

# VERFAHREN ZUR MESSUNG VON IMPULSLADUNGEN\*

Von

E. LEMKE

Institut für Hochspannungstechnik der TU Dresden

(Eingegangen am 31. Mai 1967)  
Vorgelegt von Prof. Dr. J. EISLER

## 1. Einleitung, Aufgabenstellung

Die Stromimpulse von Teilentladungen umfassen ein sehr breites Frequenzspektrum. Es ist daher möglich, die in der Nachrichtentechnik üblichen Geräte zur Messung von Störspannungen und Störfeldstärken auch zur Erfassung von Teilentladungen in Isolierstoffen einzusetzen [1] [2]. Bei der Bewertung der einem Störspannungsmäßiggerät zugeführten Impulse ist der Einfluß der Amplitude auf die Anzeige erheblich größer als der der Folgefrequenz (quasi-peak-Bewertung). Daher erhält man mit diesem Meßverfahren oft nur unzureichende Aussagen über die Intensität der Teilentladungen. Ein weiterer Nachteil ist, daß die wichtigste Kenngröße bei Teilentladungen, die Impulsladung, durch das selektive Meßverfahren nicht mit erfaßt wird.

Die Entladungsvorgänge in einem Isolierstoff können besser beurteilt werden, wenn die Impulsloadungen direkt gemessen werden. Das ist möglich, wenn der zur Stromimpulsmessung übliche Widerstand in der Erdleitung des Prüflings durch einen Kondensator ersetzt wird. Die Entladungsstromimpulse werden dann integriert, d. h. die Spannung über dem Kondensator ist der Impulsladung direkt proportional. Dieses Verfahren kann allerdings nur verwendet werden, wenn die Prüflingskapazität sehr klein ist, so daß der kapazitive Ladestrom gegenüber den Entladungsstromimpulsen vernachlässigt werden kann [3], [4]. Im anderen Fall muß der Ladestrom des Prüflings in einer Brückenschaltung kompensiert werden [5], [6]. Dazu ist neben einem entladungsfreien Hochspannungskondensator ein hochwertiger Differenzverstärker (Gleichaktunterdrückung) erforderlich.

Bei praktischen Anordnungen (z. B. Schaltgeräte, Kondensatoren) kann der Ladestrom so groß sein, daß der Differenzverstärker nicht mehr in der Lage ist, diesen richtig zu eliminieren. Hinzu kommt noch, daß die in Luftfunkstrecken erzeugten Ladungsträger direkt zu den Elektroden abfließen können und somit zu einer stetigen Aufladung des Meßkondensators führen, d. h. die Kondensatorspannung steigt auf sehr hohe Werte an, und die Meßapparatur wird übersteuert.

\* Diese Arbeit wurde im Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Apparate der TU Budapest durchgeführt.

Es soll daher nach einem Verfahren gesucht werden, das die Ladungsmessung auch bei großer Prüflingskapazität sowohl bei Entladungen im Isolierstoff als auch bei Entladungen in Luft ermöglicht.

## 2. Lösungsweg

Bei der Stromimpulsmessung wird der störende kapazitive Ladestrom gewöhnlich durch einen Hochpaß (RC-Kombination) vom Oszillografeneingang ferngehalten. Ähnlich kann auch bei der Ladungsmessung verfahren werden. Die Ladung der Stromimpulse kann dann allerdings nicht direkt auf einem Kondensator gespeichert werden, da über die Koppelkapazitäten kein dauernder Gleichstrom geführt werden kann. Es ist daher zunächst nötig, die Stromimpulse in ladungsproportionale Spannungsstufen umzuformen und dann in einer geeigneten Schaltung zu summieren. Als Speicher wird zweckmäßigerweise ein Kondensator verwendet. Damit die Kondensatorspannung nicht auf sehr hohe Werte ansteigt und damit die Meßapparatur übersteuert, muß der Meßkondensator nach einem definierten Zeitabschnitt (z. B. nach jeder Periode der 50-Hz-Wechselspannung) kurzgeschlossen werden. Aus dem Verlauf der Kondensatorspannung (der oszillografiert wird) kann eine Aussage über den zeitlichen Ablauf der Entladungsvorgänge im Prüfling gewonnen werden. Außerdem kann die in einem definierten Zeitaugenblick erzeugte Ladungsmenge bestimmt werden, wenn der jeweilige Maximalwert der Kondensatorspannung gemessen wird. Eine polaritätsabhängige Erfassung der Entladungsimpulse soll vorgesehen werden.

