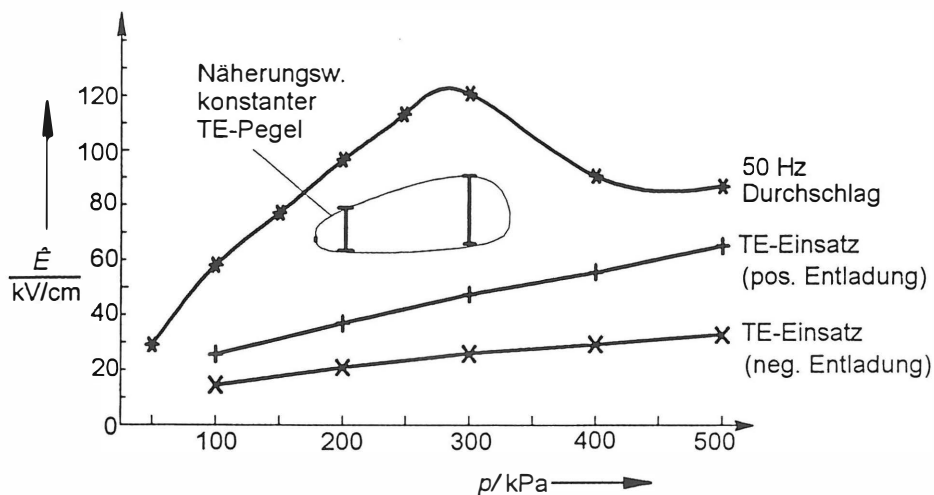


Fig. 2

Druckabhängigkeit von Einsatz- und Durchschlagsspannung

## 2.2 Bewegliche Partikel

Leitfähige Partikel heben von der Kapselungsoberfläche ab, wenn die auf das Partikel wirkende Feldkraft die Gravitationskraft übersteigt. Nähert sich ein Partikel dem Innenleiter, kann ein Durchschlag erfolgen. In diesem Fall wird die Strecke zwischen Partikel und Leiter durch eine Entladung überbrückt. Das Partikel verhält sich dann wie eine Spitze auf dem Innenleiter. Erzeugt ihre Ausrichtung und Form bei der augenblicklich anliegenden Spannung einen Leadereinsatz, schlägt die Isolationsstrecke durch.

Die kritische Größe ist durch die Nennstehwechselfeldstärke, den Gasdruck und die Form der Partikel bestimmt. Bei üblichen GIS-Konstruktionen mit einem Scheitelwert der Innenleiterfeldstärke von 70 kV/cm bis 120 kV/cm bei Nennstehwechselfeldstärke bewirken Partikel mit einer Länge von 5 mm bis 1,5 mm einen Durchschlag [3]. Durch die zufällige Bewegung des Partikels streut die Zeit bis zum Durchschlag erheblich.

Die Teilentladungspegel hängen neben den oben erwähnten Parametern auch von der Geometrie der GIS und vom Bewegungsmodus des Partikels ab. Tanzt ein Partikel auf der Kapselung und bewegt sich entlang der Kapselungsoberfläche, werden Teilentladungspegel kleiner 1 pC beobachtet. Hebt das Partikel von der Kapselung ab, mißt man Teilentladungspegel im Bereich von 10 pC (Aufreffen auf der Kapselung) bis über 1000 pC (Aufreffen auf dem Innenleiter).

Auch Partikel, die bei der Wechselfeldstärkenprüfung nicht von der Kapselung abheben, sind mit einem gewissen Risiko behaftet. Sie können - je nach Konstruktion der GIS - Isolatoroberflächen erreichen und einen Durchschlag auslösen. Vibrationen (z. B. durch Gasarbeiten oder Schalthandlungen) können die Ausrichtung der Partikel ändern und ein Abheben begünstigen. Um diese Partikel zu erfassen, müsste die Teilentladungsmessung einen Grundstörpegel kleiner als 1 pC besitzen. Für die Detektion abhebender Partikel ist eine geringere Empfindlichkeit ausreichend.

## 2.3 Partikel auf Stützeroberflächen

Partikel können sich an Stützisolatoren anlagern und durch elektrostatische Kräfte oder Fett an der Oberfläche haften. Die kritische Länge der Partikel, die gerade noch einen Durchschlag erzeugt, ist vom Gasdruck, der Isolatorbauweise und der Form und Position des Partikels abhängig. Die kleinsten kritischen Abmessungen ergeben sich, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Längliches, scharfkantiges Partikel
- Orientierung in Feldrichtung
- Enden liegen auf der Stützeroberfläche auf
- Position am Ort der maximalen Tangentialfeldstärke auf der Stützeroberfläche

Partikel auf Stützeroberflächen sind kritisch bei der Blitzstoßprüfung. Ein Richtwert für die kritische Länge bei üblichen Isolator Konstruktionen (maximalen Tangentialfeldstärke bei Blitzstoß von 100 kV/cm bis 80 kV/cm) ist 0,6 mm bis 1 mm. Aber auch Teilentladung bei der Wechselspannungsprüfung kann durch Ansammlung von Oberflächenladungen oder durch Reduzierung des Oberflächenwiderstandes nach längerer Zeit zu Durchschlägen führen. Die Mechanismen sind noch weitgehend ungeklärt.

Messungen mit kritischen Partikeln zeigen sehr geringe Teilentladungspegel. Typische Werte sind 0,5 pC bis 5 pC beim Einsatz, gemessen an einer 123 kV-GIS. Der Pegel steigt bis zum Durchschlag nur wenig an.

## 2.4 Notwendige Empfindlichkeit

In der IEC 517 ist für die Teilentladungsprüfung vor Ort ein Grenzwert von 10 pC bei einer Spannung von  $1,1 U/\sqrt{3}$  bzw.  $1,9 U/\sqrt{3}$  bei Netzen mit Erdschlußkompensation festgelegt. Der Grundstörpegel sollte dabei 5 pC nicht übersteigen. Dieser Grenzwert stammt aus einer Empfehlung für die Prüfung von Gießharzisolatoren und berücksichtigt nicht die oben angeführten Fehlertypen.

Nach den bisherigen Erkenntnissen sollte für eine maximale Empfindlichkeit der Teilentladungsprüfung der Grundstörpegel weniger als 1 pC betragen. Die Prüfung sollte bei einer hohen Prüfspannung, möglichst 80% bis 100% der Nennstehwechselspannung erfolgen. Dies bedeutet nicht, daß Teilentladungsprüfungen mit höherem Grundstörpegel oder niedrigeren Prüfspannungen keine Aussagekraft hätten. Man muß sich aber im Klaren sein, daß durch den Verlust an Empfindlichkeit gerade kritische Fehler, die durch die Wechsel- oder Stoßprüfung nicht detektiert werden, verloren gehen können.

