

Neues Verfahren zur Beurteilung der Stoßspannungsprüfung von Transformatoren

Rolf Maier
Adolf Kachler

1. Allgemein

Bei der elektrischen Prüfung von Leistungstransformatoren muß oftmals auch der praktische Nachweis der Spannungsfestigkeit gegen transiente Überspannungen erbracht werden. Dieser Nachweis erfolgt durch eine vorschriftengerechte Blitzstoß- oder Schaltstoßspannungsprüfung, wobei nach Amplitude und Kurvenform standardisierte Spannungsimpulse an den Prüfling angelegt werden, /1/.

Die Beurteilung über eine bestandene Prüfung erfolgt durch den visuellen Vergleich der mit unterschiedlichen Prüfspannungen aufgezeichneten Oszillogramme der angelegten Spannung und einer weiteren charakteristischen Größe, dem Sondenstrom oder dem Stoßstrom.

Die richtige Interpretation der Oszillogramme ist schwierig und erfordert eine große Erfahrung des Prüffeldingenieurs, da minimale Unterschiede im Kurvenverlauf auf einen Fehler im Transformator schließen lassen. Diese visuelle Interpretation ist subjektiv und kann zu langen Diskussionen führen.

Digitale Meßwerterfassungsanlagen, deren Tauglichkeit zur Stoßspannungsprüfung bereits 1983 untersucht wurde, ermöglichen neben der Echtzeiterfassung der Meßsignale neue diagnostische Verfahren zur Beurteilung der Oszillogramme; die Überlagerung zweier amplitudenmäßig normierter Oszillogramme und deren Differenzbildung sowie die Transferfunktionsanalyse, /2/-/7/.

2. Stand der Technik

2.1 Echtzeitverfahren

Die Stoßspannungsprüfung von Transformatoren erfolgt üblicherweise in Echtzeit, 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.

Stoßspannungsprüfung von Transformatoren

Echtzeitverfahren

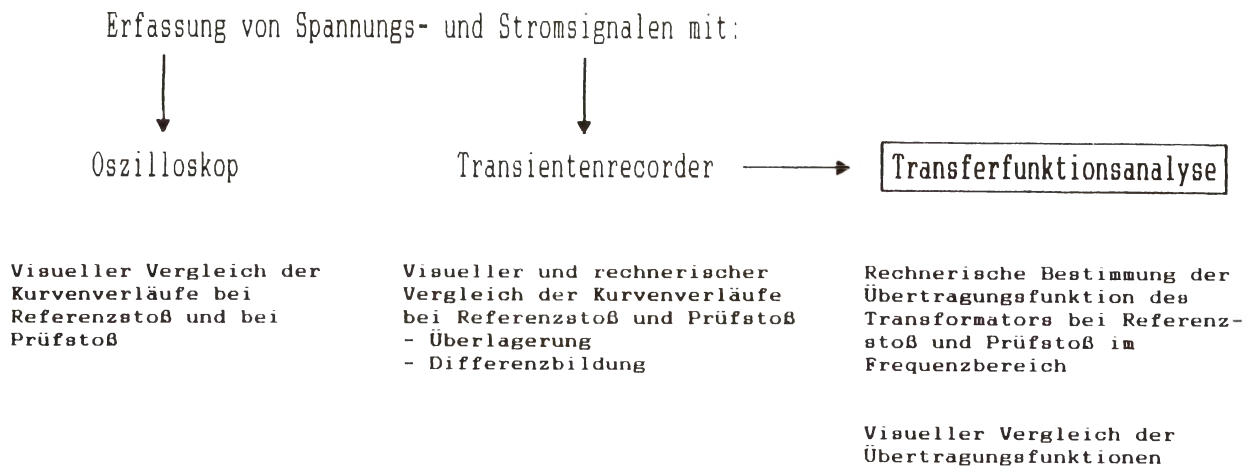


Bild 1: Stoßspannungsprüfung von Transformatoren

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, siehe Kapitel 3.

2.2 Transferfunktionsanalyse

Eine weitere Möglichkeit ist die Transferfunktionsanalyse bzw. das Transfer Function Concept, /3/,/6/. Bei diesem Verfahren wird die zu prüfende Transformatorwicklung wie ein Vierpol betrachtet, der durch seine Übertragungsfunktion beschrieben wird. Die angelegte Spannung und der aufgezeichnete Strom werden mit einer Fouriertransformation (FFT) vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert. Die Division des Stromes mit der Spannung im Frequenzbereich ergibt die Übertragungsfunktion, bzw. die Transfer Funktion. Die Übertragungsfunktionen bei Referenz- und Prüfstoß werden dann visuell miteinander verglichen.

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 Übertragungsfunktion 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 in der Literatur folgendermaßen beschrieben, /6/,/7/:

Die Übertragungsfunktion ist unabhängig von der angelegten Spannungsform, d.h. Stöße mit voller und abgeschnittener Stoßspannung können miteinander verglichen werden.

Die Übertragungsfunktion erlaubt den Vergleich von abgeschnittenen Stößen mit unterschiedlicher Abschneidezeit.

Die Übertragungsfunktion erlaubt eine Fehleridentifizierung.

Durchschlag: Verschiebung der Pole der Übertragungsfunktion

Teilentladungen: Amplitudenveränderungen der Übertragungsfunktion.

Die Übertragungsfunktion erlaubt eine Trennung zwischen Meßkreisfehlern und Prüfobjektfehlern

Wie jedoch in den nächsten Kapiteln gezeigt wird, können diese Aussagen nicht uneingeschränkt auf die zur Zeit verfügbare Software und Hardware übertragen werden, /8/.

