

## AUTOMATISCHE ERKENNUNG VON TEILENTLADUNGS-STÖRSTELLEN MITTELS STATISTISCHER OPERATOREN

Edward Gulski

Technische Universität Delft, Hochspannungslaboratorium  
Mekelweg 4, NL- 2628 CD Delft

### ZUSAMMENFASSUNG

Um die Aussagekraft von Teilentladungsmessungen zu erhöhen, werden in den letzten Jahren zunehmend automatisierte Meßsysteme eingesetzt. Dieser Beitrag präsentiert ein neues Verfahren für die Erkennung von verschiedenen Störstellen in elektrischen Isolierungen. Mit Hilfe einer computergestützten Meßwerterfassung werden zwei Kenngrößen als Funktion der Phasenlage erfaßt: die Häufigkeitsverteilung der Teilentladungsamplituden und die Häufigkeitsverteilung der Teilentladungsanzahl. Um die Form von diesen Häufigkeitsverteilungen zu interpretieren, wurden diese Kenngrößen mittels einer Reihe von 15 *statistischen Operatoren* bewertet. Messungen an physischen Modelle von 9 bekannten TE-Störstellen haben gezeigt, daß es Zusammenhänge zwischen den Teilentladungsprozessen und den statistischen Operatoren gibt. Außerdem kann die Kombination von 15 *statistischen Operatoren* benützt werden, um den *Fingerprint* einer Störstelle zu bestimmen. Der Einsatz dieser *Fingerprint*-Systematik während der Messung an Hochspannungsgeräten macht es möglich, die Störstellen in der Isolierung zu erkennen.

### EINLEITUNG

Im Laufe der Jahre ist die Messung von Teilentladungen (TE): (scheinbare Ladung in pC und TE- Einsatzspannung in kV) ein wichtiges Mittel zur Qualitätskontrolle elektroenergetischer Betriebsmittel geworden. Außerdem versucht man anhand gemessener TE-Signale kriterielle Informationen über die in Inneren der Isolierung ablaufenden Zerstörungsprozesse zu erhalten. Es ist bekannt, daß die verschiedenen TE-Störstellen typischen Erscheinungsbildern von TE zugeschrieben werden können. Die Form solcher Erscheinungsbilder wird bestimmt u.a. durch die Geometrie der Störstellen, den Platz in der Isolation, die elektrische Feldstärke und die dielektrischen Eigenschaften des Isolationsmaterials. Für Diagnosezwecke wurde 1969 durch die CIGRE eine Systematik von Ellipsen-Oszillogrammen entwickelt. Dabei wurden erfahrungsmäßig verschieden TE-Störstellen typische Ellipsendarstellungen zugeordnet. Erfahrungen haben gezeigt, daß mittels dieser Systematik nicht immer eine eindeutige Korrelation zwischen den TE- Erscheinungsbilder und der Störstelle gefunden werden kann. Bild 1a zeigt ein skizziertes Beispiel von TE im festen Isolierstoff und Bild 1b zeigt Ellipsendarstellung einer echten Messung von TE im Abstandshalter einer gekapselten 400 kV Druckgasisolierstrecke. Es ist ohne Zweifel nicht einfach den Zusammenhang zwischen messbaren TE-Signalen und den Störstellen in komplizierten Isolationskonstruktionen zu ermitteln. Deswegen ist es besser, zuerst mehr Erfahrungen mit Hilfe physischer Modelle von Störstellen zu versammeln und

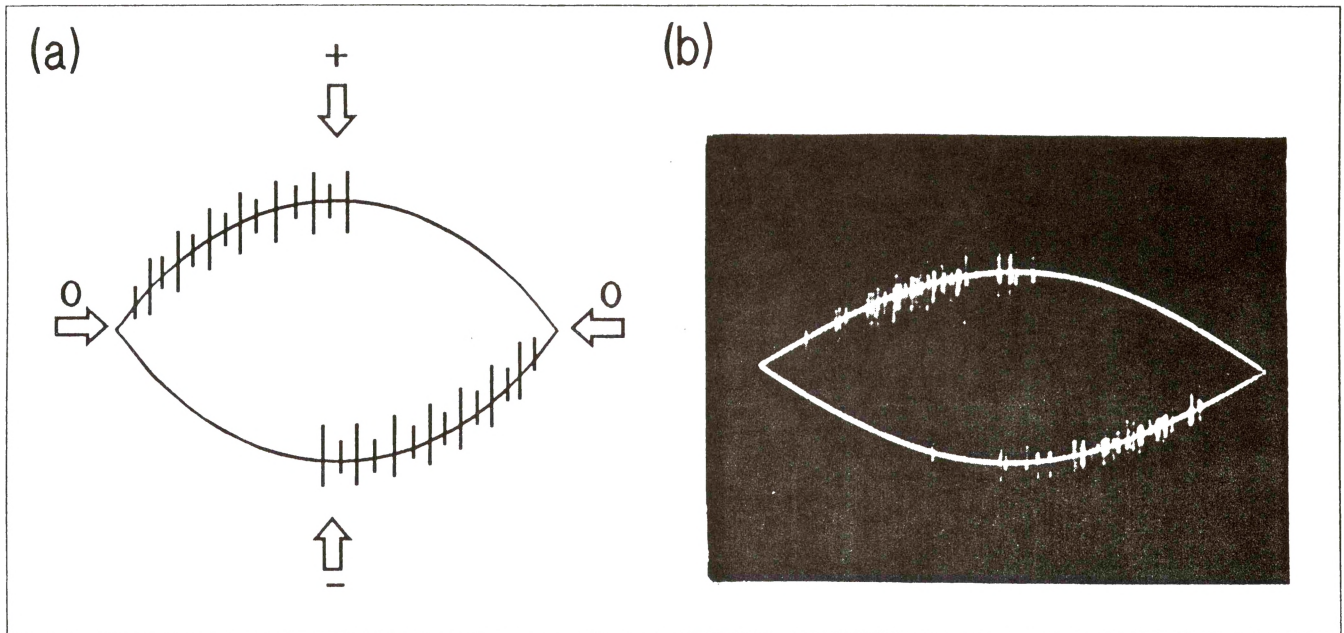


Figure 1: Ellipsendarstellung von TE im festen Stoff: (a) skizziertes Beispiel aus CIGRE Electra, No 11, 1969; (b) Beispiel von TE im Abstandshalter einer gekapselte 400 kV Druckgasisolierstrecke.

danach diese Erfahrungen anzuwenden für die Diagnose von Hochspannungsgeräten. Für diesen Zweck wurde vor vier Jahren in unserem Hochspannungslaboratorium ein automatisiertes Meßsystem entwickelt, genannt *PD-Analyzer*. Dieses System macht es möglich zwischen verschiedenen künstlichen Defekten zu unterscheiden: (1) Hohlräume mit verschiedener Form und dem Platz in der Isolation, (2) Gleitentladungen in Luft und in  $SF_6$ , (3) freie leitende Partikel in der Luft und in  $SF_6$ , (4) Korona in der Luft, und (5) Tree-Wachstum. Im vorliegenden Aufsatz wird versucht, die an elf physischen Modelle von Störstellen ermittelte Erfahrungen für die Erkennung von TE-Störstellen in Hochspannungsgeräten anzuwenden.

