

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 42 (1951)  
**Heft:** 14

**Artikel:** Kabelringwandler für Erdschlussschutz  
**Autor:** Gross, T.B.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1056875>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 25.12.2024

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

Position du témoin	Température °C	Quantité évaporée mg/cm <sup>2</sup> /30 min
Plan moyen horizontal, arrière droite, à 5 cm des parois	72	56,1
Plan moyen horizontal, avant gauche, à 5 cm des parois	72	42,0
Centre, point d'intersection des diagonales d'espace	71	36,9
Plan moyen horizontal, arrière droite, à 5 cm des parois	71	50,0
Plan moyen horizontal, avant gauche, à 5 cm des parois	71	43,3
Centre, point d'intersection des diagonales d'espace	71	27,3
		27,5
		28,8

l'étuve, sa diminution de poids est linéairement proportionnelle au temps. Lors des

*mesures pratiques,*

le procédé suivant s'est révélé comme parfaitement adapté au but poursuivi: Tout d'abord, on détermine au moyen d'un calibre la surface du témoin. Puis ce dernier est suspendu librement en un lieu donné de l'étuve portée à 70 °C exactement, jusqu'à ce qu'il ait atteint cette température, soit environ pendant 10 minutes. On détermine alors son poids exact le plus rapidement possible, au moyen d'une balance à amortisseurs, et on le ramène aussitôt après dans l'étuve. La pesée ne doit pas durer plus d'une minute, ceci afin d'éviter un refroidissement considérable du témoin pendant cette opération. La deuxième pesée se fait après 30 minutes. Il est recommandé de n'utiliser chaque témoin qu'une fois, car la sublimation d'une quantité notable de naphthaline entraîne la formation d'une surface poreuse dont on ne peut plus déterminer la grandeur avec suffisamment d'exactitude.

**Résultats**

La quantité évaporée est donnée en mg/cm<sup>2</sup>/30 min.

Les résultats suivants, communiqués à titre d'exemples, ont été obtenus de 3 étuves de constructions différentes, telles qu'on les rencontre couramment dans le commerce.

**Conclusions**

Les mesures ci-dessus conduisent aux conclusions suivantes, conclusions dont il faut tenir compte dans tous les cas où l'évaporation lente de substances volatiles joue un certain rôle.

L'effet de séchage de 3 étuves telles qu'on les rencontre couramment dans le commerce, est dans le rapport de 8:16:36, mesuré au centre de chaque étuve.

Pour les étuves 1 et 2 à faible circulation d'air, l'évaporation est du même ordre de grandeur en tous leurs points.

Concernant l'étuve n° 3, l'évaporation peut varier d'un point à l'autre de l'étuve dans le rapport de 3:5, alors même que le thermomètre indique partout la même température. Cette dispersion provient de différences locales de circulation dues à la formation de tourbillons causés eux-mêmes par l'arrangement propre des entrées et sorties de l'air de circulation.

Dans le cas d'une circulation intense, de petites variations de température peuvent provoquer des variations relativement grandes de l'évaporation.

**Adresse des auteurs:**

M. Zürcher, Dr ès sc. techn., ingénieur-chimiste dipl., Station d'essai des matériaux de l'ASE, 301, Seefeldstrasse, Zurich 8.  
Jean Lüder, ingénieur-chimiste dipl., Station d'essai des matériaux de l'ASE, 301, Seefeldstrasse, Zurich 8.

**Kabelringwandler für Erdschlussschutz \*)**

Von Eric T. B. Gross, Chicago

621.314.222.08:621.316.925

*Zur selektiven Anzeige und Abschaltung von Erdschlüssen in Hochspannungsnetzen werden Erdschlussrelais verwendet. Es wird gezeigt, dass Ringwandler in Kabelnetzen zur Erhöhung der Empfindlichkeit mit Vorteil verwendet werden, dass es jedoch notwendig ist, den Fehlwinkel dieser Kabelringwandler zu korrigieren. Auch beim Gehäuseschlussschutz elektrischer Generatoren ermöglichen Kabelringwandler eine Steigerung der Empfindlichkeit; ein wattmetrisches Erdschlussrelais neuer Anschlussart wird beschrieben.*

*La signalisation et le déclenchement sélectifs de mises à la terre accidentelles dans les réseaux à haute tension s'opère au moyen de relais. L'auteur montre que la sensibilité de ces relais peut être augmentée, dans les réseaux en câbles, par l'emploi de transformateurs toroïdaux, mais qu'il est nécessaire d'en corriger l'angle d'erreur. Ces transformateurs augmentent également la sensibilité des relais de protection contre les mises accidentelles à la masse des générateurs. L'auteur décrit un relais wattmétrique branché selon ce nouveau système.*

**I. Vorteile**

**der Verwendung von Kabelringwandlern**

Erdschlussrelais, welche für die Abschaltung oder für die Anzeige von Erdschlüssen in Hochspannungsnetzen verwendet werden, erhalten den Unsymmetriestrom zugeführt. Der Unsymmetriestrom eines Zweiges kann auf verschiedene Arten gewonnen werden. Allgemein verwendbar ist der Zusammen-

schluss der Messwicklungen von Stromwandlern in jeder Phase (Unsymmetrie- oder Summenschal-

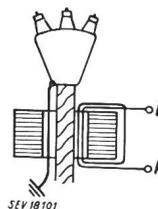


Fig. 1  
Kabelringwandler

zung). In Kabelnetzen sind aber auch Kabelringwandler (Fig. 1) geeignet, die besonders bei klei-

\*) Das Manuskript wurde uns vor einigen Jahren eingebracht, konnte aber wegen Raumangels nicht früher veröffentlicht werden. Red.