3. Stoßspannungsprüfung an einem schadhaften Transformator

Die im folgenden dargestellten Messungen wurden mit dem zweikanaligen Transientenrecorder Meßsystem HIAS und der dazugehörigen Software der Fa. HAEFELY durchgeführt, /8/, Bild 2.

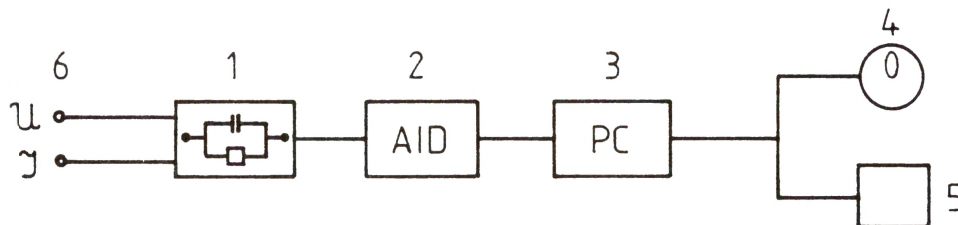


Bild 2: Blockschaltbild des Meßsystems

1. Programmierbarer Eingangsteiler (2-kanalig)
2. Transientenrecorder (A-D- Wandler)
3. Tischrechner mit Bildschirm
4. Diskette zur Datenspeicherung
5. Plotter und Drucker zur Protokollausgabe
6. Eingangssignal von Spannungsteiler und Shunt

Es handelt sich hierbei um ein komplettes Meßsystem, bestehend aus Transientenrecorder, Rechner, Plotter, Drucker und Steuersoftware. Das Meßsystem ist seit Januar 1989 im Prüffeld des Siemens Transformatorenwerkes Nürnberg im Einsatz.

3.1 Schadenserkennung

Bei der Abnahmeprüfung eines dreiphasigen 40 MVA Transformators trat beim Stoß der Oberspannungswicklung ein Fehler auf.

Auf den geplotteten Oszillogrammen zeigt der erste Prüfstoß mit vollem Pegel, No.3, kleinste Abweichungen im Spannungs- und Stromsignal gegenüber dem reduzierten Stoß, No.1, Bild 3.

