

Expertensystem für die TE-Messung an SF₆-isolierten Anlagen

Hans-Gerd Kranz, Reiner Krump

Ein hohes Maß an Unsicherheit in der unterscheidenden Diagnose von kritischen und unkritischen Isolationsfehlern kennzeichnet den gegenwärtigen Stand der Teilentladungsprüftechnik. Insbesondere die Hersteller und Betreiber komplexer SF₆-isolierter Anlagenkomponenten sind mangels gesicherter Erkenntnisse und aufgrund entsprechend unverbindlich gehaltener Prüfvorschriften gezwungen, Teilentladungen mit freiwilligen, vom Sicherheitsdenken geprägten niedrigen Grenzwerten zu bewerten.

Die TE-Diagnose auf der Basis von Expertensystemen wird die Prüftechnik der Zukunft. Hierzu werden alle wichtigen Kenngrößen eines jeden Entladungsimpulses, i.e. die Phasenlage, die Ladung, die quadratische Ladung und die Energie berücksichtigt. Zusätzlich findet der Einfluß der Prüfspannungsvariation und das charakteristische Zeitverhalten einer Entladungsfolge besondere Beachtung. Neben einer grundsätzlichen Unterscheidung von Fehlern mit und ohne Beteiligung eines Dielektrikums kann damit ein bisher unbekanntes Diagnosepotential erschlossen werden.

Die automatisierte Analyse der gemessenen Kenngrößen erfolgt in einem Personalcomputer unter Anwendung eines Paketes statistischer Algorithmen. Das anschließende selbständige Datenvergleichsverfahren liefert nach einer bewertenden Gegenüberstellung bekannter Referenzdaten die Diagnose des Isolationsfehlers.

1. Grundlagen der Teilentladungsdiagnostik

Zunehmend werden in verschiedenen Bereichen der Prüftechnik speziell entwickelte rechnergestützte Expertensysteme zur Qualitätskontrolle eingesetzt. Vorrangiges Ziel der TE-Diagnostik ist dabei eine Klärung der Zusammenhänge zwischen meßbaren TE-Erscheinungen und schädigenden Sekundäreffekten. Sämtliche Computeranwendungen basieren auf Methoden zur impulsbezogenen Erfassung und Verarbeitung einer oder mehrerer TE-Kenngrößen und gehen damit über die genormte reine integrale Ladungsmessung weit hinaus.

Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung des Teilentladungsmeßsignales auf seinen bisher nicht genutzten Informationsgehalt bezüglich der ursächlichen physikalischen Umgebung des Entladungsortes.

Zusätzlich wurde der Einfluß der Prüfspannungsvariation und das charakteristische Zeitverhalten einer Entladungsfolge besonders untersucht.

Neben einer grundsätzlichen Unterscheidung von Fehlern mit und ohne Beteiligung eines Dielektrikums - der für die Zuverlässigkeit einer SF₆-Anlage entscheidenden Frage - wurde hier insbesondere das Differenzierungsvermögen einer kenngößenbezogenen TE-Diagnostik bestimmt.

Unter den Begriff **TE-Kenngroße** fallen alle sich auf einen **einzelnen TE-Impuls** beziehenden elektrischen und nicht-elektrischen Meßgrößen. Diese Größen müssen nicht notwendigerweise direkt meßbar sein, sondern können auch aus der mathematischen Korrelation mit einer oder mehreren anderen TE-Kenngroßen hervorgehen. Zum Beispiel kann die bekannte TE-Impulsladung Q_{TE} durch Integration der Kenngroßen TE-Impulsstrom $i_{TE}(t)$ über die Zeit gewonnen werden. Im folgenden wird aus Übersichtsgründen bei sämtlichen TE-Kenngroßen auf den Zusatz "Impuls-" verzichtet.

Bei den Kenngroßen TE-Ladung, TE-Energie und TE-Impulsdauer handelt es sich um **scheinbare Größen**, deren Werte wesentlich durch die kapazitive Umgebung der ursächlichen Entladungsstrecke und die äußere Beschaltung des Meßaufbaues geprägt sind!

Wie verschiedene Untersuchungen an ausgesuchten modellhaften Isolationsanordnungen belegen, zeigen sich in ihnen dennoch fehlerstellentypische Abhängigkeiten, die eine erweiterte Bewertung zulassen.

Die einzige die Entladungsphysik der TE-Strecke repräsentierende, impulsbezogene **echte TE-Kenngroße** ist die ereignisbezogene TE-Phasenlage. In den Analysefunktionen hat diese Kenngroße daher einen besonderen Stellenwert.

Für einige spezielle Fragestellungen im Bereich der TE-Forschung gibt es heute bereits mehrere Ansätze zur erweiterten computergestützten Verarbeitung einer oder mehrerer TE-Kenngroßen. Der Einsatzbereich der darauf basierenden Geräte kann grob in zwei Klassen unterteilt werden:

- 1.) TE-Meßwertaufnahme, Speicherung und Darstellung /1,2,3,4/
- 2.) computergestützte Bewertung von TE-Erscheinungsbildern /5,6,7/

Aus diesem Stand der Forschung können die folgenden Erkenntnisse zusammengefaßt werden:

- Die in der heutigen, an den Vorschriften orientierten Prüfpraxis übliche qualitative Beobachtung der TE-Phasenlage vernachlässigt einen erheblichen Teil des in dieser "echten Kenngröße" enthaltenen Bewertungspotentials.
- Die impulsbezogene Erfassung und Analyse einer oder mehrerer TE-Kenngrößen ermöglicht ein tiefergehendes produktbezogenes Verständnis der Teilentladungsvorgänge.
- Die in verschiedenen Bereichen für Hochspannungsanlagen entwickelten computergestützten Meßsysteme geben eine gute Unterstützung bei der Interpretation von TE-Meßdaten.
- Ein selbständig arbeitendes TE-Diagnosekonzept entsprechend dem hier vorgestellten Expertensystem gibt es noch nicht.

2. Konzeption eines Expertensystems zur selbständigen TE-Diagnose

Konzeptionell wird davon ausgegangen, daß erst die breite quantitative Erfassung **mehrerer TE-Kenngrößen** für **jeden** der in einer TE-Prüfung detektierbaren Entladungsimpulse und die anschließende **vergleichende statistische Analyse** unter Berücksichtigung verschiedener Einflußparameter eine sicherere, von subjektiven Eindrücken befreite Differenzierung von unterschiedlichen TE-Phänomenen an komplexen Mischisolationssystemen ermöglicht!