### 3. Elektrische Teilentladungsmessung

#### 3.1 Empfindlichkeit bei konventionellen TE-Messungen

Die Empfindlichkeit der konventionellen Teilentladungsmessung ist prinzipiell durch das Rauschen des Eingangsverstärkers im Teilentladungsmeßgerät begrenzt. Moderne Meßgeräte mit rauscharmen Vorverstärkern erreichen in typischen Aufbauten ein Eingangsrauschen äquivalent zu 0,1 bis 0,5 pC. Der genaue Wert hängt vom Verhältnis der Koppelkapazität zur Kapazität des Prüfabschnitts ab. Diese Werte gelten nur, wenn ein **vollständig gekapselter Prüfaufbau** realisiert werden kann. Voraussetzung dafür ist:

- Spannungsversorgung durch einen gekapselten Prüftransformator, der an die Anlage angeflanscht ist
- Gefilterte Stromversorgung für den Prüftransformator
- Gekapselter Koppelkondensator
- Geschirmte Verbindung zum Ankoppelvierpol
- Abgetrennte Durchführungen und Kabelabgänge (Abgangstrenner geöffnet)
- Bei Abgängen ohne Abgangstrenner und Einkammerleistungsschalter: LS geöffnet, bei Mehrkammerleistungsschaltern: SS-Trenner geöffnet

Mit diesem Aufbau lassen sich bis zu Nennspannungen von 245 kV Grundstörpegel kleiner als 0,5 pC zuverlässig erreichen. Über 245 kV Nennspannung reicht die Leistung gekapselter Prüftransformatoren nicht mehr aus. Hier werden Resonanzanlagen oder Prüftransformatoren größerer Leistung über eine Freiluftdurchführung angeschlossen.

1)	Vollständig geschirmter Prüfaufbau, gekapselter Prüftransformator und Koppelkondensator.	0,1...0.5 pC, abhängig von dem Verhältnis von Prüflings- und Koppelkapazität.
2)	GIS mit abgeschalteten Durchführungen, gekapselter Prüftransformator und Koppelkondensator	0.1...0.5 pC, wie 1)
3)	GIS mit angeschlossenen Durchführungen, gekapselter Prüftransformator und Koppelkondensator	> 20...30 pC, abhängig von den Störquellen, Verbesserung durch Störunterdrückung möglich.
4)	GIS mit externem Prüftransformator und Koppelkondensator an einer Durchführung angeschlossen.	Schlechter als 3)

Tabelle 1: Typische Grundstörpegel

Da folglich der Prüfaufbau nicht mehr vollständig geschirmt ist, begrenzen eingekoppelte Störungen die Empfindlichkeit. Das Verhältnis von Koppel- zu Anlagenkapazität ist dann unerheblich, d. h. auch eine Vergrößerung der Koppelkapazität verbessert den Grundstörpegel nicht. Die Höhe des Grundstörpegels hängt im wesentlichen von der Umgebung der Baustelle und von der Geometrie der durch den Prüfaufbau gebildeten "Antenne" ab. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Grundstörpegel bei verschiedenen Prüfaufbauten.

### 3.2 Störunterdrückungsverfahren

Schmalbandigen Störern (Rundfunksender und andere Informationsdienste) kann man mit einem durchstimmbaren schmalbandigen Teilentladungsmeßgerät ausweichen. Eine bessere Empfindlichkeit und zeitliche Auflösung der Teilentladungsimpulse erzielt man mit einem breitbandigen Meßgerät in Verbindung mit einer Multibandsperre. Eine Multibandsperre kann gleichzeitig mehrere gestörte Frequenzabschnitte unterdrücken. An der Universität Stuttgart wurde ein solches Gerät mit dem Namen "Adaptives Digitalfilter" oder auch ADF entwickelt [4/ 5/]. Es analysiert selbstständig das Spektrum des Störsignals und bestimmt einen optimalen Filterfrequenzgang zur Unterdrückung der dominanten schmalbandigen Störer. Während der Messung wird das Meßsignal kontinuierlich mit einem Digitalfilter verarbeitet. Mit dem ADF läßt sich bei einem Störspektrum mit drei bis vier dominanten Rundfunkstörern der Grundstörpegel um etwa 20 dB reduzieren.

Das ADF wurde mit mehreren exemplarischen Prüfaufbauten erprobt (Tabelle 2). Mit externem Koppelkondensator und Speisung durch einen externen Prüftransformator ergab sich im ungeschirmten Hochspannungslabor der Universität Stuttgart ein Grundstörpegel von 60 pC (Prüfaufbau (a)). Verkleinert man die aufgespannte Fläche, sinkt der Grundstörpegel, wegen der geringeren effektiven Höhe der aufgespannten Rahmenantenne (Prüfaufbau (b)). Das ADF konnte in beiden Fällen den Grundstörpegel auf Werte unter 5 pC reduzieren.

Steht ein interner Koppelkondensator zur Verfügung (z. B. der Steuerkondensator eines Leistungsschalters), kann man die externe Speisung durch ein Tiefpaßfilter im Hochspannungskreis abblocken. Der Grundstörpegel reduziert sich auf etwa denselben Wert, der mit einem gekapselten Prüfkreis mit angeschlossener Durchführung erreichbar ist (vergleiche Prüfaufbau (c) und (d)). Hier erzielte das ADF Grundstörpegel kleiner 2 pC. Ein gekapselter Prüfaufbau (e) erreichte einen Grundstörpegel von 0,4 pC. Da er durch das breitbandige Rauschen des Teilentladungsmeßgerätes bestimmt ist, kann ihn das ADF nicht weiter reduzieren.

Für die Praxis sind vor allem die Prüfaufbauten (a) und (c) interessant (Fig. 3/4). Mit ihnen können bei Speisung über eine Freiluftdurchführung und einem entsprechenden Störspek-



trum Grundstörpegel kleiner als 5 pC erreicht werden. Voraussetzung ist allerdings ein teilentladungsfreier Freiluftaufbau und eine teilentladungsfreie Prüfspannungsquelle.

Neben den schmalbandigen, sinusförmigen Störern können auch stochastisch verteilte impulsförmige Störungen in den Prüfkreis einkoppeln. Ein Beispiel ist die Korona einer benachbarten Freileitung. Auch für diese Störsignale wird intensiv an Unterdrückungsverfahren gearbeitet /5/.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß mit den heute verfügbaren Techniken eine empfindliche Teilentladungsprüfung vor Ort bis zu Nennspannungen von 245 kV zuverlässig durchführbar ist. Bei externer Einspeisung kann man meist durch die Unterdrückung sinusförmiger Störer einen akzeptablen Grundstörpegel kleiner 5 pC erreichen.