## TE-KENNGRÖßEN

Zur Beschreibung der TE wurden im Laufe der Jahren mehr als zwanzig verschiedene TE Kenngrößen eingeführt und besonders in den letzten Jahren mit Hilfe automatisierter Meßsysteme erfaßt. Es ist bekannt, daß bei einer konventioneller Bewertung (Bandbreite 400 kHz) die im Inneren des Prüflings auftretenden TE-Vorgänge mittels zwei Größen im äußeren Prüfkreis erfaßt werden können (Bild 2a):

- TE- Größe: scheinbare Ladung in Picocoulombs [pC]
- TE-Zeitzuordnung: die Lage der TE in Milisekunden [ms] oder in Grad  $[0-360^\circ]$  bezüglich der Prüfspannung.

Wenn man diese Größen während mehrerer 50 Hz Perioden, bezüglich der Phasenachse digital erfaßt und verarbeitet, so können zwei TE-Kenngrößen in der Abhängigkeit von der Phasenlage, die Häufigkeitsverteilung der TE-Amplituden  $H_{qn}(\varphi)$  und die Häufigkeitsverteilung der TE-Anzahl  $H_n(\varphi)$ , ermittelt werden (Bild 2b). Bild 3a zeigt ein Beispiel von diesen TE-Kenngrößen. Wenn man diese Verteilungen näher betrachtet, können zwei Schlußfolgerungen gezogen werden. Erstens, daß nicht nur zwischen  $H_{qn}(\varphi)$  und  $H_n(\varphi)$  ein Unterschied besteht sonder auch zwischen den einzelnen Verteilungen aus der positiven und aus der negativen

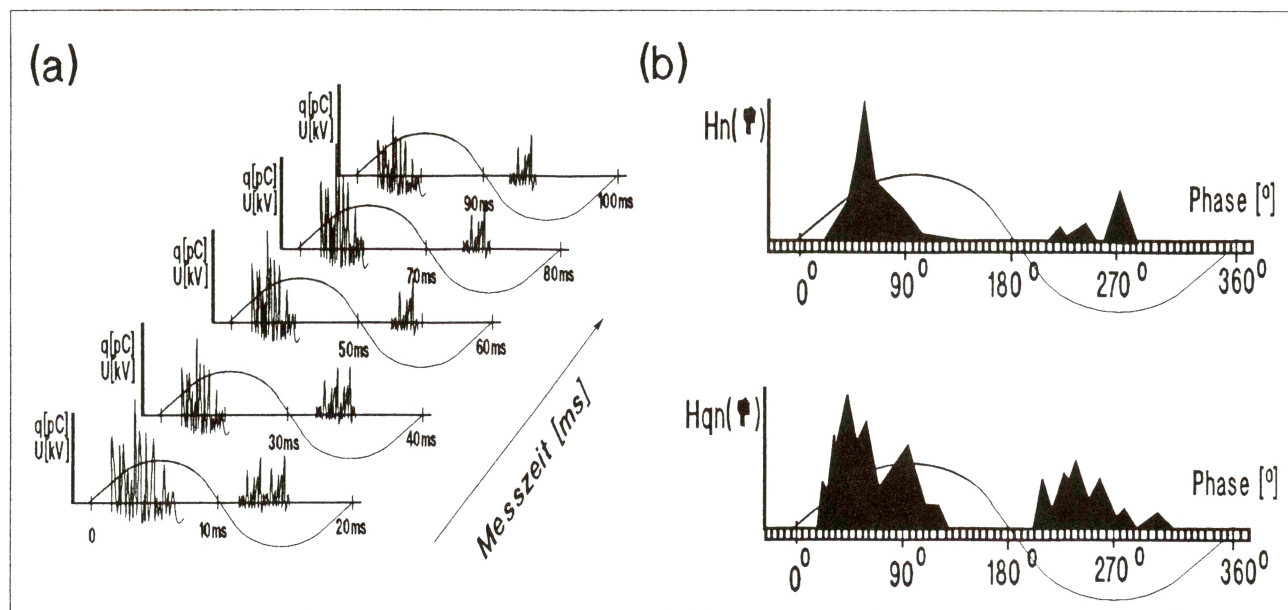


Figure 2: Schematische Darstellung von TE-Kenngrößen: (a) die Zeitzuordnung von den einzelnen TE-Impulse; (b) TE-Kenngrößen als Funktion der Phasenlage: der Häufigkeitsverteilung der TE-Amplituden  $H_{qn}(\varphi)$  und der Häufigkeitsverteilung der TE-Anzahl  $H_n(\varphi)$ .

Hälfte der Prüfspannung. Zweitens, daß die Unterschiede nicht einfach quantifiziert werden können. Deswegen war es nötig diese TE-Kenngrößen apart zu behandeln: für die positive Hälfte  $H_{qn}^+(\varphi)$ ,  $H_n^+(\varphi)$  und für die negative Hälfte  $H_{qn}^-(\varphi)$  und  $H_n^-(\varphi)$ . Um die Form dieser Verteilungen zu quantifizieren, werden diese mit s.g. *statistischen Operatoren* bewertet.