Ein Expertensystem muß dabei folgende Fragen beantworten:

- 1.) Welches unterscheidbare Verhalten zeigen Teilentladungen auf den verschiedenen Kunststoff-SF₆- und Kunststoff-Metallgrenzflächenkombinationen?
- 2.) Welches unterschiedliche Verhalten haben leitende und nichtleitende Partikel an diesen Grenzschichten?
- 3.) Welche der TE-Kenngrößen eignen sich besonders zur TE-Diagnostik, wie groß ist das Differenzierungspotential?
- 4.) Bezieht sich die Bewertung (Diagnoseentscheidung) auf ein TE-Phänomen oder ein Störsignal?

Aufgrund der unbekannten Kapazitätsverhältnisse ist sowohl die in einer Fehlstelle umgesetzte Energie W_{TEreal} , als auch die wahre Ladung Q_{TEreal} an den Klemmen eines Prüflings nicht zu bestimmen. Betrachtet man allerdings eine bestimmte Fehlstelle unter konstanten kapazitiven Verhältnissen (Raumladungskapazitäten vernachlässigt), so kann davon ausgegangen werden, daß sich die normierte Statistik einer Folge von wahren TE-Ladungen Q_{TEreal} auf das Verhalten der meßbaren TE-Ladung Q_{TE} abbildet. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird daher eine hier mit **TE-Impulsenergie** W_{TE} bezeichnete scheinbare Energiegröße definiert, die einem einzelnen inneren Entladungsereignis zugeordnet werden kann.

Im Gegensatz zur wahren TE-Energie W_{TEreal} ist der von der Spannungsquelle während und nach einer Teilentladung gelieferte Energieausgleich direkt meßbar. Diese hier mit **TE-Systemenergie** W_{TESys} bezeichnete Energie ist durch das Produkt Momentanwert der Spannung mal scheinbarer Ladung definiert.

Nach eingehender Untersuchung /8/ sind die folgenden **vier Kenngrößen** für eine differenzierende TE-Diagnostik besonders geeignet; diese Anzahl ist im Hinblick auf Rechenaufwand und Diagnosesicherheit hinreichend und notwendig:

$$\begin{aligned} Q & \hat{=} \text{TE-Ladung } Q_{TE} \\ \text{ImpE} & \hat{=} \text{TE-Impulsenergie } Q_{TE}^2 / [F] \\ \text{SysE} & \hat{=} \text{TE-Systemenergie } u(t_{TE}) \cdot Q_{TE} \\ \text{PHI} & \hat{=} \text{TE-Phasenlage} \end{aligned}$$

Zur quantitativen Beschreibung des statistischen Zeit- und Intensitätsverhaltens werden **TE-Kennfunktionen** berechnet. In ihnen können zusätzlich die **Zeit** und die **Spannung** als Einflußparameter auf eine Kenngröße berücksichtigt werden.

Die Ermittlung dieser Funktionen für die verschiedenen Kenngrößen verfolgt im wesentlichen drei Ziele:

- Minimierung des Einflusses rauschähnlicher externer Störsignale. Durch die integrierende Wirkung vieler statistischer Verfahren kann grundsätzlich die Detektierbarkeit eines nichtstochastischen TE-Meßsignales in einem Rauschsignal gleicher oder höherer Amplitude verbessert werden.

- Abbildung der im Zeitbereich stark streuenden TE-Impulsfolgen auf einen charakteristischen, quantifizierten **TE-Kenndatensatz**. Dieser TE-Kenndatensatz kann mit dem Ziel der Diagnose mit nach gleicher Vorschrift erstellten Datensätzen verglichen werden.
- Reduzierung des Datenvolumens der Original-Messung.

Insbesondere die hier aus einer TE-Messung abgeleiteten TE-Kennfunktionen reduzieren die Vielzahl von einzelnen TE-Meßdaten zu einem charakteristischen, den ursächlichen TE-Fehlertyp kennzeichnenden TE-Kenndatensatz und machen damit die Analyse in einem Personalcomputer erst möglich.

Die im Bild 1 definierten TE-Kennfunktionen werden von der statistischen Analyse in zwei Gruppen unterteilt:

Phasenwinkelanalyse:

Hier findet die TE-Phasenlage als einzige **echte** TE-Kenngröße besondere Berücksichtigung. In verschiedenen Summendarstellungen werden die TE-Phasenwinkel mit jeweils einer der übrigen **scheinbaren** TE-Kenngrößen in einem Histogramm verknüpft /8/.

Amplitudenanalyse:

Die Amplitudenanalyse ermittelt die Häufigkeiten des Auftretens bestimmter Werte einer TE-Kenngröße im Meßsignal und erzeugt ebenfalls charakteristische Histogramme.

TE - Kennfunktionen			
Phasenwinkel-Analyse $\varphi = 0.....360$		Amplituden-Analyse	
SummTE	$= H_N(\varphi)$	Vert Q	$= H_N(Q_{TE})$
Summ Q	$= \sum Q_{TE}(\varphi)$	VertSysE	$= H_N(W_{TESys})$
SummSysE	$= \sum W_{TE}(\varphi)$	VertImpE	$= H_N(W_{TE})$
SummImpE	$= \sum W_{TE}(\varphi)$	VertAbst	$= H_N(\Delta t)$

Bild 1: Aufbau eines TE-Kenndatensatzes aus acht Kennfunktionen

Die Kennfunktion VertAbst gibt an, wie viele Teilnetladungen mit einem bestimmten zeitlichen Abstand Δt_{TE} zur jeweils vorangegangenen Entladung stattgefunden haben. Sie ist damit neben den Funktionen der Phasenwinkel-

analyse besonders dazu geeignet, die zeitliche Folge der Entladungen und damit die Zeitcharakteristik des TE-Verhaltens zu erfassen.

Die Prüfspannung als bedeutender Einflußparameter auf das Teilentladungsverhalten wird durch eine Datenerfassung mit **variabler** Spannung berücksichtigt. Die zum Zeitpunkt einer Teilentladung am Prüfling anliegende Spannung wird kontinuierlich gemessen, um dann als zusätzliche Dimension in die Berechnung der TE-Kennfunktionen einzugehen. Es wird in der Analyse zwischen dem **Effektivwert** und dem **Momentanwert** der Prüfspannung unterschieden; und eine Bewertung der Kenngrößen in Zeitintervallen (Bild 2a) und Amplitudenintervallen (Bild 2b) vorgenommen.

