

Anwendung von Transferfunktionsverfahren bei der Prüfung von Großtransformatoren

Peter Kemm, Günter Hengge; ABB Transformatoren GmbH, Mannheim
Thomas Leibfried; Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart

1. Überblick

Mit der Transferfunktion eines Netzwerks oder eines Systems wird ganz allgemein das Verhältnis eines Antwortsignals zu einem Anregungssignal an diesem Netzwerk bezeichnet. Dabei sind zu unterscheiden (Spannungs- oder Strom-)Übertragungsfunktionen oder Übertragungen und Transmittanzfunktionen oder Transmittanzen (= Impedanzen und Admittanzen). Vergl. 6. Schrifttum, / 03 /. Streng genommen sind diese Systemfunktionen für in den Frequenzbereich transformierte Signale definiert, weiter gefaßt kann man darunter aber auch die Verhältnisse der entsprechenden Signale im Zeitbereich verstehen – wobei im Extremfall das Signalverhältnis auf einen Einzelwert reduziert sein kann, z.B. das Verhältnis der Maximalwerte der betrachteten Signale.

Bei Zugrundelegung dieser Betrachtungsweise läßt sich sagen, daß Transferfunktionen in der Transformatoren-Prüftechnik ein seit Jahrzehnten unter verschiedenen Bezeichnungen angewandtes Mittel zur Kontrolle der Qualität oder zur Ermittlung spezifischer Eigenschaften des Prüflings sind. An elektrischen Verfahren sind zu nennen

- die Stoßspannungsverteilungsmessung mit Impulsscheitelwerten von 1V bis 500V zur Feststellung partieller Wicklungs- und Isolationsbeanspruchungen bei der späteren Stoßspannungsprüfung;
- die bei ebenfalls niedrigen Pegeln mittels frequenzvariabler Sinusspannung oder mittels Spannungsimpuls und 'Fast Fourier Transform' (FFT-)Analyse durchgeführten Frequenzgangmessungen zur Ermittlung von Resonanzen des Prüfobjekts;
- die 'Low Voltage Impulse' (LVI-)Diagnose und die Frequenzganganalyse ('Frequency Response Analysis' = FRA) – zuweilen auch komplizierter als 'Frequency Response of Stray Losses' (FRSL-)Methode bezeichnet – zur Überprüfung der Auswirkungen von Stoßkurzschlußprüfungen;
- die erst seit wenigen Jahren zur Verfügung stehende 'Transferfunktion' (TF) – meist in Form einer Admittanzfunktion – unter Verwendung direkt aus der Stoßspannungsprüfung abgeleiteter Hochspannungssignale zur Bewertung des Prüfergebnisses.

Auf den ebenfalls möglichen Einbezug nichtelektrischer Verfahren (z.B. Geräuschmessung, Messung mechanischer Schwingungen u.a.) soll in diesem Rahmen verzichtet werden.

2. Erläuterung einiger Transferfunktionsverfahren

Die Verfahren werden kurz nach Zweck und Durchführung vorgestellt und fallweise mit Meßdiagrammen verdeutlicht – dabei stellen diese Diagramme jeweils nur ein Beispiel aus bis zu hundert Einzelmessungen an verschiedenen Transformatoren dar, auf deren Aussageergebnisse hier nicht im Detail eingegangen werden kann.

2.1 Stoßspannungsverteilungsmessung

Diese Messung dient der Ermittlung lokaler und partieller Spannungsbeanspruchungen längs von Wicklungen oder über Isolationsanordnungen bei der Stoßspannungsprüfung. Dazu werden die Anschlußklemmen am (offenen) Aktivteil in gleicher Weise beschaltet wie bei der späteren Prüfung am 'betriebsbereiten' Transformator. Die niedrigen angewandten Stoßspannungspegel bis ca. 500V erlauben einen problemlosen Abgriff der Meßsignale an den gewünschten Stellen. Als Ergebnis erhält man das Zahlenverhältnis des Maximalwerts der Meßspannung(en) zum Scheitelwert der applizierten Stoßspannung, womit sich die Beanspruchungen auf den Pegel des Prüfstoßes linear hochrechnen lassen. Die Berücksichtigung des Einflusses der Ölfüllung und des Kessels beim fertigen Transformator – also geänderte Kapazitäten – erfolgt aufgrund von in Basisuntersuchungen gewonnenen Erfahrungen. Bild 1 zeigt die Spannung über einer Regelwicklungsstufe eines 1phasigen 242MVA-HGÜ-Transformators bei Beaufschlagung der Eingangsklemme der 400/ $\sqrt{3}$ kV-Netzwicklung mit einer ('Blitz'-)Stoßspannung 1 | 50 μ s von +200V Scheitelwert.

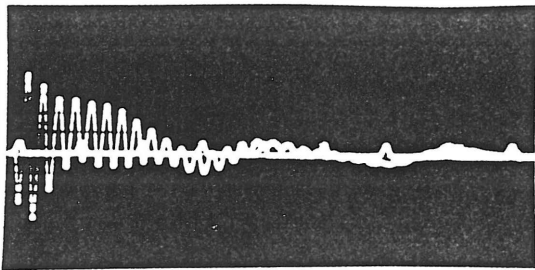


Bild 1

Teilstoßspannung an einer Regelwicklungsstufe bei Anregung mit +200V, 1 | 50 μ s

20V/cm, 10 μ s/Zeitmarke

Zwar existieren seit vielen Jahren auch Computerprogramme zur Bestimmung der Stoßspannungsbeanspruchung, aber die extrem große Zahl nicht immer exakt zu erfassender Einflußparameter führt dazu, daß bei Neukonstruktionen und in Zweifelsfällen – insbesondere bei der Ermittlung von Schadensursachen – doch immer wieder auf diese Uralt-Meßmethode zurückgegriffen wird.

2.2 Frequenzgangmessung

Mit Hilfe der Frequenzgangmessung werden Resonanzfrequenzen von Transformatoren im Bereich einiger zehn bis einiger hundert Kilohertz ermittelt, bei denen Wicklungspotentiale zu einem Vielfachen ihres Wertes bei Betriebs- oder (Wechselspannungs-)Prüfbedingungen aufschwingen und die Spannungsfestigkeit der betroffenen Elektroden- und Isolieranordnungen überschreiten können. Dazu legt man eine Spannung niedrigen Pegels (bei Sinusspannungen 1V bis maximal 20V Scheitelwert, bei Pulsspannungen bis 1000V Scheitelwert) an eine Wicklung, die im Netz oder bei der (Stoßspannungs-) Prüfung Resonanzanregungssignalen ausgesetzt ist, und mißt neben der Eingangsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz die Antwortspannung am interessierenden Wicklungsteil (\rightarrow Übertragungsfrequenzgang) oder den Eingangsstrom (\rightarrow Immitanzfrequenzgang = Impedanz- oder Admittanzfrequenzgang).

Am Aktivteil mit der Zugänglichkeit innerer Wicklungsverbindungen wählt man meist die eine direktere Aussage liefernde Übertragungsfrequenzgangmessung (evtl. zum Vergleich zusätzlich eine Admittanzfrequenzgangmessung), während am fertigen Transformator meist nur eine Immitanzfrequenzgangmessung möglich ist, in der Regel als Admittanzfrequenzgang bestimmt. Mit einigem Aufwand sind in beschränktem Umfang auch am fertigen Transformator Übertragungsfrequenzgangmessungen möglich – so erlaubt die Verwendung eines speziellen durchbrochenen Schalterkopfes den Zugriff auf einzelne Regelwicklungsstufen. Wie bei der Stoßspannungsverteilungsmessung bedingt die Übertragung der am Aktivteil gewonnenen Ergebnisse auf den fertigen Transformator die aus umfangreichen Untersuchungen resultierende Erfahrung – z. B. erniedrigen sich Resonanzfrequenzen infolge der geänderten Randbedingungen um 15 – 30%. (/ 04 /)

Obwohl äußerst mühsam und zeitaufwendig, ist das Durchfahren der Frequenz eines Sinusspannungsgenerators von Hand und das Notieren der Resonanzstellen anhand von Überhöhungsmaxima des Antwortsignals und/oder von Zusammenbrüchen der Ausgangsspannung des Generators infolge des hohen Strombedarfs im Resonanzfall immer noch weit verbreitet. Eine Ungenauigkeit dieser Methode rührt daher, daß Zusammenbruch des Anregungssignals und Überhöhungen des Antwortsignals nicht exakt zusammenfallen. Eine gravierende Verbesserung mit nur einem Bruchteil des Zeitbedarfs stellt die Verwendung eines Funktionsgenerators mit automatischem Frequenzdurchlauf und direkter frequenzproportionaler Ansteuerung der Horizontalablenkung z. B. eines analogen Oszilloskops dar, und die Registrierung mittels einer Polaroidkamera. Bild 2 zeigt eine solche Messung am gleichen Prüfling und mit gleichen Einspeise- und Meßpunkten wie in 2.1. Eine Resonanzfrequenz von ca.

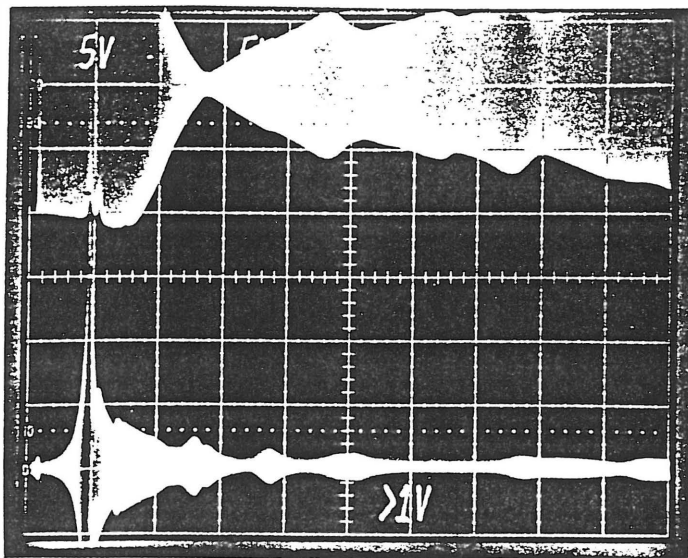


Bild 2

Übertragungsfrequenzgang an einer Regelwicklungsstufe am Aktivteil

oben Anregungsspannung,
unten Antwortspannung

Frequenzteilung (horizontal) 400kHz/div,
Frequenzbereich 40 – 4000kHz

weitere Angaben s. Text

380kHz (mit einem Spannungsübertragungsfaktor von ca. 2.2 entsprechend einer Überhöhung von ca. 200) findet sich in Bild 1 wieder als Schwingungsfrequenz der Teilstoßspannung. Auch hier besteht das Problem der Verfälschung des visuellen Eindrucks infolge des Zusammenbruchs der Anregungsspannung an Resonanzstellen – durch Einsatz eines Quotientenbildners kann dieser Einfluß eliminiert werden, die Verwendung eines y-t-Schreibers statt eines Analogoszilloskops erhöht die Auflösung ganz entscheidend, erleichtert damit die Auswertung und verbessert die Genauigkeit. Die Verwendung eines Digitaloszilloskops schließlich erlaubt die Abspeicherung der Meßsignale und ermöglicht eine direkte apparative oder rechnergestützte Auswertung.

Dem heutigen Stand der Technik entspricht der Einsatz eines Netzwerkanalysators, der die Durchführung der Messung erheblich vereinfacht und die Auswertung mit hoher Genauigkeit gewissermaßen automatisch mitliefert. Bild 3 ist in der gleichen Meßschaltung wie Bild 1 (2.1 Stoßspannungsverteilungsmessung) und Bild 2 (Frequenzgangmessung mit Sinusgenerator und Oszilloskop) aufge-

nommen, im Gegensatz zu diesen jedoch am fertigen Transformator. Die Resonanz bei 282.5kHz entspricht der Resonanz bei 380kHz am Aktivteil, liegt also um 25% tiefer. Der Übertragungsfaktor ist mit 2.85 leicht erhöht, was allerdings keine allgemeingültige Gesetzmäßigkeit darstellt – ausgeprägte Resonanzen am Aktivteil können sich am fertigen Transformator verstärken oder abschwächen, sogar

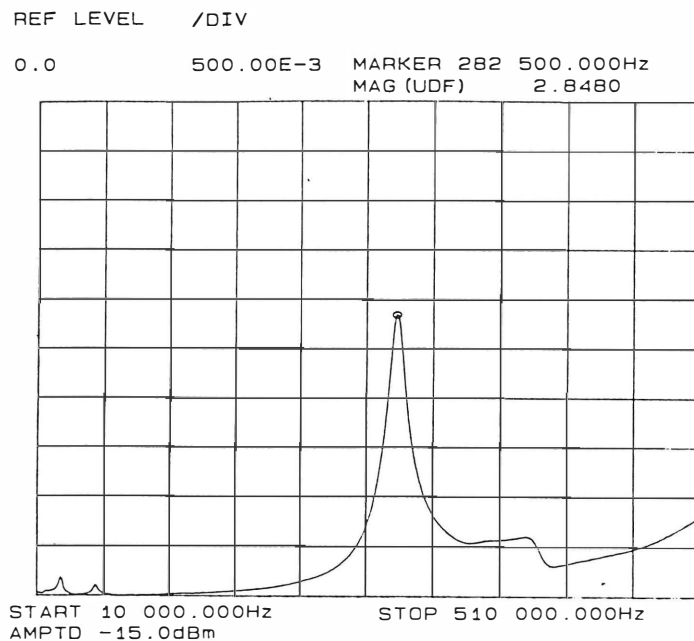


Bild 3

Übertragungsfrequenzgang an einer Regelwicklungsstufe mit Netzwerkanalysator

gleiche Meßschaltung wie in Bild 2, jedoch Messung am fertigen Transformator

weitere Angaben s. Text

fast verschwinden, vorher kaum feststellbare Resonanzen können dominierend werden. Netzwerkanalysatoren bieten eine Reihe weiterer Auswerteverfahren, wie z. B. die Darstellung des Phasenfrequenzgangs, und eröffnen damit zusätzliche Aussagemöglichkeiten. Probleme kann ihre niedrige Ausgangsspannung von meist unter 1V verursachen. Da sie ursprünglich für Messungen an konzentrierten Elementen und kleinen Objekten entwickelt wurden, ist bei den großen Abmessungen von Transformatoren und den damit notwendigen großen Speise- und Meßleitungslängen eine starke Empfindlichkeit gegenüber Einstreuungen zu beachten, welche wegen der niedrigen Signalpegel zu erheblichen Verfälschungen führen können. (/ 04 /, / 05 /)

Gleiches wie Netzwerkanalysatoren mit kontinuierlichem oder schrittweisem Durchlauf des interessierenden Frequenzbereiches leisten Geräte, die nach dem FFT-Verfahren (Fast Fourier Transform) arbeiten. Dabei werden sowohl das meist impulsförmige Eingangs- oder Anregungssignal wie auch das Antwortsignal in den Frequenzbereich transformiert und dann der Quotient gebildet. Alle im vorigen Abschnitt angedeuteten Auswertemöglichkeiten sind auch hier gegeben. Aufgrund der Signalpegel separater Impulsgeneratoren mit bis zu 1000V Scheitelwert (z. B. sind auch die für die Stoßspannungsverteilungsmessung benutzten Signalgeneratoren verwendbar) ist das FFT-Verfahren weniger empfindlich gegen Einstreuung, andererseits kommt hier zum Verstärkerrauschen das Digitalisierungsrauschen mit allen Begleiterscheinungen, wodurch vor allem bei Frequenzen über ca. 600kHz Schwierigkeiten bei der Auswertung auftreten können. Da keine entsprechende Messung am gleichen Transformator wie bei den vorangehenden Beispielen vorliegt, wird an dieser Stelle auf ein Bildbeispiel verzichtet. Ein solches ist jedoch als Vergleichsmessung in 3.2 und in 3.3 zu finden. (/ 04 /)

Die bislang beschriebenen Verfahren stellen keine extremen Anforderungen im Hinblick auf die verwendeten Geräte und die Durchführung der Messungen, jedoch ist auf einen sorgfältigen fachgerechten und problemangepaßten Aufbau der Meßschaltungen zu achten. Die Anschlußbedingungen – nicht zuletzt die Erdungsverbindungen – und die Leitungsführungen sind präzise zu dokumentieren, sonst wird selbst die gleiche Person nach einem Neuaufbau der Messung merkbare Ergebnisab-

weichungen feststellen, eine andere Person wird möglicherweise gar keine annähernde Reproduzierbarkeit mehr erreichen.

