

# **Einsatz der Übertragungsfunktion zur On-line Überwachung von Transformatoren**

**T. Leibfried**

**Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik  
Universität Stuttgart**

## **1. Einleitung**

Großtransformatoren sorgen als Bindeglieder zwischen Kraftwerken und dem elektrischen Energieversorgungsnetz oder Netzen mit unterschiedlichen Spannungsebenen für die wirtschaftliche Verteilung elektrischer Energie. Die ständige Verfügbarkeit von sowohl Netzkuppeltransformatoren, insbesondere aber auch Maschinentransformatoren ist deshalb die Grundlage für eine zuverlässige elektrische Energieversorgung.

Großtransformatoren sind im Netz sehr verschiedenartigen Beanspruchungen ausgesetzt. Dies sind neben Kurzschlüssen insbesondere transiente Überspannungen, hervorgerufen durch Schalthandlungen oder Blitzeinschläge in ein Leiterseil. Unterschiedliche thermische Beanspruchungen des Transformators während des Betriebs führen zu einer Alterung der Öl-Papier-Isolation.

Eine umfassende Transformatorüberwachung kann dazu beitragen, kritische Betriebszustände zu vermeiden, eine Alterung oder Beschädigung frühzeitig zu erkennen und so die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Transformatoren zu erhöhen.

Komponenten einer Transformatorüberwachung sind die Aufzeichnung und Auswertung aller Betriebsparameter des Transformators (z.B. Temperaturen, Lastströme, Stufenschalterstellung), der transienten Spannungen und Ströme sowie der auftretenden Teilentladungssignale. Auch die Auswertung der Gas-in-Öl-Analyse ( $H_2$ ) kann dazu beitragen Beschädigungen der Isolation frühzeitig zu erkennen.

### **1.1 Transformatorüberwachung mit Hilfe der Übertragungsfunktion**

Bei der Stoßspannungsprüfung von Transformatoren im Prüffeld des Herstellers wird die Übertragungsfunktion vielfach bereits heute als zusätzliches Diagnosehilfsmittel herangezogen. Als Übertragungsfunktion wird hierbei nahezu ausschließlich eine Admittanzfunktion aus einem Stoßstrom und der Stoßspannung berechnet.

Bei in Betrieb befindlichen Transformatoren können transiente Spannungen und Ströme, die durch Ein- und Ausschaltvorgänge des Transformators oder Schaltvorgänge an anderen Stellen im Netz entstanden sind, zur Berechnung einer Übertragungsfunktion herangezogen werden.

Eine Transformatorüberwachung mit Hilfe der Übertragungsfunktion kann durch den Vergleich von bestimmten Übertragungsfunktionen aus zeitlich nacheinander aufgezeichneten Messungen realisiert werden. Ergibt sich eine Abweichung der Übertragungsfunktionen, so deutet dies auf eine Veränderung und damit auf einen Defekt im Transformator hin. Identische Verläufe der Übertragungsfunktion bedeuten, daß sich seit der letzten Messung keine Änderung des Transformatorzustandes ergeben hat.

Mit Hilfe der Übertragungsfunktion können prinzipiell alle internen Fehler und Defekte erkannt werden, die eine Veränderung des RLC-Ersatznetzwerkes verursachen, durch das ein Transformator für höhere Frequenzen mathematisch beschrieben werden kann. Bei Kurzschlüssen treten enorme Kräfte auf, die zu Wicklungsverschiebungen und Wicklungsdeformationen führen können. Solche Defekte können durch andere Verfahren wie z. B. eine Impedanzmessung vor und nach einem Kurzschluß oft nur unzuverlässig erkannt werden /1/. Die Übertragungsfunktion hingegen ist hierfür ein geeignetes Werkzeug /2/. Auch Schäden der Isolation, die im Moment des transienten Spannungsanstiegs zu Über- oder Durchschlägen zwischen Windungen oder Teilen von Wicklungen führen können erkannt werden. Zur Zeit gibt es jedoch noch keine Beispiele für eine Fehlererkennung bei der On-line Überwachung von Transformatoren mit Hilfe der Übertragungsfunktion, da derartige Überwachungssysteme noch im Entwicklungsstadium sind /3/ /6/. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des neuen Verfahrens ist man deshalb momentan auf Erfahrungen beim Einsatz der Übertragungsfunktion im Prüffeld des Herstellers angewiesen.

Eine Aufzeichnung und Auswertung transienter Signale, gemessen an einem im Betrieb befindlichen Transformator kann jedoch noch weitere, über eine Fehlererkennung hinausgehende Informationen liefern. Durch den Vergleich der Spektren der Spannungen, die den Transformator anregen, und seiner Übertragungsfunktion(en) kann eine Gefährdung des Transformators durch Resonanzanregung erkannt werden. Ferner eröffnet die Aufzeichnung der z. B. beim Schalten des Transformators auftretenden transienten Spannungen die Möglichkeit zur statistischen Auswertung der Überspannungen und gegebenenfalls Verbesserung der Isolationskoordination für den Transformator.

## **1.2 Technische Realisierung der On-line Überwachung von Transformatoren mit Hilfe der Übertragungsfunktion**

Abhängig von der Art und Lage eines inneren Transformatorfehlers bleibt die Übertragungsfunktion bei niedrigen Frequenzen bis ca. 200 kHz praktisch unbeeinflusst /2/. Für eine empfindliche und zuverlässige Erkennung auch kleinerer Defekte ist deshalb die Auswertung der Übertragungsfunktion bis zu möglichst hohen Frequenzen (mindestens einige 100 kHz) erforderlich.

Für die technische Realisierung des Verfahrens ist deshalb zu untersuchen ob

- die Frequenzanregung, die durch Schalthandlungen am Transformator erzeugt wird, zur Berechnung einer Übertragungsfunktion bis zu mehreren 100 kHz ausreichend ist.
- die Messung transienter Signale vor Ort reproduzierbar durchgeführt werden kann.

Neben diesen beiden grundlegenden Bedingungen müssen aber auch alle Parameter bekannt sein, die einen Einfluß auf die Messungen und damit auf die daraus berechnete Übertragungsfunktion haben.

Dies sind zum einen die Betriebsparameter des Transformators:

- Stufenschalterstellung
- Temperatur des Transformators

Zusätzlich sind die an den Transformator angeschlossenen Netzkomponenten (z.B. Kabel) zu berücksichtigen.

Die zur Berechnung der Übertragungsfunktion erforderlichen Messungen transienter Signale am Transformator können auf zwei verschiedene Arten durchgeführt werden:

- Im Rahmen periodischer Wartungsintervalle kann der Transformator überspannungsseitig zu- und abgeschaltet werden. Üblicherweise ist dabei die Unterspannungsseite (US) von Netz abgetrennt. In diesem Fall sind nur die an den Transformator angeschlossenen Netzkomponenten wirksam, die nicht durch den Leistungsschalter an der US abgetrennt werden.
- Durch die Messung "zufällig" auftretender und durch betriebsbedingte Schalthandlungen an einer anderen Stelle im Netz verursachter transienter Spannungen und Ströme werden für die On-line Überwachung mit Hilfe der Übertragungsfunktion keine zusätzlichen Schalthandlungen benötigt. Im Gegensatz zur erstgenannten Methode ist jedoch ein stationäres und ständig in Betrieb befindliches Meßsystem erforderlich. Ferner kann das in diesem Fall unterspannungsseitig angeschlossene Netz durchaus einen Einfluß auf die Übertragungsfunktion haben.

Abhängig davon, welche Meßgrößen zur Berechnung der Übertragungsfunktion herangezogen werden, müssen geeignete Meßwerterfassungen entwickelt werden. Der Transformator wird in jedem Fall durch eine transiente Spannung angeregt, daher ist eine Spannungserfassung an Ober - und/oder Unterspannungsseite erforderlich. Hierzu eignet sich der an Kondensatordurchführungen üblicherweise vorhandene Meßabgriff.

Zur Berechnung der Übertragungsfunktion ist eine weitere Meßgröße erforderlich. Dies kann die Spannung an der selben Phase des jeweils anderen Wicklungssystems (d. h. Spannung an OS und US an der selben Phase) sein. Falls der Sternpunkt des Transformators starr geerdet ist, kann als weitere Meßgröße auch der Sternpunktstrom mit Hilfe einer geeignet dimensionierten Rogowskispule gemessen werden.

Fig. 1 zeigt das Prinzipschaltbild einer Transformatorüberwachung mit Hilfe der Übertragungsfunktion. In dem dargestellten Beispiel werden die Spannungen an der OS, der Sternpunktstrom, die Stufenschalterstellung und eine für den Transformator charakteristische Temperatur (z. B. die Deckeltemperatur) mit Hilfe einer Datenaufzeichnungseinheit erfaßt.

