

# Probleme und Grenzen des Einsatzes der Übertragungsfunktion im Monitoring an Transformatoren

J. Christian

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik  
Universität Stuttgart

## 1 Einleitung

Seit mehreren Jahren werden zusätzlich zu den herkömmlichen Diagnoseverfahren Untersuchungen zur frequenzabhängigen Übertragungsfunktion durchgeführt. Die Analyse des Transformators im Frequenzbereich soll die Empfindlichkeit von  $u_k$ -Messungen, Messungen von Übersetzung und Widerstand, Gas-in-Öl-Analysen und TE-Messungen übertreffen. Neben dem ursprünglichen Einsatz im Prüffeld in Form einer erweiterten Auswertemethode der Stoßspannungsprüfung, finden mittlerweile auch Untersuchungen an in Betrieb befindlichen Objekten statt. Eine regelmäßige Analyse des Frequenzgangs soll den Zustand des Transformators überwachen und mögliche Veränderungen sehr frühzeitig detektieren.

Eine systematische Überwachung der Frequenzgänge eines Transformators kann innerhalb ( online ) und außerhalb des Netzbetriebs ( offline ) erfolgen. Bei freigeschalteten Objekten können derartige Untersuchungen mit Betriebsspannung oder mit Niederspannung vorgenommen werden. Der Einsatz von Hochspannung ist allerdings mit einem erhöhten Aufwand hinsichtlich Apparatur und Meßtechnik verbunden und setzt bestimmte konstruktive Gegebenheiten für die Montage der notwendigen Sensorik am Trafo voraus.

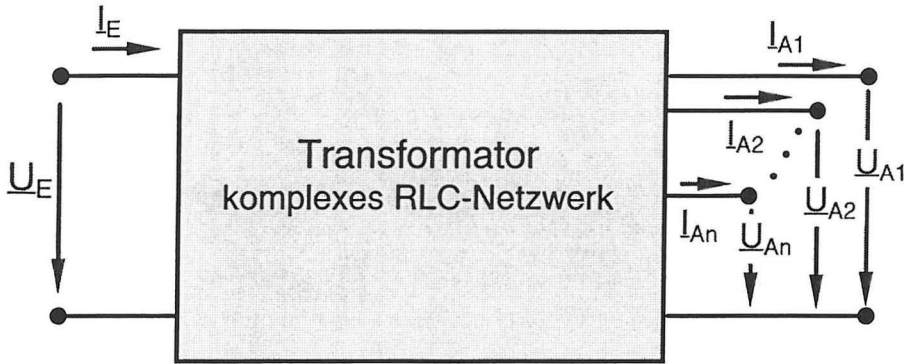
Für die Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln ist vor allem die Zustandsüberwachung bzw. -diagnose von älteren Objekten interessant. Hierbei besteht oft keine Möglichkeit, entsprechende Sonden für eine Messung mit Hochspannung anzubringen. Aus diesem Grund gewinnt bei der Zustandsdiagnose alter Transformatoren die Ermittlung der Übertragungsfunktion mit Niederspannung zunehmend an Bedeutung.

Während die Meß- und Prüfbedingungen in einem Prüffeld sehr definiert und überschaubar sind, bringen die örtlichen Gegebenheiten bei Vor-Ort-Messungen diverse Schwierigkeiten mit sich. Die Gestaltungsmöglichkeiten für den Meßaufbau, Erdung und Signalleitungsführung sind oft sehr eingeschränkt und verhindern die Reproduktion von Meßanordnungen, die bereits zu Vergleichszwecken an anderen Orten am selben Prüfobjekt vorgenommen wurden. Um allerdings reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, sind definierte Signalwege und Erdungsverhältnisse notwendig.

Die Bewertung des Diagnoseverfahrens erfordert die Durchführung umfangreicher Meßreihen an verschiedenen Objekten. Die damit gewonnene Datenbasis ist zur Klärung der Aussagefähigkeit des Verfahrens notwendig. Darüber hinaus sollen Korrelationen zwischen möglichen Änderungen am Prüfobjekt und den Charakteristika der Frequenzkennlinien erarbeitet werden. Außerdem interessiert der Zusammenhang zwischen Wicklungstyp und den damit verbundenen Merkmalen im Frequenzgang der Übertragungsfunktion. Da derzeit solche Datenmengen nur bei den Herstellern verfügbar sind und diese dann unter definierten Prüffeldbedingungen im Rahmen der Isolationsstoßprüfung erstellt werden, bleibt für Untersuchungen mit Niederspannung nur die vergleichende Betrachtung von Referenzmessungen.

## 2 Theoretische Grundlagen

In Anlehnung an die Grundlagen der Systemtheorie geht man davon aus, daß ein Transformator als komplexes, passives, lineares und zeitinvariantes Netzwerk beschrieben werden kann. Der Transformator stellt ein System mit einem Eingang und mehreren Ausgängen dar. Abbildung 2.1 veranschaulicht die Betrachtungsweise eines Trafos als komplexes RLC-Netzwerk.



**Abbildung 2.1:**  
Betrachtung des Transformators als komplexes RLC-Netzwerk

Eine erregende Eingangsgröße hat verschiedene Systemantworten zur Folge. Entsprechend der Anzahl von definierten Ausgangsgrößen lassen sich eine Reihe von Übertragungsfunktionen definieren.

$$\underline{TF}_E(f) = \frac{\underline{I}_E(f)}{\underline{U}_E(f)}$$

$$\underline{TF}_{Au,v}(f) = \frac{\underline{U}_{A,v}(f)}{\underline{U}_E(f)} \quad \underline{TF}_{Ai,v}(f) = \frac{\underline{I}_{A,v}(f)}{\underline{U}_E(f)} \quad (2.1)$$

Die einzelnen Übertragungsfunktionen besitzen hinsichtlich der zu detektierenden Effekte im Trafo eine sehr unterschiedliche Empfindlichkeit.

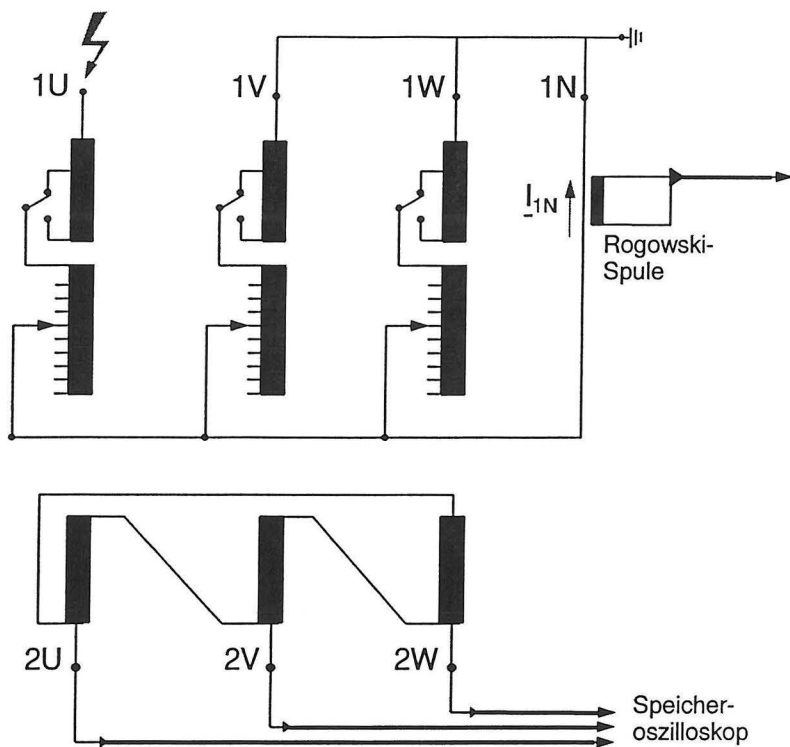
Gemäß den Grundlagen der Systemtheorie ist der Transformator durch eine der verschiedenen Übertragungsfunktionen vollständig beschrieben.

Abbildung 2.2 zeigt das Beispiel einer Prüfschaltung für einen 125 MVA-Transformator in Stern-Dreieck-Schaltung.

Bei Stoß auf die Primärklemme 1U und geerdeten Klemmen 1V und 1W werden die übertragenen Spannungen auf 2U, 2V und 2W gemessen. Eine Rogowski-Spule erfaßt den Strom des geerdeten Sternpunkts 1N. Hieraus lassen sich 4 verschiedene Übertragungsfunktionen definieren:

$$\underline{TF}_1(f) = \frac{\underline{I}_W(f)}{\underline{U}_W(f)} \quad ; \quad \underline{TF}_2(f) = \frac{\underline{U}_{2U}(f)}{\underline{U}_W(f)}$$

$$\underline{TF}_3(f) = \frac{\underline{U}_{2V}(f)}{\underline{U}_W(f)} \quad ; \quad \underline{TF}_4(f) = \frac{\underline{U}_{2W}(f)}{\underline{U}_W(f)} \quad (2.2)$$



**Abbildung 2.2:**

**Beispiel einer Prüfschaltung zur Ermittlung der Übertragungsfunktion an einem 125 MVA-Transformator**

Die Netzwerkbeschreibung mit Hilfe der vier Übertragungsfunktionen gibt nicht das elektrische Verhalten des Trafos, sondern das der aus Trafo und Meßaufbau bestehenden Gesamtanordnung wieder. Die Anwendung der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion als empfindliches Diagnosekriterium gibt daher auch diejenigen Änderungen wieder, die durch den Meßaufbau bedingt sind. Um Fehlinterpretationen bei Meßergebnissen zu vermeiden, wird versucht, den Einfluß der Meßschaltung möglichst gering bzw. reproduzierbar zu gestalten. Hierbei spielen definierte Signalwege und Anschlußkonzepte für Meßkabel eine wichtige Rolle. Darüber hinaus sollten nach Möglichkeit einheitliche Erdungsschaltungen realisiert werden.