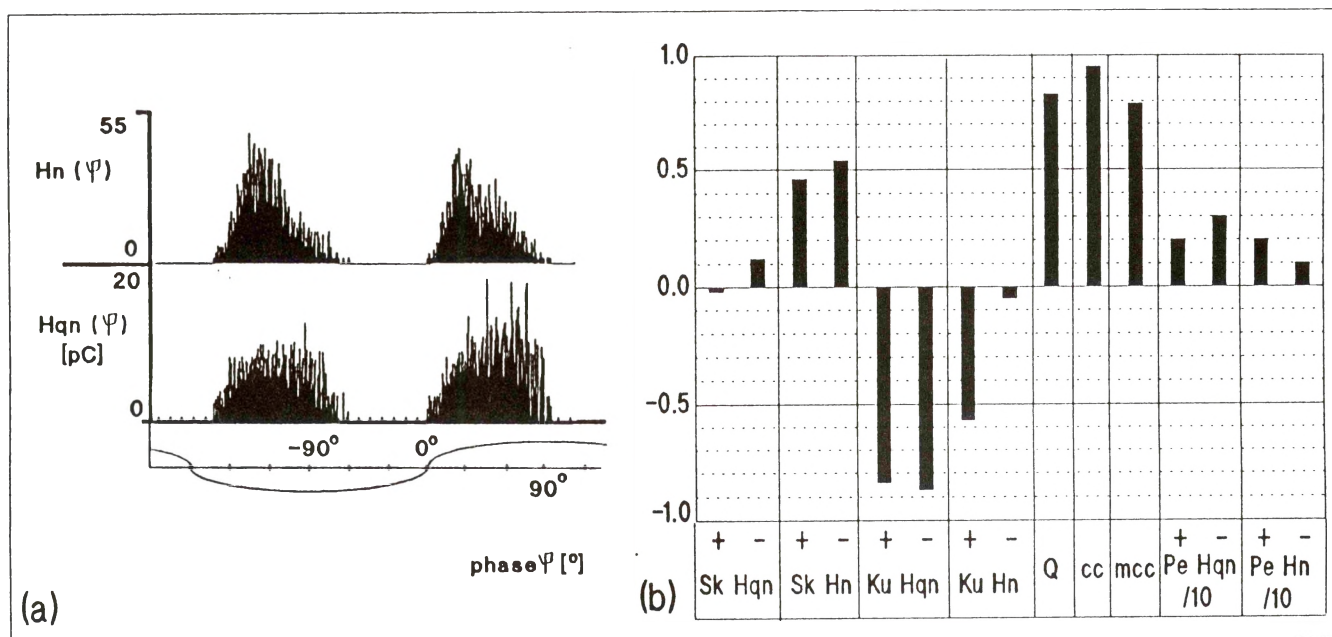


Figure 3: Beispiel einer TE-Messung an einer gekapselten 400 kV Druckgasisolierstrecke: (a) TE-Kenngrößen als Funktion der Phasenlage: Häufigkeitsverteilung der TE-Amplituden  $H_{qn}(\varphi)$  und Häufigkeitsverteilung der TE-Anzahl  $H_n(\varphi)$ ; (b) für die Verteilungen aus (a) ermittelte statistischen Operatoren.



## STATISTISCHE OPERATOREN

Es ist bekannt, daß die Form von  $H_{qn}(\varphi)$  und  $H_n(\varphi)$  Verteilungen bezüglich verschiedener TE-Störstellen wertvolle Information beinhaltet. Um den Unterschied zwischen diesen Verteilungen quantitativ zu bewerten, wurden folgende numerischen Parametern s.g. *statistische Operatoren* eingeführt:

- Die Schiefe s.g. *Skewness Sk* die als Maß für die Asymmetrie der  $H_{qn}^{+/-}(\varphi)$  und  $H_n^{+/-}(\varphi)$  Verteilungen benutzt wird;
- Der Exzeß s.g. *Kurtosis Ku* der als Maß für die Abweichung von  $H_{qn}^{+/-}(\varphi)$  und  $H_n^{+/-}(\varphi)$  bezüglich einer Normalverteilung benutzt wird;
- Die Anzahl Spitzen *Pe* in  $H_{qn}^{+/-}(\varphi)$  und  $H_n^{+/-}(\varphi)$  Verteilungen.
- Der Kreuzkorrelationskoeffizient *cc* für die Beschreibung der Unterschiede in der Form von  $H_{qn}^+(\varphi)$  und  $H_{qn}^-(\varphi)$  Verteilungen.
- TE-Asymmetrie *Q* als Mittelwertverhältnis von der Ladung aus der  $H_{qn}^+(\varphi)$  und  $H_{qn}^-(\varphi)$  Verteilungen.
- Der modifizierte Kreuzkorrelationskoeffizient *mcc* der als Produkt von *cc* und *Q* zu berechnen ist.

Um die verschiedenen TE-Störstellen mit Hilfe von  $H_{qn}^{+/-}(\varphi)$  und  $H_n^{+/-}(\varphi)$  Verteilungen zu bewerten und zu diskriminieren wurden insgesamt 15 *statistischen Operatoren* eingeführt. Als Beispiel für solche Bewertung sind im Bild 3b *statistische Operatoren* gezeigt, die für die im Bild 3a ermittelte Verteilungen berechnet wurden.

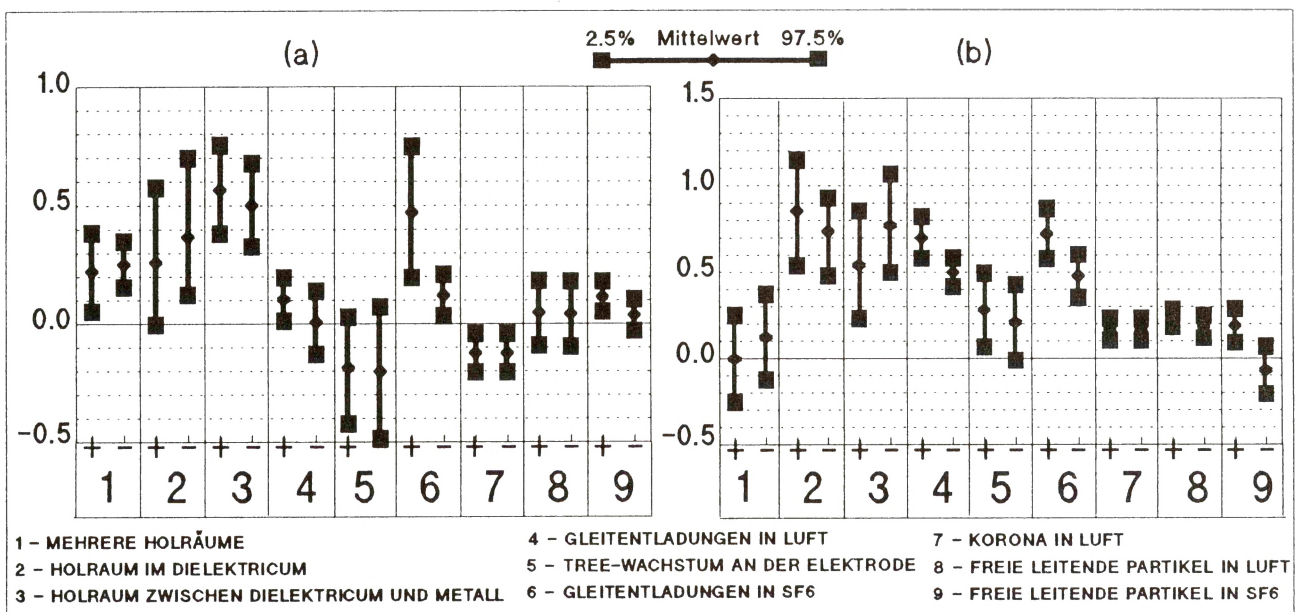


Figure 4: Vergleich zwischen den Werten eines statistischen Operator die für 9 verschiedenen Störstellen gewonnen wurden: (a) Skewness *Sk* von  $H_{qn}^+(\varphi)$  und  $H_{qn}^-(\varphi)$ , (b) Skewness *Sk* von  $H_n^+(\varphi)$  und  $H_n^-(\varphi)$ .

