

# **Erfahrungen mit zwei HIAS Meßsystemen bei der Stoßspannungsprüfung von Transformatoren**

Dr.-Ing. Rolf Maier  
Dipl.-Ing. Adolf Kachler  
Siemens AG, Transformatorenwerk Nürnberg

## **1. Zusammenfassung**

Es werden die zur Zeit kommerziell verfügbaren digitalen Meßwerterfassungssysteme und die entsprechenden Softwarewerkzeuge im Einsatz bei der Blitz- und Schaltstoßspannungsprüfung von Transformatoren beschrieben. Insbesondere wird die Transferfunktionsanalyse kritisch anhand konkreter Oszillogramme diskutiert.

Die Leistungsfähigkeit der Transferfunktion wird durch EMV Probleme und begrenzte Vertikalauflösung stark eingeschränkt. Die Veränderung der mathematischen Empfindlichkeit der Transferfunktion führt zu unterschiedlichen Ergebnissen, so daß die theoretischen Eigenschaften der Transferfunktion nur bedingt genutzt werden können.

## **2. Allgemein**

Die Stoßspannungsprüfung von Leistungstransformatoren ist eine wichtige Prüfung zur Beurteilung der Isolationsfestigkeit des Prüfobjektes gegen transiente Überspannungen. Bei Transformatoren, deren Spannungsreihe kleiner als 300 kV ist, wird diese Prüfung in der Regel als Typprüfung durchgeführt. Bei Transformatoren mit einer Spannungsreihe größer oder gleich 300 kV wird diese Prüfung nach den IEC/VDE Vorschriften als Stückprüfung durchgeführt, [1].

Je nach Typ des Transformators und der Vereinbarung zwischen Kunde und Hersteller, kann die Stoßspannungsprüfung aus folgenden Teilprüfungen bestehen:

- Blitzstoßspannungsprüfung mit voller und abgeschnittener Stoßspannung,
- Schaltstoßspannungsprüfung.

Der Nachweis einer bestandenen Prüfung erfolgt durch den visuellen Vergleich der mit unterschiedlichen Prüfspannungen aufgezeichneten Kurvenverläufe der angelegten Stoßspannung und einer weiteren charakteristischen Größe, dem Stoßstrom oder dem Sondenstrom.

Seit einiger Zeit sind rechnergesteuerte Transientenrecorder-Meßsysteme im Einsatz, die neben einer verbesserten Meßtechnik zusätzliche Softwarewerkzeuge bieten.

Die Softwarewerkzeuge im Zeitbereich erlauben eine Überlagerung und Differenzbildung zweier aufgezeichneter Kurvenverläufe. Ein weiteres Softwarewerkzeug, die Transferfunktion, arbeitet im Frequenzbereich und soll auf Grund seiner größeren Empfindlichkeit in der Lage sein, die Fehlererkennung zu erleichtern. Die Praxis zeigt aber, daß speziell die Transferfunktion zur Zeit nur bedingt einsatzfähig ist, [2].

### 3. Stoßspannungsprüfung an Transformatoren

#### 3.1 Prüfung im Zeitbereich

Die Stoßspannungsprüfung von Transformatoren findet üblicherweise in Echtzeit statt, wobei die zu registrierenden Spannungs- und Stromsignale mit einem Oszilloskop oder mit einem Transientenrecorder aufgezeichnet werden, Bild 1.

Die mit dem Oszilloskop aufgezeichneten Kurvenverläufe bei Referenz- und Prüfstoß werden optisch miteinander verglichen. Bei Verwendung eines Transientenrecorders zur Echtzeiterfassung der Meßsignale können die Kurvenverläufe ebenfalls optisch miteinander verglichen werden.

Die richtige Interpretation der Oszillogramme ist schwierig und erfordert eine große Erfahrung des Prüffeldingenieurs, da minimale Unterschiede im Kurvenverlauf unter Umständen einen Fehler im Transformator signalisieren, solange nicht feststeht, daß es sich um Prüfkreisprobleme handelt. Diese visuelle Interpretation ist subjektiv und kann zu langen Diskussionen führen.

Neben der reinen Echtzeitdarstellung bietet der Einsatz eines Transientenrecorders zusammen mit einem nachgeschalteten Rechner die Möglichkeit, aufgezeichnete Kurvenverläufe rechnerisch zu bearbeiten. Die Softwarewerkzeuge im Zeitbereich, Überlagerung und Differenzbildung zweier Meßsignale, erlauben eine bessere Fehlererkennung, [3-5].