nen primären Unsymmetrieströmen grosse Vorteile bringen. Da bei Kabelringwandlern Fehlerquellen, die bei der Verwendung gewöhnlicher Stromwandler auftreten, beseitigt sind, wird Kabelringwandlern immer dann der Vorteil gegeben, wenn ihre Anwendung möglich ist. Bei der Verwendung gewöhnlicher Stromwandler werden deren Sekundärwicklungen in Summenschaltung miteinander verbunden. Im erdschlussfreien, also unsymmetriestromfreien Betrieb ist die Summe der Primärströme in den drei Phasen eines Drehstromzweiges gleich Null, so dass auch sekundär kein Unsymmetriestrom vorhanden sein sollte. Da die drei Stromwandler eines Zweiges jedoch nicht völlig übereinstimmen, wird in der Regel ein, wenn auch geringer, so doch merkbarer Unsymmetriestrom auf der Sekundärseite fliessen, der Falschstrom genannt wird. Schutzrelais dürfen auf diesen Strom, der ja einen primären Fehler nur vortäuscht, nicht ansprechen. Durch den Falschstrom wird also der zulässigen Empfindlichkeit [1]<sup>1)</sup> der Relais eine Grenze gesetzt. Bei Verwendung von Kabelringwandlern, die gemäss Fig. 1 aus einem bewickelten Eisenring bestehen, durch dessen Inneres das Kabel durchgeführt ist, treten derartige Falschströme nicht auf, weil eben nur ein einziger Wandler vorhanden ist. Die Verwendung von Kabelringwandlern ermöglicht deshalb, die Empfindlichkeit des Erdschlussschutzes ausserordentlich zu steigern. Primäre Unsymmetrieströme (Erdschlussrestströme) von 1 bis 2 A und weniger können selbst bei Betriebsströmen (Kabelnennstrom) von einigen 100 A noch erdschlussfrei erfasst werden. Im folgenden wird über die Ergebnisse einiger theoretischer und praktischer Untersuchungen berichtet, welche hochempfindliche (wattmetrische) Erdschlussrelais betreffen, deren Stromwicklung von Kabelringwandlern gespeist wird. Wir behandeln zunächst die Erdschlussanzeige in radialen kompensierten Kabelnetzen und dann den Gehäuseschlusschutz von Generatoren, die auf Unterspannungs-Sammelschienen (6-kV- oder 10-kV-Schienen und -Netze) arbeiten.

## II. Kabelringwandler für Erdschlussrelais in Netzen

Die Praxis des Betriebes mit Erdschlußspulen hat gezeigt, dass es vorteilhaft ist, Erdschlußspulen auch in Kabelnetzen anzuwenden, sobald der Erdschlußstrom solcher Netze etwa 5...10 A überschreitet. Auf jeden Fall sollen Kabelnetze kompensiert werden, wenn der Erdschlußstrom 20 A erreicht. Bei kleinen und mittleren Betriebsspannungen beträgt die unkompenzierte Wirkkomponente des Erdschlußstromes, der massgebende Erdschlußreststrom, etwa 5 %. Wird also angenommen, dass der gesamte kapazitive Erdschlußstrom 20 A beträgt, dann verbleibt bei exakter Kompensierung an der Erdschlußstelle ein Wirkreststrom von 1 A. Bei kleinerem Netzumfange ist der über den Kabelringwandler vom Erdschlussrelais zu erfassende Strom noch kleiner. Es ist durchaus möglich, in Radialnetzen, um die es sich häufig handelt, selbst

<sup>1)</sup> siehe Literatur am Schluss.

bei so geringen primären Erdschlussrestströmen und bei Betriebsströmen von mehreren 100 A, eine einwandfreie Erdschlussanzeige durch wattmetrische Erdschlussrelais zu erreichen. Wenn Ringe oder Leitungsschleifen vorhanden sind, ist es wohl immer möglich, eine vorübergehende Auftrennung durchzuführen und das Netz dadurch in ein Radialnetz zu verwandeln. Wir beschränken uns im folgenden auf die Behandlung solcher Radialnetze. In Ringnetzen können schon primär tatsächlich nicht existierende Wirkkomponenten vorgetäuscht werden, so dass eigentlich jedes vermaschte Netz in dieser Hinsicht im einzelnen genau untersucht werden muss. Für die hier betrachteten Radialnetze hingegen gelten unsere grundsätzlichen Überlegungen ganz allgemein. Vorausgesetzt wird nur, dass die Netze im erdschlussfreien Betrieb symmetrisch sind und dass die Symmetriebedingung (Gleichheit der Erdkapazitäten) nicht nur für das ganze Netz, sondern auch für jeden Zweig allein gilt<sup>2)</sup>.

Obwohl wir unsere Überlegungen für kompensierte Netze führen, bereitet die Übertragung auf nicht kompensierte Netze keinerlei Schwierigkeiten. An Stelle von Wirkleistungsrelais ( $\cos\varphi$ -Relais) sind dann Blindleistungsrelais ( $\sin\varphi$ -Relais) zu verwenden. Stromrelais allein kämen nur bei Netzen mit vielen Zweigen und sehr grossen Erdschlussströmen in Frage, weil nur dann ein Intensitätsvergleich des mit dem Fehler behafteten Zweiges (grosser Unsymmetriestrom) mit den fehlerfreien Zweigen (kleiner Unsymmetriestrom) durchgeführt werden kann. Bei grossen Erdschlußströmen wird aber vorteilhaft eine Erdschlußspule zur Kompensierung vorgesehen [2]. Wichtig bei der Verwendung von Kabelringwandlern ist noch, dass wattmetrische Relais viel empfindlicher gebaut werden können als gewöhnliche Stromrelais. Im Abschnitt III über Generatorschutz wird hierauf noch eingegangen.

Es ist zu erwarten, dass Kabelringwandler als Einleiterwandler, wenn sie primär von Strömen  $I$  geringer Intensität gespeist werden — es kommen bestenfalls einige Ampère in Frage — den Sekundärstrom  $I'$  mit grossem Übersetzungsfehler

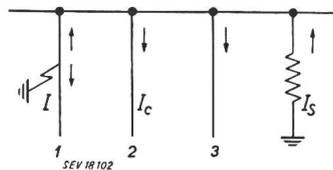


Fig. 2

Radialnetz mit Erdschlußspule. Erdschluss an Zweig 1 (in einpoliger Darstellung)

$I$  Erdschlussreststrom in Zweig 1;  $I_c$  kapazitiver Erdschlussstrom in Zweig 2;  $I_s$  Löschstrom der Erdschlußspule

(Stromfehler) und Fehlwinkel liefern. Beim Zweig, an dem der Erdschluss liegt, stören diese Eigenschaften nicht weiter, jedoch muss bei den fehlerfreien Zweigen dafür gesorgt werden, dass sicher keine Falschmeldung eintritt. In Fig. 2 ist in ein-

