Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 78 (1987)

Heft: 9

Artikel: Zur Ortung und Beurteilung von Teilentladungen an Kunststoff-Hochspannungskabeln

Autor: Osvath, P. / Biasutti, G. / Zaengl, W. S.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903853

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 06.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Zur Ortung und Beurteilung von Teilentladungen an Kunststoff-Hochspannungskabeln

P. Osvath, G. Biasutti und W. S. Zaengl

Von grosser Bedeutung für den Entwurf und optimalen Aufbau von TE-Messsystemen für Kunststoff-Hochspannungskabel ist die durch die Kabelkonstruktion und Kabellänge bedingte Dispersion der TE-Impulse. Für ein typisches VPE-Mittelspannungskabel wird diese Dispersion experimentell untersucht. Aus den Ergebnissen lassen sich wichtige Erkenntnisse für die Dimensionierung der Messsysteme ableiten.

La dispersion des impulsions de décharge partielle conditionnée par la construction et la longueur des câbles est d'une grande signification pour l'élaboration et la construction optimale de systèmes de mesure de décharge partielle. Pour un câble XLPE de moyenne tension typique, cette dispersion sera par la suite examinée expérimentalement. D'importantes connaissances pour la construction des appareils de mesure résulteront de ces examens.

Adressen der Autoren
Prof. Dr. *W.S. Zaengl*, Hochspannungslabor, ETH-Zürich, 8092 Zürich,
Dr. *P. Osvath*, Tettex AG Instruments, Rotbuchstrasse 45, 8042 Zürich,
Dr. *G. Biasutti*, Dätwyler AG, 6460 Altdorf.

1. Bedeutung der TE-Messung an Hochspannungskabeln

Hohe Betriebssicherheit und lange Lebensdauer, gleichbedeutend mit hoher elektrischer Durchschlagsfestigkeit bei nur mässigem Alterungsfortschritt («Festigkeitsverbrauch»), sind die letztlich wichtigsten Qualitätskriterien eines Hochspannungskabels. Beide Grössen – Festigkeit und Alterung – lassen sich allerdings nur mittels aufwendiger, zerstörender Laboruntersuchungen (elektrisch, optisch) an Einzelprüflingen (typischerweise 10 m) quantifizieren. Dabei existieren keine Normen oder Vorschriften, weder in bezug auf die Durchführung dieser Untersuchungen noch in bezug auf gewisse Minimalanforderungen. Durchführung und Auswertung dieser für die Qualitätssicherung unerlässlichen Stichprobenprüfungen obliegen also – sofern mit dem Kabelkunden nicht eigens vereinbart – vollständig dem Kabelhersteller.

Von den internationalen Vorschriften zur Qualitätssicherung dagegen sehr eingehend erfasst (siehe z.B. [1]) ist die Teilentladungsprüfung, in Kombination mit einer Spannungshalteprüfung, als aussagekräftigste zerstörungsfreie Stückprüfung. Für eine Qualitätssicherung von insbesondere neu gefertigten Hochspannungskabeln aus hochpolymeren Isolierstoffen ist heute die absolute Notwendigkeit zur Detektion und Ortung von Teilentladungen (TE) unbestritten, wobei nur mit einer ausreichend empfindlichen TE-Messung bei Grundstörpegeln von $< 2{,}5$ pC den Anforderungen des Kunststoffkabels Rechnung getragen wird. Neu gefertigte Kunststoffkabel sollten die Fabrik im Grunde genommen bei den üblichen Prüfspannungen ohne messbare TE verlassen, obgleich den Vorschriften [1; 12; 13; 14] entsprechend ein Pegel von 5 bis 20 pC bei 1,25 bis $2\,U_0$ zulässig wäre. Diese sehr streng erscheinende Anforderung des Kunststoffkabels verliert angesichts des erfahrungsgemäss recht seltenen Auftretens von TE an Tragweite.

Weitgehende TE-Freiheit ist eine absolut *notwendige* Forderung zur Sicherstellung einer ausreichenden Kabelqualität, da beim Vorhandensein einer TE a priori mit einer stark beschleunigten Alterung (aufgrund lokaler Erosionsprozesse) und somit dem vorzeitigen Ausfall des Kabels zu rechnen wäre.

Andererseits ist TE-Freiheit als Qualitätskriterium aber noch *keineswegs hinreichend;* da nur ein relativ kleiner Teil der für die Kunststoffisolation relevanten qualitätsmindernden Faktoren überhaupt zu TE führen; dies gilt sowohl für das fabrikneue wie auch für das betriebsbeanspruchte Kabel. Nur im Zusammenhang mit den einleitend angesprochenen Stichprobenprüfungen lässt sich ein schlüssiges Urteil abgeben.

Obgleich selten, lassen sich Fertigungsfehler, die zu Teilentladungen während der Stückprüfung der Kabel führen, niemals ganz vermeiden. Solche Isolationsfehler sind dann aber überwiegend auf nur eine oder im Extremfall wenige Stellen einer Fertigungslänge konzentriert. Der Ortung solcher singulärer Störstellen kommt somit eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung zu, da bei Fertigungseinheiten von typischerweise 1 bis 8 km auch nach der Entfernung der schadhaften Stelle meist noch genügend grosse Teillängen zur Verfügung stehen. Noch grössere Bedeutung kommt aber der TE-Ortung an der vollen Fertigungseinheit als erstem Schritt zur punktgenauen Lokalisierung der Störstelle zu, denn die wirkliche Erkennung der Störungsursache eröffnet eine Möglichkeit zur gezielten Optimierung der Kabelherstellung. Messsysteme, welche in der Lage sind, die

Ortung von selbst kleiner TE auf relativ einfache Weise, mit hoher örtlicher Auflösung und mit grosser Zuverlässigkeit, vorzunehmen, amortisieren sich somit innerhalb kurzer Zeit.

2. Grundlegende Probleme bei der TE-Messung und -ortung in Kabeln

Alle nachfolgenden Überlegungen beziehen sich auf kunststoffisolierte Kabel, die insbesondere durch 3fach-Extrusion gefertigt sind. Ihr Aufbau besteht somit aus dem metallischen Innenleiter, der Leiterglättung aus leitfähigem Kompound, der aktiven Isolierung (PE, VPE, EPR), dem Isolationsschirm) sowie der meist aus Kupferbändern, -drähten oder -wellmänteln bestehenden «Abschirmung», die durch Kunststoff-Adermäntel oder zusätzliche Metallarmierungen geschützt wird. Aus elektrischer Sicht stellt ein derartig vollständig gefestigtes Einphasenkabel ein Zweitor dar, das im Sinne der Wanderwellentheorie durch eine verlustbehaftete Leitung und mit verteilten elektrischen Parametern beschrieben werden kann.