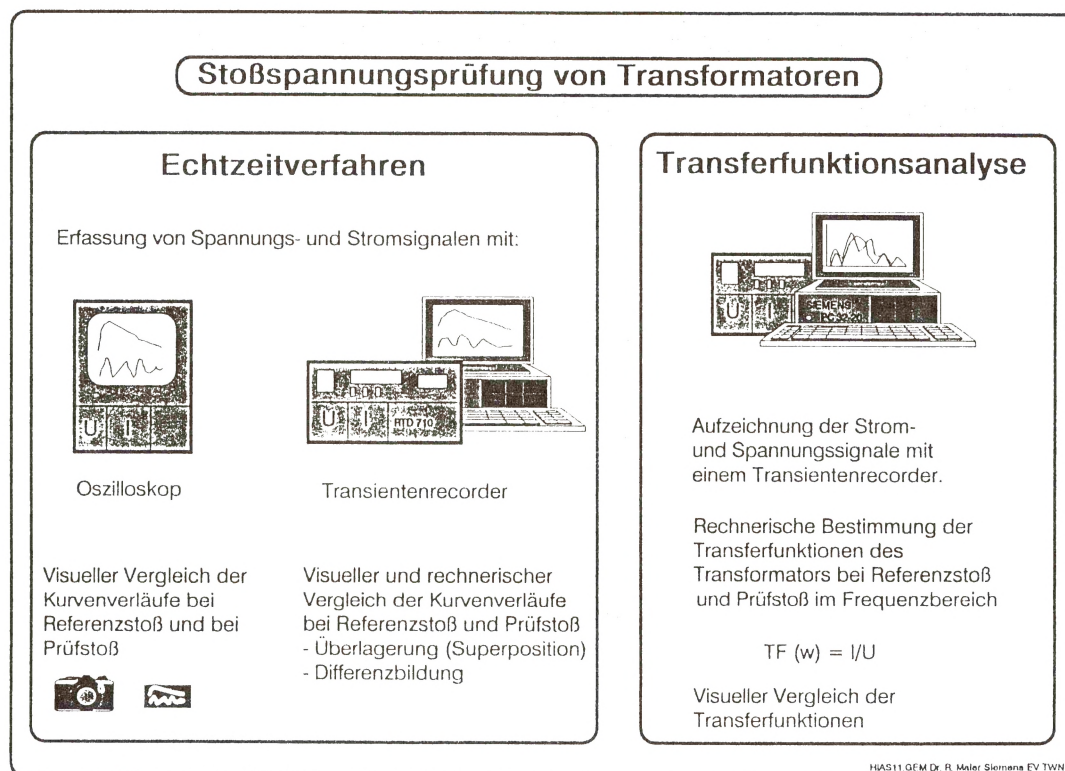


Bild 1: Zusammenfassung der gebräuchlichen Verfahren zur Stoßspannungsprüfung von Transformatoren

### 3.2 Transferfunktionsanalyse

Eine weitere Möglichkeit ist die Transferfunktionsanalyse bzw. das Transfer Function Concept. Bei diesem Verfahren wird die zu prüfende Transformatorwicklung wie ein Vierpol betrachtet, der durch seine Übertragungsfunktion beschrieben wird, [6].

Die im Zeitbereich aufgezeichneten Strom- und Spannungsverläufe  $i(t)$  und  $u(t)$  werden digital gefiltert und mit einem Interpolationsalgorithmus weiterverarbeitet. Dies entspricht in etwa einer analogen Filterung der Daten mit einem Tiefpaßfilter, dessen obere Bandbreitenbegrenzung bei 1 bis 3 MHz liegt. Dadurch wird ein ruhigerer Kurvenverlauf sowie die Reduzierung hochfrequenter Störsignale erreicht.

Vor der Transformation der Zeitbereichssignale in den Frequenzbereich mit einer FFT-Analyse müssen die transienten Zeitbereichssignale in periodische Zeitbereichssignale umgewandelt werden. Bei einem reinen Aneinanderreihen des einmaligen Zeitbereichssignales gäbe es bei jeder Periode einen Sprung, da das Signal zwar bei Null beginnt, jedoch nicht bei Null endet. Deshalb wird das Zeitbereichssignal entweder mit einer Cosinusfunktion multipliziert oder eine Rampenfunktion wird subtrahiert, [6,7]. Diese Signalteile lassen sich beliebig aneinanderreihen und können mit einer FFT-Analyse in den Frequenzbereich transformiert werden.

Zur Bildung der Transferfunktion wird im Frequenzbereich der Strom durch die Spannung dividiert. Diese Funktion ist nicht die Übertragungsfunktion des Transformators im Sinne der Vierpoltheorie, sondern wird als Transferfunktion bezeichnet und bis zu einer oberen Grenze von ca. 1 MHz berechnet.

Da nach der Vierpoltheorie die Übertragungsfunktion nur von der Impedanz bzw. Admittanz des Prüflings bestimmt wird, ist sie theoretisch unabhängig von der angelegten Kurvenform. Abweichungen in der Transferfunktion bei Referenz- und Prüfstoß lassen somit auf eine Veränderung der Impedanz des Prüflings und damit auf einen Fehler im Transformator schließen.

