

# Erhöhung der Reproduzierbarkeit von FRA-Messungen durch Standardisierung

Dipl.-Ing. René Wimmer

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart

Dr.-Ing. Michael Krüger

Omicron electronics GmbH, Klaus / Austria

## 1 Einleitung

Hohe Ströme infolge von Kurzschlüssen verursachen hohe mechanische Kräfte in Transformatorwicklungen und können Verformungen und Verschiebungen der Wicklung hervorrufen. Solche Wicklungsschäden führen nicht unbedingt zu einem Ausfall des Transformators, jedoch sind sie aufgrund dieser Vorschädigung einem erhöhten Ausfallrisiko ausgesetzt. Aus diesem Grund ist die messtechnische Erfassung dieser Vorschädigung wichtig um geeignete Maßnahmen einleiten zu können. Ein Diagnoseverfahren hierzu ist die Übertragungsfunktion, auch FRA (**F**requency **R**esponse **A**nalysis) genannt. Die Zustandsbeurteilung der Wicklung erfolgt bei der FRA durch einen Vergleich mit einer Referenzkurve, die idealerweise schon beim Transformatorhersteller gemessen werden sollte. Versuche an einer Versuchswicklung haben allerdings gezeigt, dass die Kurvenänderung der FRA bei einer Wicklungsdeformation gering ausfallen können (vgl. Abb. 1) [Christian - 2002]. Deshalb ist es wichtig, dass der Messaufbau keinen Einfluss auf die FRA besitzt und die Bestimmung der FRA eine hohe Reproduzierbarkeit aufweist.

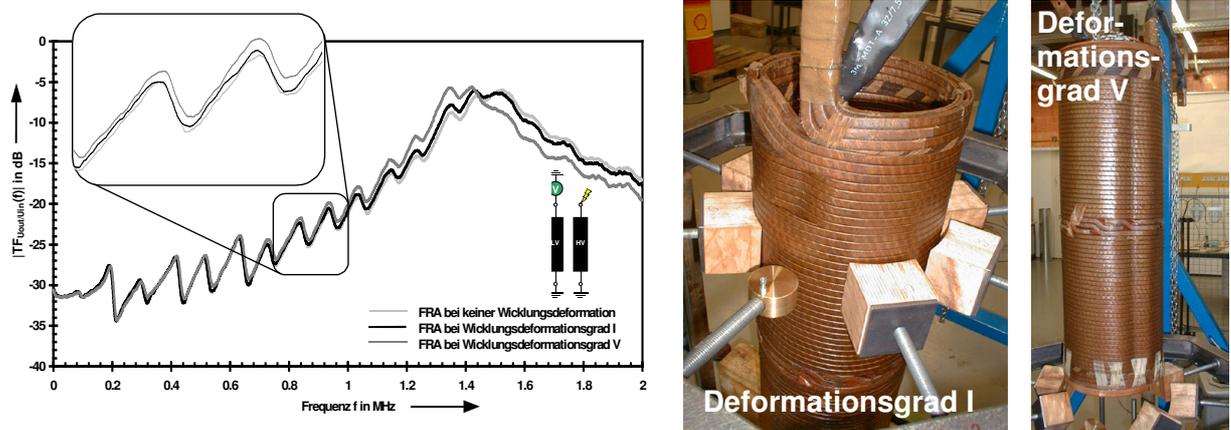


Abb 1: Veränderung der FRA bei unterschiedlichen Deformationsgrade  
(Quelle: Christian - 2002)

## 2 Grundlagen

### 2.1 Die Vierpoltheorie

Der Transformator kann als ein Netzwerk, bestehend aus Widerständen, Eigeninduktivitäten, Erdkapazitäten, Koppelinduktivitäten und Längskapazitäten, betrachtet werden. Das unterschiedliche Verhalten des magnetischen Flusses im Eisenkern führt zu einer Unterteilung des Frequenzbereiches [Bak-Jensen - 1995], [Nothhaft - 1994], [Gharehpetian - 1996]:

- Frequenzbereich 1:  $f < 10 \text{ kHz}$

Die magnetischen Feldlinien treten für niedere Frequenzen senkrecht in den Schenkel ein. Mit zunehmender Frequenz führen Kernpermeabilität und sich ausbildende Wirbelströme zu einer Feldverdrängung aus der Mitte des Kerns [Rahimpour - 2001]. In diesem Bereich kann der nichtlineare Effekt der Eisensättigung infolge zu hoher Magnetisierung auftreten.

- Frequenzbereich 2:  $f > 10 \text{ kHz}$

Die Feldlinien werden nahezu vollständig aus dem Kerninneren verdrängt und der Eisenkern führt keinen magnetischen Fluss mehr. In diesem Bereich haben daher die nichtlinearen Effekte des Kerns keine Bedeutung mehr.