Die in den jeweiligen Fenstern stattfindenden TE-Ereignisse bestimmen einen Häufigkeitswert der Kenngrößen-Histogramme.

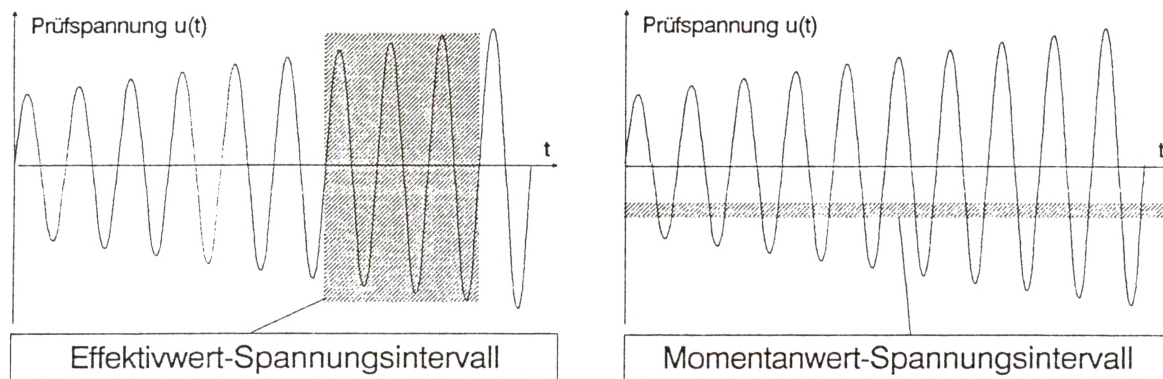


Bild 2: Prüfspannung als Parameter: Effektivwert- und Momentanwertintervalle

3. Diagnosesoftware

Eine Übersicht über den Informationsfluß in der Bewertungssoftware gibt Bild 3. Die Software eines TE-Diagnosesystems besteht aus den folgenden Funktionsblöcken:

1.) Meßwertaufnahme und Dateiverwaltung

2.) On-Line-Funktionen

Direktdarstellung des TE-Geschehens

Ausgabe von On-Line-Phasenhistogrammen

3.) Off-Line-Funktionen und Algorithmen zur TE-Diagnostik

- Berechnung eines TE-Kenndatensatzes, bestehend aus den Werten der TE-Kennfunktionen.
- Mehrstufige Normierung des TE-Kenndatensatzes zur Minimierung nicht fehlerstellenspezifischer Einflüsse
- Vergleich des TE-Kenndatensatzes mit definierten Referenzdatensätzen mit dem Ziel einer TE-Fehlerdiagnose.

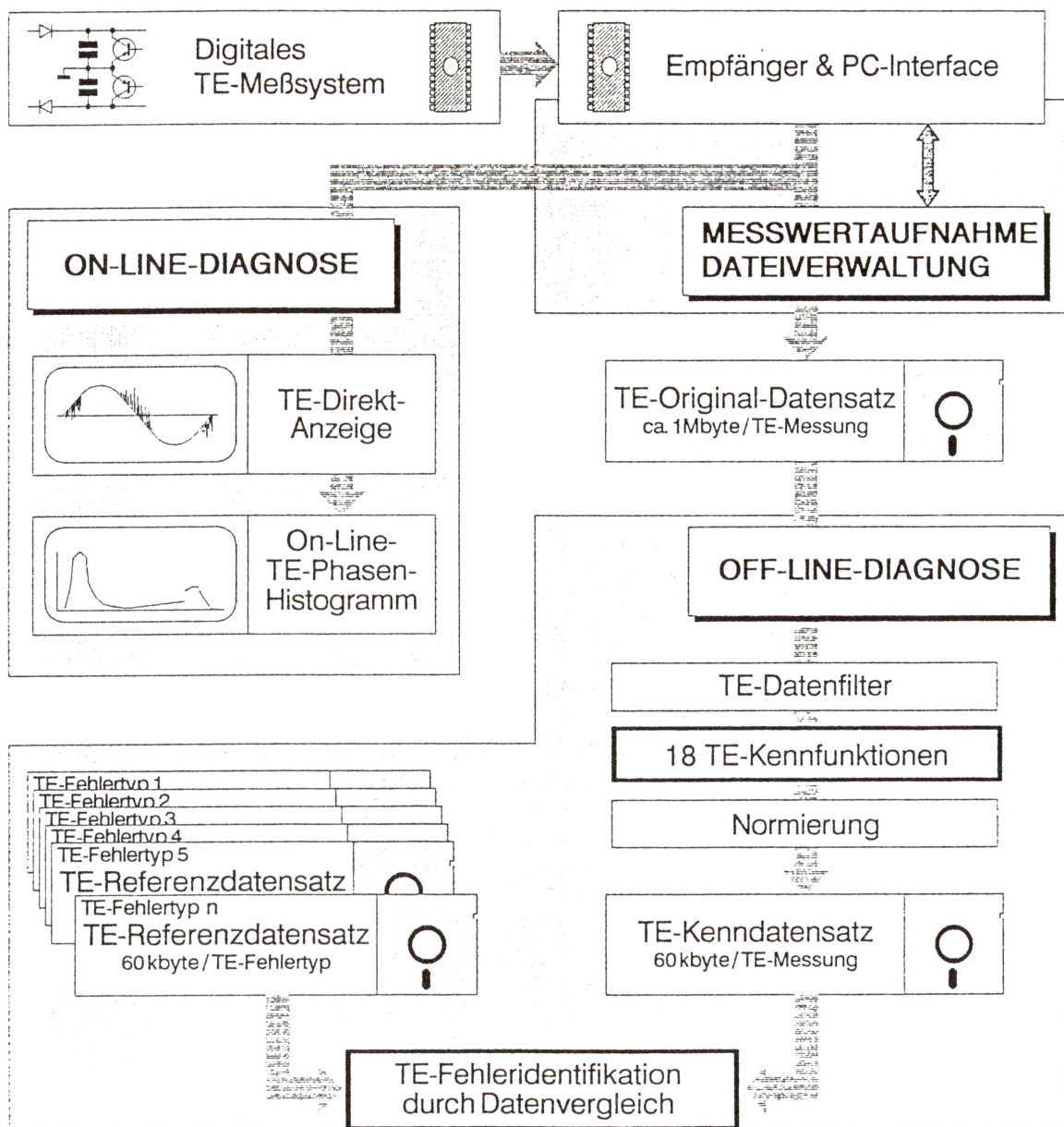


Bild 3: Übersicht zur Softwareorganisation des TE-Diagnosesystems

Das Programmpaket wurde für den Einsatz in einem IBM-kompatiblen PC unter dem Betriebssystem MS-DOS entwickelt. Für die meisten Routinen kam die Programmiersprache C (Turbo C) zur Anwendung.

