

Hardwareaufbau und Softwarestruktur des neuen digitalen TE-Meßgerätes Type TE 571

Ladislaus Kehl
Haefely - Trench, Basel

1. Einleitung

Die digitale Signalverarbeitung ermöglicht umfangreiche, statistische Auswertungen von Teilentladungen (TE) bzw. deren Kenndaten, die mit analogen Meßgeräten bisher nur teilweise und mit hohem Aufwand gemacht werden konnten. Der Vorteil für den Anwender solcher digitaler TE-Meßgeräte ist ein deutlicher Informationsgewinn bezüglich der beobachteten Eigenschaften der TE-Quelle. Dies erlaubt eine differenziertere Bewertung, Analyse und Darstellung der zu untersuchenden TE-Erscheinung.

Ein weiterer Unterschied zwischen der analogen und der digitalen TE-Meßtechnik zeigt sich auch bereits bei der Erfassung von TE-Impulsen. Während bei digitalen Methoden durch die lückenlose Erfassung aller TE-Impulse jeder einzelne Impuls nachgewiesen werden kann, besitzen analoge Geräte meist Schaltungen zur Glättung und zeitlichen Bewertung der Impulse. Bei TE-Meßgeräten, die jeden einzelnen Impuls auf einem Oszilloskop darstellen, ist die Bewertung des Impulses durch das menschliche Auge zudem auch noch subjektiv. Ob die lückenlose Erfassung und Darstellung jedes einzelnen TE-Impulses als Vor- oder Nachteil zu bewerten ist, hängt vermutlich vom jeweiligen Standpunkt des Anwenders ab. Im Entwurf der neuen IEC 270 wurde dieses Problem offenbar erkannt, so daß auch bei den digitalen Meßgeräten ein Bewertungs- bzw. Glättungsalgorithmus sehr wahrscheinlich definiert und zulässig sein wird.

2. Hardwareaufbau

Ein digitales TE-Meßgerät unterscheidet sich in der Regel nicht sehr von einem analogen, zumindest bis zu dem Punkt, wo die Umsetzung des Signals bzw. der Signale in 8, 10 oder 12-bit breite Datenworte erfolgt. Anstelle von Drehschaltern oder Tastern zur Einstellung der Signalverstärkung werden kleine Relais oder integrierte Analogschalterbausteine verwendet. Dadurch kann die Signalverstärkung vom digitalen Teil des Meßgerätes automatisch so eingestellt werden, daß die Aussteuerung der gesamten Meßkette möglichst immer optimal ist. Lediglich gegenüber analogen Meßgeräten, die auch eine Umformung der Signale, wie z.B. eine Quadrierung, vornehmen, kann der Aufbau eines digitalen Gerätes einfacher ausgeführt werden, da die scheinbare Ladung allein als Basis für weitere Auswertungen ausreichend ist.

