

# **UHF-Methode für die TE-Messung in GIS während der Vor-Ort-Prüfung und zum Monitoring**

**R. Feger,**  
Universität Stuttgart  
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik

## **1. Einleitung**

Gasisolierte Schaltanlagen (GIS) werden nach ihrer Errichtung vor Ort einer Hochspannungsprüfung, bestehend aus einer Wechsellspannungsprüfung und einer Stoßspannungsprüfung, unterzogen. Sie soll eventuelle Montagefehler oder Verunreinigungen durch leitfähige Partikel in der Anlage verhindernden und somit den fehlerfreien Zustand der GIS nach der Montage gewährleisten.

Partikel und andere potentielle Fehlerquellen könnten vor Ort aber auch mit einer empfindlichen Teilentladungsmessung (TE-Messung) erkannt werden. Bei ausreichender Meßempfindlichkeit könnte daher ähnlich der Stückprüfung auf die Stoßprüfung verzichtet werden. Im Gegensatz zur Stückprüfung, bei der ein von der Norm empfohlener Grundstörpegel von 5 pC einfach erreichbar ist, ist die Empfindlichkeit der Standard-TE-Messung nach IEC 270 vor Ort durch Störeinkopplung stark vermindert. Als Alternative zur IEC 270 Methode hat sich in den letzten Jahren die UHF-Methode entwickelt. Sie besitzt eine ähnlich gute Empfindlichkeit, bietet aber zudem eine weitaus größere Störsicherheit. Im Gegensatz zur IEC 270 Methode ist sie aber nicht kalibrierbar. Bestrebungen, die fehlende Kalibriermöglichkeit durch den Nachweis einer ausreichenden Empfindlichkeit zu ersetzen, haben zur Entwicklung eines entsprechenden Verfahrens geführt. Mit dem in diesem Beitrag vorgestellten Verfahren kann die erforderliche Empfindlichkeit von UHF-Meßsystemen nachgewiesen werden.

Zur ständigen Überwachung des Betriebszustandes gasisolierter Schaltanlagen werden mechanische, chemische und elektrische Meßgrößen erfaßt. Mit Hilfe einer Teilentladungsmessung kann der dielektrische Zustand der Anlage ermittelt werden. Von den bekannten Verfahren zur Teilentladungsmessung ist nach heutigem Stand lediglich die UHF-Methode zum On-line-Monitoring einer GIS geeignet. Dazu werden Sensoren in der Anlage installiert, deren Signale von einem breitbandigen UHF-Empfänger aufgenommen und weiterverarbeitet werden. Mit einer geeigneten Auswerte- und Diagnosesoftware können die Teilentladungssignale erkannt und weitergehende Maßnahmen eingeleitet werden. Zum Nachweis der erforderlichen Empfindlichkeit des Monitoringsystems kann ebenfalls das neu entwickelte Verfahren eingesetzt werden.

Im folgenden Beitrag wird zunächst ein kurzer Überblick über die theoretischen Grundlagen der UHF-TE-Meßmethode gegeben. Im weiteren wird kurz auf Ergebnisse von Messungen zur Einkopplung von elektromagnetischen Störern in GIS eingegangen. Das Verfahren zum Nachweis der ausreichenden Empfindlichkeit von UHF-Meßsystemen wird ausführlich vorgestellt. Abschließend wird noch das Konzept eines UHF-Monitoringsystems dargestellt und diskutiert.

## 2. Die UHF-Methode zur Teilentladungsmessung

### 2.1 Prinzip der UHF-Methode

Die sogenannte UHF-Methode stellt ein wichtiges Verfahren zur Teilentladungsmessung bei der Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung und zur On-Line-Überwachung von gasisolierten Schaltanlagen dar. Die TE-Signale werden dabei in einem Frequenzbereich von  $f = 300 \text{ MHz} - 3 \text{ GHz}$  mit flachen Scheibensensoren gemessen, die an Erderflanschen oder einer Montageöffnung in der Anlage eingebaut sind. Die Sensoren verbleiben in der Anlage, so daß eine ständige TE-Überwachung im Betrieb möglich ist (Fig. 2.1). Im Gegensatz dazu wird bei der TE-Messung nach der Standardmethode IEC 270 ein Koppelkondensator zur Auskopplung der TE-Impulse verwendet. Die Messungen erfolgen dabei in einem Frequenzbereich zwischen 40 und 400 kHz /1/.

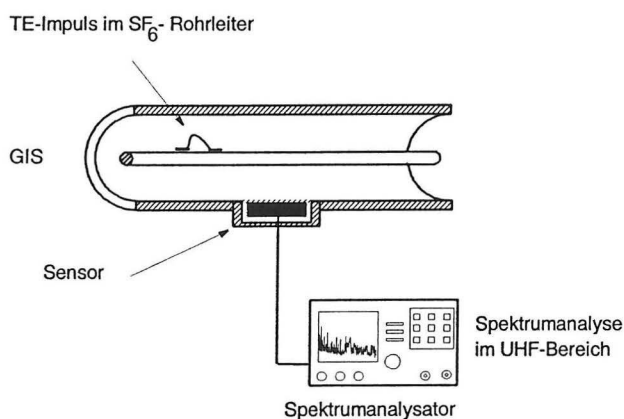


Fig. 2.1:

Meßprinzip der  
UHF-Methode

Aus dem Vergleich des gemessenen Spektrums mit einem im spannungslosen Zustand der Anlage aufgenommenen Referenzspektrum (Fig. 2.2) läßt sich erkennen, ob Teilentladungen vorhanden sind. Abhängig vom Fehlstellentyp und -ort sind spektrale Anteile bis über 2 GHz erkennbar. Ein direkter Rückschluß aus dem Spektrum auf die bei der TE umgesetzte scheinbare Ladung ist nicht möglich, allerdings nehmen die spektralen Anteile bei steigenden TE-Werten zu und das Spektrum wird dichter.

Aufgrund der geringen Anstiegszeiten der Teilentladungen in einem Gasraum werden hochfrequente elektromagnetische Wellen angeregt, die sich in der Schaltanlage ausbreiten. Da eine GIS im UHF-Bereich einen coaxialen Hohlleiter darstellt, treten neben dem leitungsgebundenen TEM-Mode (transversal-elektromagnetisch) auch leitungsungebundene TM- (transversal-magnetisch) und TE- (transversal-elektrisch) Moden auf /2/. Diese auch als höhere Moden bezeichneten Wellenmoden lassen sich durch ihre kritische Grenzfrequenz im coaxialen Hohlleiter charakterisieren. Oberhalb dieser kritischen Grenzfrequenz ist ein Wellenmode in der GIS ausbreitungsfähig, wohingegen er unterhalb der Grenzfrequenz stark gedämpft wird. Die Grenzfrequenzen der höheren Moden sind abhängig von der Baugröße der Anlage /3/, die des ersten ausbreitungsfähigen Modes liegt dabei im allgemeinen zwischen 250 und 700 MHz /2, 3, 4/. Der TEM-Mode hingegen besitzt keine Grenzfrequenz, er ist in einer coaxialen Anordnung bereits ab der Frequenz 0 Hz ausbreitungsfähig.

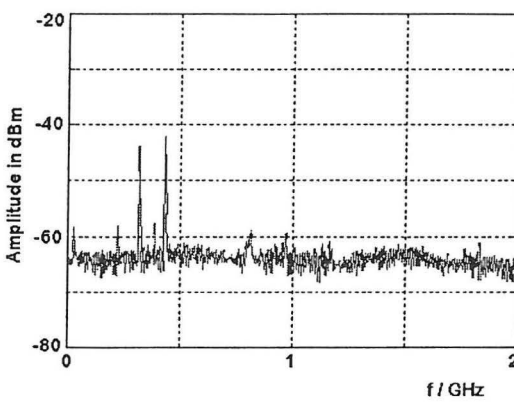


Fig 2.2a:  
Referenzspektrum

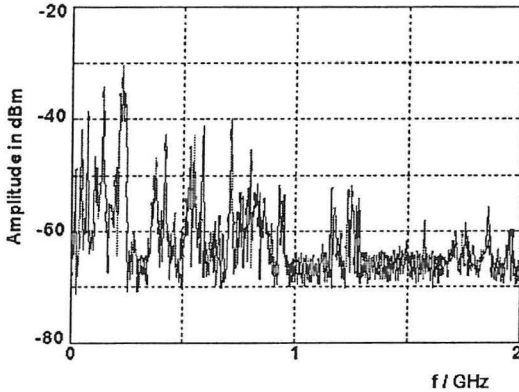


Fig. 2.2b:  
TE-Spektrum

An Inhomogenitäten in der Anlage (Stütz- bzw. Schottisolatoren, Verzweigungen, Enddeckel, etc.) kommt es zu Reflexionen und zur Ausbildung stehender Wellen. Die stehenden Wellen erzeugen Resonanzen in der GIS, die ebenfalls von der Anlagengeometrie bestimmt werden. Die Resonanzfrequenzen der höheren Moden liegen sehr dicht und nur wenig oberhalb der entsprechenden kritischen Grenzfrequenzen /2/, während die Resonanzfrequenzen höherer Ordnung des TEM-Modes bei Vielfachen der ersten Resonanzfrequenz (aus der Anlagengeometrie errechenbar) liegen /5/. Zwischen den Moden treten ebenfalls Kopplungseffekte auf, die zu berücksichtigen sind. Die Anregung der höheren Wellenmoden wird darüber hinaus auch von der Anstiegszeit des TE-Impulses wesentlich beeinflusst. Aus diesem Grund ist die Signalenergie bei TE-Impulsen mit einer sehr kurzen Anstiegszeit im UHF-Bereich deutlich höher als im VHF-Bereich (30 - 300 MHz), in dem lediglich der TEM-Mode erfaßt wird /4/.