### 3 Praktischer Einsatz des Meßverfahrens zur Überwachung von Transformatoren

Der praktischen Ermittlung des Frequenzgangs einer Übertragungsfunktion stehen prinzipiell zwei Möglichkeiten offen. Der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße läßt sich einerseits durch Anlegen einer harmonischen Erregerspannung und Ausmessung der Signalantwort nach Betrag und Phasenlage ermitteln. Durch Variation der Frequenz des erregenden Signals kann daher der Frequenzgang ermittelt werden. Dieses Prinzip findet hauptsächlich bei Netzwerkanalysatoren Anwendung.

Das systematische Durchlaufen eines definierten Frequenzbandes mit einer sinusförmigen Erregerspannung kann dadurch vermieden werden, indem ein breitbandiges Erregersignal angewandt wird. Hierzu bieten Stoßspannungen, deren Charakteristik an die Normblitzstoßspannung angelehnt ist, eine ausreichende spektrale Breite. Die Einspeisung eines transienten Signals ermöglicht die Berechnung des gesamten Spektrums.

Unter praktischen Gesichtspunkten können bei Messungen mit Stoßspannungen mehrere Signalantworten gleichzeitig aufgezeichnet und damit mehrere Übertragungsfunktionen gebildet werden. Herkömmliche Netzwerkanalysatoren besitzen oft nur zwei Eingangskanäle, während mehrere Transientenrekorder mit wenig Aufwand synchron getriggert werden können und dadurch beispielsweise bis zu 10 Antwortsignale gleichzeitig erfaßbar sind.

Für die Anwendung von Stoßspannungen zur Ermittlung der Frequenzgänge bei Transformatoren besteht prinzipiell die Möglichkeit des Einsatzes von Hochspannung ( Betriebsspannung ) und Niederspannung. Abbildung 3.1 illustriert die Einordnung der verschiedenen Verfahren für die Anwendung von transienten Spannungen zur Ermittlung der Übertragungsfunktion.

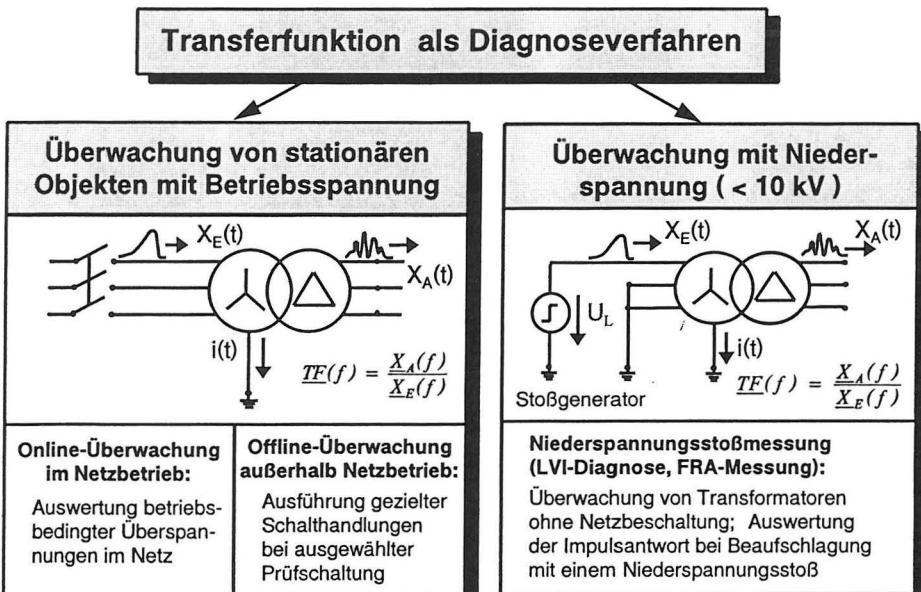


Abbildung 3.1:  
Praktische Einsatzvarianten der Übertragungsfunktion

Eine Messung der Übertragungsfunktion mit Niederspannung kann bei allen Objekten durchgeführt werden. Es müssen keine konstruktiven Voraussetzungen erfüllt sein, um die entsprechende Meßtechnik installieren zu können. Sie ermöglicht einen mobilen, modularen Aufbau und bedarf keiner stationären Einrichtungen am Trafo. Das Untersuchungsobjekt muß allerdings vom Betriebsnetz getrennt werden. Im Gegensatz dazu ist für Messungen mit Hochspannung zumindest eine teilstationäre Anordnung empfehlenswert. Aufgrund der



Hochspannung ist eine auf das Prüfobjekt abgestimmte Sensorik notwendig. Zur Eindämmung von meßtechnischen Einflüssen sollte Sensorik und Verkabelung fest installiert werden. Der Online-Betrieb erfordert zusätzlich ein stationäres, digitales Meßsystem mit einer ausreichenden zeitlichen Speichertiefe. Für Offline-Messungen kann ein mobiles Meßsystem angewandt werden.

Im Gegensatz zum Online-Betrieb, der Überspannungen aus den Netz erfaßt und auswertet, sind für Offline-Messungen gezielte Schalthandlungen notwendig.

Da der Meßaufbau für Hochspannungsmessungen in der Regel fest installiert ist, ergibt sich zwischen einzelnen Untersuchungen eine gute Reproduzierbarkeit. Die Übertragungsfunktion kann daher als vergleichende Methode für über größere Zeiträume getrennte Meßreihen verwendet werden. Tabelle 3.1 zeigt die wesentlichsten Merkmale der drei vorgestellten Meßvarianten hinsichtlich der notwendigen Meßtechnik im Überblick.

	Hochspannung		Niederspannung
	online	offline	
universelle Einsetzbarkeit	+	+	+++
Freiheitsgrade bei Prüfschaltungen	o	+	+++
Unterbrechung des Netzbetriebs	o	- / - -n	- - -
zusätzliche Belastung von Leistungsschaltern	o	- - -	o
Aufwendungen für Sensorik	- - -	- - -	-
stationär installierte Meßtechnik	- - -	- -	o
Mobilität des Gesamtaufbaus	o	+	+++
notwendige zeitliche Speichertiefe	- - -	- - -	-
Kosten für digitales Meßsystem	- - -	- - -	-
Einfluß des Meßaufbaus auf Meßergebnisse	o	o / -	- - -

("+": positiver Gesichtspunkt; "-/-": wenig erwünschter Effekt; "o": keine Relevanz )

Tabelle 3.1: Hochspannungs- und Niederspannungsmethode im meßtechnischen Vergleich

Die Auswertung transients Vorgänge infolge von Schalthandlungen zur Ermittlung der Übertragungsfunktion ( online oder offline ) ergibt unter idealen Bedingungen drei zeitlich entkoppelte Anregungen an den Phasen U, V und W. Der Grund liegt in der zeitlich getrennten Schaltfolge der Leistungsschalter bei dreiphasigen Anordnungen. Die Aufzeichnung der drei transienten Vorgänge erfordert eine entsprechend große zeitliche Speichertiefe. Die erhöhten Anforderungen machen sich in den Kosten des Meßsystems bemerkbar.

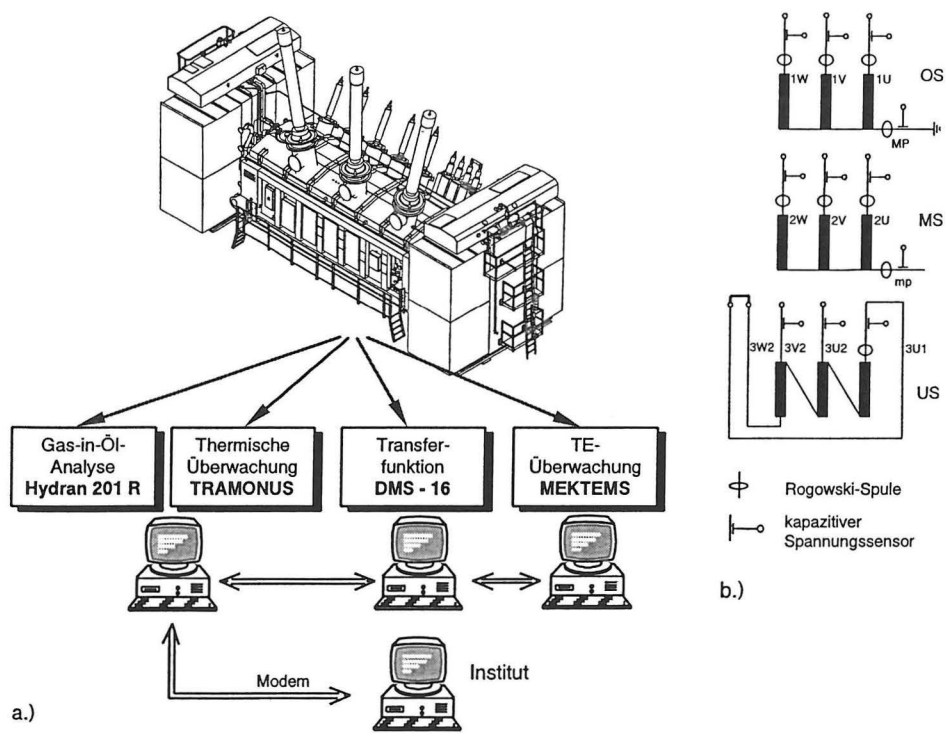
### 3.1 Untersuchungen bei Messung mit Hochspannung

#### 3.1.1 Online-Monitoring an Leistungstransformatoren

Abbildung 3.2a zeigt die praktische Realisierung einer Online-Überwachung für einen 350 MVA-Transformator in einem Umspannwerk.