<sup>2)</sup> In Kabelnetzen ist diese Bedingung wohl immer erfüllt. Durch kapazitive Unsymmetrien (in Freileitungsnetzen) können Wirkkomponenten vorgetäuscht werden, worauf bei Verwendung von Erdschlussrelais mit gesteigerter Empfindlichkeit geachtet werden muss.

poliger Darstellung eine Sammelschiene mit drei Zweigen und einer Erdschlußspule gezeichnet. An der Erdschlußstelle fließt der Reststrom  $I$ , der gemäss Fig. 3 durch vektorielle Zusammensetzung aus

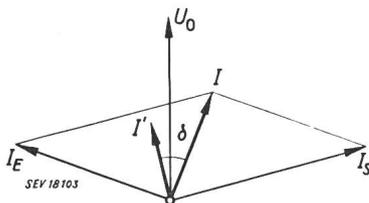


Fig. 3

**Kompensierungsdiagramm**

$U_0$  Nullpunktspannung;  $I_E$  Erdschlußstrom des Netzes;  $I_S$  Löschtstrom der Spule;  $I$  Erdschlußreststrom;  $I'$  Sekundärstrom im Relais;  $\delta$  Phasenverschiebung

dem kapazitiven Erdschlußstrom  $I_E$  des Netzes und dem Strom  $I_S$  der Erdschlußspule entsteht. Bei nicht genauer Kompensierung, die in Fig. 3 angenommen ist, fällt der Reststrom  $I$  nicht genau in die Richtung der treibenden Nullpunktspannung  $U_0$  (der Deutlichkeit halber sind in Fig. 3 die in Richtung von  $U_0$  fallenden Komponenten von  $I_E$  und  $I_S$  zu gross angenommen; tatsächlich stehen sowohl  $I_E$  als auch  $I_S$  auf  $U_0$  nahezu senkrecht). An die Kabelringwandler wird die Stromwicklung des Erdschlussrelais angeschlossen. Das Erdschlussrelais stellt eine induktive Belastung des Wandlers dar, und aus diesem Grunde eilt der dem Primärstrom  $I$  des Kabelringwandlers entsprechende Sekundärstrom  $I'$  im Relais gegenüber  $I$  um einen Phasenverschiebungswinkel  $\delta$  vor. Beim Zweig mit dem Erdfehler stört diese Phasenverschiebung nicht weiter, denn die Wirkkomponente wird dadurch nur unwesentlich geändert.

Beachten wir nun, dass die Phasenlage des Erdschlussstromes  $I_E$  in Bezug auf die Nullpunktspannung  $U_0$  (Fig. 3) voreilend ist und dass sich der Erdschlussstrom bei den Zweigen, welche keinen Erdschluss besitzen, bei Berücksichtigung des richtungsabhängigen Anschlusses der Erdschlussrelais, um genau  $180^\circ$  umkehrt (Fig. 4), so wird sofort klar, dass wegen des Fehlwinkels  $\delta$  auch ein Relais eines gesunden Zweiges ansprechen kann. In Fig. 4

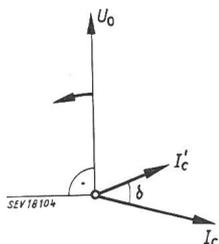


Fig. 4

**Diagramm des Unsymmetriestromes in einem Zweig ohne Erdschluss**

$U_0$  Nullpunktspannung;  $I_c$  primärer Erdschlußstrom;  $I'_c$  sekundärer Erdschlußstrom;  $\delta$  Fehlwinkel des Kabelringwandlers

sind die Verhältnisse für den Zweig 2 der Fig. 2 gezeichnet. Der an den Sammelschienen vorhandene anteilige kapazitive Erdschlußstrom ist mit  $I_c$  bezeichnet. Er eilt gegenüber  $U_0$  um einen Winkel nach, der grösser ist als  $90^\circ$ . Seine Wirkkomponente ist negativ, so dass das zugehörige Erdschlussrelais unter dem primären Strom  $I_c$  nicht ansprechen würde. Nun ist aber der Fehlwinkel  $\delta$  des Kabelringwandlers zu beachten, der zwischen etwa  $5^\circ$

und  $20^\circ$  liegt. Auf der Sekundärseite, also das Erdschlussrelais durchfliessend, kommt tatsächlich ein Strom  $I'_c$  zur Wirkung, der in Bezug auf  $U_0$  eine positive Wirkkomponente besitzt. Es könnte also zu einem falschen Ansprechen des Erdschlussrelais kommen, und zwar würden zusammen mit dem Erdschlussrelais des Zweiges, der mit dem Erdschluss wirklich behaftet ist, auch noch Relais anderer Zweige ansprechen und zwar, wie unten gezeigt wird, vornehmlich solche grosser Ausdehnung, also mit grossem Erdschlußstrom  $I_c$ . Aus Fig. 4 lässt sich unmittelbar ableiten, wie das falsche Ansprechen von Erdschlussrelais bei den Kabelzweigen, die nicht mit dem Erdschluss behaftet sind, vermieden werden kann. Es muss einfach die Phasenlage der Nullpunktspannung  $U_0$  gemäss dem Pfeil in Fig. 4 solange verdreht werden, bis die in die neue Richtung von  $U_0$  fallende Komponente von  $I'_c$  so klein geworden ist, dass ihr Drehmoment zur Relaisbetätigung nicht mehr ausreicht oder, mit anderen Worten, die durch den Fehlwinkel  $\delta$  hervorgerufene Verdrehung des Sekundärstromes  $I'_c$  gegenüber dem Primär-Unsymmetriestrom  $I_c$  muss durch eine gleichartige Drehung der Spannung ausgeglichen werden. Man könnte ebenso daran denken, den Sekundärstrom  $I'_c$  zurückzudrehen, jedoch empfiehlt sich diese Massnahme deshalb nicht, weil damit zwangsläufig eine weitere Vergrösserung der Wandlerfehler verbunden wäre. Viel einfacher und ebenso leicht zum Ziele führt die Verdrehung der Spannung. Die dem Erdschlussrelais zuzuführende Spannung  $U_R$  wird also gegenüber  $U_0$  voreilen müssen, besonders bei exakter Kompensierung des Stromwandler-Fehlwinkels um denselben Betrag  $\delta$ . Diese Verdrehung lässt sich leicht ausführen. Beispielsweise wird gemäss Fig. 5 der Stromwandler in