Aus diesem Grund kann der Transformator für Frequenzen größer 10 kHz als ein passives, kausales, zeitinvariantes und lineares System betrachtet und es können die theoretischen Grundlagen der Vierpoltheorie angewendet werden. Aus einem Anregungssignal  $\underline{X}(j\omega)$  und einer Systemantwort  $\underline{Y}(j\omega)$  kann die entsprechende FRA durch Quotientenbildung berechnet werden.

$$\underline{TF}(j\omega) = \frac{\underline{Y}(j\omega)}{\underline{X}(j\omega)} \quad (1)$$

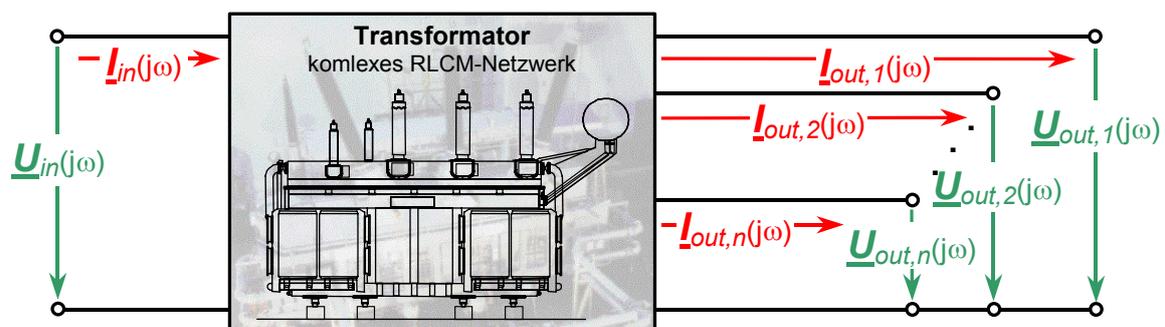


Abb. 2: Beschreibung eines Transformators als Vierpol

Durch die mehrpolige Anordnung eines Transformators erhält man bei einer einphasigen Anregung mehrere Systemantworten. Prinzipiell eignen sich alle messbaren Größen als Antwortsignal. Nach der Darstellung in Abb. 2 kann für jedes Antwortsignal eine Übertragungsfunktion definieren:

$$\underline{TF}(j\omega) = \frac{I_{in}(j\omega)}{\underline{U}_{in}(j\omega)} \quad (2)$$

$$\underline{TF}(j\omega) = \frac{I_{out,n}(j\omega)}{\underline{U}_{in}(j\omega)} \quad (3)$$

$$\underline{TF}(j\omega) = \frac{U_{out,n}(j\omega)}{\underline{U}_{in}(j\omega)} \quad (4)$$

Der Theorie entsprechend verkörpert jede dieser Übertragungsfunktionen eine Systemübertragungsfunktion und ist im Zeitbereich vom Eingangssignal  $\underline{U}_{in}(t)$  unabhängig. Die Übertragungsfunktion wird demzufolge ausschließlich durch das elektrische Netzwerk des Transformators bestimmt [Leibfried - 1996].

## 2.2 Die Bestimmung der Übertragungsfunktion im Zeitbereich

Bei der Zeitbereichsmessung, auch **I**mpuls **F**requency **R**esponse **A**nalysis (IFRA) genannt, wird das Testobjekt mit einer breitbandigen Impulsspannung angeregt. Entsprechend der Impulsantwort des Testobjekts wird am Ausgang ein Antwortsignal zu messen sein. Beide Signale werden simultan erfasst und unter Benutzung der **F**ast **F**ourier **T**ransformation (FFT) numerisch in den Frequenzbereich transformiert. Durch die anschließende Quotientenbildung zwischen dem fouriertransformierten Ausgangs- und Eingangssignal erhält man die Übertragungsfunktion.