Zwischen der Stoßspannungsverteilungsmessung (s. 2.1) und der Frequenzgangmessung ist aus den jeweiligen Beschreibungen ein enger Zusammenhang erkennbar. Ein Verzicht auf eine dieser Methoden und statt dessen die Berechnung ihrer Aussagen aus den Ergebnissen der anderen Methode ist wegen der aus den unterschiedlichen Zielsetzungen resultierenden anderen Anschlußbedingungen trotzdem nicht ohne weiteres möglich.

2.3 LVI- und FRA-Messungen bei Stoßkurzschlußprüfungen

Zum Nachweis der mechanischen Festigkeit von Transformatoren oder ihrer Wicklungsaufbauten bei transformatornahen Netzkurzschlüssen werden fallweise Stoßkurzschlußprüfungen an Modellen oder Prototypen durchgeführt – gleichzeitig wird damit die Korrektheit der Auslegungsrechnung überprüft. Wegen der hohen Kosten solcher Prüfungen erfolgen sie jedoch nur selten, entweder in starken Zweifelsfällen oder auf ausdrückliche Forderung des Transformatorbestellers.

Zur Feststellung von Änderungen im Transformator, d. h. von Wicklungsverschiebungen und sonstigen Deformationen, dienen vor Beginn der Prüfungen und nach jedem Prüfkurzschluß angewandte spezielle Meßverfahren. Die in 2.3.1 und 2.3.2 gezeigten Meßergebnisse stammen von der bei der KEMA in Arnhem, Niederlande durchgeführten Stoßkurzschlußprüfung an einem 3phasigen 50MVA-Transformator mit den Spannungsebenen 230kV / 34kV / 11kV und der Schaltgruppe Yyn0d1. Der als Prototyp vorgesehene Transformator wurde insgesamt 6 Kurzschlüssen in wechselnder Schaltung unterworfen – wie eine im Werk durchgeführte Demontage in Bestätigung der Kontrollmessungen bei der KEMA nachwies, überstand der Transformator diese Beanspruchungen erfolgreich und konnte nach ebenfalls erfolgreicher Absolvierung der üblichen Prüfungen als Teil eines Auftrags von mehreren gleichen Transformatoren ausgeliefert werden. (/ 07 /)

2.3.1 Niederspannungsimpulsverfahren

Dieses wahrscheinlich besser unter der (teilenglischen) Bezeichnung Low Voltage Impulse (LVI-) Diagnose bekannte Verfahren benutzte im vorliegenden Fall Spannungspulse $0.05 | 3.8 \mu\text{s}$ von

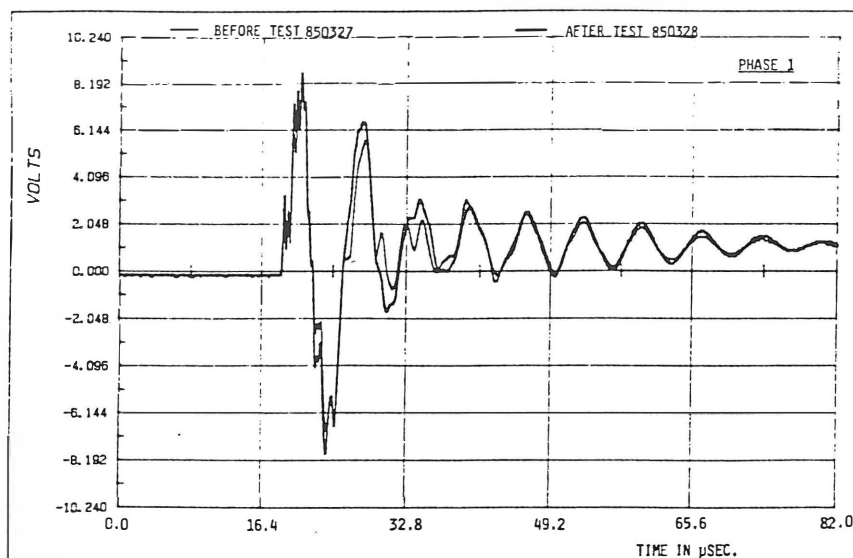


Bild 4

LVI-Messungen vor und nach einem Stoßkurzschluß

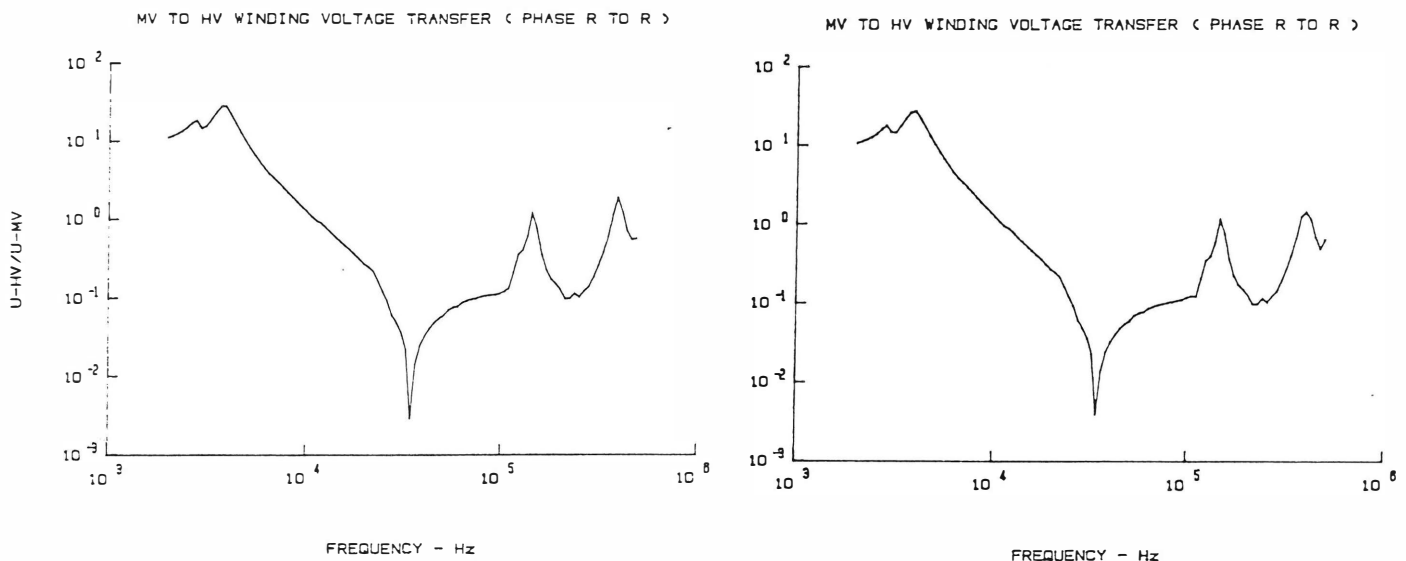
geringe Abweichungen zeigen bestandene Prüfung

weitere Angaben s. Text

500V Scheitelwert, die mit einer Wiederholungsfrequenz von 50Hz auf eine Mittelspannungswicklung appliziert wurden. Als Antwortsignal wurde der Strom in der mit 50Ω belasteten Oberspannungswicklung derselben Phase gemessen (als Spannungsabfall an diesem 50Ω -Widerstand). Bild 4 zeigt die Messung des Stroms/Spannungsabfalls vor und nach einem Stoßkurzschluß. Die geringen Abweichungen in den Signalverläufen indizieren laut KEMA den unbeschädigten Zustand der Wicklungen dieser Phase. Wer wie die Autoren allerdings keine ausgiebige Erfahrung in der Durchführung von Stoßkurzschlußprüfungen und derartigen Kontrollmessungen besitzt, wird von der mangelhaften Reproduzierbarkeit des Verfahrens enttäuscht sein und aufgrund der doch deutlichen Unterschiede zwischen den Signalen bis ca. $40\mu s$ erhebliche Bedenken hegen. (/ 05 / , / 06 /)

2.3.2 Frequenzganganalyse

Auch hier stammt das bekannte Kürzel FRA von der englischen Bezeichnung Frequency Response Analysis. Das angewandte Verfahren entspricht der in 2.2 beschriebenen Frequenzgangmessung unter Einsatz eines Sinusgenerators und eines Transientenrekorders, zusätzlich wurde ein Verstärker zur Erhöhung des Speisespannungspegels benutzt. Es wurden verschiedene Impedanz- und



a vor Stoßkurzschluß

b nach Stoßkurzschluß

Bild 5 FRA-Messung – die fast deckungsgleichen Kurven zeigen die bestandene Prüfung

Übertragungsfrequenzgänge mit einem durchfahrenen Frequenzbereich 2 – 500kHz aufgenommen. Als Beispiel zeigt Bild 5 die Spannungsübertragungsfrequenzgänge vor und nach einem Stoßkurzschluß in der Phase R. Geringfügigste Abweichungen im obersten Frequenzbereich scheinen eher auf einer zu groben Signalabtastung zu beruhen. Auch hier kann von einer unbeschädigten Wicklungsanordnung ausgegangen werden. Dieses Diagnoseverfahren ist eindeutig vertrauenseinflößender als das in 2.3.1 vorgestellte. (/ 05 /)

2.4 Transferfunktionen (TF) bei Blitzstoßspannungen

2.4.1 Anwendung der TF bei der Blitzstoßspannungsprüfung

Blitzstoßspannungsprüfungen an Transformatoren dienen dem Nachweis der Festigkeit der Wicklungskonstruktion und von Isolationsanordnungen im Kessel gegen Überspannungen infolge von Blitzeinschlägen in das Freileitungsnetz. Nach IEC 76-3 (/ 01 /) besteht eine Prüfsequenz bei An-

wendung abgeschnittener Stöße je gestoßener Klemme aus einem Vollstoß mit reduziertem Pegel (z. B. 50%) einem Vollstoß mit 100% Prüfpegel, einem abgeschnittenen Stoß mit reduziertem Pegel, zwei abgeschnittenen Stößen mit 100% Prüfpegel und schließlich zwei 100%–Vollstößen. Die (100%–) Prüfpegel (= Scheitelwert) von Vollstößen und abgeschnittenen Stößen sind gleich groß.

Neben der Stoßspannung wird mindestens ein Strom registriert, als empfindlichster Indikator für kleinste Veränderungen im Transformator (= Defekte) ist das zumeist der auf ein anderes, d. h. nichtgestoßenes System kapazitiv übertragene Strom. Im Einzelfall werden bis zu drei Ströme registriert, unter Einschluß des erdseitig abfließenden Stroms des gestoßenen Systems. Auch im Zeitalter der digitalen Erfassung der Stoßsignale und ihrer Ausgabe auf Plotter oder Laserdrucker spricht man gewohnheitsmäßig immer noch von Spannungs- und Stromoszillogrammen.

Falls keine nichtlinearen Elemente, wie z. B. spannungsabhängige Widerstände oder Schutzfunkenstrecken im Transformator von Einfluß sind, müssen Spannungs- und Stromoszillogramme des anfänglichen reduzierten Vollstoßes – der gerne als Referenzstoß mißdeutet wird – und des ersten 100%–Vollstoßes exakt übereinstimmen, d. h. deckungsgleich sein. Im anderen Fall liegt ein Fehler im Prüf- oder Meßaufbau vor, oder ein grober Fehler im Transformator hat bereits einen Defekt verursacht – ein solcher wird sich allerdings auch häufig akustisch deutlich bemerkbar machen. Vor Fortführung der Prüfung muß die Ursache für Abweichungen in den Oszillogrammen geklärt werden, äußere Fehlereinflüsse, z. B. mangelhafte Erdverbindungen oder Überschläge an Fahrgestellen, sind zu beheben. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Oszillogramme von zweitem und drittem 100%–Vollstoß mit denen des ersten 100%–Vollstoßes (dem Referenzstoß) übereinstimmen. Erfahrenen Prüfsingenieuren genügt ein visueller Vergleich der Oszillogramme um auch kleinste Unregelmäßigkeiten zu entdecken, geplottete oder 'gedruckte' Oszillogramme kann man auch übereinanderlegen. Heutige Stoßsignalerfassungssysteme erlauben außerdem einen rechnerischen Vergleich mittels Differenzbildung.

Vor etwa zehn Jahren wurde in einer Veröffentlichung die Anwendung des Transferfunktionsverfahrens bei der Blitzstoßspannungsprüfung beschrieben (/ 08 /), und seit etwa sieben Jahren werden Systeme mit dieser Zusatzfunktion von den Herstellern von Stoßspannungsmeßeinrichtungen angeboten (/ 10 /). Dabei handelt es sich um eine Software-Erweiterung zu den digitalen Meßwerterfassungs- und -verarbeitungssystemen. Seither verbindet man in der Hochspannungsmeßtechnik den Begriff 'Transferfunktion' oder 'die TF' unbenommen seiner allgemeinen Bedeutung fast automatisch mit der Anwendung von Transferfunktionsverfahren bei Stoßspannungsprüfungen.

