

# Die 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, 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 zwei abweichende alternative Verfahren festgelegt, die neben einer Wechselspannungsprüfung auch eine Stoßspannungsprüfung beinhalten (Fig. 1) [1].

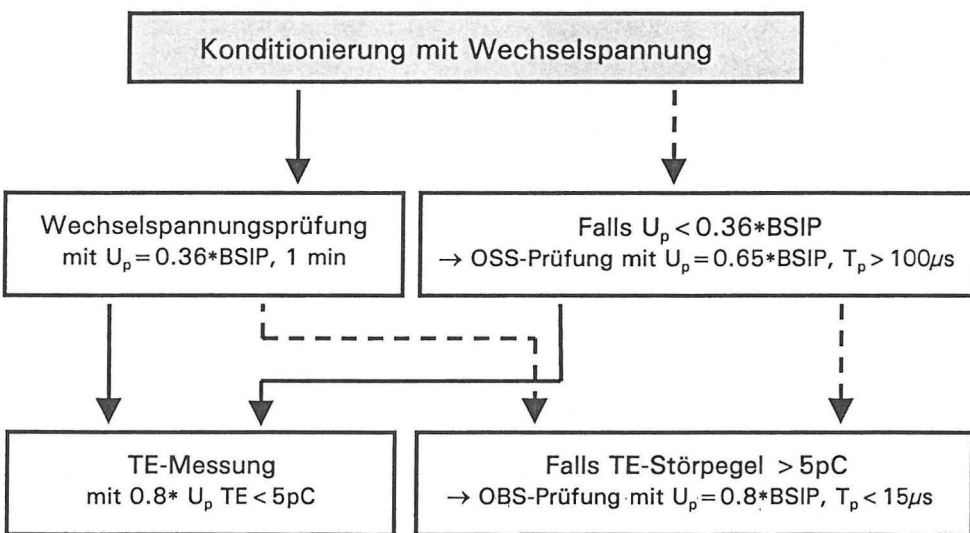


Fig. 1:

Vorschlag für die  
Vor-Ort-Prüfung von  
GIS  
CIGRE WG 33/23,  
1997

Mit einer empfindlichen Teilentladungsmessung vor Ort könnten Partikel und andere potentielle Fehlerquellen mit größerer Sicherheit erkannt werden [2]. Gleichzeitig kann durch rechtzeitiges Abschalten ein Prüfdurchschlag vermieden werden. Die Gefahr von Sekundärüberschlägen und der Reparaturaufwand für das Austauschen beschädigter Anlagenteile 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 bisher 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. Alternativ dazu haben sich andere Detektions- und Ortungsmethoden, allen voran die UHF-Methode, als sehr

störsicher herausgestellt. Durch eine Kombination dieser Methoden ist eine sinnvolle Teilentladungsprüfung vor Ort in den meisten Fällen möglich.

Der Betriebszustand gasisolierter Schaltanlagen wird ständig überwacht. Ziel dieser ständigen Überwachung ist:

- Steigerung der Verfügbarkeit der Anlagen durch eine rechtzeitige Erkennung von Fehlern
- Reduzierte Wartungskosten durch zustandsorientierte Wartung
- Fehleranalyse zur schnellen Instandsetzung im Fehlerfall

Neben dem Zustand der in der Anlage befindlichen Leistungsschalter mit ihren Peripheriegeräten und der  $\text{SF}_6$ -Gasdichte bzw. der Leckage wird mit Hilfe der Teilentladungsmessung der dielektrische Zustand der GIS ermittelt. Von den bisher bekannten Verfahren zur Teilentladungsmessung ist nach heutigem Stand lediglich die UHF-Methode zum dauerhaften On-line-Monitoring geeignet. Mittels breitbandiger UHF-Empfänger werden die von in den Anlagen installierten Scheibensensoren erfassten Teilentladungssignale aufgezeichnet und durch geeignete Auswerte- und Diagnosesoftware ausgewertet. Die Empfindlichkeit solcher Monitoringssysteme kann durch das inzwischen von CIGRE beschlossene Zweischnitt-Verfahren nachgewiesen werden [3]. Bei älteren GIS, die nicht über die zur Installation von UHF-Sensoren notwendigen Flansche verfügen, können Scheibensensoren von außen auf die vorhandenen Trennerschaugläser angebracht werden. Mit diesen Fenstersensoren ist sowohl eine kurze Teilentladungsmessung zu Kontrollzwecken als auch ein dauerhaftes Monitoring der Anlage möglich.

Der folgende Beitrag gibt einen kurzen Vergleich der gängigsten TE-Messverfahren hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit und Tauglichkeit bei Vor-Ort-Messungen. Im Anschluss daran werden Erfahrungen und Ergebnisse aus Untersuchungen mit verschiedenen Fenstersensoren vorgestellt. Abschließend wird ein breitbandiges UHF-TE-Monitoringsystem diskutiert und über erste Erfahrungen aus dem Einsatz vor Ort berichtet.

## 2 TE-Messverfahren zur Vor-Ort-Prüfung von GIS

### 2.1 Kritische Fehlstellen bei der Vor-Ort-Prüfung

Bei der Vor-Ort-Prüfung von gasisolierten Schaltanlagen können verschiedene Defektarten auftreten, die sowohl in ihrem TE-Pegel als auch in ihrem Gefährdungspotential deutliche Unterschiede aufweisen. Die weitaus häufigste Defektart sind bewegliche Partikel, die in Form von Metallspänen beim Zusammenbau in die Anlage gelangen. Sie sind ab einer Länge von ca. 5 mm kritisch bei Wechsellspannung, erzeugen jedoch bei der angelegten Prüfspannung im allgemeinen einen relativ hohen TE-Pegel von 5 – 10 pC, so dass sie relativ leicht erkannt werden können. Mit der Zeit können bewegliche Partikel auch im laufenden Betrieb der Anlagen entstehen, indem entweder von beweglichen Teilen (Trennerkontakte etc.) Metallspäne abgeschert werden oder indem durch eine in der Anlage aufgetretenen Stoßspannung bereits vorhandene Partikel aus dem feldschwachen Raum bewegt wurden, wo sie während der Stoßspannungsprüfung unentdeckt blieben. Diese Partikel im Betrieb zu detektieren ist Aufgabe eines TE-Monitoringsystems.

Unachtsamkeiten beim Zusammenbau können zu feststehenden, leitfähigen Spitzen an der Innenelektrode führen, die insbesondere bei Steilstoß- oder Blitzstoßspannungen eine erhebliche Gefährdung der Isolationsfestigkeit der Anlagen darstellen. Da die kritische Länge der Spitze bereits im Bereich von unter 2 mm liegt und somit der TE-Pegel im Normalfall ebenfalls sehr gering ( $< 2$  pC) ist, können diese Defekte nur durch eine Stoßspannungsprüfung oder aber eine sehr empfindliche TE-Messung detektiert werden. Durch geeignete Maßnahmen zur Qualitätssicherung kann das Auftreten dieser Fehler jedoch deutlich reduziert werden.