Menügeführt können wahlweise

- alle aktuellen Meßdaten auf die Festplatte gespeichert werden,
- und/oder in verschiedenen On-Line- und Off-Line-Funktionen dargestellt werden,
- gespeicherte Meßdaten in den Arbeitsspeicher zurückgelesen werden.

3.1 Normierungsverfahren

Das Entladungsverhalten einer TE-Impulsfolge wird in entscheidendem Maße auch von nicht TE-Quellen-spezifischen Größen geprägt. So wird z.B. die Anzahl der erfaßten Entladungsereignisse von der Höhe der Impulsamplitude, bezogen auf den Erkennungsschwellwert der Meßhardware, abhängen. Die Impulsamplitude ist aber auch eine Funktion der kapazitiven Verhältnisse und der Feldstärke am Ort der Teilentladung, die ebenfalls die Amplituden-Statistik beeinflussen.

Weitere variable Parameter erzeugt die Dauer eines Meßvorganges. Zur Reduzierung dieser Einflußgrößen werden für die bewertende Analyse nur die **relativen Kurvenformen** der TE-Kennfunktionen berücksichtigt. Es werden daher alle Kennfunktionen mit Werkzeugen der künstlichen Intelligenz bearbeitet und auf ihren charakteristischen Gehalt reduziert.

Zeitnormierung:

Zur Eliminierung der Einflüsse von Meßdauer und schwankenden Spannungstellgeschwindigkeiten wird die Anzahl der registrierten Ereignisse und Kenngrößen auf die Anzahl der Perioden des betrachteten Spannungsintervalls normiert. In der Phasenwinkelanalyse wird für jedes Winkelintervall eine zeitnormierte Kenngröße berechnet.

Spannungsnormierung:

Der Existenzbereich einer Teilentladungstätigkeit ist außer von der Art einer Fehlstelle in erheblichem Maße von den lokalen Feldstärkeverhältnissen in ihrer Umgebung bestimmt. So kann ein und derselbe Fehlertyp in feldstarken oder in feldschwachen Bereichen eines Isolationssystems durch stark unterschiedliche Einsetzspannungen gekennzeichnet sein. Vergleich-

bare Entladungsformen sind dann nur bei unterschiedlichen absoluten äußeren Spannungshöhen zu erreichen.

Die Berücksichtigung einer variablen Prüfwechselspannung als Differenzierungsparameter ist daher nur sinnvoll, wenn in der bewertenden Analyse Spannungsintervalle gegenübergestellt werden, die vergleichbare physikalische Bedingungen an einer TE-Fehlstelle bewirken. Die Prüfspannung, bei der eine TE-Tätigkeit gerade beginnt, - **die TE-Einsetzspannung** - ist hier der geeignete Bezugswert.

Abszissennormierung:

Die nicht fehlstellenspezifischen Einflüsse auf die meßbare TE-Impulsamplitude und damit auf alle daraus definierten TE-Kenngrößen können auch bei identischem TE-Fehlertyp zu sehr unterschiedlichen Werten in den TE-Kennfunktionen führen. Da hier nicht die absoluten Werte, sondern deren relative Abhängigkeiten einen bestimmten Fehlertyp diagnostizieren, werden die Variablenbereiche (Abszissen) aller Verteilungen der Amplitudenanalyse normiert.

Flächennormierung:

Nach der Berechnung der TE-Kennfunktionen und der zuvor beschriebenen Normierung enthalten alle Histogramme eine unterschiedliche Ordinatenskalierung.

Zur Vorbereitung für die anschließende vergleichende Analyse werden alle Funktionswerte einheitlich auf einen dimensionslosen Integerzahlenbereich abgebildet. Der Normierungsfaktor wird so gewählt, daß die Summe aller Ordinatenwerte gerade 65536 (2^{16}) beträgt, und damit die Flächen aller Histogramme gleich groß werden.

3.2 Softwareorganisation und Meßvorschrift

Die Impulsabstände zeitlich aufeinanderfolgender Teilentladungen können einen großen Wertebereich überdecken. Da in den entsprechenden TE-Kennfunktionen (VertAbst) keine Abszissennormierung stattfindet, werden nur diese Funktionen für zwei Zeitbereiche berechnet.

Die automatisierte Analyse eines TE-Originalmeßdatensatzes erzeugt damit einen TE-Kenndatensatz (198 Histogramme entsprechend 396 Tabellen mit je 64 Werten), der aus den in Tabelle 4 angegebenen 18 Basis-Funktionen besteht.

Nr.	Name	Funktion	Parameter
1	VertSysEE	Verteilung d. TE-Systemenergien	Par.: U_{eff}
2	VertSysEM	Verteilung d. TE-Systemenergien	Par.: $u(t_{TE})$
3	VertImpEE	Verteilung d. TE-Impulsenergien	Par.: U_{eff}
4	VertImpEM	Verteilung d. TE-Impulsenergien	Par.: $u(t_{TE})$
5	Vert Q E	Verteilung d. TE-Ladungen	Par.: U_{eff}
6	Vert Q M	Verteilung d. TE-Ladungen	Par.: $u(t_{TE})$
7	VertAbstE	Verteilung d. TE-Impulsabstände	Par.: U_{eff} , $0 < t < 10ms$
8	VertAbstE	Verteilung d. TE-Impulsabstände	Par.: U_{eff} , $0 < t < 40ms$
9	VertAbstM	Verteilung d. TE-Impulsabstände	Par.: $u(t_{TE})$, $0 < t < 10ms$
10	VertAbstM	Verteilung d. TE-Impulsabstände	Par.: $u(t_{TE})$, $0 < t < 40ms$
11	SummSysEE	Summen d. TE-Systemenergien	Par.: U_{eff}
12	SummSysEM	Summen d. TE-Systemenergien	Par.: $u(t_{TE})$
13	SummImpEE	Summen d. TE-Impulsenergien	Par.: U_{eff}
14	SummImpEM	Summen d. TE-Impulsenergien	Par.: $u(t_{TE})$
15	Summ Q E	Summen d. TE-Ladungen	Par.: U_{eff}
16	Summ Q M	Summen d. TE-Ladungen	Par.: $u(t_{TE})$
17	Summ TE E	Summen d. TE-Ereignisse	Par.: U_{eff}
18	Summ TE M	Summen d. TE-Ereignisse	Par.: $u(t_{TE})$