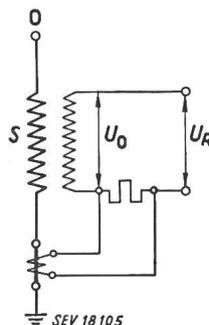


Fig. 5

**Schaltung zur Phasenverdrehung der Relaisspannung**

$S$  Erdschlußspule;  $U_0$  Nullpunktspannung;  $U_R$  Relaisspannung

Serie mit der Primärwicklung der Erdschlußspule  $S$  durch einen Widerstand belastet, der in der Verbindungsleitung von der Messwicklung der Erdschlußspule zu den Relaisklemmen eingeschaltet ist. Der Spannungsabfall an diesem geringen Widerstand ist mit dem Strom durch die Erdschlußspule in Phase. Die Spannung  $U_0$  jedoch steht auf dem Strom durch die Erdschlußspule senkrecht, so dass durch die Serienschaltung eine Spannung  $U_R$  entsteht, die bei entsprechender Polarität gegenüber  $U_0$  voreilt. Auf diese Art wird die nötige Voreilung der Relaisspannung  $U_R$  für alle Erdschlussrelais in der Station erzeugt. Ebenfalls unter Verwendung eines Widerstandes zeigt Fig. 6 eine andere Ausführung, die wegen ihrer leichten Einstell-

barkeit mit Vorteil wiederholt angewendet wurde. Es wird einfach in den Spannungskreis des Relais ein entsprechend dimensionierter zusätzlicher Widerstand geschaltet. Ist  $U_0$  gemäss Fig. 6 die sekun-

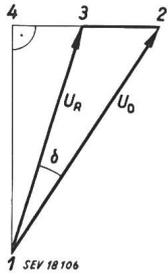


Fig. 6  
Vektordiagramm zur Phasenverdrrehung der Relaisspannung, erzeugt durch einen Vorschaltwiderstand  
 $U_0$  Nullpunktspannung;  $U_R$  Relaisspannung;  $\delta$  Voreilwinkel

däre Nullpunktspannung, so entspricht dem Abstand 3—2 der Spannungsabfall an diesem Vorschaltwiderstand, der den Voreilwinkel  $\delta$  und die Relaisspannung  $U_R$  erzeugt. Die Grössen 1—4 und 4—3 stellen die im Relais wirksamen Spannungs-komponenten dar.

Bei bekannten Dimensionen des Kabelringwandlers können Fehlwinkel und Übersetzungsfehler auf bekannte Weise voraus berechnet werden. Man geht dabei (Fig. 7) vom Sekundärstrom  $I'$  aus, der

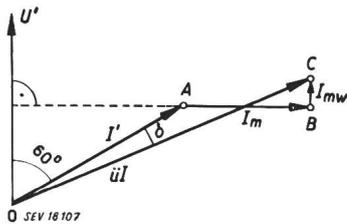


Fig. 7  
Vektordiagramm des Kabelringwandlers bei vorwiegend induktiver Belastung  
 $U'$  sekundäre Klemmenspannung des Wandlers;  $I'$  Sekundärstrom des Wandlers;  $I_m$  Magnetisierungsstrom;  $I_{mw}$  Verluststrom;  $\ddot{u}I$  auf die Sekundärseite reduzierter Primärstrom;  $\delta$  Fehlwinkel des Wandlers

gegenüber der Sekundär-Klemmenspannung  $U'$  des Wandlers um den Phasenwinkel der Belastung ( $60^\circ$  im Beispiel Fig. 7 für Erdschlussrelais samt Zuleitung) nacheilend aufzutragen ist. Aus der Klemmenspannung  $U'$  lässt sich die Induktion berechnen und dann aus Magnetisierungslinien der Magnetisierungsstrom  $I_m$  und seine Verlustkomponente  $I_{mw}$  bestimmen. Die Abschlusslinie  $OC$  des Diagrammes ist dann der mit dem Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  reduzierte Primärstrom  $I$ . Aus dem Diagramm lassen sich Fehlwinkel  $\delta$  und Übersetzungsfehler  $f = 100 \frac{\ddot{u}I - I'}{\ddot{u}I}$  unmittelbar ableiten. Es ist zweck-

mässig, solche Berechnungen durch experimentelle Untersuchungen zu vervollständigen [3]. Gemäss Fig. 8 wird dabei eine Schaltung verwendet, welche gestattet, sowohl den Strom im Kabelringwandler  $K$  bzw. im Erdschlussrelais  $ER$  der Grösse nach, als auch die Phase der Spannung am Erdschlussrelais (bei konstanter Spannung) zu verändern. Die Einstellung des Stromes erfolgt mittels eines Schiebewiderstandes  $R$ , die Einstellung der Spannung der Phase und Grösse nach durch einen Drehtransformator  $DT$  und durch Potentiometer  $P$ . Sämtliche

Grössen werden durch entsprechende Messinstrumente überwacht. Der Strom wird nur auf der Primärseite gemessen, weil die Sekundärseite des Kabelringwandlers keine zusätzlichen Belastungen er-

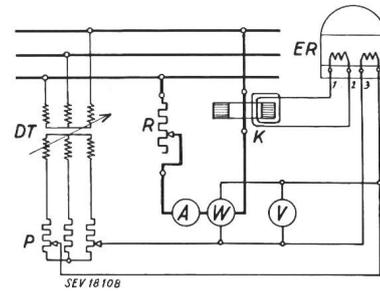


Fig. 8  
Schaltung zur Untersuchung der Strom- und Spannungsverhältnisse

$DT$  Drehtransformator;  $P$  Potentiometer;  $R$  Schiebewiderstand;  $K$  Kabelringwandler;  $ER$  Erdschlussrelais;  $A$  Ampèremeter;  $W$  Wattmeter;  $V$  Voltmeter

