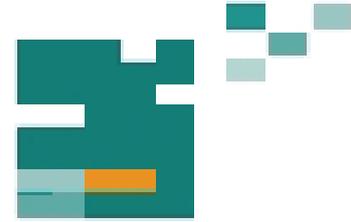


# 51. IWK

Internationales Wissenschaftliches Kolloquium  
International Scientific Colloquium



PROCEEDINGS

11-15 September 2006

## FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION SCIENCE



**INFORMATION TECHNOLOGY AND  
ELECTRICAL ENGINEERING -  
DEVICES AND SYSTEMS,  
MATERIALS AND TECHNOLOGIES  
FOR THE FUTURE**

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

## Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische  
Angelegenheiten  
Andrea Schneider
- Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Susanne Jakob  
Dipl.-Ing. Helge Drumm
- Redaktionsschluss: 07. Juli 2006
- Technische Realisierung (CD-Rom-Ausgabe):  
Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht  
Dipl.-Ing. Helge Drumm
- Technische Realisierung (Online-Ausgabe):  
Universitätsbibliothek Ilmenau  
[ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2006

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung ohne Einwilligung der Redaktion strafbar.

ISBN (Druckausgabe): 3-938843-15-2  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-938843-16-0

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

A. Novitskiy, H. Schau, U. Klemmer

## Anwendung der Korrelationsanalyse zur Feststellung der Ursache unerwünschter Wechselströme in Rohrleitungen

### Versorgungsqualität

#### Potentialausgleichsverbinding in TN-C-(S)-Netzen als Verursacher der Erdströme

Viele Niederspannungsnetze werden als TN-Netze aufgebaut. Die Neutralleiter sind mit den Transformator-Sternpunkten verbunden, die direkt geerdet sind. Oft liegt der Fall vor, dass ein kombinierter Neutral- und Schutzleiter (PEN) von der Transformatorstation zur Abnehmeranlage (z.B. Hausanschlusskasten) geführt und dort in Neutral- und Schutzleiter aufgetrennt wird (Bild 1). Eine solche Netzausführung wird als TN-C-S-Netz bezeichnet.

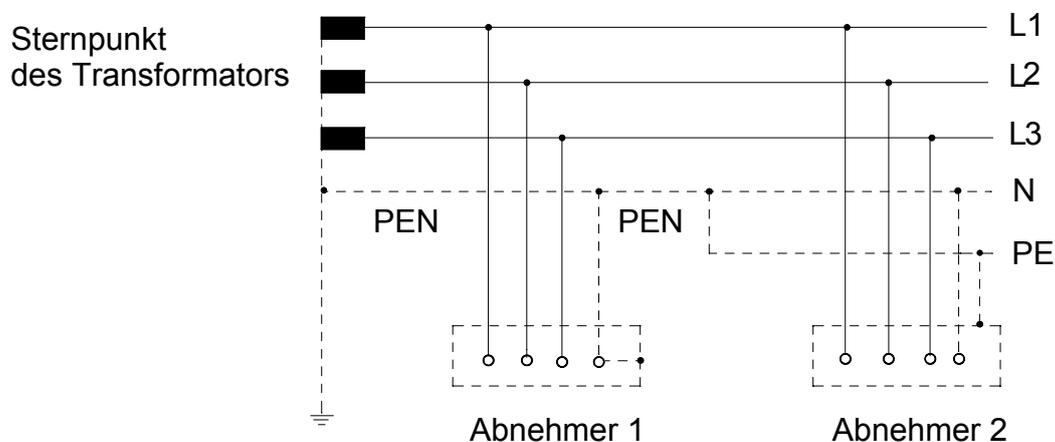


Bild 1: Netzaufbau für das TN-C-S-Netz

Als Schutzmaßnahme wird in TN-Netzen bei jedem Hausanschluss eine Verbindung zwischen dem PEN- bzw. PE-Leiter und der mit dem Fundamente verbundenen Potentialausgleichsschiene (PAS) gefordert (z.B. [1, 2]). Zur Potentialausgleichsschiene müssen sämtliche leitfähige Teile der Hausinstallationen wie Gas-, Wasser- und Abwasserleitungen, Heizungsröhre, Antennenanlage, etc. angeschlossen werden. Bild 2 illustriert das.