Weiterhin können an den Stütz- und Schottisolatoren der Anlage Defekte durch Partikel auf der Oberfläche oder kleinen Hohlräumen im Inneren der Isolatoren auftreten. Letzteres stellt für moderne GIS kein Problem mehr dar, da defekte Isolatoren bereits bei der Stückprüfung im Werk ohne Schwierigkeiten entdeckt und ausgesondert werden. Partikel auf der Isolatorenoberfläche beeinträchtigen schon ab einer Länge von ca. 1 mm die Isolationsfestigkeit bei Blitzstoß- wie auch bei Wechsellspannung. Daher ist es wichtig, in der Anlage befindliche Partikel zu detektieren, bevor diese auf einer Stützeroberfläche anhaften können.

### 2.2 Konventionelle TE-Messung nach IEC 60270

Die konventionelle TE-Messung nach IEC 60270 ist immer noch das am häufigsten eingesetzte TE-Messverfahren, da es neben der Stückprüfung für GIS auch an anderen Betriebsmitteln seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt wird. Aus diesem Grund besitzen sowohl die Hersteller als auch die EVUs die größte Erfahrung in der Anwendung dieses Verfahrens.

Die Empfindlichkeit der konventionellen TE-Messung vor Ort hängt in starkem Maße vom bestehenden Prüfaufbau ab. Die Messung erfolgt mittels eines extern oder gekapselt angeschlossenen Koppelkondensators. Bei vollständig gekapselten Prüfaufbauten, die sich allerdings nur bis zu Nennspannungen von 245 kV realisieren lassen, ist ein Hintergrundstörpegel von unter 2 pC gut erreichbar. Bei höheren Nennspannungen reicht die Leistung gekapselter Prüftransformatoren nicht mehr aus, so dass statt dessen Resonanzanlagen oder Prüftransformatoren größerer Leistung über eine Freiluftdurchführung angeschlossen werden. Durch geeignete Störunterdrückungsverfahren, wie z. B. einem adaptiven Digitalfilter, lassen sich jedoch auch für diese offenen Aufbauten ausreichend gute Empfindlichkeiten erreichen. Da die TE-Signale in der Anlage im betrachteten Frequenzbereich (40-400 kHz) nicht gedämpft werden, kann dieses Verfahren kalibriert werden. Eine detaillierte Übersicht über die erreichbare Empfindlichkeit für verschiedene Prüfaufbauten mit und ohne Filterung kann [2] entnommen werden.

## 2.3 Akustische TE-Messung

Die akustische TE-Messung ist eine weitere an GIS anwendbare TE-Messmethode. Sie ist besonders empfindlich für bewegliche Partikel, da bei Spitzen die Signale durch die starke Absorption der Schallenergie im SF<sub>6</sub> stärker gedämpft werden [2]. Die Messung kann mit Schallemissionssensoren oder Beschleunigungsaufnehmern erfolgen. Die akustische Methode ist unempfindlich gegen vor Ort auftretende elektromagnetische Störer, wie z.B. Koronastörer. Da die Methode nicht kalibrierbar ist, wurde von der CIGRE Working Group WG 15/33.03.05 [3] ein Verfahren entwickelt, mit dem die Empfindlichkeit von akustischen Messsystemen nachgewiesen werden kann. Das Verfahren ist im Prinzip ähnlich dem für die UHF-Methode, weshalb hier auf eine ausführliche Darstellung verzichtet wird. Der Messbereich ist aufgrund der starken Dämpfung durch Stütz- bzw. Schottisolatoren auf einen Gasraum beschränkt, so dass eine Vor-Ort-Prüfung einer kompletten GIS-Anlage sehr zeitaufwendig und somit nicht praktikabel ist. Die akustische TE-Messung ist vielmehr zur Ortung von eventuell während der Prüfung auftretenden Fehlstellen geeignet.

## 2.4 UHF-TE-Messung

### 2.4.1 Die UHF-Methode zur Vor-Ort-TE-Messung

Die TE-Messung an GIS mit Hilfe der UHF-Methode wurde in den letzten Jahren intensiv untersucht und hat sich in der Zwischenzeit als gängiges TE-Messverfahren etabliert. Die TE-Signale werden in einem Frequenzbereich zwischen 300 MHz und 3 GHz mit in Montage- oder Erderflanschen angebrachten flachen Scheibensensoren gemessen. Bei älteren Anlagen, die nicht über entsprechende Flansche zur Nachrüstung solcher Sensoren verfügen, können die TE-Signale auch mittels an Trennerschaugläsern angebrachten Fenstersensoren gemessen werden.

Vergleichende Untersuchungen [4] haben gezeigt, dass die UHF-Methode insbesondere für die am weitest häufigsten auftretende Fehlstelle, einem frei beweglichen Partikel, eine gleich gute Empfindlichkeit aufweist wie die konventionelle TE-Messung nach IEC 60270 (Fig.2). Da die UHF-Methode jedoch aufgrund des Frequenzbereiches von vor Ort auftretenden Koronastörern unbeeinflusst bleibt, eignet sie sich auch zur TE-Messung an teilgekapselten oder offenen Prüfaufbauten.

Die TE-Messungen können dabei sowohl im Frequenzbereich mit einer Bandbreite von wenigen MHz (das sogenannte Schmalbandverfahren) als auch im Zeitbereich über einen breiten Frequenzbereich bis 2 GHz (Breitbandverfahren) durchgeführt werden (Fig. 3). Beim Schmalbandverfahren erhält man die Frequenzspektren der TE-Signale mittels eines Spektrumanalysators und rauscharmer Vorverstärker. Beim Breitbandverfahren werden die TE-Signale mit Hilfe eines UHF-Spitzenwert-Detektors gemessen und von einem geeigneten TE-Messgerät in Form eines PRPD-Musters dargestellt, das dem der konventionellen TE-Messung entspricht. Zur Unterdrückung der Koronastörer und zu Schutzzwecken sollte ein Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von ca. 250-300 MHz verwendet werden.