Prinzipiell werden auch hier, wie gegen Ende von Kapitel 2.2 angeführt, die Meßsignale aus dem Zeit- in den Frequenzbereich transformiert und dann der Quotient berechnet – vorteilhaft in Form einer Admittanz, also Strom durch Spannung. Auch wenn gemäß Definition falsch, behält man bei Verwendung des (erdseitigen) **Eingangsstoßstroms** aus Bequemlichkeitsgründen die allgemeine Bezeichnung **Transferfunktion** bei. Zusätzliche Hilfsmittel wie Filterverfahren und Fensterfunktionen helfen Störeinflüsse und sonstige problematische Eigenschaften zu eliminieren oder zu mildern (/ 13 /). Detaillierte Erläuterungen des Aufbaus und der Funktion digitaler Stoßsignalerfassungssysteme mit der zusätzlichen Möglichkeit des Einsatzes von Frequenzanalysemethoden (der TF) werden von kompetenter Seite in verschiedenen Beiträgen dieses Symposiums geboten. (/ 10 / , / 15 / , / 16 /)

Die ursprüngliche Idee war, mittels der TF kleine Abweichungen in der Stoßspannung aufgrund von Zündungsunregelmäßigkeiten des Stoßgenerators mit dadurch verursachten größeren Abweichungen im Stromverlauf in der Quotientenbildung zu eliminieren. Als weitere Anwendungsmöglichkeit der TF kam dann die Einbeziehung der Prüfstöße mit abgeschnittener Stoßspannungen in die Bewertung des Prüfergebnisses hinzu. Schließlich soll die TF bei nicht bestandener Stoßspannungsprüfung eine Diagnose des Fehlers und vielleicht eine Ortung der Fehlerstelle ermöglichen. Wenn auch diese Möglichkeiten z. T. entweder nicht unbedingt notwendig oder noch nicht voll praxistauglich scheinen,

so ist doch zu erwarten, daß die TF in naher Zukunft, nicht zuletzt mit wachsender Erfahrung in der Anwendung, zu einem wertvollen Diagnosehilfsmittel bei der Stoßspannungsprüfung von Transformatoren werden wird (vergl. a. 2.4.2, 3. und 4.). Erfahrung in der Anwendung der TF und der Beurteilung ihrer Aussage bedingt nun allerdings auch Prüfdefekte, die man sich als Prüfenieur des Transformatorherstellers keinesfalls wünschen kann. Meßbeispiele werden hier nicht gezeigt, solche sind jedoch in einiger Zahl in 3. und 4. zu finden.

2.4.2 Anwendung der TF bei der Vor-Ort-Diagnose

Wie bereits in 2.3 angeführt, sind Niederspannungspulse und Frequenzgangmessungen zur Überprüfung von Transformatorwicklungen auf Lageveränderungen und Deformierungen anwendbar. In der Kombination führen diese beiden Methoden zur schon bekannten Frequenzgangmessung mittels Impulsanregung und FFT (s. 2.2) oder eben zu der in 2.4.1 vorgestellten Transferfunktion (TF). Es sollte also möglich sein, nach einem Netzkurzschluß auf der Anlage zu überprüfen, ob die Wicklungen eines Transformators durch die Kurzschlußkräfte verformt wurden, ohne daß ein Defekt seine Abschaltung verursachte. Bereits im Prüffeld des Transformatorherstellers kann für eventuelle spätere Vergleichsmessungen an einem rückgelieferten Transformator eine Referenz-Transferfunktion aufgenommen werden. Eine Referenz für die Kontrollmessungen muß aber in jedem Fall auch auf der Anlage vor Ersteininsatz des Transformators aufgenommen werden. Die Referenz-Transferfunktion aus dem Prüffeld ist hierfür kaum brauchbar, da man die Anschlußbedingungen, insbesondere die Erdverbindungen, an diesen beiden Orten niemals in exakt gleicher Weise herstellen kann. Für späteren gleichen Anschluß ist der Meßaufbau mit allen Randbedingungen akribisch zu dokumentieren.

Neben der Niederspannungsmessung, für die der Transformator freigeschaltet werden muß, ist auch eine Kontrolle während des Betriebes möglich – dabei werden als Anregungssignale der Betriebsspannung überlagerte 'Zufallssignale' (z. B. als Folge von Schaltvorgängen im Netz) verwendet. Die Erfassung von Anregungs- und Antwortsignalen kann durch Auskopplung über die Meßanschlüsse der Transformator-Durchführungen oder über in den Durchführungsdomen eingebaute kapazitive und/oder induktive Meßsonden erfolgen. Ob dieses Verfahren auch für eine Überwachung des elektrischen Zustandes von Transformatoren einsetzbar ist, bedarf weiterer Untersuchungen. (/ 15 /)

3. Vergleich verschiedener Verfahren zur Bestimmung der Transferfunktion (TF)

Zum praktischen Nachweis der theoretisch unzweifelhaften Identität von Transferfunktionen unabhängig von ihrer Bestimmung mittels Frequenzgangmessung mit frequenzvariabler Sinusspannung oder mit Niederspannungspulsen bis 1000V und FFT-Verfahren oder direkt aus den Hochspannungssignalen der Stoßspannungsprüfung, wurden solche Messungen und Prüfungen an einem Transformator unter durchweg gleichen Anschlußbedingungen durchgeführt, wie sie bei zweckgebundener Ausführung der jeweiligen Messungen nicht vorhanden sind (vergl. a. 2.1, 2.2 und 2.4).

Als Meßobjekt diente ein 3phasiger 240MVA-Spartransformator mit den Spannungsebenen 275kV / 132kV / 33kV und der Schaltgruppe YNa0d1. Prüf- und Meßkreisschaltung sind Bild 6 zu entnehmen. Die Erdanschlüsse von Meßobjekt und Großgeräten blieben bei allen Versuchen unverändert, Kleinsignalgeräte (s. 3.2, 3.3) wurden direkt neben dem Transformator platziert und an dessen zentralem Erdpunkt K0 geerdet – für die damit durchgeführten Niederspannungsversuche wurde außerdem die Hochspannungsverbindung vom Stoßspannungsgenerator zur Prüfklemme 1U entfernt.

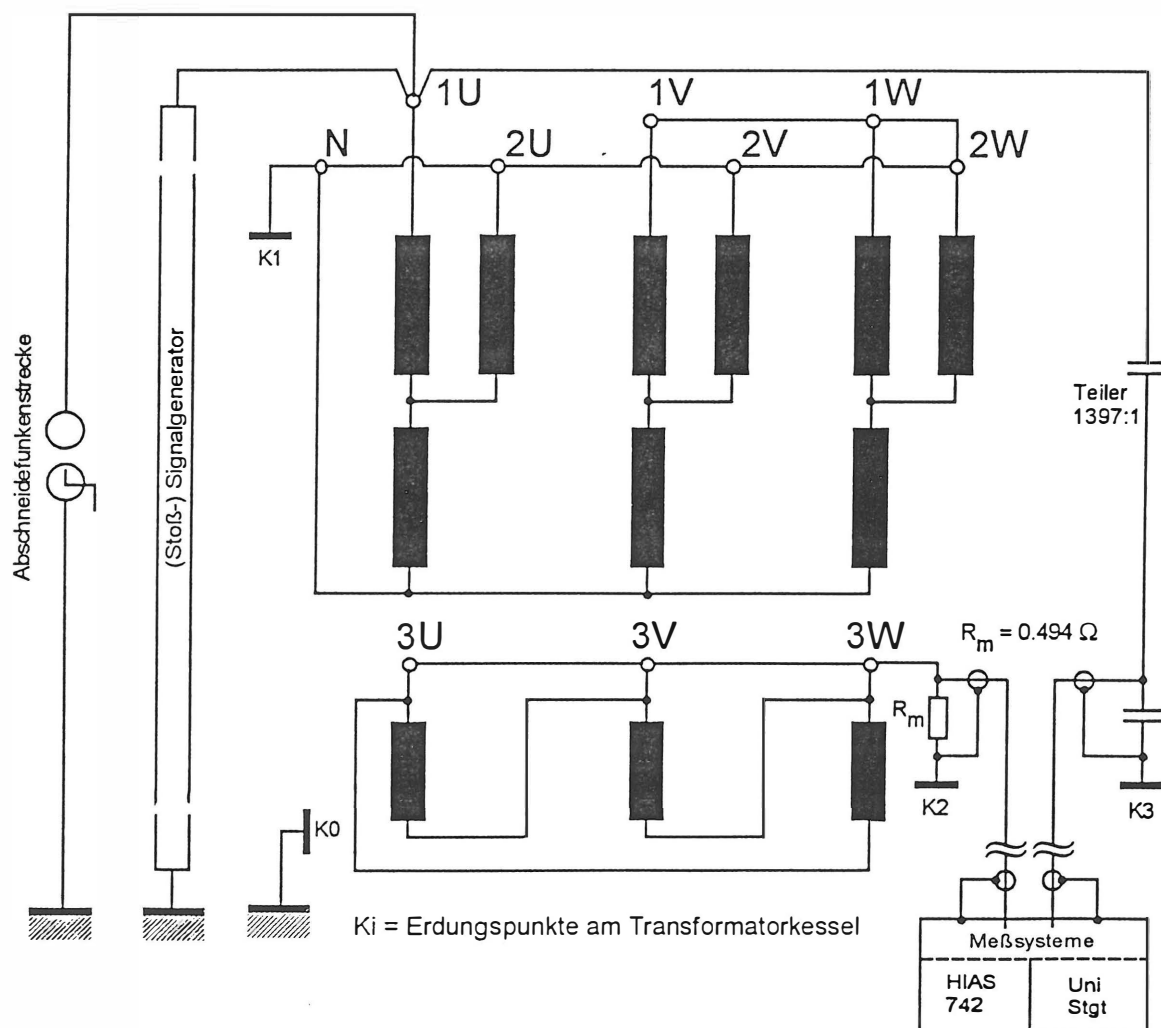


Bild 6 Stoßspannungsprüfaufbau für einen 3phasen Spartransformator – Details siehe Text

Die Meßwerterfassungsgeräte HIAS 742 (hochauflösendes Impuls-Auswertesystem der Firma HAEFELY TRENCH, Basel, CH – nur bei den Hochspannungsversuchen benutzt) und das System des Hochspannungsinstituts der Universität Stuttgart (folgend als 'System Uni Stuttgart' bezeichnet)

wurden über Trenntransformatoren betrieben. Ermittelt wurde jeweils die Transadmittanzfunktion aus dem kapazitiv auf das Tertiär-Wicklungssystem übertragenen Strom und der Prüfspannung. In allen Fällen wurde der Strom über den Spannungsabfall am Stoßmeßwiderstand R_m gemessen. Die bei den Hochspannungsversuchen angelegten Spannungen lagen weit unter den tatsächlichen Prüfpegeln des defektfreien Transformators.

3.1 'System Uni Stuttgart', Vergleich Vollstoß (FW) – abgeschnittener Stoß (CW)

Als einer der herausragenden Vorteile der Transferfunktion wird häufig angeführt, daß man mit ihrer Hilfe auch bei abgeschnittenen Stößen aufgenommene Signale zur Beurteilung des Prüfergebnisses heranziehen kann (/ 09 / , / 14 /). In Bild 7 sind für einen solchen Vergleich sowohl Admittanzbetrags- wie –phasenfrequenzgänge dargestellt. Die oberhalb 500kHz auftretenden Abweichungen zwischen den Transferfunktionen bei Vollstoß und abgeschnittenem Stoß, für die in dem gezeigten Fall das Quantisierungsrauschen alleinige Ursache sein dürfte, sorgen für Unsicherheiten in der Interpre-

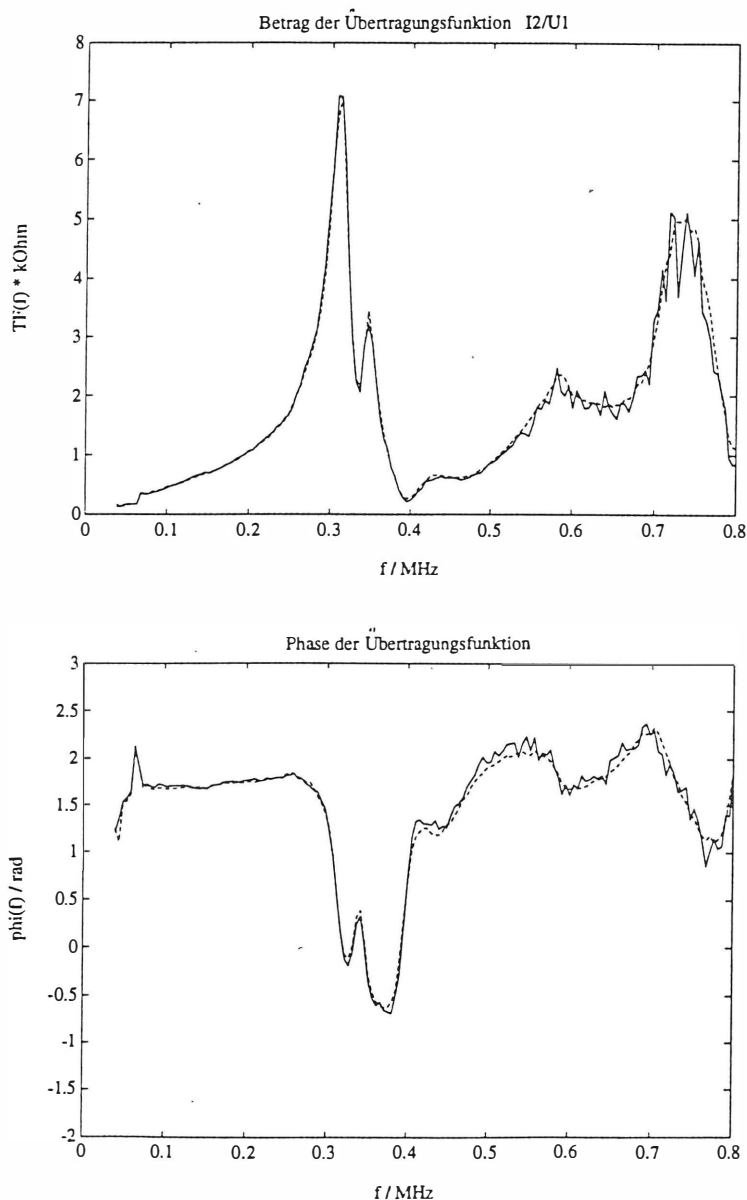


Bild 7

Vergleich Transferfunktion bei Vollstoß (FW = Full Wave) und bei abgeschnittenem Stoß (CW = Chopped Wave)

FW -632kV, 1.9/46 μ s —

CW -632kV, $T_c = 4.2\mu$ s - - -

'System Uni Stuttgart'

tation. Unbedingt notwendig für den Anwender ist hier eine Hilfestellung zur Beurteilung des für eine noch brauchbare Aussage nutzbaren Frequenzbereichs (/ 12 /). Vergl. a. 3.4 und / 11 / , / 13 / und / 14 / .