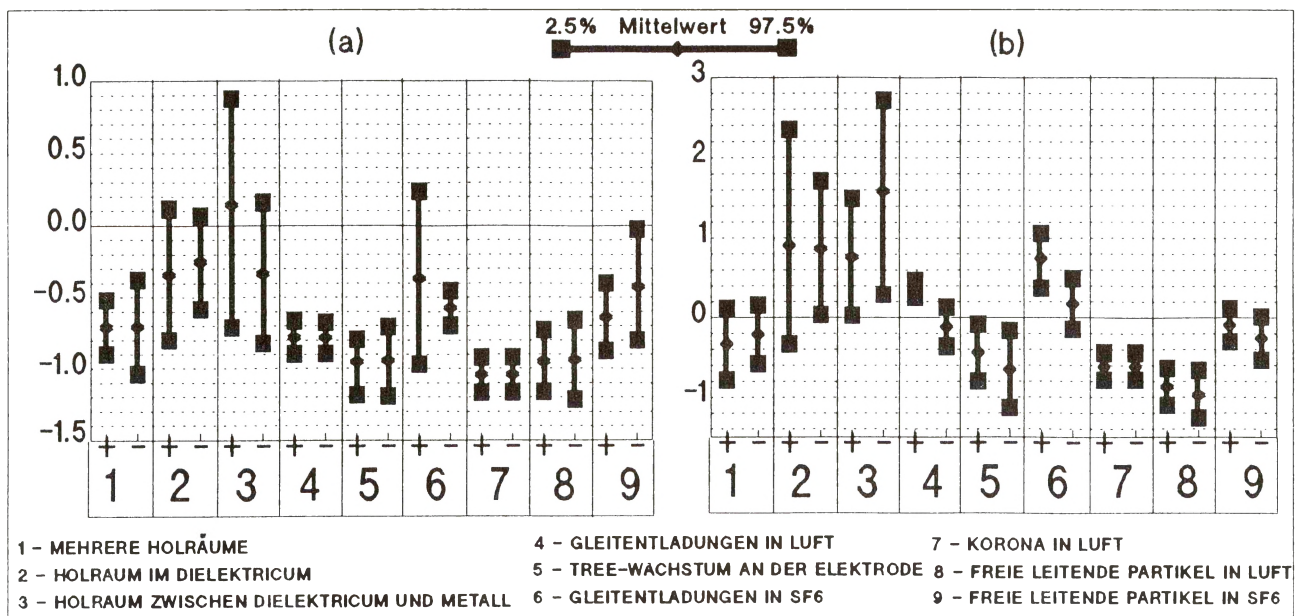


Figure 5: Vergleich zwischen den Werten eines statistischen Operator die für 9 verschiedenen Störstellen gewonnen wurden: (a) Kurtosis  $Ku$  von  $H_{qn}^+(\varphi)$  und  $H_{qn}^-(\varphi)$ , (b) Kurtosis  $Ku$  von  $H_n^+(\varphi)$  und  $H_n^-(\varphi)$ .

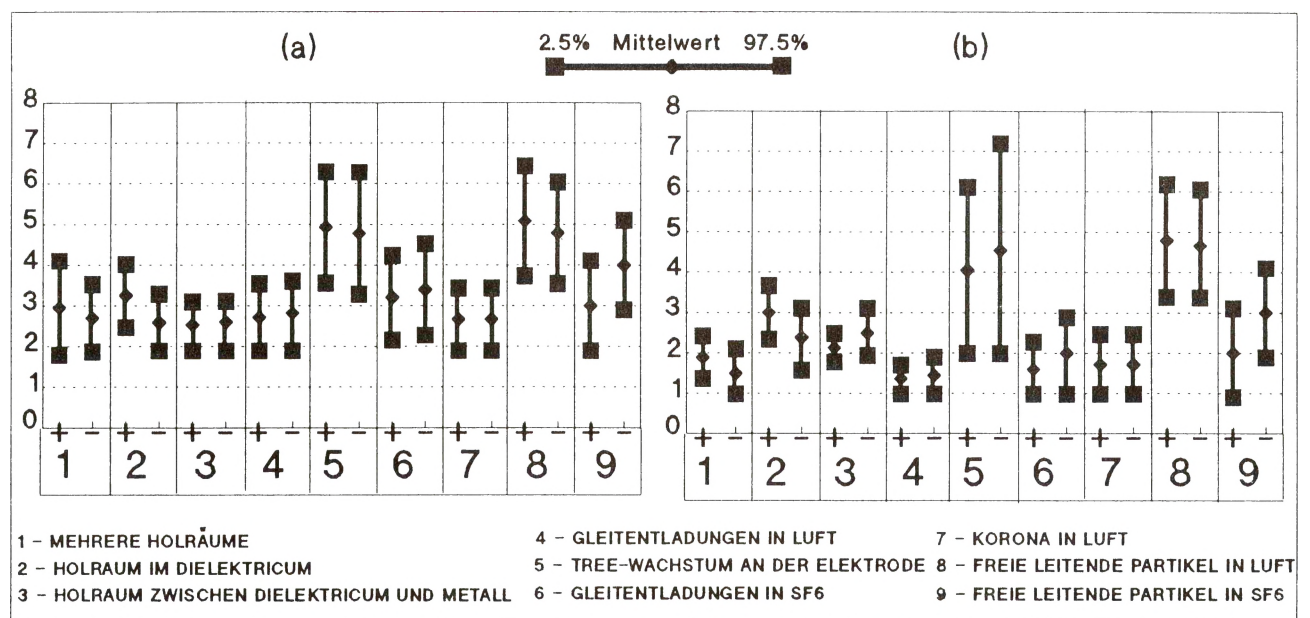


Figure 6: Vergleich zwischen den Werten eines statistischen Operator die für 9 verschiedenen Störstellen gewonnen wurden: (a) Anzahl Spitzen  $Pe$  von  $H_{qn}^+(\varphi)$  und  $H_{qn}^-(\varphi)$ , (b) Anzahl Spitzen  $Pe$  von  $H_n^+(\varphi)$  und  $H_n^-(\varphi)$ .

Um die verschiedenen Störstelle miteinander zu vergleichen, wurden Stichprobenmessungen an physischen Modelle von 9 bekannten Störstellen ausgeführt. Für jede Störstelle wurde eine Reihe von Messungen gemacht. Um die für eine Störstelle gewonnenen Werte von einem statistischen Operator mit denen von einer anderen Störstelle zu vergleichen wurden 95% Vertrauensgrenzen bestimmt. In den Bildern 4, 5, 6 und 7 sind diese Vertrauensgrenzen für alle 15 statistischen Operatoren gezeigt.

Der Vergleich von den Vertrauensgrenzen zeigt, daß jede Störstelle durch eine typische Kombination von 15 statistischen Operatoren beschrieben werden kann. Deswegen wurden diese