## 3. Meßverfahren zur Ladungsmessung

### 3.1. Meßprinzip

Die wichtigsten Baugruppen der Meßapparatur zur Ladungsmessung sollen anhand der Blockschaltung nach Abb. 1 nachfolgend beschrieben werden:

Die über dem Widerstand in der Erdleitung des Prüflings abfallende Spannung wird zunächst vom kapazitiven Anteil getrennt. Die stromproportionalen Spannungsimpulse werden anschließend integriert. Da die nachfolgende Summierschaltung nur Spannungsimpulse verarbeiten kann, muß das Integrierglied so bemessen werden, daß der am Ausgang auftretende Maximalwert der Spannung der Impulsladung proportional ist, die Spannung aber nicht auf diesem Endwert verharrt, sondern mit einer Zeitkonstante von etwa  $1 \mu\text{s}$  wieder abfällt.

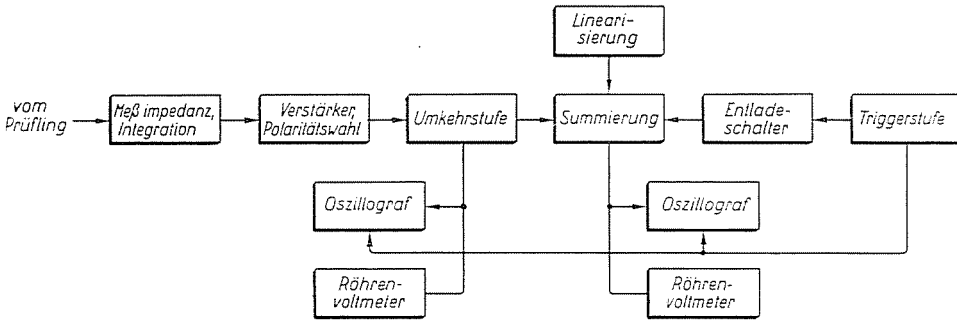


Abb. 1

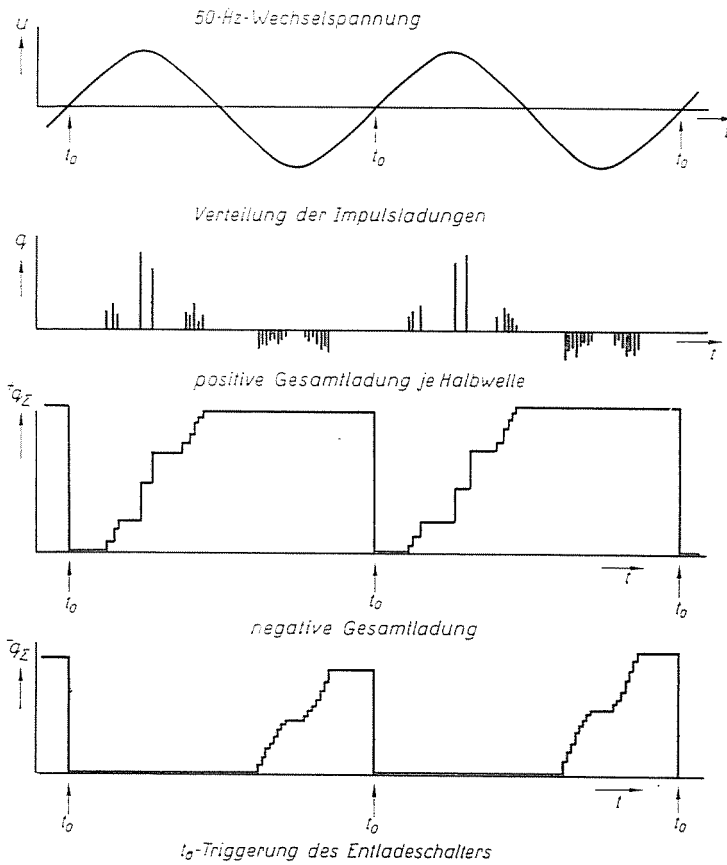


Abb. 2

Nach der Integration werden die Spannungsimpulse einem Meßverstärker zugeführt und ihre Amplitude auf einen für die weitere Verarbeitung ausreichenden Wert erhöht. Durch eine Umkehrstufe wird erreicht, daß unab-

hängig von der Polarität der Impulse, am Eingang stets positive Impulse am Ausgang auftreten. Die ladungsproportionalen Impulse können oszillografisch beobachtet werden (Übersichtszoszillogramm). Durch ein Röhrenvoltmeter mit entsprechenden Bewertungsgliedern wird die mittlere Impulsladung (z. B. quasi-peak-Bewertung) gemessen.

Zur Bestimmung der Gesamtladung werden die Ladungen der Einzelimpulse durch eine als »Speicherzähler« bekannte Schaltung addiert. Damit sämtliche Impulse gleich bewertet werden, ist eine Linearisierung der Aufladekurve des Meßkondensators notwendig. Nach einer bestimmten Zeit (z. B. nach jeder Periode der 50-Hz-Wechselspannung) wird der Meßkondensator über einen »Entladeschalter« kurzgeschlossen. Der bei einer Impulsfolge auftretende treppenförmige Verlauf der Kondensatorspannung (Abb. 2) kann sich dann nach jeder Periode ständig wiederholen.