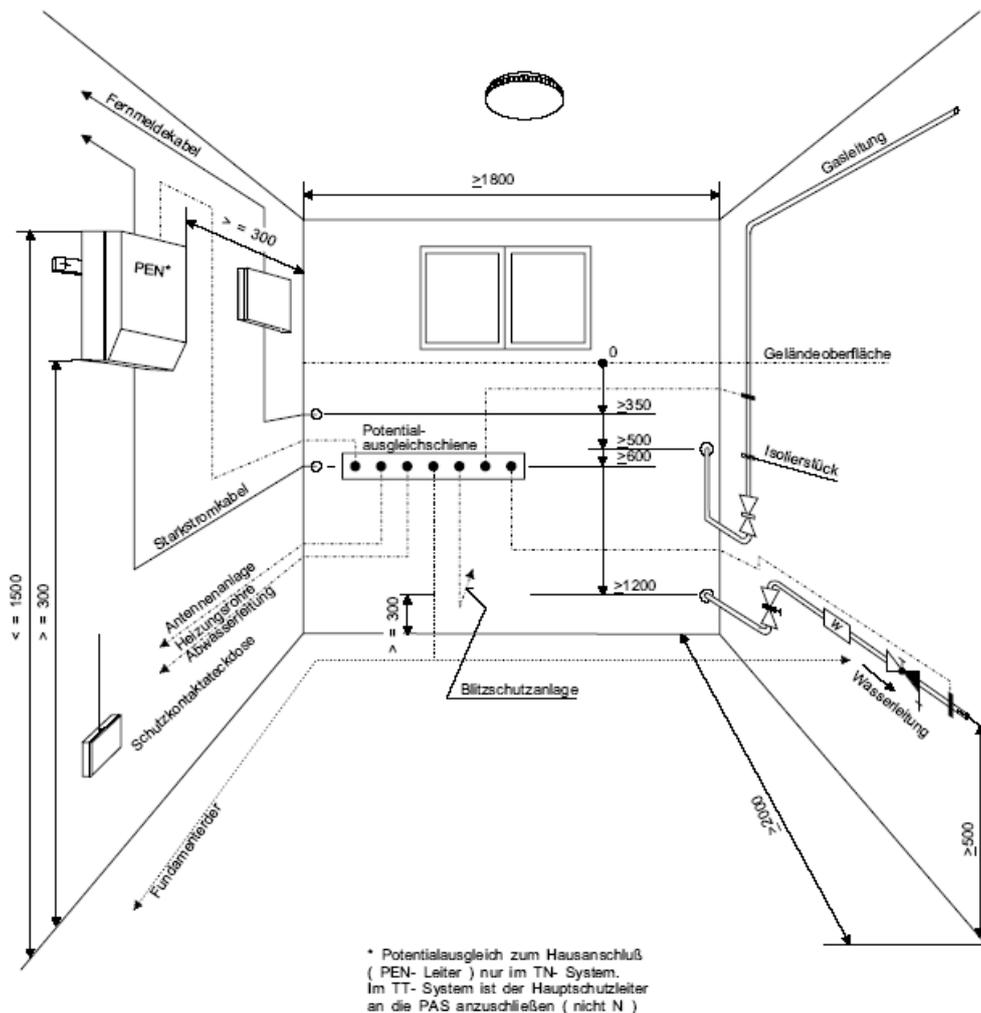


Bild 2: Hausanschlussraum (Quelle: [2])

Dadurch entstehen für die Ströme, die normalerweise nur durch die Neutralleiter zum Transformator-Sternpunkt fließen, alternative Wege über das Erdreich. Die Ströme, die sich über das Erdreich ausbreiten, können schwere Korrosionsschäden an metallischen Rohrleitungen (z.B. Gasleitungen) verursachen, die in der Erde verlegt sind [4]. Die Feststellung der Ursachen solcher Korrosionsschäden ist oft sehr kompliziert, insbesondere in dicht bebauten städtischen Gebieten, in den sich viele Hausanschlüsse in direkter Nähe zu Rohrleitungen befinden.

Es ist zu bemerken, dass die Ströme, die über die Potentialausgleichsschiene in das Erdreich dringen, oft über lange Zeit unbemerkt bleiben können, weil die konventionellen FI-Schutzschalter, die die Differenz zwischen den Phasen- und N-Leiter-Betriebsströmen ermitteln und bei Überschreitung des voreingestellten Grenzwertes (d.h. bei der Entstehung der alternativen Wege für die Neutralleiterströme durch einen

Isolationsfehler ) das zu schützende Gerät abschalten, laut Vorschriften erst nach der Aufteilung in PE- und N-Leiter (in Energieflussrichtung gesehen) installiert werden. Damit wird der Stromfluss durch die o.g. Verbindung zwischen dem PEN-Leiter und der Potentialausgleichsschiene mit der weiteren Ausbreitung der unerwünschten Wechselströme durch die an die PAS angeschlossenen leitfähigen Teile inklusive Fundamenterder nicht verhindert. Bild 3 verdeutlicht das.