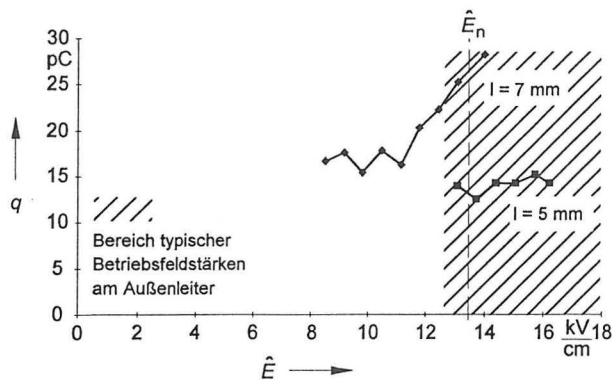


Fig. 2a:

TE-Pegel für frei bewegliche Partikel der Länge  $l = 5$  und  $7$  mm, gemessen mit IEC-Methode

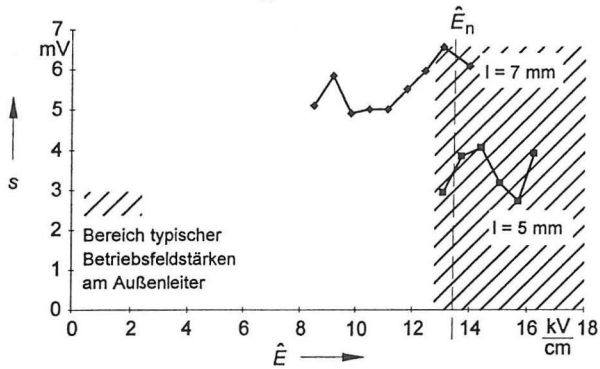


Fig. 2b:

UHF-TE-Signalamplitude bei der Mittenfrequenz  $f = 1,29$  GHz für frei bewegliche Partikel der Länge  $l = 5$  und  $7$  mm

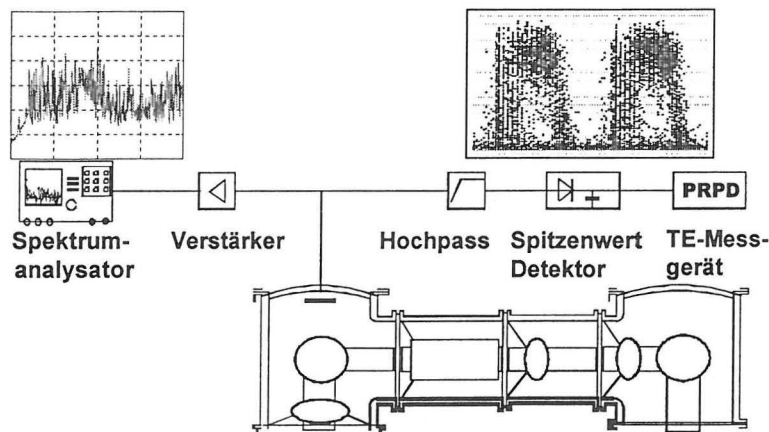


Fig. 3:

Prinzip des Schmalband- (links) und Breitband- (rechts) UHF-TE-Messverfahrens mit typischen Signalbildern

### 2.3.2 Empfindlichkeitsnachweis für UHF-Messsysteme

Teilentladungen in GIS regen elektromagnetische Wellen an, die sich in dem aus Innenleiter und Kapselung gebildeten Koaxialleiter ausbreiten. Aufgrund der sehr kurzen Anstiegszeit der TE-Impulse werden nicht nur Wellen im TEM-Mod, sondern auch in den sogenannten höheren Moden (TE- und TM-Moden) angeregt. Reflexionen an verschiedenen Unstetigkeitsstellen (Isolatoren, T-Stücke, etc.) führen zur Ausbildung von stehenden Wellen und komplexen Resonanzen in der Anlage.

Das gemessene TE-UHF-Signal hängt somit von der Anlagenform, der Fehlerart und -position sowie dem Sensor ab. Aus diesem Grund ist die UHF-Methode im Gegensatz zum konventionellen Verfahren nicht kalibrierbar. Im Rahmen der CIGRE Working Group WG 15/33.03.05 wurde jedoch ein zweistufiges Verfahren zum Nachweis der Empfindlichkeit von UHF-Messsystemen entwickelt [3]. Im Folgenden soll dieses Verfahren in seinen wesentlichen Zügen nochmals kurz erläutert werden.

Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Impuls entsprechender Charakteristik, der an einem UHF-Sensor in die GIS eingespeist wird, ein ähnliches Frequenzspektrum erzeugt wie ein bewegliches Partikel (welches der mit Abstand am häufigsten vorkommende Defekt ist). Die Anstiegszeit des Impulses muss unter einer Nanosekunde liegen, die Wiederholfrequenz unterhalb 100 kHz und die Rückenhalbwertszeit sollte mehrere zehn Nanosekunden betragen, je nach Form des Impulses. In einem ersten Schritt im Labor ist die Amplitude des einzuspeisenden Impulses zu ermitteln. Dazu wird zunächst das Frequenzspektrum eines sich im Gasraum mit einem Sensor befindlichen beweglichen Partikels aufgezeichnet, das ein TE-Pegel von 5 pC nach IEC 60270 erzeugt. Anschließend werden Impulse unterschiedlicher Amplitude an diesem Sensor eingespeist, und die erhaltenen Spektren werden mit dem des beweglichen Partikels verglichen, bis die Spektren mit einer akzeptablen Abweichung von 20% übereinstimmen (Fig. 4 und 5).

Für den zweiten Schritt, dem Nachweis der Empfindlichkeit vor Ort, muss dieselbe Messausrüstung wie im Labor verwendet werden. Impulse mit der im Labor gefunden Form und Amplitude werden vor Ort in einen Sensor der Anlage eingespeist. Kann das Signal an benachbarten UHF-Sensoren gemessen werden, so ist eine ausreichende Empfindlichkeit der UHF-TE-Messung von 5 pC zwischen den Sensoren nachgewiesen. Diese Empfindlichkeit ist ausreichend für bewegliche Partikel, wohingegen für andere Defektarten eine wesentlich höhere Empfindlichkeit erforderlich ist.

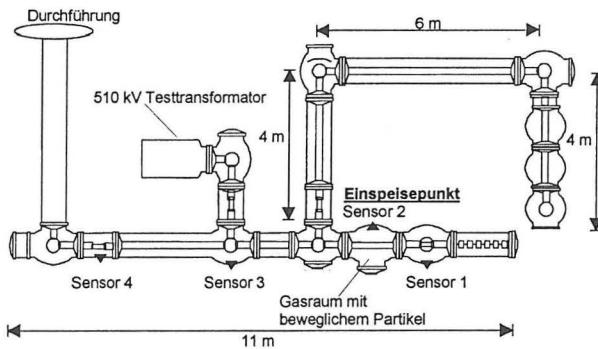


Fig. 4:

Testaufbau der 420 kV GIS mit der Lage der Sensoren und des beweglichen Partikels