2.1 Ursachen von TE

TE können grundsätzlich nur in der aktiven Isolierung bzw. an deren Grenzflächen zu den Feldglättungen bei genügend hohen Spannungen auftreten. Als Ursache für die TE kommen fast ausschliesslich fertigungsbedingte Lunker oder Hohlräume in Betracht, sofern diese eine gewisse Grösse überschreiten und kein Kondensat hoher elektrischer Festigkeit oder hoher relativer Dielektrizitätskonstante («Spannungsstabilisator») enthalten. Hohlräume können zum Beispiel durch Mikrorissbildung oder Ablösung an Einschlüssen infolge materialinterner mechanischer Spannung entstehen sowie bei ungeeigneter Herstellungs-Prozesssteuerung durch Verdampfung von Fremdstoffen oder Vernetzungs-Spaltprodukten.

Ausgesprochen selten werden «rauhe» Grenzschichten oder leitfähige Einschlüsse zu so hohen Feldstärken im Isolierstoff führen, dass bei den relativ kurzandauernden Prüfspannungs-Beanspruchungen eine «Bäumchenbildung» (electrical treeing) einsetzt und TE verursacht. Bei dieser Art von technologischen Schwachstellen werden auch bei den betrieblichen Dauerbeanspruchungen TE normalerweise erst im ausgesprochenen Endstadium der Lebensdauer auftreten. TE können dann die Folge von langsam fortschreitenden Degradationsprozessen wie insbesondere «water-treeing» oder auch Materialveränderungen durch «heisse» Elektronen [11] und andere ebenfalls nicht unmittelbar TE-behafteten Vorgänge sein.

2.2 Zeitlicher Verlauf der TE-Impulse am Ort der Fehlerstelle

Die für die TE-Messung an Kabeln sehr wichtige Tatsache, dass praktisch nur gasgefüllte Hohlräume Quellen von TE darstellen können, bestimmt die am Ort der Fehlerstelle auftretenden elektrischen Vorgänge: in den Hohlräumen mit meist sehr kleinen Abmessungen (< 1 mm) setzt eine Gasentladung beim Überschreiten einer kritischen Feldstärke ein, die nach genau bekannten physikalischen Mechanismen abläuft. Diese Feststellung wird zwar lediglich durch umfangreiche Untersuchungen an Modellanordnungen zur Simulation von Hohlraumentladungen gestützt, da einwandfreie Messungen an Kabeln selbst, d.h. an natürlichen Hohlräumen, praktisch nicht möglich sind. Sie wird aber durch die sehr gute Übereinstimmung zwischen den an Modellanordnungen gemessenen und den aus der Gasphysik berechneten Vorgängen bekräftigt.

In dieser Hinsicht verdienen die Arbeiten von *B. Luczynski* [2] besondere Beachtung, da hier die Ursachen für das Auftreten von sowohl sehr schnellen als auch relativ langsamen TE-Vorgängen geklärt werden konnten. Nach diesen Untersuchungen verläuft, unter der Annahme atmosphärischen Gasdruckes im Hohlraum, eine TE in kleinen Hohlräumen immer dann sehr schnell, im Zeitraum weniger ns (durch Raumladungen beschleunigtes Elektronenlawinenwachstum), wenn die Leitfähigkeit der Hohlräume noch sehr niedrig ist, die Hohlraumwandungen also noch nicht durch länger andauernden Elektronen- und Ionenbeschuss chemisch degradiert sind. Relativ langsam andauernde TE-Vorgänge (Zeitdauer im Bereich von etwa 0,1 µs) werden dagegen bei hoher Oberflächenleitfähigkeit der Hohlräume beobachtet.

Selbst bei einem Kabel von mehreren km Länge ist die Potentialverteilung längs des Kabels bei einer Gleichspannungs- oder niederfrequenten Wechselspannungsbeanspruchung in jedem Zeitpunkt konstant (Ferranti-Effekt vernachlässigbar klein). Bei jedem einzelnen TE-Vorgang entsteht nun aber am Ort einer Fehlerstelle ein kleiner Spannungseinbruch $u(t, x = 0)$. Der zeitliche Verlauf dieses Spannungseinbruches entsteht dadurch, dass die im Hohlraum gebildeten und dort auch beweglichen Ladungsträger (Elektronen und Ionen beiderlei Polarität) im elektrischen Feld wandern bzw. driften. Durch elektrische Influenz entstehen auch an den im Wirkungsbereich dieser Ladungen liegenden Elektroden (Leiterglättungen) Influenzladungen, deren zeitlicher Auf- und Abbau ein getreues Abbild der physikalischen Ladungsbewegungen in der Fehlerstelle ist. Der Hohlraum wird somit zum Ort einer TE-Stromimpulsquelle $i(t)$; der genannte Spannungseinbruch $u(t)$ ist über den Wellenwiderstand Z des Kabels aus dem TE-Stromimpuls berechenbar; $u(t) = Z \cdot i(t)$. In bekannter Weise breitet sich in einem Kontinuum, wie es ein Kabel darstellt, dieser Strom- bzw. Spannungsimpuls im Sinne der Wanderwellentheorie aus, wobei sich mehr oder weniger starke «Verzerrungen» in der zeitlich-räumlichen Impulsform ergeben.

Wichtig ist somit zunächst der zeitliche Verlauf $i(t)$ bzw. $u(t)$ der TE-Impulse am Ort $x = 0$ der Fehlerstelle. Die Erkenntnisse aus [2] sowie viele andere Untersuchungen der simulierten Hohlraumentladungen bekräftigen die Annahme, dass diese Original-TE-Impulse vor allem bei einem erstmaligen Auftreten der TE während der Kabelprüfung recht kurzzeitig sind und angenähert als Gausssche Zeitimpulse

$$i(t) = \frac{u(t)}{Z} = \frac{q}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\left(\frac{t/\sigma}{\sqrt{2}}\right)^2\right] \quad (1)$$

betrachtet werden können [15]. Der Zeitparameter σ (entspricht etwa der mittleren Impulsbreite) wird in der Regel bei wenigen ns liegen, wie z.B. aus den Arbeiten von *J.P. Reynders* [3] zu entnehmen ist. Der wirkliche zeitliche Verlauf wird aber von der Gleichung (1) mehr oder weniger stark abweichen und statistischen Schwankungen sowohl hinsichtlich des Zeitverlaufs als auch bezüglich der Amplituden unterworfen sein. Von Interesse ist hier auch das auf $\omega = 0$ normierte Amplitudenspektrum solcher Gauss-Impulse,

$$I_\delta(\omega) = \exp\left[-\left(\frac{\omega \cdot \delta}{\sqrt{2}}\right)^2\right] \qquad (2)$$

aus dem zu entnehmen ist, dass für sehr kleine Impulsbreiten der spektrale Anteil bis zu hohen Frequenzen recht konstant bleibt (z. B. 10% Abfall bei f = 14,6 MHz für σ = 5 ns).