fahren darf, da sonst die Nachbildung durch die Impedanzen der Messinstrumente gegenüber den tatsächlichen Verhältnissen verändert würde. Bei der Messung wird ein bestimmter Primärstrom  $I$  eingestellt und dann die Phasenlage der Spannung so lange verändert, bis das eine Mal positive und das andere Mal negative Ausschläge der Relais beginnen. Der mittlere Phasenwinkel zwischen diesen beiden Grenzständen entspricht dann der Nulllage. Bei einer Kontrollmessung werden die gleichen Versuche mit kommutiertem Strom ausgeführt. Da auch die Relais an sich in der Regel nicht genau auf  $0^\circ$  abgeglichen sind, empfiehlt es sich, zunächst die Relais allein zu überprüfen. Es werden dabei der Fig. 8 analoge Schaltungen verwendet, jedoch entfällt der Kabelringwandler  $K$ ; an seine Stelle tritt die Stromwicklung des Erdschlussrelais (Klemmen 1, 2) unmittelbar. Es ist nicht nötig, die Erdschlussrelais allein auf Null abzugleichen, wenn die Abgleichung durch separate Vorschaltwiderstände (gemäss Fig. 6) bei jedem Erdschlussrelais einzeln erfolgt, weil hiebei zugleich mit dem Winkelfehler  $\delta$  des Kabelringwandlers auch der Fehlwinkel des Relais korrigiert werden kann. Die Ergebnisse einer solchen Berechnungs- und Mess-

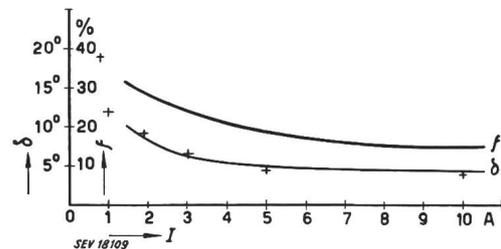


Fig. 9  
Fehlwinkel  $\delta$  und Übersetzungsfehler  $f$  eines Kabelringwandlers in Abhängigkeit vom Erdschlussstrom  $I$

reihe sind in Fig. 9 eingetragen. Man sieht, dass Fehlwinkel  $\delta$  und Übersetzungsfehler  $f$  mit abnehmendem Strom stark anwachsen; dabei zeigen die Kreuze Messpunkte für  $\delta$ , die ausgezogenen Kurvenzüge Berechnungsergebnisse. Die Übereinstimmung ist hinreichend.

Obwohl die für Falschanzeige von Erdschlussrelais in erster Linie massgebenden Fehlwinkel bei kleinen Primärströmen  $I$ -Werte bis zu  $20^\circ$  erreichen, neigen doch die längeren Kabelzweige mit den grösseren Strömen eher zu unrichtiger Betätigung der Erdschlussrelais. In Fig. 10 ist die in Richtung von  $U_o$  fallende Komponente

$$I_u' = \ddot{u} I \sin \delta \left(1 - \frac{f}{100}\right)$$

des Sekundärstromes  $I'$  in Abhängigkeit von  $I$  dargestellt. Dabei ist angenommen, dass  $I$  (der Erdschlußstrom des Kabelzweiges, in Fig. 4 mit  $I_c$  bezeichnet) gegenüber  $U_o$  um genau  $90^\circ$  nach-eilt. Für  $f$  und  $\delta$  sind die Werte aus Fig. 9 eingesetzt und  $\ddot{u}$  ist wieder das Übersetzungsverhältnis, also der reziproke Wert der Sekundärwindungszahl  $w$  des Kabelringwandlers. Die wesentlichen Daten des Kabelringwandlers, der den Untersuchungen zugrunde lag, sind: Wirksamer Eisenquerschnitt  $q = 52 \text{ cm}^2$ , mittlere Eisenweglänge  $l = 47 \text{ cm}$  und sekundäre Windungszahl  $w = 100$ . Der Blindwiderstand des Stromkreises der Erdschlussrelais samt Zuleitung betrug  $4,6 \Omega$  und der Gleichstromwiderstand  $2,5 \Omega$ .

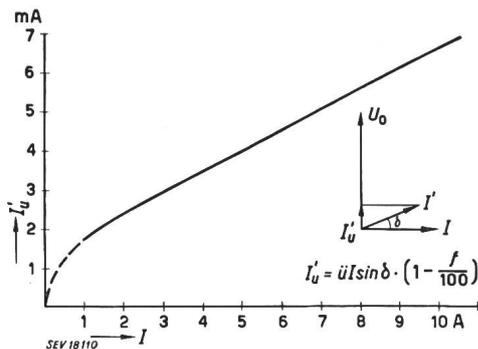


Fig. 10

Abhängigkeit der durch den Fehlwinkel  $\delta$  entstehenden Wirkstromkomponente  $I_u'$  vom Erdschlußstrom  $I$   
 $\ddot{u}$  Übersetzungsverhältnis des Wandlers ( $\ddot{u} = \frac{1}{w}$ );  
 $w$  Sekundärwindungszahl des Wandlers;  $f$  Übersetzungsfehler  
 $(f = 100 \frac{\ddot{u}I - I'}{\ddot{u}I})$

Fig. 10 zeigt, dass der störende Strom  $I_u'$  mit dem primären Erdschlußstrom zunimmt. Da die Empfindlichkeit der Erdschlussrelais durch den kleinsten Wirkreststrom festgelegt ist, der im praktischen Betrieb beim Zweig mit dem Erdschluss auftritt, muss  $I_u'$  kleiner gehalten werden als diese Empfindlichkeitsgrenze der Erdschlussrelais. Beträgt beispielsweise der kleinste tatsächlich vorkommende Wirkreststrom auf die Sekundärseite bezogen und mit Übersetzungsfehler und Fehlwinkel korrigiert  $0,005 \text{ A}$ , dann muss  $U_R$  gegenüber  $U_o$  (nach Fig. 5 oder Fig. 6) so verdreht werden, dass der verbleibende, von  $\delta$  herrührende Strom  $I_u'$  bei den erdschlussfreien Zweigen sicher kleiner ist als die Empfindlichkeitsgrenze  $0,005 \text{ A}$ <sup>3)</sup>. Am einfachsten ist es,

<sup>3)</sup> Die Verdrehung wird bei allen Zweigen durchgeführt, wo sie (wegen der Grösse von  $I_c$ ) notwendig ist. Auf die richtige Funktion des Relais bei Erdschluss am zugehörigen Zweig darf sie natürlich nicht von Einfluss sein. Im allgemeinen ist hierauf keine Rücksichtnahme erforderlich.

die Einstellung der Verdrehung durch Vorwiderstände im Spannungskreis der Relais bei Erdschlussversuchen [4] so vorzunehmen, dass die notwendige Verdrehung bei jedem Kabel in Abhängigkeit von seiner Länge unmittelbar bestimmt wird. Die früher beschriebenen Verfahren zur Betriebskontrolle von Erdschlussrelais [5] sind auch bei diesen Versuchen zu beachten.