Die Vorteile der Transferfunktionsanalyse werden im Schrifttum folgendermaßen beschrieben, [8]:

<i>Die Transferfunktion erlaubt eine Fehleridentifizierung. Durchschlag: Verschiebung der Pole der Transferfunktion, Teilentladungen: Amplitudenveränderungen bzw. Polabflachungen der Transferfunktion.</i>
<i>Die Transferfunktion erlaubt eine Trennung zwischen Meßkreisfehlern und Prüfbjektfehlern.</i>
<i>Die Transferfunktion ist unabhängig von der angelegten Spannungsform, d. h. Stöße mit voller und abgeschnittener Stoßspannung können miteinander verglichen werden.</i>
<i>Die Transferfunktion erlaubt den Vergleich von abgeschnittenen Stößen mit unterschiedlicher Abschneidezeit.</i>

In den folgenden Abschnitten wird jedoch beschrieben, daß diese Aussagen nicht uneingeschränkt auf die zur Zeit verfügbare Software und Hardware übertragen werden können.



## **4. Beschreibung der Meßeinrichtung**

Die hier dargestellten Aufzeichnungen sind nur eine kleine repräsentative Auswahl aus einer mehrjährigen Erfahrung mit zwei digitalen Meßsystemen. Das zwei- bzw. vierkanalige Meßsystem besteht aus Eingangsteiler, Transientenrecorder, Rechner, Plotter, Drucker und Steuersoftware. Der Eingangsteiler und der Transientenrecorder werden direkt vom Rechner angesteuert, [9].

Die Meßsysteme verfügen über eine Analogbandbreite von 13 MHz (zweikanalig) bzw. 15 MHz (vierkanalig), dies entspricht nach dem Zeit-Bandbreiteprodukt einer Eigenanstiegszeit von 27 ns bzw. 23 ns. Von den Transientenrecordern wird jeweils 2 K-Byte Speichertiefe je Kanal ausgenutzt, dies entspricht 2048 Abtastpunkten. Die nominelle Vertikalauflösung beträgt jeweils 10 Bit, entsprechend 1024 Digitalisierungsstufen.

Über die Probleme der Elektromagnetischen Verträglichkeit EMV und der dynamischen Vertikalauflösung dieser Meßsysteme wurde bereits in einem früheren Aufsatz berichtet, [2].

## **5. Einsatz bei der Stoßspannungsprüfung**

Die Vorteile und die Grenzen dieser neuen Meßsysteme werden anhand einiger ausgewählter Darstellungen gezeigt. Eine vorschriftenkonforme Stoßspannungsprüfung an einem schadhaften 40 MVA Transformator sowie die Schadenserkenkung wurden in einem früheren Aufsatz ausführlich beschrieben, [2]. Dort wurden deutlich die Vorteile der Softwarewerkzeuge im Zeitbereich, Überlagerung (Superposition) und Differenzbildung, sowie die Probleme mit der Transferfunktion dargestellt.

Die nachfolgend dargestellten Oszillogramme sollen speziell den Themenkreis Transferfunktionsanalyse näher darstellen.

### **5.1 Darstellung im Zeitbereich**

Ein 25 MVA Transformator wurde zu Versuchszwecken mit steigender Spannung bis zum Schadenseintritt gestoßen. In Bild 2 sind folgende Oszillogramme von oben nach unten dargestellt:

- Blitzstoßspannung mit voller Stoßspannung ohne Fehler
- Blitzstoßspannung mit voller Stoßspannung mit Fehler
- Blitzstoßspannung mit abgeschnittener Stoßspannung ohne Fehler
- Blitzstoßspannung mit abgeschnittener Stoßspannung mit Fehler.

Vergleicht man bei den Stößen mit voller Blitzstoßspannung, Oszillogramm Nr. 37 und 57 in Bild 2, die Spannungen und die Ströme bzw. bei den Stößen mit abgeschnittener Blitzstoßspannung, Oszillogramm Nr. 12 und 54 in Bild 2, die Ströme, so ist der Fehler deutlich zu sehen.