Prüfaufbau	Grundstörpegel	Grundstörpegel mit ADF	Verhältnis
(a) Externer Koppelkondensator, externer Prüftransformator Schleifenfläche 40 m <sup>2</sup> (Fig. 3)	60 pC	4.0 pC	15
(b) Externer Koppelkondensator, externer Prüftransformator, Schleifenfläche 22 m <sup>2</sup>	35 pC	4.0 pC	9
(c) Interner Koppelkondensator, externer Prüftransformator, Schleife 22 m <sup>2</sup> mit Hochspannungsfilter (Fig. 4)	18 pC	1.6 pC	11
(d) Interner Koppelkondensator, gekapselter Prüftransformator, Durchführung angeschlossen	18 pC	1.7 pC	10
(e) Interner Koppelkondensator, gekapselter Prüfaufbau, Durchführung abgetrennt	0.4 pC	0.3 pC	1

**Tabelle 2:** Grundstörpegel mit und ohne adaptivem Digitalfilter (ADF), gemessen an typischen Prüfaufbauten im ungeschirmten Hochspannungslabor der Universität Stuttgart

Fig. 3

Grundstörpegel mit  
externem Koppelkon-  
densator und exter-  
nem Prüftransforma-  
tor entsprechend  
Prüfaufbau (a) in  
Tabelle 2

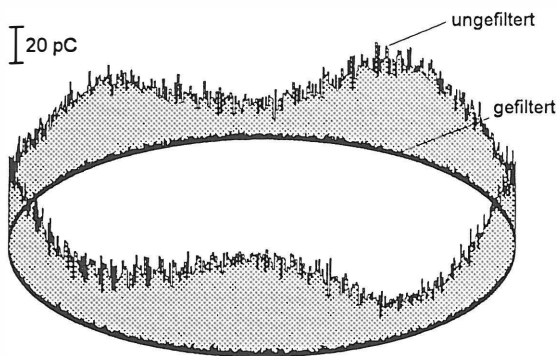
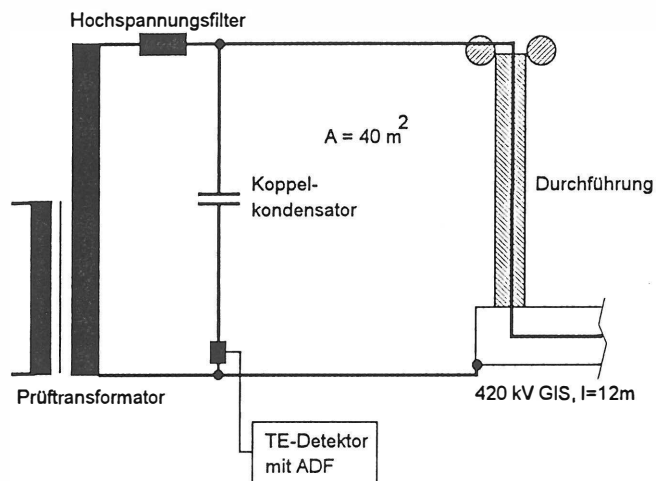
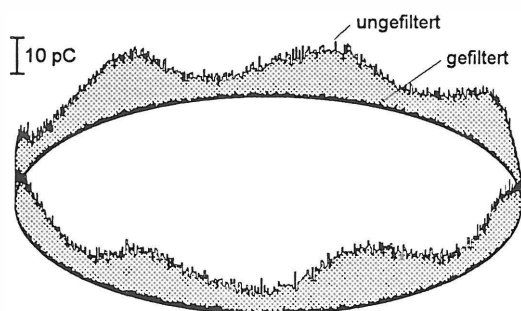
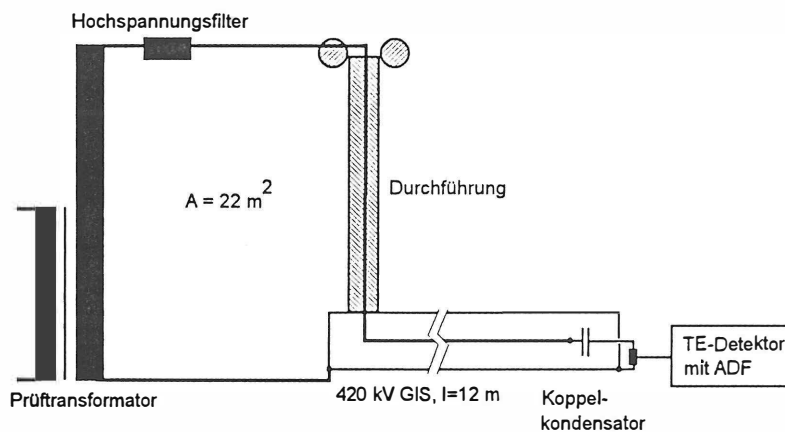


Fig. 4

Grundstörpegel mit  
internem Koppelkon-  
densator und exter-  
nem Prüftransforma-  
tor entsprechend  
Prüfaufbau (c) in  
Tabelle 2



## 4. Akustische Teilentladungsdetektion

Messungen mit Körperschallsensoren werden seit mehr als dreißig Jahren bei der Materialprüfung intensiv genutzt. Dabei wird das Entstehen von Rissen und anderen Gefügeveränderungen in mechanisch belasteten Prüflingen erfaßt und geortet. Aber auch elektrische Entladungen in Hochspannungsapparaten lassen sich mit Körperschallsensoren nachweisen, wie Harrold 1979 /6/ beschrieb. Verschiedene Forschergruppen sammelten seitdem Erfahrungen mit der Prüfung von GIS-Anlagen. Bei den ersten Messungen im Hörbereich stellte man fest, daß Umgebungsgeräusche oft die Empfindlichkeit beeinträchtigen. Der Einsatz von Ultraschallsensoren eliminierte diese Störquelle weitgehend und ermöglichte empfindliche Messungen unter vor-Ort-Bedingungen. Die heute verfügbaren Meßgeräte besitzen eine sehr gute Empfindlichkeit für bewegliche Partikel und Entladungen an Spitzen auf den Leiteroberflächen. /7/ /8/. In Schweden wird die Methode für regelmäßige Kontrollen der installierten Anlagen eingesetzt /9/.

Allerdings ist die Interpretation der Meßsignale - ähnlich der Interpretation von Phasenbildern bei der elektrischen Teilentladungsmessung - nicht einfach. Sie erfolgt in der Regel in drei Schritten: (1) Klassifikation des Fehlertyps (Partikel, Spitze usw.), (2) exakte Ortung des Fehlers, und schließlich (3) Risikoabschätzung und Entscheidung, ob die Anlage geöffnet werden soll. Während der Benutzer die Schritte (1) und (2) mit etwas Erfahrung zuverlässig durchführen kann, ist die Risikoabschätzung schwierig, subjektiv und erfordert die Kenntnis der Geometrie und konstruktiven Besonderheiten der jeweiligen Anlage.

Bei der Prüfung einer größeren GIS-Anlage ist die Ortung der Fehlerquelle wichtig. Dies ist wegen der begrenzten Reichweite der Schallsignale in der Kapselung mit einer einfachen Prozedur möglich. Die akustische TE-Messung bietet sich deshalb als Ergänzung zur elektrischen TE-Messung an, wenn die Ursache für ein elektrisches TE-Signal geortet werden muß.

### 4.1 Akustik

Fig. 5 zeigt schematisch den Signalweg von der Schallquelle im Inneren der Kapselung zum außen angebrachten Sensor. Entladungen im Gasraum und auf der Kapselung aufschlagende Partikel erzeugen einen zeitlich kurzen Schallimpuls mit einer Bandbreite von mehr als einem Megahertz. Während bewegliche Partikel die metallische Kapselung direkt anregen und der Schall sich ausschließlich in der Kapselung bis zum Sensor ausbreitet, muß der Schall von einer Entladung am Innenleiter zusätzlich eine Strecke im Gas zurücklegen.