Tabelle 4: Gliederung des TE-Kenndatensatzes aus 18 Kennfunktionen

Dieser TE-Kenndatensatz belegt zusammen mit einigen Normierungs- und Identifikationsvariablen, unabhängig von der Größe des TE-Originaldatensatzes, einen festen Speicherbereich mit einer Länge von nur 60 kByte. Die darin enthaltene Information beschreibt hinreichend die charakteristische Substanz eines TE-Originaldatensatzes.

Aus dem hier vorgestellten Aufbau eines TE-Kenndatensatzes ergibt sich die folgende Meßvorschrift zur Datenaufnahme:

- Starten des Datenaufnahmeprogrammes
- Hochfahren der Prüfspannung (langsam von 0 bis zum anlagenspezifischen Maximalwert)
- Deaktivieren des Meßsystems
- Abstellen der Prüfspannung

Der gesamte Meßzyklus dauert einige 10 Sekunden und liefert einen TE-Originaldatensatz mit einer Länge von etwa 200 ... 1600 kByte. Nach einer Bearbeitungszeit von wenigen Minuten steht der entsprechende TE-Kenndatensatz zur Verfügung.

3.3 Diagnose durch Vergleich der Kenndatensätze

Ein berechneter TE-Kenndatensatz enthält in kompakter Form alle signifikanten Aussagen über das Teilentladungsverhalten der vier wichtigsten TE-Kenngrößen während des Meßvorganges. Dieser charakteristische "Fingerabdruck" eines TE-Fehlers kann nun mit den Kenndaten aller bereits identifizierter Fehlertypen verglichen werden. Dabei ist das vorrangige Ziel, den gemessenen Fehler sicher **wiederzuerkennen** und gleichzeitig Ähnlichkeiten mit den übrigen Referenzfehlern **auszuschließen**. Die Software benutzt dazu Werkzeuge der computergestützten Mustererkennung.

Der aktuell gemessene "unbekannte Fehler" wird einem **Referenzfehler** zugeordnet, wenn die zugehörigen TE-Kennfunktionen in dem hier verwendeten Vergleichsalgorithmus einen Erkennungsschwellwert überschreiten.

Zur quantitativen Erfassung der Übereinstimmung werden die **Summen der absoluten Differenzen** der in den normierten TE-Kennfunktionen dargestellten Flächen (L_1 -Distanzen) ermittelt und in einem Übersichtsdiagramm dargestellt (Bilder 6a-g).

Getrennt für positive und negative TE-Impulse wird ein polaritätsbezogener Mittelwert über alle Kennfunktionen berechnet.

Das Mustererkennungsprogramm vergleicht automatisch die Kenndatensätze aller in einer Programmbibliothek gespeicherten Referenzfehler mit dem gemessenen "unbekannten Fehler".

Die Diagnoseentscheidung des Systems wird über eine Gesamtübersicht (Bild 7) der Gesamtübereinstimmungen des aktuellen Meßdatensatzes mit allen Referenzen dem Benutzer mitgeteilt.

4. Experimentelle Verifikation der Leistungen eines TE-Expertensystems

Umfangreiche praktische Untersuchungen haben die grundsätzlichen Möglichkeiten und Grenzen des hier beschriebenen Konzeptes aufgezeigt /8/. Für ein selbstlernendes System war dabei insbesondere die Beantwortung der folgenden Fragen von Bedeutung:

- 1.) Wie genau werden bestimmte TE-Fehlertypen vom System wiedererkannt?
- 2.) Wie groß ist der Abstand zwischen Wiedererkennung und Ausschluß?

3.) Deuten die Vergleichsergebnisse auf die Zugehörigkeit einer "unbekannten" TE-Fehlstelle zu einer der Gruppen: TE-Fehler **mit** oder **ohne** Beteiligung dielektrischer Materialien hin?

4.) Wie wirken sich Störsignale auf das angewendete Diagnoseverfahren aus?

Für die Beurteilung der vergleichenden TE-Diagnose wurden in einer SF₆-Anlagenkomponente (Bild 5) grundsätzliche TE-Fehlertypen untersucht. Die Auswahl der Musterfehler orientierte sich dabei an den Problemen der heutigen GIS-Prüfpraxis.

Zur Aufnahme der verschiedenen TE-Musterfehler dient die rechte Kammer der in Bild 5 dargestellten SF₆-Sammelschienen-Trennschalteranordnung. Zur Realisierung z.B. des Fehlers SH wurde eine Metallnadel auf das feldschwache Ende des Innenleiters, mit Orientierung in Feldrichtung, fixiert. Die Diagnoseentscheidung des Systems müßte hier als TE-Quelle eine Metallspitze auf hohem Potential benennen.