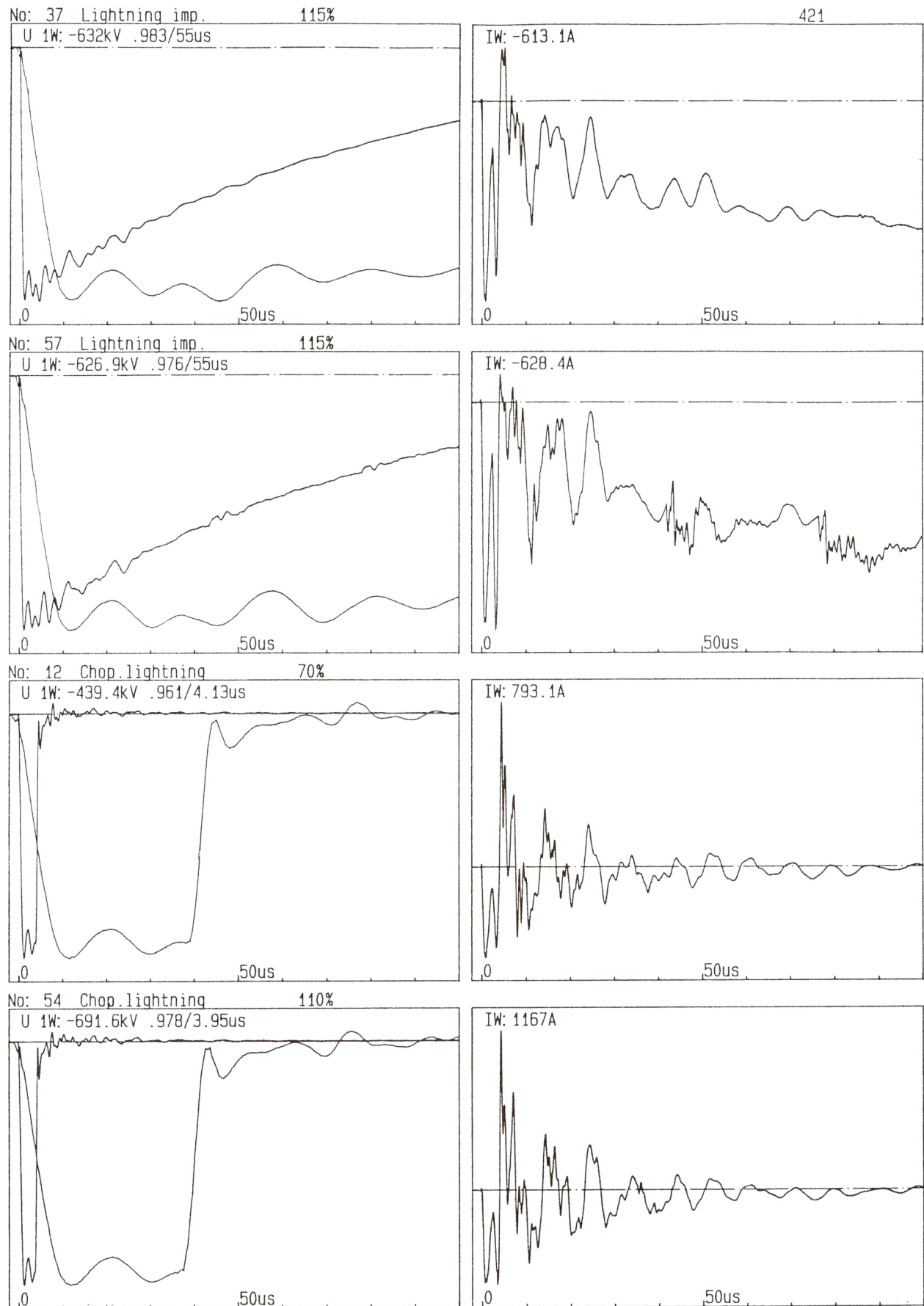


Bild 2: Darstellung der Oszillogramme im Zeitbereich

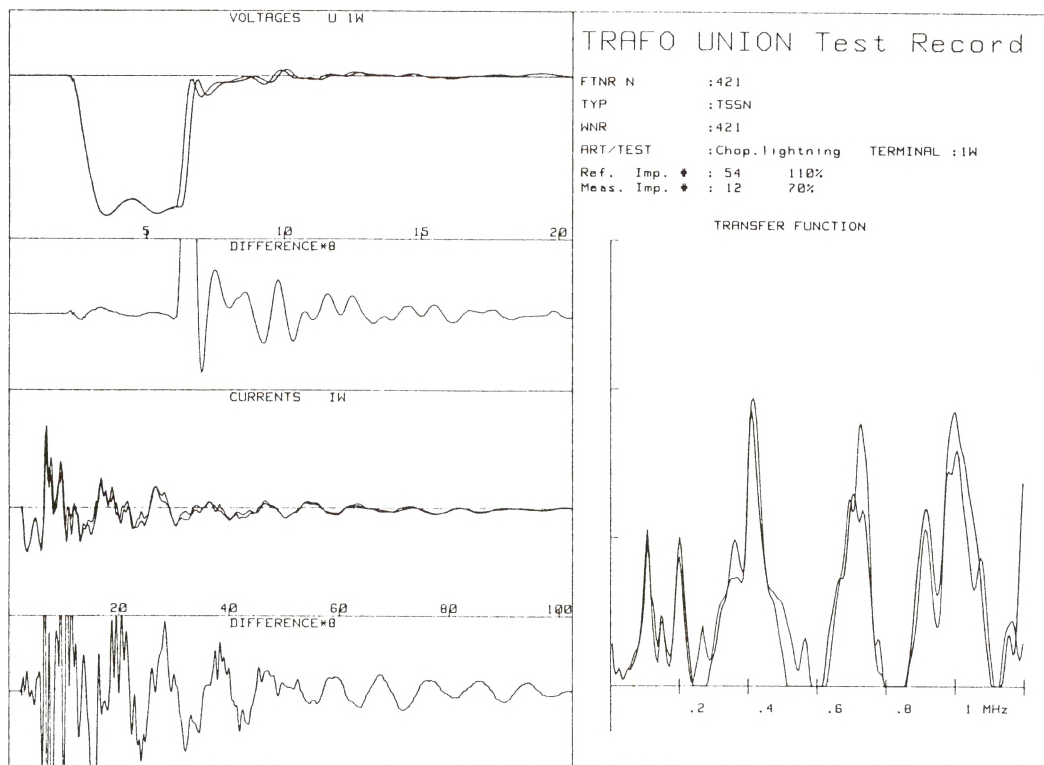


Bild 3: Einsatz der Softwarewerkzeuge beim Vergleich der Stöße Nr. 12 und 54

## 5.2 Einsatz der Softwarewerkzeuge im Zeitbereich

Durch den Einsatz der Softwarewerkzeuge im Zeitbereich, Überlagerung und Differenzbildung, wird die Beurteilung der Oszillogramme wesentlich erleichtert. Die Überlagerung zweier Stöße, die als Referenzstoß und als Prüfstoß (Ref. Imp. und Meas. Imp.) bezeichnet werden, die Berechnung der Differenz zwischen beiden und die Transferfunktionsanalyse geben weitere Informationen, Bild 3.