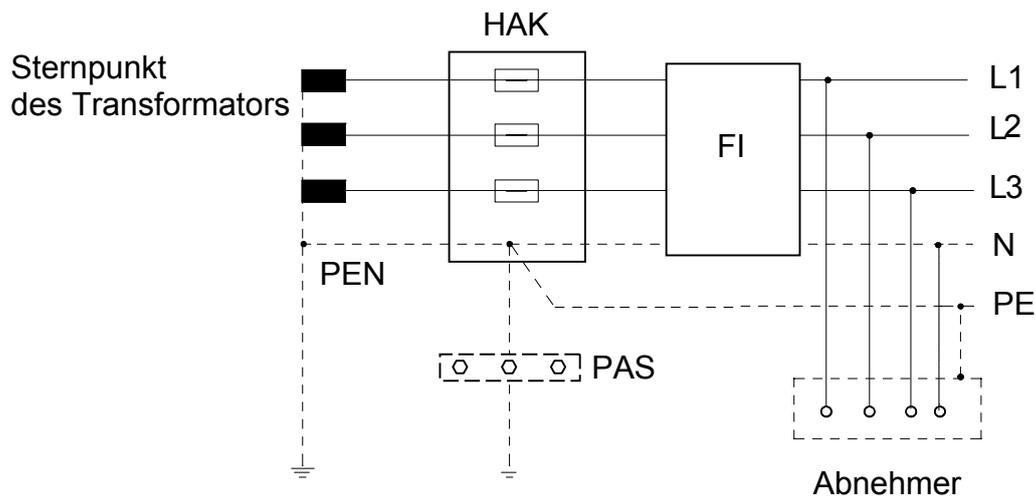


Bild 3: Anschluss eines FI-Schutzschalters im TN-C-S-Netz

Der Ausmass derartiger Stromausbreitung ist sehr groß. Beispielsweise sind nach Angaben des Zentrums für elektromagnetische Sicherheit in Moskau ([www.tesla.ru](http://www.tesla.ru)) bis zu 80% der Moskauer Gebäude durch solche alternativen Stromflüsse betroffen [3].

Bild 4 zeigt die Messergebnisse für Neutralleiterströme, die in der Transformatorstation (2x630 kVA-Transformatoren) eines Industrieunternehmens in Deutschland ermittelt wurden.

In Bild 4 a) sind die Neutralleiterstromeffektivwerte für die Grundschwingung dargestellt, die als Vektorsummen aus den gemessenen Außenleiterströmen ermittelt wurden. Bild 4 b) zeigt dagegen die direkt gemessenen Neutralleitergrundschwingungsstromeffektivwerte. Es ist ersichtlich, dass die tatsächlich durch den Neutralleiter fließenden Ströme nur etwa die Hälfte der Größe der zu erwartenden Neutralleiterstromeffektivwerte erreichen. Das bedeutet, dass etwa 50% der Neutralleiterströme als Erdströme von den Abnehmern über die alternativen Wege zum

Transformatorsternpunkt fließen.