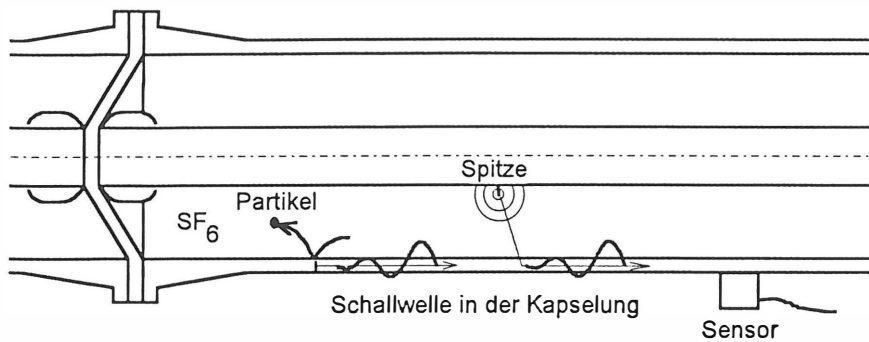


Fig. 5

Signalwege zwischen  
Quelle und Sensor

Auf Ihrem Weg zum Sensor werden die Schallwellen durch zwei Effekte gedämpft:

Die **räumliche Dämpfung** ergibt sich aus der Geometrie des Ausbreitungsmediums und der Form der Quelle. Für eine Punktschallquelle nimmt die Signalintensität beispielsweise umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung zur Quelle ab. Dagegen wird eine ebene Schallwelle in einem eindimensionalen Wellenleiter, zum Beispiel einem Rohr, nicht gedämpft.

Der zweite Effekt ist die **Absorption** von Schallenergie im Medium. Während die Absorption in der Kapselung gering ist, kann sie in SF<sub>6</sub> sehr große Werte annehmen (Fig. 6). Sie erreicht 20 dB/m bei einem SF<sub>6</sub>-Gasdruck von 400 kPa und einer Frequenz von 30 kHz. Die Dämpfung nimmt für höhere Frequenzen und geringere Gasdrücke weiter zu. Signale von einer Teilentladung im SF<sub>6</sub>-Gas enthalten deshalb keine meßbaren Anteile bei Frequenzen größer ca. 50 kHz (Fig. 7, Teilbild c) und d)).

Das Signalspektrum bei einer direkten Anregung der Kapselung durch ein bewegliches Partikel reicht dagegen bis über ein Megahertz. Fig. 7, Teilbild a) zeigt ein typisches Signal, in dem man auch die Reflexionen an den Flanschen erkennen kann. Das zugehörige Spektrogramm in Teilbild b) besitzt Spektralanteile bis über 600 kHz.

Die Ausbreitung in der Kapselung ist nahezu verlustfrei, die Dämpfungen betragen etwa 1 dB/m für gewalztes Al-Rohr bis 3 dB/m für Al-Guß. An einem Flansch mit Stützisolator wurden je nach Bauweise Dämpfungen von 8 dB bis 10 dB gemessen. In der Kapselung pflanzt sich der Schall durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Moden von Biege- und Dehnungswellen fort. Sie besitzen neben ihrer kritischen Grenzfrequenz frequenzabhängige Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten. Die Folge ist eine starke Dispersion, d. h. zeitliche Verbreiterung des Schallimpulses, je weiter der Sensor von der Quelle entfernt ist.

Die Dämpfung im Epoxidharz der Stützisolatoren ist ebenfalls erheblich. In der Literatur sind Richtwerte von 100 dB/m erwähnt [7]. Wegen dieser starken Dämpfung kann Teilentladung in Lunkern nicht festgestellt werden.

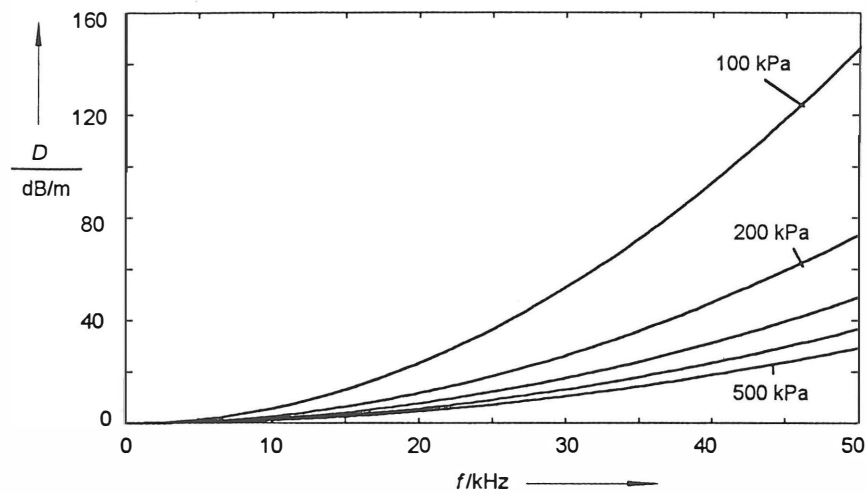


Fig. 6

Dämpfung einer ebenen Schallwelle in  $\text{SF}_6$  in Abhängigkeit vom Gasdruck und der Frequenz  $/10/$

