

# FEHLERORTUNG MITTELS TRANSFERFUNKTION FÜR DIE STOSSPRÜFUNG VON TRANSFORMATOREN (aus [\*)]

D.Tschudi, ABB Sécheron S.A., Schweiz

## ABSTRAKT

Messungen an einem 500 kVA Transformator sind unternommen worden, um den Einfluss von Fehlerort auf die Transferfunktion zu evaluieren. Dabei wurden (sog.) DSP-Techniken (Digital Signal Processing = digitale Signalverarbeitung) verwendet, einerseits um Messfehler zu verringern und andererseits um die Gültigkeit dieser Messungen abzuschätzen.

Diese digitalen Messmethoden und Analysetechniken führen nicht nur zu einer Verbesserung des Blitzstosstests, sondern sie können auch eine Beschleunigung der Fehlerortung mit sich bringen. Damit werden kostbare Zeit und Material eingespart.

## EINFÜHRUNG

Der Blitzstosstest ist ein Teil der Abnahmeprüfung eines Hochleistungstransformators. Während dieser Prüfung wird die Eingangsspannung des Transformators (mittels eines Hochspannungsteilers) und dessen Ausgangsstrom (mittels eines Shunts) an einer entsprechenden Klemme (z.B. Sternpunkt) gemessen (Fig.1). Blitzstösse von 50 und 100% BIL (Basic Insulation Level) werden appliziert und die daraus resultierenden Strom- oder Spannungskurven miteinander verglichen. Eine Änderung in Strom- oder Spannungskurven kann auf einen Defekt im Transformator hinweisen.

Heutzutage lassen sich solche Testdaten numerisch aufzeichnen, nachfolgend wird damit eine präzisere Auswertung möglich [1]. So kann z.B. die Transferfunktion des Transformators, d.h. der Quotient von Ausgangsstrom- und Eingangsspannungs-spektrum durch Dekonvolution ermittelt werden [2]. Die Superposition der zwei Transferfunktionen (entsprechend 50 und 100% BIL) hilft, während der Prüfung entstandene Fehler zu erkennen. Tritt nun während des Impulstests ein Wicklungs- oder Windungskurzschluss auf, so verschieben sich gewisse Pole (auch als "Resonanzen" bezeichnet) gegenüber der entsprechenden "fehlerfreien" Transferfunktion oder neue Pole werden sichtbar. Eine Amplitudendifferenz eines bestimmten Poles hingegen kann als Resultat einer Teilentladung interpretiert werden.

Die Testdaten, digitale Aufzeichnungen von Eingangsspannung und Ausgangsstrom sowie die entsprechenden Transferfunktionen beinhalten nicht nur die Antwort auf die Frage, ob ein Fehler aufgetaucht ist, zusätzlich können sie dazu beitragen, einen solchen Defekt im Innern des Transformators zu lokalisieren.

Ein Vergleich der Ausgangsströme kann in gewissen Fällen, mit Hilfe eines Wanderwellenansatzes [4], zur Ortung des Fehler führen, aber nicht jeder Wicklungstyp (z.B. verschachtelte Wicklungen) eignet sich dazu. Deshalb wird die Transferfunktion verwendet, weil sie sich bei Fehlern charakteristisch ändert und diese Abweichungen vom Fehlerort abhängig sind.

## MESSUNGEN

Defekte im Innern eines Transformators während des Blitzstosstests sind selten. Auch wenn man Zugang zu der weltgrössten Datenbank (Aufzeichnungen von solchen Prüfungen in Firmen von ABB) hat ist es schwierig, Schlussfolgerungen allein daraus zu ziehen.

Deshalb wurde ein 500 kVA (20kV/400V) 3-Phasen Verteiltransformator ausgewählt, um die Einflüsse von Fehlerart auf die Transferfunktion zu untersuchen.

Die Hochspannungswicklung dieser Trockentrafos besteht aus 12 Scheibenspulen. Die Eingangs- und Ausgangsklemme zusammen mit 5 aussenliegenden Verbindungen der Scheiben erlauben es die Wicklung an verschiedenen Stellen kurzzuschliessen (Fig.1).

Die Messungen bestanden darin 1.2/50  $\mu$ s-Impulse von ca. 500V zu applizieren. Ein RTD710A A/D-Wandler zeichnete jeweils paarweise Eingangsspannung (mittels einer Sonde) und

Ausgangsstrom (durch einen  $10\Omega$  Shunt) auf. Dann wurden die entsprechenden Transferfunktionen berechnet (Fig.2).