An die Inbetriebnahme des Trafos wurde die Installation eines 16-kanaligen Meßsystems für transiente Vorgänge geknüpft. Es besteht dadurch die Möglichkeit, ab dem Zeitpunkt der ersten Netzschaltung die Übertragungsfunktion über längere Zeiträume zu überwachen und damit Rückschlüsse auf mögliche Veränderungen im Trafo zu ziehen.

Insgesamt verfügt der Transformator über 20 Sensoren zur transienten Strom- und Spannungsmessung. Davon werden mit dem 16-kanaligen Meßsystem insgesamt 9 Spannungen und 7 Ströme erfaßt. Abbildung 3.2b zeigt hierzu das Schaltbild des Trafos und die Anordnung der Sensoren.



**Abbildung 3.2:**  
**Überwachungssystem eines 350 MVA-Transformators**

- a.) Online-Überwachungssystem
- b.) Sensorik zur Überwachung transienter Vorgänge

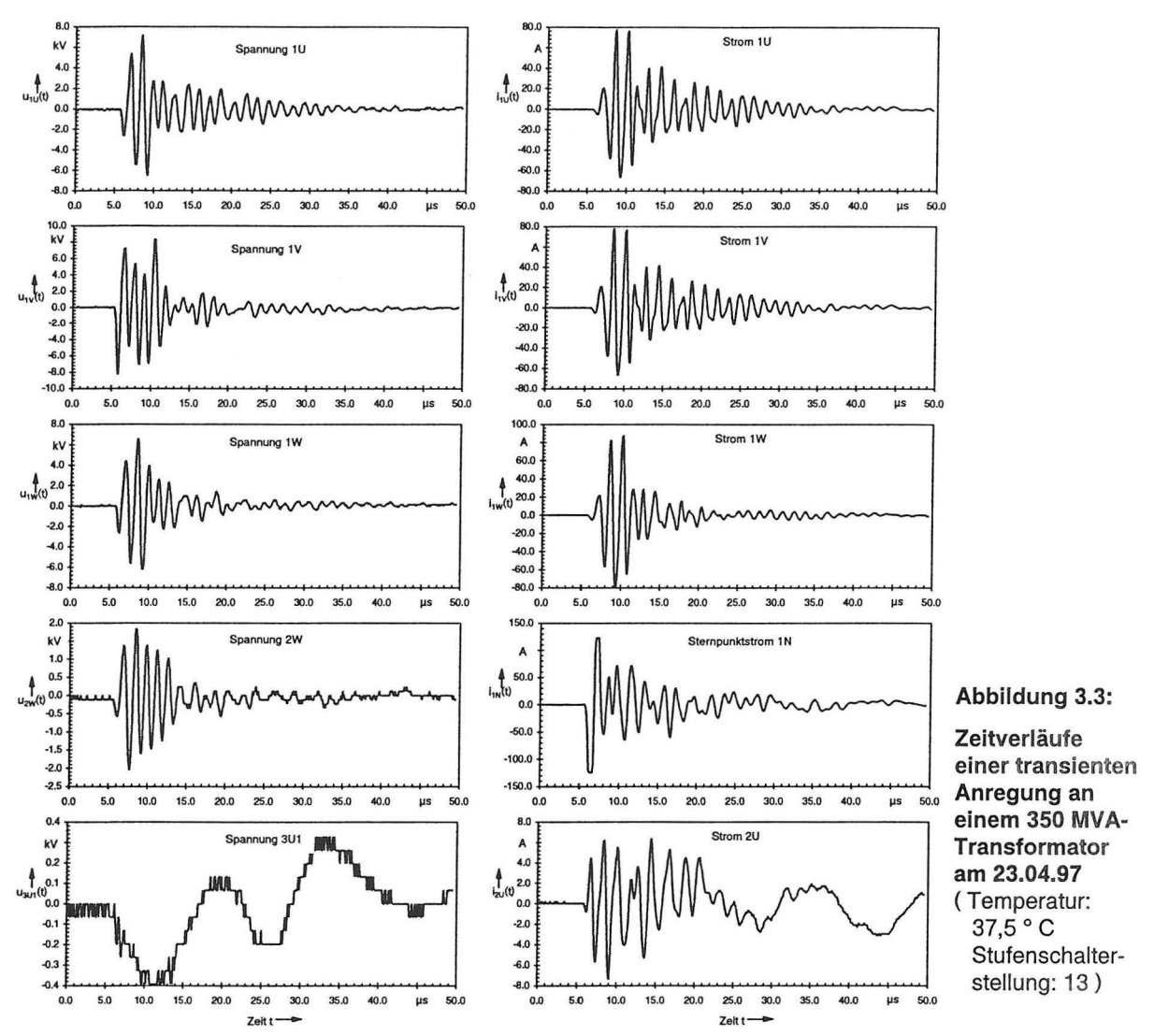
Das Gesamtsystem beinhaltet neben der Erfassung transienter Vorgänge auch eine thermische Überwachung, eine Gas-in-Öl-Analyse sowie die Überwachung von Teilentladungen. Unter den drei voneinander entkoppelten Datenerfassungssystemen besteht eine Netzwerkverbindung und eine Ankopplung an einen Institutsrechner per Modem.

Der Sinn einer Online-Erfassung transienter Überspannungen liegt in der vergleichenden Langzeitbetrachtung der Übertragungsfunktion. Hierzu wird die Übertragungsfunktion aus den Zeitverläufen von transienten Anregungen berechnet, bei denen die Stufenschalterstellung und die Trafotemperatur gleiche Werte aufweisen. Je nach Einbettung des Betriebsmittels in das elektrische Versorgungsnetz ist auch der Schaltzustand des umgebenden Netzes zu berücksichtigen.

Der Vergleich zweier Übertragungsfunktionen ist hinsichtlich den transienten Anregungen an folgende Bedingungen geknüpft:

- vergleichbare Temperaturverhältnisse im Trafo
- identische Stufenschalterstellung
- übereinstimmender Schaltzustand des umliegenden Netzes
- ausreichender Signal-zu-Rauschabstand einzelner Zeitsignale ( gute Aussteuerung der ADU )
- deutlich erkennbare Anregung auf nur einer Phase des Transformators

Daß die Qualität der aufgezeichneten transienten Vorgänge hinsichtlich den beiden letztgenannten Voraussetzungen sehr unterschiedlich sein kann, zeigt die Darstellung unter Abbildung 3.3.



Ein Vergleich der Spannungen an den Phasen 1U, 1V und 1W gibt keinen Aufschluß auf eine eindeutige Anregung an nur einer Klemme des Transformators. Auch die nähere Untersuchung der Leitungsströme gibt keinen entsprechenden Hinweis. Es kann daher von Wanderwellen, die nahezu synchron an den Klemmen 1U, 1V und 1W einlaufen, ausgegangen werden. Im vorliegenden Fall ist sogar keine gesicherte Aussage möglich, ob die Anregung auf der Primär- oder der Sekundärseite erfolgt ist. Mit sehr unterschiedlicher Qualität fällt die Aussteuerung der A/D-Umsetzer aus. Während der Pegel des Sternpunktstroms  $i_N(t)$  bis an die Begrenzung des ADU reicht, sind bei den Spannungen der Sekundärklemmen deutliche Quantisierungsstufen zu erkennen. In beiden Fällen sind die Ergebnisse nicht zu verwenden.

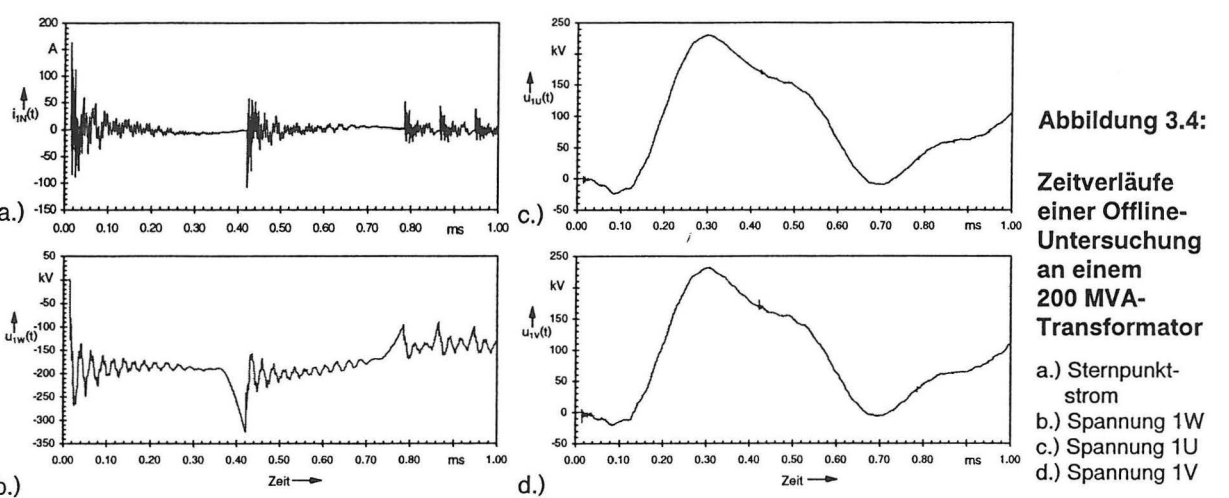
Je nach Einbindung des Trafos ins umliegende Versorgungsnetz treten einlaufende Wanderwellen mit unterschiedlicher Häufigkeit an allen drei Leitern gleichzeitig auf, obwohl der Ursprung in einer Anregung auf nur einem Leiter liegt. Dieser Umstand ist vor allem bei Transformatoren zu beobachten, die an sehr lange Übertragungsleitungen gekoppelt sind und deren nächste Schaltstation weit entfernt liegt. Mit steigender Laufstrecke koppelt eine Überspannungswelle eines Leiterseils immer stärker auf die benachbarten Leitungen über und führt dadurch zu dreiphasigen Anregungen am Ende der Leitung. Abhängig vom

Schaltbetrieb im Netz kann dies dazu führen, daß über 90 % der aufgezeichneten Vorgänge gleichzeitig an den Phasen R, S und T eine Anregung aufweisen und daher für die weitere Auswertung unbrauchbar sind. Da zur Weiterverarbeitung der verbleibenden einphasigen Anregungen die restlichen vier der obengenannten Kriterien ebenso erfüllt sein müssen, reduziert sich der verfügbare Datenvorrat für eine zeitliche Vergleichsbetrachtung zum Teil erheblich. Die Qualitätsdichte der aufgezeichneten Zeitverläufe hängt also stark vom Ort der Netzanbindung ab.