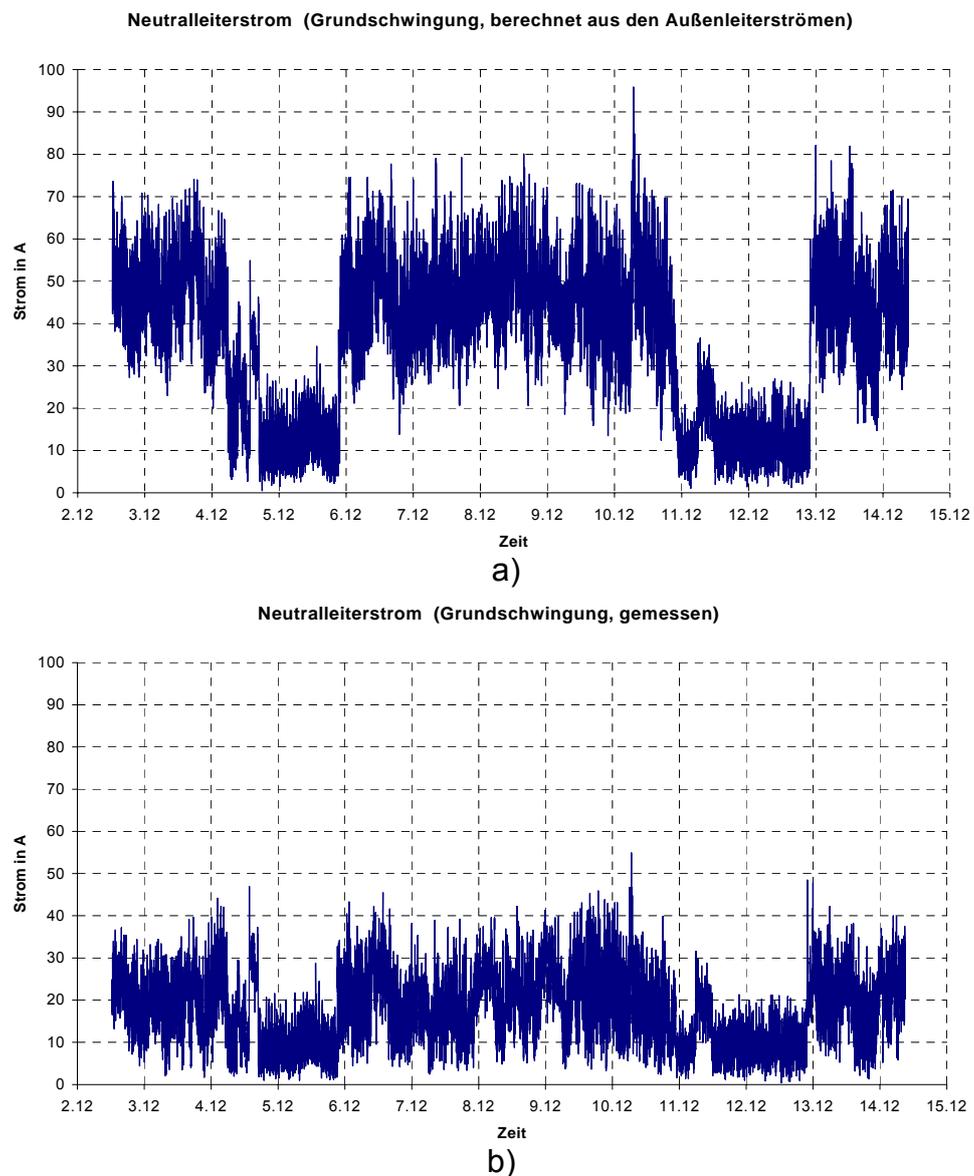


Bild 4: Neutralleiterströme. Messbeispiel

Weitere Messungen, die im Rahmen einer Analyse der Neutralleiterbelastung in Industrie-/Gewerbegebieten und Wohngebieten in einem regionalen VNB-Netz in Deutschland durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass die direkt in den Neutralleitern gemessenen Ströme bei den meisten untersuchten Abnehmern kleiner sind als die aus den Außenleiterströmen berechneten zu erwartenden Ströme. Diese Ergebnisse weisen auf ein grundsätzliches Problem in den TN-C- und TN-C-S-Netzen hin: Anteile der Neutralleiterströme können als Erdströme über Erdungsanlagen und Erdverbindungen fließen.

## Messtechnische Untersuchungen zur Feststellung der Ursache unerwünschter Wechselströme in Rohrleitungen

Wie schon angedeutet, fließen die Erdströme über das Erdreich zum Transformator-Sternpunkt und können Korrosionsschäden an in der Erde verlegten metallischen Rohrleitungen verursachen. Ein möglicher Lösungsweg für die Feststellung der Ursache unerwünschter Wechselströme in Rohrleitungen ist eine simultane messtechnische Erfassung der Ströme in den Rohrleitungen einerseits und der Differenzströme, die sich als Vektorsummen der Phasen- und Neutralleiterströme in den NS-Kabelabgängen ergeben.

Bild 5 zeigt die Anordnung der Messstellen (MP1...4) für ein Untersuchungsbeispiel, in dem nach der Ursache mehrerer Korrosionsschäden in einer in der Nähe der Transformatorstation verlegten 4-bar-Gasleitung gesucht wurde.

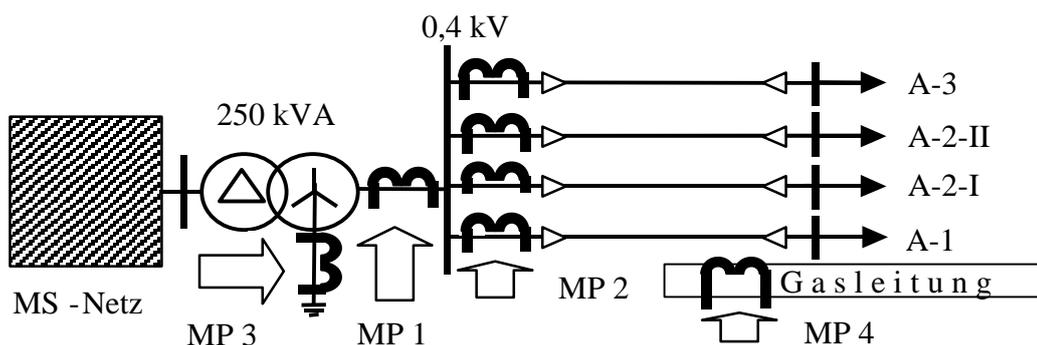


Bild 5: Niederspannungsstation mit vier Abgängen (Untersuchungsbeispiel)

Durch die Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die Schäden an der Gasleitung vermutlich durch Wechselstromkorrosion verursacht wurden. Aus den direkten Messungen des Rohrleitungsstromes ergab sich, dass die 50-Herz-Komponente in dem Rohrleitungsstrom dominiert. Bild 6 zeigt den Momentanwertzeitverlauf des Rohrleitungsstromes. Die Grundschiwingung ist in Bild 6 deutlich zu erkennen.