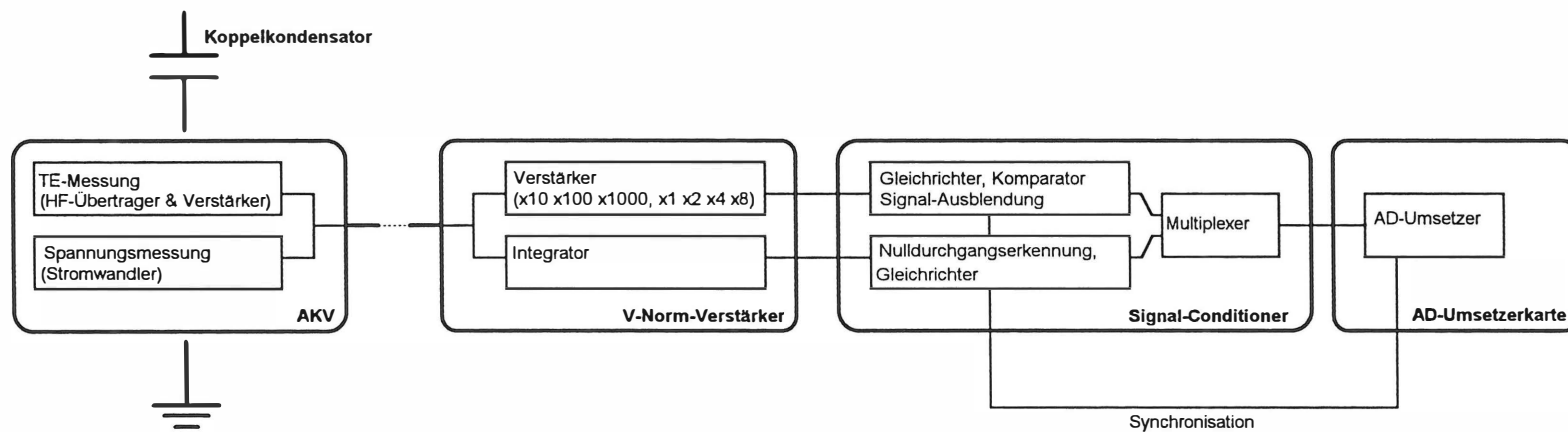


Fig. 1: Blockschaftbild des digitalen TE-Meßgerätes TE 571 mit Ankopplungsvierpol AKV 572

2.1 AKV 572

In Fig. 1 ist das Blockschaltbild des Haefely TE-Meßgerätes TE 571 zusammen mit dem Ankopplungsvierpol AKV 572 dargestellt. Der AKV 572 entspricht in seinen technischen Daten und im Aufbau im wesentlichen dem Universal-AKV 568, der in Verbindung mit den analogen TE-Detektoren TE 560 / TE 561 verwendet wird. Lediglich der max. zul. Strombereich wurde von 500 mA auf 2 A erweitert und der bisher manuell zuschaltbare Verstärker mit einem Relais ausgestattet, so daß der Verstärker vom Meßgerät aktiviert werden kann. Die 3 bisher verwendeten BNC-Koaxialkabel wurden durch ein spezielles, mehrpoliges Kabel ersetzt.

2.2 V-Norm-Verstärker

Innerhalb des V-Norm-Verstärkers, der im TE-Meßgerät angeordnet ist, wird das TE-Meßsignal gefiltert (40 - 400 kHz) und in 4 Stufen verstärkt. Alle Stufen können unabhängig voneinander eingestellt werden, wobei die ersten 3 eine Verstärkung von jeweils x10 besitzen. Die letzte Stufe dient der Feineinstellung der Gesamtverstärkung. Sie kann auf eine Verstärkung von x1, x2, x4 oder x8 eingestellt werden.

Parallel zum TE-Signalzweig befindet sich der Zweig zur Verstärkung des Spannungssignals. Da zur Spannungsmessung der Strom durch den Koppelkondensator in den TE-Meßgerät übertragen wird, muß dieser zunächst integriert werden, um wieder den tatsächlichen Verlauf der Spannung zu erhalten.

2.3 Signal-Conditioner

Im sogenannten Signal-Conditioner werden beide Signale zunächst weiterhin getrennt bearbeitet. Das TE-Signal wird gleichgerichtet und über einen Komparator mit einstellbarem Schwellwert geführt. Der Komparator dient zur Unterdrückung von Störungen und blendet das Signal solange aus, bis der Schwellwert überschritten ist. Prinzipiell könnte die Störunterdrückung auch erst nach der Umsetzung in die digitalen Datenworte erfolgen. Dies würde jedoch eine erheblich höhere Rechenleistung des Prozessors erfordern, die für andere Zwecke sinnvoller eingesetzt werden kann. Nachdem der Komparator das Signal freigegeben hat, ist es möglich, das Signal nach der Digitalisierung für eine einstellbare Zeit zwischen 6 und 69 µs weiter auszublenden, um die Impulsauflösung des Gerätes zu verändern.

Die Information über die scheinbare Ladung des TE-Impulses steckt in der Amplitude des bis hierhin aufbereiteten TE-Signales. Es ist deshalb nicht notwendig, den Verlauf des Impulses digital aufzuzeichnen. Es genügt, wenn der Scheitelwert, der innerhalb einer gewissen Zeitspanne aufgetreten ist, digitalisiert wird. Dazu wird ein Spitzenwert-Speicher verwendet, der sich am Ausgang des Komparators befindet.