In Bild 3 sind auf der linken Seite von oben nach unten dargestellt:

- Überlagerung des normierten Kurvenverlaufs der Spannungen des Referenz- und Prüfstoßes,
- achtfach vergrößerte Differenz dieser Kurvenverläufe,
- Überlagerung des normierten Kurvenverlaufs der Ströme des Referenz- und Prüfstoßes,
- achtfach vergrößerte Differenz dieser Kurvenverläufe.

Die rechte Seite von Bild 3 zeigt die überlagerten Transferfunktionen von Referenz- und Prüfstoß.

Der Vergleich der beiden Oszillogramme zeigt eindeutige Abweichungen bei den überlagerten Spannungen und Strömen. Besonders die Unterschiede in den Strömen lassen auf einen Fehler im Prüfobjekt schließen. Die Transferfunktionen zeigen ebenfalls unterschiedliche Polstellen und Veränderungen der Amplituden, so daß auch von hier auf einen Fehler geschlossen werden kann.

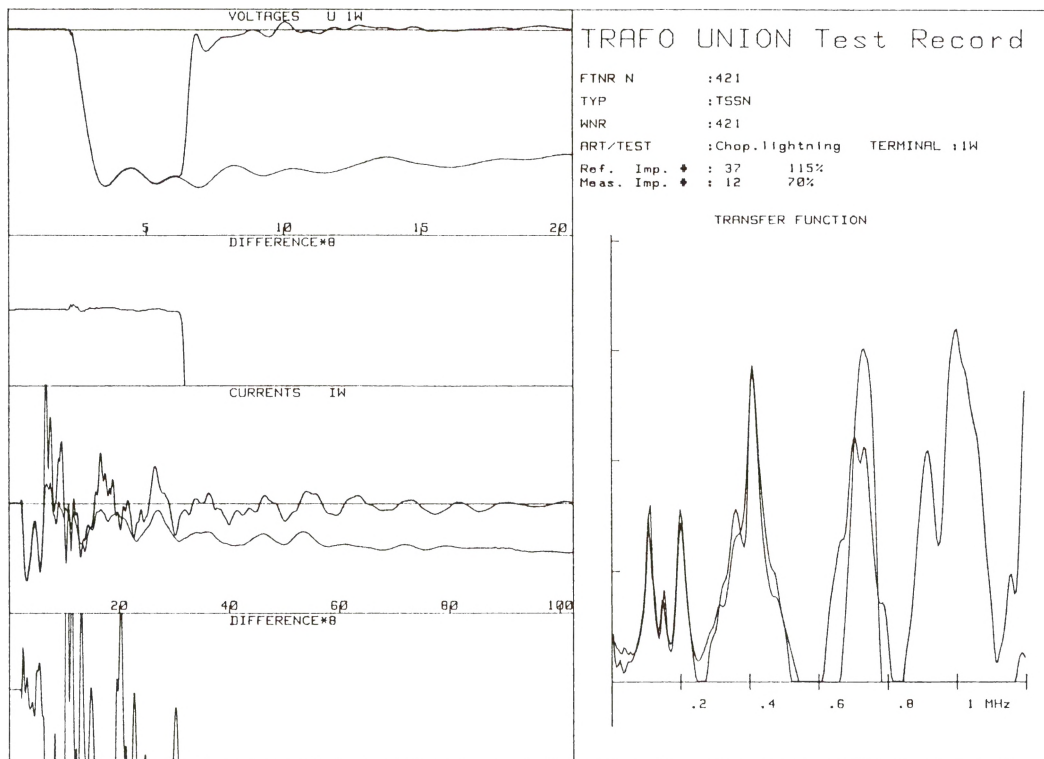


Bild 4: Vergleich einer Blitzstoßspannung mit voller Stoßspannung ohne Fehler (Nr. 37) mit einer abgeschnittenen Stoßspannung ebenfalls ohne Fehler (Nr.12)

### 5.3 Transferfunktionsanalyse

Nach der Theorie erlaubt die Transferfunktionsanalyse auch den Vergleich zwischen Stößen mit voller Stoßspannung und Stößen mit abgeschnittener Stoßspannung, da die Transferfunktion von der angelegten Spannungsform unabhängig ist, s. Kap. 3.2.