### 3.1.2 Offline-Monitoring an Leistungstransformatoren

Aufgrund der Tatsache, daß bei der Online-Auswertung transienter Signale eine sehr unterschiedliche Qualitätsdichte auftreten kann, besteht die Notwendigkeit zur Ausführung gezielter Schaltvorgänge an jenen Leistungsschaltern, die den Trafo mit dem umliegenden elektrischen Netz verbinden. Diese Schalthandlungen werden außerhalb des normalen Netzbetriebes durchgeführt und erfordern daher eine zusätzliche Abschaltung des Betriebsmittels. Da der Ursprung der transienten Anregung bei Offline-Untersuchungen trafonah liegt, ist eine hohe Qualitätsdichte der aufgezeichneten Daten hinsichtlich Rauschabstand und Einphasigkeit der Anregung zu erwarten. Außerdem besteht die Möglichkeit, die Stufenschalterstellung eventuellen Vergleichsmessungen anzupassen. Da die Temperaturverhältnisse von der Lastcharakteristik des Betriebs abhängen, können hierbei Unterschiede zu Vergleichsmessungen auftreten. Da für Offline-Untersuchungen der Trafo vom Netz freigeschaltet wird, tritt keine Beeinflussung durch unterschiedliche Netzschaltzustände auf. Für Vergleichsmessungen ergibt sich in dieser Hinsicht eine hohe Reproduzierbarkeit.

Abbildung 3.4 zeigt hierzu die Zeitverläufe einer Offline-Untersuchung an einem 200 MVA-Transformator. Bei abgetrennter Unterspannungsseite wird der Trafo mehrmals ans 220 kV-Netz geschaltet und wieder abgetrennt. Der dargestellte Zeitausschnitt gibt den Teil des transienten Vorgangs wieder, der durch das Schalten der Phase 1W verursacht wird.



Werden in regelmäßigen Zeitabständen Offline-Untersuchungen mit Hochspannung durchgeführt, so ergibt sich auch hieraus die Möglichkeit einer Langzeitüberwachung. Abbildung 3.5 zeigt das Ergebnis einer entsprechenden Untersuchung.

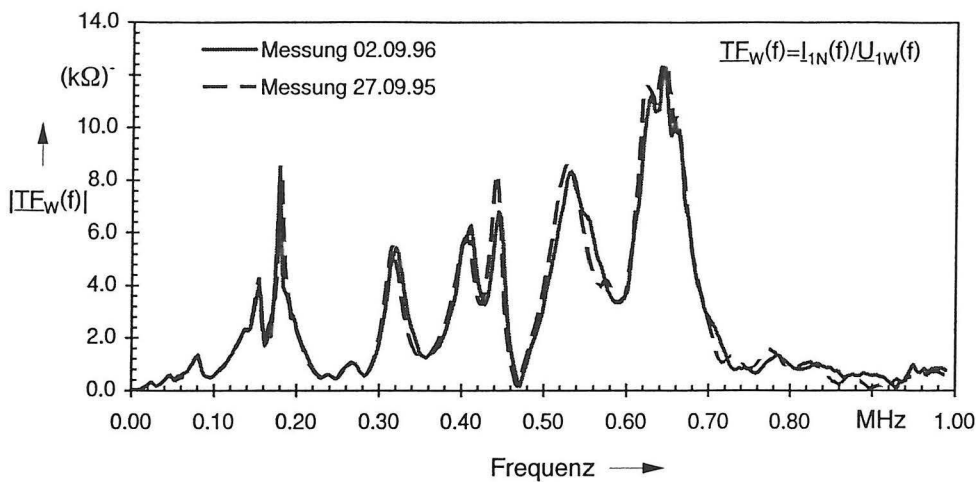


Abbildung 3.5:  
Langzeit-  
betrachtung zur  
Übertragungs-  
funktion eines  
200 MVA-  
Transformators  
aus Meßergeb-  
nissen von  
Offline-Unter-  
suchungen

### 3.2 Untersuchungen mit Niederspannung

Die Erfassung transienter Vorgänge auf Betriebsspannungsniveau erfordert den Einsatz kapazitiver Spannungssensoren. Diese bilden mit den Kapazitätsbelägen der Durchführungen einen kapazitiven Spannungsteiler. Bei älteren Transformatoren sind die dazu notwendigen Meßabgriffe an den Durchführungen oft nur teilweise oder überhaupt nicht vorhanden. In manchen Fällen besteht aufgrund der konstruktiven Eigenheiten der Durchführungsdomen keine Montagemöglichkeit für Meßsonden. In den beschriebenen Fällen stellt die Ausmessung der Übertragungsfunktion nach der Niederspannungsmethode die einzige Möglichkeit zur Untersuchung dar. Dies gilt insbesondere auch dann, wenn keine Möglichkeit zur Anbindung an ein elektrisches Hochspannungsnetz gegeben ist.

Die Mobilität des Meßaufbaus für Untersuchungen mit Niederspannung ermöglicht eine systematische Ausmessung der Übertragungsfunktion eines Versuchsobjektes an verschiedenen Orten. Abbildung 3.6 zeigt hierzu ein Beispiel zu einer Untersuchung mit Niederspannung. In regelmäßigen zeitlichen Abständen wird die Übertragungsfunktion gemessen, um damit den Zustand des Trafos hinsichtlich eventuellen Veränderungen zu untersuchen. Besonderes Augenmerk gilt hierbei den Einflüssen, die durch Montagearbeiten, Transport und diverse Einzelprüfungen hervorgerufen werden.

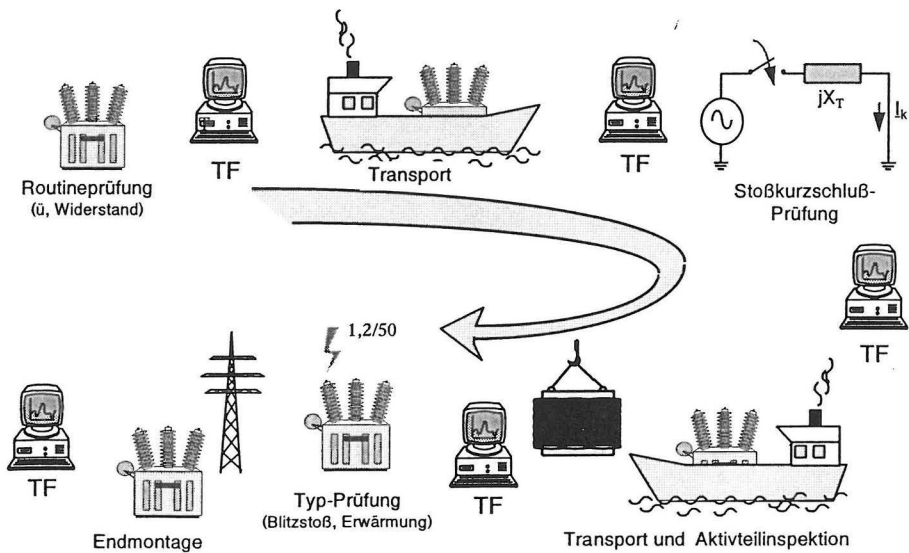


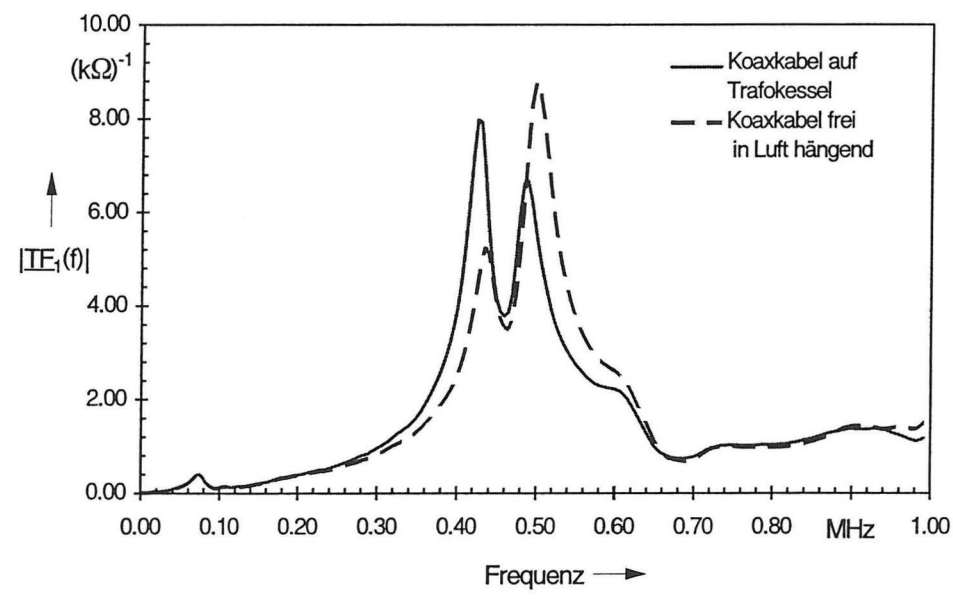
Abbildung 3.6:  
Dokumentation zum  
Prüfprogramm eines  
125 MVA-Transfor-  
mators mit Hilfe der  
Übertragungs-  
funktion  
(Niederspannungs-  
messung )  
  
( 'TF' = Messung der  
Transferfunktion )



Die Durchführung von Messungen zur Übertragungsfunktion wird an den jeweiligen Orten von unterschiedlichen Meßbedingungen begleitet. Aufgrund der praktischen Gegebenheiten läßt sich der Meßaufbau hinsichtlich Kabel- und Meßleitungsführung nicht identisch gestalten. Der Einfluß des Meßaufbaus kann daher nicht konstant gehalten werden. Hieraus ergeben sich Einschränkungen zur Reproduzierbarkeit der einzelnen Meßreihen.