3.2 Vergleich der Transferfunktionen bei Hoch- und Niederspannungsvollstoß (HVI und LVI)

Für gleichbleibende Einflußparameter wurde auch der Niederspannungssstoß (Low Voltage Impulse = LVI) über den Hochspannungsteiler gemessen. Ebenso blieb die Abschneidefunkenstrecke als Belastungskapazität angeschlossen, während die Hochspannungsverbindung zum 'großen' Stoßgenerator entfernt war. Bis etwa 550kHz zeigt sich wie in 3.1 eine sehr gute Übereinstimmung, was angesichts der unterschiedlichen Signalpegel und der abweichenden Stoßformen einerseits die Theorie bestätigt, andererseits für das Meßwerterfassungssystem und das Berechnungsverfahren spricht. Die Abweichungen oberhalb 550kHz sind, ebenfalls wie in 3.1, auf Probleme im Zusammenhang mit dem Hochspannungs-Vollstoß (High Voltage Impulse = HVI) zurückzuführen.

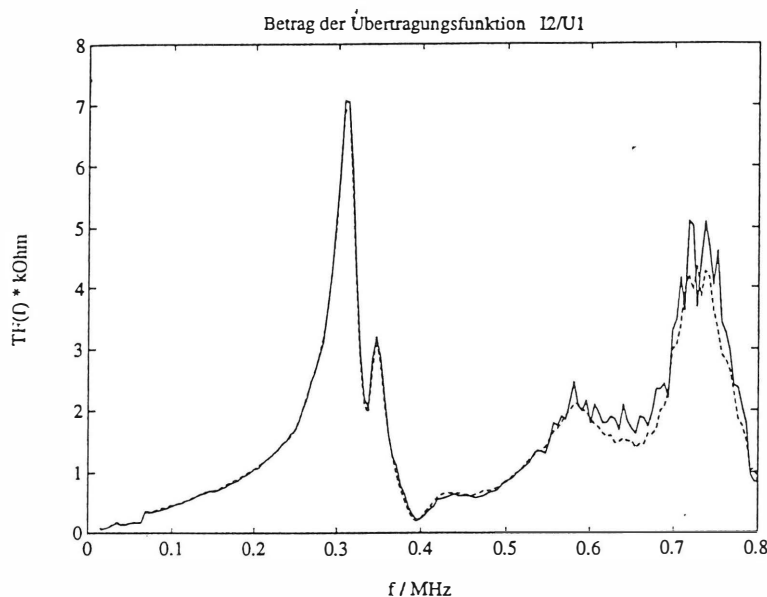


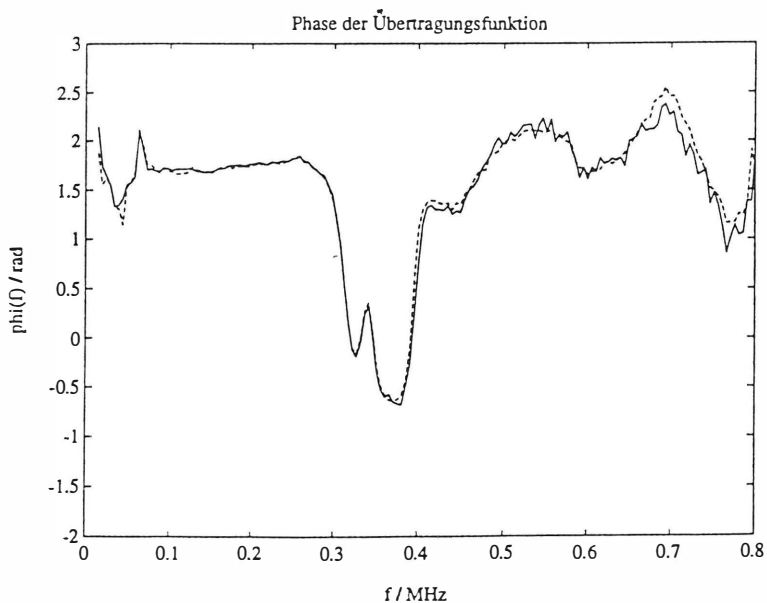
Bild 8

Vergleich Transferfunktion bei Vollstoß mit Hoch- und Niederspannung (HVI + LVI)

HVI -632kV, 1.9 | 46 μ s ———

LVI +500V, 0.4 | 50 μ s - - - - -

'System Uni Stuttgart'



3.3 Vergleich von Transferfunktionen aus Frequenzgangmessungen mittels FFT und kontinuierlicher FRA

Das in 2.2 kurz aufgeführte FFT-Verfahren (Fast Fourier Transform) entspricht dem in 2.4.1 beschriebenen Transferfunktionsverfahren – Signalerzeugung und –applizierung sowie die Meßwertverarbeitung sind also mit der LVI-Methode in 3.2 identisch, jedoch wurden die bei derartigen Niederspannungsversuchen im Regelfalle nicht vorhandenen Geräte Abschneidefunkenstrecke und Hochspannungsteiler einseitig abgeklemmt und die Spannung direkt an der Transformatorklemme 1U gemessen. Das FRA-Verfahren (Frequency Response Analysis) mit Sinusspannung ist in 2.2

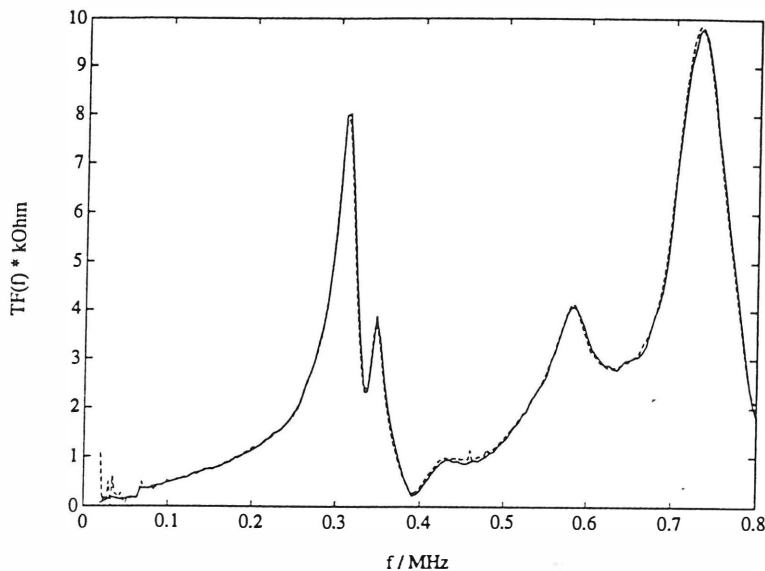


Bild 9

Vergleich Transferfunktion per FFT/LVI- und FRA-Verfahren

LVI +500V, 0,4 | 50µs

FRA <1V, 0,2 – 1000kHz

ausführlich beschrieben. Es wurde ein Netzwerkanalysator mit einer Ausgangsspannung <1V eingesetzt, die Anschlußbedingungen waren die gleichen wie beim FFT-Verfahren. Die vom Netzwerkanalysator ermittelte Frequenzgangkurve wurde mittels Rechner in das FFT/LVI-Diagramm übernommen. Die beiden Kurven in Bild 9 zeigen theoriegemäß eine ausgezeichnete Übereinstimmung von 100kHz bis zur Darstellungsgrenze 800kHz. Nur interessehalber wurden beide Verfahren auch in der praxisfremden Versuchsanordnung mit angeschlossener Funkenstrecke und Spannungsmessung über den Hochspannungsteiler durchgeführt. Bild 10 zeigt wiederum Deckungsgleichheit der beiden Kurven von 100 – 500kHz, die (geringe) Abweichung bei höheren Frequenzen dürfte auf der extrem geringen Eingangsspannung für den Netzwerkanalysator im µV-Bereich beruhen.

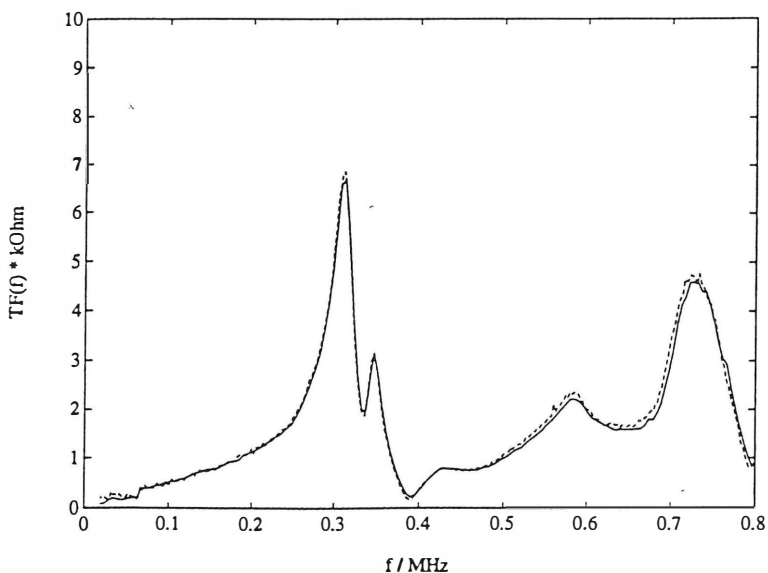


Bild 10

wie Bild 9, jedoch 'Hochspannungskonfiguration' (vergl. Text)

3.4 HIAS 742, Vergleich Vollstoß (FW) – abgeschnittener Stoß (CW)

Die Aufzeichnung der Meßsignale mit dem HIAS erfolgte gleichzeitig mit der Signalaufzeichnung für die Versuche in 3.1. In eher noch stärkerem Maße als dort gilt, daß ein Vergleich der Transferfunktionen (TF) aus Vollstoß und abgeschnittenem Stoß zur Bewertung des Prüfergebnisses nicht praktikabel ist (s. a. / 11 /). Z. B. irritiert eine Stufe in der Flanke der Vollstoß-Transferfunktion bei etwa 330kHz, die in der Transferfunktion des abgeschnittenen Stoßes nicht auftaucht. Außerdem sind Polverschiebungen im Bereich um 600kHz bei diesem defektfreien Transformator nicht plausibel. Man mag darüber spekulieren, ob die üblicherweise kürzere Aufzeichnungszeit bei abgeschnittenen Stößen, und damit verbunden ein ungenügender Informationsgehalt, möglicherweise bei der Bestimmung der TF von ungünstigem Einfluß ist – die Klärung und Behebung derartiger Probleme sehen wir als Anwender jedoch als Aufgabe der Anbieter solcher Systeme an. Es muß allerdings angemerkt werden, daß die Kurven nicht mit der neuesten HIAS-Software erstellt wurden, die aus anderen (formalen) Gründen bei uns nicht für Abnahmeprüfungen eingesetzt werden kann. Eine bereits erfolgte weitere Verbesserung des Transferfunktions-Werkzeugs ist also nicht auszuschließen. Einige zusätzliche Beispiele für TF bei der Stoßspannungsprüfung von Transformatoren sind in 4. zu finden. (/10 /, / 12 /, / 13 /, / 14 /, / 16 /)

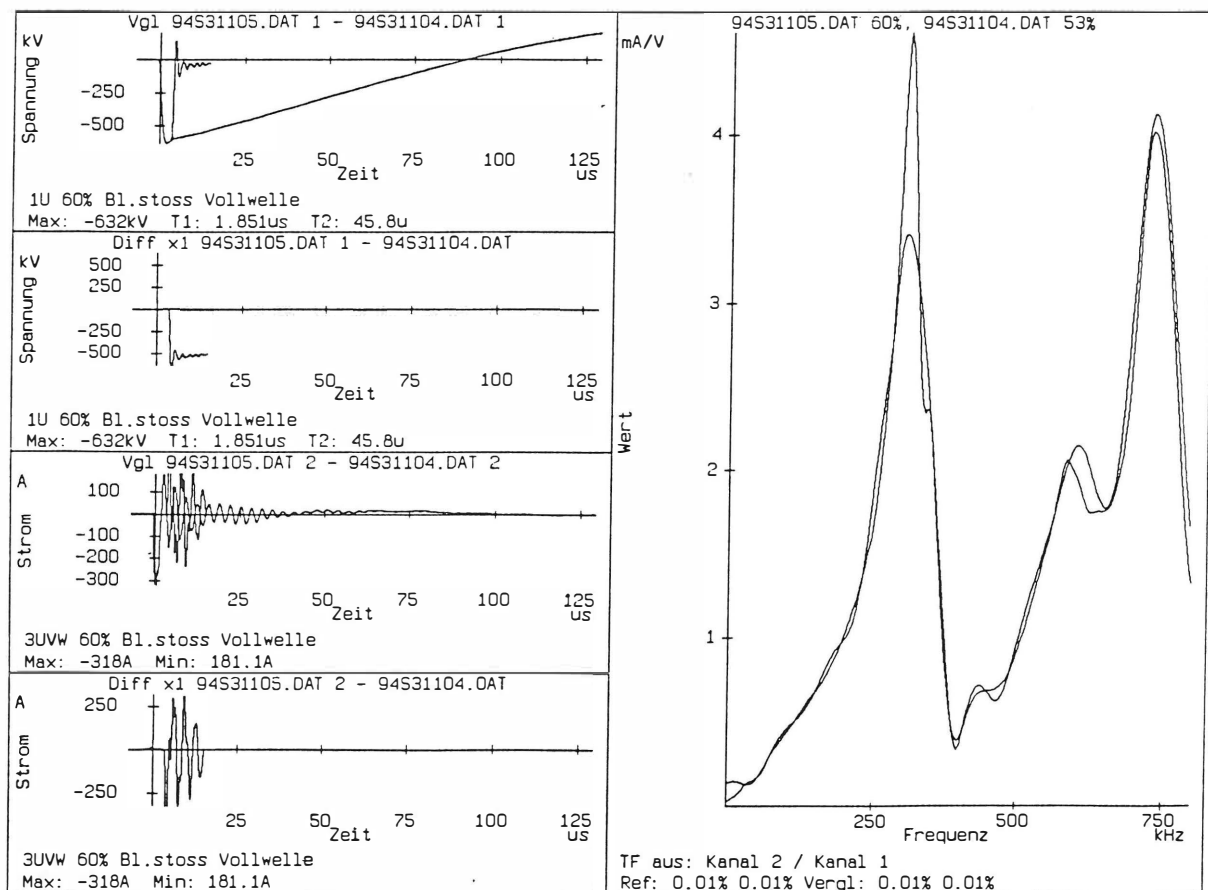


Bild 11 Vergleich Transferfunktion bei Vollstoß (FW) und bei abgeschnittenem Stoß (CW)

FW -632kV, 1.9|46µs; CW -632kV, $T_c = 4.2µs$

System HIAS 742

4. Beispiele für Prüfdefekte oder –unregelmäßigkeiten und deren Auswirkung auf die Transferfunktion

In knapp über fünf Jahren, seit wir bei ABB Transformatoren in Mannheim ein HIAS der Firma HAEFELY TRENCH besitzen (zunächst Typ 741–4, dann 742–4), ereignete sich nur ein Stoßprüfdefekt. Deshalb verfügen wir, keineswegs unerwünscht, über nur wenig direkte 'Erfahrung' im Einsatz der Transferfunktion zur Bewertung von Prüfergebnissen. Die Defektanzeigen waren eindeutig, ebenso konnte in den wenigen anderen Fällen mit Unregelmäßigkeiten in den Meßsignalverläufen die Ursache schnell ohne Hilfe der Transferfunktion gefunden werden. Vom Stoßspannungsgenerator verursachte Probleme aufgrund unsauberer Durchzündens sind übrigens so selten, daß sie als ursprünglicher Einsatzzweck der Transferfunktion praktisch entfallen. Die kurze Zusammenstellung von Beispielen in diesem Kapitel ist deshalb nur als Bestandsaufnahme anzusehen, aus deren Ergebnissen keinerlei allgemeingültige Zusammenhänge und Aussagen abgeleitet werden können.