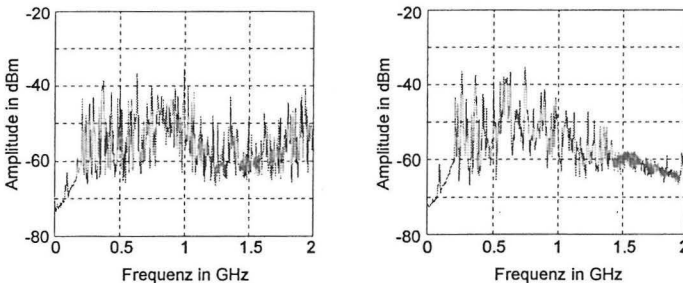


Fig. 5:

UHF-Signalamplitude gemessen an Sensor 3  
links: bewegliches Partikel, 5 pC,  $l=4\text{mm}$ ,  $\dot{U} = 380\text{ kV}$   
rechts: Eingespeister Impuls am Sensor 2,  $\dot{U} = 7\text{ V}$

### 3 Fenstersensoren

Die Fertigung und Montage moderner Schaltanlagen ist heutzutage von solcher Qualität, dass nach erfolgreich bestandener Vor-Ort-Prüfung nur noch sehr selten Teilentladungen auftreten. Aus diesem Grund werden der Sinn und Zweck einer dauerhaften Teilentladungsüberwachung dieser Anlagen kontrovers diskutiert.

Ganz anders hingegen sieht es bei Altanlagen aus, die vor 20 oder mehr Jahren gebaut wurden. In manchen dieser älteren Anlagen treten regelmäßige Teilentladungen auf, die jedoch aufgrund fehlender Sensoren oft nicht erkannt werden. Zudem fehlen in diesen Anlagen meist auch die für eine Nachrüstung notwendigen Flansche oder Montageöffnungen. Oftmals bieten daher die in Trennergehäusen angebrachten Schaugläser die einzige Möglichkeit, sinnvolle Teilentladungsmessungen, sei es dauerhaft oder nur als gelegentliche Kontrollmessung, durchzuführen. Im folgenden sollen daher Untersuchungen zu Fenstersensoren vorgestellt werden, die zur Überwachung einer 123 kV Schaltanlage entwickelt wurden.

#### 3.1 Messaufbau zur Sensorentwicklung

Für die Durchführung der Messungen wurden von der RWE zwei Trennschalter aus der ersten in Deutschland installierten 123 kV GIS zur Verfügung gestellt. Die Trennergehäuse sind mit Schaugläsern unterschiedlicher Größe ausgestattet, an denen die UHF-TE-Fenstersensoren angebracht wurden. Die Bezeichnung der Fenstersensortypen erfolgt gemäß der Schauglasgröße:

Schauglasdurchmesser (in mm)	Bezeichnung des Fenstersensortyps
143,8	Typ G
83,4	Typ M
49,8	Typ K

Tab. 1: Bezeichnungen der Fenstersensoren unterschiedlicher Größe

Mit Hilfe eines Übergangsflansches konnten die Anlagenteile an die institutseigene GIS (Nennspannung 245 - 362 kV) angeschlossen werden, die mit 3 konventionellen UHF-TE-Sensoren ausgerüstet ist. Figur 6 zeigt den verwendeten Versuchsaufbau der Anlage.

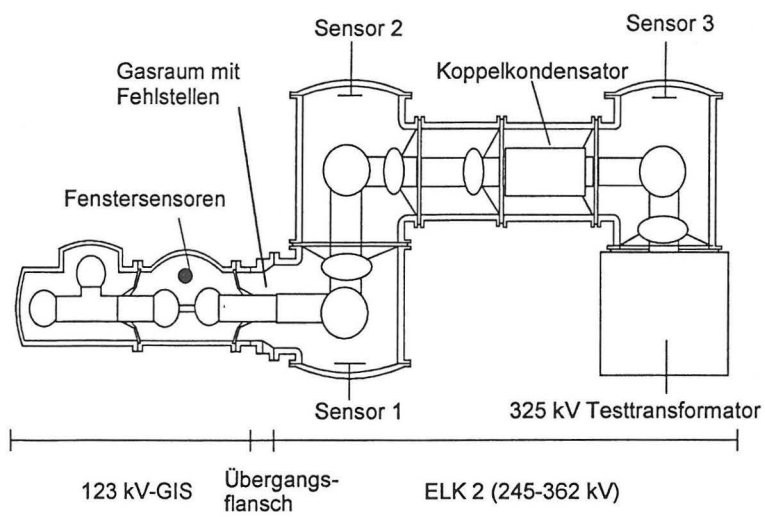


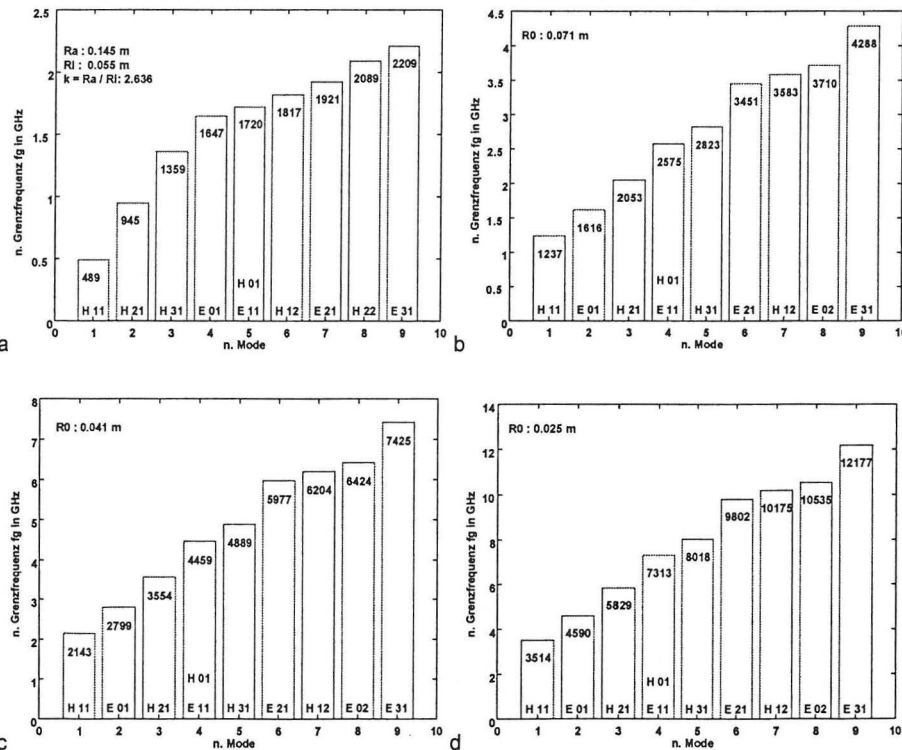
Fig. 6:  
Aufbau der 245-362 kV GIS mit angeflanschten 123 kV GIS Teilen  
Position der Sensoren und der Fehlstellen

### 3.2 Theoretische Betrachtungen

Aufgrund der geringen Anstiegszeiten der TE in einem Gasraum werden hochfrequente elektromagnetische Wellen angeregt, die sich in der Schaltanlage ausbreiten. Da eine GIS im UHF-Bereich einen koaxialen Hohlleiter darstellt, treten neben dem leitungsgebundenen TEM-Mod (transversal-elektromagnetisch) auch leitungsungebundene TM- (transversal-magnetisch) und TE- (transversal-elektrisch) Moden auf. Diese auch als höhere Moden bezeichneten Wellenmoden lassen sich durch ihre kritische Grenzfrequenz im koaxialen 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. Der TEM-Mod hingegen besitzt keine Grenzfrequenz, er ist in einer koaxialen Anordnung bereits ab der Frequenz 0 Hz ausbreitungsfähig. Da die Fensterflansche Hohlleiter darstellen, können sich dort lediglich die höheren Wellenmoden ausbreiten und mit den Fenstersensoren gemessen werden.