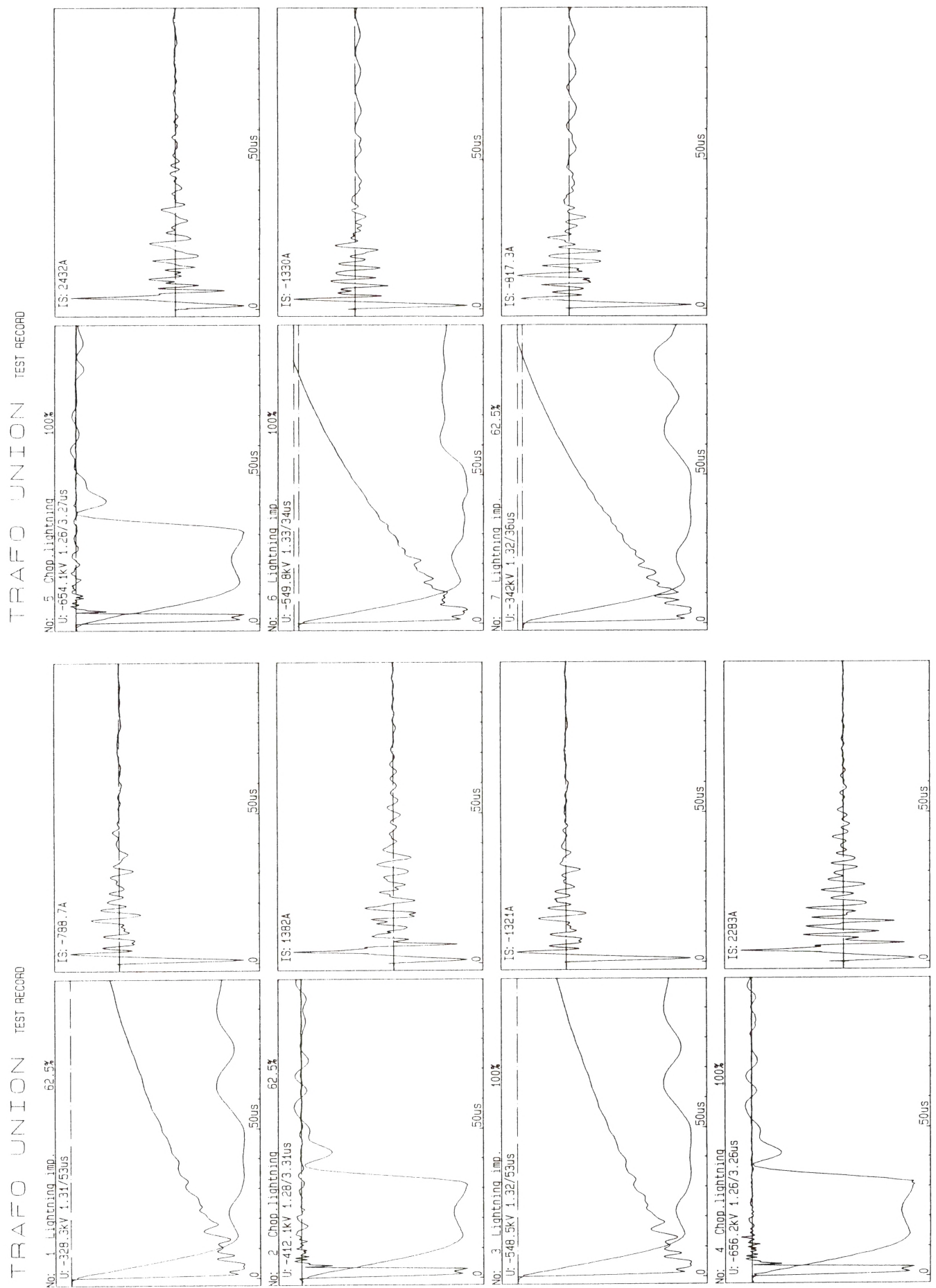


Bild 3: Stoßspannungsprüfung an einem 40 MVA Transformator

Der Fehler machte sich erstmals bei der Prüfung mit abgeschnittener Stoßspannung deutlich bemerkbar, Oszillogramm No.2 u. 4 und No.2 u. 5, Bild 3. Die Stöße mit abgeschnittener Stoßspannung zeigen nach dem Abschneiden Unterschiede im Spannungs- und Stromsignal.

Der nachfolgende Stoß mit voller Stoßspannung, No.6, zeigt den Fehler durch einen kürzeren Rücken. Bei diesem Stoß war auch ein dumpfer Schlag hörbar. Die folgenden Stöße mit reduziertem Pegel zeigen den gleichen Kurvenverlauf.

Der Fehler war ein Überschlag innerhalb eines mehrlagigen Wicklungsaufbaus. Die Fehlerursache war eine leitfähige Verunreinigung in der Lagenisolation.

3.2 Verwendung der Softwarewerkzeuge

Durch den Einsatz der Softwarewerkzeuge des Meßsystems wird die Fehlererkennung erleichtert. Die Überlagerung von Referenzstoß und Prüfstoß, die Berechnung der Differenz zwischen beiden und die Transferfunktionsanalyse geben weitere Informationen.

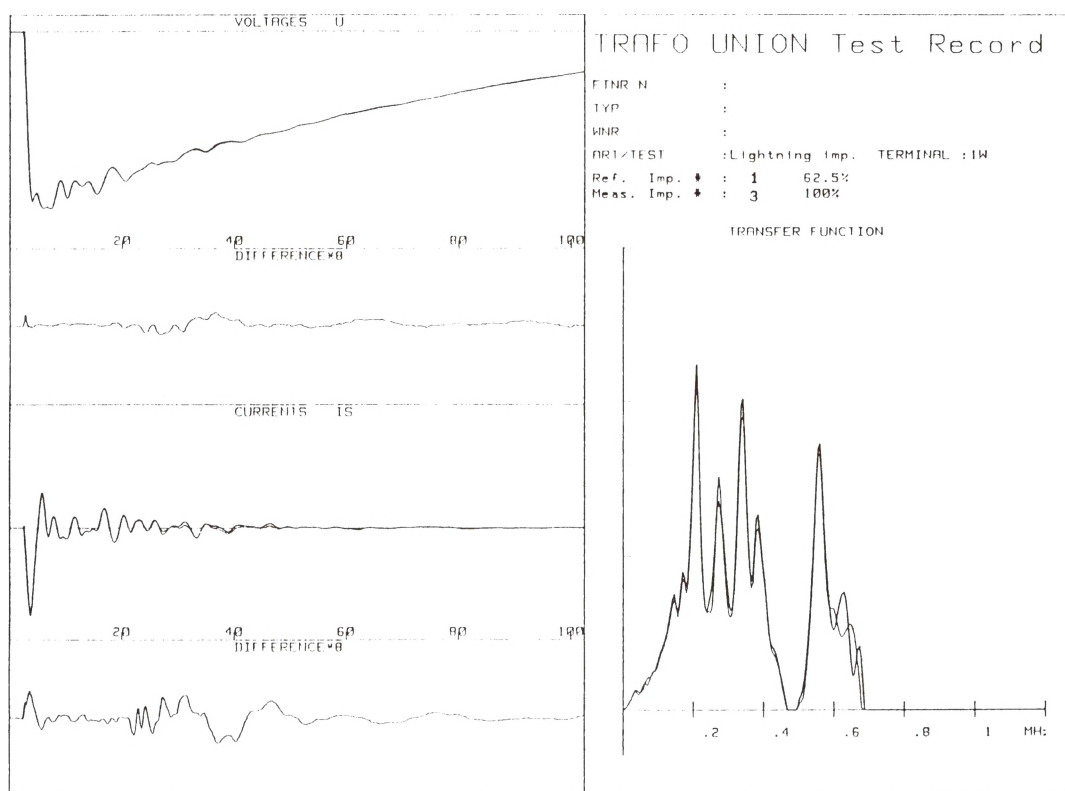


Bild 4: Vergleich des Referenzstoßes und des ersten Prüfstoßes

Der Vergleich des Referenzstoßes (62,5%) mit dem ersten Prüfstoß (100%) zeigt Abweichungen im Spannungs- und Stromsignal, Bild 4. Diese Bilder entsprechen den Oszillogrammen No.1 und 3 in Bild 3. Die achtfach vergrößerte Differenz des normierten Kurvenverlaufes beider Stöße zeigt dies deutlicher. Die Transfer Funktion zeigt bei einem Pol Unterschiede. Der Fehler im Transformator zeigt sich bereits hier durch kleinste Abweichungen.