Die anschließenden Erläuterungen und Bildtexte enthalten folgende Kürzel:

Tr	Transformator
ZU, ZI	Spannungs- und Stromsignale im Zeitbereich
TF	Transferfunktion (Admittanzfunktion)
LI	Blitzstoßprüfpegel FW (in Klammern jeweils für CW, vergl. u.)
FW	Vollwellen-Blitzstoß (Full Wave) mit 100% Prüfpegel
CW	Blitzstoß mit abgeschnittener Welle (Chopped Wave) mit 100% Prüfpegel
RF, RC	entsprechende Blitzstöße mit reduziertem Pegel (meist 50% Prüfpegel, Angabe nur bei mehreren Pegeln innerhalb einer Sequenz, z. B. 50RF, 75RF)
FW1, FW2,..., CW1,...	1., 2.,... Stoß mit dem jeweiligen Pegel innerhalb einer Prüfsequenz

Seit etwa 1980 sind für FW und CW gleiche Prüfpegel üblich (/ 01 / , / 02 /), vorher waren die CW-Prüfpegel ca. 15% höher als die FW-Prüfpegel. Aber auch heute wird noch oft eine Stoßspannungsprüfung 'nach alter Norm' verlangt, wie bei allen hier gezeigten Beispielen aus 1994. Die Prüfsequenz ist (wie nach gültiger Norm) 1xRF, 1xFW, 1xRC, 2xCW, 2xFW.

Trafo 1	3ph Tr 100MVA, 230kV / 31kV, YNyn0(d), 50Hz, LI –950kV (–1090kV) / –170kV (–195kV) 'ohne Befund' = kein Prüfdefekt, keine nichtlinearen Elemente; Stoß auf 1W
Bild 12a	FW1 – FW2 → Übereinstimmung ZU, ZI und TF gut
b	CW1 – CW2 → Übereinstimmung ZU, ZI und TF gut
c	FW1 – CW1 → Abweichung TF FW und CW stark
Trafo 2 (s.a. 3.)	3ph Spar-Tr 240MVA, 275kV / 132kV / 33kV, YNa0d1, 50Hz, LI –1050kV (–1200kV) / –650kV (–750kV) / –170kV (–195kV) 'Widerstand 1' = Varistor + Zusatzwiderstand über Regelwicklung; Stoß auf 2W
Bild 13a	RF1 – FW1 → Abweichung in ZU und ZI deutlich, in TF leicht
b	FW1 – FW2 → Übereinstimmung ZU, ZI und TF gut
c	CW1 – CW2 → Abweichung in ZI (nach Abschneidung) und TF leicht
d	FW1 – CW1 → Abweichung TF FW und CW stark
Trafo 3	3ph Tr 200MVA, 220kV / 110kV / 10kV, YNyn0d5, 50Hz, LI –950kV (–1090kV) / –550kV (–630kV) / –125kV (–145kV) 'Widerstand 2' = Varistor am Schalter über eine Regelwicklungsstufe; Stoß auf 1W
Bild 14a	50RF1 – FW1 → Abweichung in ZU stark, in ZI merklich, in TF leicht
b	75RF1 – FW1 → Abweichung insgesamt geringer
c	FW1 – FW2 → Übereinstimmung insgesamt gut

Trafo 4	3ph Tr 60MVA, 275kV / 33kV, YNd1, 50Hz, LI -1050kV (-1200kV) / -170kV (-195kV)
	'Defekt' = Überschlag über eine Regelwicklungsstufe; Stoß auf 1V
Bild 15a	RF1 - FW1 → Defekt deutet sich bereits an, Abweichung in ZU leicht, in ZI deutlich, in TF merklich
b	CW1 - CW2 → Überschlag bei CW2 löst verfrühte Abschneidung aus, Abweichung in ZU, ZI und TF drastisch
c	FW1 - FW2 → kein Überschlag, jedoch Abweichung in ZU deutlich, in ZI stark, in TF sehr stark

Die Auswirkungen der nichtlinearen Elemente oder des sich anbahnenden Defekts in den gezeigten Beispielen sind in den Spannungs- und/oder Stromsignalen zu erkennen – die TF liefert hier keine eindeutigere Aussage. Wie in 3.4 sind die TF aus Vollstoß und abgeschnittenem Stoß kaum vergleichbar, Störeinflüsse scheinen sich hier verfälschend auszuwirken (Trafo 1, Bild 12), vergl. a. / 11 /. Zur vertrauenswürdigen Beurteilung des Prüfergebnisses nach der TF wird es wohl noch einiger Jahre an praktischer Erfahrung bedürfen. Für eine Abschätzung des zum Vergleich nutzbaren Frequenzbereichs der TF werden einfach zu handhabende Kriterien benötigt, besser noch vom System gelieferte Informationen über die Frequenzgrenzen (s.a. 3.1, 3.4 und / 12 /).

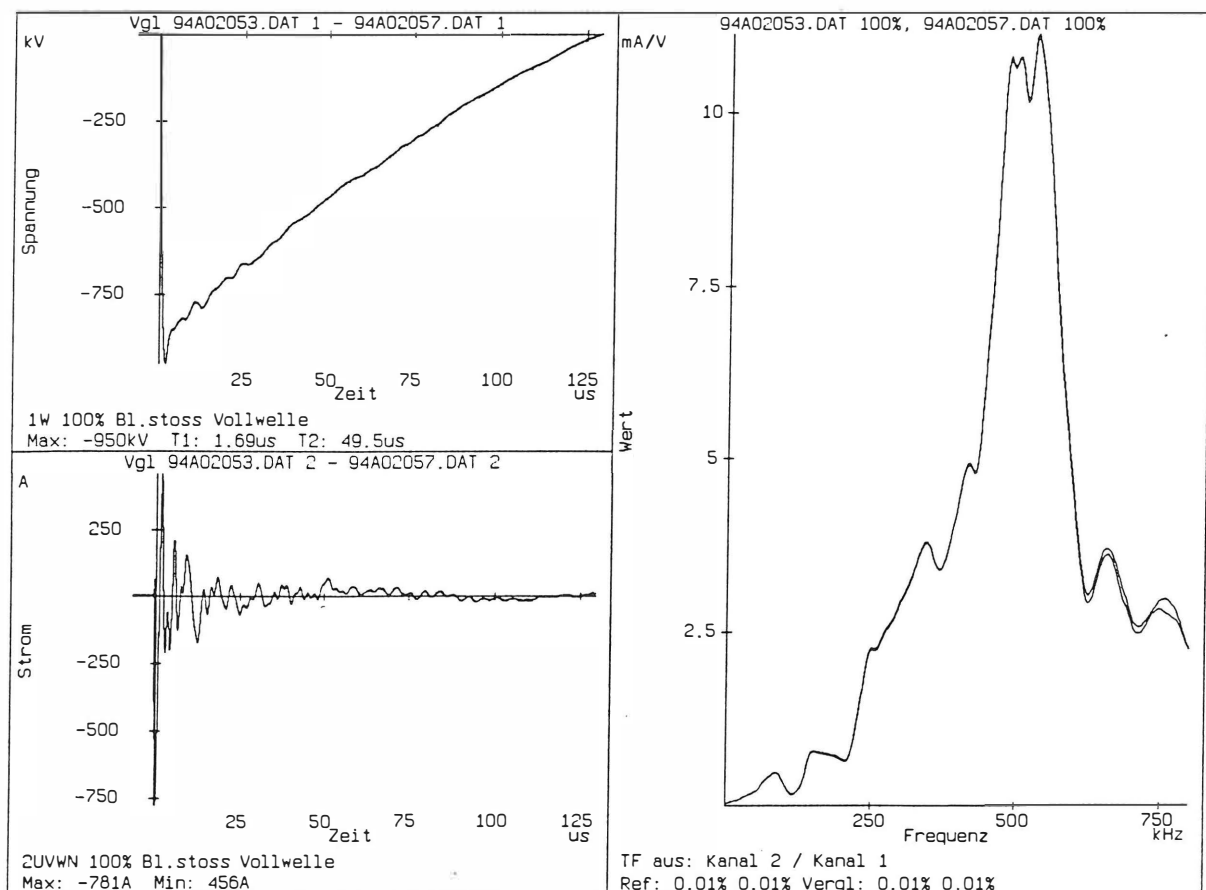


Bild 12a Trafo 1 'ohne Befund' FW1 - FW2 (Erläuterungen s. Text)