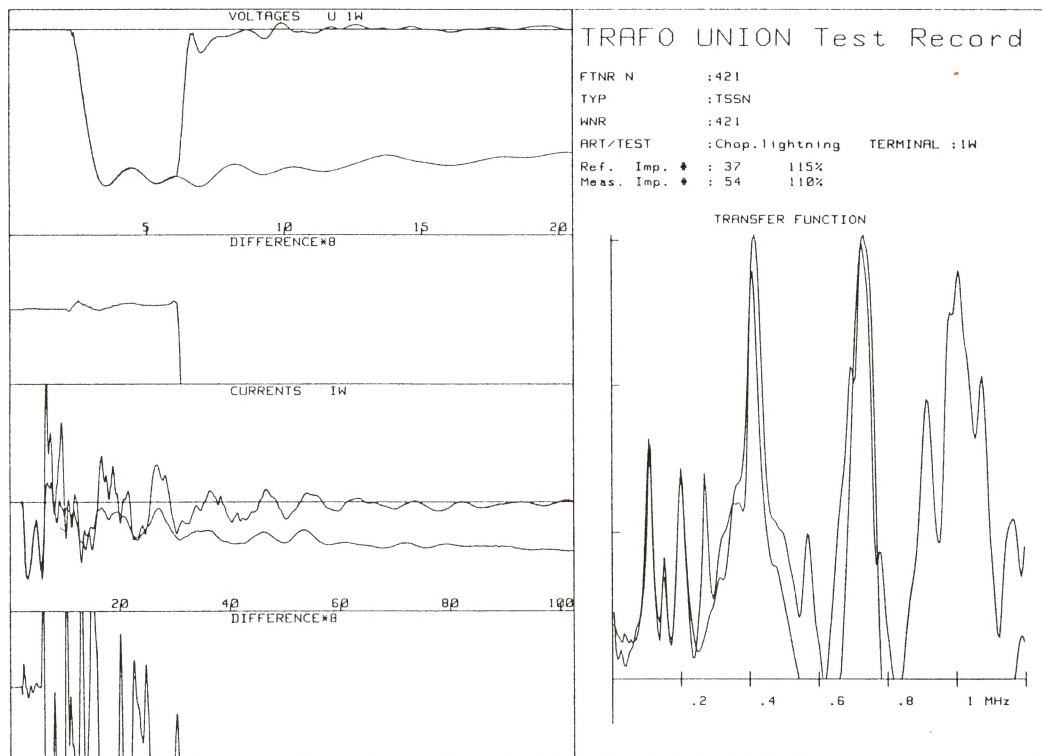
Bild 4 zeigt den Vergleich einer Blitzstoßspannung mit voller Stoßspannung ohne Fehler (Nr. 37) mit einer abgeschnittenen Stoßspannung ebenfalls ohne Fehler (Nr. 12). Auf den Echtzeitdarstellungen der Überlagerung und der Differenzbildung ist bis zum Abschneidezeitpunkt eine Übereinstimmung festzustellen. Nach dem Abschneiden läßt sich keine Aussage mehr treffen. Die Transferfunktionen zeigen bereits ab 250 kHz Veränderungen, neue Polstellen bei 400 kHz und 700 kHz. Die hochfrequenten Anteile ab 800 kHz werden durch das Abschneiden verursacht.

Bild 5 zeigt den Vergleich zwischen einer Blitzstoßspannung mit voller Stoßspannung ohne Fehler (Nr. 37) und einer abgeschnittenen Stoßspannung mit Fehler (Nr. 54). Auf den Echtzeitaufzeichnungen in Bild 2 und 3 zeigt das Oszillogramm Nr. 54 bereits eindeutige Fehleranzeigen. Bei der Überlagerung und Differenzbildung ist bis zur Abschneidezeit nach ca 6  $\mu$ s eine Übereinstimmung festzustellen. Nach der Abschneidezeit sind keine weiteren Aussagen möglich.