## 2.2 Dämpfung und Reflexion von Wellen in GIS

Die von einer Fehlstelle abgestrahlte elektromagnetische Welle erfährt durch Verluste in der Metallkapselung bei einer idealen Oberfläche eine Dämpfung von ca. 2 dB/km /2/. Die Dämpfung wird durch den Skin-Effekt hervorgerufen, so daß sich bei einer Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit ein geringfügig höherer Wert ergibt. Da der Dämpfungswert für alle Moden in der gleichen vernachlässigbaren Größenordnung liegt, lassen sich damit die gemessenen Veränderungen im Amplitudenspektrum an Stützisolatoren bzw. T-Stücken von ca. 5 - 10 dB nicht erklären / 2, 4/.

Diese Reduzierung der Amplitude des Spektrums ist letztlich nicht auf die Wandlung elektromagnetischer Feldenergie in ohmsche Verlustwärme, sondern vielmehr auf Brechungs- und Reflexionsvorgänge an den Inhomogenitäten einer GIS zurückzuführen. Für den relativ einfachen Fall eines Stützisolators, der als dielektrische Scheibe im Hohlleiter

näherungsweise modelliert werden kann, lassen sich die Reflexions- und Transmissionskoeffizienten der einzelnen Moden berechnen /2/. Die erhaltenen Werte zeigen, daß die Dämpfung sowohl vom Wellentyp als auch von der Frequenz abhängig ist und somit kein allgemein gültiger Wert angegeben werden kann. Komplexere Inhomogenitäten, wie z. B. ein T-Stück, lassen sich dagegen nur bedingt mathematisch beschreiben, da die Lösungen sehr umfangreich werden.

Im VHF-Bereich können diese Reflexionsvorgänge mit Hilfe der Leitungsgleichungen oder darauf basierender Programme (EMTP bzw. ATP /6/, PSPICE, etc.) beschrieben werden. Die hierbei gefundenen Dämpfungswerte sind nicht ohne weiteres auf den UHF-Bereich übertragbar, da insbesondere bei höheren Frequenzen ein erheblicher Anteil der Energie der elektromagnetischen Welle in den in diesem Fall unberücksichtigten höheren Wellenmoden enthalten ist /4/.

Ausgehend von dem in /4/ beschriebenen Hochfrequenz-Modell der Erregung und Ausbreitung eines UHF-Signals in einem Gasraum ohne Inhomogenitäten wurde ein sogenanntes Leistungsfluß-Modell entwickelt, mit dem die Veränderungen der Signalenergie-dichte durch Stützisolatoren bzw. offene Trennschalter vereinfacht beschrieben werden können /7, 8/. Sind die für dieses Modell benötigten charakteristischen Größen durch Messungen ermittelt, so kann man die Dämpfung in einem Gasraum zwischen zwei Stützen abschätzen.

Weitere Erkenntnisse auf diesem Gebiet läßt die Verwendung von hochfrequenztauglichen Simulationsprogrammen erwarten, die auch TM- und TE-Wellenmoden beinhalten /9/. Da diese Programme in ihrem Ursprung jedoch nicht für die Simulation von hochspannungstechnischen Schaltgeräten entwickelt wurden, sind die damit erzielten Ergebnisse kritisch auf ihre Plausibilität hin zu überprüfen. Erste Simulationen mit vereinfachten Anordnungen haben aber gezeigt, daß damit eine Berechnung der elektromagnetischen Wellen in einer GIS auch im UHF-Bereich möglich ist.

Neueste Vor-Ort-Messungen deuten an /10/, daß die Bedeutung der Stützisolatoren für die Dämpfung in GIS weit geringer ist als bisher angenommen wurde. Einen wesentlich größeren Einfluß auf die Dämpfung scheinen Anlagenkomponenten zu haben, die aufgrund ihrer Form zu einer abrupten Änderung des Wellenwiderstandes führen. Dazu zählen in erster Linie Trenn-, aber auch Leistungsschalter.



2.3 Messungen mit der UHF-Methode

2.3.1 Schmalbandige und breitbandige Auflösung

TE-Spektren können im UHF-Bereich mit schmalbandigen oder breitbandigen Auflösungsfiltern gemessen werden. Bei einer schmalbandigen Auflösung (z. B. 300 Hz) erfolgt die Aufzeichnung eines Linienspektrums, da die sehr dicht beieinander liegenden Spektrallinien getrennt aufgelöst und somit auch ihre Amplitude richtig gemessen werden. Bei einer breitbandigen Auflösung (> 1 MHz) hingegen werden die einzelnen Spektrallinien nicht getrennt sondern die Hüllkurve des Spektrums aufgezeichnet. Da bei einer breitbandigen Auflösung mehrere spektrale Anteile gleichzeitig erfaßt werden, ist sie empfindlicher als die schmalbandige Messung. Darüber hinaus ist die benötigte Zeit zum Durchlaufen des gesamten Meßbereichs bei der Breitbandmessung geringer, so daß sie sowohl für die Vor-Ort-Prüfung als auch für das On-line-Monitoring besser geeignet ist.

2.3.2 Messungen im Frequenzbereich und im Zeitbereich

Die UHF-Meßmethode läßt sich in die sogenannte Schmalband- und Breitband-UHF-Methode einteilen (Fig. 2.3). Bei der schmalbandigen UHF-Methode, die üblicherweise mit einem Spektrumanalysator durchgeführt wird, wird die Signalenergie aus einem begrenzten Frequenzbereich (einige MHz Bandbreite) erfaßt. Anhand der Aufnahme des gesamten Frequenzbereichs können die Resonanzspitzen des TE-Signals ermittelt werden, bei denen anschließend eine Zero-Span-Messung durchgeführt wird. Bei der Zero-Span-Messung wird der Spektrumanalysator auf eine feste Frequenz eingestellt, deren Signalkomponente dann als Funktion der Zeit phasenrichtig zur Hochspannung dargestellt werden kann. Der Vorteil der Schmalband-Methode liegt in der möglichen Unterdrückung von hochfrequenten Störern /11/.

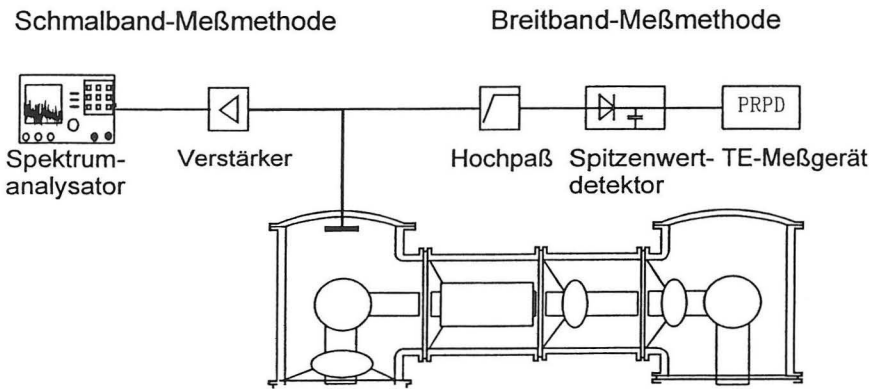


Fig. 2.3:  
UHF-Meßmethoden

Bei der breitbandigen UHF-Methode wird die Energie des TE-Signals über einen großen Frequenzbereich von 300 MHz bis maximal 2 GHz erfaßt. Die Messung erfolgt im Zeitbereich mit einem breitbandigen Spitzenwertdetektor, dem ein Hochpaß vorgeschaltet ist. Die Vergrößerung der Bandbreite führt allerdings zu einer generellen Verschlechterung des Signal/Rausch-Verhältnisses /11/. Ein weiterer Nachteil ist die gleichzeitige Erfassung von Stör- und TE-Signalen. In Figur 2.4 sind Meßsignale der schmal- und der breitbandigen UHF-Meßmethode sowie der Standardmethode nach IEC 270 am Beispiel einer Spitze auf dem Innenleiter vergleichend dargestellt.