Figur 2 zeigt das hauptsächlich induktive Verhalten des Trafos im niederen Frequenzbereich ( $< 60\text{kHz}$ ) und eine kapazitive Charakteristik oberhalb  $200\text{ kHz}$ .

Defekte wurden dann simuliert, indem eine oder mehrere Scheiben der Wicklung durch einen Kurzschlussbügel überbrückt wurden. Figur 3 zeigt die Magnituden der entsprechenden Transferfunktionen, wobei nur die ersten  $500\text{kHz}$ , in welchen sich die entscheidenden Pole ("Resonanzen") befinden, wiedergegeben sind.

Die erste Zeile enthält die "1-Scheiben-Fehler", Kurve 1 entspricht so dem Kurzschluss zwischen Klemme 1 und 2 (siehe Fig.1), Kurve 2 entspricht dann dem Kurzschluss zwischen 2 und 3 usw. Die zweite Zeile enthält die "2-Scheiben-Fehler" in der selben Reihenfolge wie oben. Schliesslich ist rechts unten die Transferfunktion des intakten Transformators wiedergegeben.

Während all dieser Messungen wurden die nebenliegenden Wicklungen und die Unterspannungswicklungen kurzgeschlossen und geerdet.

## DSP-TECHNIKEN

Um aus einer Eingangsspannung und einem Ausgangsstrom eine Transferfunktion zu berechnen, benötigt man sogenannte digitale Signalverarbeitungstechniken. Eine Beschreibung der hierzu benützten Algorithmen (Dekonvolution) findet man z.B. in [5].

Rauschen, produziert oder induziert im Messkreis, sowie Aufzeichnungsparameter (Abtastrate, Messzeit usw.) beeinflussen Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Messung und Rechnung.

Die nachfolgend erwähnten DSP-techniken helfen diese Fehler zu verringern und auch die Exaktheit der Transferfunktion abzuschätzen.

Werden während eines Impulstests mehrere Aufzeichnungen gemacht, so kann eine Mittelung der Daten (sog. "averaging") im Zeitbereich zu einer Verringerung des Rauschen führen. Dabei ist aber grosse Vorsicht geboten, da eine kleine Verschiebung des Triggermoments (jitter) zwischen den Datenpaaren unkorrigierbare Fehler zur Folge haben wird.

Dieser Nachteil ist nicht vorhanden für die Frequenzmittelung der Daten. Nach [3] lässt sich eine Transferfunktion durch :

$$T(f) = \frac{\text{Ave}(G_{yx})}{\text{Ave}(G_{xx})}$$

berechnen, wobei  $G_{yx}$  das "cross power"-Spektrum,  $G_{xx}$  das Eingangs-"power"-Spektrum (der Transienten  $x$  und  $y$ ) und  $\text{Ave}()$  die Mittelung von Frequenzdaten darstellt. Figur 4 zeigt die damit erreichte verbesserte Genauigkeit der Transferfunktion. Drei Datenpaare (des "gesunden" Transformators) wurden zu dieser Rechnung verwendet.

Die gleichen drei Datenpaare wurden dazu verwendet, die Zuverlässigkeit der Transferfunktion zu überprüfen.

Ein Mass dafür, inwieweit der Ausgangsstrom von der Eingangsspannung und nicht von Rauscheinflüssen abhängt ist durch die Kohärenzfunktion  $\gamma^2$  gegeben. Diese ist definiert durch :

$$\gamma^2 = \frac{\text{Ave}(|G_{yx}|^2)}{\text{Ave}(G_{xx}) * \text{Ave}(G_{yy})}$$

wobei  $G_{yy}$  das Ausgangs-"power"-Spektrum ist.

Eine erste Abschätzung von  $\gamma^2$  aus einer Aufzeichnung von  $y(t)$  and  $x(t)$  ergibt immer eins. Mittelt man jedoch mehrere Aufzeichnungen, so tendieren rauschverzernte Datenpunkte gegen Null, rauschfreie Datenpunkte bleiben eins. Die Figur 5 illustriert diese Eigenschaft und zeigt konkret, dass eine Analyse der Transferfunktion oberhalb  $2\text{ MHz}$ , z.B. mit dem

Ziel der Fehlerortung den Einfluss des Rauschens in Betracht ziehen muss. Hingegen unter 1Mhz ist die Dekonvolutionsrechnung weitgehend rauschunabhängig und zuverlässig, d.h. jeder Funktionspol resultiert aus einer impulsinduzierten Schwingung des Transformators oder des entsprechenden Messkreises.