2.3 Dämpfung der TE-Impulse

Die Messung und Verarbeitung der TE-Strom- bzw. -Spannungsimpulse ist nur an den Kabelenden mit einer geeigneten Auskopplung bzw. Ausfilterung aus den niederfrequenten Prüfspannungen möglich. Damit unterliegen die Impulse sowohl einer Dämpfung (reine Amplitudendämpfung) und vor allem auch einer Verzerrung, da eine reine Dämpfung nur möglich wäre, wenn die Kabelimpedanz-Verhältnisse die Bedingungen für Verzerrungsfreiheit erfüllen würden, was sicher niemals der Fall ist.

Es existieren bisher keine systematischen experimentellen und theoretisch vollständigen Untersuchungen über diese Verzerrungsvorgänge, was allerdings bei der Vielfalt der Kabel auch verständlich ist. Einige Ergebnisse zu diesem Fragenkomplex sind neueren Publikationen zu entnehmen: so berichten *Stone* und *Boggs* von reinen Spannungsdämpfungsmessungen an EPR- und XLPE-Mittelspannungskabeln [4], die mit speziellen Berechnungen verglichen wurden. Bei diesen Berechnungen wurden die «halbleitenden» Schichten als stark verlustbehaftete Dielektrika betrachtet, welche mit der aktiven Isolation in Serie liegen und somit die Quer-Admittanz des Kabels bilden. Bei einer recht guten Übereinstimmung von Rechnung und Messung, in die auch die frequenzabhängigen elektrischen Eigenschaften des als Leiterglättung verwendeten Halbleiters einbezogen wurden, ergeben sich Dämpfungsfaktoren α' von etwa 5 dB/km für die gemessenen XLPE- und etwa 120 dB/km für EPR-Kabel bei 30 MHz, wobei bis zu dieser Frequenz die Dämpfung praktisch linear mit der Frequenz ansteigt.

Diese etwa lineare Frequenzabhängigkeit der Dämpfung kann nicht mehr mit dem Skineffekt erklärt werden, da dieser nur auf eine $\sqrt{f}$-Abhängigkeit führt. In der Tat kann ja ein bedeutender Skineffekt in den feldbegrenzenden Schichten mit spezifischen Widerständen von etwa 1...10 Ωm nicht auftreten, da bei derartig hohen Widerständen die Eindringtiefe des Stromes selbst bei Frequenzen von 30 MHz die Dicke dieser Widerstandsschichten weit übersteigt. Offensichtlich resultiert somit die lineare Frequenzabhängigkeit aus den dielektrischen Verlusten in diesem Halbleitermaterial, das bei hohen Frequenzen als verlustbehaftetes Dielektrikum aufgefasst werden muss. Bei den Wanderwellenvorgängen wirken somit die «feldbegrenzenden Schichten» nicht mehr als leitfähiges Material, sondern als stark verlustbehaftetes Isoliermaterial.

Auch die Wellengeschwindigkeit v, üblicherweise $v = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$, mit ε = Permitivität des Dielektrikums, ist stark frequenzabhängig, wie z. B. in [5] durch umfangreiche Rechnungen gezeigt wird. Daraus resultiert eine zusätzliche Verzerrung der Wellenform. Dadurch beeinflussen die teils sehr unterschiedlichen und meist nicht genau bekannten Materialarten für die Leiterglättungen die Ergebnisse stark.

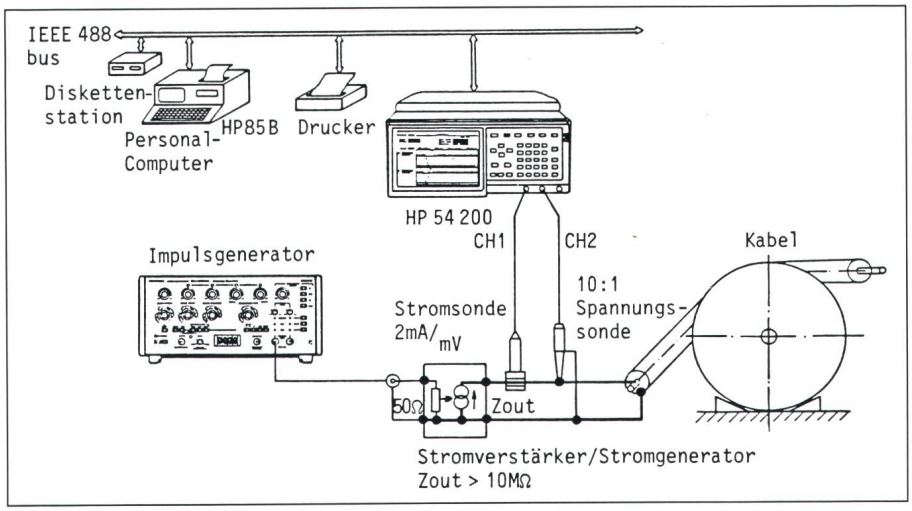
2.4 Reflexion der TE-Impulse

Abhängig von den gewählten Schaltungen bei einer TE-Messung an Kabeln werden die Kabelenden ein- oder beidseitig mit Netzwerken verbunden sein, die durch die Prüfspannungsquelle, eventuell vorhandene Filter oder durch Koppelkondensatoren zur Auskopplung der TE-Impulse entstehen. Diese Kabelenden sind Reflexionsstellen für die TE-Wanderwellenimpulse. Die Reflexionsfaktoren werden ebenfalls mehr oder weniger stark frequenz- bzw. zeitabhängig sein.

2.5 Konsequenzen

Die wohl wichtigste Konsequenz aus diesen Betrachtungen ist die Tatsache, dass der ursprünglich am Ort der Fehlerstelle sehr kurzzeitige TE-Impuls, am Ort seiner Erfassung (Kabelanfang oder -ende), bereits stark zeitlich verzerrt, sein Frequenzspektrum (Gl. 2) somit bereits stark verfälscht sein wird; dies gilt insbesondere für die reflektierten Grössen, die längere Wege im Kabel zurückgelegt haben. Es ist somit unnötig, Messsysteme mit sehr hoher Bandbreite (z. B. > 10 MHz) einzusetzen, da damit weder von der zeitlichen Auflösung noch von einer Optimierung der Empfindlichkeit aus gesehen besondere Vorteile zu erwarten sind.

Diese Behauptung ist leicht begründbar: Die Fehlerortung beruht bei den meisten bereits bekannten Kabelmesssystemen auf einer Auswertung der Laufzeitdifferenz zwischen dem direkt von der Fehlerstelle und dem über Reflexionen zur Messstelle (Kabelanfang oder -ende) gelangenden TE-Impuls ([6; 7; 9]). Die quantitative Erfassung dieser Laufzeitdifferenzen wird durch eine Verflachung insbesondere von der TE-Impulsstirn erschwert, da eine flachere Impulsstirn einer Vergrösserung der Laufzeitdifferenz gleichkommt. Wird nun aber durch ein Messsystem mit nicht zu hoher oberer Grenzfrequenz ein besonders kurzzeitiger Impuls, wie er z. B. bei einem TE-Impuls in unmittelbarer Nähe der Messstelle auftritt, durch dieses Messsystem bereits verzerrt, so entsprechen diese Verzerrungen jenen Impulsformänderungen, die durch



Figur 1 Versuchsaufbau zur Messung des Ausbreitungs- und Dämpfungsverhaltens

lange Laufzeiten für die reflektierten Impulse ohnehin auftreten. Insofern vergleichmässigt ein bandbegrenztes Messsystem die TE-Impulse zur weiteren Auswertung und reduziert somit die Messfehler.