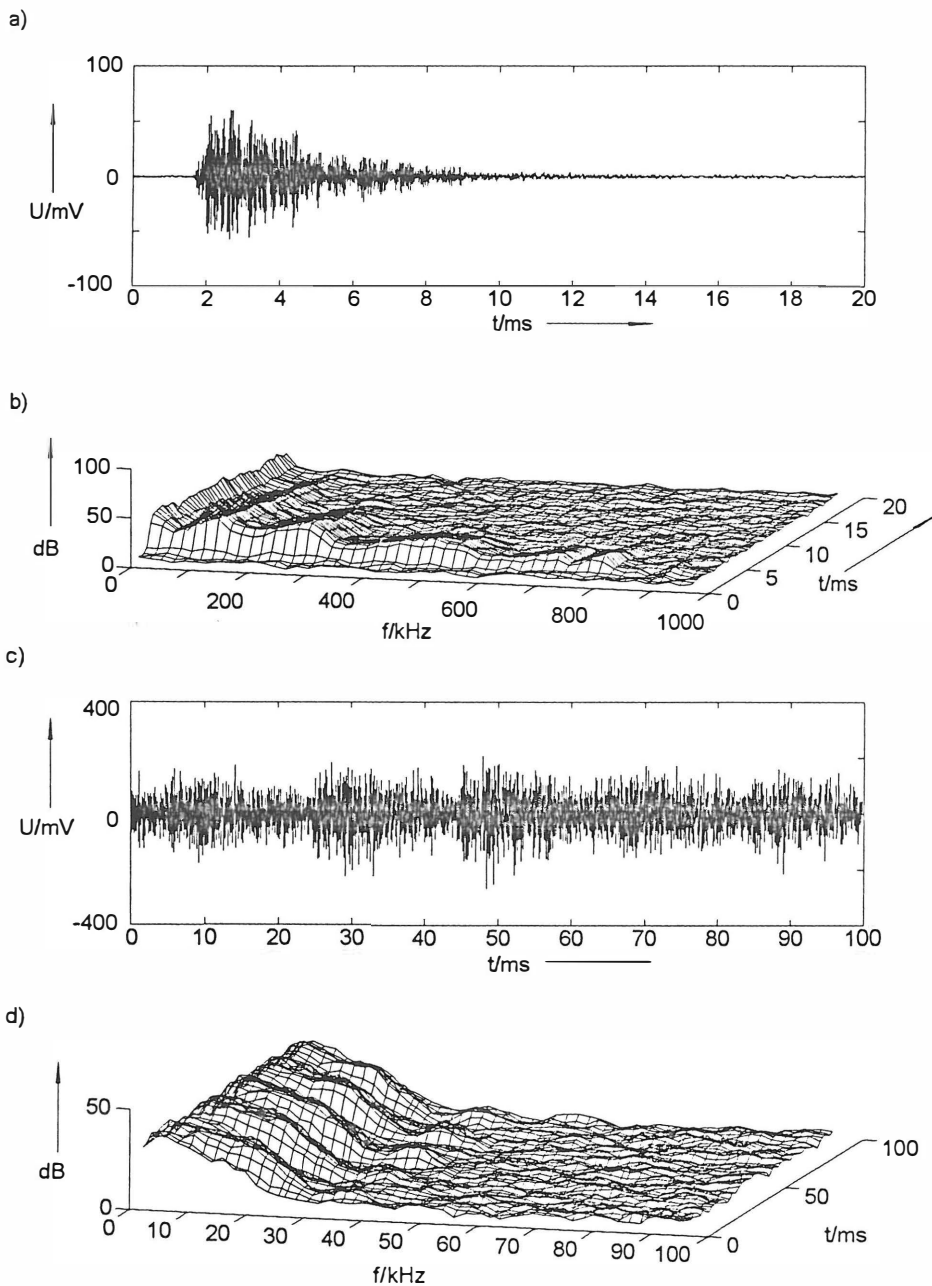


Fig. 7

Zeitsignal und Spektrogramm bei direkter Anregung der Kapselung (a, b) und bei einer Entladung am Innenleiter (c, d)

## 4.2 Sensoren

Für die Detektion von Fehlern werden Beschleunigungssensoren (Accelerometer) und Schallemissionssensoren (Acoustic Emission Sensors) eingesetzt. Beide basieren auf Piezokeramiken, unterscheiden sich aber im Aufbau.

In einem **Beschleunigungssensor** ist die Piezokeramik mit einer frei schwingenden Masse verbunden. Sie übt eine der Beschleunigung proportionale Kraft auf die Keramik aus. Das Gesamtsystem ist schwach bedämpft und besitzt eine ausgeprägte Resonanz, die je nach Bauweise von wenigen kHz bis zu 100 kHz reicht. Die Empfindlichkeit sinkt mit wachsender Resonanzfrequenz, da das Keramik-Masse-System kleiner ausgeführt werden muß. Bei der Messung von Beschleunigungen wird darauf geachtet, daß der Frequenzgehalt des zu messenden Signals nicht größer als etwa ein Zehntel der Resonanzfrequenz ist. In diesem Fall ist das Ausgangssignal der Beschleunigung des Sensors proportional. Dagegen ist es für die Detektion von Teilentladungen günstig, die Resonanzfrequenz in den gewünschten Meßbereich zu legen. Die Proportionalität zur Beschleunigung geht dadurch verloren, aber die Empfindlichkeit des Meßsystems steigt.

**Schallemissionssensoren** sind Ultraschallsensoren mit einer schwach bedämpften Piezokeramik als Aufnehmer. Sie besitzen in der Regel mehrere ausgeprägte Resonanzen und außerdem eine Hochpaßcharakteristik. Erhältlich sind Sensortypen mit einer Hauptresonanz von ca. 30 kHz bis zu 2 MHz. Daneben gibt es unempfindlichere Sensoren mit Bandbreiten bis zu einem Megahertz und näherungsweise flachem Frequenzgang.

Geeignete Sensoren müssen neben einer hohen Empfindlichkeit eine Resonanzfrequenz bzw. untere Grenzfrequenz von weniger als 50 kHz besitzen, damit Entladungen im SF<sub>6</sub>-Gas detektiert werden können. Andererseits darf sie nicht kleiner als ca. 10 kHz sein, weil dann störende Umgebungsgeräusche die Messung beeinträchtigen können. Optimal sind Sensoren mit einer Resonanz- bzw. unteren Grenzfrequenz zwischen 20 kHz und 50 kHz.

Bei der Wahl der oberen Grenzfrequenz muß man einen Kompromiß zwischen Bandbreite und Empfindlichkeit eingehen. Sensoren mit größerer Bandbreite ergeben eine bessere Zeitauflösung, besitzen aber auch eine geringere Empfindlichkeit. In der Praxis haben sich Standardsensoren, wie das Brüel & Kjaer Accelerometer Typ 4370 (Resonanzfrequenz 31 kHz, Empfindlichkeit 10 pC/ms<sup>-2</sup>) und der Schallemissionssensor PAC R15D (Hauptresonanz bei 150 kHz, Frequenzbereich ca. 50 kHz bis 400 kHz, Empfindlichkeit ca. -65 dB bezogen auf 1V/µbar) bewährt. Accelerometer besitzen eine etwas schlechtere zeitliche Auflösung als breitbandigere Schallemissionssensoren, sie reicht aber in der Praxis vollkommen aus.

### 4.3 Meßgeräte

Für den Einsatz auf der Baustelle und im Labor wurde an der Universität Stuttgart ein akustischer Teilentladungsdetektor entwickelt. Er besteht aus vier identisch aufgebauten Kanälen für die gleichzeitige Messung mit vier Sensoren. Jeder Kanal besitzt einen separaten rauscharmen Verstärker, der die Sensorsignale im  $\mu\text{V}$ -Bereich um 60 dB verstärkt. Ein nachgeschaltetes Hochpaßfilter vierter Ordnung mit veränderbarer Grenzfrequenz unterdrückt Störungen durch Umgebungsgeräusche.