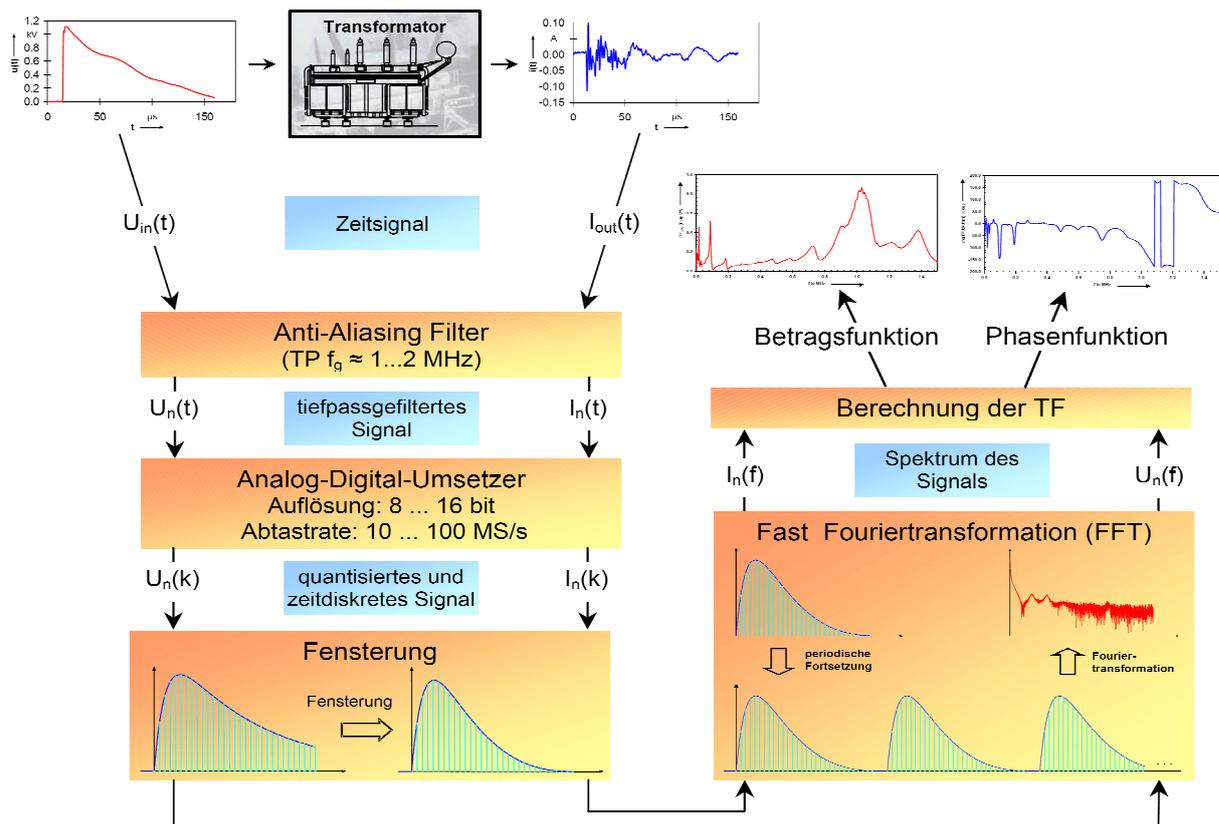


Abb. 3: Die Signalverarbeitungsschritte zur Bestimmung der TF im Zeitbereich

Die Signalverarbeitung hat hierbei einen maßgeblichen Einfluss auf die Übertragungsfunktion [Wimmer - 2003]. Damit sich die Teilspektren nicht im Frequenzbereich auf-

grund der ADU-Abtastung überlagern, müssen die Signale mit einem analogen Tiefpassfilter bandbegrenzt werden. Bei der anschließenden Signalaufzeichnung steht nur ein begrenztes Zeitfenster zur Verfügung und es können daher die Strom- bzw. Spannungsverläufe abgeschnitten sein. Die FFT impliziert jedoch ein periodisches Signal und würde solch abgeschnittene Signale als Sprung interpretieren. Dieser Abschneideeffekt führt zu einem fehlerhaften Spektrum der Zeitsignale. Deshalb müssen diese mit einer abklingenden Fensterfunktion gewichtet werden, damit eine stetig periodische Fortsetzung möglich ist und die Abschneideeffekte eliminiert werden. In Abb. 3 sind die einzelnen Signalverarbeitungsschritte grafisch dargestellt. Aufgrund dieser vielen Freiheitsgrade ist es für eine hohe Reproduzierbarkeit äußerst wichtig immer die gleiche Signalverarbeitung zu verwenden.

Für die korrekte Ermittlung der Übertragungsfunktion ist es wichtig die Signale unverfälscht zu erfassen und weiterzuverarbeiten. Ein Problem bei der Zeitbereichsmessung ist, dass die Impulssignale bandbegrenzt sind und mit steigender Frequenz der Signal-zu-Rausch-Abstand (SNR) geringer wird. Selbst unter idealen Bedingungen bzw. einer störungsfreien Signalübertragung vom Testobjekt zum Transientenrecorder besteht das Problem, dass ein wertekontinuierliches Signal dem wertediskreten Bereich der ADU gegenübersteht. Daraus resultiert der Quantisierungsfehler der sich in Form von Rauschen auf das Signal auswirkt. Somit sind die Signale fehlerbehaftet und für die Nutzsignale gilt folgende Min-Max-Abschätzung:

$$\{|\underline{X}(\omega)| - |\underline{X}_S(\omega)|\} < |\underline{X}_N(\omega)| < \{|\underline{X}(\omega)| + |\underline{X}_S(\omega)|\} \quad (5)$$

$$\{|\underline{Y}(\omega)| - |\underline{Y}_S(\omega)|\} < |\underline{Y}_N(\omega)| < \{|\underline{Y}(\omega)| + |\underline{Y}_S(\omega)|\} \quad (6)$$

Darin stellen  $|\underline{X}(\omega)|$  und  $|\underline{Y}(\omega)|$  die Messsignale,  $|\underline{X}_S(\omega)|$  und  $|\underline{Y}_S(\omega)|$  die Störsignalpegel (Rauschpegel) und  $|\underline{X}_N(\omega)|$  und  $|\underline{Y}_N(\omega)|$  die Nutzsignale von Ein- und Ausgang dar [Leibfried - 1996].

Eine Genauigkeitssteigerung kann dadurch erreicht werden, indem der SNR vergrößert bzw. die Signale entrauscht werden. Eine bekannte Methode zur Entrauschung ist das Mittelungsverfahren [Coffeen - 2003]. Das Rauschen strebt hierbei, unter der Annahme, dass es sich um ein weißes Rauschen handelt, zu seinem statistischen Mittelwert null. Der Gewinn des SNR ist mit dem theoretischem Faktor  $\sqrt{N}$  verbunden, wobei  $N$  die Anzahl der Überlagerungen darstellt. Unter der Ausnutzung der linearen Eigenschaften der Fouriertransformation wird der Mittelwert im Frequenzbereich ermittelt. Das hat den Vorteil, dass eventuelle Probleme mit dem Triggerungsjitter vermieden werden. Wichtig hierbei ist, dass der Mittelwert von den komplexen, fouriertransformierten Zeitsignalen berechnet wird und nicht von der Betragsfunktion (Abb. 4).