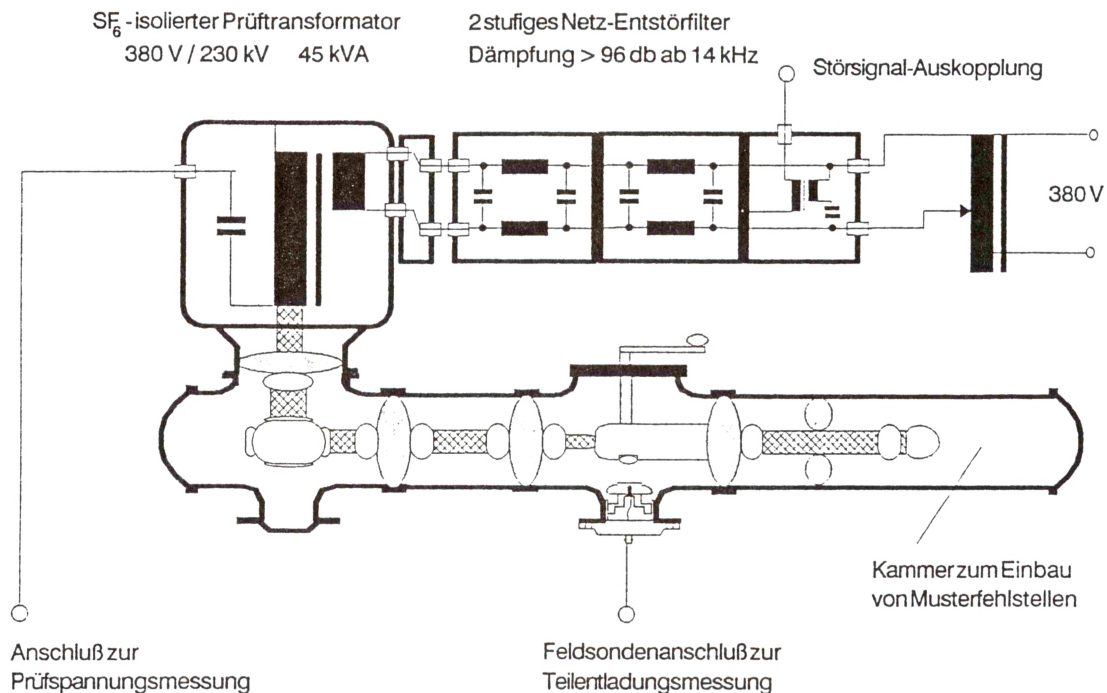


Bild 5: Aufbau zur Erzeugung von TE-Signalen

Folgende Fehlertypen wurden untersucht:

Name	Beschreibung	Grenzflächen
SH	Metallspitze (Fe) auf hohem Potential	Metall-SF ₆
SRH	Metallspitze (Fe) rund, auf hohem Potential	Metall-SF ₆
SE	Metallspitze (Fe) auf Erdpotential	Metall-SF ₆
LP	freie leitende Partikel	Metall-SF ₆
HD	Hohlräume im Dielektrikum	Gas-Dielektrikum
NLP	nichtleitende Partikel (nicht in Referenzliste)	Metall-SF ₆ -Dielektrikum
ABLE	erdseitige Ablösung zw. Diel. und Metall	Metall-SF ₆ -Dielektrikum
LPS	leitendes Partikel auf einem Stützer	Metall-SF ₆ -Dielektrikum
ELFP	Feldsteuerelektrode auf freiem Potential	Dielektrikum-Metall-Gas
LEER	leeres System, nur Grundstörpegel	

Die GIS-Anlagenkomponente mit den eingebrachten Musterfehlern diente hier lediglich als "teilentladungserzeugende Maschine". Das Expertensystem benötigt als Eingangsinformation den Scheitelwert der Prüfwechselspannung und den mit einer Bandbreite von ca. 2 MHz gemessenen TE-Impuls. Die Diagnoseentscheidung wurde von der Art der Ankopplung nicht beeinflusst!

Die Leistungsfähigkeit des Expertensystems wird beispielhaft an einer Wiedererkennungsmessung ABLE1A einer erdseitigen Ablösung einer Elektrode gezeigt. Das System muß hier die Monate zuvor gespeicherte Referenz ABLE1 - Teilentladungssignal einer Metall-SF₆-Dielektrikum-Grenzfläche - wiedererkennen (Bild 6g) und jede Ähnlichkeit mit einem anderen Musterfehler sicher ausschließen (Bilder 6a-f)

Die zusammenfassende Diagnose zeigt Bild 7. Die Ablösung wird mit einer Wahrscheinlichkeit von insgesamt 81,36 % diagnostiziert; der absolute Identifikationsabstand zum nächsten Musterfehler (SRH1 - Metallspitze rund, auf hohem Potential) beträgt 57,06 %.

Die Analyse aller übrigen Wiedererkennungsmessungen der hier untersuchten Musterfehler SHA-1, SEA-1, LPA-1, HDA-1, LPSA-1, ELFPA-S und LEERA-1 ist in Bild 8 tabellarisch zusammengefaßt. Mit Ausnahme der Leermessung LEER (nur wenige, statistisch stark streuende Störimpulse) zeigen die jeweiligen Differenzen zwischen Wiedererkennung und Ausschluß ein signifikantes

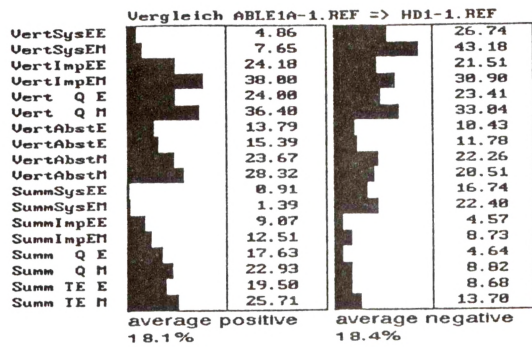


Bild 6a: Kenndatenvergleich: Ausschluß, daß die Meßwerte einen Hohlraum im Dielektrikum (Fehler HD) beschreiben.

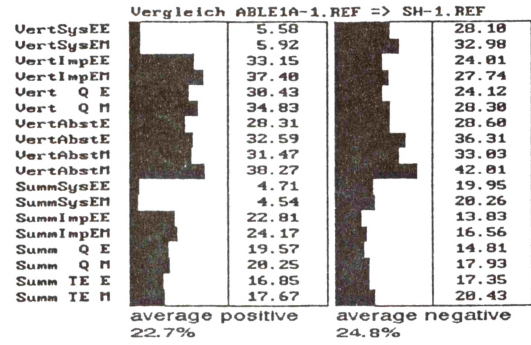


Bild 6e: Kenndatenvergleich: Ausschluß, daß die Meßwerte eine Metallspitze auf hohem Potential (Fehler SH) beschreiben

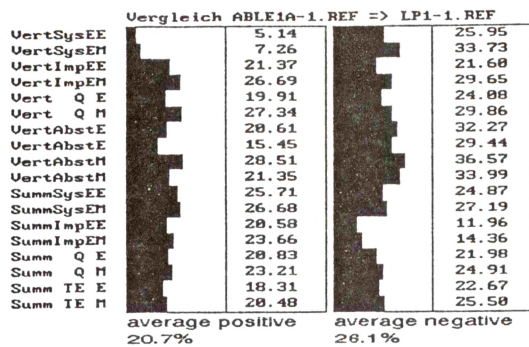


Bild 6b: Kenndatenvergleich: Ausschluß, daß die Meßwerte leitende Partikel (Fehler LP) beschreiben