Zur vollständigen Beschreibung des TE-Impulses und zur Auswertung seiner Energie muß zusammen mit dem Spitzenwert eines Impulses auch seine Phasenlage bzw. die momentane Spannung gespeichert werden. Dazu werden beide Signale mit Hilfe eines Multiplexers abwechselnd auf den AD-Umsetzer geführt und digitalisiert. Da sich die Spannung jedoch nur verhältnismäßig langsam ändert, können jeweils 15 TE-Impulse zu einer Gruppe zusammengefaßt und mit nur einem Spannungswert gespeichert werden. Dadurch erhöht sich

die Informationsmenge zugunsten der TE-Messung und die Redundanz bezüglich der Spannungsmessung wird deutlich reduziert.

Zur Unterscheidung der digitalen Datenworte wird das Vorzeichen der Worte verwendet. Alle TE-Impulse gelangen bereits gleichgerichtet an den AD-Umsetzer. Das Vorzeichen dieser Daten ist damit immer identisch (in Fig. 2 immer positiv). Die mit $1/16$ der Abtastfrequenz digitalisierte momentane Spannung besitzt dagegen immer das entgegengesetzte Vorzeichen (in Fig. 2 negativ). Sie wird dazu ebenfalls gleichgerichtet. Damit geht zunächst die Information über die Polarität der Halbschwingung der Wechselspannung verloren, so daß diese in einer anderen Form in die Folge der Datenworte wieder eingefügt werden muß. Dazu wird die Richtung der Nulldurchgänge der Spannung ausgewertet und durch zwei verschiedene, sonst nicht vorkommende Spannungspegel (-5 V bzw. -4.5 V) zum Zeitpunkt des Nulldurchganges charakterisiert.

2.4 AD-Umsetzerkarte

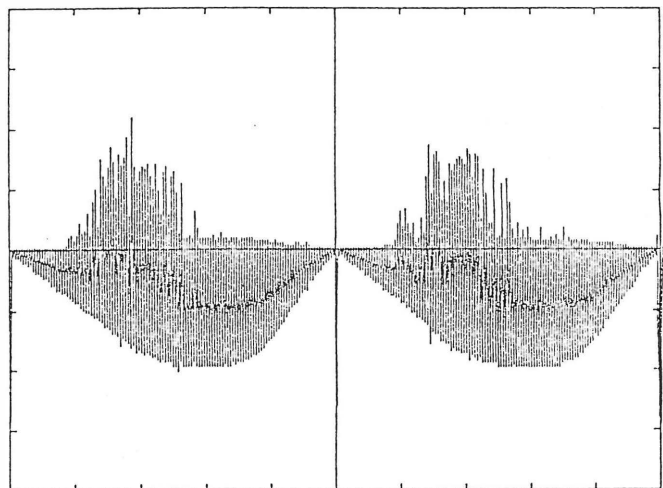


Fig. 2: Signalverlauf am Eingang des AD-Umsetzers

Die Abtastung des Signals am AD-Umsetzer, der auf einer PC-Einsteckkarte angeordnet ist, erfolgt mit 200 kHz und ist mit den Spitzenwert-Speichern synchronisiert. Die Einsteckkarte besitzt zwei voneinander unabhängige Speicherbereiche, die abwechselnd mit den Datenworten des AD-Umsetzers gefüllt werden. Ist ein Bereich gefüllt, so wird auf den anderen Bereich umgeschaltet und gleichzeitig der erste vom Prozessor ausgelesen, damit er anschließend wieder neue Daten aufnehmen kann. Die digitale Auflösung der TE-Impulse

beträgt 8 Bit, während die Auflösung der Spannung lediglich 7 Bit ist, da die Speicherung des Polaritätswechsels der Spannung 1 Bit benötigt.