### 3.2.1 Einfluß der Signalleitungsführung

Der praktischen Realisierung identischer Meßaufbauten an identischen Meßorten sind insofern Grenzen gesetzt, daß die Anzahl der Freiheitsgrade für einen Aufbau sehr groß und damit nur eingeschränkt überschaubar ist. Praktische Untersuchungen zeigen beispielsweise, daß bei Messungen am gleichen Ort, deren Durchführung einen mehrfachen Auf- und Abbau der Kabelwege erforderlich macht, keine vollständige Reproduzierbarkeit zu erreichen ist. Der Einfluß der Signalkabelführung macht sich in den Meßergebnissen bemerkbar. Wie stark dieser Effekt sein kann, zeigt die gezielt manipulierte Untersuchung in Abbildung 3.7. Bei den beiden Vergleichsmessungen liegen die Signalkabel zum einen am Trafokessel auf, zum anderen sind diese frei hängend gelagert, so daß die Isolation des Kabelschirms keinen Massekontakt entlang des Signalwegs hat.



**Abbildung 3.7:**  
Vergleich von Übertragungsfunktionen für den Sternpunktstrom eines 125 MVA-Transformators bei unterschiedlicher Signalleitungsführung

Die Untersuchung nach Abbildung 3.7 gibt sicherlich einen Extremfall einer unterschiedlichen Signalkabelverlegung wieder. Sollten es die örtlichen Bedingungen zulassen, so werden die Meßkabel stets in gleicher Weise angeordnet. Trotz allen Anstrengungen sind der praktischen Realisierbarkeit und dem damit verbundenen Aufwand zur Dokumentation Grenzen gesetzt. Der Einfluß auf die Ergebnisse der Meßreihen fällt dann im Vergleich zur Darstellung nach Abbildung 3.7 wesentlich geringer aus.

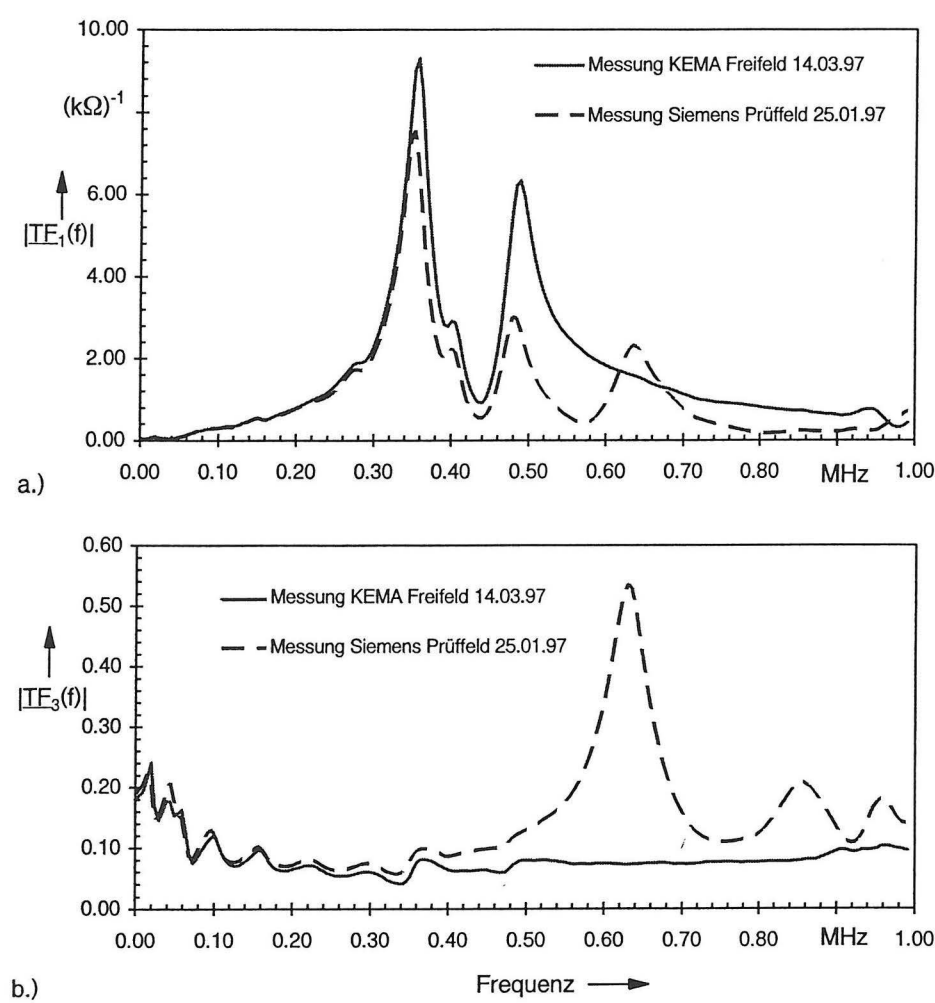
### 3.2.2 Einfluß von Gesamtaufbau, Montage und Transport

Weitere Meßunsicherheiten, die ihren Ursprung im Aufbau der Meßeinrichtung haben, entstehen durch unterschiedliche Erdungsverhältnisse an den einzelnen Meßorten. Es wird stets versucht, ein weitgehend identisches Massekonzept zu realisieren. Übergeordnete Dinge wie beispielsweise die Impedanz eines verfügbaren Erdungspunktes sind allerdings nicht beeinflussbar.



Da zwischen Messungen an verschiedenen Orten mit unterschiedlichen Erdungspunkten in den meisten Fällen ein Transport und damit eine Montage und Demontage verbunden ist, ist eine getrennte Untersuchung der genannten Einflüsse kaum möglich. Beim Transport können mechanische Verschiebungen im Trafokessel auftreten, bei der Montage sind mechanische Toleranzen beim Anschluß der Durchführungen an die Leitungen des Aktivteils sowie eine mögliche Vertauschung der Durchführungen denkbar. Der Überwachung dieser Unsicherheiten sind deutliche Grenzen gesetzt. Gemessene Änderungen im Frequenzgang eines Transformators bei Messungen an verschiedenen Orten können also sehr selten differenziert auf eine der obengenannten Einflußfaktoren zurückgeführt werden.

Abbildung 3.8 zeigt hierzu einen Vergleich zweier Messungen, die einerseits im geschlossenen Prüffeld eines Trafoherstellers, andererseits in freier Umgebung eines Schiffsanlegplatzes durchgeführt werden. Die jeweiligen Meßbedingungen sind bei beiden Untersuchungen denkbar unterschiedlich.



**Abbildung 3.8:**  
**Vergleich von Übertragungsfunktionen für einen 125 MVA-Transformators bei Messungen in einem geschlossen Prüffeld und in freier Umgebung eines Schiffsanlegplatzes**  
 ( Stoß 1V, Stellung 27 )  
 a.) Sternpunktstrom  
 b.) Spannung 2V

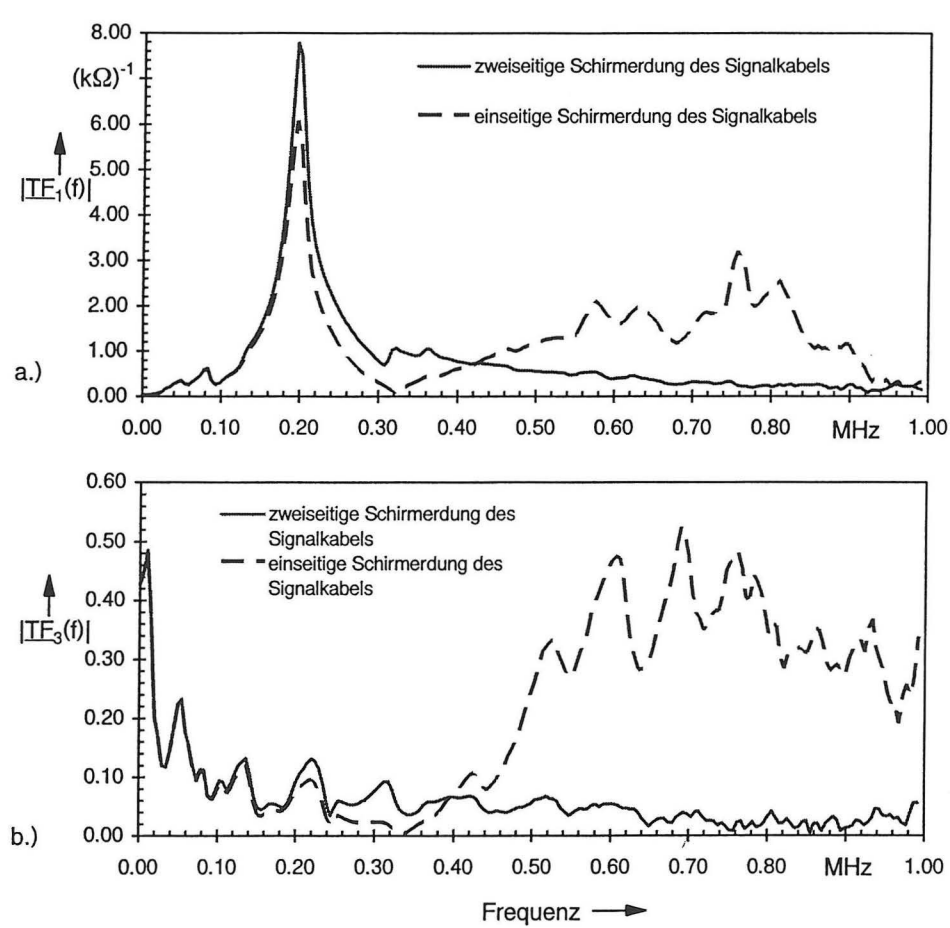
Die Ergebnisse nach Abbildung 3.8a und 3.8b geben eindrucksvoll die Tatsache wieder, daß bei einer Untersuchung zur Übertragungsfunktion nicht der Frequenzgang des Prüfobjektes, sondern der der gesamten Meßanordnung ermittelt wird. Im Gegensatz zur Untersuchung am 14.03.97 tritt bei der Messung im geschlossenen Prüffeld ( 25.01.97 ) eine deutlich ausgeprägte, zusätzliche Resonanz bei ca. 640 MHz auf. Diese ist bei sämtlichen Systemantwortgrößen festzustellen.