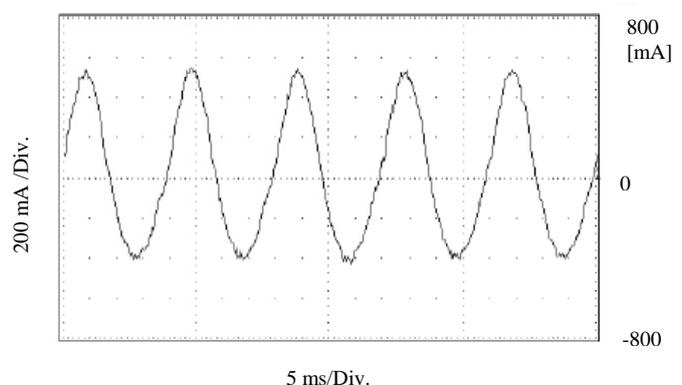


Bild 6: Momentanwertzeitverlauf des Rohrstromes (MP 4)

Für die messtechnischen Untersuchungen wurden die Messgeräte HAAG und Fluke eingesetzt. Als die Stromwandler wurden Rogowski-Spulen, die die Rohrleitung oder die Kabelleitungen umfassten, verwendet.

Zur Feststellung der Quellen des Rohrstromes wurden in der Transformatorstation kontinuierliche Messungen durchgeführt. Als erster Schritt wurde der Gesamtdifferenzstrom aus den Messungen der Phasenströme und des Neutralleiterstromes

$$I_{\text{Diff}} = I_{\text{N}} - (I_{\text{L1}} + I_{\text{L2}} + I_{\text{L3}})$$

in der 0,4-kV-Einspeisung ermittelt (MP 1). Bild 7 zeigt die Momentanwertzeitverläufe des o.g. Differenzstromes und des direkt gemessenen Erderstromes bzw. des Stromes durch die Verbindung des Sternpunktes des Transformators zur Erde  $I_{\text{Erder}}$  (MP 3).

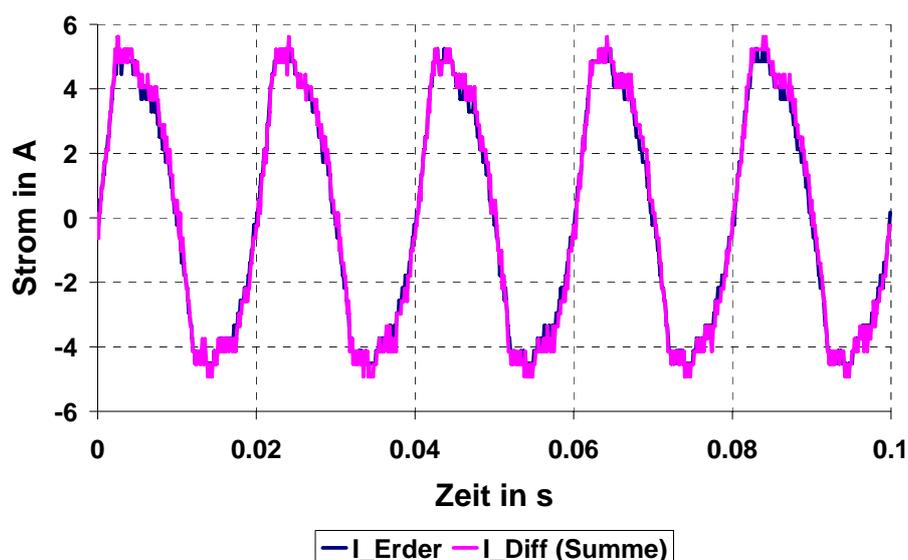


Bild 7: Momentanwertzeitverläufe des Gesamtdifferenzstromes (MP 1) und des Erderstromes

Es ist in Bild 7 deutlich zu sehen, dass der Anteil des Neutralleiterstromes tatsächlich durch die Erde fließt und dadurch die Erdungsanlage der Transformatorstation ständig durch diesen Strom durchflossen wird.

Durch die Analyse der ermittelten Zeitverläufe des Differenzstromes bzw. Erdstromes ( $I_{\text{Erde}} = I_{\text{Diff}}$ ) und des Rohrstromes  $I_{\text{Rohr}}$  wurde festgestellt, dass die periodischen

Änderungen der gemessenen Rohrstromwerte über die Tageszeit den Änderungen der ermittelten Erdstromwerte in den meisten Fällen direkt folgen. Bild 8 zeigt ein Wochendiagramm, Bild 9 - ein Tagesgang. Es kann schlussfolgert werden, dass der Erdstrom der 0,4-kV-Einspeisung der Transformatorstation der Verursacher des Rohrstromes in der Gasleitung über den betrachteten Messzeitraum ist.