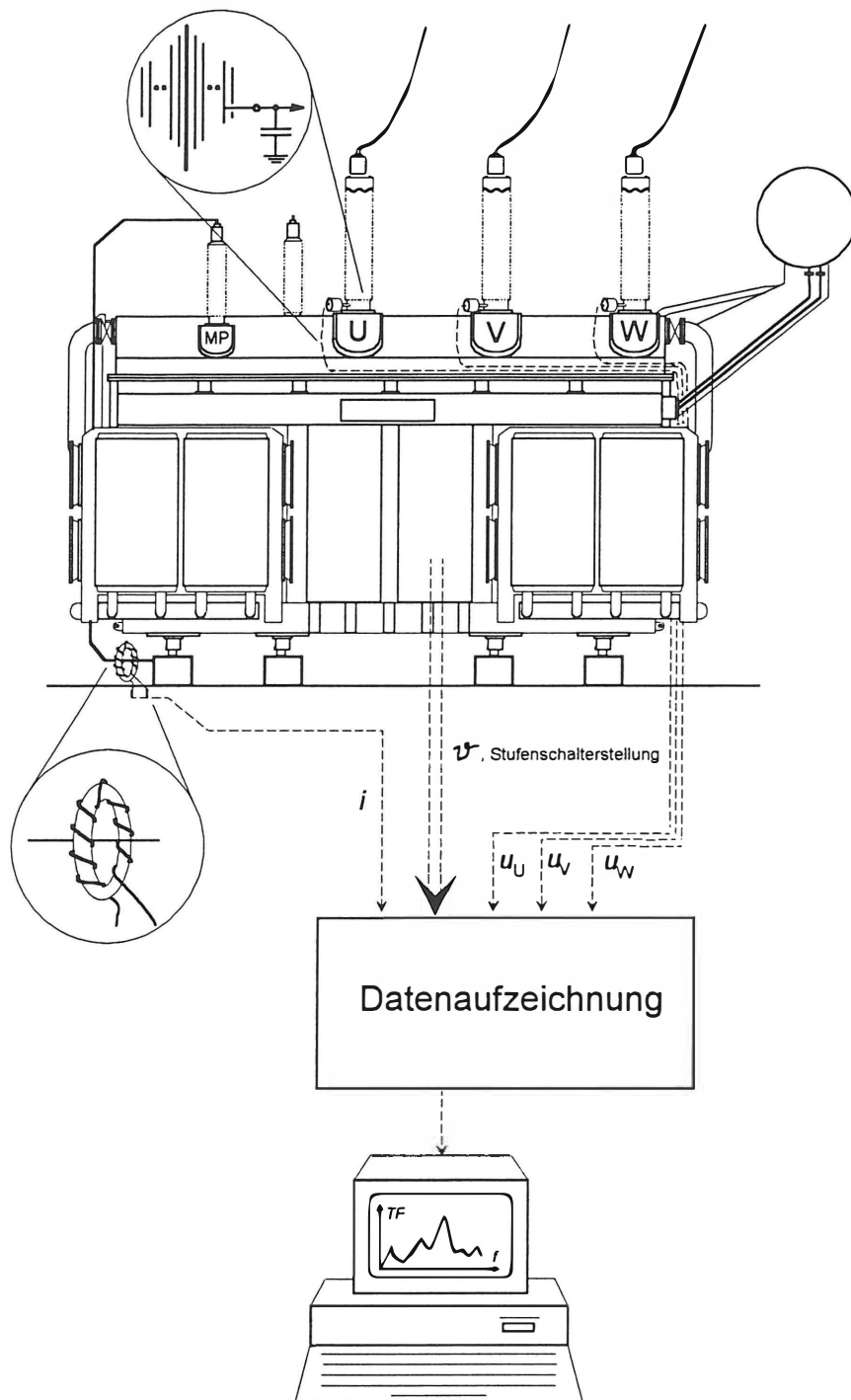


Fig. 1

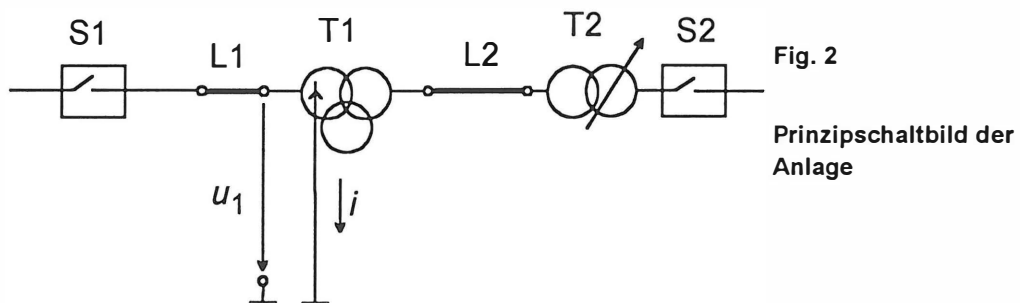
Prinzipschaltbild einer  
Transformatorüber-  
wachung mit Hilfe der  
Übertragungsfunktion

## 2. Vor-Ort Messungen an einem 200 MVA/220 kV/110 kV/10,5 kV-Dreiphasentransformator

Anhand von Vor-Ort Messungen soll gezeigt werden, wie und unter welchen Bedingungen eine Transformatorüberwachung mit Hilfe der Übertragungsfunktion technisch realisiert werden kann. Dabei sind die Frequenzanregung durch Schalthandlungen, die Reproduzierbarkeit der Messungen und Einflüsse durch die Betriebsparameter des Transformators von besonderem Interesse.

### 2.1.1 Beschreibung der Anlage und des Meßsystems

Zur Untersuchung der Anwendbarkeit der Übertragungsfunktion zur On-line Überwachung von Transformatoren wurden bei einem Kraftwerksbetreiber Messungen an einem 200 MVA/220 kV/110 kV/10,5 kV Dreiphasentransformator durchgeführt. Der Transformator T1 ist an der Oberspannungsseite (220 kV) über eine 20 m lange Freileitung (L1) mit einer SF<sub>6</sub>-Schaltanlage verbunden. Die Mittelspannungswicklung ist über eine ca. 220 m lange Kabelstrecke an den Querregeltransformator T2 (200 MVA/110 kV/110 kV) gekoppelt. Der Leistungsschalter (S2) auf der 110 kV-Seite war während der Messungen stets geöffnet. Transformator T1 wurde überspannungsseitig durch den Leistungsschalter S1 zu- und abgeschaltet. Fig. 2 zeigt ein Prinzipschaltbild der Anlage. In Fig. 3 ist das Schaltbild des Transformators T1 dargestellt.



Die drei Oberspannungsdurchführungen des Transformators T1 sind mit Meßabgriffen ausgerüstet. An diese Meßabgriffe wurden Sekundärkapazitäten angeschlossen, die zusammen mit der Kapazität der Hochspannungselektrode gegen den Meßabgriff der Durchführung einen kapazitiven Spannungsteiler bilden. Der Sternpunktstrom gegen Erde wurde mit einer Rogowskispule gemessen, die ein konstantes Übertragungsverhältnis im Frequenzbereich von ca. 30 kHz bis 2,5 MHz aufweist.

Als Meßsystem wurde ein Speicheroszilloskop mit vorgeschalteten Tiefpaßfiltern zur Bandbegrenzung der Signale verwendet. Die Speichertiefe betrug 15000 Samples bei einer Auflösung von 10 Bit. Bei einer Abtastfrequenz von 10 MHz ergibt sich damit eine Aufzeichnungsdauer von 1,5 ms. Die Tiefpaßfilter haben eine 3 dB-Grenzfrequenz von 2,1 MHz. Die Triggerung des Meßsystems erfolgte auf den Sternpunktstrom, sodaß der erste sich ergebende Schaltvorgang aufgezeichnet wurde.

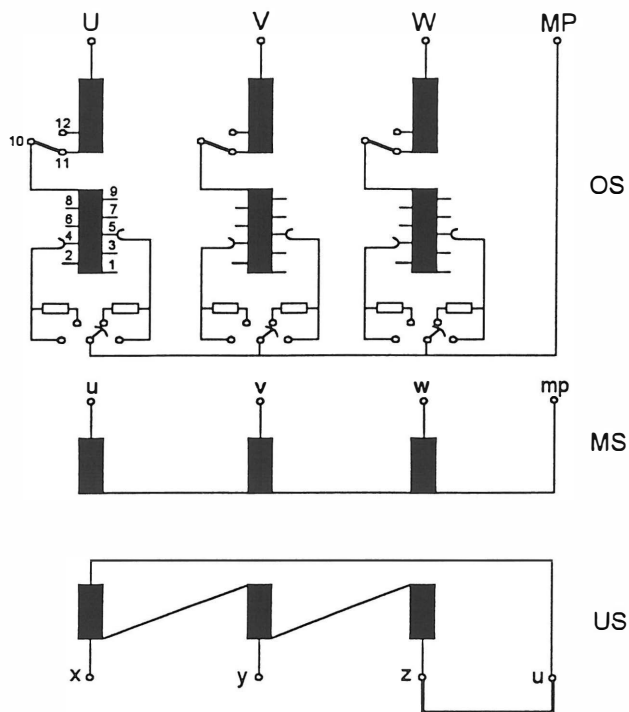


Fig. 3

Schaltbild des  
Transformators T1

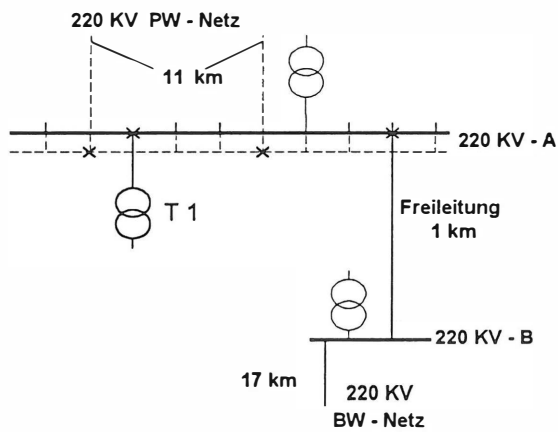
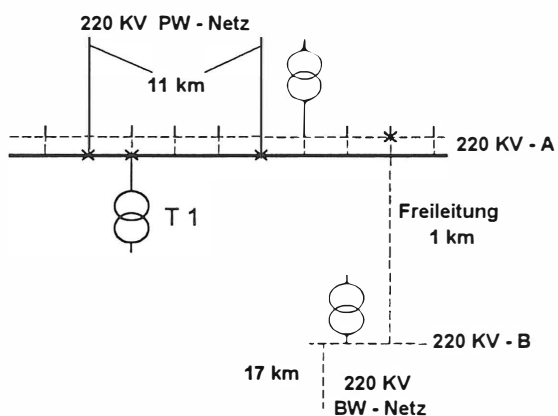


Fig. 4

Prinzipschaltbild der  
Netzkonfigurationen auf  
der 220 kV-Seite

a.

Transformator T1 wird  
ans BW-Netz  
angeschlossen



b.

Transformator T1 wird  
ans PW-Netz  
angeschlossen

Der Transformator T1 kann überspannungsseitig mit zwei unterschiedlichen Netzkonfigurationen betrieben werden (Fig. 4). Der Anschluß des Transformators T1 ans Pfalzwerke-Netz (PW-Netz) erfolgt über zwei ca. 11 km lange Freileitungen. Das Badenwerke-Netz (BW-Netz) ist zunächst über eine ca. 17 km lange Freileitung mit der Sammelschiene B verbunden, die wiederum über eine 1 km lange Freileitung mit der Sammelschiene A, an die der Transformator T1 geschaltet wird, gekoppelt ist. Entsprechend diesen unterschiedlichen Netzkonfigurationen ergeben sich auch völlig unterschiedliche Einschwingvorgänge der Spannung an der OS beim Zuschalten des Transformators T1 (Fig. 5 und Fig. 6).

## 2.2 Analyse der Messungen im Zeit- und Frequenzbereich

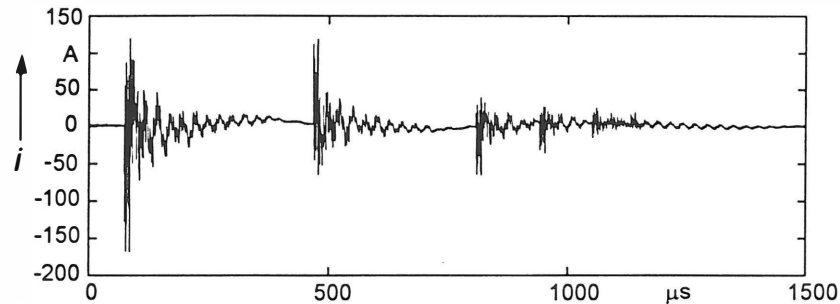
Fig. 5 und Fig. 6 zeigen die zeitlichen Verläufe der Spannungen an den drei Phasen der Überspannungsseite und des Sternpunktstromes. Der erste Schaltvorgang erfolgt an Phase W; die Spannung steigt auf den Nennwert der unverketteten Spannung von ca. 180 kV. Der Schaltvorgang verursacht einen abklingenden transienten Sternpunktstrom gegen Erde. Nach einer Zeit von ca. 350  $\mu$ s erlischt der Lichtbogen zwischen den Leistungsschalterkontakten und die Wicklung schwingt frei. Die Spannung am Transformator schwingt auf und erreicht einen Maximalwert von 300 kV. Die Spannungsdifferenz zwischen den Leistungsschalterkontakten ist dann so groß geworden, daß es zur Wiederzündung des Lichtbogens zwischen den Kontakten kommt, wodurch die Spannung am Transformator wieder auf die Netzspannung gezwungen wird. Die Spannung an den anderen Phasen wird durch die magnetische Kopplung über die als Ausgleichswicklung geschaltete Unterspannungswicklung erzeugt. Diese niederfrequenten Spannungen erreichen Maximalwerte von ca. 200 kV. Im aufgezeichneten Zeitbereich finden keine Schaltvorgänge an den anderen Phasen U und V statt. Die an den Wicklungseingängen U und V gemessenen Spannungen schwingen deshalb bis zum Zünden des Lichtbogens zwischen den entsprechenden Leistungsschalterkontakten aus.