### 3.2.3 Einfluß durch Meßprinzipien

Neben den zum Teil wenig beeinflussbaren Nebeneffekten bei Messungen zur Übertragungsfunktion gibt es auch Freiheitsgrade hinsichtlich des angewandten Meßprinzips. Da sich diese Freiheitsgrade ebenfalls sehr stark auf die Meßergebnisse auswirken können, muß zur Erhaltung der Vergleichbarkeit einzelner Meßreihen ein einheitliches Meßprinzip verfolgt werden.

Bei der Durchführung von Messungen sind vor allem Fragen in Bezug auf die Behandlung der Signal- und der Masseleitungen zu klären. Wie stark der Einfluß solcher Einzelheiten sein kann, zeigt das Beispiel unter Abbildung 3.9.

Bei den dargestellten Messungen erfolgt entweder eine Erdung der Signalleitungsschirme nur an dem Ende, an welchem der Transientenrekorder angeschlossen ist, oder an beiden Leitungsenden, d.h. am Signalabgriff des Trafos und am Signaleingang des Transientenrekorders.



**Abbildung 3.9:**  
**Vergleich von Übertragungsfunktionen für einen 200 MVA-Wander-Transformator bei Messungen mit einseitiger und zweiseitiger Schirmerdung der Signalleitungen**  
(Stoß 1V, Stellung 27)  
a.) Sternpunktstrom  
b.) Spannung 2V

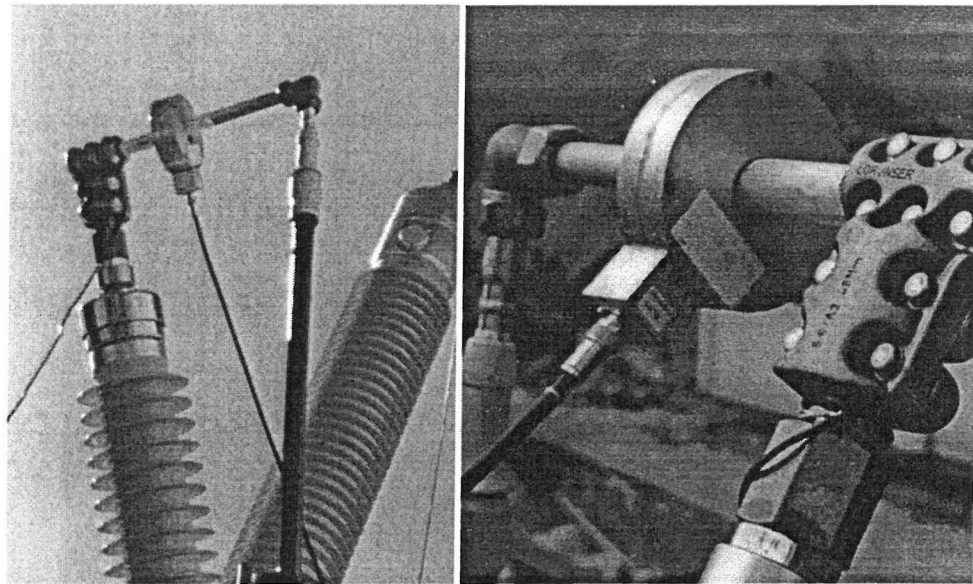
Im Frequenzbereich bis ca. 200 kHz ergeben sich für die Ergebnisse keine wesentlichen Beeinflussungen durch die unterschiedliche Behandlung der Kabelschirme. Für höhere Frequenzen ist die Vergleichbarkeit allerdings nicht mehr gegeben.

### 3.2.4 Verbesserung der Meßtechnik für Messungen mit Niederspannung - Standardisierung

Die in den vorigen Kapiteln erläuterten Einflüsse der Meßtechnik auf die Ergebnisse zur Übertragungsfunktion legen die Notwendigkeit einer weitergehenden, im Rahmen der praktischen Möglichkeiten durchführbaren Standardisierung nahe. Ziel ist es, durch gezielte meßtechnische Maßnahmen und Vereinbarungen den Einfluß der Meßapparatur möglichst konstant zu halten.

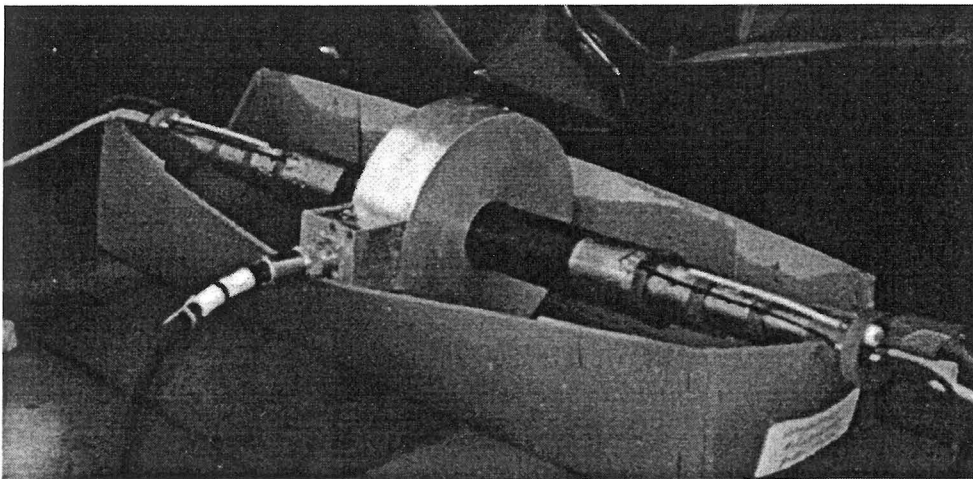
Die wesentlichsten Bestandteile eines standardisierten Meßaufbaus sind zunächst in den Fragen der Ankopplung von Signalleitungen zur Spannungsmessung, der Anbindung einer Rogowski-Spule an den stromführenden Leiter und der Realisierung eines geschlossenen Massekonzepts zu sehen.

Der Einsatz einer Rogowski-Spule zur Strommessung ist an die Bedingung geknüpft, daß der stromführende Leiter idealerweise axial und möglichst starr durch das Spulengehäuse hindurchgeführt wird. Je nach Spulenkonstruktion kann direkt der Erdungsleiter der Betriebserdung verwendet werden. Abbildung 3.10 zeigt hierzu ein Beispiel an einem 125 MVA-Transformator.



**Abbildung 3.10:**  
Strommessung  
mit Rogowski-  
Spule bei  
durchgeführtem  
Erdungsleiter des  
Transformator-  
sternpunktes

In denjenigen Fällen, bei denen eine nach Abbildung 3.10 gezeigte Anordnung nicht realisierbar ist, wird der stromführende Sternpunkt-Erdleiter mit einer Zusatzkonstruktion nachgebildet. Abbildung 3.11 zeigt die entsprechende Hilfsanordnung.



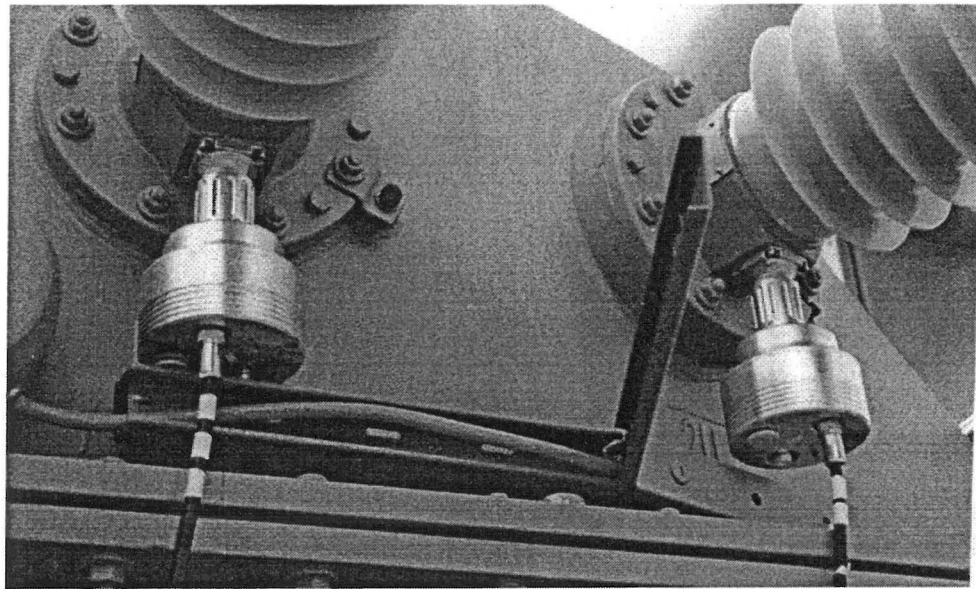
**Abbildung 3.11:**  
Strommessung  
mit Rogowski-  
Spule unter  
Verwendung  
einer axialen  
Hilfskonstruktion  
zur Stromführung

Der zu messende Strom wird axial durch die Meßspule geführt. Aufgrund der koaxialen Anordnung mehrerer isolierter Teilleiter kann die Empfindlichkeit der Messung bei der gezeigten Anordnung um den Faktor 5 erhöht werden. Der zu messende Strom wird bei entsprechender äußerer Verschaltung der einzelnen Leiter 5mal durch die Spule geführt.