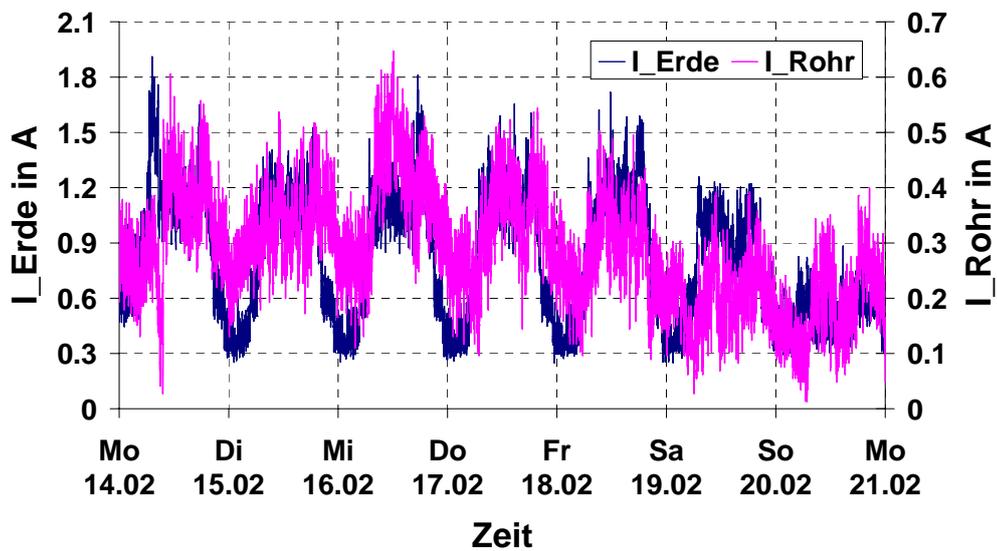


Bild 8: Wochengänge der 1-min-Effektivwerte des Differenzstromes (MP 1) und des Rohrstromes (MP 4)

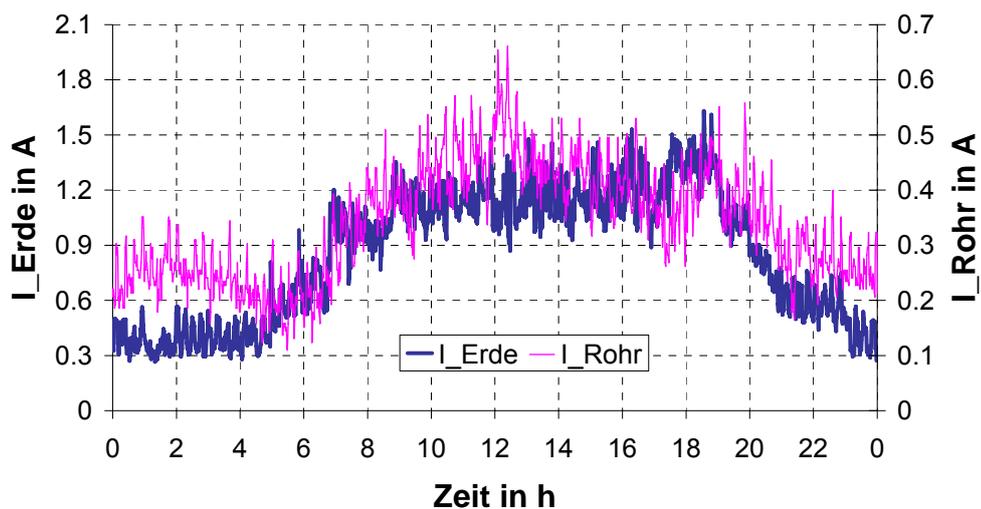


Bild 9: Tagesgänge der 1-min-Effektivwerte des Differenzstromes (MP 1) und des Rohrstromes (MP 4)

Diese Schlussfolgerung wurde durch die Ergebnisse der Korrelationsanalyse verifiziert. Die quantitative Einschätzung der bestehenden Zusammenhänge zwischen den Differenz- und Rohrströmen erfolgte auf der Grundlage der Bewertung der Größe der Korrelationsfaktoren  $r_{AB}$  zwischen beiden o.g. Wertereihen.

Es ist dabei zu beachten, dass die folgende Bewertung der Korrelationsfaktoren auf der Grundlage der angewendeten statistischen Theorie (Pearson-Verfahren) für eine korrekte Charakterisierung der ermittelten Zusammenhänge zwischen den Messreihen maßgebend ist:

$$\begin{aligned} 0,2 < r_{AB} \leq 0,5 & - \text{geringe Korrelation} \\ 0,5 < r_{AB} \leq 0,7 & - \text{mittlere Korrelation} \\ 0,7 < r_{AB} \leq 0,9 & - \text{hohe Korrelation} \\ 0,9 < r_{AB} \leq 1,0 & - \text{sehr hohe Korrelation} \end{aligned} \tag{1}$$

Weiterhin muss beachtet werden, dass nur die Korrelationsfaktoren statistisch signifikant bzw. nicht zufällig entstanden sind und berücksichtigt werden können, die die nach dem Pearson-Verfahren in Abhängigkeit von der Anzahl der Messwerte und den angenommenen Wahrscheinlichkeiten von 95% ( $\alpha = 0,05$ ) und 99% ( $\alpha = 0,01$ ) ermittelten Grenzwerte  $r_{PEARSON}$  für jedes Analyse-Intervall überschreiten.