Figur 7 zeigt die berechneten Grenzfrequenzen der höheren Wellenmoden für die Koaxialanordnung der 123 kV GIS und der drei Fensterflansche. Die Ergebnisse lassen erkennen, dass mit kleiner werdendem Flanschdurchmesser die vom Messsystem mit einer oberen Grenzfrequenz von 2 GHz erfassbare Signalenergie (d.h. die Empfindlichkeit) abnimmt.

An Inhomogenitäten in der Anlage (Stütz- bzw. Schottisolatoren, Verzweigungen, etc.) kommt es zu Reflexionen und zur Ausbildung stehender Wellen. Diese 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, während die Resonanzfrequenzen höherer Ordnung des TEM-Modes bei Vielfachen der ersten Resonanzfrequenz (aus der Anlagengeometrie errechenbar) liegen. 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, wie z.B. bewegliche Partikel, im UHF-Bereich deutlich höher.

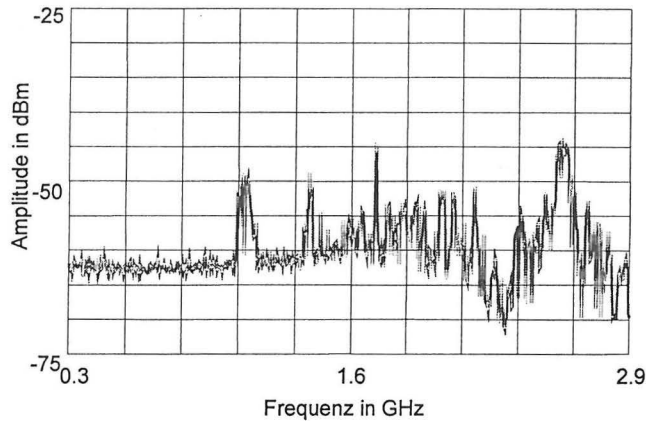
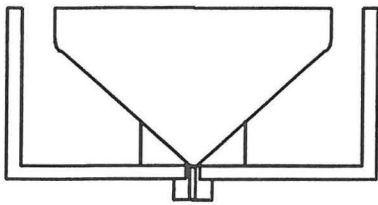


**Fig. 7:**  
**Grenzfrequenzen höherer Wellenmoden**  
**a:** in der koaxialen 123 kV GIS, Innenleiterradius Ri = 0.055 m, Außenleiterradius Ra = 0.145 m  
**b:** im Flansch des großen Schauglases, Außenleiterradius Ra = 0.071 m  
**c:** im Flansch des mittelgroßen Schauglases, Außenleiterradius Ra = 0.041 m  
**d:** im Flansch des kleinen Schauglases, Außenleiterradius Ra = 0.025 m  
**H=TE-Mod, E=TM-Mod**

### 3.3 Messungen mit Fenstersensoren

Um eine geeignete Sensorbauform zu finden, wurden anhand des Typs M verschiedene Bauformen auf ihre Empfindlichkeit hin untersucht (Fig. 8). Aufgrund der Einfachheit im Aufbau und der dennoch guten Empfindlichkeit wurden die Fenstersensoren als flache Scheibensensoren ausgeführt.

Konussensor



Scheibensensor

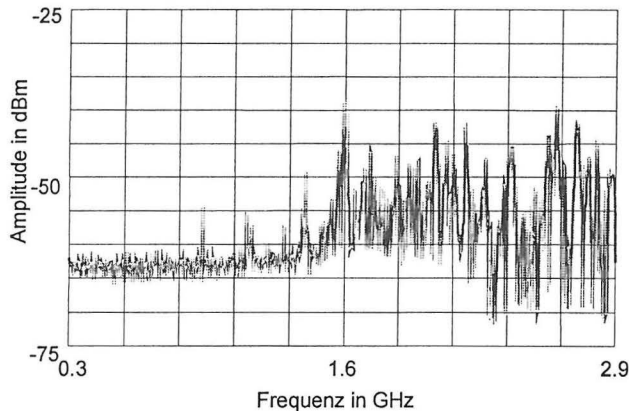
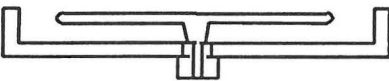


Fig. 8:  
Schnittbilder und  
Frequenzspektren  
(bewegliches Partikel,  
 $q=1.5\text{ pC}$ )  
von verschiedenen  
Sensorbauformen

Aus der Theorie für Scheibenantennen ist bekannt, dass ihre Empfindlichkeit im wesentlichen von der Antennenfläche und der Spaltbreite abhängt. Da sich diese beiden Parameter jedoch grundsätzlich widersprechen, wurde mit Hilfe des HF-Feldberechnungsprogramm FEKO eine Optimierung der Scheibenfläche angestrebt. Die Empfindlichkeit der einzelnen Geometrien ändert sich aber in Abhängigkeit der Frequenz derart, dass auf diesem Wege kein eindeutiges Optimum für den Scheibendurchmesser gefunden werden konnte. Versuche mit unterschiedlichen Scheibendurchmessern für Fenstersensoren aller Baugrößen haben jedoch gezeigt, dass der Einfluss des Durchmessers auf die Empfindlichkeit des Sensors nur von unwesentlicher Bedeutung ist, solange er sich in einem vernünftigen Größenbereich befindet.