Laufzeiteffekte in der GIS und auf der Freileitung von der GIS zum Transformator können vernachlässigt werden. Bei Anschluß des Transformators an das PW-Netz ist der Spannungsanstieg am Transformator daher nur durch die Aufladung der Transformatorkapazität über die beiden Freileitungen bestimmt. Für einen Wellenwiderstand der beiden parallel geschalteten Freileitungen von 180  $\Omega$  und einer Zeitkonstante von 260 ns erhält man eine Eingangskapazität des Transformators von ca. 1,5 nF. Dieser Wert entspricht den aus der Literatur bekannten Erfahrungsdaten.

Die Freileitung zwischen den Sammelschienen A und B ist aufgrund von Leitungsabgängen an Sammelschiene B als niederohmig abgeschlossen zu betrachten. Dadurch ergeben sich beim Zuschalten des Transformators an das BW-Netz Verhältnisse, die mit dem Einschalten eines Transformators über eine Stichleitung vergleichbar sind. Abhängig von der Länge der Freileitung und den an beiden Leitungsenden wirksamen Impedanzen schwingt die Spannung mit einer charakteristischen Frequenz von ca. 40 kHz auf ihren Nennwert ein.

In Fig. 7 sind die Spektren der transienten Signalanteile der Spannung an der Phase W und des Sternpunktstromes für die Einschaltvorgänge gemäß Fig. 5 und Fig. 6 dargestellt. Durch die Schaltvorgänge wird eine Anregung des Transformators bis zu Frequenzen von ca. 1,5 MHz erreicht.

Für das Spannungsspektrum der beim Zuschalten des Transformators T1 an das BW-Netz aufgezeichneten Messung ergibt sich bei der Frequenz von ca. 180 kHz ein lokaler Tiefpunkt. Das Spektrum des Sternpunktstromes hat bei beiden Messungen einen lokalen Tiefpunkt bei etwa 900 kHz. Dies bedeutet einen geringen Signal-zu-Rauschabstand, was zu einer fehlerbehafteten Berechnung der Spektren bei diesen Frequenzen führt.

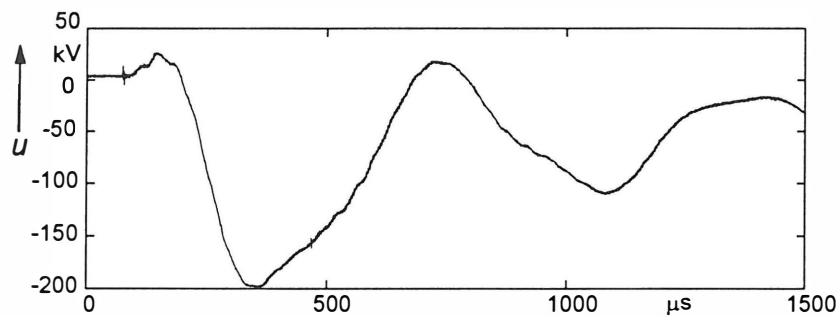


a.

Fig. 5

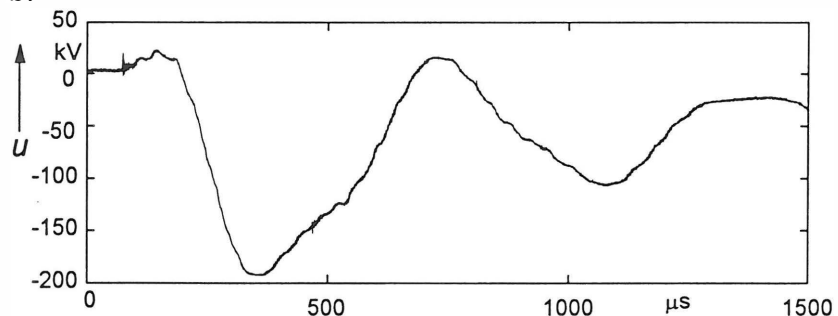
Transformator T1 wird  
ans BW-Netz geschaltet

a.  
Sternpunktstrom



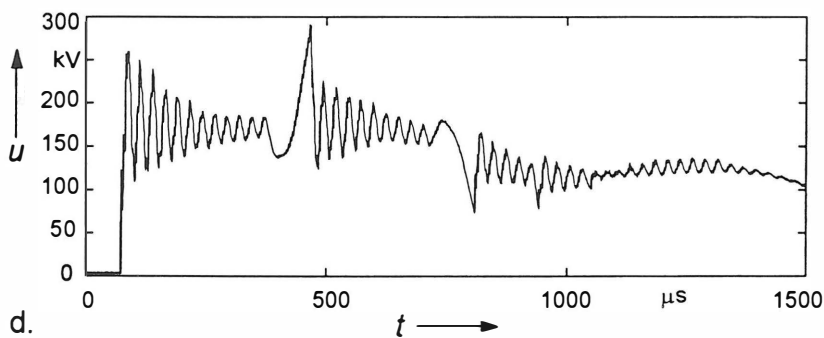
b.

b.  
Spannung an Phase U



c.

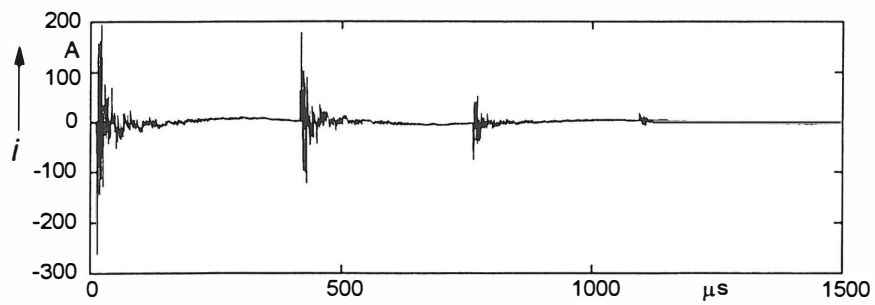
c.  
Spannung an Phase V



d.

d.  
Spannung an Phase W



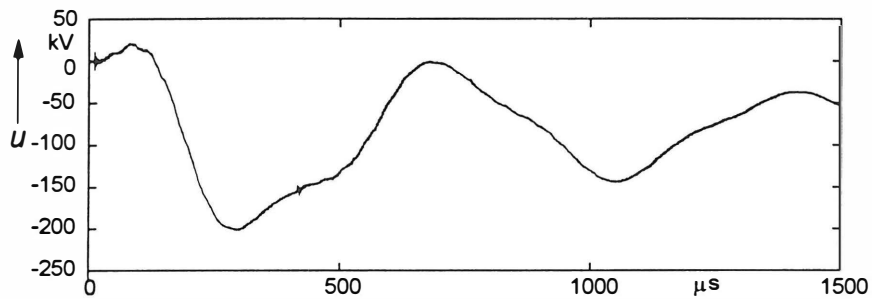


a.

Fig. 6

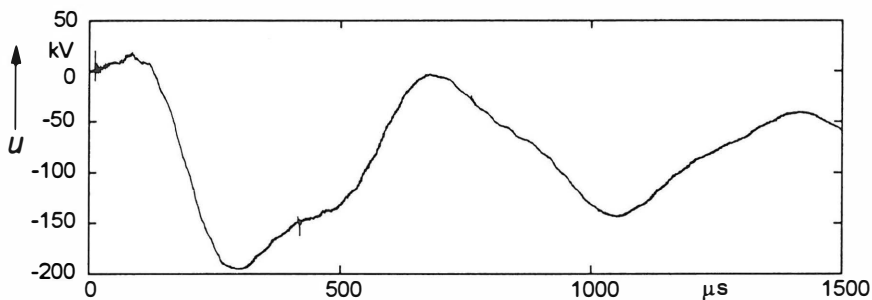
Transformator T1 wird  
ans PW-Netz geschaltet

a.  
Sternpunktstrom



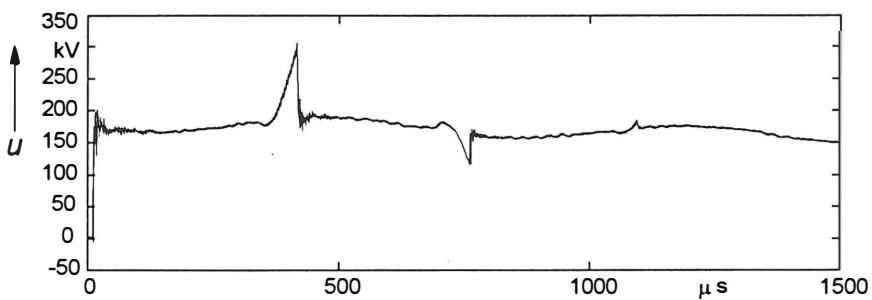
b.

b.  
Spannung an Phase U



c.

c.  
Spannung an Phase V



d.