Aus der Analyse der bestehenden Messreihen wurde festgestellt, dass die ermittelten Korrelationsfaktoren  $r_{AB}$  für die meisten Messtagen im Bereich einer hohen Korrelation von  $0,7 < r_{AB} \leq 0,9$  liegen. So ergab sich z. B. ein Korrelationsfaktor  $r_{AB} = 0,75$  für die Tagesgänge der Reihen der 1-min-Effektivwerte des Differenzstromes (MP 1) und des Rohrstromes (MP 4), die in Bild 9 dargestellt sind. Die Pearson'schen Grenzwerte  $r_{PEARSON}$  betragen dabei 0,052 ( $\alpha=0,05$ ) und 0,068 ( $\alpha=0,01$ ).

Um die Genauigkeit der Analyse zu erhöhen und den Einfluss von möglichen Fehler einer u. U. nicht sekundengenauen Synchronität der Messaufzeichnungen zu reduzieren, wurde eine weitere Korrelationsfaktor-Ermittlung auf der Basis der 30-Min-Effektivwert-Betrachtungen vorgenommen. Die berechneten Korrelationsfaktoren für die Tagesgänge der 30-Min-Mittelwerte nahmen erwartungsgemäß höhere Werte im Vergleich mit den für die 1-Min-Werte ermittelten Korrelationsfaktoren an. Für das im Bild 9 dargestellte Messbeispiel ergab sich ein Korrelationsfaktor von  $r_{AB} = 0,86$ . Der entsprechende Pearson'sche Grenzwert betrug dabei  $r_{PEARSON} = 0,37$  ( $\alpha=0,01$ ).

Es muss angemerkt werden, dass die Korrelationsanalyse grundsätzlich keine Kausalketten zwischen den zu vergleichenden Wertereihen bestätigen oder ausschliessen kann. Aus den Ergebnissen der Korrelationsanalyse kann allerdings schlussfolgert werden, ob die Änderungen eines zu vergleichenden Parameters (im betrachteten Fall der Rohrstrom) den Änderungen eines anderen Parameters (Differenzstrom) entsprechen.

Unter der Annahme, dass der Wechselstrom in der Rohrleitung durch die Erdströme entsteht und das Vorhandensein der Erdströme bzw. Differenzströme messtechnisch nachgewiesen wurde, kann auf der Basis der durchgeführten Korrelationsanalyse festgestellt werden, dass der Differenzstrom in der Einspeisung der Transformatorstation tatsächlich den Rohrleitungstrom verursacht.

Als nächster Schritt der Analyse der Ursache des unerwünschten Wechselstromes in Rohrleitung wurde eine kontinuierliche messtechnische Erfassung der Differenzströme in jedem einzelnen 0,4-kV-Kabelabgang vorgenommen (MP 2, Bild 5). Durch die weitere Analyse wurde festgestellt, dass der Differenzstrom des Abnehmers A-1 (Bild 5) die stärkste Korrelation mit dem Rohrstrom aufweist (Korrelationsfaktoren bis zu 0,89 für die einzelnen Tagesgänge). Das illustriert Bild 10.

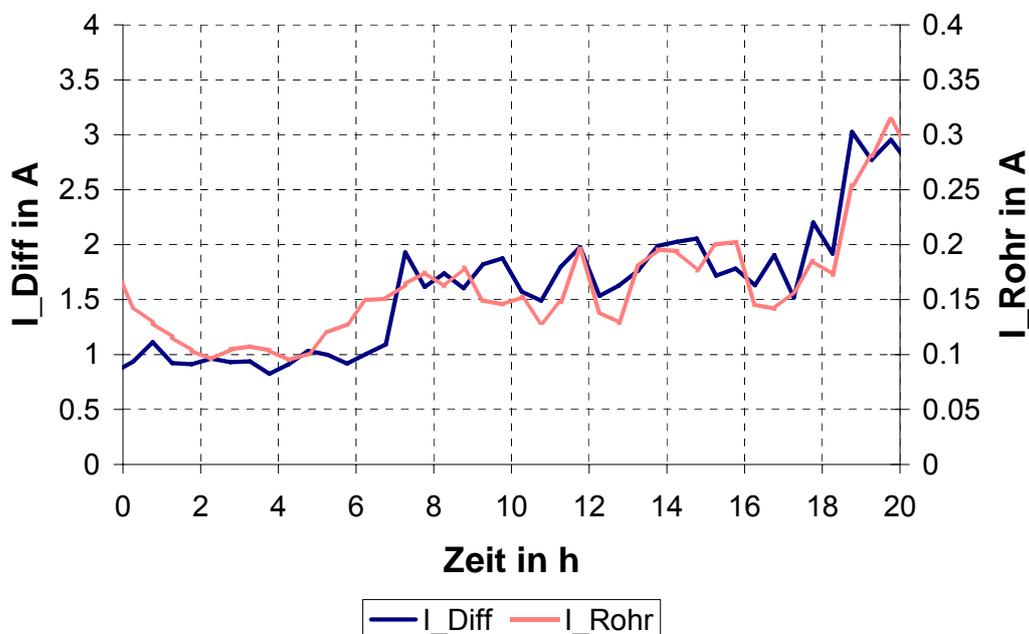


Bild 10: Tagesgänge der 30-min-Effektivwerte (0 bis 20:00 Uhr) des Differenzstromes des Abnehmers A-1 (MP 2) und des Rohrstromes (MP 4)