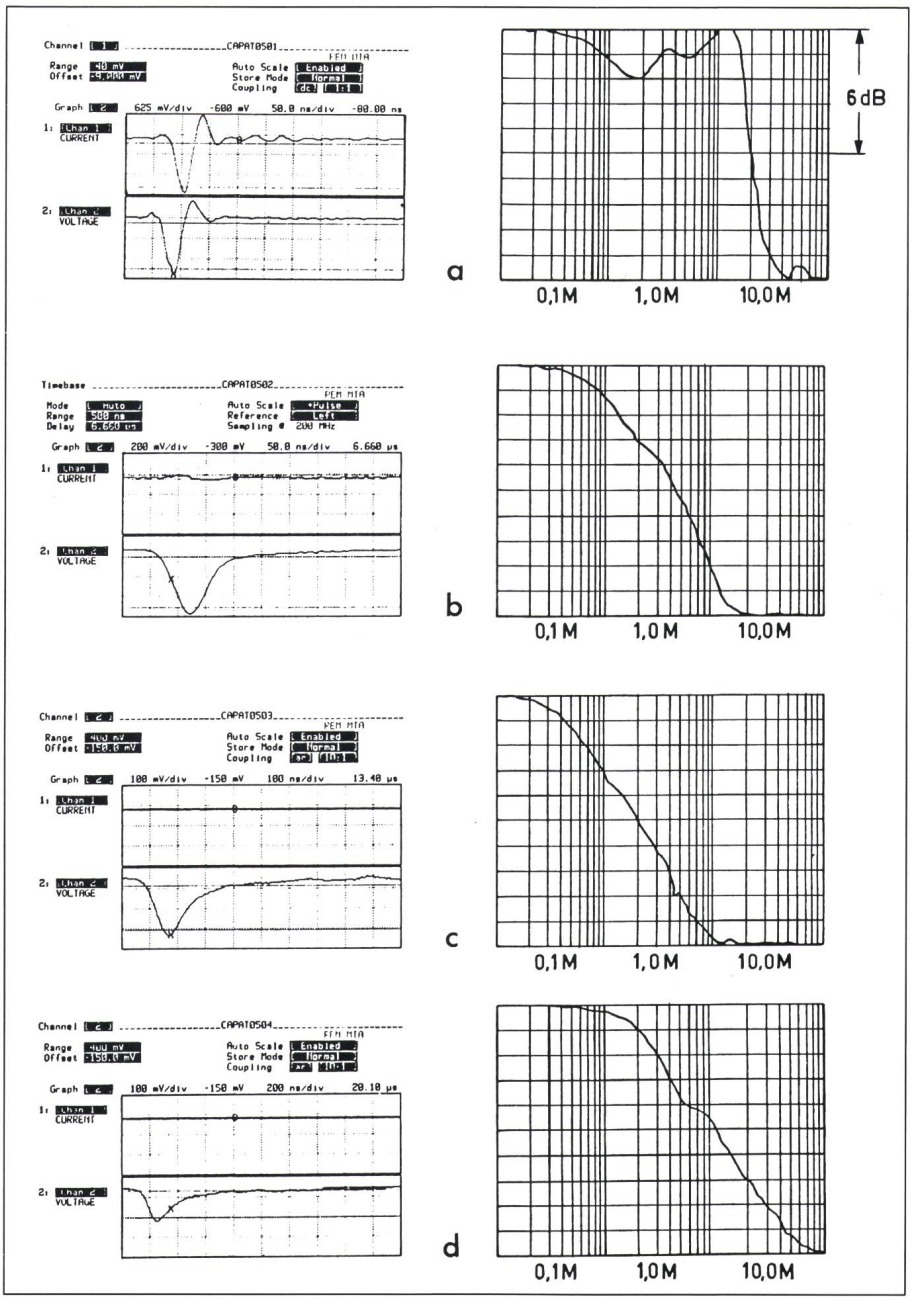
Bezüglich der Empfindlichkeit der Messsysteme spielen aber Impulsveränderungen, wie sie hier zur Diskussion stehen, keine grosse Rolle. Die Notwendigkeit zur Integration der TE-Stromimpulse zur Bewertung der TE-Impulsladung macht ohnehin ein Bandpass-System erforderlich, welches nur einen Teil der Impulsspektren zur Quantifizierung der Ladungen verwenden kann. Man wird somit ein für die hier auftretenden Spektren besonders gut geeignetes Bandpasssystem als Integrator einsetzen [8] und erzielt damit eine hohe Empfindlichkeit, die wegen der notwendigen Integration allerdings nicht so hoch getrieben werden kann, wie sie teilweise von Autoren gefordert wird, die auf die einwandfreie TE-Ladungsmessung verzichten [7].

3. Signalausbreitung, Signalverarbeitung

Orientierende Messungen zur Ausbreitung extern eingespeister Impulse in einem konventionellen Mittelspannungskabel wurden zur näheren Betrachtung der folgenden, vorgängig angesprochenen Grundprobleme vorgenommen:

1. Integration der durch die TE generierten Kabel-Ausgangsströme oder -spannungen zum Zwecke der TE-Quantifizierung.
2. Identifikation der reflektierten Impulse zum Zwecke der TE-Ortung.

Die Integration der TE-Impulse erfolgt grundsätzlich immer mittels einer Tiefpassfilterung [8], sei dies analog (R-L-C-Glieder) oder mittels einer digitalen Abtastung und Summierung. Wie z.B. in [8] gezeigt wird, ist der Wert des Frequenzspektrums des Signals bei der «Nullfrequenz», also der gesamte Flachteil des Spektrums bei tieferen Frequenzen, proportional dem Signalintegral. Ein auf diesem Teil des Spektrums liegender Tief- bzw. Bandpassfilter gibt ein Antwortsignal mit einem dem Impulsintegral proportionalen Signal-Scheitelwert. Im Sinne einer Optimierung der Messempfindlichkeit wird die Wahl einer möglichst hohen oberen Grenzfrequenz des Filters angestrebt. Die Kenntnis des Spektrums der Ausgangssignale ist deshalb für eine korrekte Integration unerlässlich.