Eine solche Funktion stellt also einen nützlichen Zusatz zum üblichen Blitzstosstest dar, falls die Transferfunktionsmethode angewendet wird.

## FEHLERORTUNG

Da die Transferfunktion, wie im weiteren gezeigt wird, charakteristische Änderungen je nach Fehlerart und -ort aufweist, ist sie ein hilfreiches Mittel um Defekte, die während der Stossprüfung auftreten zu lokalisieren.

Die in diesem Artikel aufgeführten Messungen sind demnach ein erster Schritt um diese Zusammenhänge zu ergründen. Die simulierten Kurzschlüsse entsprechen zwar nicht ganz einem richtigen Fehler, welcher von transienter Natur ist (Lichtbogen), aber sie stellen einen "Endzustand" des Defekts dar.

Im folgenden werden die Kurven in Figur 3 besprochen.

Das ganze Bild zeigt eine gewisse Symmetrie (Kurve 1 = Kurve 6, 2 = 5, usw..). Die Ursache dafür ist die symmetrische Konstruktion des Transformators. Ein Kurzschluss zwischen Anzapfung 1 und 3 führt also zur selben Transferfunktion wie einer zwischen 5 und 7.

Unterhalb 60 kHz zeigt der 500 kVA Transformator ein fast reines induktives Verhalten. Die Berechnung dieser Induktivität ( $L=1/(2\pi*f*y_i)$ , mit  $y_i$  als Amplitudenwert der Transferfunktion) für die 20 ersten Datapunkte der Kurven 0 bis 20 zeigt die erwartete Abnahme in Funktion der Anzahl kurzgeschlossener Scheibenspulen. Diese Induktivität nimmt aber nicht linear ab, weil in ihrem Wert ebenfalls Gegeninduktivitätsanteile enthalten sind. Eine ähnliche Abnahme zeigt sich für Fehler in Wicklungsmitte gegenüber solchen am Wicklungsende (bei gleicher Anzahl kurzgeschlossener Scheiben).

Die nächste Information erhält man durch die Betrachtung des "hochfrequenten" Verhaltens (über 500 kHz) des Transformators. Dieser Teil der Frequenzcharakteristik wird durch die Seri kapazität der Wicklung bestimmt. Da die Transferfunktion in diesem Bereich bereits etwas vom Rauschen beeinträchtigt wird wurde es unterlassen, Werte dieser Kapazität zu berechnen. Der generelle Trend zeigt hier die erwartete Zunahme der Kapazität, bei Erhöhung der Anzahl kurzgeschlossener Scheibenspulen.

Detailliertere Informationen bringt eine Analyse der einzelnen Pole der Kurven. Eine erste Betrachtung der Figur 3 zeigt eine gewisse Ähnlichkeit zwischen den Kurven 0, 3(4), 9, 13(14) und 17(18). Deren erste zwei Maxima befinden sich jeweils an gleicher Frequenz. Die benachbarten zwei Minima (das zweite ist ausgeprägter) bestimmen den Fehler, da sie an verschiedenen Frequenzen liegen.

Eine physikalische Interpretation dieser Tatsachen kann zur Zeit noch nicht gegeben werden. Weitere Untersuchungen sind nötig, um Erfahrung mit diesem Typ von Fehlerortung zu sammeln.

Simulationen von richtigen Blitzstossfehlern (Lichtbogen) an diesem 500 kVA Transformator sind im Gange und werden zur Lösung dieses Problems beitragen .

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Transferfunktion eines Transformators ist eine äusserst brauchbare Charakteristik um Fehler während der Blitzstossprüfung zu orten. Messungen an einem 500 kVA Transformer haben erste typische Änderungen der Transferfunktion gezeigt, abhängig von den verschiedenen Fehlerorten.

Um solche Blitzstoss-Fehler genau zu lokalisieren ist es notwendig, die Transferfunktion so präzise wie möglich zu berechnen. Die hier erwähnten DSP-techniken tragen dazu bei und sollten, falls nötig, angewandt werden.



Ein Impuls-Auswertesystem wie HIAS sollte demnach so konzipiert sein, dass seine Software beliebig erweiterbar ist, dass z.B. weitere DSP-techniken hinzugefügt werden können, um damit Schritt halten zu können mit neuesten Erkenntnissen.