Es ist anzumerken, dass alle Differenzströme der 0,4-kV-Kabelabgänge als Erdströme zur Transformatorstation fließen und dadurch Beiträge zum Rohrstrom in der erdverlegten Gasleitung leisten können. Das wurde durch die Ergebnisse der Korrelationsanalyse nochmals bestätigt. Die Ermittlung der Einflüsse der einzelnen Differenzströme auf die Rohrstromwerte erfolgte auf der Grundlage der Berücksichtigung der Größe der entsprechenden Korrelationsfaktoren.

Weiterhin ist zu beachten, dass einzelne Abnehmer durch zeitlich veränderliche Betriebszustände und demzufolge durch die Veränderung der Größe der jeweiligen Differenzströme über die Tages- und Wochenzeit charakterisiert werden. Infolgedessen kann der Rohrleitungsstrom z. B. vormittags und nachts durch die Differenzströme von unterschiedlichen Abnehmern am stärksten beeinflusst werden. Das erschwert zusätzlich die Analyse des bestehenden Beeinflussungsmechanismus. Eine Berücksichtigung der typischen Betriebs- oder Lastzustände der untersuchten Abnehmer ist für eine korrekte Analyse unumgänglich.

## **Zusammenfassung**

In den Niederspannungsnetzen, die als TN-C- oder TN-C-S-Netze aufgebaut sind, besteht grundsätzlich das Problem, dass Anteile der Neutralleiterströme als Erdströme über Erdungsanlagen und Erdverbindungen fließen können. Dies kommt dadurch zustande, dass eine elektrische Verbindung zwischen dem PEN- oder PE-Leiter und der Potentialausgleichsschiene vorliegt, die als Schutzmaßnahme gefordert wird. Die Ströme, die sich über das Erdreich ausbreiten, können schwere Korrosionsschäden an metallischen Rohrleitungen (z.B. Gas- oder Wasserleitungen) verursachen, die in der Erde verlegt sind.

Die Anwendung der Korrelationsanalyse zur Feststellung der Ursache unerwünschter Wechselströme in Rohrleitungen auf der Grundlage messtechnischer Untersuchungen hat sich als ein praktisches Verfahren erwiesen.

Eine Reduzierung der Rohrströme und Korrosionseffekte lässt sich prinzipiell durch Ersatz der Rohrleitungen durch PE-Rohre oder Reduzierung der Differenzströme im Erdreich erreichen.

Aufgrund des o. g. Aufbaus der bestehenden TN-Netze lässt sich grundsätzlich eine Reduzierung unerwünschter Erdströme vor allem durch eine wesentliche Verringerung der Neutralleiterströme erreichen.

**Literatur:**

- [1] Erläuterungen zur TAB 2000 des VBEW. E.ON Bayern. 05.2002.
- [2] Erläuterungen der Rhein Energie AG zu den Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an das Niederspannungsnetz. Stand 04.05.
- [3] Монитор "заболел". (Bildschirm ist „krank geworden“ – auf Russisch) <http://fags.yaroslavl.ru/aifarhiv/c1.shtml?c29.txt>
- [4] Dr. K.-E. Nowak. Gutachten. Schadenuntersuchungen an der 4 bar-Ausgangsleitung der GDRA Talstraße im Bereich des Betriebsgeländes der Fa. Meteor. 2003.

**Autoren:**

Dr.-Ing. Alexander Novitskiy, PD Dr.-Ing. habil. Holger Schau  
TU Ilmenau  
P.O.B. 10 05 65  
98693, Ilmenau  
Tel. : +49 (3677) 691490/89  
Fax: +49 (3677) 691496  
E-mail: [Nov@E-Technik.TU-Ilmenau.de](mailto:Nov@E-Technik.TU-Ilmenau.de),  
[Holger.Schau@TU-Ilmenau.de](mailto:Holger.Schau@TU-Ilmenau.de)

Dipl.-Ing. Ulrich Klemmer  
Stadtwerke Suhl/Zella-Mehlis  
Fröhliche-Mann-Str. 2  
98528. Suhl  
+49 (3681) 495 1722  
+49 (3681) 495 1749  
[ulrich.klemmer@swsz.de](mailto:ulrich.klemmer@swsz.de)