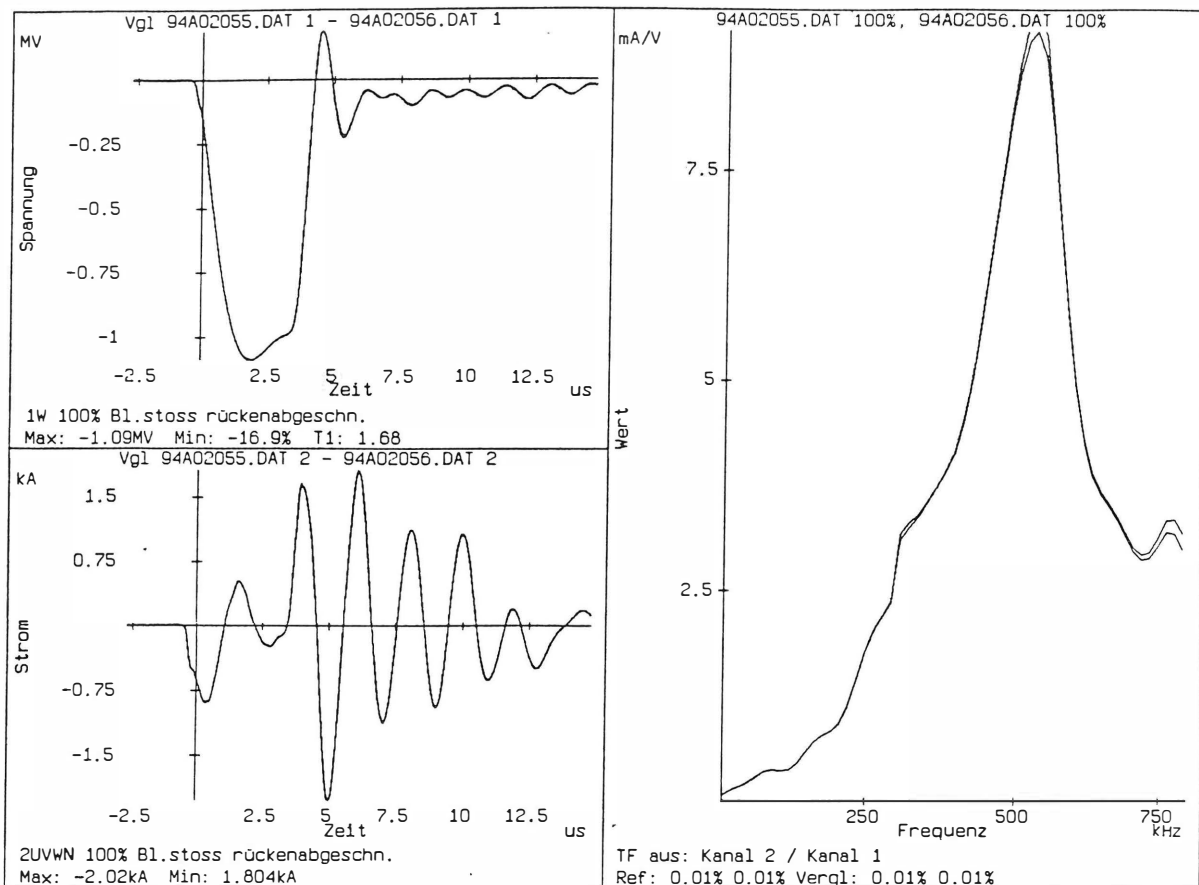


Bild 12b Trafo 1 'ohne Befund' CW1 - CW2

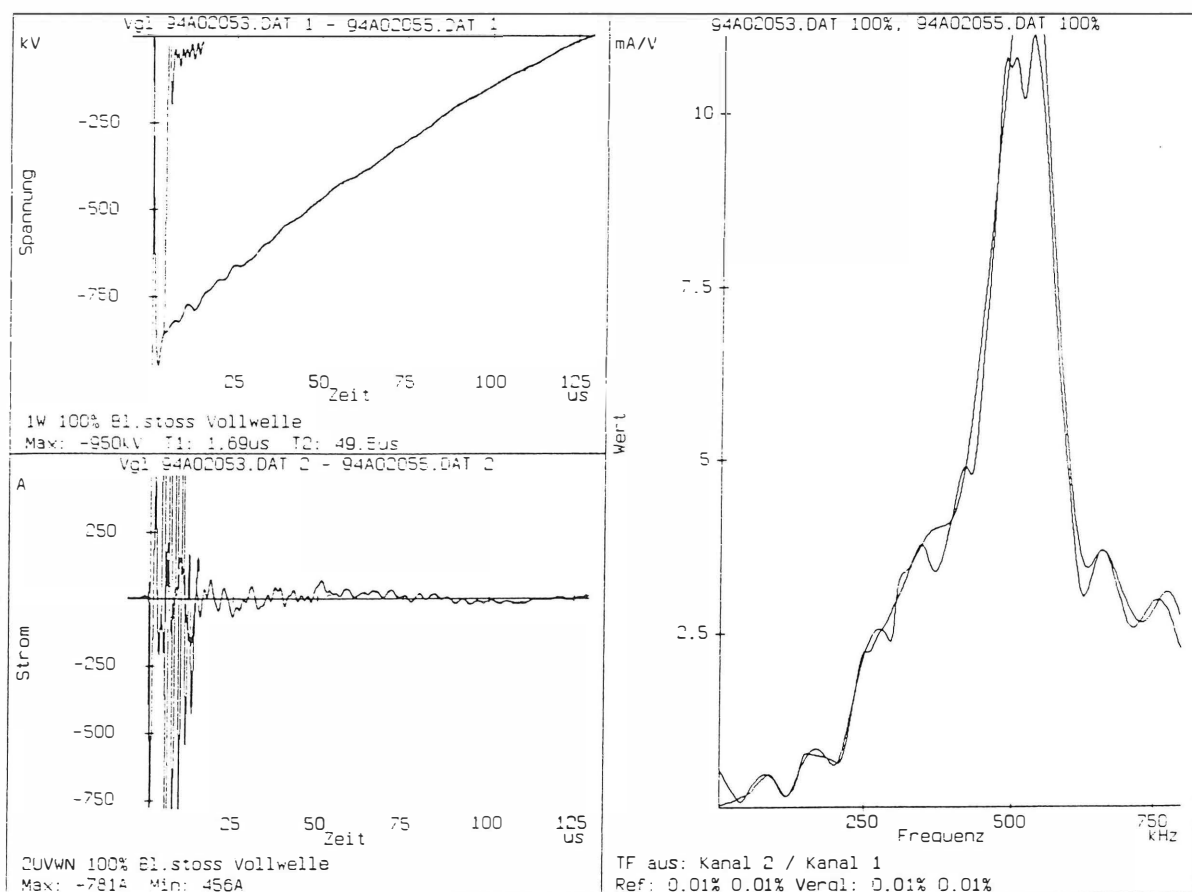


Bild 12c Trafo 1 'ohne Befund' FW1 - CW1

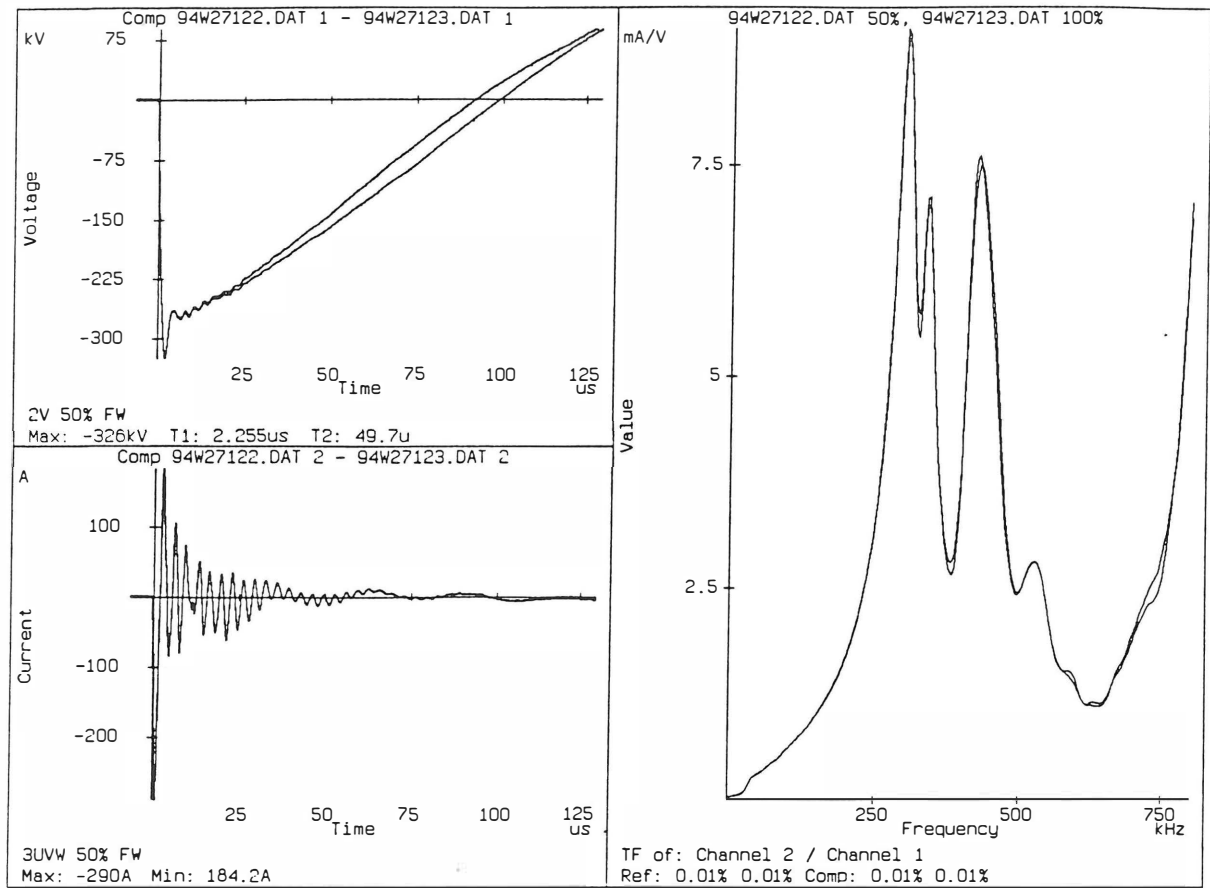


Bild 13a Trafo 2 'Widerstand 1' RF1 - FW1

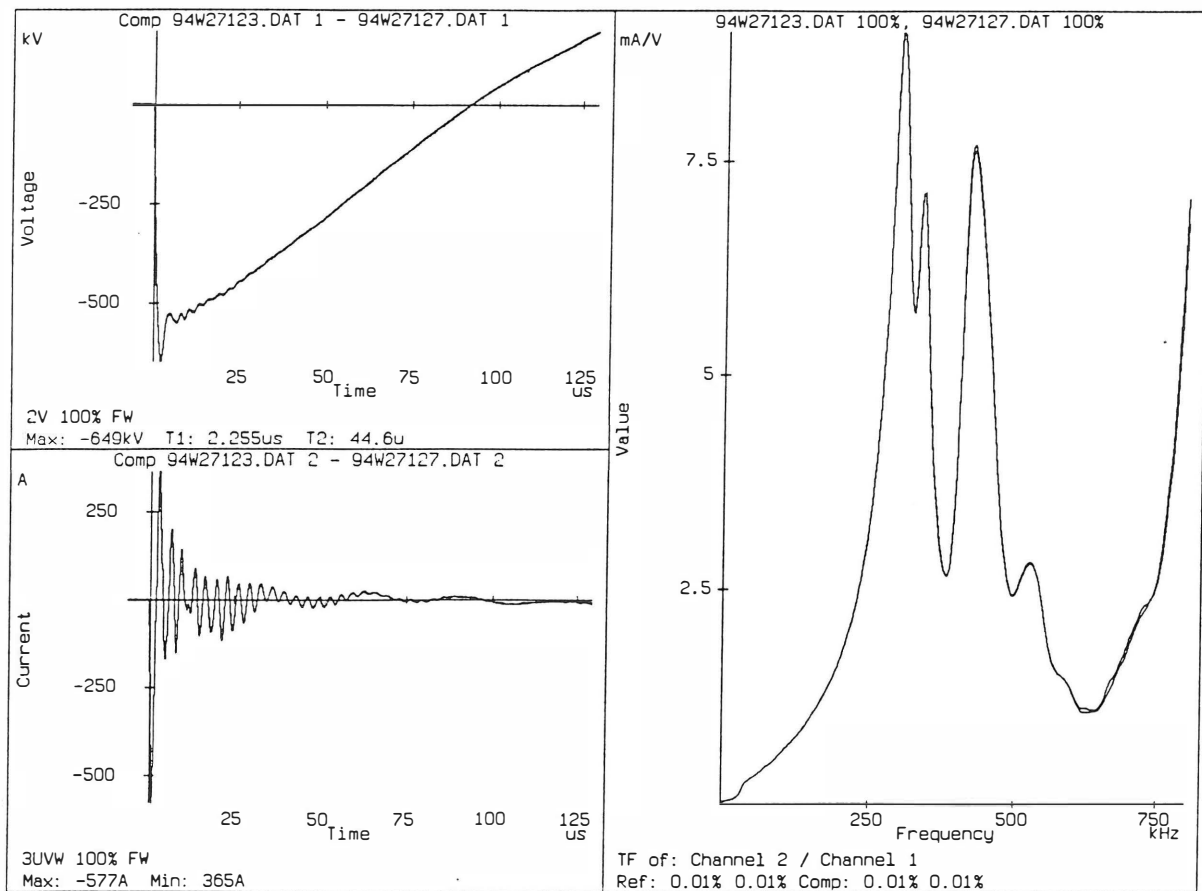


Bild 13b Trafo 2 'Widerstand 1' FW1 - FW2

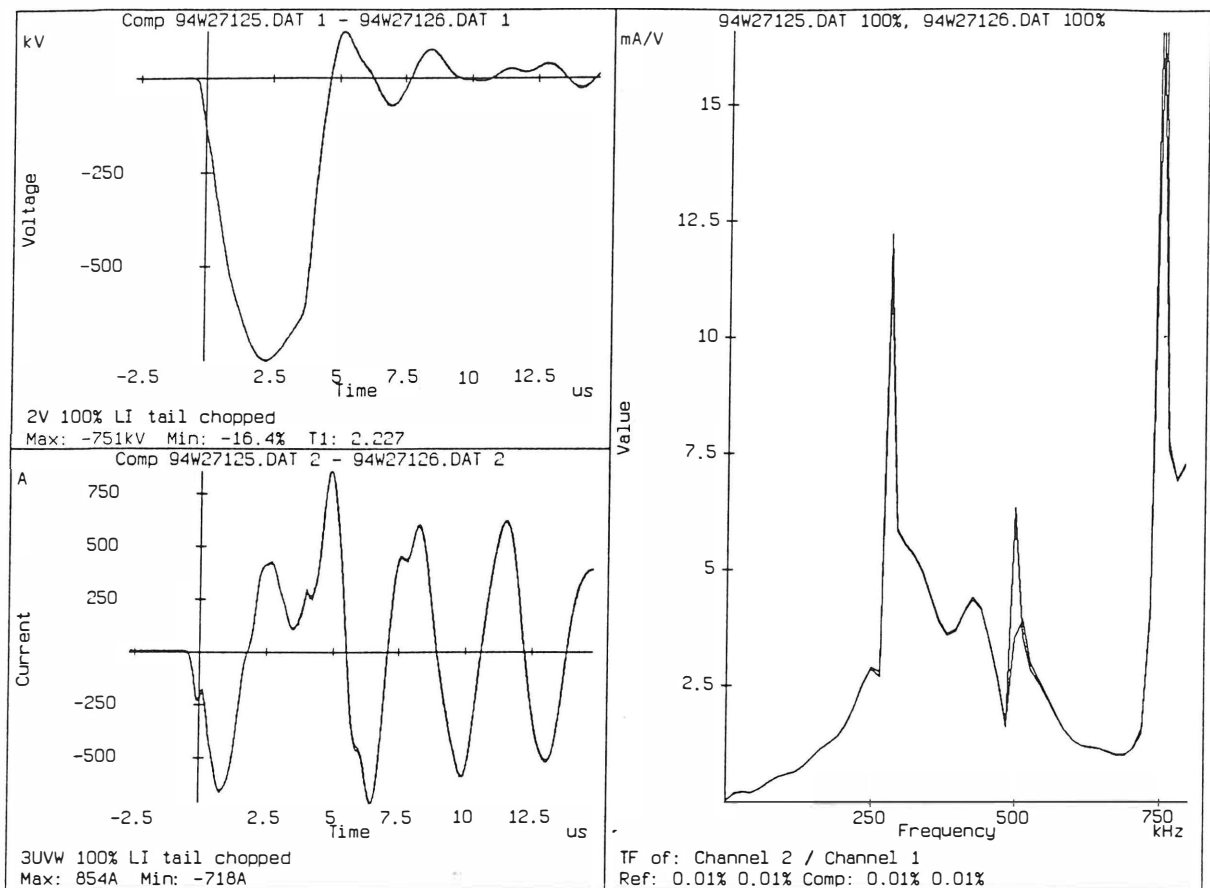


Bild 13c Trafo 2 'Widerstand 1' CW1 - CW2

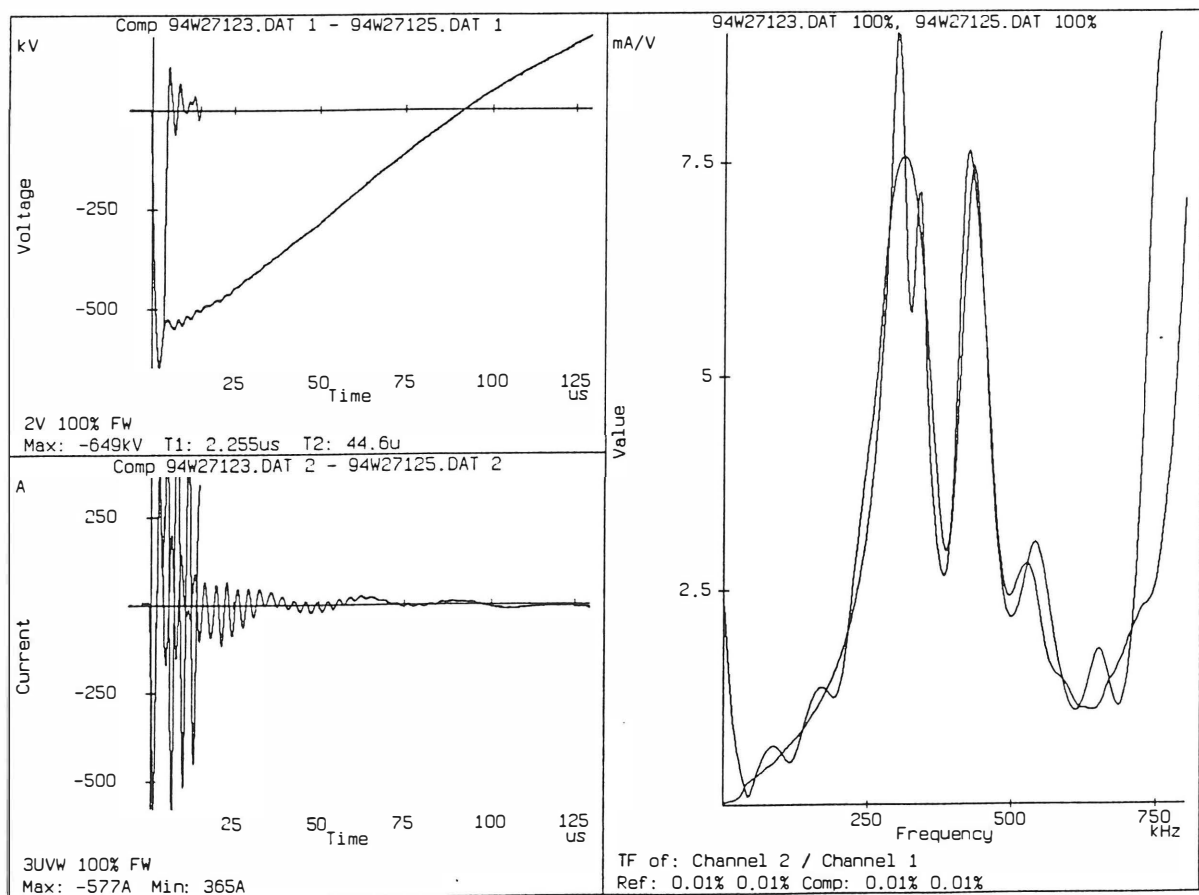


Bild 13d Trafo 2 'Widerstand 1' FW1 - CW1

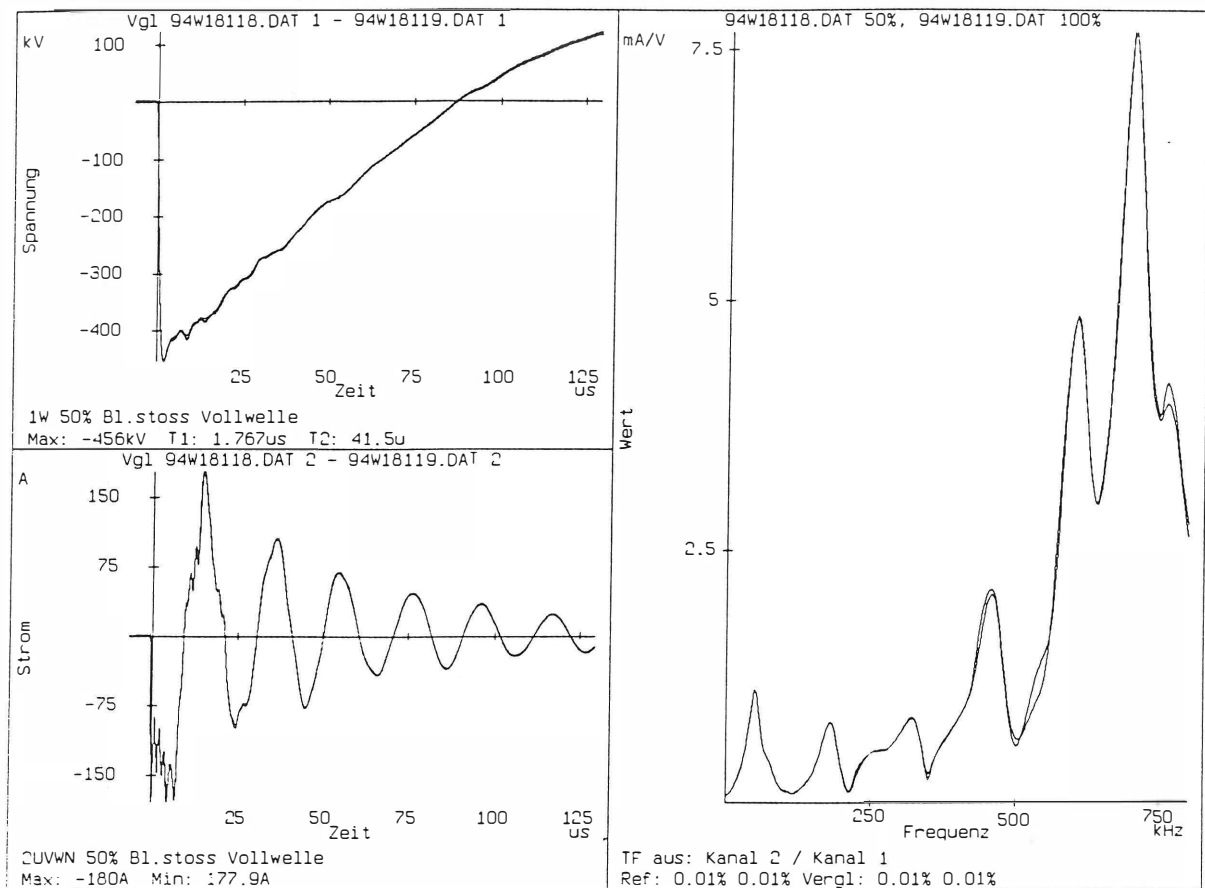


Bild 14a Trafo 3 'Widerstand 2' 50RF1 - FW1

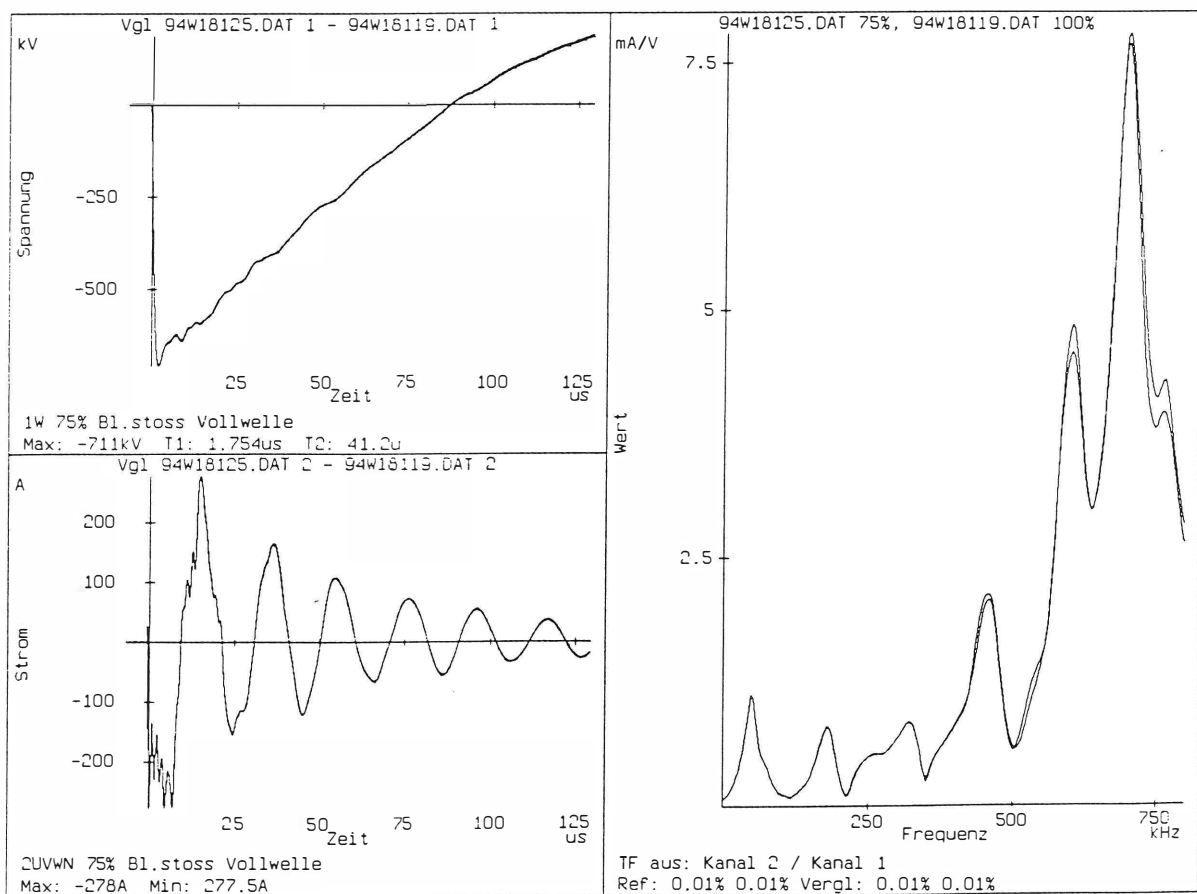


Bild 14b Trafo 3 'Widerstand 2' 75RF1 - FW1

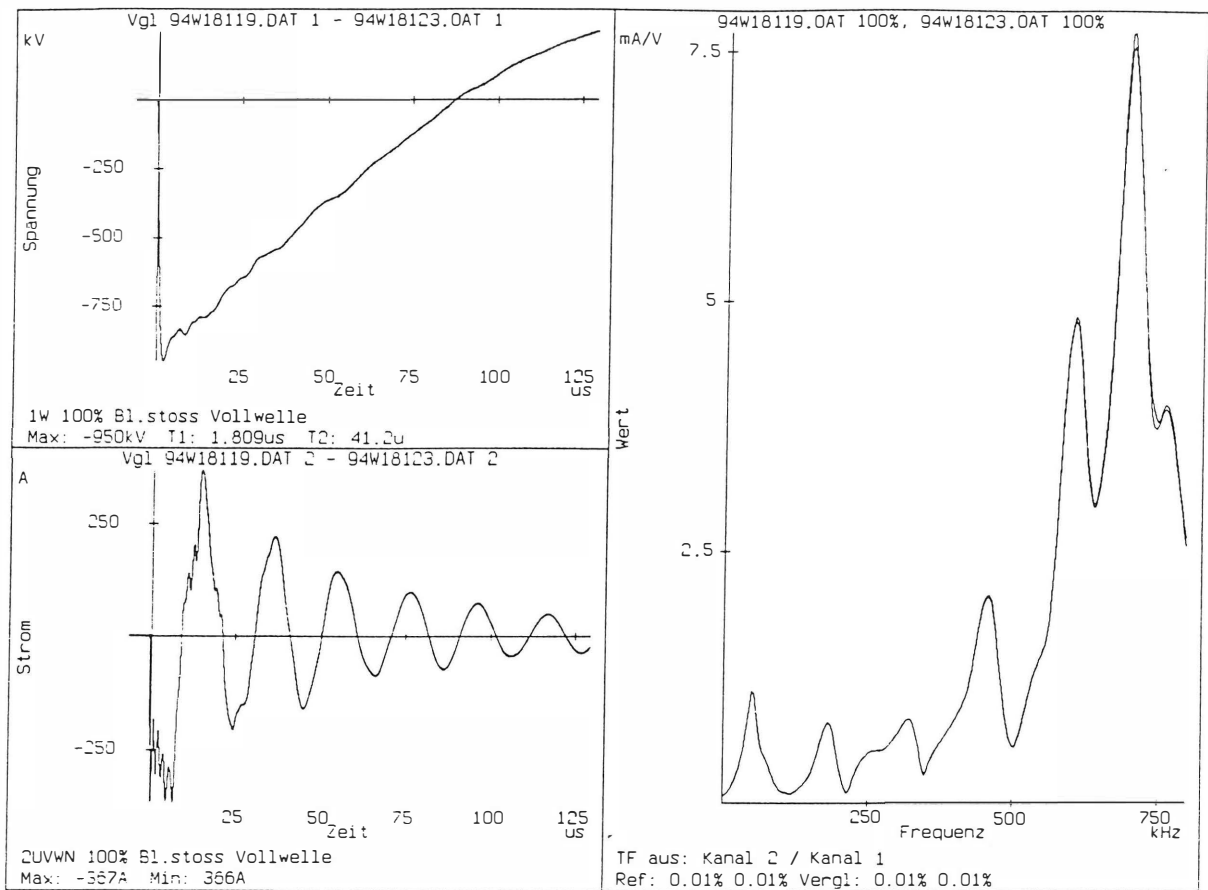


Bild 14c Trafo 3 'Widerstand 2' FW1 - FW2

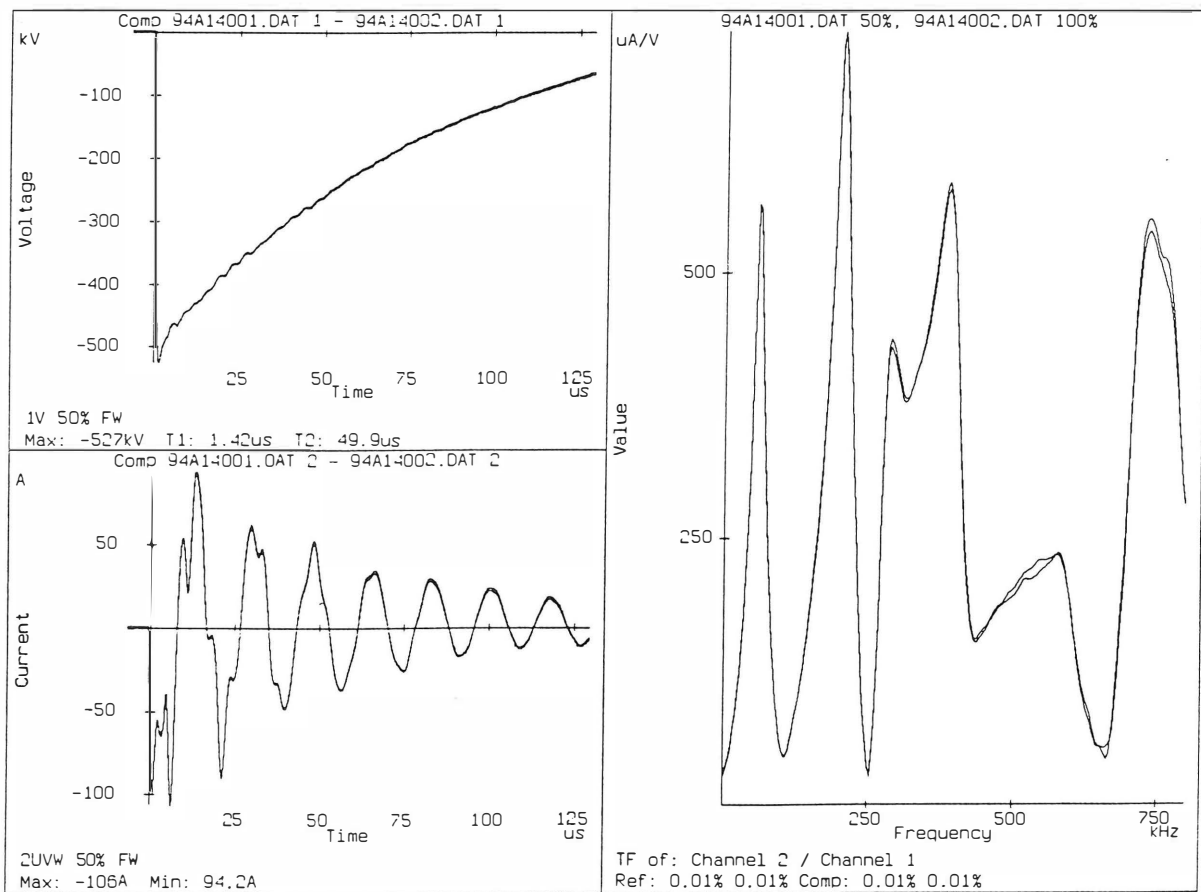


Bild 15a Trafo 4 'Defekt' RF1 - FW1

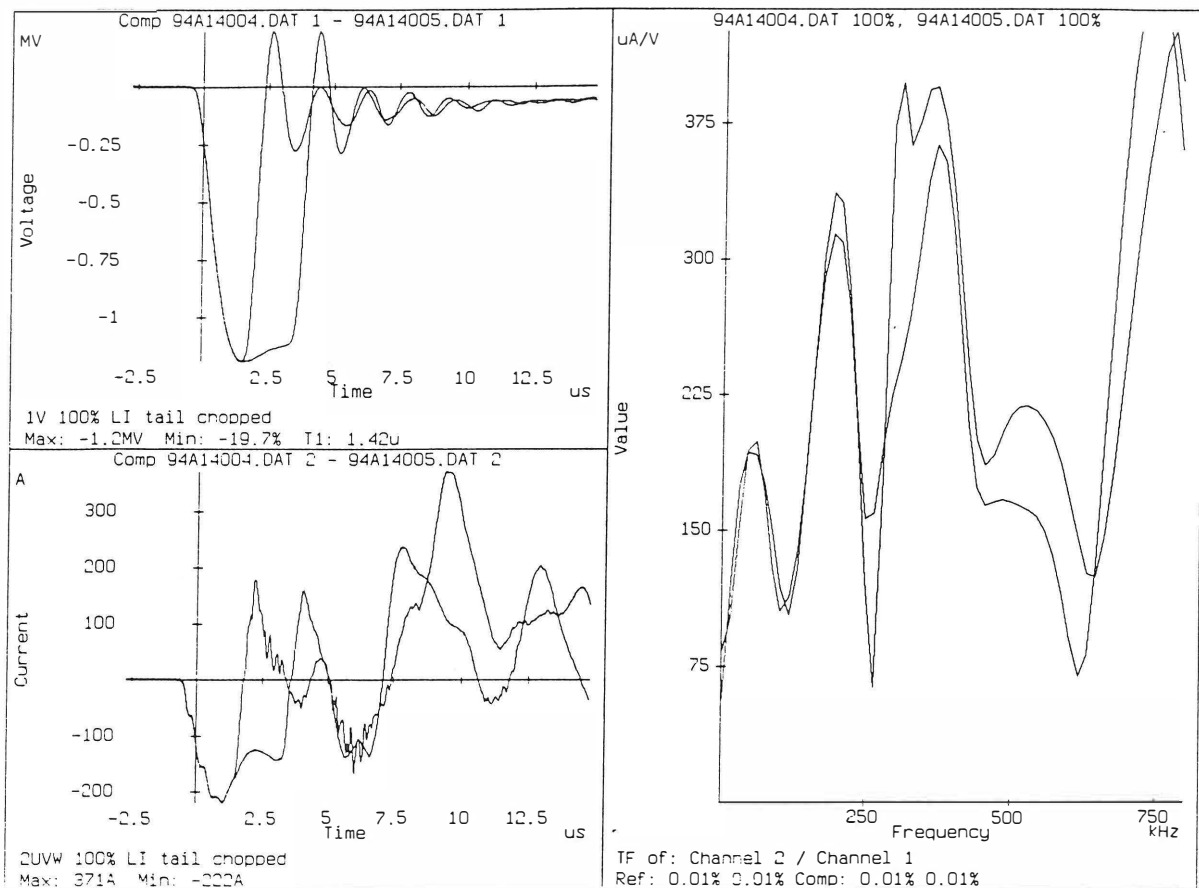


Bild 15b Trafo 4 'Defekt' CW1 - CW2

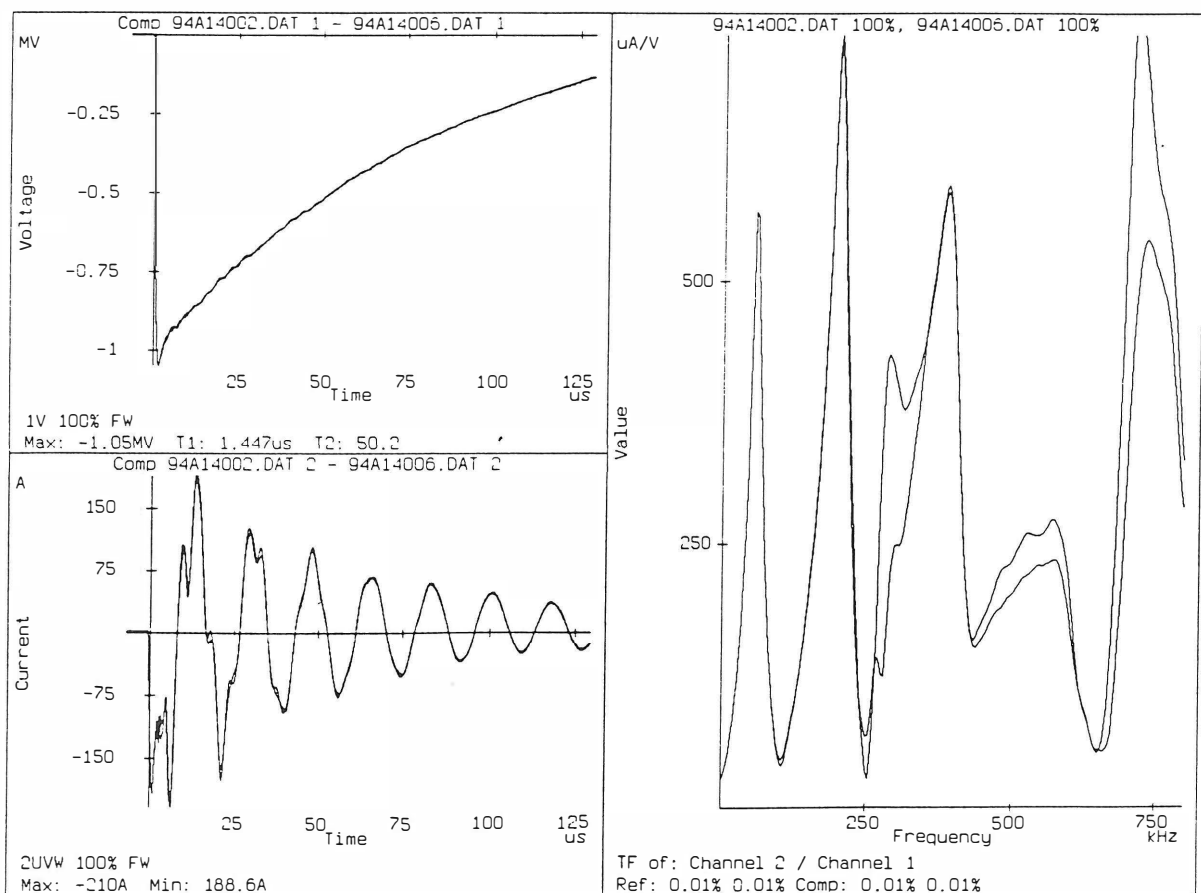


Bild 15c Trafo 4 'Defekt' FW1 - FW2

5. Zusammenfassung

Zunächst ist noch anzumerken, daß die in den vorausgehenden Kapiteln und hier gemachten Aussagen außer für Transformatoren meist in gleicher oder ähnlicher Weise auch für Drosselspulen gelten.

Transferfunktionsverfahren werden bei der Untersuchung und Prüfung von Großtransformatoren mit unterschiedlicher Zielsetzung und in variiertem Ausmaß z. T. seit Jahrzehnten standardmäßig angewendet. Vergleichsweise neu ist der erst vor rund zehn Jahren propagierte Einsatz einer Transferfunktion (TF) zur Beurteilung des Ergebnisses von Stoßspannungsprüfungen.

Diese hinsichtlich ihrer Aussagekraft und Eindeutigkeit mit vielen Vorschußlorbeeren bedachte TF ist zumindest bei der Stoßspannungsprüfung von Großtransformatoren den Nachweis ihrer überragenden Leistungsfähigkeit bislang schuldig geblieben. Den Verfassern dieses Beitrags ist aus eigener Anschauung oder von 'befreundeten Prüffeldern' kein Fall bekannt, bei dem mittels der TF feststellbare Unregelmäßigkeiten oder Defektanzeigen nicht auch in den Zeitfunktionen zu entdecken gewesen wären, und zwar überwiegend deutlicher und eindeutiger interpretierbar. Hingegen hat die Anwendung der TF bei bekannt defektfreiem Transformator aufgrund nicht deutbarer Abweichungen zwischen zwei Stößen schon mehrfach für Verunsicherung gesorgt. Dabei sind sich die Autoren durchaus bewußt, daß ihre noch wenig ausgeprägte Erfahrung mit dem Einsatz der TF in diesem Bereich zu dieser Bewertung beitragen mag.