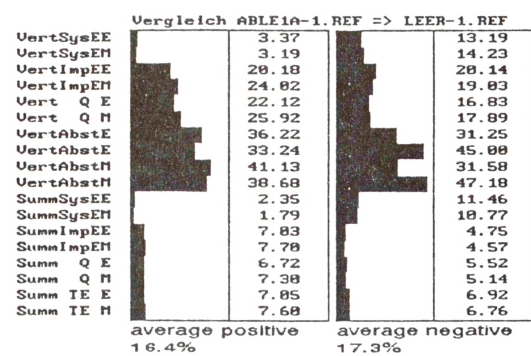


Bild 6f: Kenndatenvergleich: Ausschluß, daß die Meßwerte ein leeres System (Fehler LEER) beschreiben

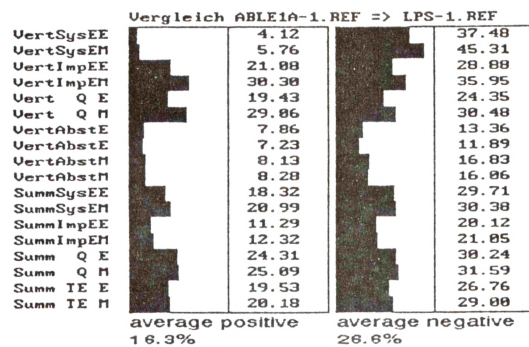


Bild 6c: Kenndatenvergleich: Ausschluß, daß die Meßwerte leitende Partikel auf einen Stützer (Fehler LPS) beschreiben

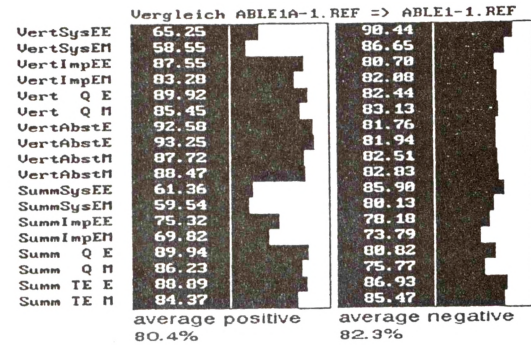


Bild 6g: Diagnose: Wiedererkennung, daß die Meßwerte eine Elektrodenablösung (Fehler ABLE) beschreiben

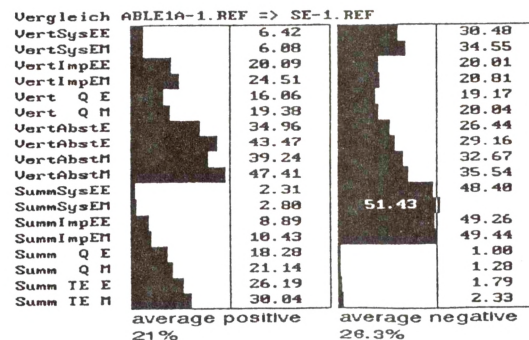


Bild 6d: Kenndatenvergleich: Ausschluß, daß die Meßwerte eine Metallspitze auf Erdpotential (Fehler SE) beschreiben

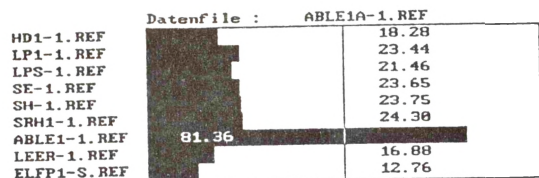


Bild 7: Übersicht über den Kenndatenvergleich aller Musterfehler. Diagnoseentscheidung des Systems: Die Meßdaten stammen von einer Ablösung
Diagnosesicherheit: 81,36 %
Identifikationsabstand: 70 % (IDAR)

Verhalten. Die runde Spitze auf hohem Potential und die Spitze auf Erdpotential lassen sich aber nicht differenzieren, weil bei diesen TE-Quellen das physikalische Teilentladungsverhalten sehr ähnlich ist.

Zur quantitativen Beurteilung der Diagnoseentscheidungen wird ein relativer Identifikationsabstand IDAR definiert:

$$\text{IDAR} = \frac{\% \text{-Wert Wiedererkennung} - \text{höchster } \% \text{-Wert Ausschluß}}{\% \text{-Wert Wiedererkennung}}$$

IDAR ist damit die bezogene Differenz der Gesamtübereinstimmungen der diagnostizierten Wiedererkennung und des schwächsten Ausschlusses (anderer Fehlertyp mit der größten Ähnlichkeit). Die Höhe der absoluten Übereinstimmungen kann auch als ein Maß für die Diagnosesicherheit verstanden werden.

Wiederholungsmessungen xxxxA-1



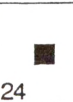









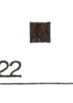


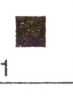
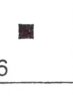

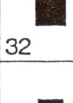
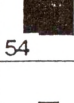
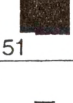
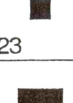



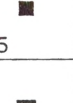
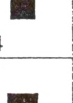





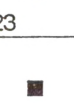












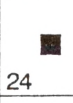
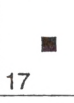




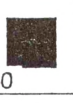
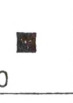

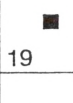
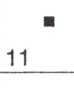
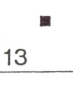
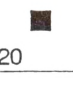


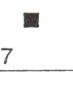

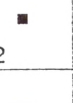
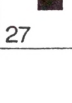
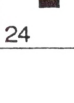
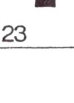
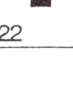
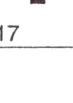
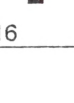
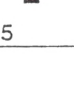
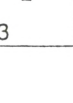
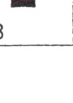









	SH	SRH	SE	LP	HD	ABLE	LPS	ELFP	LEER
SH	 51	 26	 24	 35	 24	 23	 26	 18	 27
SRH	 28	 55	 41	 22	 33	 24	 31	 16	 28
SE	 32	 54	 51	 23	 26	 24	 31	 15	 24
LP	 29	 20	 22	 46	 28	 23	 30	 22	 30
HD	 25	 27	 27	 22	 56	 18	 25	 22	 23
ABLE	 22	 33	 25	 23	 22	 81	 24	 15	 26
LPS	 24	 17	 16	 25	 25	 21	 50	 20	 20
ELFP	 19	 11	 13	 20	 21	 12	 17	 55	 12
LEER	 27	 24	 23	 22	 17	 16	 15	 13	 28

Bild 8: Gesamtübereinstimmungen der Wiedererkennungsmessungen in %.