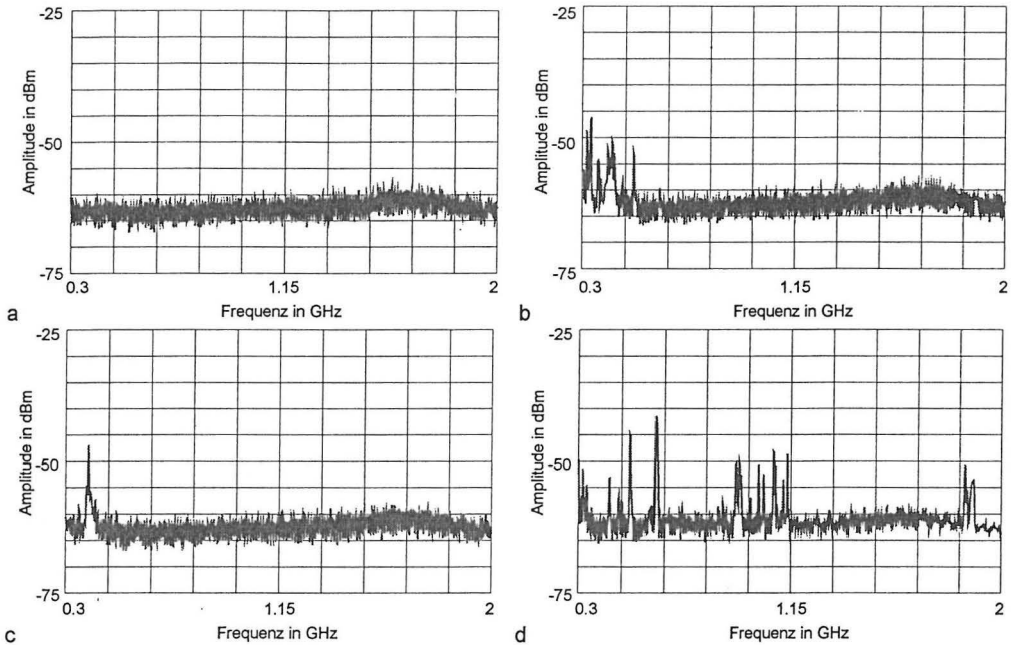
Aus Gründen der Kosten- und Gewichtsersparnis wurden die Fenstersensoren aus Aluminium hergestellt. Obwohl Aluminium für hochfrequenztechnische Anwendung nicht unbedingt optimale Eigenschaften aufweist, ist es für wurde untersucht, ob eine Beschichtung der Sensorscheibe mit aus hochfrequenztechnischer Sicht höherwertigem Silber zu einer deutlichen Verbesserung der Sensorempfindlichkeit führt.

Am Beispiel des Konussensors wurde die Schirmwirkung sowie der Einfluss der Anbindung des metallischen Sensorgehäuses an die Kapselung der GIS auf das Einkoppelverhalten von externen Störern untersucht. Wie man aus den aufgezeichneten Hintergrundstörspektren erkennen kann, ist eine gut leitende Verbindung zwischen Sensorgehäuse und Anlagenkapselung



entscheidend für eine möglichst geringe Störeinkopplung (Fig. 9). Dies ist insbesondere außerhalb der relativ störarmen Laborumgebung von Bedeutung.

- a) Sensorgehäuse metallisch leitend mit Kapselung verbunden
- b) Sensorgehäuse von Anlagenkapselung isoliert
- c) Sensorgehäuse über Erdungsband mit Anlagenkapselung verbunden
- d) Konussensor ohne Gehäuse



**Fig. 9:**  
Konussensor, Hintergrundstörpektrum für verschiedene Gehäuse-seerdunsanbindungen

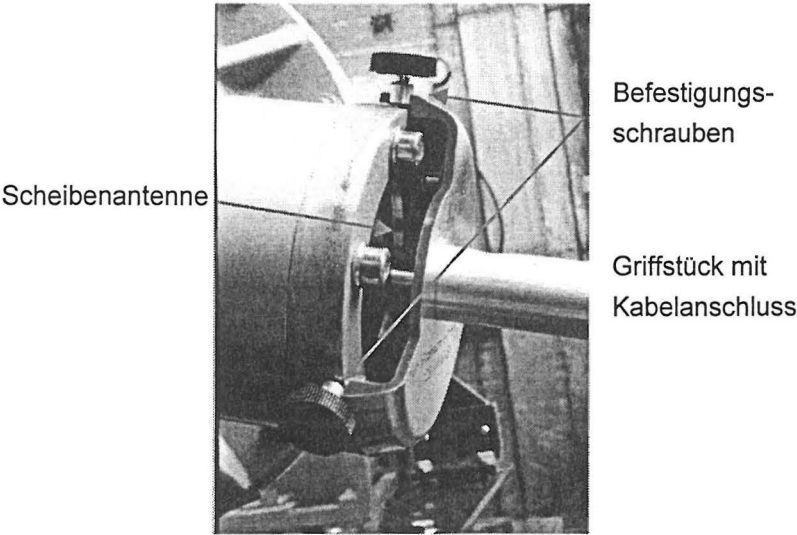
**a:** Sensorgehäuse metallisch leitend mit Kapselung verbunden

**b:** Sensorgehäuse isoliert

**c:** Sensorgehäuse über Erdungsband mit Anlagenkapselung verbunden

**d:** ohne Gehäuse

In Figur 10 ist der Fenstersensor M im Schnitt dargestellt. Ein im Rand des Gehäuse befindliches Kupferfederband sorgt für eine komplette Schirmung und festen Halt des Sensors. Durch die Befestigungsschrauben wird zudem eine dauerhafte Montage des Sensors an die Anlage gewährleistet. In dieser Ausführung kann der Fenstersensor binnen Sekunden an der Anlage installiert werden, ohne dass einzelne Schraubverbindungen der Schaugläserflansche gelöst werden müssen. Die Scheibenantenne ist über Gleitkontakte mit der Anschlussleitung im Griffstück verbunden, so dass stets sichergestellt werden kann, dass die Antenne plan und mittig auf der Scheibe des Schauglases aufliegt.



**Fig. 10**  
Fenstersensor M Aufbau

Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung der gemessenen Empfindlichkeiten der Fenstersensoren der Größen M und G. Die Fehlstelle befand sich dabei im dem Trenner benachbarten Gasraum der 245 – 362 kV Schaltanlage. Ist der Abstand zwischen der Fehlstelle und den Fenstersensoren wesentlich größer, so reduziert sich die Empfindlichkeit sehr deutlich, so dass sie lediglich für bewegliche Partikel noch ausreichend ist, die zu detektieren jedoch das wesentliche Ziel dieser Sensoren ist. Erste Erfahrungen bei Teilentladungsmessung vor Ort an der 123 kV Schaltanlage haben die hohe Empfindlichkeit und gute Einsetzbarkeit der vorgestellten Sensoren bestätigt. Allerdings reicht die Empfindlichkeit des kleinen Fenstersensors für eine sinnvolle Teilentladungsmessung im untersuchten Frequenzbereich bis maximal 2.9 GHz im allgemeinen nicht aus.