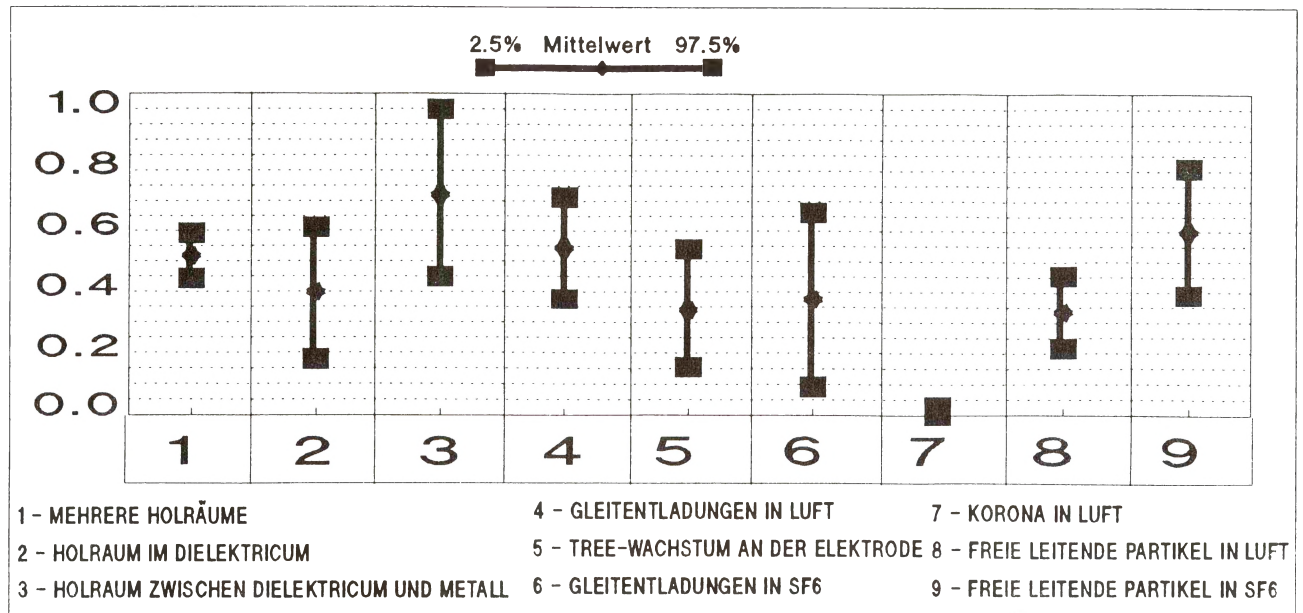


Figure 7: Vergleich zwischen den Werten des modifizierten Kreuzkorrelationskoeffizient  $mcc$  die für 9 verschiedenen Störstellen gewonnen wurden.

95% Vertrauensgrenzen für die Bestimmung des s.g. *Fingerprints* von einer Störstelle benutzt. Dadurch wird es im Falle einer TE-Messung an einem unbekannten Defekt möglich, diese *Fingerprints* zu benutzen, um die Störstelle zu erkennen. Mit Hilfe eines Algorithmus wurden die während der Messung ermittelte *statistische Operatoren* (siehe z.B. das Bild 3b) mit den *Fingerprints* von 9 bekannten TE-Störstellen verglichen. Die Anzahl *statistischer Operatoren* aus einer Messung, die innerhalb der 95% Vertrauensgrenzen einer Störstelle fallen, wurde als Erkennungsmaß betrachtet, genannt *recognition rate*. Auf diese Weise kann die Störstelle mit höchster *recognition rate* als Indikator für einen möglichen Isolationsdefect benutzt werden.

## TE-ERFASSUNG UND VERARBEITUNG

Für die Bewertung von Messungen an Hochspannungsgeräten wurden *Fingerprints* aus elf physischen Modelle von TE-Störstellen eingesetzt. Hierfür wurden folgende drei Geräte benutzt: (1) Stromwandler 2 x 150 A/ 5 A für 50 kV Netze, (2) PE Kabel 6/10 kV und (3) gekapselte 400 kV Druckgasisolierstrecke.

Alle Geräte wurden während einer Zeit zwischen 3 und 20 Minuten in einem 50 Hz Konstantspannungsversuch geprüft. Die Hohe der Prüfspannung wurde so ausgewählt, daß während der Prüfung kein Aussetzen von TE zu erwarten war. Die genauen Werte der Prüfspannung werden bei der Diskussion der einzelnen Meßresultaten gezeigt.

Zur Meßwerterfassung wurde der TE-Detektor Typ 560 (Frequenzbereich 40 - 400 kHz) in der "Straight Forward"-Methode eingesetzt. Neben dem TE-Signal zur weiteren Verarbeitung wurde mit Hilfe eines kapazitiven Spannungsteilers die Prüfspannung erfaßt. Dieser Verlauf wurde für die Triggerung des Messbalaufes benutzt. Für die A/D-Umsetzung, die Pufferung und den Rechnertransport wurde ein Zweikanal-Transientrecorder DL 919 mit einer Abtastfrequenz von 200 kHz eingesetzt. Die Transport- und Verarbeitungsroutinen wurden mit Hilfe des dafür entwickelten Programmsystems auf einem PC realisiert. Um den Grundstörpegel des Meßsignals nicht als TE-Nutzsignal zu bewerten, wurden während der Messung nur die TE-Meßsignale bewertet, die größer 10% des Bereichmaximum waren.

Während der Prüfung wurden Verteilungen:  $H_{qn}^+(\varphi)$ ,  $H_n^+(\varphi)$ ,  $H_{qn}^-(\varphi)$  und  $H_n^-(\varphi)$  ermittelt und gespeichert. Nach Abschluß jeder Messung wurden diese Verteilungen weiter statistisch



verarbeitet. Danach wurde der Vergleich zwischen den ermittelten *statistischen Operatoren* und den *Fingerprints* von den bekannten 9 Störstellen ausgeführt, sodaß mit Hilfe der höchsten *recognition rate* mögliche Störstellen analysiert werden konnten.

## DISKUSSION DER MESSRESULTATEN

### Stromwandler 2x150 A/ 5 A

Dieser Stromwandler 2 x 150 A/ 5 A wird in 50 kV Netzen benutzt. Transformatoren dieses Types werden während 1 Sekunde mit 30 kA Kurzschlußstrom geprüft. Durch eine große mechanische Belastung der Epoxyisolation können während solcher Prüfungen Brüche im Material entstehen. Solche Hohlräume in der Nähe des Transformatorernes können eine Ursache für TE sein. An so einem Transformator, wo nach der Kurzschlußprüfung TE unter dem Wert 29 kV r.m.s. einsetzen, wurden TE-Messung und Analyse ausgeführt.