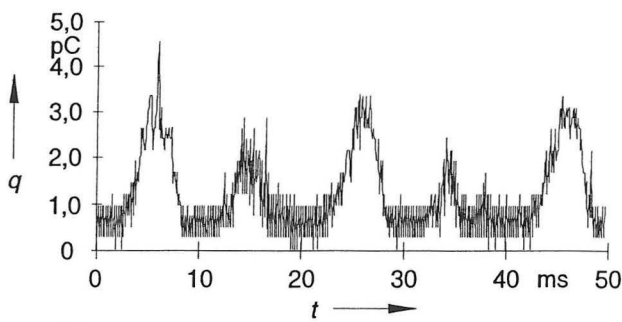


Fig. 2.4a:

Messung nach der IEC  
270 Methode  
Frequenzbereich 40 - 400  
kHz

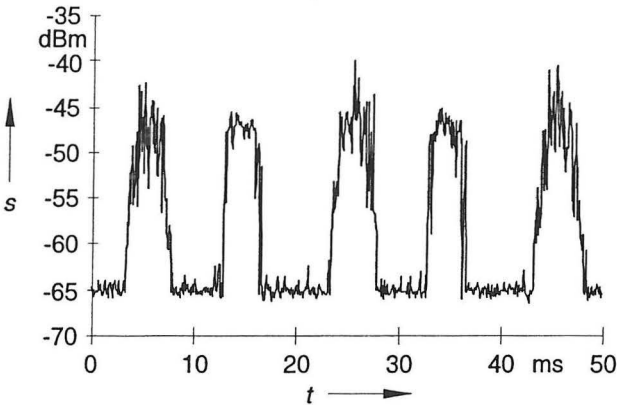


Fig. 2.4b:

UHF-TE-Signal, schmal-  
bandig mit einem Spek-  
trumanalysator gemessen;  
Zero-Span-Messung bei  
 $f = 457$  MHz

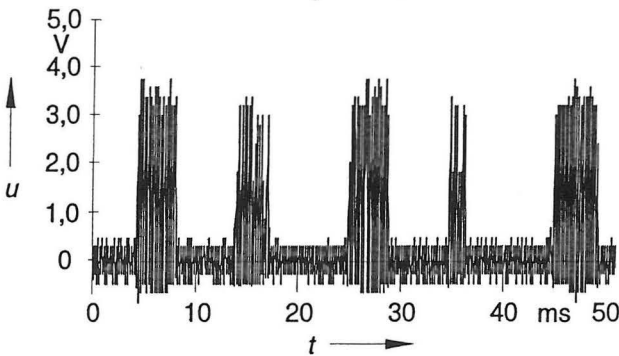


Fig. 2.4c:

UHF-TE-Signal, breitban-  
dig gemessen mit UHF-  
TE-Empfänger im Bereich  
0.3 - 2 GHz

Die anschließende Auswertung der Signale erfolgt bei beiden Verfahren mit Hilfe von PRPD (phase-resolved partial discharge) -Analysatoren, wie sie auch bei der IEC 270 Methode angewendet werden. Bei der schmalbandigen Meßmethode wird dazu der PRPD-Analysator über den Videoausgang des Spektrumanalysators angesteuert, während bei der Breitband-Meßmethode die Signale direkt vom Spitzenwertdetektor auf den PRPD-Analysator gegeben werden. Man erhält bei der UHF-Methode nahezu die gleichen Verteilungsmuster (sogenannte Fingerprints) wie auch bei der Standardmethode IEC 270 /12/.

### 3. Einfluß von Störern

Durch die Integration der Sensoren in die GIS-Anlage wird die Schirmwirkung der Metallkapselung gegenüber hochfrequenten Störungen genutzt. Die Reduzierung der Abmessungen des Meßkreises für die TE-Messung führt darüber hinaus zu einer Verminderung der Störeinkopplungen. Während vor Ort die TE-Messung nach der Standardmethode IEC 270 durch Störungen, insbesondere Korona auf Freileitungen, stark beeinträchtigt wird, kann bei der UHF-TE-Messung durch die Wahl eines entsprechenden Frequenzbereiches bzw. der Vorschaltung eines angemessenen Hochpasses ein geringer Grundstörpegel erreicht werden. Darüber hinaus können schmalbandige Störungen, wie z. B. Rund- und Mobilfunk, im Spektrum erkannt und bei der Auswertung berücksichtigt werden. Selbst kleinste Veränderungen nahe einem Störer können im Frequenzbereich detektiert werden, während sie im Zeitbereich vom Störsignal überdeckt würden.

Beim On-line-Monitoring stellen Störungen eine besondere Herausforderung dar, da sie von TE-Signalen in der GIS unterschieden werden müssen. Dies erfordert die Entwicklung entsprechender Algorithmen und Systeme, um eine fehlerhafte TE-Detektion zu verhindern. So lassen sich beispielsweise die von Korona auf Freileitung verursachten Störungen durch Vorschalten eines Hochpasses, dessen Grenzfrequenz bei 300 MHz liegen sollte, vollkommen unterdrücken /11/. Ist die Intensität der Störer sehr hoch, so kann dies eine empfindliche Messung und letztlich auch eine empfindliche TE-Überwachung mit der breitbandigen UHF-Methode unmöglich machen.

#### 3.1 Untersuchung verschiedener Störer

Neben den bereits angesprochenen ständigen Störungen treten bei Anlagen vor Ort auch nichtständige Störer auf, die eine TE-Überwachung erschweren. Nichtständige Störer sind z. B. die von Trennerschaltungen ausgelösten hochfrequenten Ausgleichsvorgänge (VFT - Very Fast Transients) oder auch Motoren von im Nahbereich der Anlage eingesetzten elektrischen Geräten, die in die Anlage oder das Meßsystem einkoppeln.

Die im folgenden untersuchten Störer wurden hinsichtlich ihrer möglichen Verwendung in unmittelbarer Nähe einer GIS ausgewählt. Im Einzelnen wurden dabei untersucht:

- Bohrmaschinen verschiedener Leistungsklassen
- Schlagbohrer (Hilti)
- Industriestaubsauger
- Akkubetriebene Werkzeuge
- Neonröhren
- Heizgebläse, Haarfön 1200 W
- Schleifer (28 000 U/min)
- Schweißtransformator
- 20 A Stromquelle
- Mobiltelefon

Die Messungen wurden schmalbandig mit einem Spektrumanalysator und einem 35 dB Vorverstärker an einer 362 kV Schaltanlage durchgeführt, deren Aufbau in Figur 3.1 dargestellt ist. Das Hintergrundstörspektrum war dabei frei von Störungen. Um Rückkopplungen über das Netz zu vermeiden, wurde der Spektrumanalysator über ein Netzfilter betrieben.

Die überwiegende Anzahl der untersuchten Geräte erzeugte dauerhaft Störimpulse unterhalb der Frequenz von 300 MHz, so daß diese ebenfalls durch die Vorschaltung eines Hochpasses mit einer entsprechenden Grenzfrequenz wirkungsvoll unterdrückt werden können. Lediglich beim Einschalten konnten öfters einmalige Impulse bis zu 700 MHz nachgewiesen werden, die aber eine TE-Überwachung nicht behindern.

Eine besondere Rolle nimmt das Mobiltelefon ein, da es kontinuierlich bei einer festen Frequenz mit extrem hoher Amplitude einkoppelt und somit durch eine Zero-Span-Messung (Messung im Zeitbereich bei einer festen Frequenz) leicht identifizierbar ist.

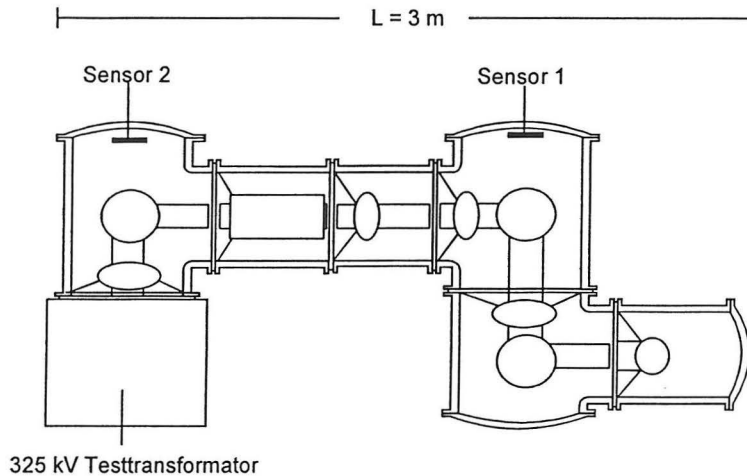


Fig. 3.1:

Meßaufbau der  
362 kV Schaltanlage

Als kritisch erwiesen sich neben der Bohrmaschine (Fig. 3.2a,b) vor allem der Schleifer (Fig. 3.3a,b) und der Fön (Fig. 3.4a;b), die ein sehr hochfrequentes Störspektrum erzeugten. Je nach Abstand und Position relativ zur Anlage wurden vom Bürstenfeuer des Föns noch Spektralanteile bis über 2 GHz hinaus dauerhaft in die Anlage eingekoppelt. Aus den Zero-Span-Messungen der Geräte läßt sich sogar eine leichte 100 Hz Periodizität erkennen, wie sie auch bei von Fehlstellen in der GIS verursachten TE-Signalen auftreten kann, wenn auch sehr viel deutlicher. Insbesondere das Störspektrum des Schleifers zeigt, daß es externe Störer gibt, die in der Lage sind, ein dem TE-Spektrum einer Fehlstelle ähnliches Störspektrum in die Anlage einzukoppeln. Dies muß bei der Konzeption eines On-Line-Überwachungssystems mitberücksichtigt werden.