Durch Oszillografieren des Spannungsverlaufs über dem Meßkondensator können die im Prüfling auftretenden Entladungsvorgänge verfolgt werden. Damit man auf dem Oszillografenschirm ein stehendes Bild erhält, wird der Oszillograf gleichzeitig mit dem Entladeschalter durch eine Triggereinrichtung (die z. B. von der 50-Hz-Wechselspannung angesteuert werden kann) ausgelöst. Der mittlere Wert der Gesamtladung in den einzelnen Meßperioden wird durch Messung des Maximalwertes der Spannung über dem Meßkondensator mit einem Röhrenvoltmeter bestimmt.

### 3.2. Wirkungsweise der Meßschaltung

Die Schaltung zur Messung der Ladungsmenge (Abb. 3) wurde durch antiparallel geschaltete Zenerdioden gegen evtl. auftretende Überspannungen (Prüflingsdurchschläge) am Eingang geschützt.

Die Integration der am Meßwiderstand auftretenden Spannungsimpulse kann mit einem Miller-Integrator durchgeführt werden. Sind die Anforderungen an die Meßempfindlichkeit nicht extrem hoch, so ist bereits eine Integration der Impulse durch einen Parallelkondensator zum Meßwiderstand möglich. Im vorliegenden Funktionsmuster wurde die zuletzt genannte Möglichkeit verwendet. Die Zeitkonstante der RC-Kombination muß so gewählt werden, daß die maximale Spannung an der Meßimpedanz der Ladung der Stromimpulse (in Luft Dauer von wenigen 100 ns) proportional ist. Der Impulsrücken muß aber noch kurz genug sein, damit sich die in gewissen zeitlichen Abständen aufeinanderfolgenden Impulse nicht überlagern und der nachfolgend beschriebene Speicherzähler noch sicher arbeitet. Im vorliegenden Muster wurde eine Zeitkonstante von 0,3  $\mu$ s gewählt. Damit können Stromimpulse mit einer Folgefrequenz von 1 MHz noch sicher erfaßt werden.