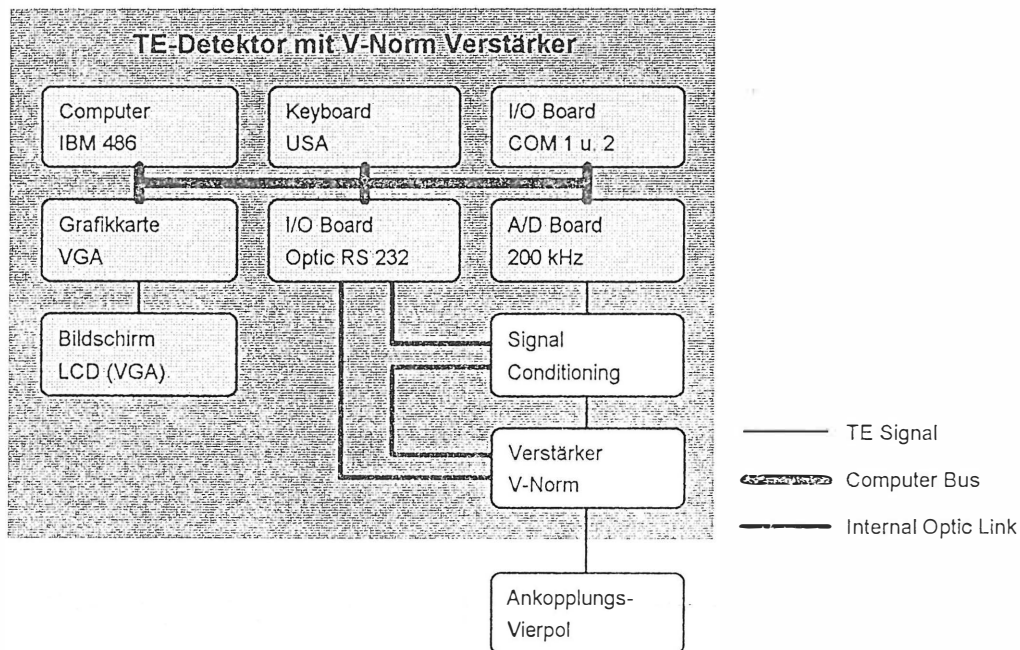


Fig. 3: vollständiges TE-Meßgerät mit V-Norm-Verstärker

2.5 Option "Fehlerortung in Kabeln"

Die bisher beschriebene Basisversion des Gerätes kann um einen Breitbandverstärker und eine schnelle AD-Umsetzerkarte ergänzt werden, um damit Fehlern in Kabeln orten zu können. Der Breitbandverstärker ist direkt am Eingang des V-Norm-Verstärkers parallel geschaltet und verstärkt das TE-Signal in ähnlicher Weise, wie der V-Norm-Verstärker. Die Aufzeichnung des TE-Impulses und seiner Reflexion erfolgt mit Hilfe der schnellen AD-Umsetzerkarte. Ihre höchste Abtastfrequenz beträgt 40 MHz.