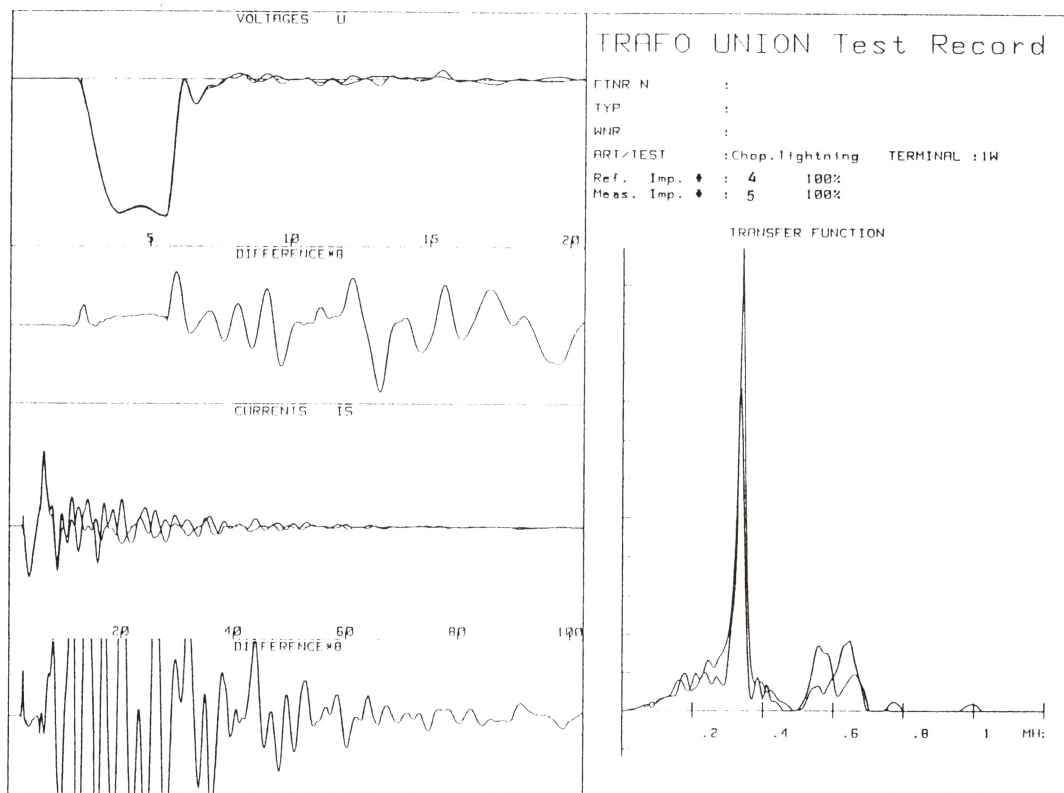


Bild 5: Vergleich der Prüfstöße mit abgeschnittener Stoßspannung

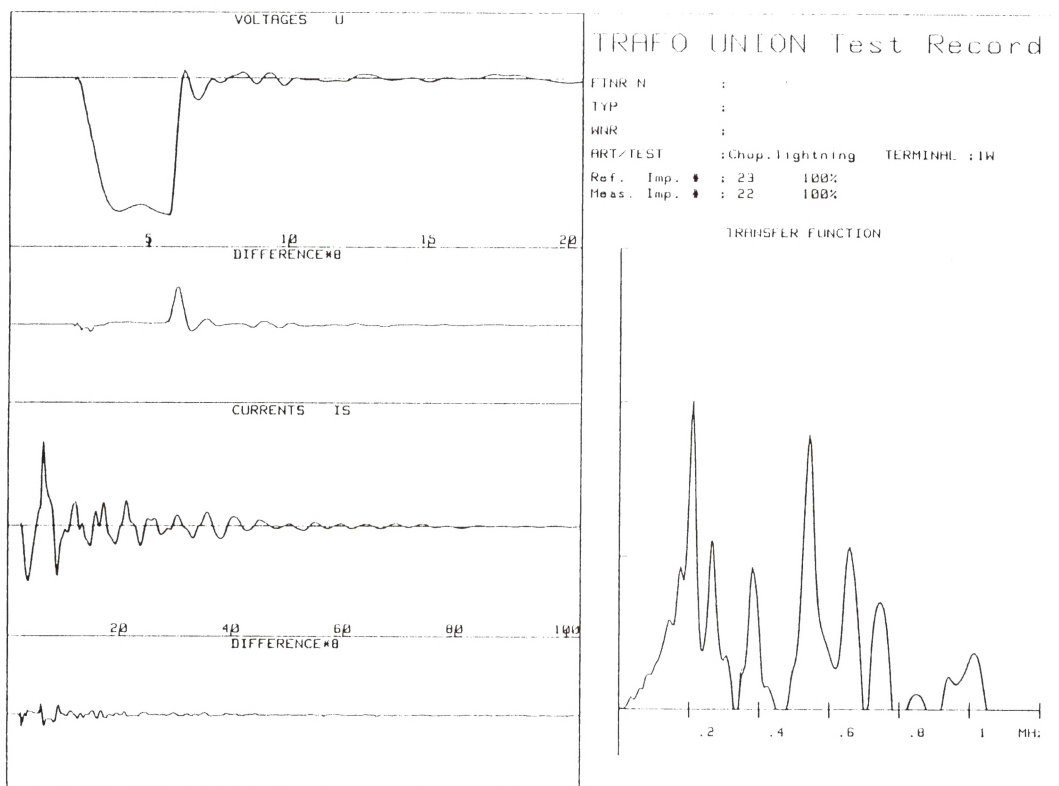


Bild 6: Vergleich der Prüfstöße mit abgeschnittener Stoßspannung nach der Reparatur

Die beiden Prüfstöße mit abgeschnittener Stoßspannung mit gleicher Abschneidezeit lassen sowohl bei der Überlagerung als auch bei der Differenz und der Transfer Funktion den Fehler deutlich erkennen, Bild 5.