d.  
Spannung an Phase W

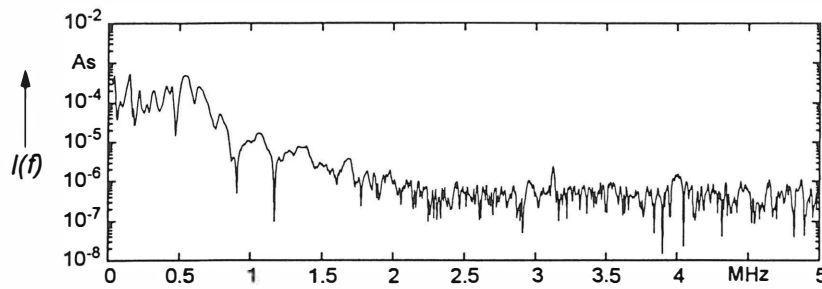
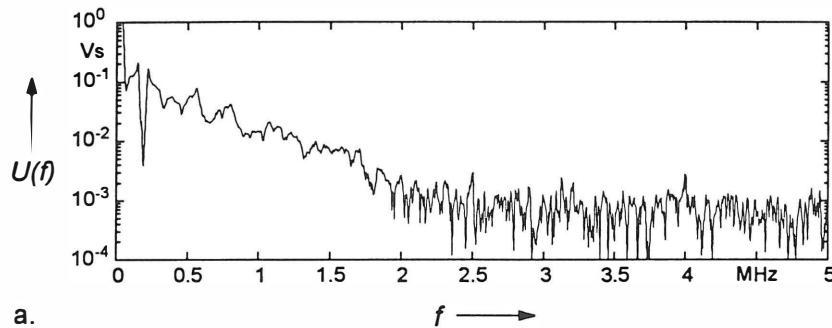
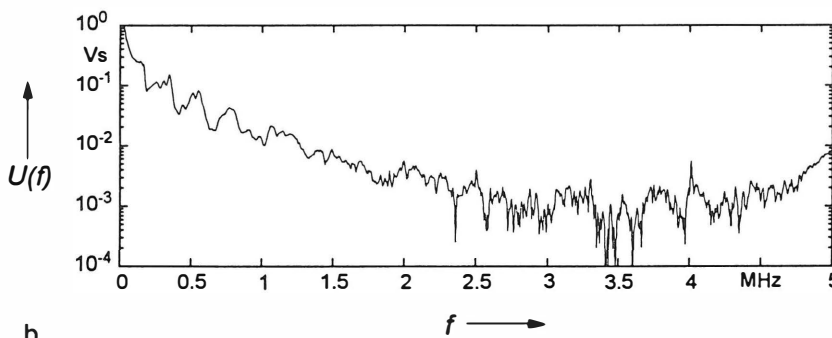
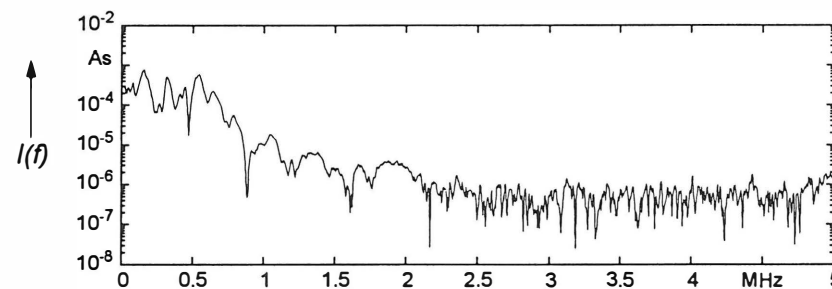


Fig. 7

Spektren der Spannung  
an der Phase W und des  
Sternpunktstromes



a.  
T1 wird an BW-Netz  
geschaltet (Messung  
vom 18. März 1994)



b.  
T1 wird an PW-Netz  
geschaltet (Messung  
vom 17. Mai 1994)

Die bereits genannten Einflußparameter Stufenschalterstellung und Temperatur des Transformators waren bei beiden Messungen identisch. Die aus den beiden Messungen berechneten Übertragungsfunktionen (Fig. 8)

$$\underline{TF}(f) = \frac{\underline{I}_{Stern}(f)}{\underline{U}_{OS}(f)} \quad (1)$$

müssen daher eine gute Übereinstimmung zeigen. Signifikante Abweichungen ergeben sich lediglich bei den bereits erwähnten lokalen Tiefpunkten der Spektren von Spannung und

Strom, d.h. bei ca. 180 kHz und 900 kHz. Mit zunehmender Frequenz wirkt sich der abnehmende Signal-zu-Rauschabstand stärker aus; dies ist an den leichten Abweichungen der Resonanzstelle bei ca. 620 kHz erkennbar.

In einem sehr weiten Frequenzbereich bis ca. 150 kHz und von 200 kHz bis 800 kHz, der frei von prinzipbedingten Abweichungen ist, zeigen die beiden Übertragungsfunktionen eine sehr gute Übereinstimmung. Sie können in diesem Bereich zur Transformatorüberwachung herangezogen werden. Im vorliegenden Beispiel würde dies bedeuten, daß im Zeitraum vom 18. März 1994 bis zum 17. Mai 1994 kein mit Hilfe der Übertragungsfunktion detektierbarer Transformatordefekt aufgetreten ist. Weitergehende Aussagen können nicht getroffen werden, da von der Inbetriebnahme des Transformators im Jahre 1972 keine Messungen der Übertragungsfunktion vorliegen.

Die Spannung beim Zuschalten des Transformators T1 ans BW-Netz bewirkt eine Anregung des Transformators bei 40 kHz (Fig. 5). Die Übertragungsfunktion gemäß Gl.(1) weist bei dieser Frequenz jedoch keine ausgeprägte Resonanzstelle auf. Eine Resonanzanregung durch die Schalthandlung ist daher nicht zu befürchten.

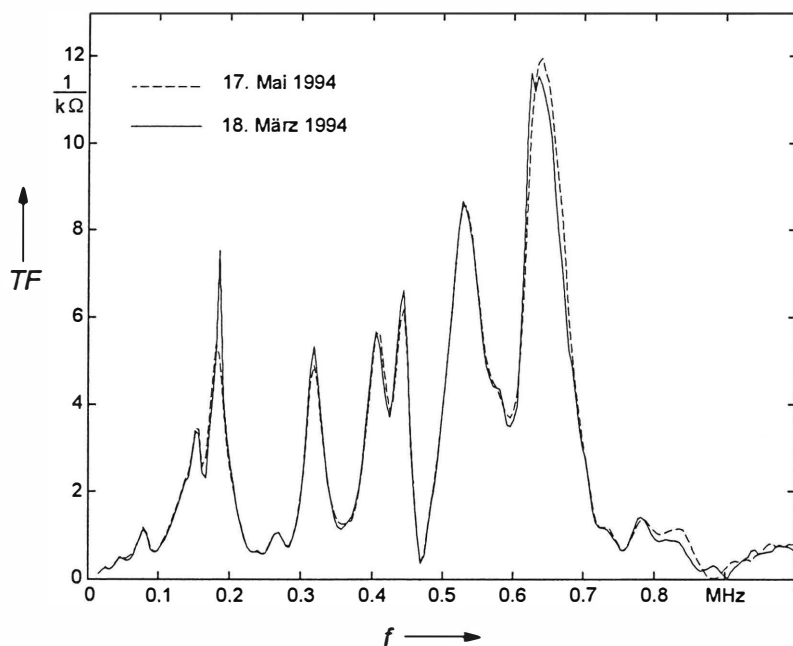


Fig. 8

Übertragungsfunktionen aus den Spektren von Sternpunktstrom und Spannung an der Phase W, gemessen am 18. März 1994 und am 17. Mai 1994

## 2.3 Beeinflussung der Messung durch die Betriebsparameter des Transformators

### 2.3.1 Stufenschalterstellung

Das Schwingungsverhalten von Transformatorwicklungen, insbesondere der Regelwicklung, wird wesentlich durch die Stufenschalterstellung beeinflusst. Dementsprechend muß auch ein Einfluß der Stufenschalterstellung auf die Übertragungsfunktion vorhanden sein.

Um dies zu untersuchen wurden Messungen von Schaltvorgängen bei verschiedenen Stufenschalterstellungen an dem 200 MVA-Transformator durchgeführt. Die benachbarten Stellungen 14 und 15 wurden ausgewählt, um die Abweichungen der Übertragungsfunktion

bei Änderung der Stufenschalterstellung um eine Stufe zu ermitteln. Bei den Stufenschalterstellungen 14 und 15 wurden neben der Verbindung der Kontakte 10 und 12 (Schaltung der Grobstufe) die folgenden Kontakte in der Feinstufe der Regelwicklung geschaltet (Fig. 3):

Stellung 14: Die Kontakte 4 der Regelwicklungen sind mit dem Mittelpunkt (MP) verbunden

Stellung 15: Die Kontakte 5 der Regelwicklungen sind mit dem Mittelpunkt (MP) verbunden

Fig. 9 zeigt den Betrag der Übertragungsfunktionen. Durch die Änderung der Stufenschalterstellung entstehen deutliche Abweichungen der Übertragungsfunktionen über nahezu den gesamten Frequenzbereich. Im Bereich zwischen 300 kHz und 500 kHz kommt es zur Verschiebung und Aufspaltung von Resonanzstellen; die Resonanz bei ca. 620 kHz bleibt erhalten, wird jedoch unterschiedlich bedämpft.

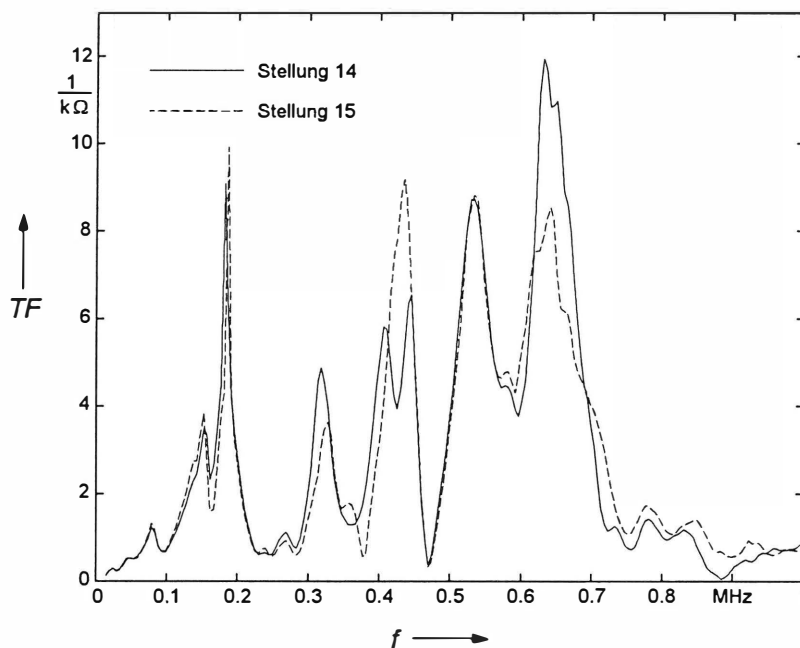


Fig. 9

Betrag der Übertragungsfunktion bei den Stufenschalterstellungen 14 und 15

Verglichen mit Fig. 8 würde das Ergebnis der Auswertung ohne Kenntnis der Stufenschalterstellung lauten, daß die Abweichung der Übertragungsfunktionen auf einen Transformatordefekt schießen läßt. Um derartige Fehlinterpretationen zu vermeiden, muß die Stufenschalterstellung bei der Messung eines jeden transienten Vorganges mit erfaßt werden.

### 2.3.2 Temperatur des Transformators

Messungen an einem Verteiltransformator im Labor haben gezeigt, daß die Transformatortemperatur einen Einfluß auf die Übertragungsfunktion hat. Um zu untersuchen, ob dieser Einfluß auch bei Großtransformatoren vorhanden ist, wurden an dem 200 MVA-Transformator Messungen von Schaltvorgängen bei gleicher Stufenschalterstellung, aber mit unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Die Temperatur des Transformators wurde durch PT100 Temperaturfühler gemessen, die in Meßtaschen

am Deckel des Transformators eingebaut sind. Fig. 10 zeigt den Vergleich der Übertragungsfunktionen für Transformatortemperaturen von 40 °C und 70 °C.