Ein weiterer Aspekt der Standardisierung stellen die Anschlußvarianten für Koax-Kabel zur Spannungsmessung dar. Aus praktischer Sicht ergibt sich bei den zu untersuchenden Transformatoren folgender Unterschied:

- sämtliche interessierende Durchführungen besitzen Meßanschlüsse
- interessierende Durchführungen besitzen nur teilweise Meßanschlüsse oder die Gesamtkonstruktion ( Durchführung und Dom ) läßt keine Montage einer Spannungssonde zu

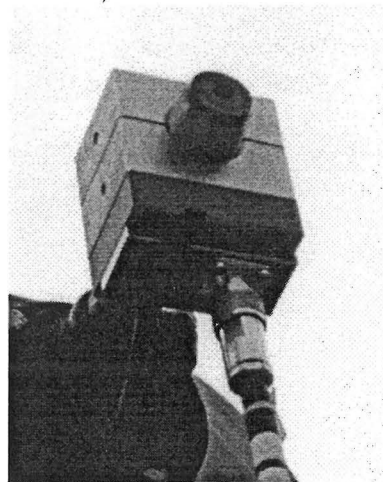
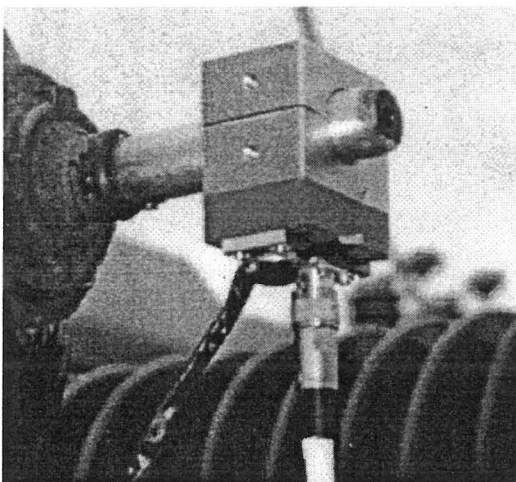
Für den Fall, daß geeignete Meßanschlüsse vorliegen, kann die Messung transienter Spannungen mit Hilfe kapazitiver Sonden erfolgen. Die Auslegung der Sensorkapazität richtet sich nach den Durchführungskapazitäten und dem gewünschten Übersetzungsverhältnis. Abbildung 3.12 zeigt den Einsatz solcher Sonden an den Unterspannungsdurchführungen eines 125 MVA-Trafos.



**Abbildung 3.12:**

**kapazitive  
Spannungs-  
sensoren an den  
Unterspannungs-  
durchführungen  
eines 125 MVA-  
Transformators**

Falls keine Sonden an den Durchführungen angebracht werden können, müssen die Signalkabel direkt an den Trafoklemmen montiert werden. Abbildung 3.13 zeigt hierzu die Anschlußvariante mit einem Adapter zwischen den Trafoanschlußbolzen und den Koax-Kabeln mit N-Verschraubung.



**Abbildung 3.13:**

**Anschlußadapter  
für Koax-Kabel an  
Transformator-  
klemmen**



Der dritte Aspekt zur Standardisierung stellt die Behandlung der Erdungen und Meßbezugspotentiale dar. Hierbei sind vor allem das Gesamtkonzept der Masseführung, aber auch Detaillösungen für die Anbindung der Bezugspotentiale an das Erdungssystem zu berücksichtigen. Als Beispiel eines meßtechnischen Details zeigt Abbildung 3.14 die Anbindung des Masseschirms eines Koax-Kabels an den Trafokessel. Über eine definierte Leiterlänge wird hierbei der Kabelschirm mit einer Verschraubung im Dombereich am Trafokessel verbunden. Zur Kontaktierung werden ausschließlich fest angebrachte Schrauben und Ösen verwendet, so daß bei baugleichen Transformatoren dieses Detail identisch ausgeführt werden kann. Bezüglich dieser Maßnahme dürfte sich daher eine gute Reproduzierbarkeit einstellen.

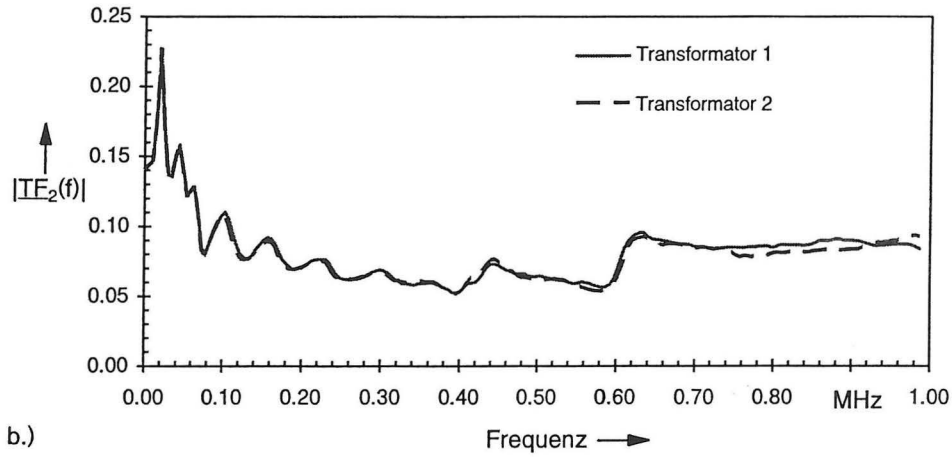
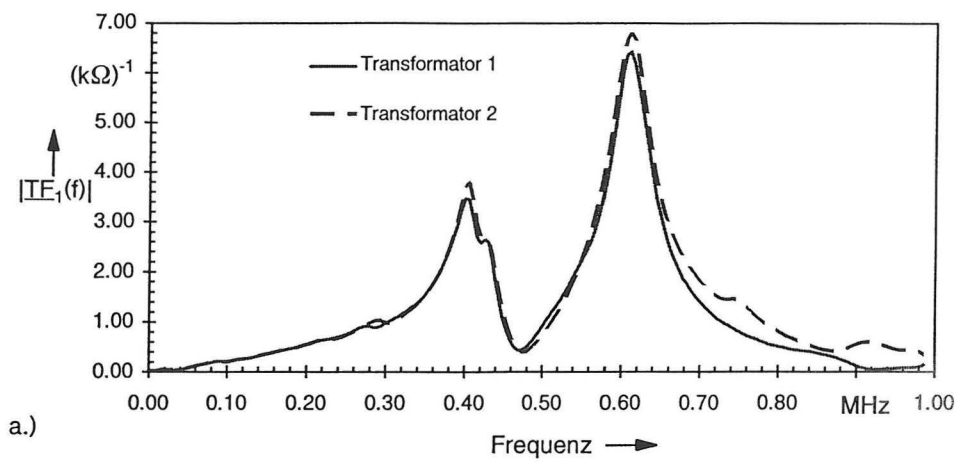


Abbildung 3.14:  
trafoseitiger  
Anschluß des  
Signalkabels an  
das Bezugspotential am  
Trafokessel

Hinsichtlich des Gesamtkonzeptes der Masse- und Erdleitungsführung wird ein zentrales Masseband an den Erdungspunkt des Trafokessels angeschlossen. Es wird darauf geachtet, daß der Kessel nur einen, gezielt montierten Erdungspunkt besitzt. Das zentrale Masseband dient als Bezugspotential für die Transientenrekorder und den Stoßgenerator.

Ob und in welchem Maße die ergriffenen Maßnahmen die Reproduzierbarkeit von Messungen zur Übertragungsfunktion erhöhen, kann erst nach umfangreicheren Tests genauer abgeschätzt werden.

Ein erster Hinweis zeigt die Auswertung der Meßergebnisse bei einem 125 MVA-Transformator, bei welcher eine Referenzuntersuchung an einem baugleichen Trafo vorliegt. Beide Untersuchungen erfolgen an unterschiedlichen Standorten auf dem Gelände eines Umspannwerkes. Für die Durchführung der Messungen ist also jeweils ein kompletter Auf- und Abbau der Meßanordnung notwendig. Aspekte wie Signalkabelführung und Erdleitungsführung unterliegen also den praktischen Schwankungen einer detailgetreuen Nachbildung einer Meßschaltung. Abbildung 3.15 zeigt das Ergebnis anhand der Übertragungsfunktionen von Sternpunktstrom an 1N und der übertragenen Spannung an 2U.



**Abbildung 3.15:**  
**Vergleich der**  
**Übertragungs-**  
**funktionen bei zwei**  
**baugleichen**  
**Transformatoren**  
 a.) Sternpunktstrom  
 b.) Spannung 2U

Im Rahmen der zu erwartenden Meßgenauigkeit ergibt sich bei Sternpunktstrom und übertragener Spannung eine gute Übereinstimmung der Frequenzgänge. Die Messung gibt also eindeutig den Umstand wieder, daß es sich um typengleiche Transformatoren handeln muß.