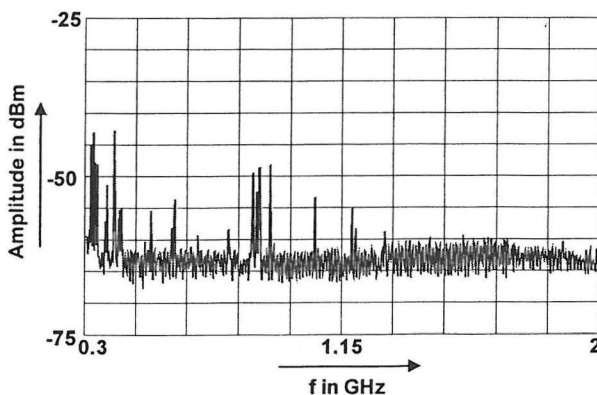


Fig. 3.2a:

Spektrum einer handels-  
üblichen Bohrmaschine,  
gemessen am Sensor 1

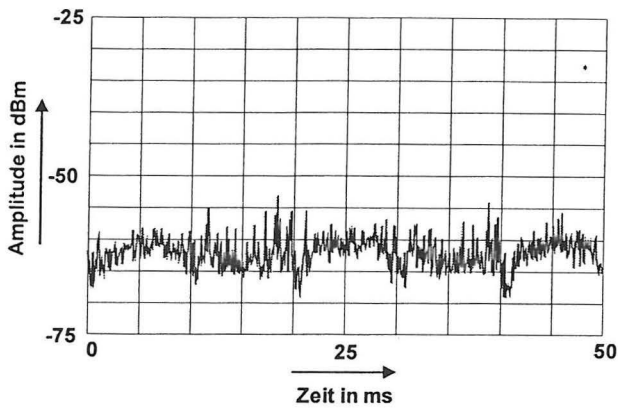


Fig. 3.2b:

Zero-Span-Messung der Bohrmaschine bei  $f = 398$  MHz

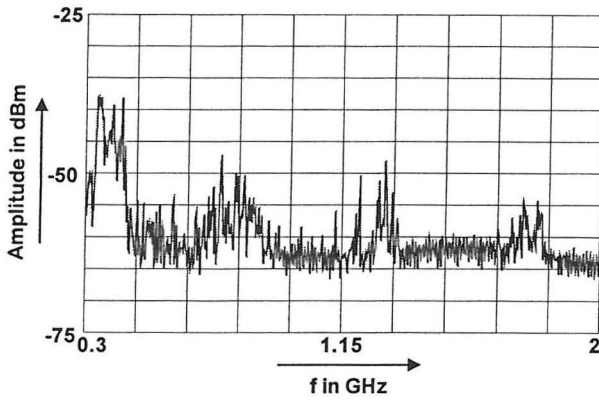


Fig. 3.3a:

Spektrum eines handelsüblichen Schleifers, gemessen am Sensor 2

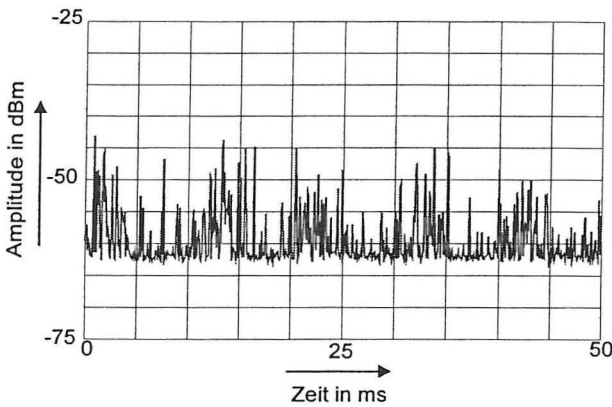


Fig. 3.3b:

Zero-Span-Messung des Schleifers bei  $f = 410$  MHz

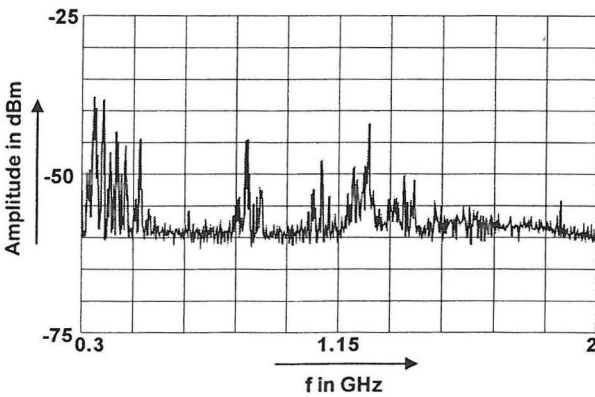


Fig. 3.4a:

Spektrum eines 1200 W Föns, gemessen am Sensor 2

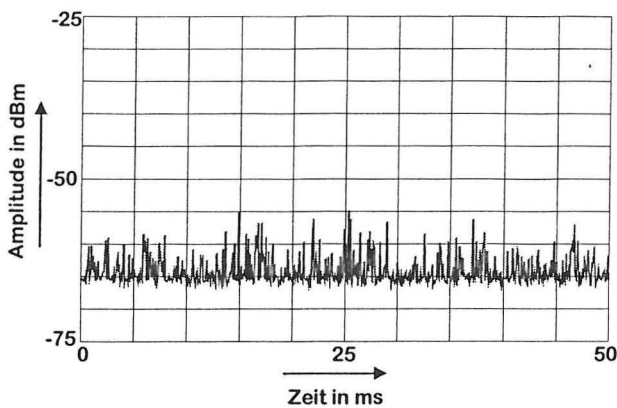


Fig. 3.4b:

Zero-Span-Messung des  
Föns bei  $f = 892 \text{ MHz}$

## 3.2 Einkopplung von Störungen in GIS

Bei der Betrachtung der Einkopplung von Störungen in GIS ist nicht nur die Frage, auf welchem Weg diese in die Anlage einkoppeln, von großer Bedeutung, sondern auch, welcher Anteil letztlich in das Meßsystem selbst einkoppelt. Um diese Frage zu klären, wurde das Meßsystem, bestehend aus dem Spektrumanalysator, einem 35 dB Vorverstärker und einem insgesamt 12 m langen doppelt geschirmten Kabel des Typs RG 214, von der Anlage abgetrennt und mit dem Wellenwiderstand abgeschlossen. Als Störquelle wurde der Schleifer verwendet. Vergleicht man das so erhaltene Störspektrum des Meßsystems (Fig. 3.5) mit dem bei angeschlossener Anlage (Fig. 3.3a), so erkennt man, daß der über das Meßsystem einkoppelnde Anteil im Störspektrum sehr gering ist.

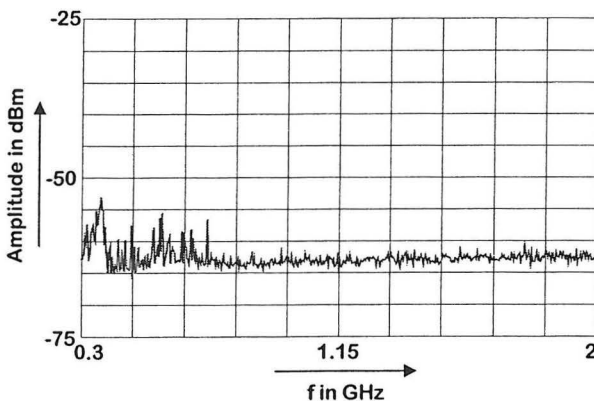


Fig. 3.5:

Einkopplung des Schleifers  
ins Meßsystem ohne GIS

Weitere Untersuchungen ergaben, daß die Störer in der Nähe des Prüftransformators und eines Schottisolators besonders stark in die Anlage einkoppelten. Beim mit einem Aluminiumring geschirmten Schottisolator lag dies am dem Störer zugewandten, mit einem Aluminiumplättchen zur Schirmung abgedeckten, Gußschlitz. Die Schirmwirkung des Plättchens reicht aus für Störer, die einen Abstand von mehr als einem Meter zum Schlitz haben. Ist der Abstand geringer, so ist ein erhebliches Einkoppeln des Störers feststellbar.