Die Charakteristik der Übertragungsfunktion des erwärmten Transformators (70 °C) bleibt gleich, es entsteht lediglich eine Verschiebung der gesamten Übertragungsfunktion in Richtung tieferer Frequenzen. Dies steht auch in Übereinstimmung mit Versuchen an dem Verteiltransformator im Labor und bei Erwärmungsmessungen an Großtransformatoren beim Hersteller. Aus der Abweichung der Übertragungsfunktionen und der Temperaturdifferenz (Fig. 10) kann ein Temperaturkoeffizient der Resonanzfrequenzen von

$$\alpha_{fres, gemessen} \approx -3 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K} \quad (2)$$

entnommen werden.

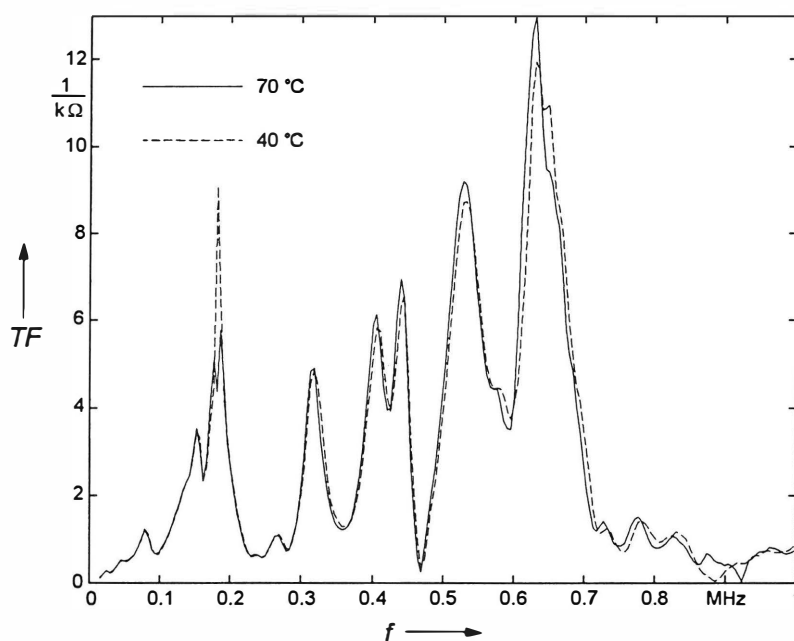


Fig. 10  
Übertragungs-  
funktionen für  
verschiedene  
Transformator-  
temperaturen (40 °C  
und 70 °C) bei gleicher  
Stufenschalterstellung

Ursache einer Frequenzverschiebung der Übertragungsfunktion eines Transformators kann sowohl eine Änderung der Kapazitäten als auch der Induktivitäten sein, durch welche eine Transformatorwicklung mathematisch beschrieben werden kann.

Zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der Induktivität wurden Messungen an einer Hochspannungswicklung vorgenommen. Dabei wurde eine lineare Zunahme der Induktivität gemäß

$$\alpha_L = 2,1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K} \quad (3)$$

festgestellt. Ausgehend von der Induktivität einer "langen Spule" (Durchmesser  $d$ , Länge  $\ell$  mit

$$L = \mu_0 \frac{\pi \cdot d^2}{4\ell} \quad (4)$$

folgt bei Ausdehnung in radialer Richtung und einem Längenausdehnungskoeffizienten für Zellulose von

$$\alpha_{Zell} = 1,2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K} \quad (5)$$

für den Temperaturkoeffizienten der Induktivität

$$\alpha_{Ind} = 2 \cdot \alpha_{Zell} = 2,4 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K} \quad (6)$$

Der gemessene Wert (Gl. 3) wird also sehr gut bestätigt. Die Längenausdehnung der Kupferwicklung ist vernachlässigbar, da der Längenausdehnungskoeffizient von Kupfer um etwa eine Zehnerpotenz niedriger liegt, als der von Zellulose.

Für die Temperaturänderung der Kapazitäten kommen zwei Werkstoffe in Betracht, die für die kapazitiven Verhältnisse im Transformator von Bedeutung sind: Transformatorenöl und ölprägniertes Transformerboard. Mit Hilfe eines Plattenkondensators wurde die Änderung der Dielektrizitätszahl von Transformatorenöl über der Temperatur in Bezug auf die Dielektrizitätszahl bei 30 °C für verschiedene Frequenzen gemessen (Fig. 11). Aus dieser Messung ergibt sich ein negativer Temperaturkoeffizient der Dielektrizitätszahl von Transformatorenöl im Bereich:

$$\alpha_{Öl} = -(3,7 \dots 4,7 \cdot 10^{-4}) \frac{1}{K} \quad (7)$$

Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung mit anderen Untersuchungen /4/, /5/. Gemäß einer Herstellerangabe der Fa. Weidmann ist der Koeffizient der Dielektrizitätszahl von ölprägniertem Transformerboard positiv und hat einen mittleren Wert von

$$\alpha_{Tr} \approx +3 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K} \quad (8)$$

Messungen verschiedener Isolierstoffe (Papierisolation eines Kupferleiters und Hartpapier) ergaben eine Streuung um den Faktor 2...3 um diesen Wert (Fig. 12)

Für Resonanzfrequenzen gilt bei Vernachlässigung der Dämpfung die folgende Proportionalität:

$$f_{res} \propto \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (9)$$

$L$  ist dabei die für die Resonanz bei  $f_{res}$  maßgebliche Induktivität,  $C$  ist die maßgebliche Kapazität. Der Temperaturkoeffizient der Resonanzfrequenzen berechnet sich dann aus den Temperaturkoeffizienten der Induktivität  $L$  und der Kapazität  $C$  gemäß der Beziehung

$$\alpha_{fres} = -\frac{1}{2}(\alpha_L + \alpha_C) \quad (10)$$

Der Temperaturkoeffizient der Induktivitäten und des Transformatorenöls ist gegenüber jenem von ölprägniertem Transformerboard zu vernachlässigen. Für den Maximalwert des Temperaturkoeffizienten der Resonanzfrequenz gilt daher:

$$\alpha_{fres,max} \approx -\frac{1}{2}\alpha_{Tr} \approx -1,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K} \quad (11)$$

Die wesentlichen Kapazitäten einer Transformatorwicklung werden stark durch das Isoliermedium Transformerboard bestimmt. Daher erhält man einen negativen Temperaturkoeffizienten der Resonanzfrequenzen; dies entspricht dem Ergebnis der in Fig. 10 dargestellten Messung (Gl. 2). Der exakte Wert des resultierenden Temperaturkoeffizienten wird vom konstruktiven Aufbau der für die Resonanz verantwortlichen Kapazität bestimmt.

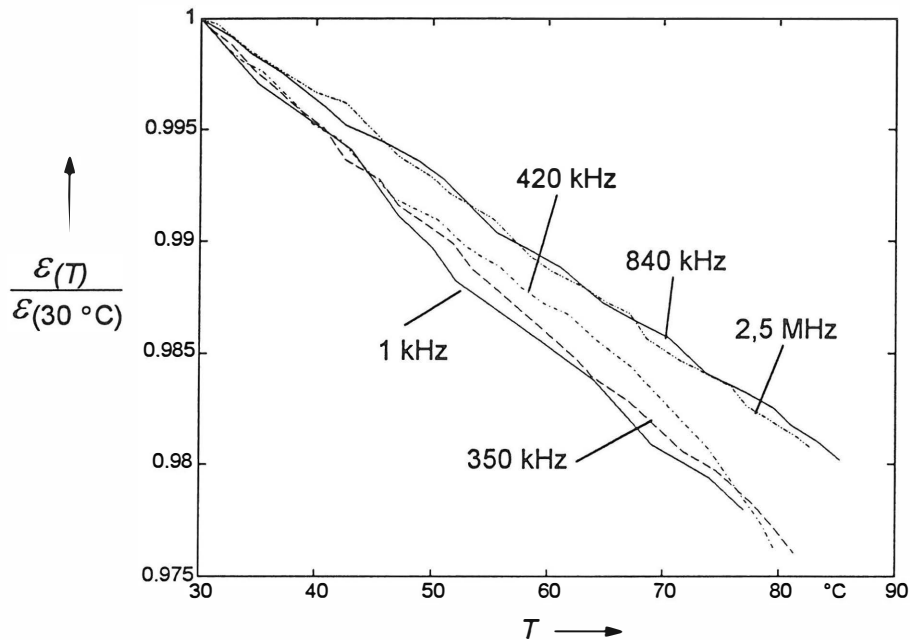


Fig. 11

Temperaturabhängigkeit von Transformatorenöl für verschiedene Frequenzen

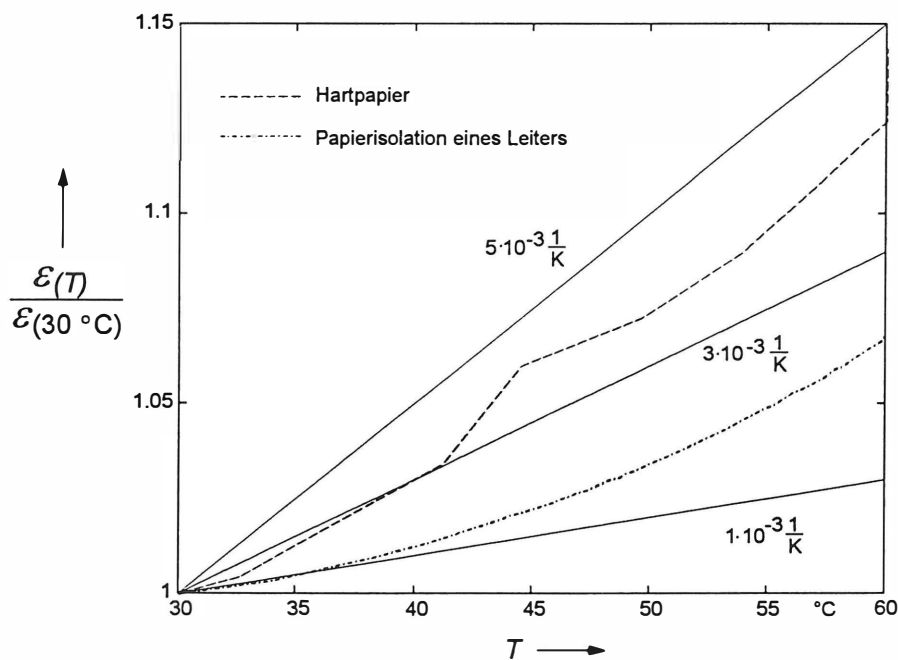


Fig. 12

Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätszahl von ölprägniertem Hartpapier und ölprägnierter Papierisolation eines Kupferleiters

### 3. Beeinflussung der Messung durch Netzkomponenten, die an den Transformator angeschlossen sind

Für die folgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, daß der Transformator überspannungsseitig zu- und abgeschaltet wird. Er ist dabei unterspannungsseitig vom Netz abgetrennt.

#### 3.1 Kabel an der Unterspannungsseite

Der Transformator T ist in einer 380 kV/110 kV-Schaltanlage eingesetzt. Die Überspannungsseite ist direkt an eine 420 kV-SF<sub>6</sub>-Schaltanlage angeschlossen. Die Unterspannungsseite ist über eine ca. 80 m lange Kabelstrecke mit einer 123 kV-SF<sub>6</sub>-Schaltanlage verbunden (Fig. 13). Alle drei Phasen des Ober- und Unterspannungssystems sind mit kapazitiven Meßsonden ausgerüstet. Mit Hilfe der Sonden, welche in die Durchführungsdomes eingebaut sind, wurden die transienten Spannungen an den Wicklungseingängen des Transformators gemessen. Der Leistungsschalter der 123 kV-Schaltanlage war während der Messung stets geöffnet.