Figur 2 Signalverlauf und Frequenzspektrum für den eingespeisten Impuls (a) sowie dessen 2., 4. und 6. Reflexion (b, c, d)
Unkonsolidierte Massstäbe

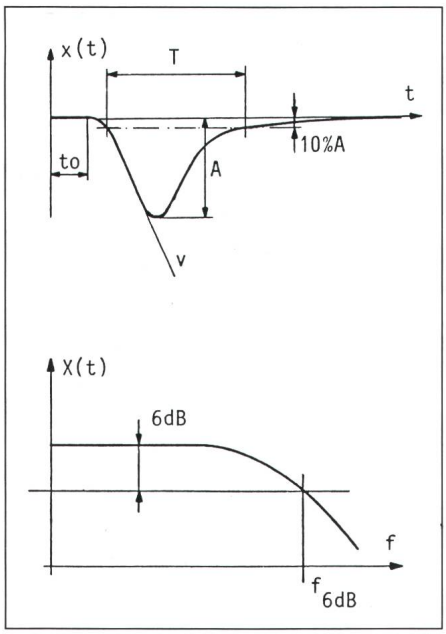
3.1 Messungen zur Dämpfung und Verzerrung

Die TE-Impulse sind am Ort der Fehlerstelle mit Impulsbreiten von nur wenigen ns sehr schnell. Während der Impulsausbreitung tritt aber rasch eine Dispersion auf und damit ein Absinken der Anstiegssteilheit sowie der Grenzfrequenz des Flachteils des Spektrums.

Messungen zur Impulsdämpfung und Verzerrung wurden an einem Kabel des folgenden Typs durchgeführt: 20/12 kV, 50 mm², XE 2213, Dätwyler AG, Altdorf; Länge: 523 m. Die gemessenen elektrischen Parameter sind bei 1 kHz: C = 197 pF/m, L = 0,27 H/m, R = 0,379 mΩ/m, Z_0 = 32,4 Ω, Wellengeschwindigkeit v_r = 51,7%. Die Messanordnung ist in Figur 1 dargestellt: Das Kabel wurde beidseitig elektrisch offen betrieben. Impulse mit einer Breite von 43 ns wurden aus einem Stromgenerator eingespeist. In der Folge stellen sich beid-

seitig positive Reflexionen ein; diese wurden mit einem Oszillographen des Typs Hewlett Packard 54 200, Abtastfrequenz 200 MHz, aufgezeichnet. Nach anschliessendem Transfer zu einem Kleinrechner (HP 85B) erfolgte eine FFT-Analyse der gespeicherten Signale.

Die zeitlichen Verläufe des eingespeisten Impulses sowie der 2., 4. und 6. Reflexion, zusammen mit den entsprechenden Spektren, sind als Figur 2 gezeigt. Ferner illustriert Figur 3 die



Figur 3 Definitionen der verwendeten Signalparameter
X Fouriertransformierte von $x(t)$

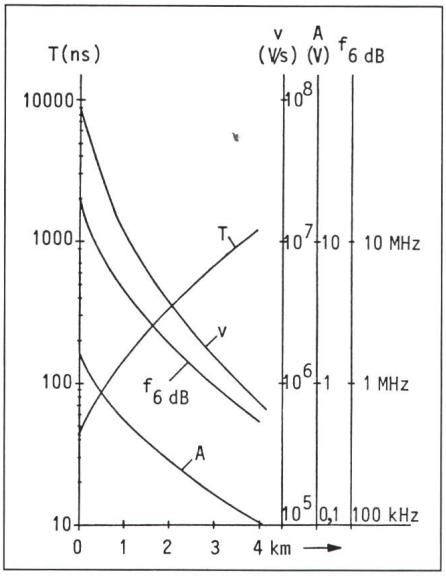
Bedeutung der aus Figur 2 verarbeiteten und in Tabelle I zusammengestellten Signalparameter. Eine graphische Darstellung dieser Parameter (Anstiegssteilheit, 6-dB-Grenzfrequenz, Amplitude, Pulsbreite) in Funktion der durchlaufenen Kabellänge gibt schliesslich Figur 4.

3.2 Ladungsmessung

Anhand theoretischer Untersuchungen wurde ermittelt, dass die Grenzfrequenz eines steil abfallenden Tiefpasses etwa um den Faktor 1,3 unterhalb des 6-dB-Punktes des Impuls-Frequenzspektrums liegen muss, um den Integrationsfehler unterhalb 10% zu halten. Demnach kann man aus den Spektren von Figur 3 ableiten, dass sich ein 2-MHz-Tiefpassfilter zur korrekten Integration von TE bis zu einer Distanz von etwa 1,5 km ab Messsonde eignet – bei wechselseitiger Messung also für Kabel bis etwa 3 km.

Aus den Figuren 3 und 4 erkennt man, dass die Grenzfrequenz des Flachteils der Impulsspektren mit der Ausbreitungsdistanz anfänglich sehr steil absinkt. Zur weiteren Betrachtung dieses Phänomens wurden analoge Messungen mit einem sehr schnellen, nur 4 ns breiten eingespeisten Impuls durchgeführt. Mit angepassten Kabelenden wurde der Impuls nach Durchlaufen der einfachen Kabellänge (523 m) oszillographiert. Innerhalb dieser Ausbreitungsdistanz verlängerte sich die Impulsbreite bereits auf 80 ns; ein Wert, der praktisch schon auf der entsprechenden für die 43 ns breiten Impulse gemessenen Kurve in Figur 4 liegt. Dies zeigt, dass eine TE im Kabel modellmässig als Dirac-Impuls behandelt werden dürfte, da das Kabel innerhalb kurzer Ausbreitungsdistanz eine praktisch immer gleiche charakteristische Impulsform generiert. Demnach erbringen TE-Ladungsmesssysteme mit Bandbreiten über wenigen MHz keinerlei Vorteile, es sei denn deren Anwendung beschränke sich auf sehr kurze Kabellängen.

Im weiteren ergaben die Messungen, dass die starke Impuls-Amplitudendämpfung auf einer reinen Dispersion ohne praktisch relevanten Ladungsverlust basiert; diese Aussage gilt unabhängig von der Breite des Ursprungsimpulses. Optisch erwecken die Oszillogramme von Figur 2 einen eher gegenteiligen Eindruck. Dies beruht aber auf dem charakteristischen langen und flachen Rücken der Impulse, welcher sich mit der Ausbreitungsdistanz zunehmend ausbildet.



Figur 4 Verlauf der gemessenen Signalparameter in Funktion der Ausbreitungsdistanz

3.3 Ortung

Die Signalamplituden sinken mit der Ausbreitungsdistanz hyperbolisch und die Anstiegssteilheiten sogar etwa reziprok quadratisch ab (Fig. 4). Diese zwei Tatsachen erschweren die zur TE-Ortung vorzunehmende Auswertung der Reflektogramme. Besonders trifft dies beim Einsatz elektronischer Komparatoren (automatisches Ortungssystem) zu, da die unbedingt erforderlichen tiefen Komparationsniveaux bei kleinen TE-Pegeln leicht in den Bereich des unvermeidbaren Grundrauschens gelangen. Die durch die zunehmende Verflachung der reflektierten Impulse hervorgerufenen Zeitmessfehler werden allerdings prinzipiell durch die begrenzte Bandbreite der Messsysteme entschärft (vgl. Abschn. 2.5).