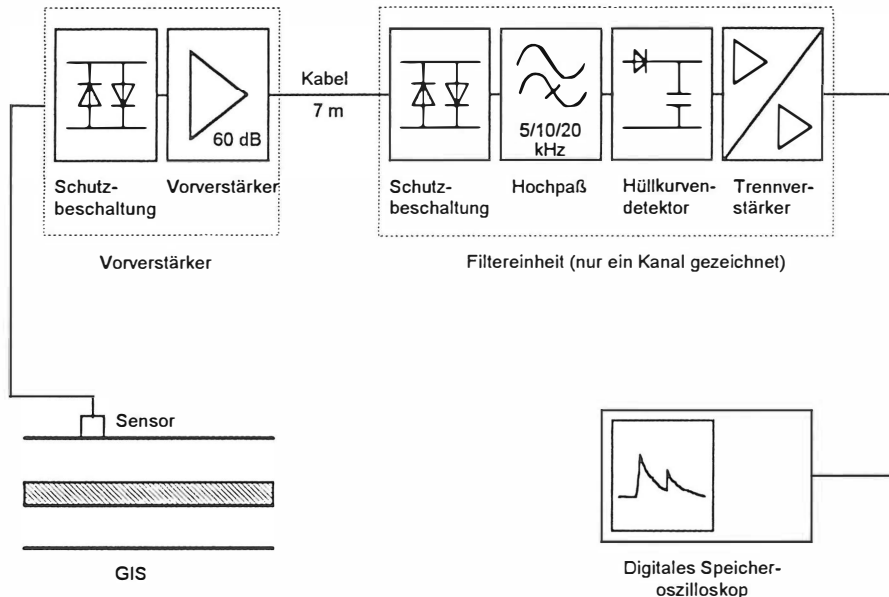


Fig. 8

Blockschaltbild des akustischen Teilentladungsdetektors

Ein aktiver Hüllkurvendetektor bildet die Hüllkurve des gefilterten Signals, die dann mit einem Digitalspeicheroszilloskop oder einem PC mit Datenerfassungskarte angezeigt und verarbeitet wird. Ein optischer Trennverstärker am Ausgang jeden Kanals und galvanisch getrennte Stromversorgungen verhindern Störungen durch Brummschleifen. Das gesamte Meßsystem ist gegen transiente Einkopplungen bei Überschlägen geschützt.

### 4.4 Vorgehen

Durch die beschränkte Reichweite der Sensoren - in der Regel ein Gasraum - müssen alle Gasräume separat vermessen werden. Dazu wird sequentiell an jeden Gasraum ein Sensor mit einem Koppelmittel befestigt. Das Koppelmittel stellt den akustischen Kontakt zur Kapselung her und fixiert gleichzeitig den Sensor. Als Koppelmittel eignen sich Wachse, zähe Silikonfette oder Kitt. Die akustische Ankopplung des Sensors läßt sich in Zweifelsfällen durch den Bruch einer Bleistiftmine aus einem Druckbleistift, der in der Nähe des Sensors auf die Kapselung aufgesetzt wird, kontrollieren. Dieses Testsignal ist in Amplitude und Form gut reproduzierbar und zeigt sofort, ob der Sensor korrekt montiert ist.

Für die Messung ist es wichtig, alle im Gasraum enthaltenen Defekte zu aktivieren. Dazu sollte eine möglichst hohe Prüfspannung gewählt werden. Ein Hammerschlag auf die Kapselung bei angelegter Spannung kann Partikel, die auf der Kapselung liegen, zu Bewegungen anregen.

In der Praxis hat sich folgendes Vorgehen bewährt:

- 1) Prüfspannung anlegen, möglichst 100% Prüfwechselspannung
- 2) Sensor an erstes Gasabteil anbringen
- 3) Akustische Signale aufzeichnen
- 4) Schlag mit einem Kunststoffhammer auf die Kapselung um Partikel anzuregen
- 5) Messung wiederholen
- 6) Wenn ein akustisches Signal angezeigt wird:  
Art des Defekts anhand des Signals feststellen, Defekt orten
- 7) Schritte 2) bis 6) für jeden Gasraum wiederholen

#### 4.5 Signalformen und Empfindlichkeiten

Die Signale verschiedener Fehlerarten unterscheiden sich in ihrem zeitlichen Verlauf und ihrem Spektrum.

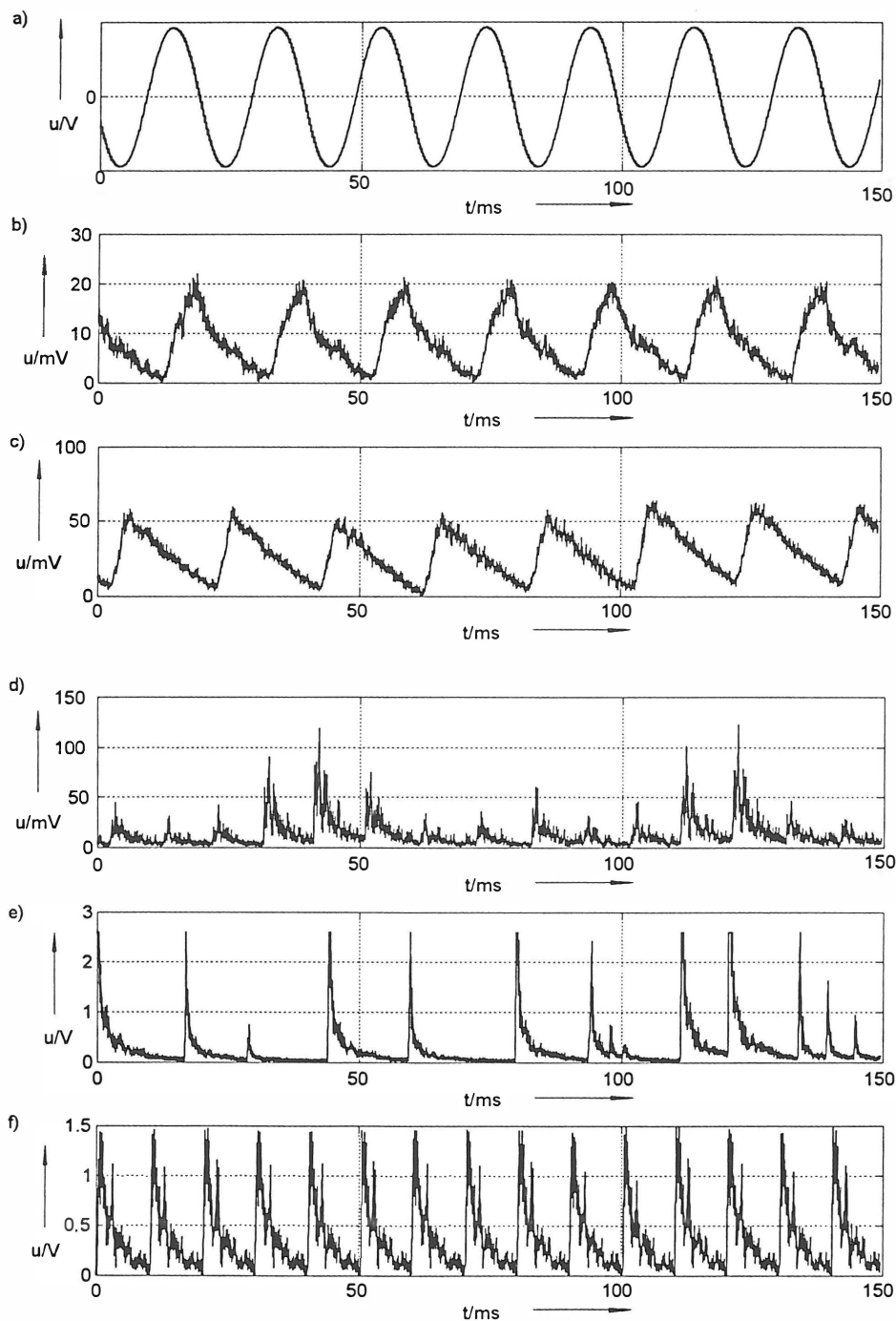
**Hüpfende Partikel** treffen in unregelmäßigen zeitlichen Abständen auf die Kapselung. Bei jedem Aufschlag erzeugen sie einen Impuls großer Amplitude. Die Hüllkurve eines solchen Signals ist in Fig. 8, Teilbild e) dargestellt. Die Impulse erscheinen in unregelmäßigen Abständen, sind also nicht mit der Prüfspannung korreliert. Die Amplitude hängt im wesentlichen vom Gewicht des Partikels und seiner Geschwindigkeit beim Auftreffen auf der Kapselung ab. Selbst Partikel mit extrem geringen Gewichten von weniger als 10 µg können mit ausreichendem Signal-zu-Rauschverhältnis detektiert werden.