### III. Kabelringwandler für Generatorschutz

Für den Gehäuseschlußschutz elektrischer Generatoren, die über Sammelschienen direkt ins Netz arbeiten, erweist sich die Verwendung hochohmiger direkter oder indirekter Nullpunktterdung als zweckmässig und erforderlich. Damit auch geringe Ströme zu einer sicheren Relaisfunktion führen, sind wattmetrische Relais verwendet worden, denen Unsymmetriestrom und Nullpunktspannung zugeführt werden. Da die Gehäuseschlüsse an jeder Stelle der Wicklung auftreten können, schwankt der Erdschlußstrom proportional mit der Entfernung der Fehlerstelle vom Sternpunkt. Er ist bei Klemmenerdschluss am grössten und bei Erdschluss am Sternpunkt gleich Null. Es entsteht also in der Nähe des Sternpunktes eine tote Zone, die vom einfachen Schutz nicht erfasst wird. Es ist deshalb von Pohl [6] vorgeschlagen worden, den Nullpunkt ständig etwas zu verlagern, so dass die gesamte Wicklung geschützt wird [7].

Die Verwendung von wattmetrischen Relais, denen Unsymmetriestrom und Nullpunktspannung zugeführt werden, sind jedoch gegenüber reinen Stromrelais im Nachteil, weil die Annäherung des Fehlers an den Sternpunkt auch die Spannung abnimmt und das im Relais wirksame Produkt Strom mal Spannung demnach quadratisch verkleinert wird. Um den Nachteil des abnehmenden Unsymmetriestromes zu beseitigen, hat Bütow die Verwendung spannungsabhängiger Erdungswiderstände [8] vorgeschlagen, die eine solche Charakteristik haben, dass sie zwischen etwa 10 % der vollen Spannung und ihrem Nennwert einen konstanten Strom liefern. Beträgt dann die Pohl'sche Nullpunktverlagerung mehr als 10 %, so tritt bei jedem Gehäuseschluss an beliebiger Stelle der Wicklung derselbe Erdschlußstrom auf. Bei wattmetrischen Relais ist somit ein abnehmender Faktor ausgeschaltet und es ist jetzt noch nach einer zweiten Verbesserung zu suchen, welche die Spannung betrifft. Hier wurde die Verwendung einer Regenerierungseinrichtung mit Erfolg erprobt, also einer Einrichtung, bei welcher die dem Relais zugeführte Spannung konstant bleibt, obwohl die primäre Spannung entsprechend der Lage der Fehlerstelle schwankt [8]. Einfacher ist jedoch die Verwendung eines Relais in selektiver ampèremetrischer Schaltung ohne Richtungsempfindlichkeit, dem ausschliesslich zur Erhöhung der Empfindlichkeit an sich konstante Spannungen zugeführt werden, die von der Lage des Gehäuseschlusses unabhängig sind [7, 9]. Eine solche Schaltung zeigt Fig. 11. Ein Drehstromgenerator  $G$  arbeitet auf ein Mittelspannungsnetz, sein Nullpunkt ist über einem hochohmigen Widerstand  $W$  geerdet.

Vorteilhaft wird dieser Widerstand nach *Bütow* in irgendeiner Form spannungsabhängig ausgebildet. Die Erdleitung ist durch den Kabelringwandler durchgeführt, womit eine selektive ampèremetri-

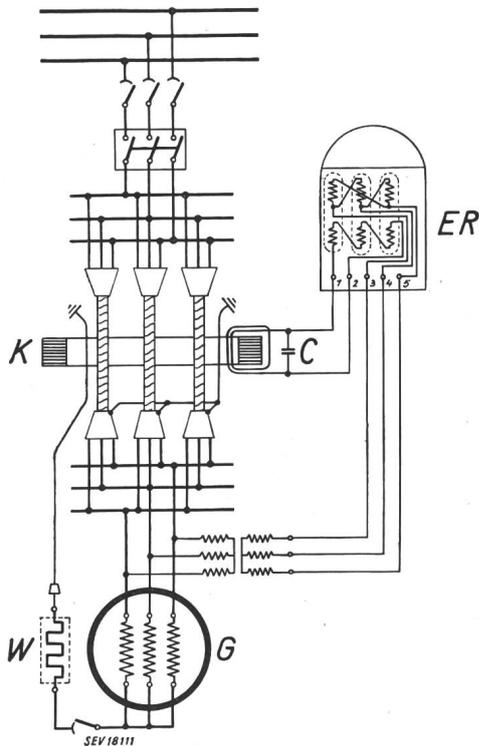


Fig. 11  
Schaltung eines empfindlichen Generator-Gehäuseschluss-Schutzes

ER wattmetrisches Relais ohne Richtungsempfindlichkeit (selektive ampèremetrische Schaltung); G Generator; W spannungsabhängiger Widerstand nach *Bütow*; K Kabelringwandler

sche Schaltung hergestellt wird. Nur bei einem Erdschluss innerhalb des Schutzbereiches (Generatorwicklung einschliesslich Verbindungskabel) wird der Kabelringwandler induziert, nicht aber bei Kurz- oder Erdschlüssen ausserhalb des Schutzbereiches, d. h. an den Sammelschienen oder im Netz. Das Erdschlussrelais besteht aus drei voneinander unabhängigen Systemen, deren Stromspulen in Serie geschaltet sind, während den Spannungswicklungen in zyklischer Aufeinanderfolge die drei verketteten Spannungen zugeführt werden. Auf diese Weise wird erreicht, dass das Relais bei Auftreten von Sekundärstrom unbedingt anspricht und den Generatordefekt anzeigt oder abschaltet. Da es sich hier um ein wattmetrisches Relais handelt, dem die Richtungseigenschaft genommen ist, kommt es auf den Fehlwinkel des Kabelringwandlers nicht an. Deshalb kann zur weiteren Erhöhung der Empfindlichkeit ein Kondensator C parallel zum Erdschlussrelais an die Klemmen des Kabelringwandlers gelegt werden. Dieser Kondensator kompensiert den Magnetisierungsstrom und vermindert dadurch den Übersetzungsfehler.