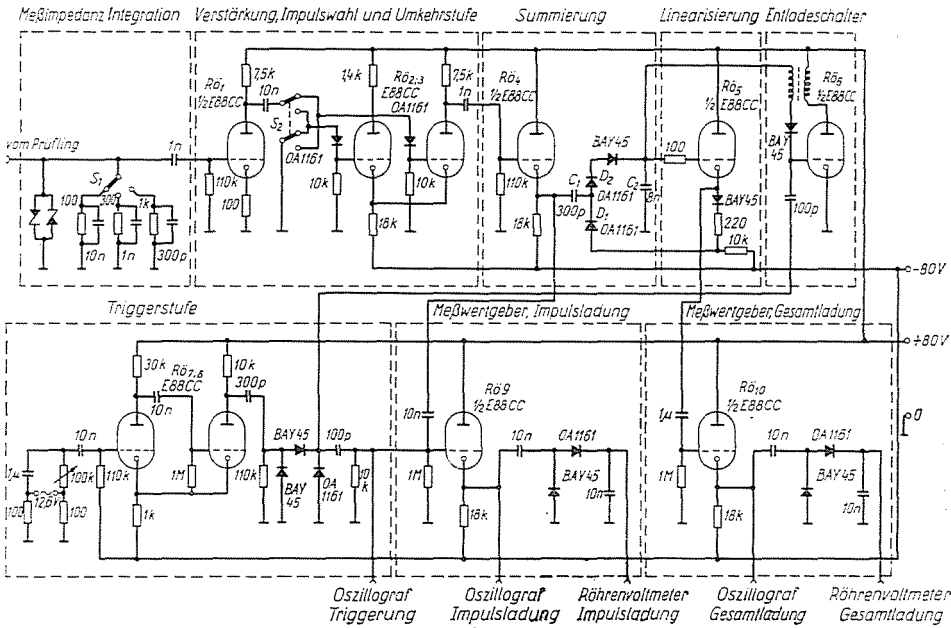


Abb. 3

Der Schalter  $S_1$  dient zur Einstellung der Meßempfindlichkeit. Der kapazitive Ladestrom des Prüflings wird durch die RC-Ankopplung (Hochpaß) zur ersten Verstärkerröhre ( $Rö_1$ ) eliminiert. Im Bedarfsfall kann der Hochpaß durch Verwendung eines RLC-Netzwerkes so dimensioniert werden, daß der kapazitive Ladestrom auch bei höchster Meßempfindlichkeit unterdrückt wird. Im Funktionsmuster wurde nur eine Verstärkerstufe ( $Rö_1$ ) eingesetzt. Sie kann durch einen hochwertigen Verstärker ersetzt werden. Eine obere Grenzfrequenz von 5 MHz ist dabei völlig ausreichend. Die Impulsamplitude am Ausgang sollte nicht kleiner als  $10 V_{ss}$  sein.

Durch den Schalter  $S_2$  kann die gewünschte Polarität zur weiteren Verarbeitung gewählt werden. Nach der folgenden Umkehrstufe ( $Rö_{2,3}$ ) stehen unabhängig von der Polarität der Eingangsimpulse stets positive Ausgangsimpulse zur Verfügung.

Die Impulse werden noch nach einer Trennstufe ( $Rö_4$ ) einem Speicherschaltkreis, bestehend aus den Kondensatoren  $C_1$  (300 pF),  $C_2$  (8 nF) und den Dioden (OA 1161) und  $D_2$  (OA 1161 und BAY 45), zugeführt. (Die Reihenschaltung der Dioden bei  $D_2$  war notwendig, da geeignete Bauelemente mit hohem Sperrwiderstand und gleichzeitig gutem dynamischem Verhalten nicht zur Verfügung standen.) Bei einem positiven Impuls an der Katode von  $Rö_4$  wird  $C_2$  teilweise über  $C_1$  und  $D_2$  aufgeladen (Spannungsteiler). Während des Impulsrückens wird  $C_1$  über  $D_1$  wieder entladen,  $C_2$  behält die Ladung. Bei