	Sensor G	Sensor M
Bewegliches Partikel (4 mm)	1 pC (TE- Einsatz)	1 pC (TE- Einsatz)
Spitze Innenleiter (9 mm)	0.5 pC (TE- Einsatz)	0.5 pC (TE- Einsatz)
Spitze Außenleiter (19 mm)	0.5 pC (TE- Einsatz)	0.5 pC (TE- Einsatz)
Partikel auf Stützer (9 mm)	0.5 pC (TE- Einsatz)	0.5 pC (TE- Einsatz)
Hohlraum in Stützer	6 pC (TE- Aussatz)	pC > TE- Aussatz
Eingespeister Impuls	2 V	4 V

Tab. 2: Empfindlichkeit der Fenstersensoren M und G für verschiedene Defektarten

Abschließend sind als Beispiel für die gemessene Empfindlichkeit der verschiedenen Fenster-sensortypen die aufgenommenen Frequenzspektren für ein bewegliches Partikel der Länge l = 4 mm, das sich im dem Trenner benachbarten Gasraum der 245 – 362 kV Schaltanlage befand, im Vergleich zu dem mit einem konventionellen, in der Anlage befindlichen Scheibensensor gleichen Abstandes erhaltenen, dargestellt (Fig. 11). Man erkennt deutlich die der Flanschgeometrie entsprechende Verschiebung der Frequenzanteile zu höheren Frequenzen hin.

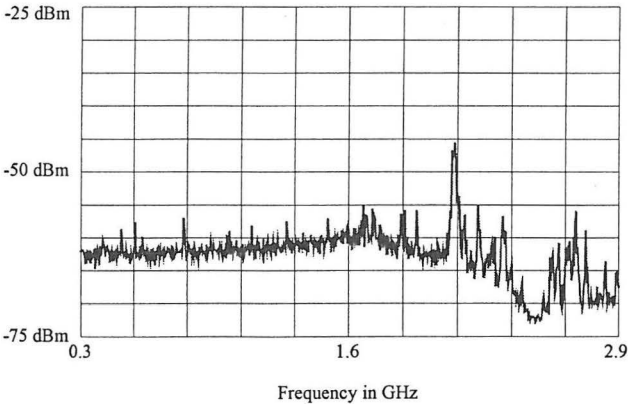
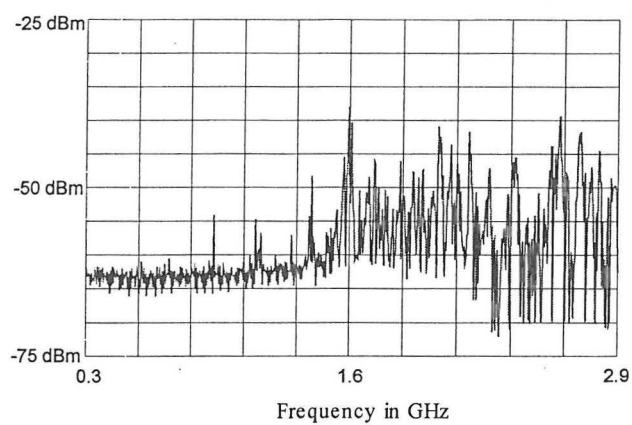
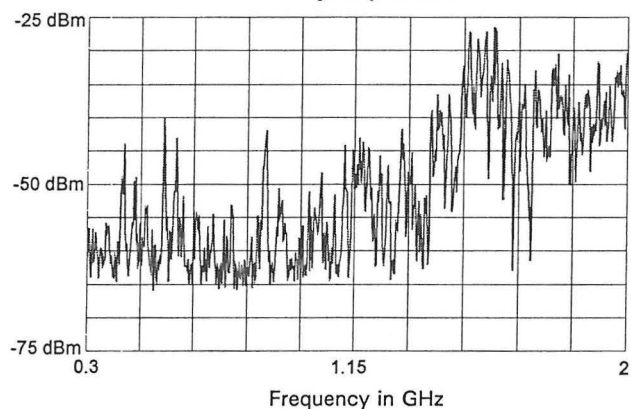


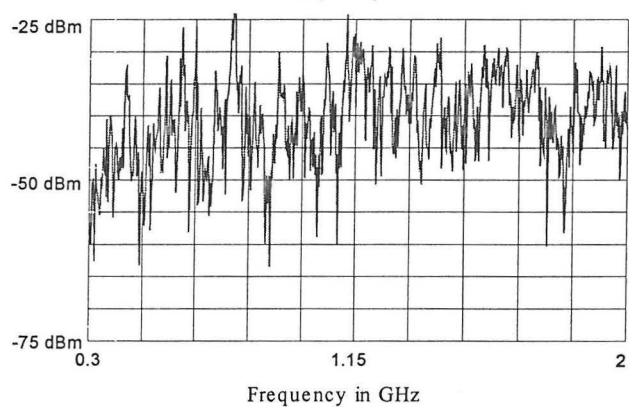
Fig. 11  
Frequenzspektren der Fenster-sensortypen im Vergleich zu einem konventionellen Sensor  
a: Typ M  
Bewegl. Partikel, 3.5 pC



**b: Typ M**  
**Bewegl. Partikel, 1.5 pC**



**c: Typ G**  
**Bewegl. Partikel, 1.5 pC**



**d: Konventioneller Sensor**  
**Bewegl. Partikel, 1.5 pC**

## 4 UHF-TE-Monitoring an einer 123 kV Schaltanlage

Zur Überwachung der Teilentladungsaktivität in der bereits in Abschnitt 3 angesprochenen 123 kV Schaltanlage wurde ein breitbandiges UHF-TE-Monitoringsystem entwickelt und an der Anlage installiert. Figur 12 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Empfängersystems für einen Kanal, bestehend aus einem HF-Teil zur Erfassung der hochfrequenten TE-Signale und einem NF-Teil mit anschließender Signalverarbeitung und Datenübertragung. Das System ist für 15 Kanäle konzipiert, wobei das Multiplexing von einem Microcontroller übernommen wird.