Eine weitere Entrauschungsmöglichkeit besteht über die Wavelet-Transformation [Lenz - 2003]. Durch eine diskrete Transformation werden die Zeitsignale in den Wavelet-Bereich überführt und die Koeffizienten, die das Rauschen beschreiben, über eine Schwellwertoperation eliminiert. Durch die Rücktransformation erhält man dann die entrauschten Zeitsignale. Allerdings kann durch die Wahl des falschen Schwellwerts für die Schwellwertoperation das Signal zerstört bzw. verfälscht werden. Daher ist die Entrauschung durch Wavelet-Transformation nur bis zu einem bestimmten Grad möglich (Abb. 5).

Die höchste Genauigkeit erhält man bei der Kombination beider Entrauschungsarten. Hierbei wird zuerst der Mittelwert aus den Einzelsignalen berechnet und anschließend einer Waveletentrauschung unterzogen (Abb. 6).

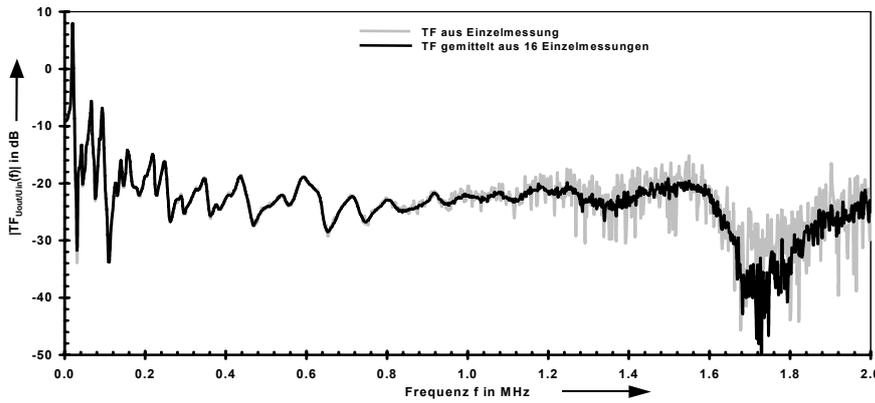


Abb. 4: Vergleich zwischen FRA aus Einzelmessung und FRA ent- rauscht durch Averaging

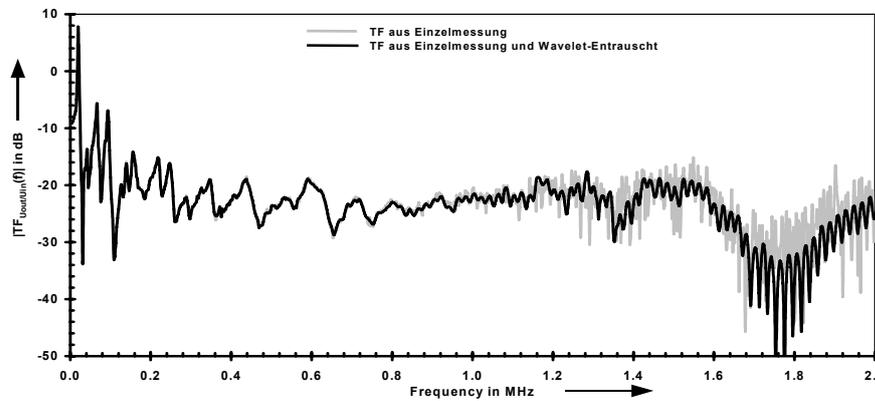
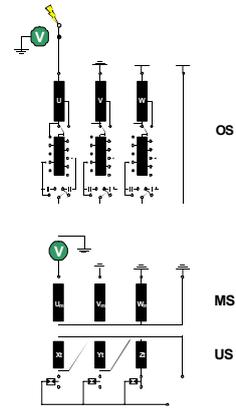


Abb. 5: Vergleich zwischen FRA aus Einzelmessung und FRA ent- rauscht durch Waveletentrauschung

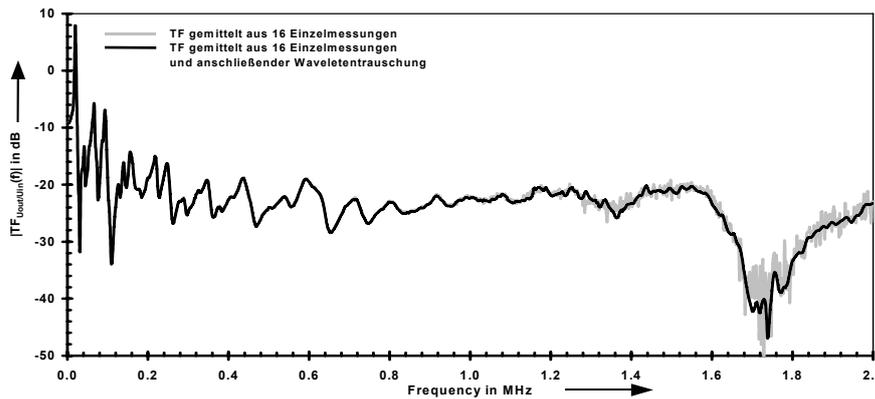
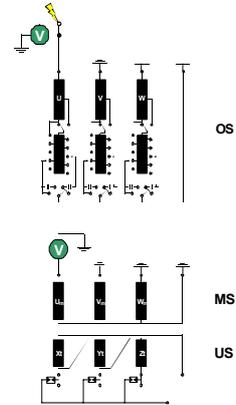
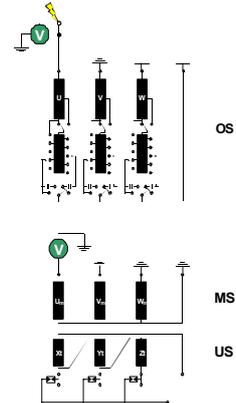