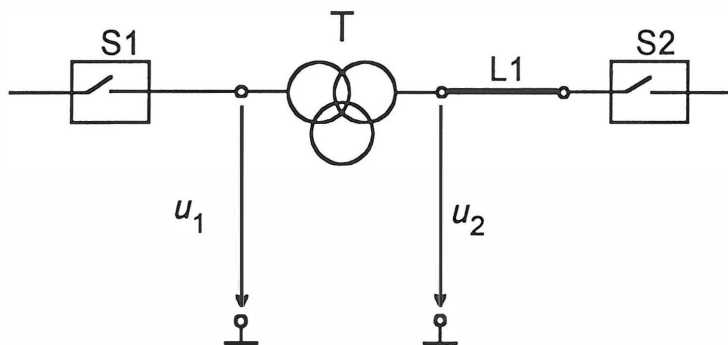


Fig. 13

Prinzipschaltbild der Anlage

Bei geöffnetem Leistungsschalter an der Unterspannungsseite ist das 110 kV-Netz nur noch über die Koppelkapazität  $C_K$  des Leistungsschalters mit dem Kabel verbunden (Fig. 14). Für Leistungsschalter mit Steuerkondensatoren liegt diese Koppelkapazität im Bereich einiger 100 pF. Im vorliegenden Fall besitzt der Leistungsschalter auf der 110 kV-Seite keine Steuerkondensatoren; die Koppelkapazität beträgt dann ca. 20 pF. Der Abschluß am Kabelende kann also bei geöffnetem Leistungsschalter mit guter Näherung als offenes Ende betrachtet werden. Der Transformator kann im höherfrequenten Bereich für Wanderwellenbetrachtungen in erster Näherung durch eine Kapazität von 1...2 nF ersetzt werden. Das Kabel ist also beidseitig fehlabgeschlossen, was zu Mehrfachreflexionen führt (Fig. 14). Durch Summation der durch die Mehrfachreflexionen am Transformator entstehenden Spannungen kann für das Spektrum der Spannung an der US folgende Beziehung berechnet werden:

$$\underline{U}_2(f) = \underline{X}(f) \cdot \underline{H}(f) \quad (12)$$

Dabei ist  $\underline{X}(f)$  das Spektrum der in das Kabel einlaufenden Welle.  $\underline{H}(f)$  ist eine Übertragungsfunktion, die sich durch die Mehrfachreflexion auf dem Kabel ergibt. Sie hängt von der Laufzeit des Kabels und vom transformatorseitigen Abschluß ab. Für eine Laufzeit von 480 ns (dies entspricht ca. 80 m Kabellänge) und einer Kapazität von 1 nF als Ersatzkapazität für den Transformator erhält man den in Fig. 15a dargestellten Verlauf für den Betrag dieser Übertragungsfunktion.



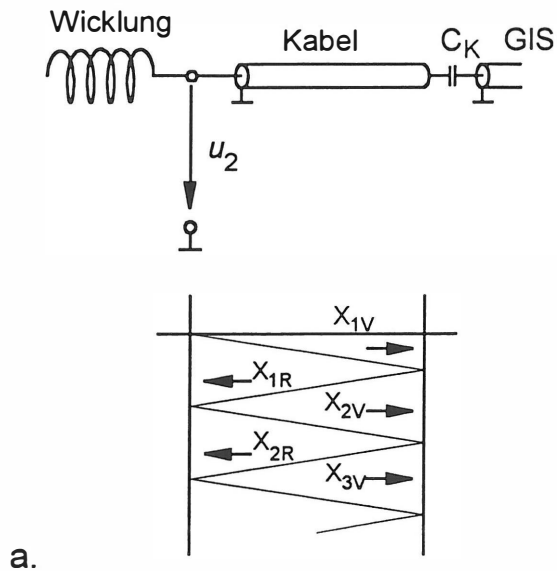
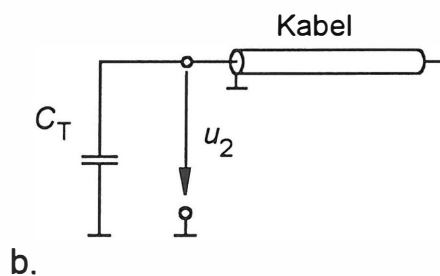


Fig. 14

a.  
Mehrfachreflexionen auf  
einem  
unterspannungsseitig  
an einen Transformator  
angeschlossenen Kabel



b.  
Ersatzschaltbild

Ein Vergleich der berechneten Übertragungsfunktion  $|\underline{H}(f)|$  und des aus Messungen berechneten Spektrums der Spannung an der US zeigt, daß dieses Spektrum wesentlich von  $|\underline{H}(f)|$  bestimmt wird (Fig. 15b).  $|\underline{H}(f)|$  besitzt periodisch Pol- und Nullstellen, beginnend mit einer Nullstelle. Dieselbe Charakteristik liegt auch dem Spektrum der an der US gemessenen Spannung zugrunde. Nullstellen liegen bei ca. 500 kHz, 1500 kHz, 2500 kHz, während Polstellen bei 1,1 MHz und 2,2 MHz zu erkennen sind. Ab einer Frequenz von ca. 2,5 MHz werden die Spektren der Spannungen an OS und US durch die Anti-Aliasing-Filter begrenzt, die bei 4 MHz eine Dämpfung von 60 dB erreichen.

Die Übertragungsfunktionen aus zwei Einschaltvorgängen, berechnet gemäß

$$\underline{TF}(f) = \frac{\underline{U}_{US}(f)}{\underline{U}_{OS}(f)} \quad (13)$$

zeigen eine sehr gute Übereinstimmung (Fig. 16). Die sehr ausgeprägte Resonanzstelle bei 1,1 MHz rührt aber gemäß Beziehung (12) nicht vom Transformator, sondern von den Mehrfachreflexionen auf dem Kabel her. Die eigentlichen Transformatorresonanzen befinden sich unterhalb der ersten Nullstelle bei 500 kHz.

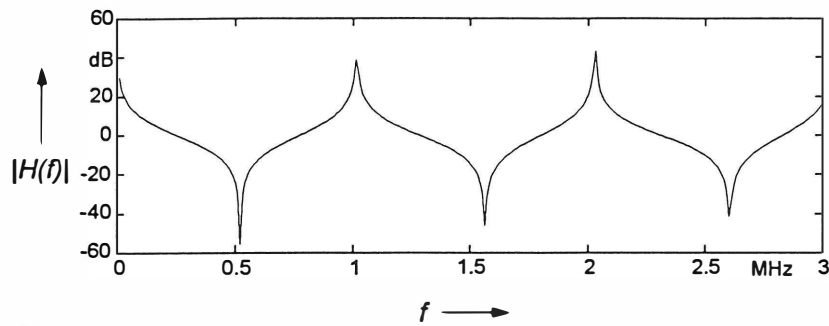
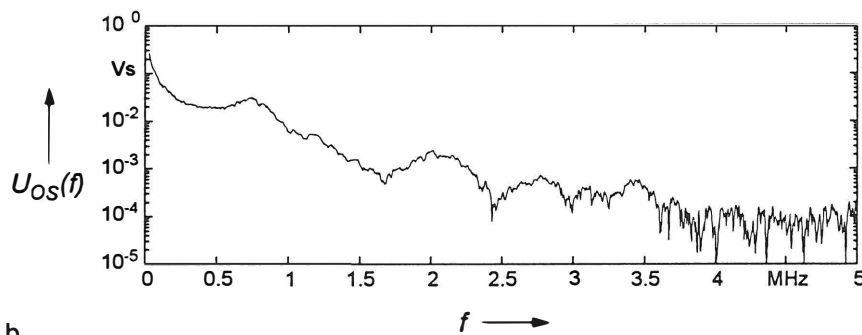
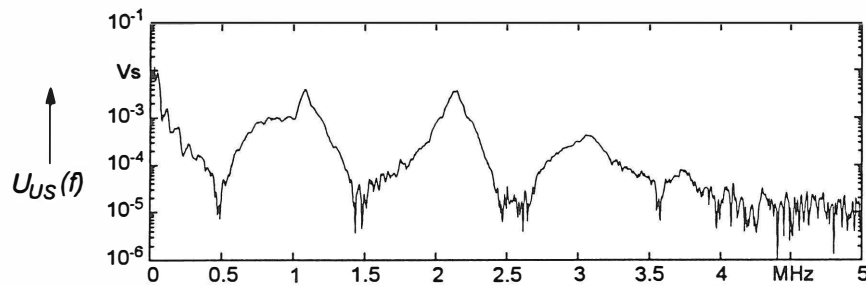


Fig. 15

a.  
Übertragungsfunktion  $|H(f)|$ , verursacht durch Mehrfach-reflexionen auf dem Kabel



b.  
Spektren der an OS und US des Transformators gemessenen Spannungen

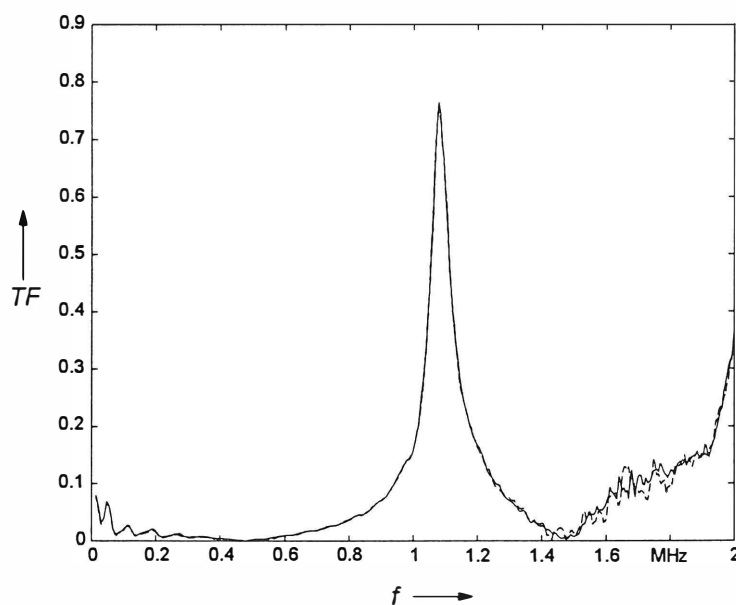


Fig. 16

Übertragungsfunktionen aus 2 Einschaltvorgängen, berechnet aus den Spannungen an OS und US