Durch Abklemmen der Spannungsversorgung sowie der Meßleitungen konnte am Prüftransformator keine Reduzierung der Störeinkopplungen erreicht werden. Durch das Abtrennen des Prüftransformators und des Koppelkondensators wurde ein vollständig metallisch gekapselter Aufbau erreicht. Er enthielt lediglich noch einen UHF-Sensor, dessen Meßleitung die einzige Öffnung in der metallischen Kapselung war. Die Störeinkopplung an einem Sensor selbst ist jedoch vernachlässigbar. Trotz der kompletten metallischen Schirmung und des Fehlens jeglicher Versorgungs- bzw. übriger Meßleitungen koppelten



die Störer noch deutlich meßbar in die Anlage ein. Dies deckt sich auch mit Erfahrungen von GIS-Herstellern. Die Störeinkopplungen ließen sich auch durch eine Veränderungen der Erdungsverhältnisse bzw. eine zusätzliche Schirmung der Stützisolatoren mit Kupferbändern nicht weiter reduzieren. Die Frage, auf welchem Weg elektromagnetische Störungen in GIS einkoppeln, kann noch nicht abschließend beantwortet werden.

## **4. Anwendung der UHF-Methode vor Ort**

### **4.1 Vor-Ort-Prüfungen**

Zur Gewährleistung der hohen Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von GIS werden TE-Messungen bei der Stückprüfung im Werk und optional auch bei der Abnahmeprüfung vor Ort durchgeführt. Die Stückprüfung umfaßt eine Wechselspannungsprüfung in Kombination mit einer empfindlichen TE-Messung nach der kalibrierbaren Standardmethode IEC 270. Bei der Abnahmeprüfung vor Ort kommt als Ergänzung zu den durchgeführten Wechsel- und Blitzstoßspannungsprüfungen eine TE-Messung nach der VHF-Methode /11/ oder UHF-Methode zum Einsatz /2/. Diese Methoden besitzen den Vorteil, daß kein Koppelkondensator zur Auskopplung der Signale benötigt wird, sondern die in die Anlage eingebauten Sensoren und ein tragbares Oszilloskop bzw. Spektrumanalysator zur Durchführung der Messungen ausreichend. Die Anwendung der Standardmethode IEC 270 ist nur bei Anlagen möglich, bei denen die Speisung der Wechselspannung nicht über eine Durchführung erfolgt.

Inzwischen werden Überlegungen angestellt, die Blitzstoßspannungsprüfung durch eine geeignete TE-Messung zu ersetzen /10, 13/. Dabei kommt der UHF-Methode eine besondere Bedeutung zu. Wie vergleichende Messungen schon mehrfach gezeigt haben /2, 11/, wird bei der UHF-Methode eine ähnlich gute Empfindlichkeit wie bei der IEC 270 Methode erreicht. Darüber hinaus ist die UHF-Methode wesentlich störunempfindlicher, da eine TE-Messung nach IEC 270 vor Ort durch starke Koronastörer erheblich beeinträchtigt wird. Voraussetzung für eine Anwendung der UHF-Methode ist jedoch, die fehlende Kalibriermöglichkeit durch ein geeignetes Verfahren zu ersetzen. Im Rahmen der CIGRE Task Force 15/33.03.05 wird ein Verfahren zum Nachweis der ausreichenden Empfindlichkeit von UHF-Meßsystemen intensiv diskutiert /14/.

### **4.2 Empfindlichkeitsnachweis für UHF-TE-Meßsysteme**

Wie bereits dargelegt, hängen die Ergebnisse und die Empfindlichkeit der UHF-Messung wesentlich vom Meßaufbau und dem Ausbreitungsverhalten zwischen der Fehlstelle und den Sensoren ab. Zudem wird die Amplitude des detektierten TE-Signals, wenn auch in geringerem Maße, noch von der Orientierung des Sensors relativ zur Fehlstelle beeinflusst /4/. Für die in einer GIS installierten Sensoren lassen sich daher keine allgemein gültigen Übertragungsfunktionen ermitteln, so daß aus den gemessenen Signalen die an der Fehlerstelle umgesetzte scheinbare Ladung nicht ermittelt werden kann. Aus diesem Grund ist eine Kalibrierung der UHF-Methode unmöglich. Daher ist für eine sinnvolle Anwendung der UHF-TE-Messung ein geeigneter Funktionsnachweis des Meßsystems für einen von der CIGRE geforderten TE-Pegel von 5 pC nach der IEC 270 Methode notwendig /14/.

Im Rahmen der gemeinsamen CIGRE Workinggroup 15/33 wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem ein Empfindlichkeitsnachweis eines UHF-Meßsystems geführt werden kann /14/. Bei Messungen mit einem Spektrumanalysator und einem 35 dB Vorverstärker an einer 362 kV Anlage (Fig. 4.1) konnte nachgewiesen werden, daß eine Nachbildung der UHF-TE-Signale realer Fehlstellen durch eine Einspeisung von sehr steiflankigen Impulsen geeigneter Amplitude möglich ist /15, 16/.

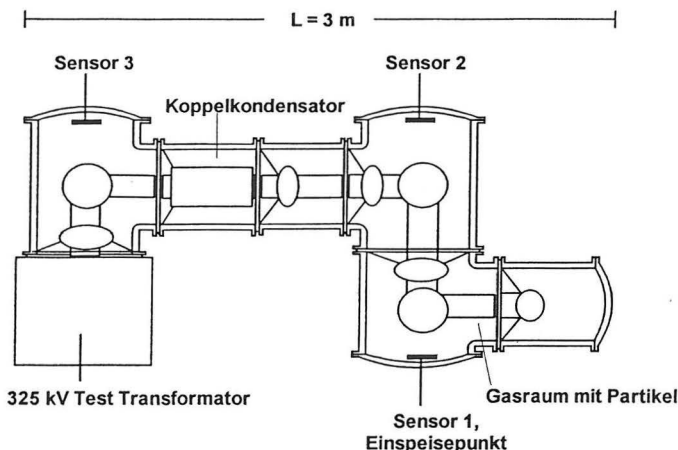


Fig. 4.1:  
Meßaufbau 362 kV Anlage

Zur Erzeugung der Impulse war ein einfacher Impulsgenerator mit variabler Amplitude und Quecksilberrelais ausreichend. Lediglich an die Anstiegszeit des eingespeisten Impulses werden gewisse Anforderungen gestellt, da nur ein Impuls sehr kleiner Anstiegszeit ein ausreichend hochfrequentes UHF-Spektrum erzeugt (Fig. 4.2) /16/. Darüber hinaus muß die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Impulsen groß genug sein, um eine Überlagerung mehrerer Impulse zu vermeiden.

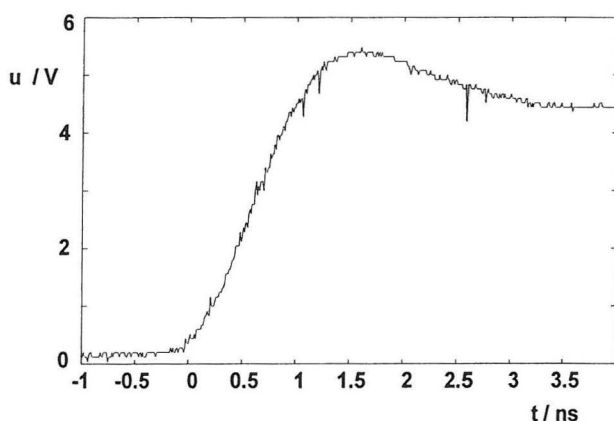


Fig. 4.2a:  
Ansteigende Flanke des Impulsgenerators

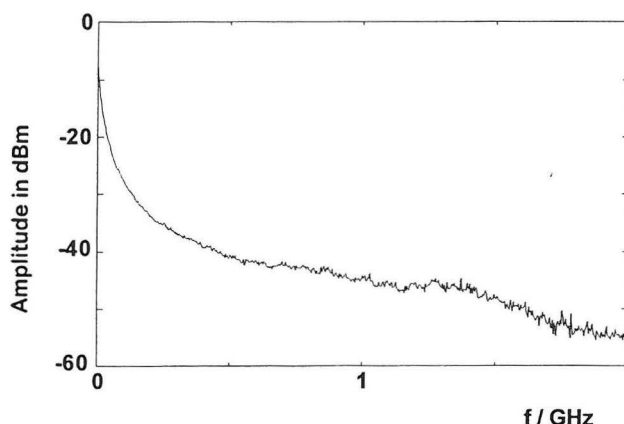


Fig. 4.2b:  
Frequenzspektrum des Impulsgenerators

Als Fehlstelle in der GIS wurden dabei ein bewegliches Partikel der Länge 3 mm mit einem Durchmesser von 0,5 mm untersucht, dessen Spektren bei einer anliegenden Wechselspannung aufgezeichnet wurden, bei der die Fehlstelle nach der IEC 270 Methode einen TE-Pegel von  $q = 5 \text{ pC}$  erzeugte. Durch einen Vergleich der gemessenen UHF-Spektren der Fehlstellen und der eingespeisten Impulse konnte die erforderliche Impulsamplitude ermittelt werden. In Figur 4.3 ist der Verlauf der UHF-Spektren eines beweglichen Partikels und des eingespeisten Impulses mit einer Amplitude von  $\hat{U} = 5 \text{ V}$  an

den Sensoren 2 und 3 beispielhaft dargestellt Für diesen Anlagentyp führte die Einspeisung eines Impulses mit einer Amplitude von 5 V zu einer guten Übereinstimmung der gemessenen Spektren.