aufeinanderfolgenden Impulsen speichert  $C_2$  die Einzelladungen, und die Spannung steigt treppenförmig an (Abb. 2). Ohne zusätzliche Maßnahmen wird allerdings die Stufenhöhe mit zunehmender Impulszahl immer kleiner, da für die auf  $C_2$  überfließende Ladung die Differenz zwischen der Spannung über  $C_2$  und der Eingangsspannung (Impulsamplitude an  $R_{\delta_4}$ ) maßgebend ist.

Damit sämtliche Impulse gleich bewertet werden, ist eine Linearisierung der Aufladekurve von  $C_2$  notwendig. Das wird erreicht, wenn das Potential der Anode von  $D_1$  der Spannungsänderung über  $C_2$  gleichsinnig folgt. Daher wurde die Spannung von  $C_2$  über einen Katodenfolger ( $R_{\delta_5}$ ) an  $D_1$  zurückgeführt. Damit die Schaltung richtig arbeitet, muß an  $R_{\delta_5}$  eine sorgfältige Arbeitspunkteinstellung vorgenommen werden (Spannungsteiler im Katodenzweig).

Die Spannung von  $C_2$  wird über die Primärwicklung eines HF-Transformators und die Diode BAY 45 dem Gitter einer Sperrschwingerröhre ( $R_{\delta_6}$ ) zugeführt. Überschreitet die Spannung an  $C_2$  einen bestimmten Pegel, so wird die zuvor gesperrte Röhre leitend. Der als Entladeschalter wirkende Sperrschwinger führt eine Schwingung aus, und der Kondensator  $C_2$  wird über die gut leitende Gitter-Katoden-Strecke von  $R_{\delta_6}$  entladen.

Im Normalfall wird der Entladeschalter zu einem definierten Zeitaugenblick ausgelöst, noch bevor die Spannung von  $C_2$  die Sperrspannung von  $R_{\delta_6}$  erreicht hat. Bei Wechselspannungsuntersuchungen wird die Triggerstufe (z. B. monostabiler Multivibrator,  $R_{\delta_{7,s}}$ ) zweckmäßigerweise von einer in ihrer Phasenlage verstellbaren 50-Hz-Wechselspannung angesteuert. Gleichzeitig mit dem Entladeschalter wird auch der Oszillograf von der Triggerstufe ausgelöst.

Die an  $R_{\delta_4}$  auftretenden Spannungsimpulse (ihre Amplitude ist der Impulsladung proportional) werden über eine Impulstrennstufe ( $R_{\delta_9}$ ) einem Oszillografen zugeführt und nach einer Klemmschaltung (Kondensator 10nF Diode BAY 45) gleichgerichtet (Diode OA 1161, Kondensator 10 nF). Somit kann das Impulsübersichtsbild verfolgt und bei entsprechenden Bewertungsgliedern (z. B. quasi-peak-Bewertung) die Impulsladung mit einem Röhrenvoltmeter gemessen werden.

Der Spannungsverlauf über  $C_2$  (Treppenkurve) erscheint an der Katode von  $R_{\delta_5}$  und kann nach der Impulstrennstufe ( $R_{\delta_{10}}$ ) oszillografiert werden. Die maximale Höhe der Treppenkurve (Gesamtladung während eines definierten Zeitintervalles) wird nach der Gleichrichtung von einem Röhrenvoltmeter angezeigt.

#### 4. Auswertung

Das entwickelte Funktionsmuster wurde bei der Untersuchung von Vorentladungen an einer Spitze-Platte-Funkenstrecke bei 50-Hz-Wechselspannungsbeanspruchung eingesetzt und erprobt. Es hat sich bei diesen Messungen gut bewährt.