Die wohl beste und zuverlässigste Methode zur TE-Ortung stellt der Einsatz eines modernen digitalen Speicheroszillographen mit hoher Abtastrate dar. In diesem Fall bietet sich insbesondere die Möglichkeit zur Mittelwertrechnung als sehr wirkungsvolles Instrument zur Verbesserung des Signal-Rauschverhältnisses an, und die optische Darstellung der Reflekto-

Record	Länge	t_0	τ	V	A	$f_{6\,dB}$
CAPAT	km	µs	ns	V/s	Volt	Hz
0501 (a)	∅	−0,024	43	$8{,}93 \cdot 10^7$	1,666	20 M
0502 (b)	1,046	6,703	157,3	$1{,}12 \cdot 10^7$	0,63	4,3 M
0503 (c)	2,092	13,452	293,1	$3{,}71 \cdot 10^6$	0,284	2,0 M
0504 (d)	3,138	20,186	672,0	$1{,}6 \cdot 10^6$	0,163	1,0 M

Tabelle I Zusammenstellung der Werte der gemessenen Signalparameter
Grafische Darstellung siehe Figur 4

BBC BROWN BOVERI GOERZ METRAWATT

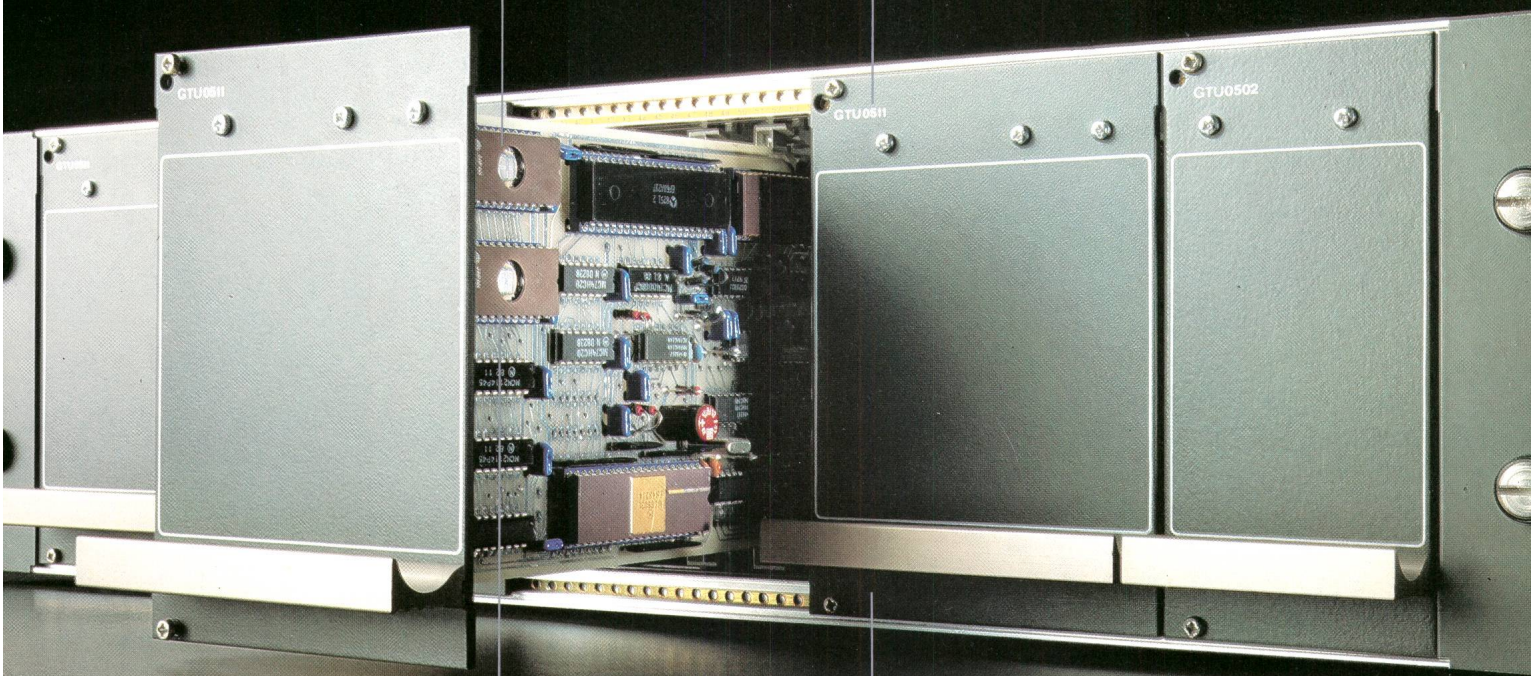
Multi-Meßumformer mit Mikroprozessor

Zur Erfassung aller Meßgrößen eines elektrischen Netzes

Ausgabe 1.87
Bestell-Nr. U 13.01.03

Digitale Erfassung und Berechnung der Meßgrößen.

Einheitliche Hardware bei vielfältiger Kombinierbarkeit der Einzelmerkmale. Breites Merkmalsspektrum.



Meßgrößen, Meßbereiche, Kennlinien, Netzart, im Datenspeicher programmiert.

Parallele Ausgabe der Meßwerte über maximal 6 Analog-Ausgänge pro Gerät. Beliebige Kombination Meßgröße-Ausgang.

Stempel Unterschrift

Firma/Institut

Abt./z. Hd.

Straße

PLZ/Ort

3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23

Geschäftsantwortsendung Invio commerciale-risposta
Correspondance commerciale-réponse

METRAWATT
AG FÜR MESSAPPARATE
Felsenrainstrasse 1

CH-8052 Zürich

METRAWATT
AG FÜR MESSAPPARATE
FELSENRAINSTRASSE 1
CH-8052 ZÜRICH
TELEFON 01-302 35 35
TELEX 823 647
TELEFAX 302 17 49

Bureau Suisse Romande:
Metrawatt, Route du Platy 52,
1752 Villars-sur-Glâne
Téléphon 037/24 77 57

Gedruckt in der Bundesrepublik Deutschland.
Änderungen vorbehalten.