Abb. 6: Vergleich zwischen FRA aus Einzelmessung und FRA ent- rauscht durch Averaging und Waveletentrauschung



### 2.3 Die Bestimmung der Übertragungsfunktion im Frequenzbereich

Bei der Frequenzbereichsmessung, auch **S**weep **F**requency **R**esponse **A**nalysis (SFRA) genannt, wird das Testobjekt mit einem sinusförmigen Signal erregt. Das Antwortsignal bei dieser Anregung ist bei einem passiven und linearen Netzwerk ebenfalls sinusförmig. Es unterscheidet sich jedoch im Vergleich zum Eingangssignal in Amplitudenhöhe und Phaselage. Das Amplitudenverhältnis und die Phasenverschiebung zwischen Aus- und Eingangssignal ergeben den Wert der Betrags- und Phasenfunktion der TF bei der entsprechenden Frequenz (Abb. 7). Erfolgt die Anregung des Testobjekts mit einer variablen Frequenz, kann so die frequenzabhängige Übertragungsfunktion ermittelt werden.

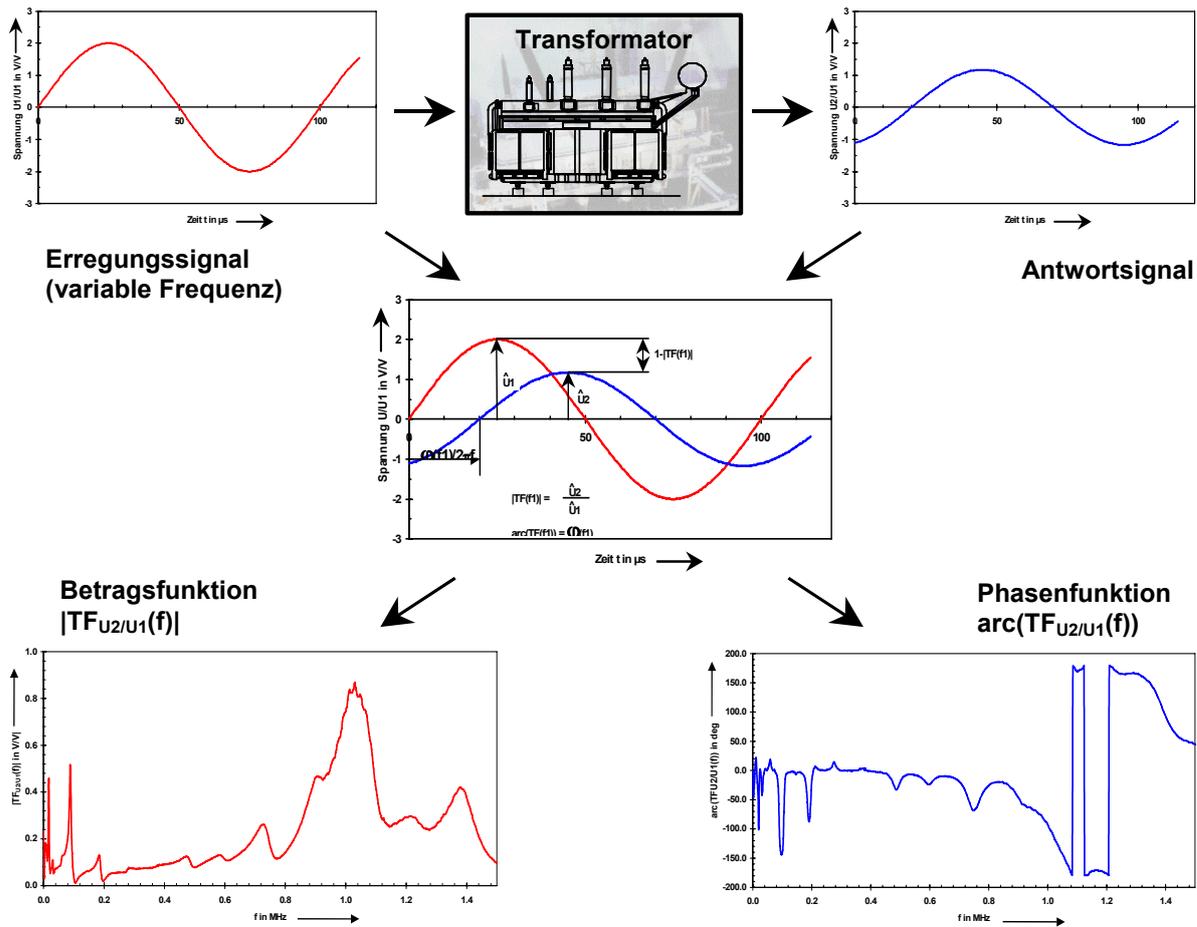


Abb. 7: Die Bestimmung der TF im Frequenzbereich

Die SFRA hat gegenüber der IFRA den Vorteil, dass die Anregung mit einer konstanten Amplitude und die Messung bei den einzelnen Frequenzpunkte über eine bestimmte Zeitdauer erfolgt. Demzufolge hat die Eingangsbeschaltung der Networkanalyzer-ADUs genügend Zeit sich auf die Eingangssignale einzustellen, um so eine bessere dynamische Performance zu erzielen. Die Eingangsbeschaltung besteht hauptsächlich aus Verstärkerstufen und einem einstellbaren Bandpassfilter, dessen Mittenfrequenz sich nach der Sweep-Frequenz richtet. Im Idealfall lässt es nur die Frequenz von Interesse durch. Praktisch muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen Messzeit und der Genauig-