Die Stoßprüfung des gleichen Transformators nach der Reparatur zeigt beim Vergleich der beiden Prüfstöße mit abgeschnittener Stoßspannung keine Abweichungen, Bild 6.

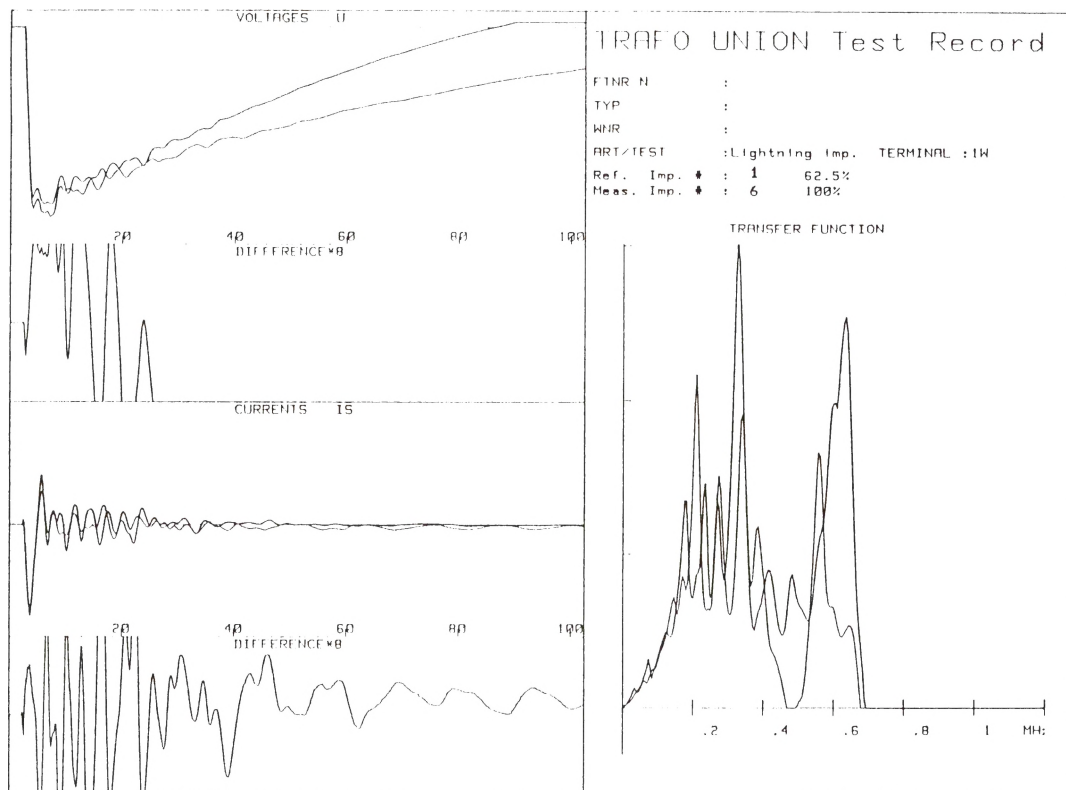


Bild 7: Vergleich des Referenzstoßes mit dem zweiten Prüfstoß

Der Vergleich des Referenzstoßes mit dem zweiten Prüfstoß am defekten Transformator (entspricht Oszillogramm No.1 und 6 in Bild2) zeigt den Fehler ebenfalls deutlich, Bild 7.

Bei den hier durchgeführten Vergleichen von Stößen mit voller Stoßspannung untereinander und von Stößen mit abgeschnittener Stoßspannung mit identischen Abschneidezeiten, leisten die Softwarewerkzeuge im Zeitbereich und die Transferfunktionsanalyse gute Dienste bei der Fehlererkennung.

4. Grenzen der Transferfunktionsanalyse

4.1 Theoretische Betrachtung

Als größter Vorteil der Transferfunktionsanalyse wird in der Literatur die Unabhängigkeit von der angelegten Spannungsform angegeben, /6/,/7/. Diese Aussagen stimmen in der Vierpoltheorie.

Ein Leistungstransformator und der dazugehörige Meßkreis zur Stoßspannungsprüfung können jedoch nicht mehr durch ein konzentriertes

Ersatzschaltbild beschrieben werden. Es handelt sich vielmehr um ein komplexes Netzwerk das mit einem Kettenleiterersatzschaltbild beschrieben werden muß, /10/. Dieses Ersatzschaltbild muß auch nichtlineare Elemente beinhalten, die z.B. den Einfluß von Stoßkorona im Prüfkreis berücksichtigen.

Somit ist es schwierig Ergebnisse der Vierpoltheorie auf komplexe Netzwerke der Hochspannungstechnik zu übertragen.

Zu diesen theoretischen Problemen kommen noch Schwierigkeiten mit der Hardware hinzu. Das HIAS-System ist empfindlich gegen elektromagnetische Beeinflussungen, die sich zwar bei der Echtzeiterfassung von Meßsignalen als nicht störend bemerkbar machen, die sich jedoch bei der Transformation in den Frequenzbereich verstärken können. Desweiteren zeigt der Eingangsteiler des Meßsystems einen Frequenzgang, der nicht dem eines konventionellen Oszilloskopes entspricht, d.h. der keinen Gaußschen Abfall hat und gewisse Frequenzbereiche weniger stark dämpft.