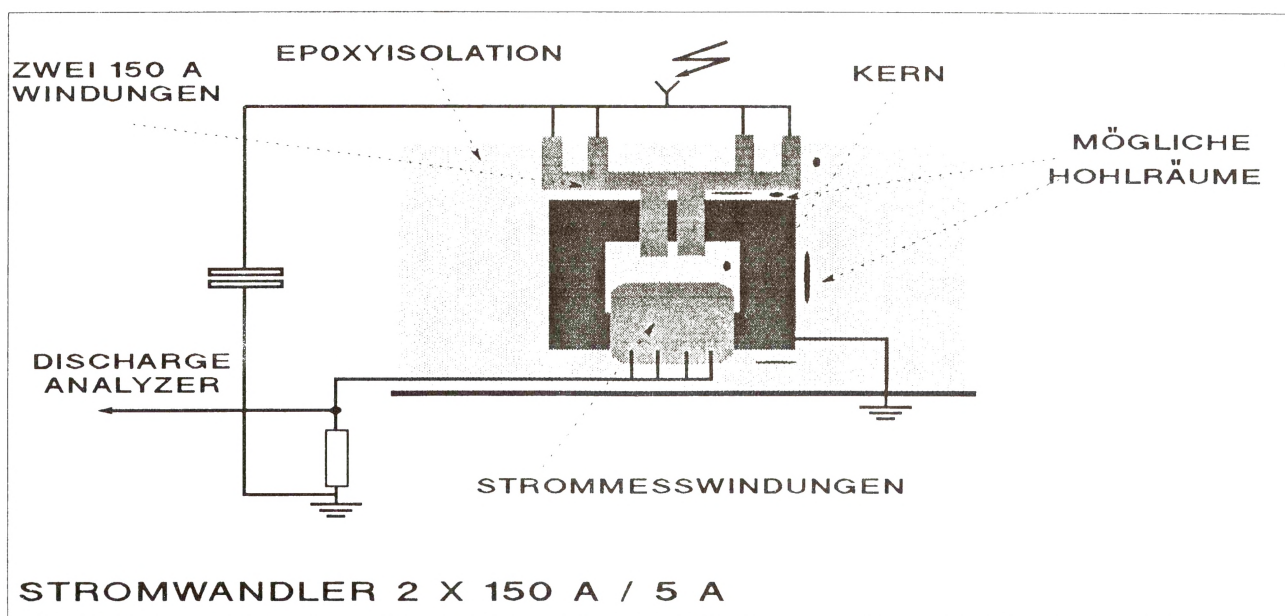


Figure 8: Schnitt durch den 2x150 A / 5 A Stromwandler mit eingezeichneten möglichen Störstellen.

Der Schnitt durch den Transformator und Orte möglicher Hohlräume sind im Bild 8 gezeigt. Der Stromwandler wurde während 3 Minuten unter 35 kV r.m.s. Spannung geprüft. Während dieser Prüfung wurden TE zwischen 10 pC und 50 pC als Kenngrößen der Phasenlage:  $H_{qn}(\varphi)$  und  $H_n(\varphi)$  registriert und bewertet. Nach der Prüfung wurden die *statistischen Operatoren* ermittelt und mit denen der physischen Modelle aus den Bildern 4, 5, 6 und 7 verglichen.

Im Bild 9 ist das Resultat der Defecterkenung, *recognition rate* gezeigt. Die Störstelle "Hohlraum im Dielectricum" wird als Indikator für die TE angezeigt. In diesem Bild fallen neun aus 15 *statistischen Operatoren* mit denen von einem "Hohlraum im Dielektrikum" zusammen. Ein Vergleich mit den anderen Störstellen zeigt eine deutlich kleinere *recognition rate*. Eine Störstelle dieser Art ist sehr realistisch und kann durch die mechanische Belastung in der Nähe des Kernes entstehen. Es war in diesem Fall nicht möglich, diese Erkennung zu bestätigen, weil ein Aufbrechen des Wandlers gleichzeitig die Störstelle vernichten würde.

### PE Kabel 6/10 kV

Zur Untersuchung des TE-Verhaltens in einem Kunststoffkabel wurde das Tree-Wachstum an einer Spitze benutzt. Diese Störstelle wurde künstlich in der Mitte eines 1 Meter langes 6/10 kV

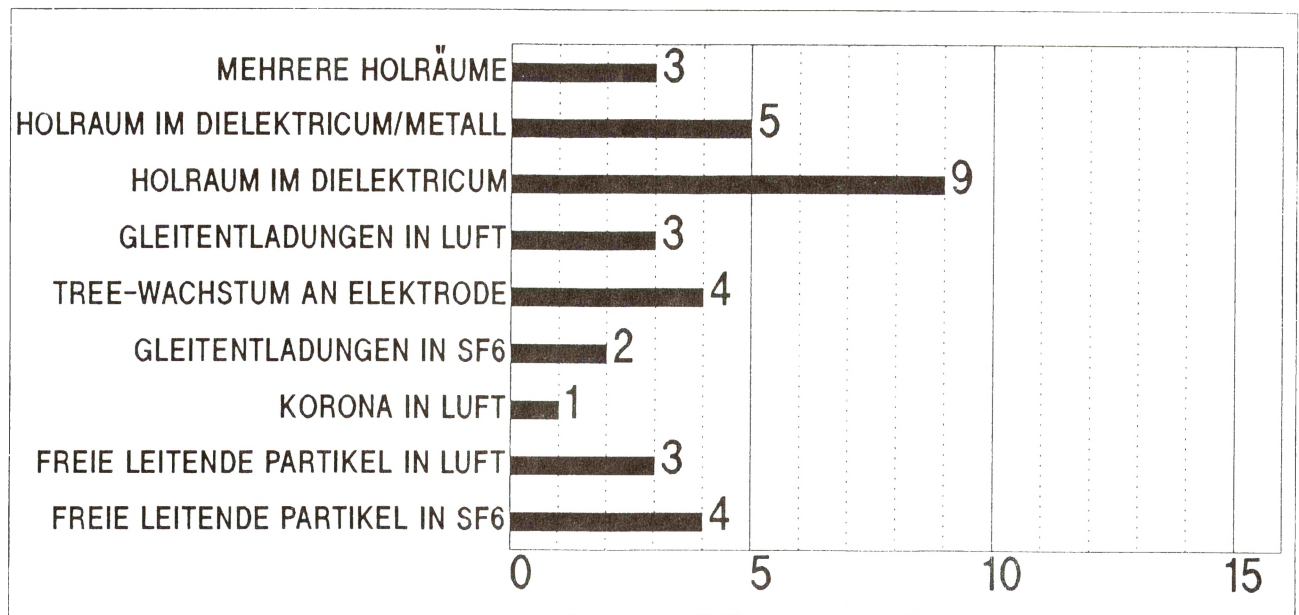


Figure 9: Resultierende recognition rate gewonnen für eine Prüfung des 2x150 A/ 5 A Stromwandlers: Prüfzeit 3 Minuten, Prüfspannung 35 kV.