## BIBLIOGRAPHIE

- [\*] D.Tschudi, A.Germond, "Transformer Impulse Test Failure Location Using DSP Techniques", International Symposium on Digital Techniques in High-Voltage Measurements, Toronto, 1991
- [1] R.Malewski, B.Poulin, "Digital Monitoring Technique for HV Impulse Test", IEEE-PAS, No.11, Nov.1985
- [2] R.Malewski, B.Poulin, "Impulse Testing of Power Transformer Using the Transfer Function Method", IEEE-PWRD, Vol.3, No.2, Apr.1988
- [3] P.R.Roth, "Effective Measurements Using Digital Signal Analysis", IEEE Spectrum, Apr.1971
- [4] R.Elsner, "Detection of Insulation Failures during Impulse Testing of Transformers", CIGRE, paper No.101, 1954
- [5] R.Malewski, J.Douville, L.Lavallée, D.Tschudi, "Dielectric Stress in 735-kV Generator Transformer under Operating and Test Conditions", CIGRE, paper No.203, 1990

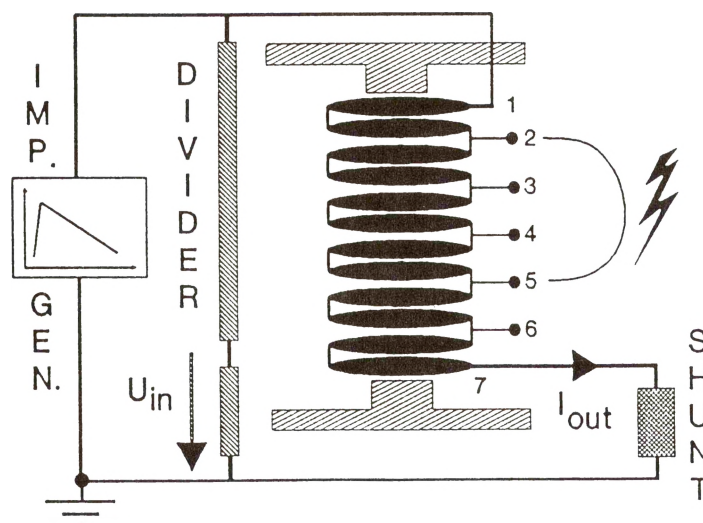


Fig.1 Messschema des Blitzstosstests

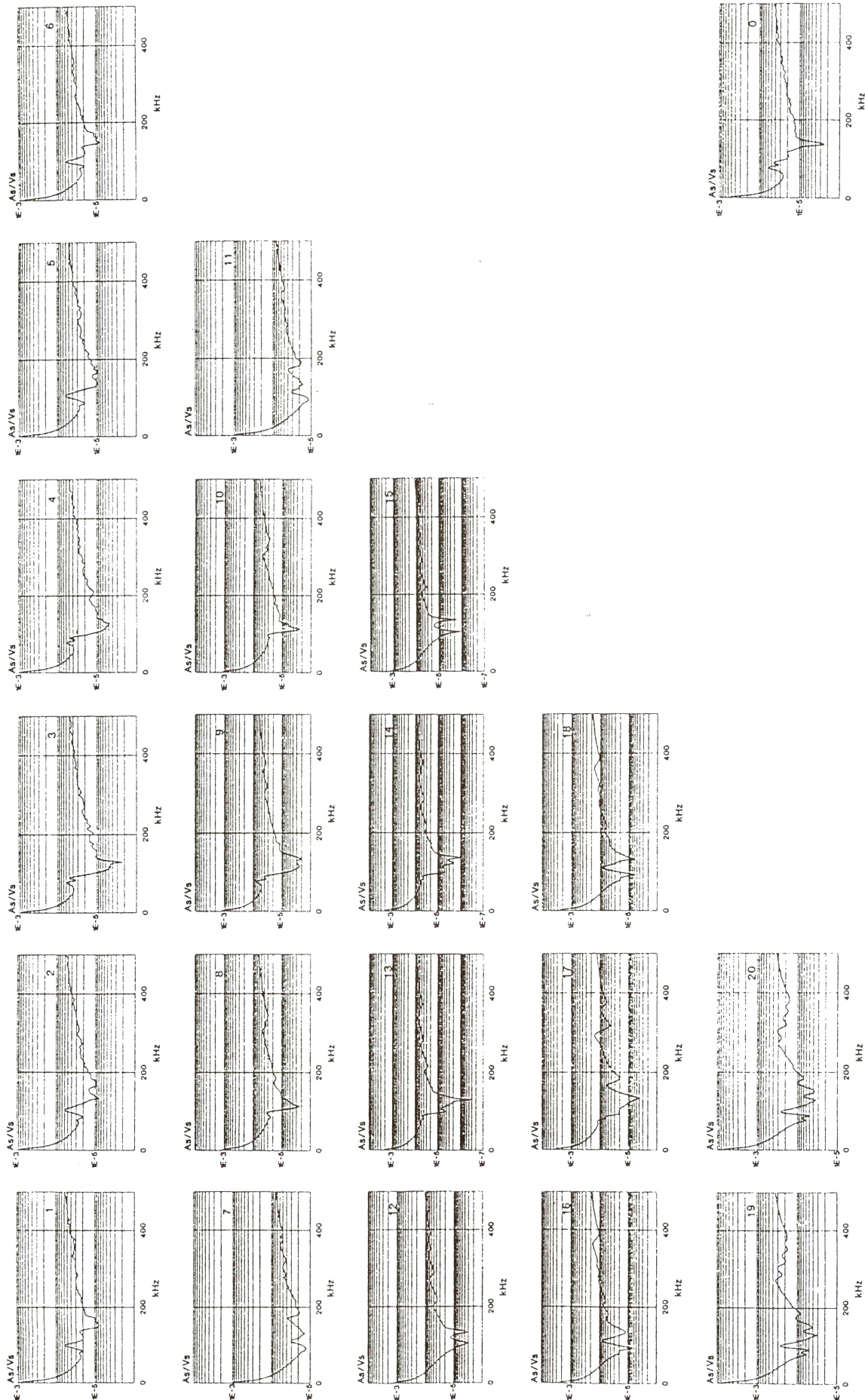


Fig.3 Transferfunktionen für verschiedenen Fehlersimulationen. 1.Reihe : Kurzschlüsse über eine Scheibenspule, Reihe 2 : über 2 Spulen usw. Kurven v.l.n.r. entsprechen Fehlern oben bis unten (z.B. No.1 : Fehler zwischen Anzapfung 1 und 2; No.8 zwischen 2 und 4 usw.). Unten rechts : "gesunder" Transformator