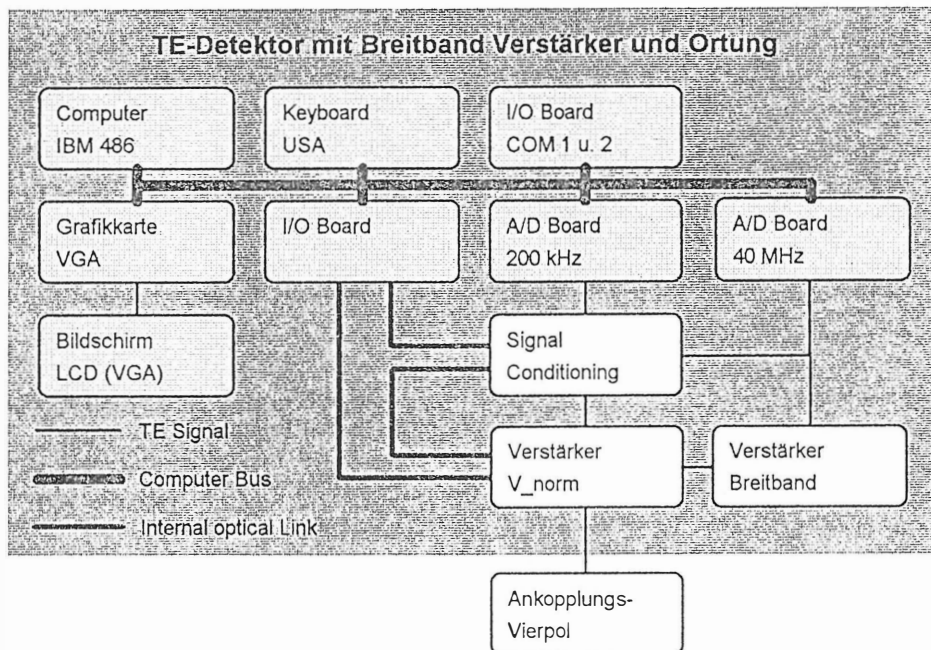


Fig. 4: TE-Meßgerät mit Breitbandverstärker und Fehlerortung

2.6 Option "Opto-AKV"

Eine weitere Option stellt der optische Ankopplungsvierpol dar, der zur Störunterdrückung eingesetzt werden kann. Er ist batteriebetrieben und kann auch auf Hochspannungspotential zur TE-Messung verwendet werden. Gegenüber der Basisversion ist bei diesem AKV die Verstärkerkette des V-Norm-Verstärkers bereits im AKV angeordnet. Auf der Geräteseite ist statt des Verstärkers dann der optische Empfänger angeordnet.

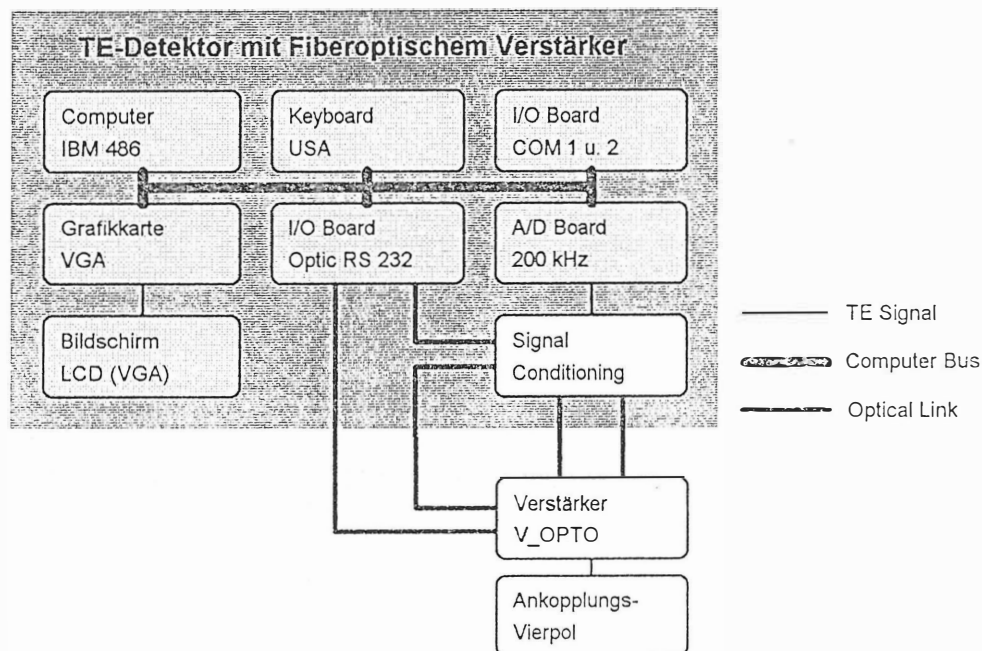


Fig. 5: TE-Meßgerät mit optischem Verstärker

2.7 Option "Störunterdrückung"

Die aufwendigste Option stellt die Störunterdrückung mit zwei optischen AKV, einer Brücke mit Bandpassfilter und einem Diskriminator dar.