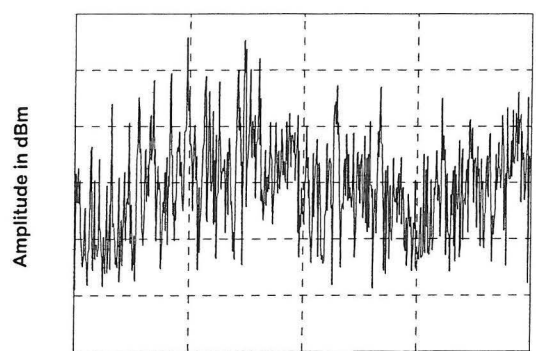


Fig. 4.3a:

Spektrum des beweglichen Partikels am Sensor 2

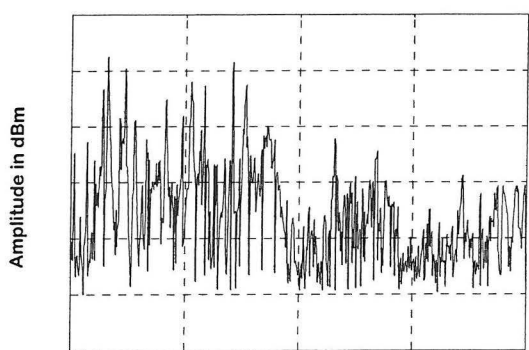


Fig. 4.3b:

Spektrum des am Sensor 1 eingespeisten Impulses von 5 V, gemessen am Sensor 2

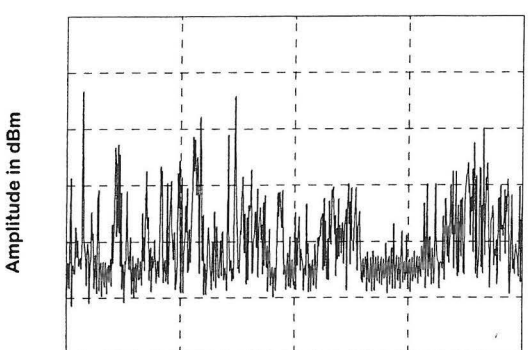


Fig. 4.3c:

Spektrum des beweglichen Partikels am Sensor 3

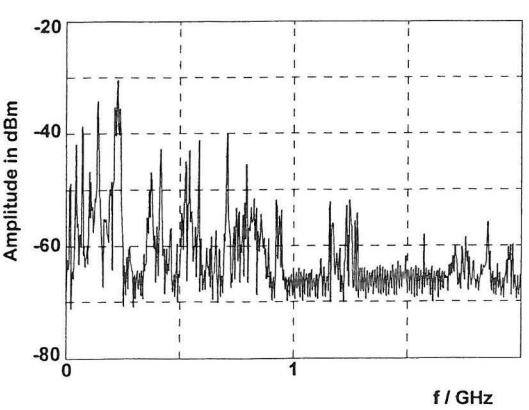


Fig. 4.3d:

Spektrum des am Sensor 1 eingespeisten Impulses von 5 V, gemessen am Sensor 3

Lediglich im Frequenzbereich oberhalb von 1,3 GHz wird das Spektrum des eingespeisten Impulses mit zunehmendem Abstand vom Einspeisepunkt deutlich geringer. Dies ist in der extremen Steilheit realer TE-Impulse begründet, die höhere TE- und TM-Wellenmoden anregen. Für das Nachweisverfahren ist dies jedoch ohne Belang, da unabhängig vom Frequenzbereich eine Mindestempfindlichkeit von 5 pC nachgewiesen werden kann.

Durch vergleichende Messungen an einer 420 kV Schaltanlage (Fig. 4.4) konnte die Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Baugrößen nachgewiesen werden [15]. Die Messungen wurden mit der gleichen Meßanordnung sowie dem selben beweglichen Partikel wie bei der 362 kV Schaltanlage durchgeführt. Zur Störunterdrückung war dem Vorverstärker ein 300 MHz Hochpaß vorgeschaltet.

Die gemessenen Spektren weisen für den Fall der Einspeisung eines Impulses mit einer Amplitude von 7 V eine gute Übereinstimmung auf. In Figur 4.5 sind beispielhaft die an Sensor 3 gemessenen Spektren dargestellt.

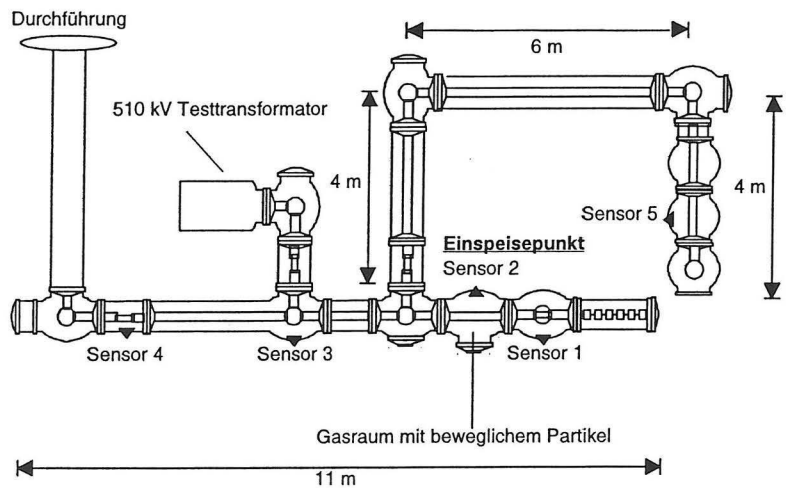


Fig. 4.4:  
Meßaufbau 420 kV Anlage

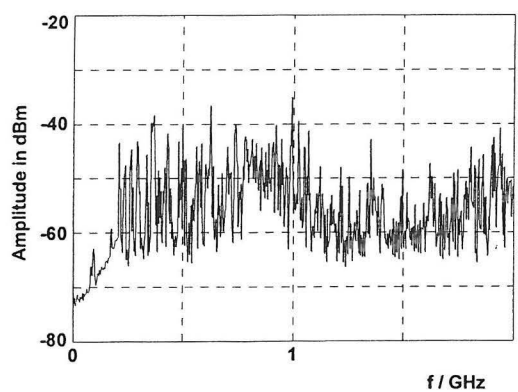


Fig. 4.5a:  
Spektrum des beweglichen Partikels am Sensor 3

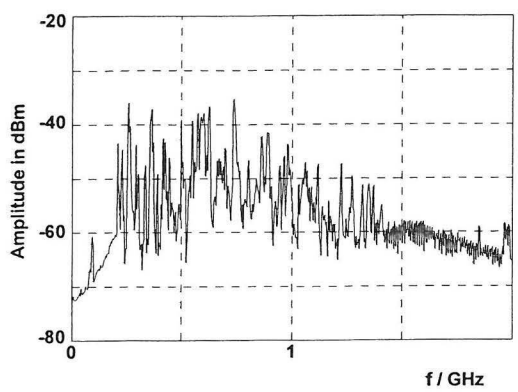


Fig. 4.5b:  
Spektrum des am Sensor 2 eingespeisten Impulses von 5 V, gemessen am Sensor 3

Die Unterschiede in der Amplitude wurden durch weitere Messungen an unterschiedlichen GIS-Anordnungen und unter Verwendung verschiedener Impulsgeneratoren bestätigt /17/. Die dabei gefundenen Werte für die Impulsamplitude liegen im Bereich zwischen 5 und 20 V. Darüber hinaus hängt dieser Wert auch vom Übertragungsverhalten der eingesetzten Sensoren ab.

Nach der beim Hersteller erfolgten Bestimmung des einzuspeisenden Impulses kann der Empfindlichkeitsnachweis an einer Anlage vor Ort unter Betriebsbedingungen durchgeführt werden. Wichtig ist dabei die Verwendung der gleichen Meßausrüstung wie sie auch bei der Impulsbestimmung verwendet wurde. Kann ein am Sensor A eingespeister Impuls (Fig. 4.6) am Sensor B gemessen werden, so ist eine ausreichende Empfindlichkeit nachgewiesen. Da der Abstand zwischen den Sensoren und einer möglichen Fehlstelle bei einer mit der Wechselspannungsprüfung erfolgenden UHF-TE-Messung maximal die Hälfte des Abstandes der beiden Sensoren betragen kann, ist eine Sicherheit gegen eventuelle Unwägbarkeiten des Empfindlichkeitstestes gegeben /14/.