keit der Messung, denn je geringer die Bandbreite des Bandpassfilters ist, desto mehr Zeit wird für die Messung benötigt. Es hängt aber auch davon ab, in welchem Frequenzbereich gemessen werden soll. So darf bei der Betrachtung tiefer Frequenzen die Breite des Bandpassfilters nicht zu groß eingestellt sein, weil ansonsten Nebenfrequenzen bei der FRA mitgemessen werden, die zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen führen (Abb. 8).

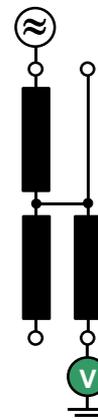
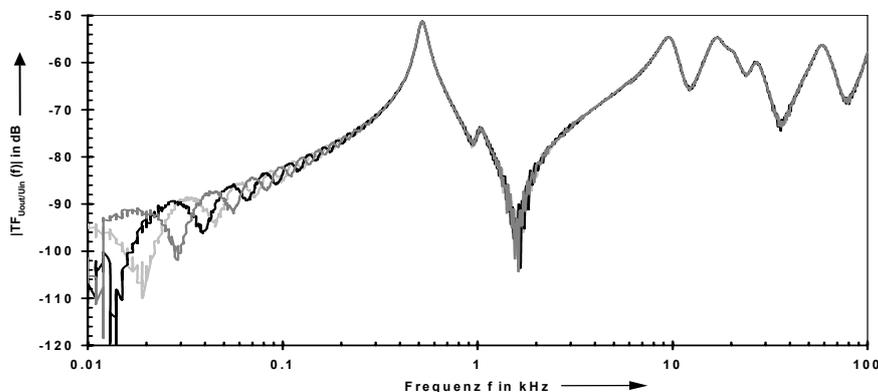


Abb. 8 a): FRA an einem 30 kVA Verteiltransformator mit einer Bandpassbreite von 10 Hz

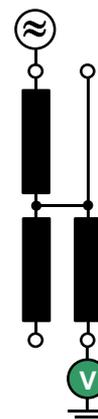
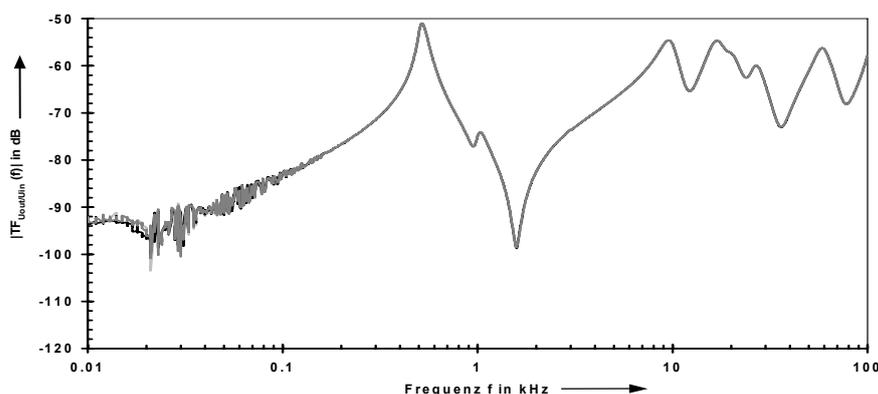


Abb. 8 a): FRA an einem 30 kVA Verteiltransformator mit einer Bandpassbreite von 1 kHz

## 2.4 Vergleich zwischen IFRA und SFRW

Der Theorie nach ergibt sich unter idealen Voraussetzungen eine deckungsgleiche Kurve der Übertragungsfunktionen aus Zeit- (IFRA) und Frequenzbereichsmessung (SFRA). Es zeigt sich jedoch, dass bei dem Vergleich der beiden Bestimmungsmethoden sich lediglich die gleichen Resonanzfrequenzen einstellen und sich die FRA hinsichtlich der Dämpfung unterscheidet (Abb. 9 a)). Ein großer Vorteil der SFRA ist, dass sie ein konstanten Signal-zu-Rausch-Abstand besitzt. Damit sind Spektrenbetrachtungen bis in die höchsten Frequenzen möglich. Hier liegt auch der entscheidende Nachteil der IFRA: die Bandbreite der Signale ist begrenzt. Durch geeignete Entrauschungsverfahren (Averaging und Waveletentrauschung) kann die Bandbreite der Zeitsignale gesteigert

werden. In Abb. 9b) ist im Vergleich zu der SFRA zu erkennen, dass durch die Entrauschung der Auswertebereich der IFRA um 400 kHz auf 1,2 MHz erhöht werden konnte.