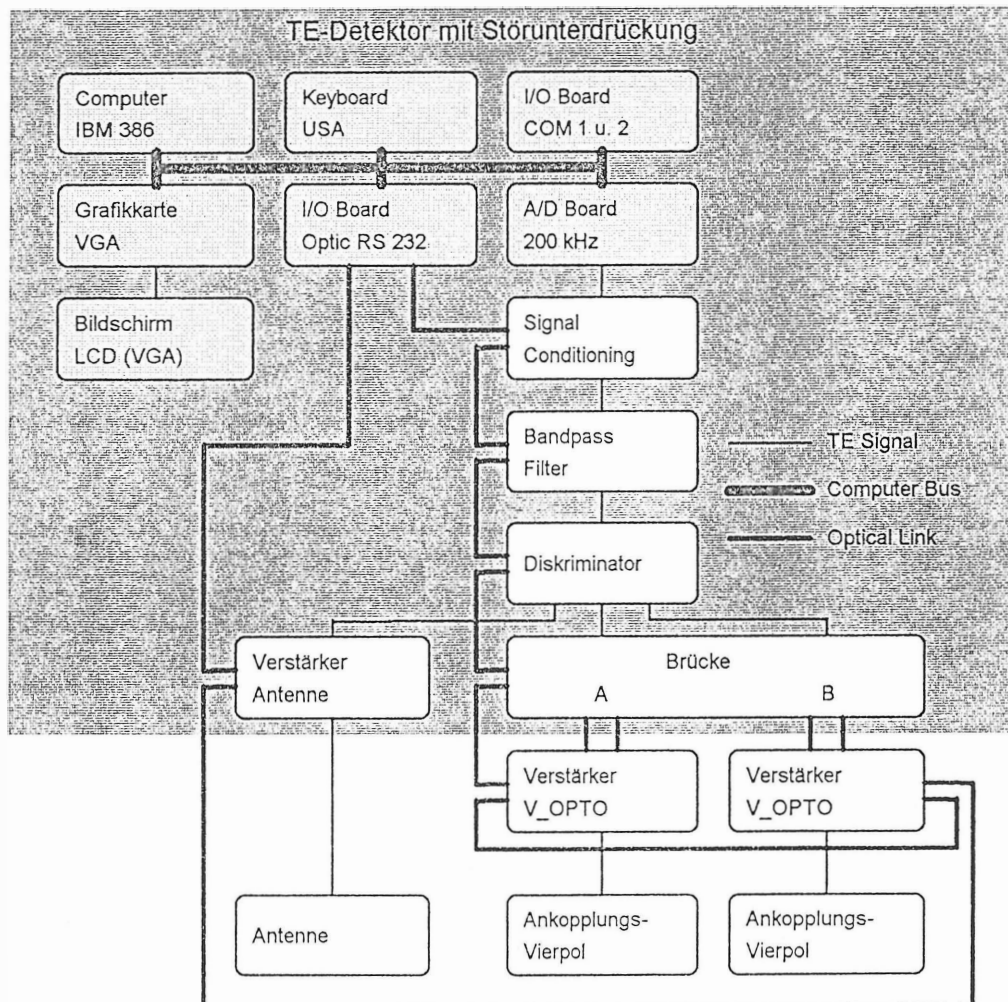


Fig. 6: TE-Meßgerät mit Störunterdrückung

3. Softwarestruktur

Entsprechend den unterschiedlichen Anforderungen an ein digitales TE-Meßgerät lassen sich beim TE 571 vier Anwendungsarten unterscheiden:

- Online-Anzeige
- Routinemessung
- Analysemessung
- Diagnose (als Option)

3.1 Online-Messung

Der Online-Anzeigemodus ist so gestaltet, daß er weitestgehend dem Messen mit einem analogen TE-Meßgerät entspricht, sowohl was die Anzeige, als auch die Bedienung betrifft. Selbst ohne daß das Gerät vorher kalibriert werden muß, werden die TE-Aktivitäten auf dem Bildschirm in einem Fenster, das einem Oszilloskop nachempfunden wurde, angezeigt. Der Meßbereich kann durch Tastendruck geändert werden oder erfolgt bei entsprechender Einstellung im Konfigurationsmenü sogar automatisch. Neben der graphischen Darstellung der TE-Impulse im Oszilloskop-Fenster werden der max. TE-Pegel und die aktuelle Spannung als Zahlenwerte angezeigt. Solange keine Kalibration durchgeführt wurde, wird neben dem TE-Pegel ein Hinweis darüber eingeblendet.