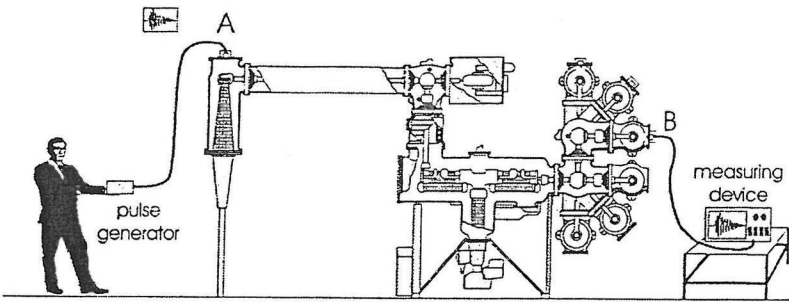


Fig. 4.6:  
Empfindlichkeitsnachweis  
für die UHF-Messung an  
GIS /14/

Ein solcher Empfindlichkeitstest muß neben beweglichen Partikeln auch für feststehende Spitzen auf den Elektroden untersucht werden. Ein Nachweis der Empfindlichkeit für Lunker in Stützisolatoren ist nicht notwendig, da diese bereits bei der Stückprüfung im Werk erkannt werden.

Messungen an der 362 kV Anlage (Fig. 4.1) haben ergeben, daß dieses Vorgehen auch bei feststehenden Spitzen anwendbar ist. Der Wert der Impulsamplitude liegt allerdings bei gleicher geforderter Empfindlichkeit von 5 pC nach IEC 270 deutlich unter dem für ein bewegliches Partikel. In Figur 4.7 sind die an Sensor 3 gemessenen Spektren einer 10 mm langen Spitze auf dem Innenleiter und eines mit einer Amplitude von 2 V am Sensor 1 eingespeisten Impulses dargestellt. Die Spitze hatte einen Durchmesser von 0,5 mm und der Wert der angelegten Spannung betrug 210 kV.

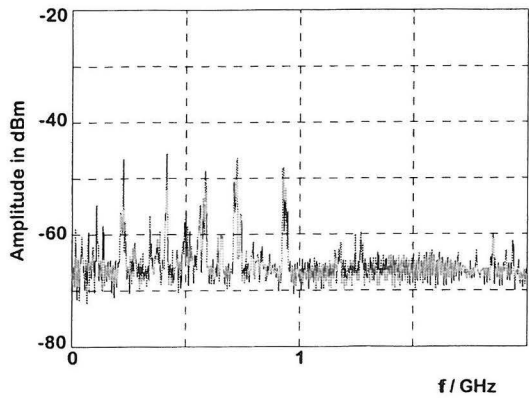


Fig. 4.7a:  
Spektrum der Spitze auf  
dem Innenleiter am Sen-  
sor 3



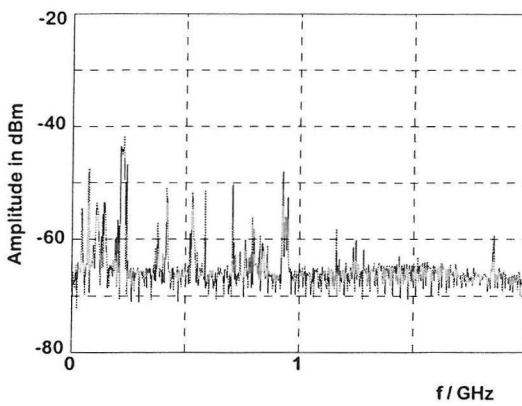


Fig. 4.7b:

Spektrum des am Sensor 1 eingespeisten Impulses von 2 V, gemessen am Sensor 3

### 4.3 UHF-TE-Überwachungssysteme

Sind GIS-Anlagen mit Sensoren ausgerüstet, so ist eine ständige TE-Überwachung mit der UHF-Methode möglich. In Figur 4.8 ist das Übersichtsschaltbild eines breitbandigen UHF-TE-Empfängers, bestehend aus einem HF-Teil zum Empfang der hochfrequenten TE-Signale und einem NF-Teil zur anschließenden Signalverarbeitung und Datenübertragung, einkanalig dargestellt [2]. Eine sinnvolle TE-Überwachung ist aber nur durch die gleichzeitige Erfassung mehrerer in der Anlage installierter Sensoren möglich, die durch die Verwendung eines Multiplexers realisierbar ist.

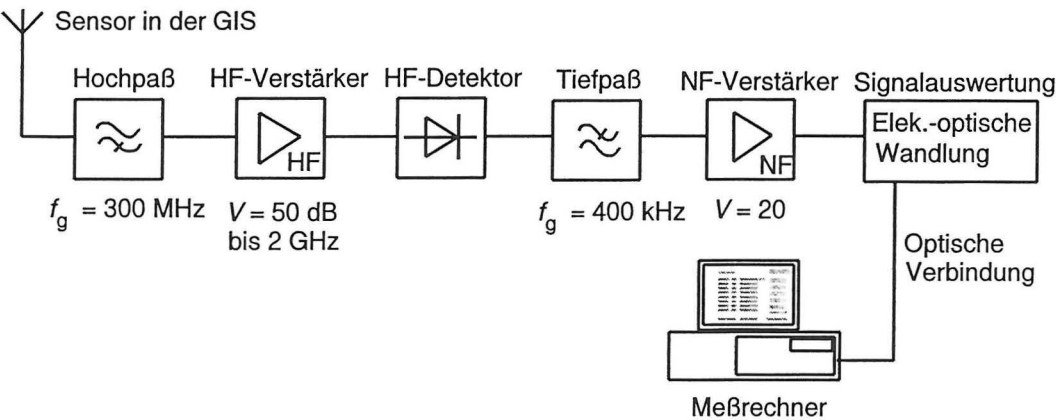


Fig. 4.8:

Prinzipieller Aufbau eines Breitband-Monitoring-systems

Zur Unterdrückung der Koronastörungen erfolgt zunächst eine 300-MHz-Hochpaßfilterung. Das von einem HF-Verstärker um mindestens 50 dB verstärkte TE-Signal wird breitbandig von einem HF-Detektor erfaßt. Die angegebene obere Bandgrenze von 2 GHz stellt eine Obergrenze dar. Eine größere Bandbreite ist nicht sinnvoll, je nach Anlage ist vielmehr eine obere Bandgrenze von 1,3 bis 1,5 GHz ausreichend. Am HF-Detektorausgang steht ein TE-Zeitsignal zur Verfügung, das im anschließenden NF-Teil tiefpaßgefiltert wird. Die obere Grenzfrequenz von 400 kHz wurde dabei so gewählt, daß man eine zur IEC 270 Methode vergleichbare Bandbreite erhält. Das zur phasenrichtigen Darstellung der UHF-Signale notwendige 50 Hz Wechselspannungssynchronisierungssignal kann direkt aus der Meßleitung kapazitiv ausgekoppelt werden.

Eine optische Übertragungsstrecke ermöglicht eine störungssichere Verbindung zu einem Rechner, der die Meßdaten aufzeichnet, auswertet und protokolliert. Die aus anderen Bereichen der TE-Signaldarstellung bekannten Verfahren wie der Darstellung der Impulshäufigkeit in Abhängigkeit der Zeit und der Amplitude können auch auf die UHF-Methode

angewandt werden /12, 18/. Damit kann die Entwicklung einer TE-Aktivität über einen längeren Zeitraum hinweg nachvollzogen werden. Unregelmäßigkeiten in den aufgezeichneten TE-Signalen können mit einem auf dem Rechner installierten automatischen TE-Diagnosesystem ausgewertet werden. Das Auftreten von TE kann somit über eine Modemverbindung zur On-Line-Datenfernübertragung an eine zentrale Leitstelle gemeldet werden, wo dann weitere Maßnahmen veranlaßt werden können. Eine Lokalisierung des fehlerbehafteten Gasraums mit der UHF-Methode ist allerdings nur bedingt möglich. Besser geeignet zur Fehlerortung ist die akustische TE-Messung /13/.

Um die Zuverlässigkeit der automatischen Klassifizierung zu verbessern, können mehrere unterschiedliche Klassifikationsalgorithmen verwendet werden. Aus diesen verschiedenen Klassifikationsalgorithmen kann ein zuverlässiges redundantes TE-Diagnosesystem aufgebaut werden /18/. Als besonders geeignet hat sich dabei die Verwendung der Fourier-, Haar- und Walsh-Hadamard-Transformationskoeffizienten erwiesen. Eine Klassifizierung ist mit Hilfe eines Neuronalen Netzes (Backpropagation Netz), der Fuzzy Logik oder eines herkömmlichen Expertensystems möglich.

Die von Trennerschaltungen ausgelösten VFT können, insbesondere bei Anlagen ab 400 kV, zu einem Absturz oder gar einer Schädigung des Überwachungssystems führen. Ein wirksamer Schutz ist aufgrund der kurzen Antiegszeit der einlaufenden VFT nur mit Hilfe von sehr schnellen Dioden oder Ableitern möglich. Andererseits darf die Schutzbeschaltung den Frequenzgang des Meßsystems nicht nachhaltig beeinträchtigen.