Die Kumulation der hier aufgeführten Probleme führt zu den im folgenden Abschnitt aufgezeigten Abweichungen zwischen Theorie und Praxis.

4.2 Praktische Untersuchungen

Um die Funktionsfähigkeit der Transferfunktionsanalyse beurteilen zu können, wurden an einer Vielzahl von Leistungstransformatoren systematische Untersuchungen durchgeführt. In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Untersuchung über die Spannungsabhängigkeit der Transferfunktion wiedergegeben, die auch die derzeitigen Grenzen des neuen Verfahrens widerspiegeln.

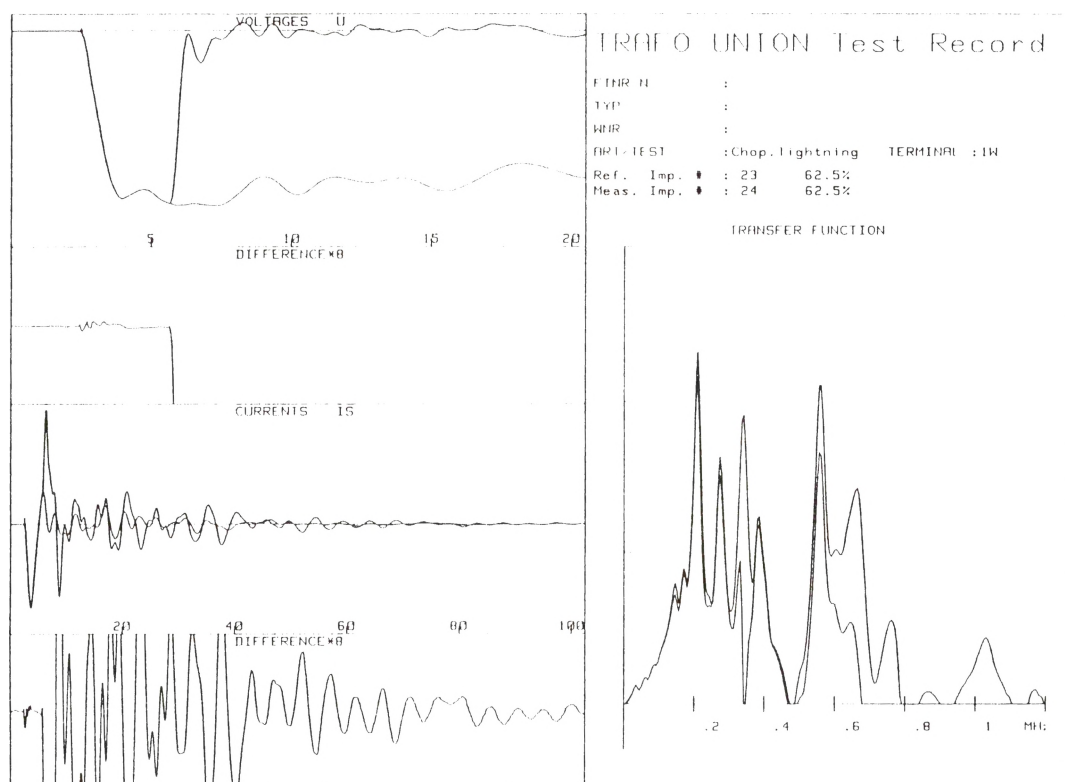


Bild 8: Vergleich von Stößen mit voller und abgeschnittener Stoßspannung an einem einwandfreien Transformator

Eine Fehlererkennung über die Transfer Funktionen beim Vergleich von Stößen mit voller und abgeschnittener Stoßspannung ist nicht möglich, da die Transfer Funktion eindeutig von der Spannungsform abhängig ist.

Die Spannungsabhängigkeit der Transfer Funktion zeigt sich am besten beim Vergleich verschiedener Stöße an einem defekten Transformator, vor und nach der Reparatur.

Beim Vergleich der Bilder 8 und 9 kann nicht festgestellt werden, ob eines der beiden oder beide die Prüfung an einem defekten Transformator darstellen. Bild 9 zeigt den bereits erwähnten defekten Transformator, Bild 8 den gleichen Transformator nach der Reparatur.