Die Synchronisation der Messung erfolgt je nach Einstellung im Konfigurationsmenü entweder über die gemessene Spannung (Extern) oder über die interne Speisung des TE-Meßgerätes (Auto), falls die über den AKV gemessene Spannung zu klein ist.

Zur Unterdrückung phasensynchroner Störer können Teile der Anzeige in sogenannten Phasenfenstern ausgeblendet werden. Die Phasenfenster haben eine Breite von 10° und sind voneinander unabhängig ein- bzw. ausschaltbar.

Die Protokollierung von Meßwerten erfolgt entweder auf Tastendruck oder automatisch in einem einstellbaren zeitlichen Abstand. Neben dem TE-Pegel und der aktuellen Spannung können der Grundstörpegel, die Ein- und Aussetzspannung und die Frequenz der Spannung jeweils mit den zugehörigen Zeitinformationen gespeichert werden. Prüflingsspezifische Daten können in einer eigenen Eingabemaske ebenfalls gespeichert werden, die dann später beim Drucken des Protokolles mit eingefügt werden.

3.2 Routinemessung

Während bei der Online-Messung bis auf den max. TE-Pegel und die Spannung keine Speicherung der Daten möglich ist, werden bei einer Routinemessung alle innerhalb der eingestellten Meßzeit aufgetretenen TE-Impulse erfaßt und gespeichert. Sie können nach Abschluß der Messung auf die eingebaute Festplatte übertragen und zu einem späteren Zeitpunkt wieder geladen und ausgedruckt werden. Die Anzeige und der Druck der aus den gemessenen Impulsen berechneten Daten wie z.B.

- die maximale Ladung q_{\max} in Abhängigkeit der Zeit
- die mittlere Ladung q_{mean} in Abhängigkeit der Zeit
- die max. Leistung p_{\max} in Abhängigkeit der Zeit
- die mittlere Leistung p_{mean} in Abhängigkeit der Zeit
- die Häufigkeit der Entladungen in Abhängigkeit der scheinbaren Ladung
- die Häufigkeit der Entladungen in Abhängigkeit der Leistung
- die maximale Ladung q_{\max} in Abhängigkeit vom Phasenwinkel

um nur einige zu nennen, kann damit auch zu einem späteren Zeitpunkt und auf einem anderen Standard PC, auf dem die Programme des TE 571 installiert wurden, erfolgen.

Die Daten werden während der Messung in 30 Puffern zwischengespeichert und verdichtet. Die Verdichtung erfolgt nach dem Maximum-Kriterium, d.h. der TE-Pegel an der aktuellen Phasenposition wird nur dann gespeichert, wenn er größer ist, als der bisher am selben Ort aufgetretene größte Impuls. Sind alle 30 Puffer gefüllt, ist die Routinemessung beendet. Während der gesamten Meßzeit werden die bis zum aktuellen Zeitpunkt aufgetretenen größten Impulse auch im Oszilloskop-Fenster an der jeweiligen Phasenposition angezeigt. Der bis zu diesem Zeitpunkt größte TE-Pegel wird auch als Zahlenwert auf dem Bildschirm ausgegeben.

3.3 Analysemessung

Im Gegensatz zur Routinemessung ist bei der Analysemessung nicht immer gewährleistet, daß alle TE-Impulse erfaßt werden. Im Vordergrund steht bei dieser Art der Messung vielmehr das Sammeln von möglichst vielen Informationen zur Analyse und Beschreibung der TE-Aktivität. Dabei spielt es keine Rolle, ob kurze Unterbrechungen während der Aufzeichnung auftreten oder nicht. Die Ursache für die Unterbrechungen liegt in der teilweise sehr hohen erforderlichen Rechenzeit des Prozessors bei der Auswertung der Meßdaten, die bei der Analysemessung jeweils nach 1/1000 der gesamten Meßzeit ausgeführt wird. Solange die TE-Aktivität eine gewisse Häufigkeit nicht übersteigt, ist aber auch die Aufzeichnung der Analysemessung in der Regel lückenlos. Durch die häufige Zwischenauswertung der Meßdaten sind nach einer Analysemessung deutlich mehr Informationen über das Verhalten und der TE-Quelle verfügbar, die eine differenziertere Analyse der Meßdaten mit Hilfe der vielfältigen Anzeigemöglichkeiten erlauben.