Ein weiteres Problem bei der TE-Überwachung an GIS ist die Unterscheidung der TE-Signale von auftretenden Störsignalen. Bei einphasig gekapselten Anlagen läßt sich dies durch eine gleichzeitige Überwachung aller drei Phasen leicht realisieren, da Störer üblicherweise in allen drei Phasen meßbar sind, während TE-Signale nur in der Phase nachweisbar sind, in der ihre Ursache liegt. Ist eine Anlage jedoch teilweise (z. B. Sammelschiene) oder komplett dreiphasig gekapselt, so ist eine Störsignalerkennung nur mit erheblich mehr Aufwand durchführbar.

Ältere Schaltanlagen, die noch nicht über entsprechende Flansche zur Nachrüstung mit UHF-Sensoren verfügen, können mit Hilfe von Fenstersensoren überwacht werden /3/. Diese UHF-Sensoren können von außen auf in der Anlage vorhandene Schaugläser angebracht werden. Die Empfindlichkeit dieser Sensoren hängt dabei entscheidend vom Durchmesser und der Länge des Schauglasflansches ab /19/. Aufgrund des Hochpaßverhaltens der Anordnung kommt es zu einer erheblichen Dämpfung der elektromagnetischen Welle, die beispielsweise bei 1 GHz ungefähr 300 dB/m beträgt /3/.

Eine On-line-TE-Überwachung von GIS ist grundsätzlich auch mit der Schmalbandmethode möglich. Das Auswertungsprinzip ist ähnlich, die Schwierigkeit liegt aber in der automatischen Anpassung der Mittenfrequenz an das sich je nach Defektart und -ort ändernde Frequenzspektrum.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Für die TE-Messung zur Prüfung einer GIS-Einheit im Werk, nach erfolgter Installation vor Ort sowie zur Überwachung im Betrieb sind verschiedene Meßverfahren geeignet. Die UHF-Methode ist sowohl für die Vor-Ort-Prüfung als auch zur ständigen TE-Überwachung von GIS einsetzbar.

Für eine TE-Messung im Werk eignet sich nach heutigem Stand die IEC 270 Methode aufgrund ihrer Kalibrierbarkeit am besten. Die UHF-Methode ist lediglich für die Stückprüfung von Stützisolatoren von Interesse.

Bei Vor-Ort-Wechselspannungsprüfungen ist die IEC 270 Methode wegen ihrer Kalibrierbarkeit und der Vergleichbarkeit mit Werksprüfungen interessant. Aufgrund der Einkopplung elektromagnetischer Störungen sind empfindliche Messungen vor Ort aber nur an gekapselten Prüfaufbauten oder bei GIS mit Kabelausleitungen möglich. Die UHF-Methode hingegen ist wesentlich störunempfindlicher. Sie ergibt zwar kein kalibriertes Meßergebnis, läßt aber einen empfindlichen Nachweis und bedingt auch eine Lokalisierung von TE zu. Mit Hilfe des beschriebenen Verfahrens ist ein Nachweis der ausreichenden Empfindlichkeit der UHF-Methode anstelle einer Kalibrierung möglich. Damit ist eine wichtige Voraussetzung zur verstärkten Nutzung der UHF-Methode bei der Vor-Ort-Prüfung erfüllt. Bevor jedoch die Stoßspannungsprüfung durch eine TE-Messung ersetzt werden kann, sind sicherlich noch weitere Erkenntnisse und Erfahrungen im Umgang mit der UHF-Methode vonnöten. Als weiteres TE-Meßverfahren bei der Vor-Ort-Prüfung steht die akustische TE-Messung zur Verfügung. Sie ist zwar ebenfalls sehr empfindlich, durch den hohen zeitlichen Aufwand letztlich aber wohl nur für die Fehlerortung von Bedeutung.

Die TE-Überwachung von GIS im Betrieb gewinnt zunehmend an Bedeutung, um die hohe Zuverlässigkeit der Anlagen noch weiter zu verbessern und die bei einem Ausfall der Anlage anfallende Kosten zu reduzieren. Aus heutiger Sicht ist die UHF-Methode das einzige zum dauerhaften TE-Monitoring an GIS geeignete Verfahren. Die vorgestellte Empfindlichkeitsprüfung ermöglicht es auch, den Nachweis der ausreichenden Empfindlichkeit eines installierten Überwachungssystems zu führen. Eine weitere Verbesserung der Zuverlässigkeit von TE-Diagnoseverfahren und des Schutzes der Überwachungseinrichtungen vor VFT werden zu einem verstärkten Einsatz der UHF-Methode zum On-line-Monitoring an GIS führen. Darüber hinaus wird sowohl die Entwicklung von zuverlässigen Verfahren zur Risikoabschätzung als auch weitere Untersuchungen zu den theoretischen Grundlagen wie z. B. den Dämpfungsvorgängen in GIS Gegenstand zukünftiger Forschungen sein.

## 6. Literatur

- /1/ IEC Publikation 270 "Teilentladungsmessung", 1981
- /2/ R. Kurrer: "Teilentladungsmessung im Gigahertz-Frequenzbereich an SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen", Dissertation Universität Stuttgart, 1996
- /3/ M.D. Judd, B.F. Hampton, W.L. Brown: "UHF Partial Discharge Monitoring for 132 kV GIS", 10. ISH, Montreal, 1997
- /4/ M.D. Judd, O. Farish, B.F. Hampton: "The Excitation of UHF Signals by Partial Discharges in GIS" IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.3 No. 2, April 1996
- /5/ H. Muto, M. Doi, H. Fujii, M. Kamei: "Frequency Spectrum Due to Standing Waves Excited by Partial Discharges in a GIS", 10. ISH, Montreal, 1997
- /6/ K. Mizuno, A. Ogawa, K. Nojima, H. Murase, H. Koyama, S. Wakabayashi, T. Sakakibara: "Investigation of PD Pulse Propagation Characteristics in GIS", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No.2, May 1997
- /7/ G. Wanninger: "Influence of GIS Components on the UHF Signal - The Powerflow Model", CIGRE Task Force 15/33.03.05, IWD 50, München 1997
- /8/ G. Wanninger, W. Boeck: "Damping Characteristics for the UHF Signal Transfer", 10. ISH, Montreal, 1997
- /9/ Bedienungsanleitung zum Programm FEKO, Institut für Hochfrequenztechnik, Universität Stuttgart, Version 31.95, Nov. 1997
- /10/ G.J . Behrmann, S. Neuhold, R. Pietsch: "Results of UHF Measurements in a 220 kV GIS Substation during On-Site Commissioning Tests", 10. ISH, Montreal, 1997
- /11/ N. de Kock, B. Coric, R. Pietsch: "UHF PD Detection in Gas-Insulated Switchgear - Suitability and Sensitivity of the UHF Method in Comparison with the IEC 270 Method", IEEE Electrical Insulation Magazine, Nov./Dec. 1996, Vol. 12, No. 6
- /12/ S. Meijer, E. Gulski, J.J. Smit, R. Brooks: "Comparison of Conventional and VHF/UHF Partial Discharge Detection Methods for SF<sub>6</sub> Gas Insulated Systems", 10. ISH, Montreal 1997
- /13/ H.D. Schlemper: "Akustische und Elektrische Teilentladungsmessung zur Vor-Ort-Prüfung von SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen", Dissertation Universität Stuttgart, 1997
- /14/ CIGRE Task Force 15/33.03.05: "A Sensitivity Check for Partial Discharge Measurements on GIS in the UHF Range", IWD 64, 1997
- /15/ R. Feger, R. Kurrer, K. Feser: "Application of UHF-Impulses for the Testing of UHF PD Measurement Systems applied to Gas-Insulated Substations", CIGRE Task Force 15/33.03.05, IWD 56, München 1997

- /16/ R. Kurrer, R. Feger, K. Feser: " The Application of UHF-Impulses for Testing UHF PD Measurement Systems applied to Gas-Insulated Substations", CIGRE Task Force 15/33.03.05, IWD 47, Dubai 1997
- /17/ Gec Alsthom: "Test Report", CIGRE Task Force 15/33.03.05, IWD 52, München 1997
- /18/ T. Hücker: "Computergestützte Teilentladungsdiagnostik unter praxisrelevanten Randbedingungen", Dissertation Universität Wuppertal, 1996
- /19/ M.D. Judd, O. Farish, P.F. Coventry: "UHFCouplers for GIS - Sensitivity and Specification", 10. ISH, Montreal, 1997
- /20/ C. Maulat, E. Fernandez, P. Almosnino: "Sensitivity of Electrical Partial Discharge Measuring Methods on GIS with External Disturbances: Experimental Comparison on Conventional Method, UHF Wide Band and Narrow Band Methods", 10. ISH, Montreal, 1997