Weitere Vorteile der SFRA sind die adaptive Frequenzauflösung und die direkte Ermittlung der FRA im Frequenzbereich (geringere Signalverarbeitung). Die Nachteile bei der SFRA sind, dass die Quelle kaum belastbar ist und dass nur selten die Möglichkeit besteht mehrere Signale simultan zu erfassen. Diese Dinge müssen bei der Prüfschaltung entsprechend berücksichtigt werden

Die Vorteile der IFRA sind, dass mehrere Signale simultan aufgenommen werden können (abhängig von der Anzahl der Kanäle) und dass die Quelle stärker belastbar ist. Die Nachteile der IFRA sind die bandbegrenzten Zeitsignale, die konstante Frequenzauflösung und die hohe Signalverarbeitungsprozedur.

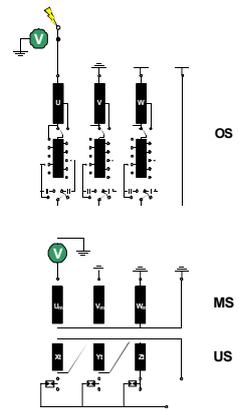
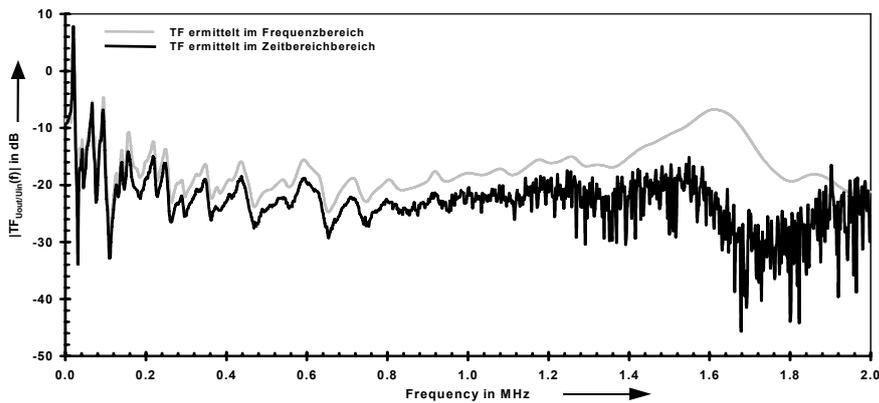


Abb. 9 a): Vergleich zwischen SFRA und IFRA

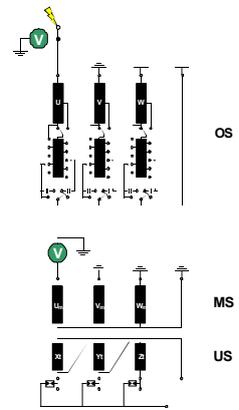
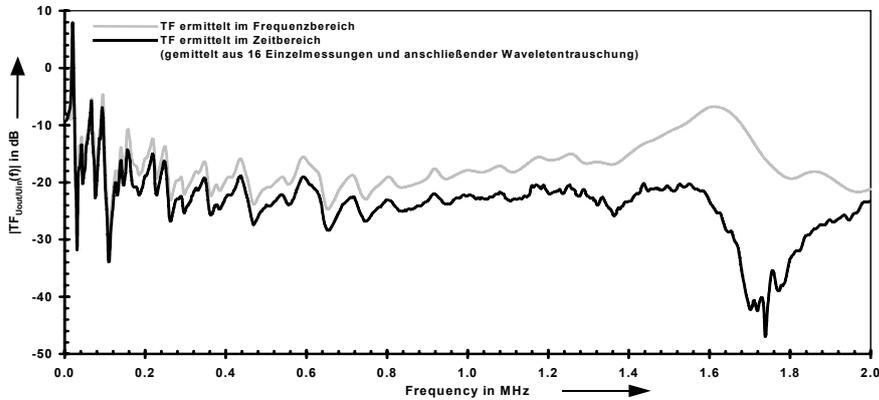


Abb.9 b): Vergleich zwischen SFRA und enträuschter IFRA

### 3 Einflussfaktoren bei der FRA

Die FRA ist eine vergleichende Messmethode und muss auf eine Referenzkurve bezogen werden. Es gibt drei Vergleichsarten für die FRA:

- Durch einen zeitabhängigen Vergleich, bei dem die Referenzkurve (Fingerprint) in einer vorangegangene Messung erhalten worden ist.
- Durch einen Konstruktionsvergleich, bei dem die Schenkel untereinander verglichen werden.
- Durch einen Typenvergleich, bei dem der Vergleich anhand eines typgleichen Transformators erfolgt.

Voraussetzung bei allen Methoden ist, dass die Messungen weitestgehend vom Messaufbau unabhängig sind. Insbesondere bei der zeitabhängigen Vergleichsmethode ist diese Anforderung unverzichtbar, weil zwischen den einzelnen Messungen Jahre liegen können. Dem Erdungskonzept, der Leitungsführung und der Anschlusstechnik kommt daher eine besondere Bedeutung zu.

#### 3.1 Messaufbau

Aufgrund der großen Dimensionen von Leistungstransformatoren sind weite Wegstrecken zwischen den Anschlussklemmen des Transformators und dem Messgerät zu überwinden. Für die Überwindung dieser Distanz werden in der Regel bis zu 30 m lange Koaxialkabel zur Signalübertragung eingesetzt. Dies führt allerdings dazu, dass bei einer nachfolgenden Untersuchung die Koaxialleitungen zwischen Transformator und Messgerät nicht gleich verlegt werden können wie bei der Erstmessung. Die Forderung, die sich daraus ergibt ist, dass die FRA von der Anordnung der Leitungen unabhängig sein muss.