Multi-Meßumformer

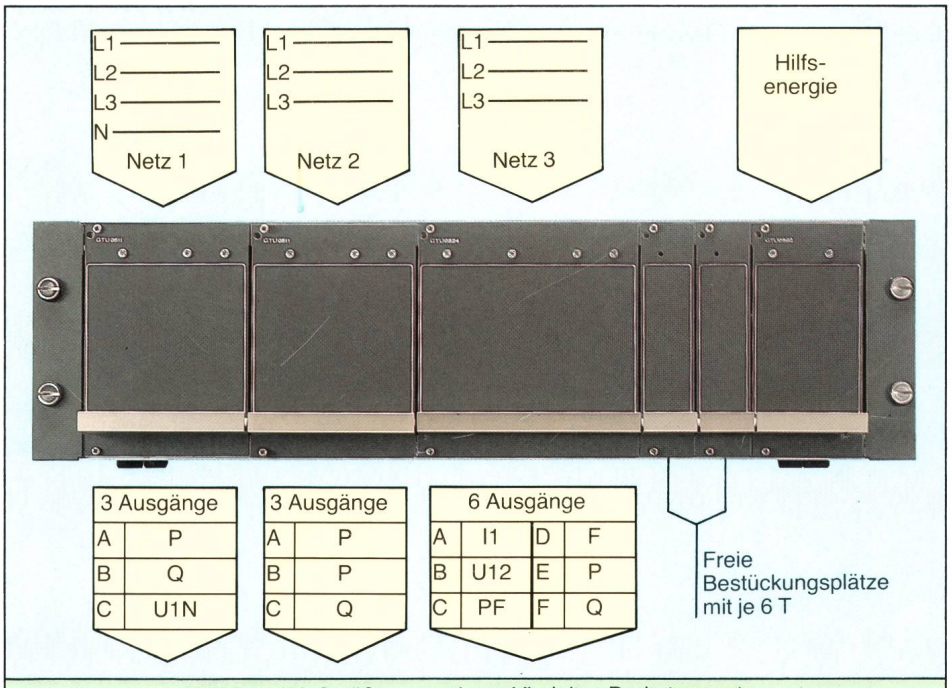
Verwendung

Erfassung mehrerer Meßgrößen eines elektrischen Netzes mit nur einem Meßumformer.

Merkmale

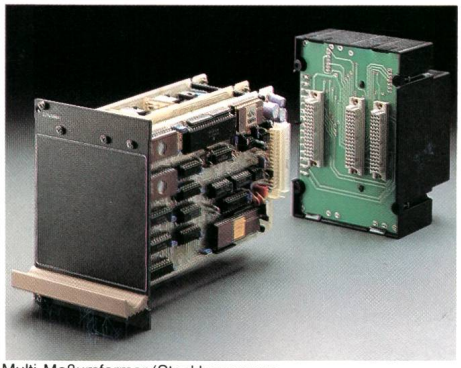
- Geringer Aufwand für Projektierung, Bestellung, Anschluß (Verdrahtung).
- Kompakte Ausführung, geringer Platzbedarf.
- Einheitliche Geräte und Anschlüsse für alle Meßgrößen.
- Für alle Netz- und Belastungsarten.
- Direkter Netzanschluß bis AC 660 V.
- Zulässige Netzfrequenz 16 Hz bis 65 Hz.
- Alle Ein- und Ausgänge galvanisch getrennt.
- Geringer Eigenverbrauch aller Eingangskreise.
- Breites Kennlinienspektrum.
- Stromversorgung
  AC: 75 ... 250 V
  DC: 20 ... 75 V oder DC: 90 ... 250 V.
- Hohe Betriebssicherheit
  Stoßspannungstest 5 kV, IEC 255-4/III
  Fehlfunktionstest 2,5 kV, 1 MHz, IEC 255-4/III
  Fehlfunktionstest 1 kV . . . 5 kV
  Sicherheitstest 4,2 kV, Sinus, 50 Hz, 1 min.
- Einsteckü berwachung der Steckbaugruppe.

Beispiel für die Erfassung von Meßgrößen an drei verschiedenen Netzen

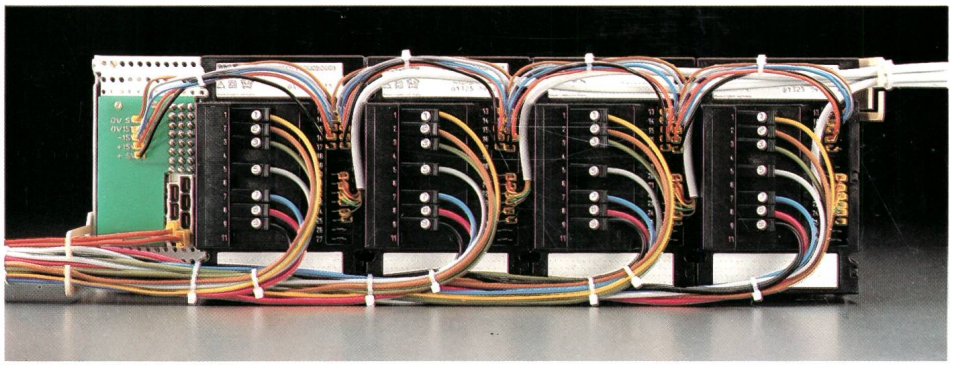


Wählbare Meßgrößen aus einem Vierleiter-Drehstromnetz

U1N	Wechselspannung	L1-N	P	Wirkleistung	Netz	PF	Wirkfaktor	Netz
U2N	Wechselspannung	L2-N	P1	Wirkleistung	Strang 1	PF1	Wirkfaktor	Strang 1
U3N	Wechselspannung	L3-N	P2	Wirkleistung	Strang 2	PF2	Wirkfaktor	Strang 2
U12	Wechselspannung	L1-L2	P3	Wirkleistung	Strang 3	PF3	Wirkfaktor	Strang 3
U23	Wechselspannung	L2-L3	Q	Blindleistung	Netz	QF	Blindfaktor	Netz
U31	Wechselspannung	L3-L1	Q1	Blindleistung	Strang 1	QF1	Blindfaktor	Strang 1
I1	Wechselstrom	L1	Q2	Blindleistung	Strang 2	QF2	Blindfaktor	Strang 2
I2	Wechselstrom	L2	Q3	Blindleistung	Strang 3	QF3	Blindfaktor	Strang 3
I3	Wechselstrom	L3				F	Frequenz	Netz



Multi-Meßumformer (Steckbaugruppe und Anschlußblock)



Rückansicht Baugruppenträger

Gedruckt in der Bundesrepublik Deutschland. Änderungen vorbehalten.

gramme erlaubt ein präzises Festlegen der Signalanstiegs-Zeitpunkte. Zur halbautomatischen Unterstützung der Ortung sowie zur Protokollierung kann schliesslich der Computer herangezogen werden. Die Visualisierung der TE-Impulse mittels Oszillographen (erforderliche Bandbreite des Messsystems einige MHz) ermöglicht ausserdem auch eine zuverlässige Diskriminierung allfälliger Störimpulse.

4. Messsystem-Aufbau

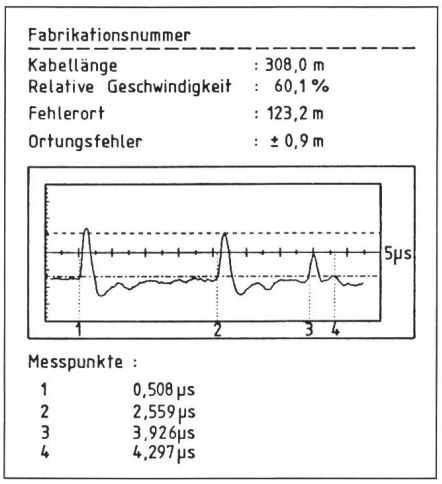
Figur 5 zeigt vereinfacht den Aufbau eines Prüfkreises. Das TE-generierte Ausgangssignal wird durch den Kondensator C_k (4 bis 10 nF) ausgekoppelt. Die Kopplungseinheit KC filtert die Netzfrequenz und deren Oberwellen aus und transformiert die 50 Ω Eingangsimpedanz des Verstärkers in einen für die Signalreflexion geeigneten höheren Wert. Der Integrationsverstärker AI verfügt über einen breitbandigen Kanal (einige MHz) als Ausgang zum Oszillographen sowie über einen Integrationskanal (2 MHz) zur gleichzeitigen Verwertung des Signals in einem Scheitelwertdetektor.