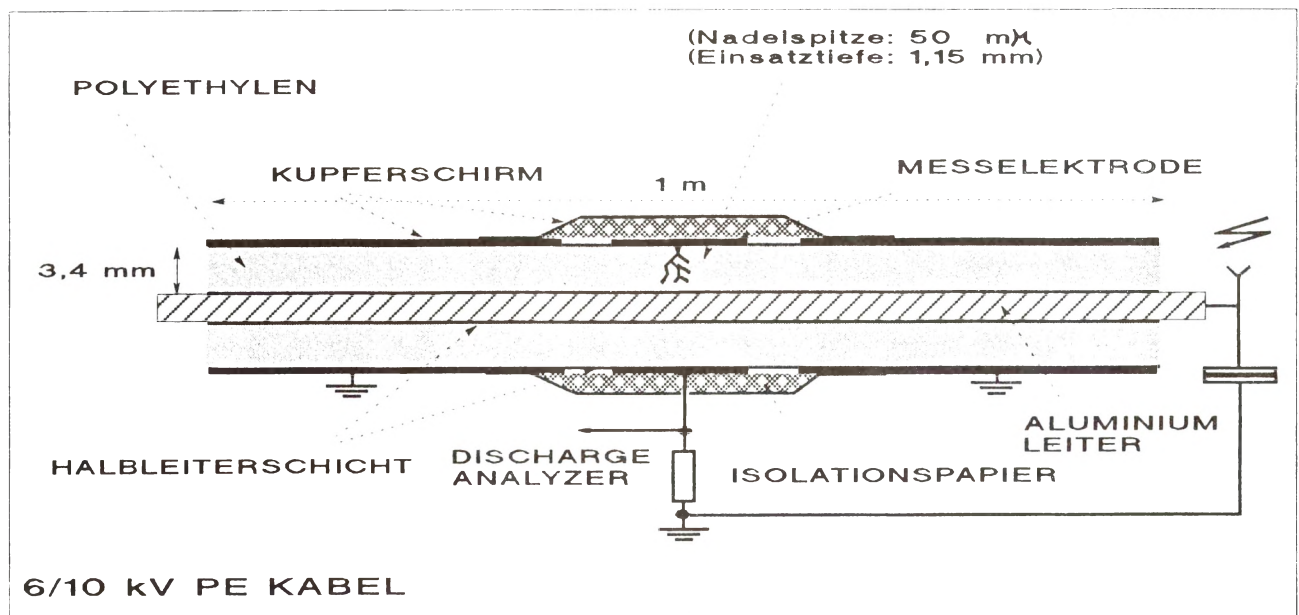


Figure 10: Schnitt durch den 6/10 kV PE Kabel mit eingezeichneter Störstelle.

PE Kabel angebracht, siehe Bild 10. Wegen notwendiger Abschirmung der Meßelektrode wurde diese mit Isolationspapier und einem Erdungsschirm umwickelt. Um das Tree-Wachstum zu erzeugen, wurde eine Stalnadel mit einer Spitze von  $50\mu\text{m}$  1.15mm tief in das Kabel eingedrückt. Danach wurde dieses Kabel während 100 Minuten mit einer Spannung von 28 kV beansprucht. Mit Beginn der Prüfung wurden TE-Initialisierung beobachtet. Nach dieser Voralterung wurde dieses Prüfobjekt 5 Minuten lang bei einer Spannung von 42 kV beansprucht. Während dieser Prüfung wurden TE zwischen bis 1000 pC registriert und als Kenngrößen der Phasenlage:  $H_{qn}(\varphi)$  und  $H_n(\varphi)$  bewertet. Nach dieser Prüfung ermittelte statistische Operatoren wurden mit denen der physischen Modelle aus den Bilder 4, 5, 6 und 7 verglichen. Im Bild 11 zeigt die recognition rate deutlich die Störstelle "Tree-Wachstum an Elektrode" an. Zwölf aus fünfzehn statistischen Operatoren dieser Messung fallen zusammen mit denen eines



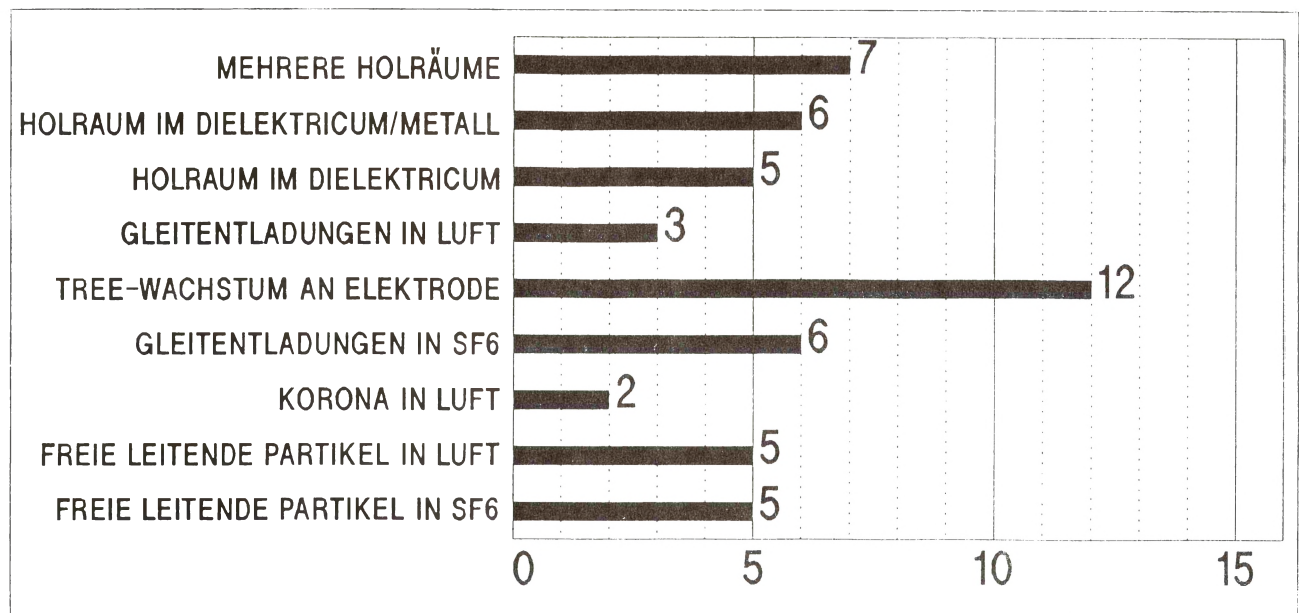


Figure 11: Resultierende recognition rate gewonnen für eine Prüfung des 6/10 kV PE Kabel: Prüfzeit 5 Minuten, Prüfspannung 42 kV.

Tree-Wachstum an einer Elektrode. Ein Vergleich zu den anderen Störstellen zeigt, daß auch Störstelle "mehrere Hohlräume" mit *recognition rate* gleich sieben erkannt wurde. Erkennung dieser Störstelle ist sehr realistisch, weil das Einsetzen von TE in mehreren Tree-Zweigen ähnlich dem von TE in mehreren Hohlräume ist. Diese Erklärung wurde auch während des Studieren der Durchlagspuren dieses Kabel bestätigt.