**Liegende oder tanzende Partikel** heben nicht von der Kapselung ab. Sie bewegen sich aber wenn die Feldstärke maximal wird. Das akustische Signal zeigt ein ähnliches Verhalten wie das hüpfender Partikel, jedoch sind die Amplituden geringer und die Impulse erscheinen immer in den Spannungsmaxima (Fig. 8, Teilbild d)). Die Korrelation zur Prüfspannung kann mit der Envelope-Funktion des Speicheroszilloskops bei Triggerung auf die Prüfspannung kontrolliert werden. Die Empfindlichkeit ist etwas geringer als bei hüpfenden Partikeln.

**Spitzen auf dem Innenleiter** zeigen Teilentladungen in der negativen und der positiven Halbwelle. Die schwachen Entladungen in der negativen Halbwelle sind meist nicht feststellbar, so daß sich ein 50 Hz-periodisches Signal ergibt, dessen Maxima in der positiven



Halbwelle der Prüfspannung liegen (Fig. 8, Teilbild b)). Die Amplitude des Signals ist klein und lässt sich manchmal erst durch eine Mittelwertbildung über mehrere Netzperioden vom Rauschen unterscheiden. Die Empfindlichkeit ist ausreichend um eine Entladung äquivalent zu 2 pC in einer 525 kV-GIS mit Gußkapselung bei einem Gasdruck von 300 kPa zu detektieren. Bei kleineren Bauformen und höheren Gasdrücken steigt die Empfindlichkeit.



**Fig. 8**  
Typische Signale am  
Ausgang des akusti-  
schen Teilentladungs-  
detektors:

a) Prüfspannung

b) Spitze auf dem  
Innenleiter

c) Spitze auf dem  
Außenleiter

d) liegendes Partikel

e) hüpfendes Partikel

f) mechanische Vi-  
bration durch eine  
lose Schraube

Alle Signale wurden  
mit einem Beschleu-  
nigungssensor B&K  
4370 aufgenommen.  
Die Amplituden bezie-  
hen sich auf das um  
60 dB verstärkte  
Sensorsignal.

Das gleiche Verhalten zeigen **Spitzen am Außenleiter**, jedoch ist Ihre Phasenlage um  $180^\circ$  verschoben (Fig. 8, Teilbild c)). Die Empfindlichkeit ist wesentlich größer, so daß auf eine Mittelwertbildung verzichtet werden kann.

Mit der akustischen Meßmethode lassen sich auch **mechanische Vibrationen** feststellen. Gewöhnlich weisen sie auf einen mechanischen Defekt hin. Fig. 8, Teilbild f) zeigt als Beispiel das 100 Hz-periodische Signal einer Vibration, verursacht durch eine lose Schraube an einem Kompensator.

Die Bestimmung des Fehlertyps ist durch die ausgeprägten Unterschiede in den Signalverläufen mit einem kurzen Training erlernbar. Verwechslungen gab es in der Praxis nur bei schwachen mechanischen Vibrationen und liegenden Partikeln. Um die Bestimmung zu vereinfachen wird zur Zeit an einem Klassifikationssystem auf der Basis von statistischen Verfahren gearbeitet. Das Klassifikationsprogramm läuft auf einem Notebook-Computer, der über eine A/D-Umsetzerkarte direkt die Meßsignale aus dem akustischen Teilentladungsdetektor verarbeiten kann. Ein Oszilloskop ist dann nicht mehr erforderlich.

Die Empfindlichkeit ist bei den meisten relevanten Defekten größer oder gleich einer empfindlichen elektrischen Teilentladungsmessung. Lediglich fixierte Partikel auf Stützeroberflächen können wegen der geringen Impulsrate und des ungünstigen akustischen Signalwegs akustisch nicht immer erkannt werden. Bewegt sich das Partikel auf der Stützeroberfläche, ist die Empfindlichkeit - zumindest bei 123 kV-GIS-Anlagen - meist besser als die der elektrischen Teilentladungsmessung.

#### 4.6 Ortung

Die Signaldämpfung in der Kapselung erlaubt die Ortung der Quelle durch Intensitätsvergleich. Dazu verändert man die Position des Sensors auf der Kapselung und sucht den Ort der größten Signalamplitude. Vorteilhaft ist eine gleichzeitige Messung mit mehreren Sensoren. Die Flankensteilheit der Signale ist ein weiterer Anhaltspunkt für die Entfernung des Sensors zur Quelle, da sie durch die Dispersion in der Kapselung bei größer werdender Entfernung abnimmt. Mit dem Intensitätsvergleich kann man eine Genauigkeit von etwa 30 cm erreichen.

Bei impulsförmigen Signalen von Partikeln oder mechanischen Vibrationen, die einen ausgeprägten steilen Anstieg besitzen, kann man durch eine Laufzeitmessung mit zwei Sensoren eine Genauigkeit von wenigen Zentimetern erreichen. Die Kapselung wird dazu näherungsweise als eindimensionaler Wellenleiter betrachtet. Aus der Zeitdifferenz der an den Sensoren ankommenden Signale kann man die Position der Quelle einfach errechnen.

(Fig. 9). Die zusätzlich benötigte Laufzeit  $T$  von Sensor A zu Sensor B wird mit einem Testsignal, das bei  $x < 0$  oder  $x > D$  eingespeist wird, gemessen.

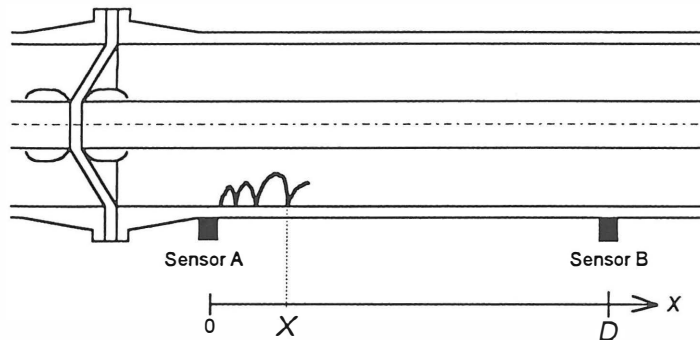


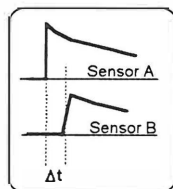
Fig. 9

Ortung mit Intensitätsvergleich und Laufzeitmessung

a) Intensität und Dispersion (Genauigkeit  $\sim 30$  cm)



b) Laufzeitmessung (Genauigkeit  $\sim 5$  cm)



$$X = \frac{D}{2} \left( 1 - \frac{\Delta t}{T} \right)$$

$T$ : Laufzeit zwischen den Sensoren

## 5. Erfahrungen aus Messungen vor Ort

Neben Laborexperimenten an Anlagen mit Nennspannungen von 245 kV und 525 kV wurden mit dem akustischen Teilentladungsdetektor mehr als eintausend Gasräume einphasig gekapselter 123 kV-GIS-Anlagen während der Abnahmeprüfung vor Ort vermessen. Die Meßdauer betrug dabei im etwa 1,5 Minuten pro Gasraum. Für die Prüfung einer gesamten Schaltanlage durchschnittlicher Größe wurden etwa zwei bis drei Tage benötigt.