Neben den Maschinentransformatoren würde sich vor allem bei den in 380 kV-Netz eingesetzten Kuppelumspannern eine Transformatorüberwachung lohnen, da sie im Leistungsbereich von einigen 100 MVA rund 10 Mio. DM kosten. Beim Ausfall von Maschinentransformatoren wäre u. U. auch der Kraftwerksausfall in eine Wirtschaftlichkeitsberechnung einzubeziehen. Um zu ermitteln, welchen Einschränkungen die Spannung an der US als Meßgröße für die Transformatorüberwachung mit Hilfe der Übertragungsfunktion unterliegt, wurde die Netzkonfiguration an allen 380 kV/110 kV-Transformatoren eines größeren Energieversorgungsunternehmens untersucht. Dabei kann für die Netzkonfiguration an der Unterspannungsseite der Transformatoren das folgende für die hier notwendige Betrachtung von Wanderwellenvorgängen allgemeine Ersatzschaltbild erstellt werden (Fig. 17)

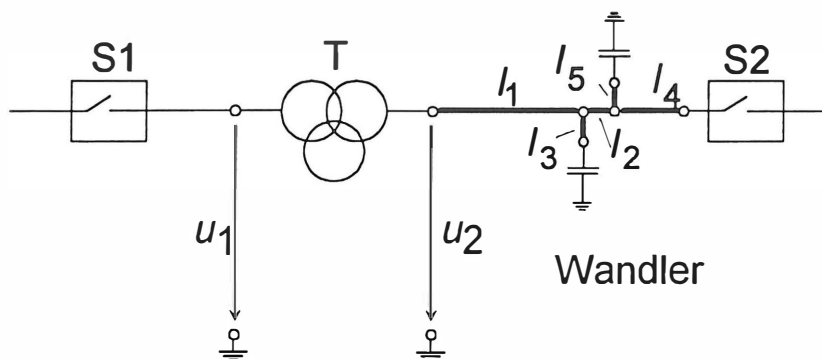


Fig. 17

Allgemeines Ersatzschaltbild für die Netzkonfiguration an der Unterspannungsseite der untersuchten 380 kV/ 110 kV-Transformatoren

Von Interesse sind die Abmessungen der Leitungen von der US des Transformators bis zum Leistungsschalter, sowie die Position der Wandler. Für die 9 Anlagen mit 380 kV-Umspannern wurden die in Tabelle 1 dargestellten Werte ermittelt.

Entsprechend Tabelle 1 hat die Verbindung von der US des Transformators zum Leistungsschalter bei den betrachteten Anlagen Abmessungen im Bereich von  $l_0 = 55 \text{ m} \dots 582 \text{ m}$ . Eine Auswertung der Übertragungsfunktion ist bis zur ersten Nullstelle im Spektrum der Spannung an der US des Transformators möglich (Fig. 15b und Fig. 16). Die Lage der ersten Nullstelle kann bei Vernachlässigung der Wandlerkapazität durch

$$f_{0,1} = \frac{1}{4 \cdot \tau_0} = \frac{v}{4 \cdot l_0} \quad (14)$$

bestimmt werden. Dabei ist  $l_0$  die Leitungslänge und  $v$  die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit auf der Leitung. Diese Beziehung gilt für eine Anordnung gemäß Bild 17 exakt. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit auf Freileitungen entspricht der Lichtgeschwindigkeit. Für die Lage der ersten Nullstelle im Spektrum der Spannung an der US ergibt sich mit  $l_0 = 55 \text{ m} \dots 582 \text{ m}$  ein Wertebereich von:

$$f_{0,1} = 1,3 \text{ MHz} \dots 130 \text{ kHz} \quad (15)$$

Anlage	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_0$	W	Ltg
Kupferzell	30	2,5	-	23	-	55,5	I	F
Pulverdingen	582	-	-	-	-	582	I	F
	148	-	-	51	-	199	Ko	F
	300	3	-	15	-	318	K	K+F
Großgartach	63,5	12,5	-	11,5	4	87,5	K	F
Oberjettingen	48	6	-	2	19	56	I	F
Dellmensingen	393	-	-	-	-	393	K	F
	15	-	-	40	-	55	K	F
Engstlatt	37	3,5	-	23	-	63,5	I	F
Rotensohl Laichingen	62	-	-	-	-	62	KT	GIS
Wendlingen	55	-	-	27	-	82	Ko	F

Dabei bedeuten:

$l_i$ : Leitungslänge in m; keine Angabe (-) bedeutet eine vernachlässigbar kurze Verbindung

Spalte W: K = Kap. Spannungswandler; I = Induktiver Spannungswandler; Ko = Kombi-Wandler, KT = Kapazitiver Teiler in der GIS

Spalte Ltg: Leitung  $l_1$  besteht aus:  
F = Freileitung; K+F = Kabel und Freileitung; GIS = Gasisolierte Schaltanlage

$l_0$ : Leitungslänge bis zum Leistungsschalter ( $= l_1 + l_2 + l_4$ )

Tabelle 1: Zusammenstellung der Leitungsabmessungen an der Unterspannungsseite von 380 kV-Transformatoren bei verschiedenen Anlagentypen

In Vergleich zum einfachen Ersatzschaltbild Fig. 14 sind bei den untersuchten Anlagen zusätzlich die folgenden Gesichtspunkte von Bedeutung (Fig. 17):

- Die Leitung  $l_1$  ist im allgemeinen aus mehreren Leitungsabschnitten zusammengesetzt.

Dies kann einerseits daher rühren, daß die Verbindung vom Transformator zum Leistungsschalter aus einer Kombination aus Freileitung und Kabel besteht (Anlage Pulverdingen). Bei den Freiluftschaltanlagen hingegen wurden für die Abspannung an den Masten und die Umspannung am Mast unterschiedliche Seiltypen verwendet (alle

Freiluftschaltanlagen gemäß Tabelle 1). Beide Seittypen bestehen aus einem 2er-Bündel, jedoch mit unterschiedlichem Bündelleiterabstand.

In jedem Fall erhält man unterschiedliche Wellenwiderstände für die einzelnen Leitungsabschnitte.

- Am Übergang der Verbindung Transformator-Schaltanlage befinden sich Strom- und Spannungswandler. Beide Wandlertypen können im höherfrequenten Bereich in erster Näherung durch Kapazitäten beschrieben werden.

Mit Hilfe eines Netzwerkanalyseprogramms wurden die Einflüsse dieser realen Bedingungen entsprechend Fig. 17 auf die Übertragungsfunktion  $|H(f)|$  untersucht. Durch unterschiedliche Wellenwiderstände im Leitungsabschnitt  $l_1$  und durch die Berücksichtigung von Wandlerkapazitäten kommt es gegenüber der in Fig. 15a dargestellten Übertragungsfunktion zu einer Verschiebung der Pol- und Nullstellen in Richtung tieferer Frequenzen. Ferner treten die Pol- und Nullstellen nicht mehr periodisch auf. Das prinzipielle Verhalten der Übertragungsfunktion  $|H(f)|$  - die sich abwechselnden Pol- und Nullstellen, beginnend mit einer Nullstelle - bleiben jedoch erhalten.

Die Spannung an der Unterspannungsseite kann also, abhängig von der Leitungslänge  $l_0$ , nur eingeschränkt zur Transformatorüberwachung mit Hilfe der Übertragungsfunktion herangezogen werden.

### 3.2 Sternpunkterdung über eine Erdungsdrossel

In einer Umspannanlage wurden an einem 40 MVA/110 kV/10 kV-Transformator Messungen mit Niederspannungsimpulsen durchgeführt. Die Spannungen an der Ober- und Unterspannungsseite wurden dabei an einer Phase durch kapazitive Spannungsteiler gemessen. Der über den Sternpunkt des Transformators gegen Erde abfließende Strom wurde mit einer Rogowskispule gemessen (Fig. 18). Die während des Betriebs erforderliche Erdungsdrossel konnte für die Messungen überbrückt werden.

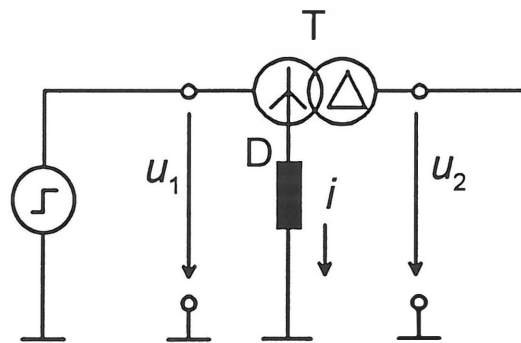


Fig. 18

Prinzipschaltbild der Anlage

Fig. 19 zeigt den Niederspannungsimpuls an der OS des Transformators, den Sternpunktstrom und die Spannungen an der US mit und ohne die Erdungsdrossel. Der zeitliche Verlauf des Sternpunktstromes zeigt eine wesentliche Änderung hinsichtlich Amplitude und Schwingungsverhalten. Die Spannung an der US hingegen ist weitgehend unabhängig von der Sternpunktsbehandlung des Transformators.

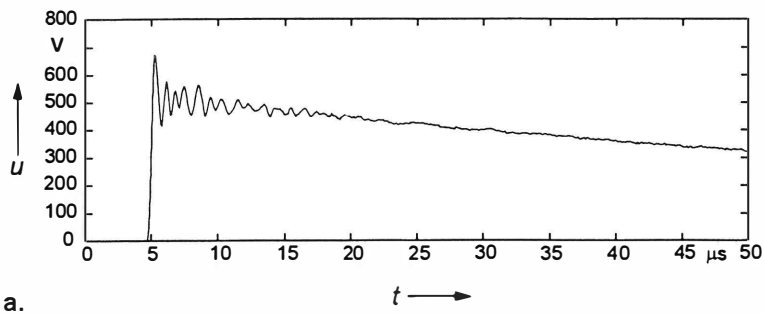
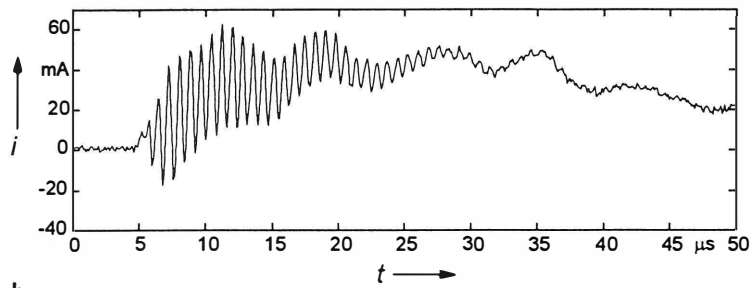
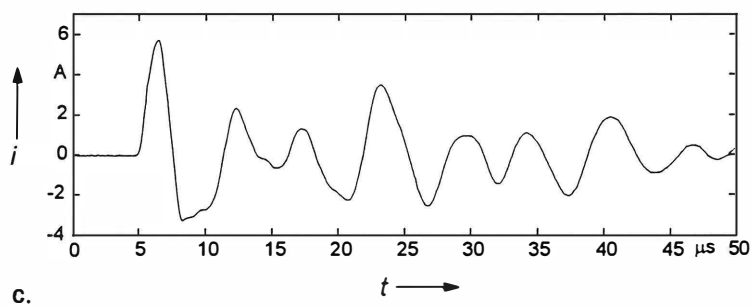