Praktische Erfahrung mit dem Aufbau derartiger Systeme in einem Kabelwerk haben gezeigt, dass in erster Linie die Konzeption des Erdsystems sowie auch die Führung und die Art der Abschirmung der Messkabel für eine günstige Störunterdrückung ausschlaggebend sind. Trotz den baulich nicht optimalen Voraussetzungen des entsprechenden Prüffeldes (einfach geschirmte Kabine aus Kupferblech; 220-kV/40-A-Spannungsquelle ausserhalb der Kabine, mit Durchführung eingeleitet; externer Mess- und Steuerraum) ist es gelungen, externe Störer auf ein unterhalb des Rauschpegels der Messgeräte liegendes Niveau zu unterdrücken. So wurde die praktisch bestmögliche Empfindlichkeit von 0,5 bis 1 pC bei 1 km Kabel erreicht.

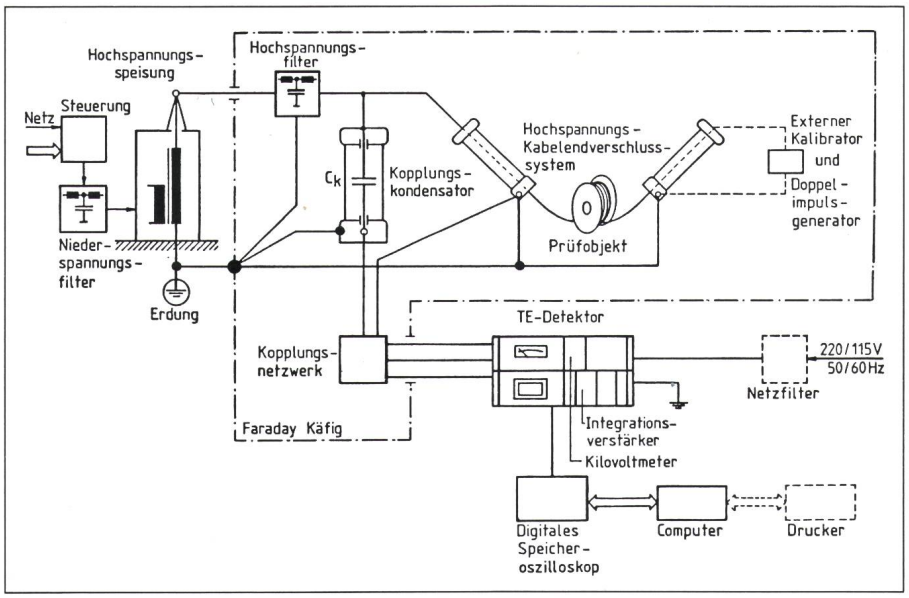
5. Messbeispiel zur TE-Ortung

Abschliessend zeigt Figur 6 ein Beispiel einer TE-Ortung, ausgewertet mit Hilfe eines Personal Computers: nach manueller Vorgabe des Komparatorniveaus werden die Schnittpunkte mit dem Signal errechnet. Der Operator identifiziert daraus die drei gesuchten Zeitpunkte, womit schliesslich der Fehlerort bestimmt wird.

Obwohl die TE-Impulse bei ihrer Ausbreitung im Prüfkabel keinem zu beachtenden Ladungsverlust unterworfen sind, trifft dies für die reflektierten Impulse des Oszillogramms von Figur 6 scheinbar nicht zu. Dies beruht aber vorwiegend auf der Tatsache, dass der dispersionsbedingte lange Impulsrücken als niederfrequenter Anteil grundsätzlich nicht vom Prüfkabel ausgekoppelt werden kann, da die Koppeleinheit KC zur Störunterdrückung ein Hochpassfilter darstellen muss.



Figur 6 Messbeispiel einer Kabel-Fehlerortung



Figur 5 Schematischer Aufbau des Prüfkreises

Literatur

[1] Kabel mit Isolierung aus thermoplastischem oder vernetztem Polyäthylen – Nennspannungen: U_0/U 6/10, 12/20 und 18/30 kV. DIN 57273/VDE 0273/10.81.

[2] *B. Luczynski:* Partial discharges in gas-filled cavities in solid high voltage insulations. Publication No. 7902. Lyngby, Technical University of Denmark, Electrical Power Engineering Department, 1979.

[3] *J.P. Reinders:* Partial discharges pulse shape analysis – a diagnostic tool. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, 28...31 August, 1979; paper 22.05.

[4] *G.C. Stone* and *S.A. Boggs:* Propagation of partial discharge pulses in shielded power cable. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 1982; p. 275...280.

[5] *W.L. Weeks* and *Y.M. Diao:* Wave propagation characteristics in underground power cable. IEEE Trans. PAS 103(1984)10, p. 2816...2826.

[6] *M. Beyer* a.o.: A new method for detection and location of distributed partial discharges (cable faults) in high voltage cables under external interference. IEEE Trans. PAS 101(1982)9, p. 3431...3438.

[7] *E. Lemke:* Ein neues Verfahren zur Messung von Teilentladungen an langen Hochspannungskabeln. Elektrie 35(1981)7, S. 358...360.

[8] *W.S. Zaengl, P. Osvath* and *H.J. Weber:* Correlation between the bandwidth of PD-detectors and its inherent integration errors. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 1986; p. 115...121.

[9] *L. Wieringa:* Location of small discharges in plastics insulated high-voltage cables. IEEE Trans. PAS 104(1984)1, p. 2...8.

[10] *J.S. Bendat* and *A.G. Piersol:* Measurement and analysis of random data. New York, Wiley, 1966.

[11] *G. Bürger:* Untersuchungen des Raumladungseinflusses und der Schädigungsmechanismen bei Initialaufbrauch von Polyethylen. Dissertation der Technischen Hochschule Aachen, 1984.

[12] Câbles de transport d'énergie isolés par diélectriques massifs extrudés pour des tensions assignées de 1 kV à 30 kV. Publication de la CEI 502, troisième édition, 1983.

[13] Prüfungen an Starkstromkabeln mit extrudierter Isolierung für Nennspannungen grösser 30 kV (U_m = 36 kV) bis 150 kV (U_m = 170 kV). DIN/VDE-Entwurf 0263/09.84.

[14] Ethylene-propylene-rubber-insulated wire and cable for the transmission and distribution of electrical energy. NEMA Standard WC 8.1976 / IPCEA S. 68...516.

[15] *M. Beyer* u.a.: Hochspannungstechnik. Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung. Berlin u.a., Springer-Verlag, 1986.