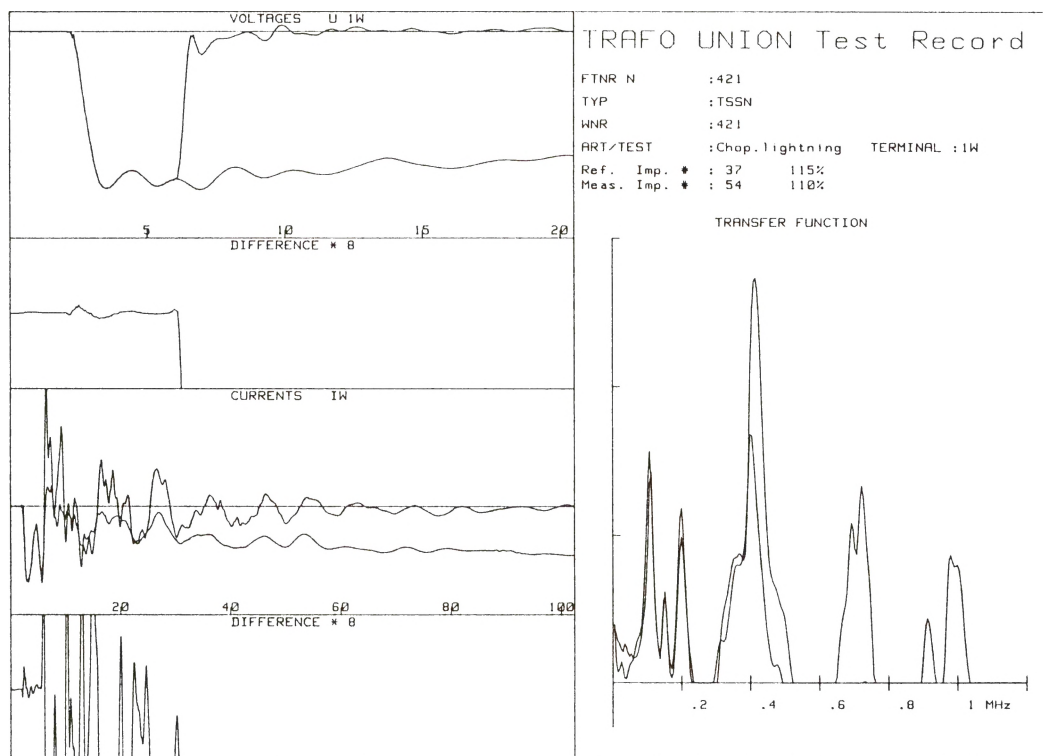
Die Transferfunktionen zeigen besonders im Vergleich zu Bild 4 bei 300 kHz und ca. 550 kHz neue Polstellen und deuten somit auf einen Fehler hin.

Vergleicht man die Bilder 4 und 5, so ist weder aus den Echtzeitaufzeichnungen noch aus den Transferfunktionen eine eindeutige Aussage darüber zu treffen, ob hier ein Fehler aufgetreten ist oder nicht.





**Bild 5: Vergleich einer Blitzstoßspannung mit voller Stoßspannung ohne Fehler (Nr. 37) mit einer abgeschnittenen Stoßspannung mit Fehler (Nr. 54)**



**Bild 6: Vergleich einer Blitzstoßspannung mit voller Stoßspannung ohne Fehler (Nr. 37) mit einer abgeschnittenen Stoßspannung mit Fehler (Nr. 54) und veränderter Empfindlichkeit der Transferfunktion**



## 5.4 Veränderung der "Empfindlichkeit" der Transferfunktion

Vergleicht man die Bilder 5 und 6, so erkennt man speziell bei den Transferfunktionen eine deutliche Veränderung. Die Transferfunktionen in Bild 6 zeigen nur noch die erwarteten Abweichungen, die sich durch die höheren Frequenzanteile der abgeschnittenen Stoßspannung ergeben. Die in Bild 5 vorhandenen zusätzlichen Polstellen ab 300 kHz sind verschwunden, obwohl es sich um den Vergleich der selben Oszillogramme handelt. Der Transformator könnte nach der Theorie der Transferfunktion als gut deklariert werden.

Tatsächlich handelt es sich um den defekten Transformator und um den Vergleich der selben Stöße wie in Bild 5. Lediglich die "*Empfindlichkeit*" der Transferfunktionsanalyse wurde mathematisch durch Variation des sog. "Thresholdlevels" verändert!

Solche Aufzeichnungen sind kein Einzelfall, sondern wurden auch an anderen Objekten beobachtet.

Durch die variable Einstellung der Empfindlichkeit lassen sich die Ergebnisse der Transferfunktionsanalyse in einem gewissen Rahmen beeinflussen.

Dies muß aus Sicht der Qualitätssicherung sowohl von uns als Hersteller als auch vom Betreiber abgelehnt werden, weil dadurch u.U. gefährliche Fehlerquellen unerkannt bleiben können.

Diese Erkenntnis führt zusammen mit bereits früher veröffentlichten Ergebnissen nach wie vor zu der Schlußfolgerung, daß die Transferfunktionsanalyse nur bedingt einsetzbar ist. Fehler, die mit der Transferfunktion erkannt werden, werden auch in den Zeitbereichssignalen erkannt, [2]. Somit wird in erster Linie die objektivierte Analysetechnik der Überlagerung und der Differenzbildung als echter Fortschritt gegenüber dem subjektiven Oszillogrammvergleich im Zeitbereich benutzt.

## 6. Neuere Entwicklungen und Ausblicke

Die hier aufgezeigten Probleme mit der Transferfunktion lassen somit den vorbehaltlosen Einsatz nicht zu. Die Ursachen sind vielschichtig und Gegenstand zahlreicher Untersuchungen.

Neuere Arbeiten, die sich mit der mathematischen Simulation der Stoßspannungsprüfung von Transformatoren beschäftigen, zeigen, daß ein idealer 8-Bit Analog Digital Wandler (A-D-Wandler) für den Vergleich von Blitzstoßspannungen mit voller und abgeschnittener Stoßspannung nicht ausreichend ist, [10]. Die bislang verfügbaren 10-Bit A-D-Wandler besitzen aber bei den hier benötigten Abtastraten auf Grund der dynamischen Eigenschaften nur noch eine effektive Bitzahl von 8-8,5 Bit.