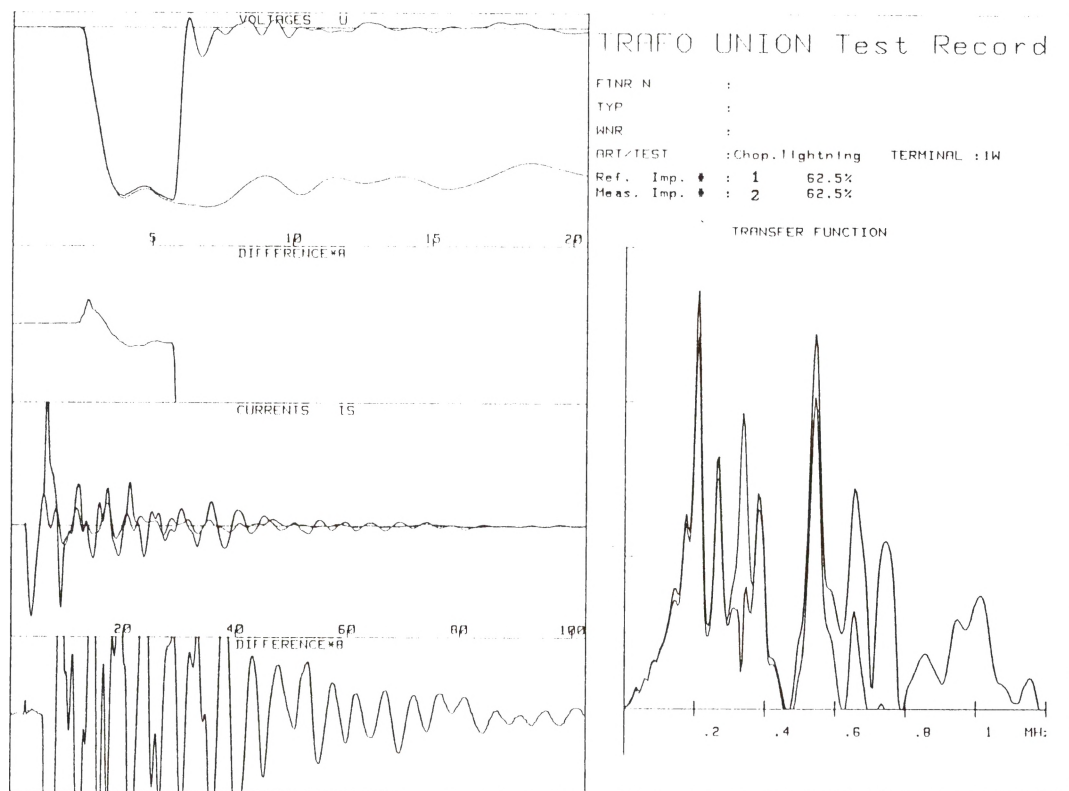


Bild 9: Vergleich von Stößen mit voller und abgeschnittener Stoßspannung an einem defekten Transformator

Die Transfer Funktionen zweier abgeschnittener Stöße mit unterschiedlichen Abschneidezeiten ($3,23\mu s$ und $3,99\mu s$) lassen ebenfalls keinen Rückschluß auf den Zustand des Transformators zu, Bild 10.

Unterschiedliche Amplituden der Transfer Funktionen sollen auf Teilentladungen im Transformator schließen lassen. Teilentladungen im Meßkreis machen sich ebenso als Transfer Funktionen mit unterschiedlichen Amplituden bemerkbar.

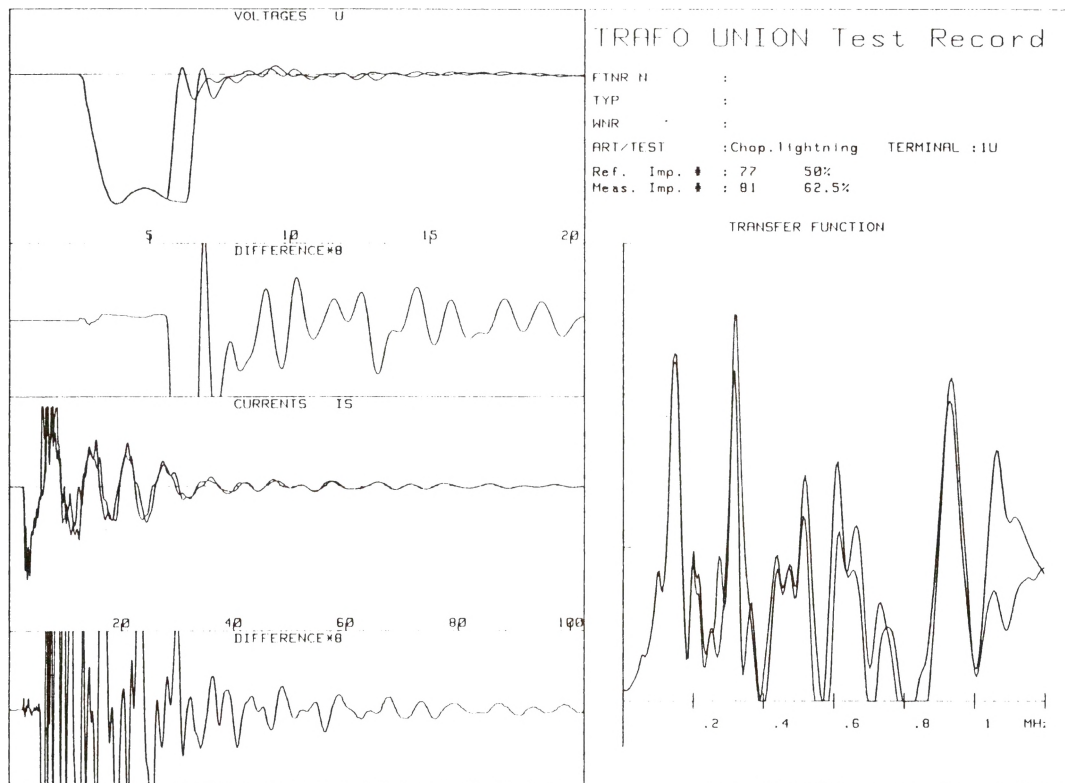


Bild 10: Vergleich zweier Stöße mit abgeschnittener Stoßspannung mit unterschiedlichen Abschneidezeiten

5. Beurteilung der Messungen

Der Einsatz eines digitalen Meßwerterfassungssystems zur Stoßspannungsprüfung von Leistungstransformatoren bietet gegenüber dem konventionellen Stoßoszilloskop eine wesentliche Verbesserung der diagnostischen Möglichkeiten der Fehlererkennung. Das Meßwerterfassungssystem besteht aus einem Transientenrecorder und einem Tischrechner, der die Steuerung des Meßablaufes sowie die Auswertung und Bearbeitung der Meßsignale übernimmt.