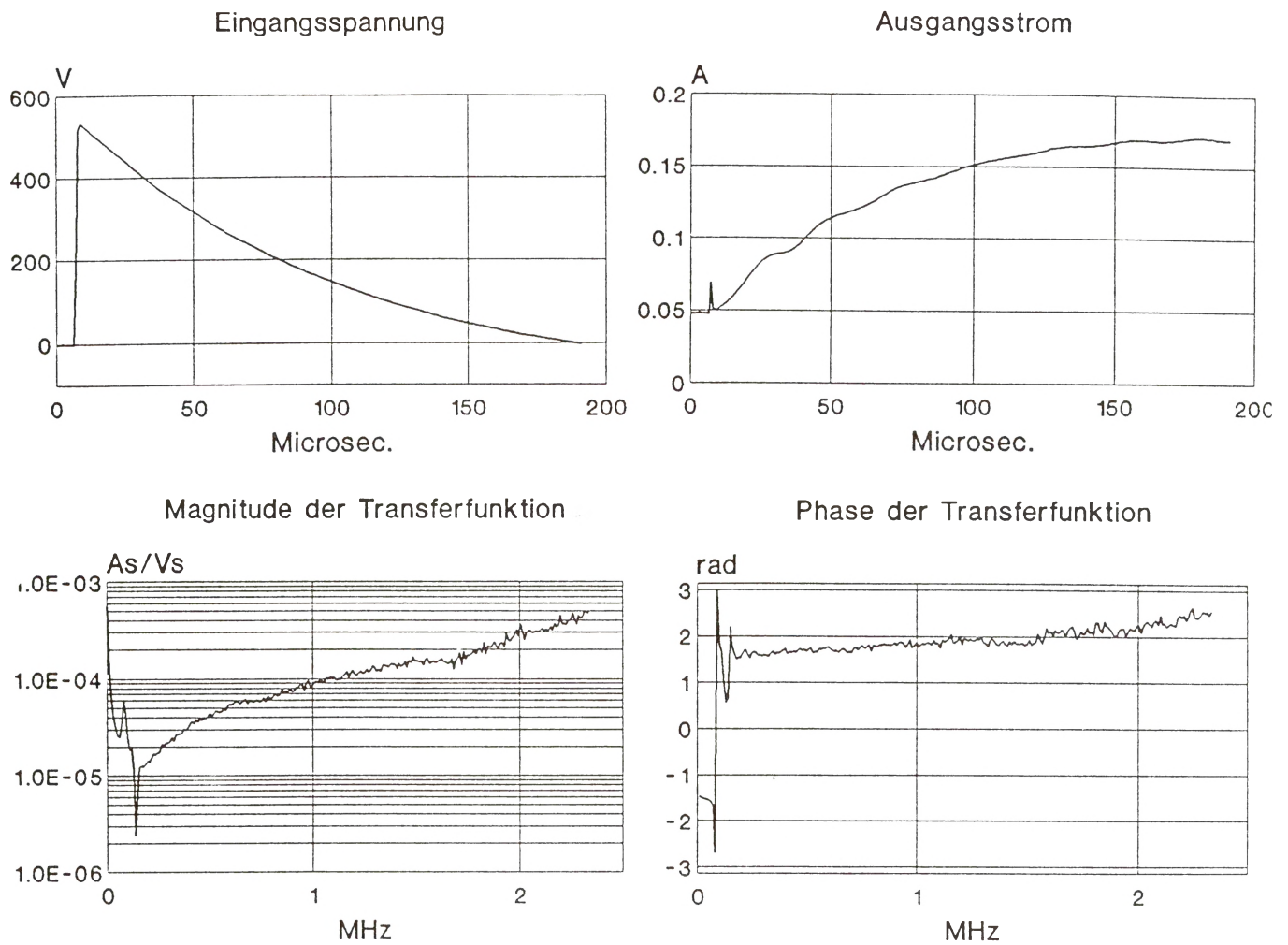


Fig.2 Typische Messdaten und zugehörige Transferfunktion

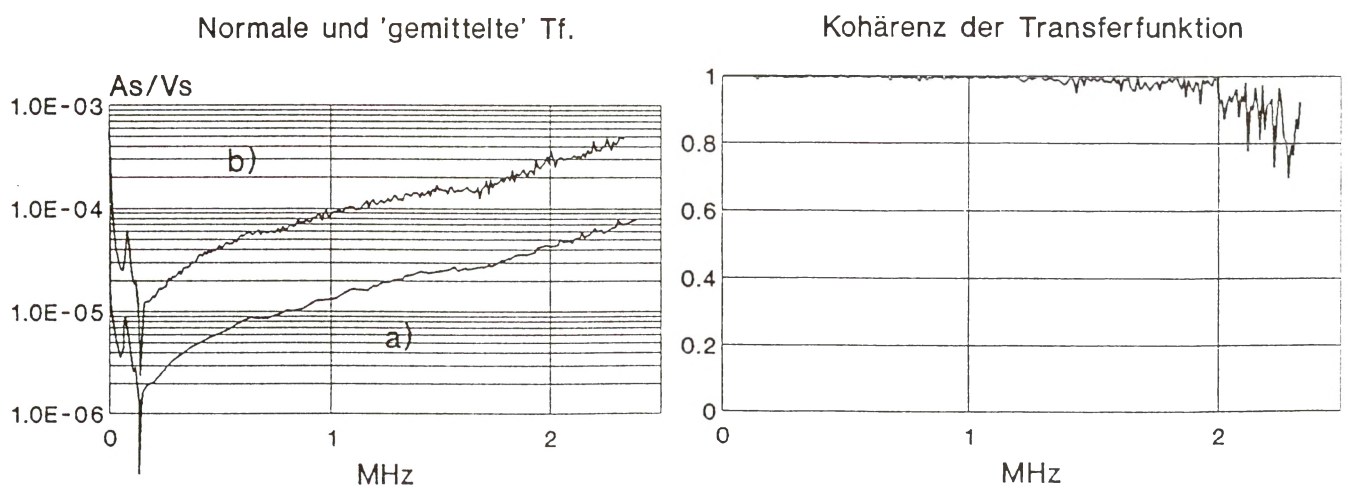


Fig.4 Frequenzmittelung (a) verringert rauschbedingte Rechenfehler (a) ist um eine Dekade versch.)

Fig.5 Kohärenz ist ein Mass für die Zuverlässigkeit der Dekonvolution