Die akustischen Methode reagiert sehr empfindlich auf bewegliche Partikel in allen Bewegungsmodi. Meist übertraf sie die Empfindlichkeit der gleichzeitig durchgeführten elektrischen Teilentladungsmessung mit einem Grundstörpegel kleiner 0,5 pC. Durch die hohe Empfindlichkeit werden aber auch Partikel unkritischer Größe erfaßt. Der Anwender muß deshalb aus dem Signalverlauf, der Spannungsabhängigkeit und den konstruktiven Besonderheiten der geprüften Anlage das mögliche Risiko eines Partikels abschätzen und über das Öffnen des Gasraumes entscheiden. Einige Kriterien dazu sind in Tabelle 3 zusammengefaßt. Im Laufe der Messungen wurde ein Entscheidungsschema erarbeitet, das eine zufriedenstellende Genauigkeit erreicht. Ein solches Schema ist aber nicht ohne weiteres auf andere Anlagentypen und Baugrößen übertragbar. Der Anwender muß speziell mit seinem Anlagentyp entsprechende Erfahrungen sammeln.

Partikel auf Stützisolatoren waren nur in wenigen Fällen unbeweglich fixiert und konnten deshalb akustisch nicht detektiert werden.

Hohes Risiko		Eigenschaft		Geringes Risiko
großes Partikel	← hoch	Signalpegel	niedrig →	kleines Partikel
Partikel kann den Innenleiter erreichen	← niedrig	Aufschlagfrequenz	hoch →	Partikel bleibt auf der Kapselung
längliches Partikel	← ja	Einsatzspannung >> Ausetzspannung	nein →	kurzes Partikel
kritische Position	← ja	Gasraum mit horizontalem Stützisolator ?	nein →	unkritische Position
...	...	...	...	....

Tabelle 3: Kriterien für die Risikoabschätzung bei beweglichen Partikeln

Der hohe Zeitaufwand für die akustische Prüfung legt die Kombination mit einer empfindlichen elektrischen Teilentladungsmessung nahe. Ergibt sich ein elektrisches Teilentla-

dungssignal, kann die Ursache akustisch geortet werden. Für die Risikoabschätzung stehen die Meßergebnisse der akustischen und der elektrischen Messung sowie die Information über die Geometrie des betroffenen Gasraumes zur Verfügung.

Vereinfacht würde sich folgender Prüfablauf ergeben:

- 1.) Empfindliche Teilentladungsmessung bei der Wechselspannungsprüfung
- 2.) Bei Teilentladungspegeln größer als ein festzulegender Grenzwert:
  - Akustische Ortung der Quelle(n) und Risikoabschätzung mit Hilfe der Meßergebnisse.
  - Gegebenenfalls Beseitigung der Fehler und Wiederholung der Prüfung.

Die Ortung mit Intensitätsvergleich und Laufzeitmessung war in den meisten Fällen problemlos möglich.

## 6.      **Schlußfolgerungen**

- Für eine maximale Empfindlichkeit gegenüber kritischen Defekten sollte die elektrische Teilentladungsmessung an GIS-Anlagen vor Ort einen Grundstörpegel kleiner 1 pC aufweisen. Die Prüfspannung sollte 80% bis 100% der Nennstehwechselspannung betragen.
- Bis zu Nennspannungen von 245 kV kann man diese Grundstörpegel zuverlässig mit einem gekapselten Prüfaufbau erzielen.
- Bei Einspeisung über eine Freiluftdurchführung kann man durch die Unterdrückung sinusförmiger Störer oft einen akzeptablen Grundstörpegel kleiner 5 pC erreichen, vorausgesetzt, der Freiluftaufbau ist teilentladungsfrei.
- Die akustische Detektion von Teilentladungen eignet sich besonders zur Ortung und zur Beurteilung des Risikos eines Fehlers. Sie reagiert genauso empfindlich auf die bei der vor-Ort-Prüfung relevanten Fehlerarten wie die elektrische Teilentladungsmessung. Eine empfindliche elektrische Teilentladungsmessung in Kombination mit einer akustischen Ortung stellt eine sichere und kostengünstige Prüfmethode dar.

## 7. Literatur

- /1/ IEC 517:1990, Gas-insulated metal-enclosed high-voltage switchgear and controlgear for rated voltages of 72.5 kV and above, Subclauses 6.1.9, 7.107.1 und Annex CC.
- /2/ Schlemper, H.-D.; Kurrer, R.; Feser, K.: Sensitivity of on-site partial discharge detection in GIS, 8th Int. Sympos. on High Voltage Engng., Yokohama 1993, Ber. 66.04
- /3/ CIGRE WG 15.03: Effects of particles on GIS insulation and the evaluation of relevant diagnostic tools. CIGRE Session 1994, Ber. 15-103
- /4/ Köpf, U.: Kontinuierliche Unterdrückung von schmalbandigen, periodischen und breitbandigen, impulsförmigen Störern bei der Teilentladungsmessung. Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- /5/ Lauersdorf, M.: Unterdrückung von Störgrößen in Echtzeit in der TE-Meßtechnik vor Ort. 7. Haefely Trench Symposium 1995.
- /6/ Harrold, R. T.: Acoustical techniques for detecting and locating electrical discharges. In Bartnikas, R.; McMahon, E. J. (Hrsg.): Engineering Dielectrics Vol. 1: Corona Measurement and Interpretation, ASTM, Philadelphia, 1979
- /7/ Lungaard, L. E.; Runde, M.; Skyberg, B.: Acoustic diagnosis of gas insulated substations; a theoretical and experimental basis. IEEE Transactions on Power Delivery, 5, 1751-1758 (1990)
- /8/ Leijon, M.; Hoff, P.; Nordin, R.; Karlsson, J.: A new portable acoustic measurement equipment for on-site diagnostics of GIS. CIGRE Symposium Berlin 1993, Ber. 130-04
- /9/ Wahlström, B.; Lord, W.; Pettersson, K.; Leijon, M.: Approaches and experiences in Sweden of reducing GIS maintenance costs - especially by application of periodic acoustic measurements. CIGRE Session 1990, Ber. 23-106
- /10/ Haebel, E. U.: Messungen zur Temperaturabhängigkeit der Schwingungsrelaxation in Schwefelhexafluorid zwischen 10°C und 215°C. Acustica, 20, 65-75 (1968)