Als Anwender wünscht man sich bei Problemen in der Benutzung der TF manchmal eine etwas direkter auf die Prüfpraxis eingehende Unterstützung seitens der Anbieter solcher Systeme. Durchaus gutgemeinte Ratschläge orientieren sich nicht selten einseitig an den Gegebenheiten in Forschungs- und Entwicklungs-Prüffeldern, die sich von den durch die Größe der Objekte, Transport- und Anschlußmöglichkeiten, Forderungen der Kunden und Termine diktierten Bedingungen in Fertigungs-Prüffeldern z. T. ganz gravierend unterscheiden können – nicht zuletzt für solche Prüffelder ist die TF schließlich als Hilfsmittel gedacht! Auch ist ein in die Software integriertes Werkzeug zu fordern, das automatisch an die Anwendung der TF gekoppelt den für eine brauchbare Aussage nutzbaren Frequenzbereich eingrenzt – hier scheinen sich allerdings erste Schritte abzuzeichnen (/ 16 /).

Um die TF bei der Beurteilung des Prüfergebnisses von Stoßspannungsprüfungen an Großtransformatoren zu einer vollwertigen Alternative, oder gar zu einem besseren Ersatz, für den visuellen oder apparativen Vergleich der Meßsignale im Zeitbereich zu machen, wird es noch einiger Jahre an Anwendungspraxis bedürfen. Da Großtransformatoren einerseits zum Glück recht selten von Stoßspannungs-Prüfdefekten ereilt werden, andererseits die Durchführung von Grundlagenversuchen in diesem Bereich aus Kosten- und Termingründen nicht praktikabel ist, kann der Aufbau einer Fallsammlung oder Datenbank 'typische Einflußgröße – typische Anzeichen in der TF' beim einzelnen Hersteller sehr lange Zeit in Anspruch nehmen. So könnte ein Informationsaustausch auf diesem Gebiet zwischen verschiedenen Herstellern für alle von Vorteil sein.

Während sich die TF im Bereich Prüfung mit vielen Jahrzehnten Erfahrung in der Beurteilung der Spannungs- und Strom-Meßsignale konfrontiert sieht, betritt sie mit ihrer Anwendung in der Betriebsüberwachung von Transformatoren Neuland (Schlagworte On-line-, Monitoring, Diagnosis). So wäre es nicht überraschend, wenn die TF auf diesem Gebiet früher eine wichtige oder dominierende Rolle erlangen würde, als bei der Werks-Stoßspannungsprüfung.

6. Schrifttum

- / 01 / IEC 76–3 (1980) Power transformers – Insulation levels and dielectric tests