3.4 Diagnose

Nachdem eine Analysemessung beendet ist, können die gesammelten Daten statistisch analysiert und ein sogenannter Fingerabdruck der TE-Quelle erstellt werden. Weiterhin ist es möglich, den Fingerabdruck mit anderen Fingerabdrücken bekannter TE-Quellen zu vergleichen, um die unbekannte TE-Quelle zu klassifizieren. Fingerabdrücke, die zu einem Umfeld, z.B. Spulen oder Kabel, gehören, sind dabei sinnvollerweise jeweils in einer eigenen Datenbank zusammengefaßt. Das Verfahren der Analyse und der Klassifikation wird im folgenden Beitrag erklärt.

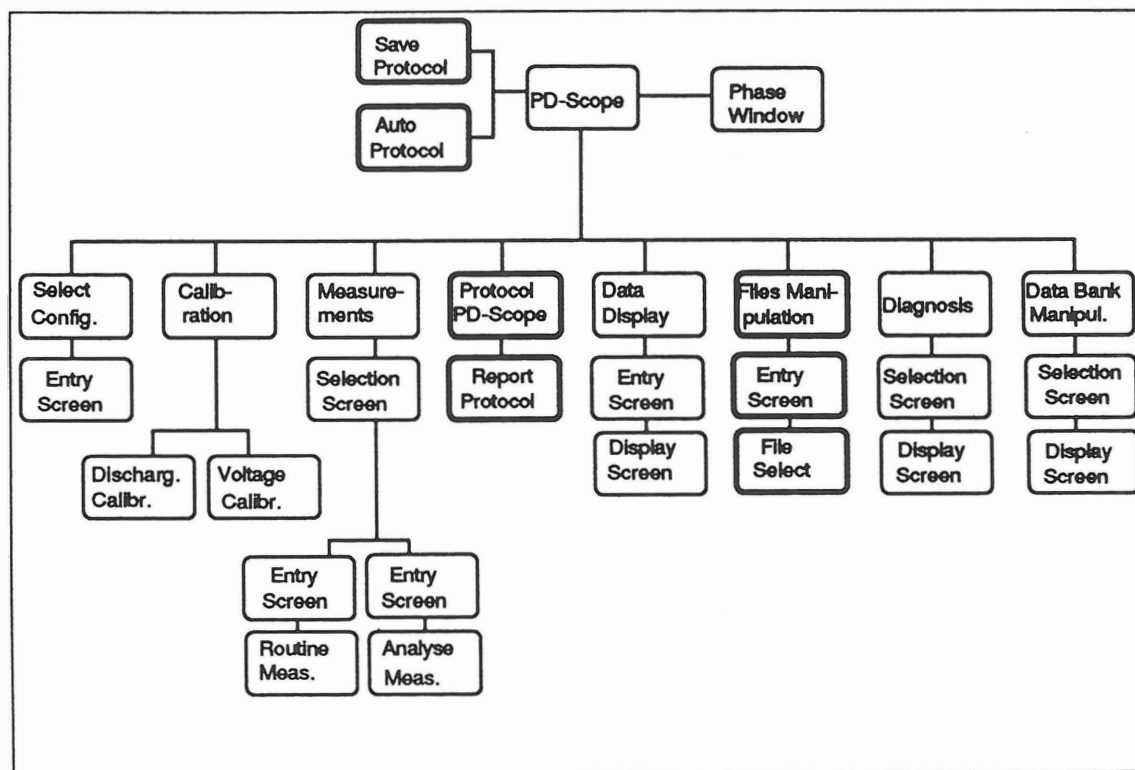


Fig. 7: Struktur der Software des TE-Meßgerätes vom Typ TE 571