Im reinen Echtzeitbetrieb, d.h. nur Aufzeichnung und Protokollierung von Stoßspannung und gemessenem Strom, bietet dieses Meßsystem wesentliche Vorteile gegenüber der konventionellen Technik. Die Auflösung des 10 Bit Transientenrecorders mit 1024 Digitalisierungsstufen ist besser als die eines Stoßoszilloskops.

Die optische Präsentation der geplotteten Meßsignale ist ebenfalls besser als die der Oszillogramme, da immer eine gleichmäßige "Strahlspur" zu sehen ist.

Ein gutes Hilfsmittel zur Fehlererkennung sind die ebenfalls im Zeitbereich arbeitenden Softwarewerkzeuge Überlagerung und Differenzbildung. Sie erleichtern die Beurteilung der aufgezeichneten Kurvenverläufe. Das Meßsystem objektiviert die Abweichungen gegenüber dem subjektiven visuellen Vergleich.

Die im Frequenzbereich arbeitende Transferfunktionsanalyse bietet in einigen Fällen eine zusätzliche Information.

Entgegen den bisherigen Veröffentlichungen arbeitet die Transferfunktionsanalyse nur beim Vergleich von Stößen mit voller Stoßspannung untereinander und beim Vergleich von abgeschnittenen Stoßspannungen

mit identischer Abschneidezeit zufriedenstellend, /9/. In diesen Fällen ist der Fehler jedoch auch im Zeitbereichssignal eindeutig zu erkennen. Der Vergleich der Transfer Funktionen von Stößen mit voller und abgeschnittener Stoßspannung läßt keine Rückschlüsse auf einen Fehler zu.

Die Ursachen sind vielschichtig und zur Zeit Gegenstand weiterer Untersuchungen. Sie können auch in der Störspannungsempfindlichkeit des Meßsystems liegen. Die Störspannungsempfindlichkeit ist bei den Zeitbereichsmessungen nicht als störend aufgetreten, dies kann sich jedoch durch die Transformation der Zeitbereichssignale in den Frequenzbereich verstärken.

6. Zusammenfassung

Die Beurteilung des Meßsystems erfolgt am besten durch die Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile.

Die Nachteile, bzw. die im praktischen Einsatz auftretenden Probleme sind:

Die Transferfunktionsanalyse ist nur bedingt einsatzfähig. Hier muß noch Entwicklungsarbeit geleistet werden. Fehler die mit der Transfer Funktion bislang erkannt werden, werden auch im Zeitbereichssignal erkannt.

Die Elektromagnetische Verträglichkeit des Meßsystems muß verbessert werden.

Der Frequenzgang der Eingangsteiler muß verbessert werden.

Den Nachteilen, die sich alle nur bei der Transferfunktionsanalyse bemerkbar machen, stehen jedoch die folgenden Vorteile gegenüber:

Verbesserte Erfassung von Strom und Spannung im Zeitbereich.

Bessere Genauigkeit und bessere optische Darstellung als bei einem Stoßoszilloskop.

Überlagerung und Differenzbildung zweier Stöße erleichtern die Beurteilung der Meßsignale.

Nachträgliche Vergrößerung der Meßsignale.

Automatische Protokollerstellung.

Zeit- und Kosteneinsparung durch den Verzicht auf die Schirmbildfotografie.

Rechnergesteuerte digitale Datenerfassungsanlagen eignen sich somit sehr gut zur Dokumentation von Stoßspannungsprüfungen. Die Auflösung ist besser als die eines Stoßoszilloskops. Die Softwarewerkzeuge im Zeitbereich erlauben, ohne Wiederholung des Stoßes, Ausschnitte aus dem Meßsignal zu vergrößern und bieten somit ein gutes Hilfsmittel zur Beurteilung der aufgezeichneten Kurvenverläufe.

7. Literatur

- /1/ VDE 0532, Teil 3, Juli 1878
- /2/ Maier, R.; Schwab, A.
Einsatz digitaler Datenerfassungssysteme zur Stoßspannungs-
prüfung von Transformatoren
Elektrizitätswirtschaft Jg.82, 1983, H.22, S. 832-836
- /3/ Malewski, R.; Poulin, B.
Digital monitoring techniques for HV impulse tests
IEEE Trans. PAS, Vol. PAS104, No.11, Nov 1985, p.3108-3116
- /4/ 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
- /5/ Koreman, C.G.A.
Improvements in transformer testing through the use of
the Transfer Function
5th ISH 1987 Braunschweig, Paper No. 62.05
- /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/ Malewski, R.; Gockenbach, E.
Neue Möglichkeiten der Beurteilung von Stoßspannungs-
prüfungen an Transformatoren durch Verwendung eines
digitalen Meßsystems
etz Archiv Bd.11, Heft 6, S. 179-185
- /8/ Haefely Basel
HIAS, Hochauflösendes Impuls-Auserte-System
Druckschrift Typ 740
- /9/ Maier, R.
Practical experiences with HIAS
Vortrag beim HIAS workshop Oktober 1989 in Basel
The transfer function, a diagnostic tool for high-voltage
tests on power transformers
- /10/ Maier, R.
Näherungsweise Berechnung transienter Felder in Hochspannungs-
prüfkreisen
VDI-Fortschrittsbericht, Reihe 21, Nr. 26, 1988