Die angegebene Schaltung stellt ein Ausführungsbeispiel dar. Zur Anpassung an spezielle Meßprobleme sind Änderungen bzw. Umdimensionierungen einzelner Baugruppen möglich. So kann die Eingangsimpedanz sowohl in ihrer Größe als auch in der Zeitkonstante geändert werden; die Verwendung eines Miller-Integrators ist u. U. vorteilhaft. Für sehr empfindliche Messungen sollte ein zusätzlicher Meßverstärker eingesetzt werden. Dabei ist darauf zu achten, daß Übersteuerungen — die zu einer Fehlanzeige führen — vermieden werden; gegebenenfalls ist ein Begrenzer mit vorzusehen. Das Verhältnis der Kapazitäten im Speicherzähler ( $C_1$ ,  $C_2$ ) kann verändert werden. Dabei sollte  $C_2$  jedoch nicht über 10 nF erhöht werden, damit der Entladeschalter noch sicher arbeitet. Die verwendeten Dioden können durch andere mit gutem dynamischem Verhalten, geringem Durchlaß- und hohem Sperrwiderstand ersetzt werden. Die Triggerstufe kann durch andere Schaltungsvarianten (z. B. Schmitt-Trigger) verwirklicht werden. Für Messungen bei Schaltspannungen oder Gleichspannungen ist eine externe Auslösung vorzusehen.

Die Abhängigkeit der im Prüfling erzeugten Ladungsmenge von der Zeit kann durch registrierende Meßgeräte (z. B. Magnetbandschreiber, Lichtlinienschreiber) aufgezeichnet werden.

## 5. Zusammenfassung

Bei Teilentladungsuntersuchungen ist die Ladungsmessung aussagekräftiger als die Messung des Hochfrequenzpegels mit Störspannungsmeßgeräten. Mit der neuentwickelten Meßschaltung kann die Ladungsmenge direkt gemessen werden. Der Aufwand ist auch bei großer Prüflingskapazität relativ gering; ein entladungsfreier Hochspannungskondensator und ein hochwertiger Differenzverstärker wird nicht (wie bei der Messung der Ladungen in einer Brückenschaltung) benötigt. Es können sowohl die Ladung der Einzelimpulse als auch die in einem bestimmten Zeitintervall erzeugte Gesamtladung gemessen werden. Durch oszillografische Aufzeichnung des Impulsübersichtsbildes und der Ladungskurve (treppenförmiger Verlauf) können die Entladungsvorgänge im Prüfling beobachtet werden. Die Anpassung der Schaltung zur Ladungsmessung an spezielle Meßprobleme ist durch Abänderung einzelner Baugruppen möglich. Die Ladungsverläufe können durch registrierende Meßgeräte aufgezeichnet werden.

## Literatur

1. NEMA 107: Methods of measurement of radio influence voltage (RIV) of high-voltage Apparatus. Pub. No 107 (1964).
2. TGL 20625: Hochfrequenz-Störspannungen von Hochspannungsbauteilen (1966).
3. BAZELYAN, E. M.: Die Rolle der Korona-Raumladung beim Entstehen langer positiver Funken bei Stoßspannungen (russ.). J. techn. Physik **36**, 363—373. (1966).
4. LEMKE, E.: Vorentladungen im inhomogenen Feld in Luft bei Schaltspannungen. Vortrag auf dem XI. Internationalen Kolloquium in Ilmenau am 21. 10. 1966.
5. DAKIN, T. W., MALINARIC, P. J.: A capacitance bridge method for measuring integrated corona-charge transfer and power loss per cycle. Trans. AIEE (III) **79**, 648—653 (1960).
6. BOECK, W.: Verfahren zur Ladungs- und Leistungsmessung bei Koronaentladungen an Isolierstoffen. ETZ-A Bd. 84 **23**, 129—132 (1963).

Dipl. Ing. E. LEMKE, T. U; Dresden, DDR