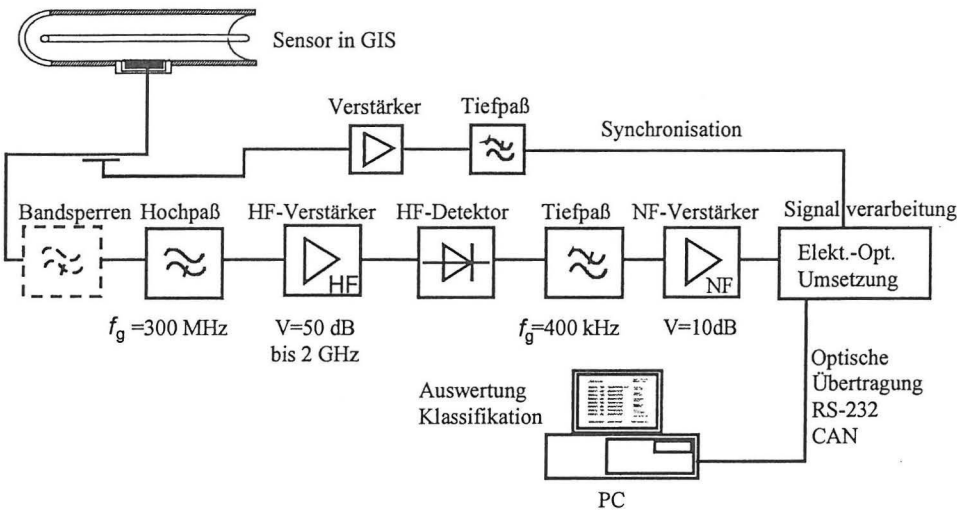


Fig. 12:

Prinzipieller Aufbau des Breitband-Monitoringsystems

Mit Hilfe eines am Eingang befindlichen Hochpasses mit einer Grenzfrequenz von 250 MHz kann die vor Ort auftretenden Koronastörungen unterdrückt werden. Dem Hochpass können auch noch eine oder mehrere Bandsperrern mit variabler Bandmittenfrequenz zur Ausfilterung von schmalbandigen Störsignalen vorgeschaltet werden. Die Bandsperrern sind aus sogenannten Notchfiltern aufgebaut und bestehen im wesentlichen aus einem LC-Schwingkreis. Durch eine Änderung der vom Microcontroller gesteuerten Sperrspannung kann die Kapazität der verwendeten Varaktordioden verändert werden und somit auch die Bandmittenfrequenz der Bandsperrern. Zur Verstärkung der HF-Signale um ca. 50 dB wird eine Kaskadenschaltung mehrerer Monolithverstärker mit einem flachen Frequenzgang bis 2 GHz verwendet. Die HF-Signale werden von einem HF-Detektor breitbandig erfasst und anschließend tiefpassgefiltert. Ehe die Signale analog-digital gewandelt werden, werden sie nochmals in einer NF-Verstärkerschaltung mit veränderlicher Verstärkung um bis zu 10 dB verstärkt. Das zur phasenrichtigen Darstellung notwendige 50-Hz-Wechselspannungssignal kann direkt am Eingang kapazitiv aus der Messleitung ausgekoppelt werden. Das ausgekoppelte Signal wird verstärkt und anschließend tiefpassgefiltert, um die mitausgekoppelten HF-Signale zu unterdrücken.

Die Datenübertragung an einen Messrechner erfolgt elektrisch oder optisch über die serielle Standard-Schnittstelle RS-232 mit einer einstellbaren Übertragungsrate. Ist eine höhere Datenübertragungsrate notwendig, so ist dies über CAN-Bus oder aber eine schnelle synchrone Seriellschnittstelle möglich. Die Datenübertragung zum Messrechner erfolgt interrupt-gesteuert. Die installierte Software erfasst die gemessenen TE-Signale, zeichnet sie in einem PRPD-Diagramm über einen bestimmten Zeitraum auf und speichert die gemessenen Daten ab. Anhand dieser Daten, die über eine Modemverbindung fernabfragbar sind, kann anschließend eine Bewertung der TE-Aktivität in der Anlage vorgenommen werden.

Ein Prototyp des Messsystem mit 3 Kanälen ist seit 2 Monaten an der 123 kV Schaltanlage installiert und läuft seither weitgehend störungsfrei. Aus der in Figur 13 beispielhaft dargestellten Messung kann die TE-Aktivität in der Anlage deutlich erkannt werden.

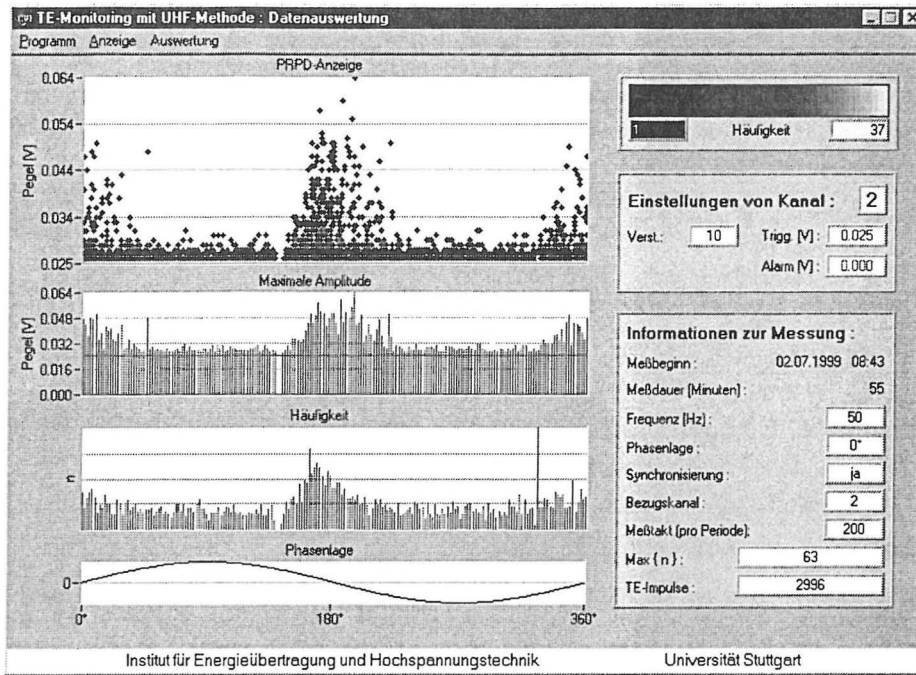


Fig. 13:

TE-Messung an 123 kV  
Schaltanlage  
Messdauer 55 min

Durch seine modulare Aufbauweise kann das Gerät ebenfalls sehr variabel als Messsystem zur Durchführung von Vor-Ort-Prüfungen oder auch als Messempfänger für gelegentliche TE-Überprüfungsmessungen an GIS eingesetzt werden. Auch der von CIGRE verabschiedete Empfindlichkeitsnachweis ist mit diesem breitbandigen UHF-Messsystem einfacher durchzuführen, da der Vergleich der gemessenen Signale im Zeitbereich deutlich leichter fällt als im Frequenzbereich.

## Literatur

- [1] IEC 517 "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, 1990
- [2] H.-D. Schlemper "Akustische und elektrische Teilentladungsmessung zur Vor-Ort-Prüfung von SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen, Dissertation Universität Stuttgart, 1997
- [3] Joint CIGRE TF 15/33.03.05 "Sensitivity Verification for Partial Discharge Detection on GIS with the UHF and the Acoustic Method", 15/33.03.03 IWD 73, 1998
- [4] R. Kurrer "Teilentladungsmessung im Gigahertz-Frequenzbereich an SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen", Dissertation Universität Stuttgart, 1996