Fig. 19

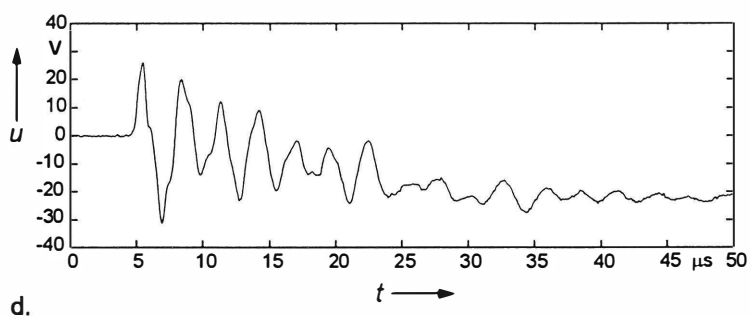
a.  
Niederspannungsimpuls



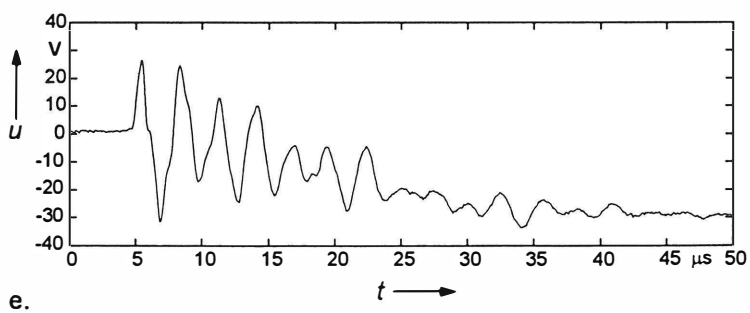
b.  
Sternpunktstrom mit  
Erdungsdrossel



c.  
Sternpunktstrom ohne  
Erdungsdrossel



d.  
Spannung an der US mit  
Erdungsdrossel.



e.  
Spannung an der US  
ohne Erdungsdrossel

Die Übertragungsfunktionen aus der Spannung an der OS und dem Sternpunktstrom mit und ohne Erdungsdrossel, berechnet gemäß

$$\underline{TF}(f) = \frac{I_{Stern}(f)}{U_{OS}(f)} \quad (14)$$

sind in Fig. 20 dargestellt.

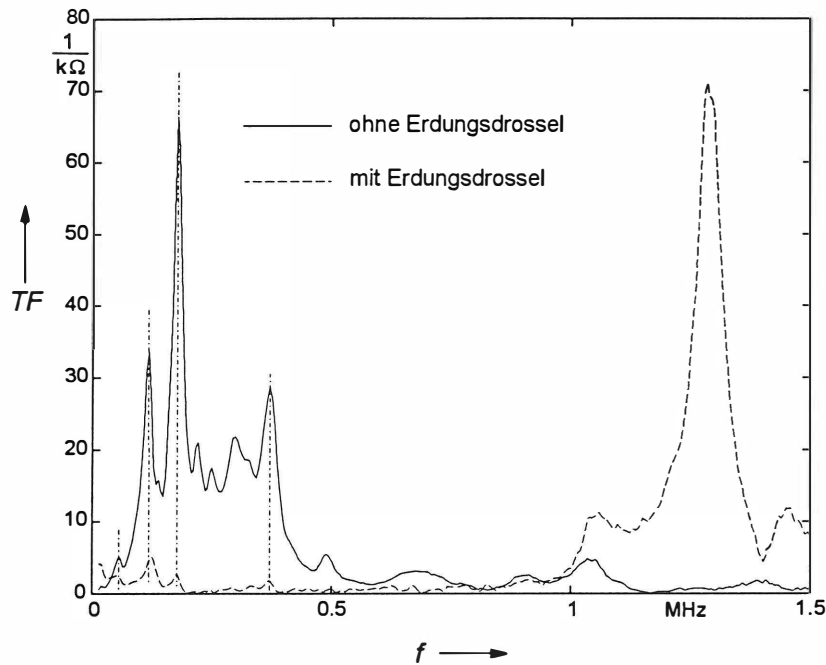


Fig. 20

Übertragungsfunktion aus Spannung an der OS und Sternpunktstrom mit und ohne Erdungsdrossel

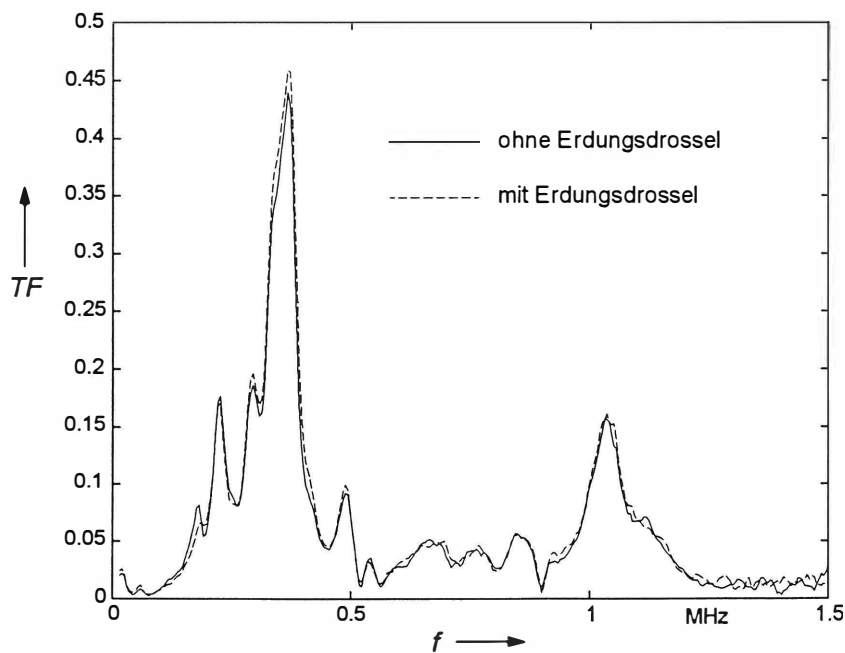


Fig. 21

Übertragungsfunktion aus Spannung an der OS und Spannung an der US mit und ohne Erdungsdrossel

Im unteren Frequenzbereich ergibt sich eine Übereinstimmung der Lage einiger Resonanzen. Dies deutet darauf hin, daß es sich dabei um Transformatorresonanzen handelt. In der Übertragungsfunktion mit Erdungsdrossel dominiert die Resonanzstelle bei 1,28 MHz, die eindeutig durch die Hinzuschaltung der Erdungsdrossel bedingt ist. Die Erdungsdrossel bewirkt also eine Dämpfung und Verformung von Resonanzen. Ferner werden zusätzliche Resonanzen erzeugt. Eine Auswertung der Übertragungsfunktion mit Erdungsdrossel ist selbst bei bekannten Resonanzstellen des Transformators sehr erschwert, wenn - wie in diesem Fall - die Übertragungsfunktion von einer Resonanz dominiert wird.

Eine Übertragungsfunktion aus Spannung an der US und Spannung an der OS ist in diesem Fall für eine Transformatorüberwachung wesentlich besser geeignet, da sie nahezu unabhängig von der Beschaltung des Sternpunktes ist (Fig. 19d, 19e und Fig. 21).

Der Vergleich der beiden aus unterschiedlichen Meßgrößen berechneten Übertragungsfunktionen in Fig. 20 und Fig. 21 liefert Resonanzstellen bei denselben Frequenzen. Für die Ermittlung der Lage von Resonanzstellen, die aufgrund einer bestimmten Anregung im Netz zu resonanzerregten Überspannungen führen, sind also beide Übertragungsfunktionen in gleicher Weise geeignet.



## 4. Schlußfolgerungen

Aus den in den Kapiteln 2 und 3 dargestellten Untersuchungen können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

- Eine Transformatorüberwachung mit Hilfe der Übertragungsfunktion ist prinzipiell möglich. Die Frequenzanregung durch Schaltvorgänge, die beim Schalten des Transformators entsteht, reicht aus, um die Übertragungsfunktion dieses Transformators bis zu Frequenzen von 1 MHz und darüber zu berechnen.
- Die Messung transienter Vorgänge bei Schalthandlungen vor Ort ist sehr gut reproduzierbar. Messungen, die zu verschiedenen Zeitpunkten aufgezeichnet wurden, können sehr gut miteinander verglichen werden.
- Bei unterspannungsseitig von Netz abgetrenntem Transformator sind die Stufenschalterstellung und die Temperatur des Transformators wesentliche Einflußgrößen auf die Übertragungsfunktion. Die Auswirkungen von Temperaturänderungen sind nur schwach, während die Stufenschalterstellung wesentlichen Einfluß auf die Übertragungsfunktion ausübt. Für eine Transformatorüberwachung mit Hilfe der Übertragungsfunktion müssen daher beide Größen erfaßt und ausgewertet werden.
- Netzkomponenten (z. B. Kabel), die an den Transformator angeschlossen sind, haben dann einen starken Einfluß auf die Übertragungsfunktion, wenn diese aus einer Meßgröße berechnet wird, die direkt an dieser Netzkomponente gemessen wird.

Näher untersucht wurde der im Anlagenbau stets auftretende Fall einer an der Unterspannungsseite eines Transformators angeschlossenen Leitung. Die Spannung an der Unterspannungsseite kann ohne größeren Aufwand über den Meßabgriff der Durchführung meßtechnisch erfaßt werden und bietet sich daher für eine Transformatorüberwachung an. Eine an der Unterspannungsseite angeschlossene Leitung führt jedoch in der Praxis immer zu Mehrfachreflexionen. Diese Mehrfachreflexionen bestimmen und beschränken die Frequenz bis zu der eine Auswertung der Übertragungsfunktion möglich ist.

Eine in die Sternpunktleitung geschaltete Erdungsdrossel führt zu einer Verformung, Dämpfung und Neubildung von Resonanzen der Übertragungsfunktion aus Spannung an der OS und Sternpunktstrom. Im Falle des in Kapitel 3 diskutierten Beispiels ist eine Transformatorüberwachung mit Hilfe der Übertragungsfunktion nicht möglich.

## 6. Literatur

- /1/ J. Kreuzer: "Entwicklungsschwerpunkte bei Verteiltransformatoren", Bulletin des SEV, Bd. 76 (1985), Nr.9, S. 503-508
- /2/ G. Hengge, P. Kemm, T. Leibfried: "Anwendung der Transferfunktion bei der Prüfung von Großtransformatoren" 7. Haefely Trench Symposium 1995
- /3/ R. Malewski, J. Douville, L. Lavallee: "Measurement of switching transients in 735 kV-substations and assessment of their severity for transformer insulation". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, Oktober 1988
- /4/ H. Link: "Das Temperaturverhalten der elektrischen Eigenschaften von Isolierölen, insbesondere Haftmassen und ihren Einzelkomponenten", Dissertation an der Universität Braunschweig, 1966
- /5/ W. O. Schumann: "Isolieröle", Verlagsbuchhandlung Springer, 1938
- /6/ R. Malewski, J. Douville, L. Lavallee: "Automatic digital recording of transients in EHV-substations", Sixth International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, LA, USA, August 28 - September 1, 1989