Ein weiteres Problem ist die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Die hier eingesetzten kommerziellen Datenerfassungsgeräte wurden nach den Spezifikationen des Herstellers an Stelle eines Stoßoszilloskopes in einem leicht geschirmten Kontrollraum aufgestellt. Wie bereits früher beschrieben, beträgt die Störeinkopplung ohne angeschlossene Meßkabel ca. 10 LSB (Least Significant Bit), entsprechend 1%, [2]. Diese Störeinkopplung wurde sowohl in den Prüffeldern der Verfasser als auch beim Hersteller gemessen.

Zu diesen 1% addieren sich noch die Störspannungen, die auf den Meßleitungen eingekoppelt werden.

Diese elektromagnetischen Beeinflussungen machen sich bei der Echtzeiterfassung nicht störend bemerkbar, scheinen jedoch eine Ursache für das in Kapitel 4 geschilderte Problem mit der Transferfunktionsanalyse zu sein, [11].

Abhilfe für diese Probleme lassen sich somit nur durch folgende Maßnahmen erreichen:

- Verbesserung der elektromagnetischen Schirmung der Meßkabel und Meßeinrichtung,
- Verwendung von Transientenrecordern mit einer höheren Abtastrate, und
- Verwendung von Transientenrecordern mit 12 Bit Auflösung bzw. einer effektiven Bitzahl von mindestens 10 Bit bei einigen MHz.

Die Nachteile dieser Maßnahmen sind der erhöhte technische Aufwand für die Schirmung sowie der erhöhte Speicherbedarf bei der Aufzeichnung. Zur Reduzierung des Speicherbedarfs untersuchen neuere Arbeiten bereits Verfahren zur Datenkompression, [12].

## **7. Schlußbetrachtung**

Der Beitrag zeigt klar die Grenzen rechnergesteuerter Diagnoseverfahren bei der Stoßspannungsprüfung von Leistungstransformatoren. Bei den zur Zeit verfügbaren Meßsystemen bieten die Softwarewerkzeuge im Zeitbereich, Überlagerung und Differenzbildung, eine wesentliche Verbesserung der Darstellung der aufgezeichneten Signale. Sie erleichtern die Beurteilung der Kurvenverläufe.

Alle Fehler, die bislang mit der Transferfunktion beobachtet wurden, wurden auch in den Zeitbereichssignalen eindeutig festgestellt.

Die Transferfunktionsanalyse ist nach wie vor nur bedingt einsatzfähig. Der Einfluß der Empfindlichkeit der Transferfunktion auf das Ergebnis ist ein Mißstand der beseitigt werden muß, da hier das Ergebnis in gewissen Grenzen beeinflußt werden kann, und somit gefährliche Fehlerquellen unerkannt bleiben können.

## **8. Literatur**

- [1] VDE 0532, Teil 3, Juli 1978
- [2] Maier, R.; Kachler, A.  
Neues Verfahren zur Beurteilung der Stoßspannungsprüfung von Transformatoren  
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 89 (1990), Heft 18, S. 984-990
- [3] Maier, R.; Schwab, A.  
Einsatz digitaler Datenerfassungssysteme zur Stoßspannungsprüfung von Transformatoren  
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 82 (1983), S. 832 - 836
- [4] Malewski, R.; Poulin, B.  
Digital monitoring techniques for HV impulse tests  
IEEE Trans. PAS, Vol. PAS 104, No. 11, 1985
- [5] Kachler, A.; Klein, H.; Szaloky, G.; Gockenbach, E.; Häusler, H-P.  
High-voltage impulse tests on power transformers using a digital monitoring system  
5th ISH 1987 Braunschweig, Paper No. 72.05
- [6] Malewski, R.; Poulin, B.  
Impulse testing of power transformers using the Transfer Function method  
IEEE Trans. on power delivery, Vol. 3, No. 2 p 476 - 489

- [7] Koreman, C.G.A.  
Improvements in transformer testing through the use of  
the transfer function  
5th ISH 1987 Braunschweig, Paper No. 62.05
- [8] Malewski, R.; Gockenbach, E.  
Neue Möglichkeiten der Beurteilung von Stoßspannungsprü-  
fungen an Transformatoren durch Verwendung eines digitalen  
Meßsystems  
etz Archiv Bd. 11, Heft 6, S. 179 - 185
- [9] Haefely Basel  
HIAS, Hochauflösendes Impuls Auswerte System  
Druckschrift Typ 740
- [10] Leibfried, T.; Feser, K.  
Some aspects using the transfer function concept in  
high-voltage impulse testing of transformers  
Int.Symp. on digital techn. in HV-measurements 1991 Toronto
- [11] Claudi, A.; Fellmann, K.-H.; Gockenbach, E.; Maier, R.;  
Malewski, R.  
Five years of monitoring of the impulse test of power  
transformers with digital recorders and the transfer  
function  
CIGRE Paper No. 38 1992, in Vorbereitung
- [12] Vaessen, P.; van Aatrijk, D.  
Data compression, spline interpolation and digitizer  
performance  
7th ISH 1991 Dresden, Paper No. 62.06