Die Diagnosesicherheit ist damit auch eine Funktion der physikalischen Entladungsprozesse in einer inneren oder äußeren Teilentladung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß bereits ohne eine physikalische Gewichtung der einzelnen TE-Kennfunktionen **alle untersuchten** TE-Fehlertypen einschließlich der hier nicht dokumentierten vom System identifiziert wurden. Eine Ausnahme bildet hier nur die als "TE-Fehlertyp" berücksichtigte Leermessung (LEER), die natürlich bei jeder Messung ein anderes "Störimpulsmuster" liefert.

Im Vergleich zu reinen Metall-Gas-Fehlern SH, SRH, SE, LP zeigt das System für die **kritischen dielektrischen Fehlertypen (HD, ABLE, LPS)** eine besonders **große Diagnosesicherheit**. Sowohl die relativen Identifikationsabstände IDAR als auch die Werte der absoluten Übereinstimmungen dielektrischer Fehlertypen liegen über denen der meisten Metall-Gas-Fehler.

Das Systemverhalten gegenüber unbekannten Fehlern (d.h. Fehler, für die noch keine Referenzmessungen vorliegen) läßt sich aus den oben dargestellten Ergebnissen abschätzen.

Unter der Annahme, daß in den dargestellten Vergleichen eine Referenzfehlerart nicht vorhanden wäre, würde die Analyse jeweils den nächstwahrscheinlichen, falschen TE-Fehlertyp und damit den schwächsten Ausschluß, identifizieren. Die zugehörigen niedrigen Werte der Gesamtübereinstimmung weisen aber auf eine hohe Unsicherheit der Diagnose hin. Unter 40 % Gesamtübereinstimmung und einen Identifikationsabstand von weniger als 30 % muß ein Fehler als "unbekannt" eingestuft werden.

5. Zusammenfassung

Die Entwicklung der Mikrocomputertechnik wird die Rechenzeiten der computergestützten Analyse weiter stark reduzieren. Versuche in einer Schaltungsanlagenfabrik haben die Funktionsfähigkeit des Expertensystems auch an großvolumigen dreiphasigen Prüfkomponenten bestätigt. Die industrielle GIS-Prüfpraxis erfordert jedoch für jede Produktgruppe eine erweiterte, über grundsätzliche Fehlertypen hinausgehende Datenbank. Das selbstlernend konzipierte System ist jedoch in der Lage, jeden "neuen" oder bis dahin "unbekannten" TE-Fehler sicher zu speichern und dann wiederzuerkennen. Ein Expertensystem vergißt nichts, wird nicht krank und wechselt nicht den Ar-

beitsplatz mit der latenten Gefahr des Verlustes der für die konventionelle TE-Prüfung unverzichtbaren Betriebserfahrung.

Insgesamt bestätigen die dargelegten Ergebnisse die generelle Leistungsfähigkeit des erarbeiteten computergestützten Diagnosekonzeptes. Die Vielzahl der hier nur komprimiert dargestellten Systemeigenschaften lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Im Durchschnitt besitzen alle 18 TE-Kennfunktionen ein etwa gleich hohes Wiedererkennungspotential gegenüber den hier untersuchten Musterfehlern.
- Abhängig vom TE-Fehlertyp zeigen bestimmte TE-Kennfunktionen ein besonderes Differenzierungsvermögen.
- Für die kritischen dielektrischen TE-Fehler ergibt sich in GIS-Komponenten eine besonders hohe Diagnosesicherheit.
- Der als Maß für die Übereinstimmung mit einem dem Expertensystem bekannten TE-Fehlertyp eingeführte Identifikationsabstand (IDAR) zeigt nur eine geringe Abhängigkeit von unterschiedlichen Meßzeiten und einer nichtstetigen Prüfspannungsstellung.
- Obwohl bei der Einwirkung von (praxisnahen) Störsignalen zum Teil Einbußen in den Identifikationsabständen beobachtet werden, ergeben sich daraus keine Fehldiagnosen.
- Die Reduzierung des Prüfspannungshubes und damit die Begrenzung der bewertbaren Information wird bei manchen Fehlern mit drastischen Verschlechterungen der Identifikationsabstände, bis hin zur Fehldiagnose, beantwortet.

6. Schrifttum

- /1/ Kärkkäinen: Multichannel pulse analyzer in Partial discharge studies, ISH-Zürich (1975)
- /2/ Kranz: Partial discharge evaluation of PE-cable material by phase angle and pulse shape analysis
IEE-Trans. (1982), Vol EI-17, No.2
- /3/ Menguy, Guerin, Fallou, Fortune: Partial Discharges Energy Measurements on Insulation Systems and Equipments
1988 IEEE Int. Symp. on Electrical Ins., Boston

- /4/ Austin, James: On-Line Digital Computer Systems for Measurement of Partial Discharges in Insulation Structures
IEEE-Trans. (1976), Vol. EI-11, No.4
- /5/ Vaillancourt, Malewski: Digital Aquisition and Processing of Partial Discharges During Acceptance Tests of HV Transformers
IEEE Paper 88 WM 049-9 (PES 1988 Winter Meeting)
- /6/ Gassaway, Jacob, Vassiliadis, Reynolds: Computer Aided Partial Discharge Measurement and Recognition
5th ISH, Braunschweig 1987
- /7/ Kranz, Krump: Computer Aided Partial Discharge Evaluation about the Surface Material of the PD-Source in Gas Insulated Substations
1988 IEEE Int. Symp. on Electrical Ins., Boston
- /8/ Krump: Ein störsignalresistentes Verfahren zur computergestützten Teilentladungsdiagnostik in SF₆-isolierten Schaltanlagen
Diss. Bergische Universität Wuppertal (1989)