#### Gekapselte 400 kV Druckgasisolierstrecke

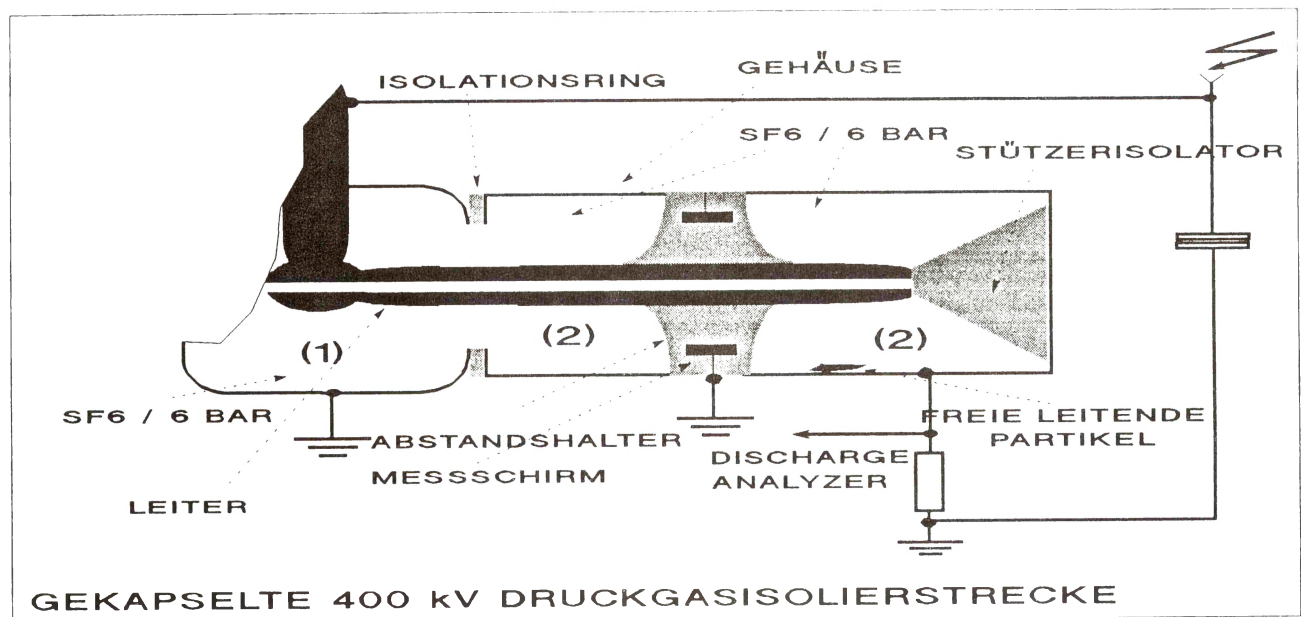


Figure 12: Schnitt durch die gekapselte 400 kV Druckgasisolierstrecke mit eingezeichneter Störstelle: freie leitende Partikel in SF<sub>6</sub>.

Im Bild 12 ist der Prüfstand der 400 kV gekapselte Druckgasisolierstrecke gezeigt. Die einzelne Räume der Isolierstrecke wurden mit Kunststoffringen isoliert, sodaß es möglich war an den einzelnen Meßelectroden: (1) und (2) die TE zu messen. Während der Prüfung wurden

die Elektrode (1) und das Meßschirm geerdet und das Gehäuse wurde an den *PD Analyzer* angeschlossen. Als freies leitendes Partikel wurde eine für gekapselte Druckgasisolierungen gebräuchliche Kontaktfeder (20 mm x 9 mm x 5 mm) benutzt. Diese Feder wurde unter dem Hochspannungsleiter angebracht. Die Einsatzspannung für TE war 100 kV r.m.s. und die Prüfung von 5 Minuten wurde ausgeführt bei 110 kV r.m.s.

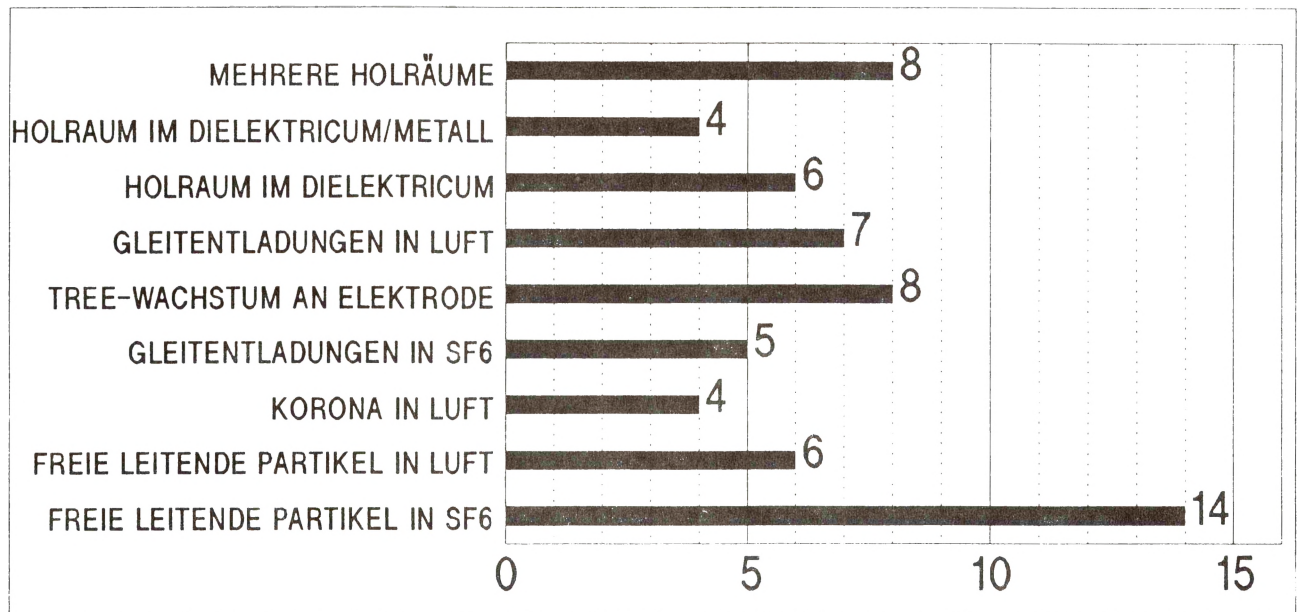


Figure 13: Resultierende recognition rate gewonnen für eine Prüfung der gekapselte 400 kV Druckgasisolierstrecke: Prüfzeit 5 Minuten, Prüfspannung 110 kV r.m.s.

Nach der Prüfung wurden die *statistischen Operatoren* mit den 95% Vertrauensgrenzen der 9 Störstellen verglichen. Das Bild 13 zeigt, daß die höchste *recognition rate* bei "Freie leitende Partikel in SF<sub>6</sub>" ermittelt wurde. Es bezeichnet, daß Partikel dieser Größe deutlich zu erkennen sein: vierzehn von fünfzehn *statistischen Operatoren* fallen mit denen von freie leitende Partikel in SF<sub>6</sub> zusammen. Ein Vergleich zu den anderen Störstellen zeigt eine deutlich kleinere *recognition rate*. Die fehlende Übereinstimmung zwischen der *recognition rate* von freie leitende Partikel in SF<sub>6</sub> und in der Luft ist zurückzuführen auf unterschiedliche TE-Phänomene in 6 Bar SF<sub>6</sub> und atmosphärischer Luft.

## SCHLUßFOLGERUNGEN

Die ersten Versuche, *statistische Operatoren* für die Diagnose von Hochspannungsgeräten einzusetzen zeigen viel versprechende Resultaten. Die für physischen Modelle von TE-Störstellen ermittelte *Fingerprints*-Systematik kann für die Erkennung dieser Störstellen in praktischer Isolierungen benutzt werden. Die weiteren Arbeiten auf diesem Gebiet sollen sich in zwei Richtungen entwickeln: (1) Erweiterung der Systematik mit neuen TE-Störstellen, (2) um die Information der *Fingerprints* für Diagnosezwecke effektiver zu benutzen, ist es nötig fortgeschrittene Erkennungsverfahren z.B. neuronale Netzte anzuwenden.