Wenn mehrere Generatoren auf Sammelschienen parallel arbeiten, wird nicht der Nullpunkt des Generators geerdet, sondern es wird an der Sammelschiene ein gemeinsamer Nullpunktstransformator

mit zugehörigem Widerstand vorgesehen, der dann auch die *Pohlsche* Zusatzspannung [7] zu liefern hat. Diese Schaltung ist wiederholt ausgeführt worden [7, 9] und hat sich gut bewährt. Sie hat sich als vollkommen falschstromfrei erwiesen. Fig. 12 zeigt den Kabelringwandler mit den 5 Verbindungskabeln, welcher den Gehäuseschlusschutz eines Generators von 15 200 kVA besorgt, der bei 6 kV mit anderen gleichartig geschützten Generatoren auf ein kombiniertes Kabel- und Freileitungsnetz arbeitet. Der kompensierte Erdschlussreststrom schwankt zwischen ca. 0,5 A (bei Gehäuseschlüssen am

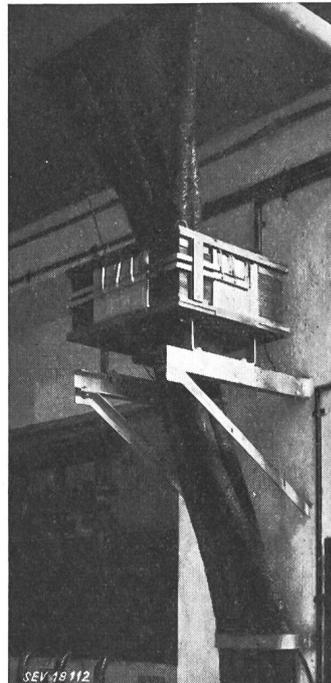


Fig. 8  
Kabelringwandler und Kabelführung für Gehäuseschlusschutz eines Drehstrom-Turbogenerators Leistung 15 200 kVA, Spannung 6 kV

Sternpunkt und ca. 10,5 A bei Klemmenerdschlüssen und exakter Kompensierung. Der Gehäuseschlusschutz ist vom Grad der Kompensierung unabhängig, weil die Relais eben eigentlich ampèremetrische Relais sind. Ihre Ausbildung als wattmetrische Relais ohne Richtungsempfindlichkeit bringt den grossen Vorteil, dass die Empfindlichkeit erhöht werden kann, weil der Kabelringwandler nur schwach belastet ist. Da der Übersetzungsfehler mit zunehmender Belastung stark anwächst, ist es sehr wesentlich, Relais zu verwenden, die nur geringe Impedanz im Stromkreis aufweisen. Gewöhnliche Stromrelais wären bei gleicher Impedanz wie die wattmetrischen Erdschlussrelais bedeutend weniger empfindlich; Stromrelais derselben Empfindlichkeit wieder würden eine so hohe Belastung für die Kabelringwandler darstellen, dass der gewonnene Vorteil infolge Reduktion des Wandler-Sekundärstromes wieder verloren wäre. Es ist besonders zu beachten, dass der Nennstrom des Generators im gezeigten Beispiel rund 1500 A beträgt und der Kabelringwandler trotzdem nur 0,5 A primären Unsymmetriestrom richtig erfasst. Aber auch die den Generatorenennennstrom um eine Grössenordnung übertreffenden Kurzschlussströme (Netz-kurzschlüsse) stören die hohe Empfindlichkeit des Schutzes nicht, weil die Kabelringwandler eben wirklich falschstromfrei gebaut bzw. angeordnet werden können.

Literatur

[1] *Gross, E. und W. Weller*: Über die zulässige Empfindlichkeit von Erdschlussrelais in Hochspannungsnetzen. Elektrotechn. u. Maschinenbau Bd. 50(1932), Nr. 8, S. 117...123.

- [2] *Willheim, R.*: Das Erdschlussproblem in Hochspannungsnetzen. Berlin, Springer 1936.  
*Villiers, M.*: Rapp. de la CIGRE 1937, Bd. 3, Diskussion Gruppe 32, [S.] D-22. Paris, 1937.
- [3] *Lippa, E.*: Der Erdschlußschutz in den Hochspannungs-Verteilnetzen der Wiener Städtischen Elektrizitätswerke. Elektrotechn. u. Maschinenbau Bd. 55(1937), Nr. 20, S. 233...238, 249...252.
- [4] *Gross, E.*: Über die erstmalige Bestimmung der günstigsten Einstellung von Erdschlußspulen. Bull. SEV Bd. 28(1937), Nr. 8, S. 165...170.
- [5] *Gross, E.*: Betriebskontrolle von Erdschlußrelais. Elektrotechn. u. Maschinenbau Bd. 46(1928), Nr. 53, S. 1213...1217. Berichtigung Bd. 47(1929), Nr. 18, S. 372.

- [6] *Pohl, R.*: Neuzeitliche Turbogeneratoren und Luftkühler. Elektrotechn. Z. Bd. 48(1927), Nr. 10, S. 320.
- [7] *Diesendorf, W.* und *E. Gross*: Zur Theorie der Pohl'schen Nullpunktverlagerung für vollständigen Gehäuseschlußschutz. Elektrotechn. u. Maschinenbau Bd. 54(1936), Nr. 22, S. 253...256.
- [8] *Bütow, W.*: Erdschlußschutz für Generatoren. Elektr.-Wirtsch. Bd. 29(1930), Nr. 510, S. 301...306.
- [9]. Oesterr. Pat. Nr. 138263.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. *Eric T. B. Gross*, Illinois Institute of Technology, Chicago 16, Illinois (USA).

## Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

### Streiflichter aus den USA

374.26 (73)

[Nach Electr. Engng. Bd. 70(1951), Nr. 4, S. 369...374.]