- / 02 / IEC 722 (1982) Guide to the lightning impulse and switching impulse testing of power transformers and reactors
- / 03 / H. Wolf: Lineare Systeme und Netzwerke. 2. Auflage 1985; SPRINGER-Verlag, Heidelberg
- / 04 / P. Glaninger: Modale Parameter der elektrischen Eigenschwingungen von Transformatoren. ETZ Archiv 6(1984)12, S. 399–405
- / 05 / E. Dick, C. Erven: Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis. IEEE Trans. PAS 97(1978)6, pp. 2144–2153
- / 06 / N. Trinh, J. Aubin, L. Bolduc: Evaluation of the Dielectric and Short Circuit Capabilities of naturally aged Power Transformers. IEEE Trans. PAS 103(1984)1, pp. 109–120
- / 07 / Kurzschlußprüfungen an einem 50MVA BBC-Transformator
Report of Performance No 138–85, KEMA, Arnhem, NL; ABB Transformatoren, Mannheim
- / 08 / R. Malewski, B. Poulin: Digital Monitoring Technique for HV Impulse Tests. IEEE Trans. PAS 104(1985)11, pp. 3108–3116
- / 09 / R. Malewski, B. Poulin: Impulse Testing of Power Transformers using the Transfer Function Method. IEEE Trans. PD 3(1988)2, pp. 476–489
- / 10 / C. Josephy: HIAS – Ein hochauflösendes Impulsauswertesystem, Erfahrungen der Geräteentwicklungen. Dokumentation 5. HAEFELY Symposium Stuttgart (1992–03–25/26), S. 3.2.1–3.2.8; HAEFELY TRENCH, Basel, CH
- / 11 / R. Maier: Erfahrungen mit zwei HIAS-Meßsystemen bei der Stoßspannungsprüfung von Transformatoren. Dokumentation 5. HAEFELY Symposium Stuttgart (1992–03–25/26), S. 3.3.1–3.3.11; HAEFELY TRENCH, Basel, CH
- / 12 / T. Leibfried: Möglichkeiten und Grenzen der Transferfunktion. Dokumentation 5. HAEFELY Symposium Stuttgart (1992–03–25/26), S. 3.5.1–3.5.22; HAEFELY TRENCH, Basel, CH
- / 13 / T. Leibfried, K. Feser, G. Hengge, P. Kemm: Beurteilung der Stoßprüfung und On-line-Überwachung von Transformatoren mit Hilfe der Transferfunktion. ETG-Fachbericht 47(1993), S. 169–173; VDE-Verlag, Berlin
- / 14 / E. Hanique: A Transfer Function is a reliable Tool for Comparison of Full and Chopped Lightning Tests. IEEE Trans. PD 9(1994)3, pp. 1261–1266
- / 15 / T. Leibfried: Einsatz der Übertragungsfunktion zur On-line-Überwachung von Transformatoren. Dokumentation 7. HAEFELY TRENCH Symposium Stuttgart (1995–03–22/23); HAEFELY TRENCH, Basel, CH
- / 16 / A. Claudi: Beurteilung der Störsicherheit von Impulsmessungen mit der Kohärenzfunktion. Dokumentation 7. HAEFELY TRENCH Symposium Stuttgart (1995–03–22/23); HAEFELY TRENCH, Basel, CH