## **4 Chancen und Entwicklungspotentiale für den Einsatz der Übertragungsfunktion**

### **4.1 Online-Monitoring**

Der Einsatz der Übertragungsfunktion im Online-Monitoring zielt auf eine Langzeitüberwachung eines Betriebsmittels ab. Es besteht die Möglichkeit, den Zustand des Trafos lückenlos zu überwachen, ohne damit den Betrieb nennenswert stören zu müssen. Aufgrund der stationär anzubringenden Sensorik läßt sich ein Online-System bei neuen Transformatoren einfacher realisieren.

Der stationäre Aufbau bringt außerdem eine gute Reproduzierbarkeit der einzelnen Messungen mit sich, da eventuelle systematische Meßfehler konstant gehalten werden.

Je nach Häufigkeit transienter Vorgänge im angeschlossenen Netz entstehen unterschiedlich große Datenmengen mit teilweise wenig zufriedenstellender Qualitätsdichte. Aus den anfallenden Datenmengen müssen also die brauchbaren Aufzeichnungen selektiert und deren Daten reduziert werden. Es stellt sich die Frage, welche Informationen zur Langzeitdokumentation gespeichert werden sollen.

Der Einsatz der Übertragungsfunktion im Online-Monitoring ist eine vergleichende Methode und beruht auf der guten Reproduzierbarkeit von einzelnen Online-Messungen. Derzeit existieren keine verbindlichen Aussagen über den Zusammenhang zwischen Trafowicklung und Frequenzgang bestimmter Übertragungsfunktionen. Darüber hinaus wurden bisher keine allgemeingültigen Kriterien für den Zusammenhang zwischen Änderungen in den Frequenzgängen der Übertragungsfunktionen und eventuellen Veränderungen im Trafo formuliert.

Ein Online-Meßsystem ist zunächst als Ergänzung zu einer thermischen Überwachung und einer TE-Messung zu sehen. Gemessene Änderungen bei der Auswertung der Übertragungsfunktion geben Anlaß, das überwachte Betriebsmittel näher zu untersuchen. Hierbei können thermische Betrachtungen und TE-Messungen ergänzende Dienste leisten. Die Überwachung des Frequenzgangs eines Transformators als alleiniges Kriterium einer Zustandsüberwachung ist nach dem aktuellen Wissensstand nicht denkbar.

Da der gerätetechnische Aufwand und daher die Kosten verhältnismäßig hoch ausfallen, sind zur effizienteren Nutzung der installierten Hardware kombinierte Meßsysteme denkbar. Der zeitliche Einsatz eines digitalen Meßsystems könnte zweigeteilt werden. Während der Standby-Betrieb für die Erfassung transienter Vorgänge innerhalb der Schwachlastzeiten eines Tages für ein bis zwei Stunden aufgehoben wird, könnten TE-Messungen am Trafo durchgeführt werden. Die Auslastung der digitalen Meßeinrichtung könnte dadurch erheblich gesteigert werden.

### **4.2 Offline-Monitoring mit Hochspannung**

Beim Offline-Monitoring mit Hochspannung ist aufgrund der Spannungsmessung auf Betriebsspannungsniveau die gleiche Sensorik wie beim Online-Betrieb notwendig. Da die Messungen allerdings nur nach definierten Zeitabschnitten stattfinden, kann ein mobiles digitales Meßsystem eingesetzt werden. Um die Vorbereitungszeit von Einzelmessungen zu reduzieren, ist eine feste Installation der Sensorik und der Signalkabelführung empfehlenswert.

Bei regelmäßiger Anwendung ermöglicht auch die Offline-Variante eine Langzeitüberwachung des Betriebsmittels. Die Reproduzierbarkeit ist im Falle einer stationär installierten Sensorik sehr zufriedenstellend. Die Überwachung des Betriebszustands beruht ebenfalls auf dem Einsatz der Übertragungsfunktion als vergleichende Methode.

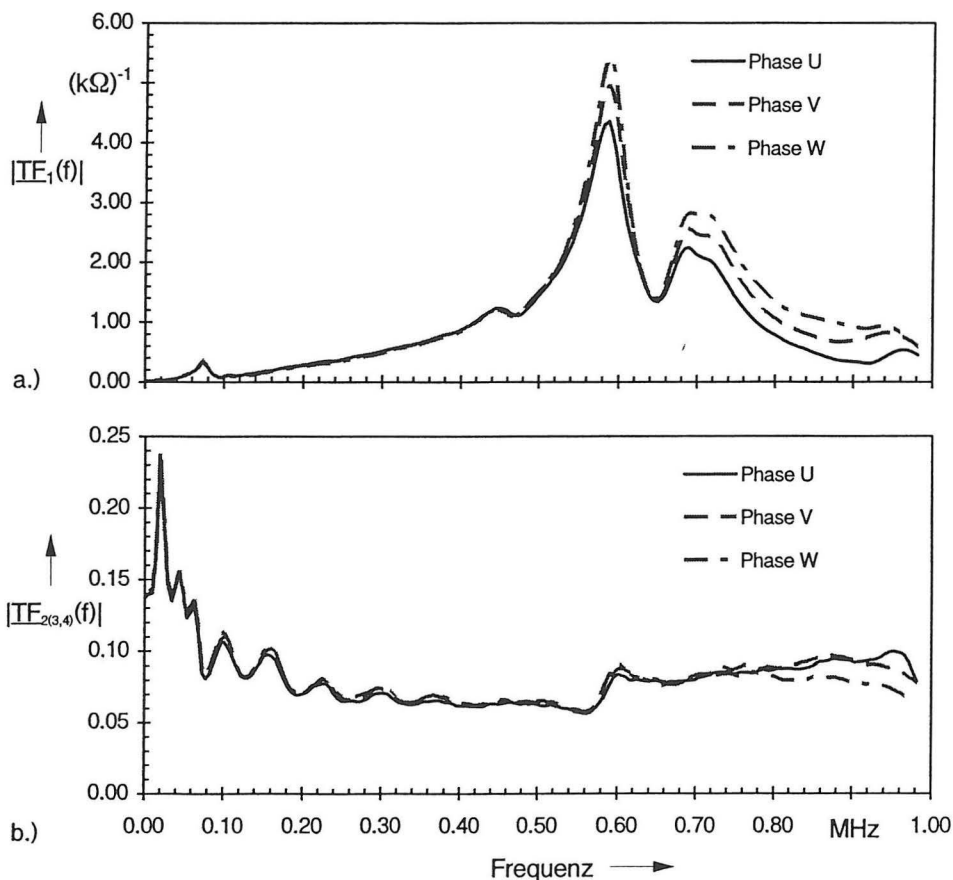
Aufgezeichnet werden definiert erzeugte, transiente Vorgänge, die zu einer hohen Qualitätsdichte der Meßdaten führen. Eine gezielte Datenselektion ist daher nicht notwendig.

Die Messungen stören allerdings den normalen Betriebsablauf und erfordern zudem außerplanmäßige Schalthandlungen am angekoppelten Netz. Es entstehen dadurch zusätzliche Beanspruchungen an den entsprechenden Leistungsschaltern.

### 4.3 Offline-Monitoring mit Niederspannung

Das entscheidende Merkmal der Niederspannungsmethode besteht im mobilen Aufbau und der universellen Einsetzbarkeit der Methode. Die Meßmethode läßt sich an nahezu allen Objekten durchführen und bedarf keiner konstruktiven Voraussetzungen. Der Einsatz der Meßmethode ist daher insbesondere bei Alttransformatoren interessant. Sie bieten oftmals keine Möglichkeit zur Montage der für Hochspannungsmessungen notwendigen Sensoren. Darüber hinaus entsteht bei der Niederspannungsmessung keine zusätzliche Beanspruchung an benachbarten Netzkomponenten. Zum Zweck der Messung muß ein Transformator von Netz genommen werden. Die Ausfallzeit des Betriebsmittels erstreckt sich über den Zeitraum des Meßvorgangs und der Montagearbeiten für den Auf- und Abbau.

Aus Sicht des Betreibers von Transformatoren ist in erster Linie die Untersuchung von Objekten mit bereits hoher Betriebsdauer von Interesse. Solchen Untersuchungen liegen allerdings nur in seltenen Fällen Referenzmessungen von früheren Zeitpunkten zugrunde. Da die Anwendung der Übertragungsfunktion zunächst generell eine vergleichende Methode darstellt, müssen die Symmetrieeigenschaften eines Drehstromtransformators zur Gegenüberstellung von Einzelmessungen herangezogen werden. In welchem Maße sich die Gleichartigkeit der einzelnen Wickelröhren und die Asymmetrie der Aktivteilkonstruktion in den Ergebnissen bemerkbar machen, müssen breit angelegte Untersuchungen an den verschiedensten Objekten erst zeigen. Abbildung 4.1 zeigt hierzu eine solche Symmetriebetrachtung an einem 125 MVA-Transformator .



**Abbildung 4.1:**  
**Symmetrie-**  
**betrachtung bei**  
**Übertrags-**  
**funktionen eines**  
**125 MVA-Trafos**  
**( Stellung 1 )**

a.) Übertrags-  
funktion des Stern-  
punktstroms 1N bei  
Stoß auf 1U, 1V  
oder 1W

b.) Übertrags-  
funktion der über-  
tragenen Spannung  
des gestoßenen  
Schenkels bei Stoß  
auf 1U, 1V oder 1W

# Literatur

- /1/      Leibfried, T.      Die Analyse der Übertragungsfunktion als Methode zur Überwachung des Isolationszustandes von Großtransformatoren  
Dissertation, Universität Stuttgart, 1996
- /2/      Leibfried, T.      Einsatz der Übertragungsfunktion zur On-line-Überwachung von Transformatoren  
Haefely Symposium, Stuttgart, 1995
- /3/      Leibfried, T.      Die 'Übertragungsfunktion' als Methode zur Überwachung von Transformatoren im Betrieb  
Micafil Symposium, Stuttgart, 1996
- /4/      Mildenerger, O.      System- und Signaltheorie  
Vieweg, 1988