#### Cadmiumsulfid-Kristalle für die Durchleuchtung industrieller Produkte

Die General Electric X-Ray Corp. hat kürzlich eine Erfindung bekanntgegeben, die erstmalig die schnelle automatische Durchleuchtung tausender Industrieerzeugnisse ermöglichen soll. Zweck der Durchleuchtung ist grössere Sicherheit und Zuverlässigkeit, Verbesserung der Qualität und der Herstellungsverfahren.

Das Herz des neuen Apparates ist ein winziges Cadmiumsulfid-Kristall, dessen Grösse vom Bruchteil eines Millimeters bis zu mehreren Kubikmillimetern variieren kann. Wenn es durch Röntgenstrahlen erregt wird, wirkt es wie eine Verstärkerröhre und gibt Elektronen frei. Die Kristalle verstärken die zugeführte Energie 1 000 000fach; auf die Fläche bezogen sind sie 1 000 000mal empfindlicher als Ionisierungskammern, in welchen die Röntgenstrahlung gewöhnlich gemessen wird und 1000mal empfindlicher als photoelektrische Zellen.

Infolge der millionenfachen Verstärkung können die Kristalle die bisher benötigten viel komplexeren Systeme von Vakuum- und Verstärkerröhren ersetzen, während sie gleichzeitig die Verwendung von Strahlen niedrigerer Intensität erlauben. Die Wissenschaftler glauben, dass die Verwendung

vierten Nahrungsmitteln und Flüssigkeiten. Als eine Art industrielle Augen können die Kristalle manche Arten von Prüfaufgaben lösen, einschliesslich:

1. Abgrenzung und Überprüfung der Füllhöhe in Behältern.
2. Ausfinden von Hohlräumen, Spalten, Löchern, sowie Veränderungen der Dicke einer grossen Zahl von homogenen Stoffen.
3. Kontrolle des Fehlens, der falschen Placierung oder unrichtigen Einstellung innerer Teile.
4. Herausfinden fremder Partikel in gewissen Nahrungsmitteln, Metallen und anderen Erzeugnissen.

Der Apparat hat ein Relais, das auf den Fehler aufmerksam macht. Es kann so eingerichtet werden, dass es sozusagen alles automatisch zu vollbringen vermag: ein Zählwerk beeinflussen, ein Diagramm zeichnen, einen Ausschuss-Hebel betätigen, Klingeln, Aufleuchten, den defekten Teil mit roter Farbe markieren, oder gar das ganze laufende Band zum Stillstand bringen, bis der Fehler im Produkt oder in der Methode behoben ist. Diese Art der Anwendung lässt eine Herabsetzung der Kontrollkosten wie eine Verminderung des Personals für eine gegebene Kontrolle erwarten.

#### Ein elektrischer Industrie-Traktor

Die Automatic Transportation Co., Chicago, entwickelte einen Industrie-Traktor, der z. B. neben einem Bahngleise fahrend einen Zug von 1350 t Gewicht ziehen kann (Fig. 1). Der Traktor ist 3 m lang und 6 t schwer und hat eine Zugkraft am Haken von über 4500 kg (10 000 lbs).

Die Konstrukteure bezeichnen den Traktor als stark genug, um die Leistung von drei Farmtraktoren zu überbieten. Als Schlepper von Bahn-Rollmaterial zieht er mehr als 250mal sein eigenes Gewicht. Besondere Merkmale sind Vierradantrieb, Vierradlenkung und Zweifachsteuerung von gegenüberliegenden Sitzen aus. Dies erlaubt dem Fahrer, den Platz zu wechseln und in beiden Richtungen vorwärts zu fahren. Das ist bei einem Fahrzeug, das solch gewaltige Lasten schleppen kann, im Interesse der Sicherheit besonders wichtig.

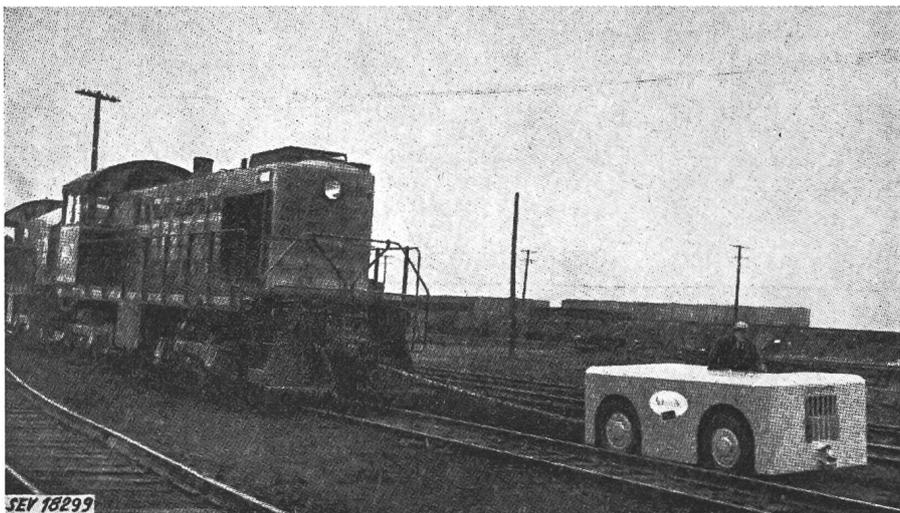


Fig. 1

Industrie-Traktor, einen Güterzug schleppend

von Kristallen als empfindliche Energie-Umformer und -Verstärker ein neues kristall-elektrisches Gebiet erschliessen wird.

Laboratoriums-Modelle sind gebaut worden für die Untersuchung von Gummiabsätzen, zur Prüfung der Füllhöhe von Kindernahrung, von Bier, von Suppe und von anderen Produkten in Büchsen und in Packungen. Die kristall-elektrische Methode verspricht bisher unerreichte Geschwindigkeiten: bis zu 600 Einheiten pro Minute im Fall von konser-

#### Neue Technik im Studium der Korrosion

Eine neue Versuchs-Methode ermöglicht die Wirkung korrodierender Lösungen zu messen. Damit hofft man in den USA die jährlichen Korrosionskosten, die auf 5,5 Milliarden Dollar geschätzt werden (37 Dollar pro Einwohner), fühlbar zu verringern.

Die Methode ist ähnlich dem Abtasten beim Fernsehen und kann für den Nachweis, das Studium, die Analyse und