##### 3.1.1 Anschlusstechnik

Eine Anforderung an die Anschlusstechnik ist, dass die Leitungen für den Anwender möglichst schnell und einfach montiert werden können. Des weiteren sollte der Anwender keine ungeschirmten Leitungen verwenden, um elektromagnetische Einkopplungen in die Signalleitungen zu verhindern. Diese Einkopplungen bewirken, dass die FRA von der Kabelanordnung abhängt.

An einem 220 MVA Spartransformator wird mit folgender Signalleitungstechnik die FRA bei unterschiedlichen Kabelanordnungen ermittelt: Ab einem Leitungssplitter wird der Innenleiter und der Schirm eines Koaxialkabels in ungeschirmten, separaten Leitungen geführt. Während die Leitung, die mit dem Innenleiter des Koaxialkabels verbunden ist, zur Anschlussklemme des Transformators führt, wird die Leitung, die mit dem Schirm des Koaxialkabels verbunden ist, mit dem Kessel des Transformators verbunden. Die elektrische Verbindung an der Transformator-klemme und an dem Kessel findet jeweils mit Zangen statt. Drei Fälle werden für die Untersuchung des Einflusses der Leitungsp-position herangezogen:

- 1) Die Kabel hängen unter der Durchführung, so dass sich eine Kabelanordnung nach Abb. 10 ergibt.
- 2) Das Koaxialkabel wird entlang der Durchführung zum Kessel geführt (Abb. 11), wobei die Position der elektrischen Verbindung zum Kessel und zum Dorn nicht verändert wird.
- 3) Die Kabel hängen unter der Durchführung wie bei Fall 1), allerdings werden die Kabel an einer anderen Stelle mit dem Kessel und dem Dorn verbunden (Abb. 12)



Abb. 10: Signalleitung unter der Durchführung hängend

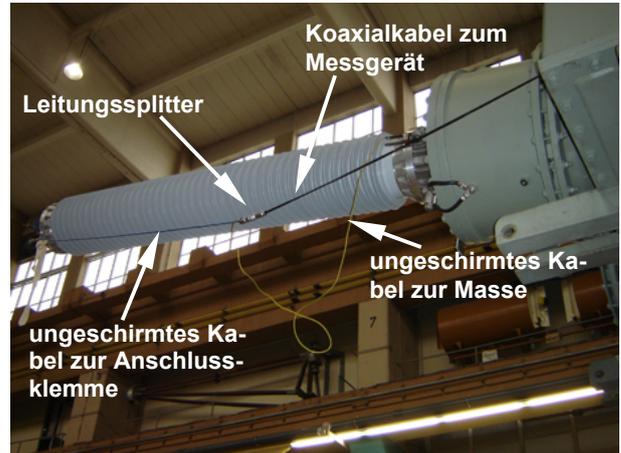


Abb. 11: Signalleitung entlang der Durchführung geführt



Abb. 12: Signalleitung unter der Durchführung hängend und neuer Anbindung an den Trafo

Wie in Abb. 13 zu erkennen ist, verschiebt sich je nach Kabelanordnung die Resonanzfrequenz bei 470 kHz. Bei dieser z.T. ungeschirmten Leitung gibt es demnach Freiheitsgrade, die zu Messfehlern und folglich zu Fehlinterpretationen führen können. Die Signalleitungen sollten daher möglichst bis zur Klemme des Transformators geschirmt geführt werden, um die Abhängigkeit der Kabelanordnung zu minimieren und die Reproduzierbarkeit zu steigern.

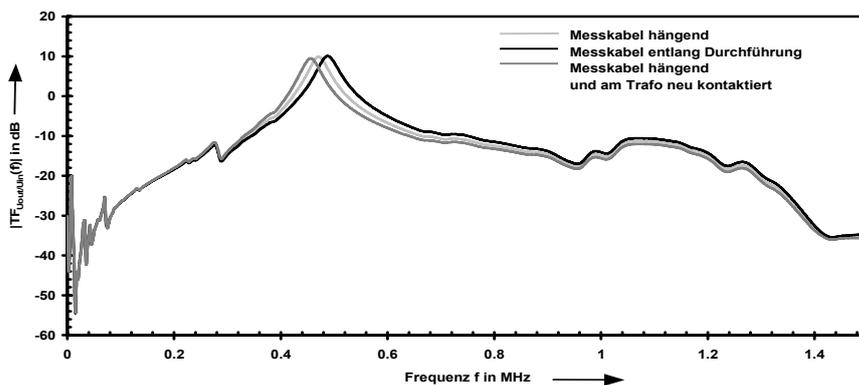


Abb. 13: Einfluss ungeschirmter Leitungen auf die FRA in Abhängigkeit ihrer Anordnung

In Abb. 14 sind entsprechende Anschlussadapter an die Trafoklemmen zu sehen, die eine Anbindung der Koaxialkabel ermöglichen. Es sind aber auch andere Anschlussverbindungen vorstellbar wie z.B. mit einer Zange.



Abb. 14 a): Massiver Messing-Klotz als N-Trafoklemme-Adapter



Abb. 14 b): BNC-Trafoklemmen-Adapter leichter Bauweise mit einstellbaren Bolzenumklammerung

### 3.1.2 Das Erdungskonzept

In früheren Untersuchungen wurde festgestellt, dass sowohl bei einer beidseitigen Erdung der Leitungsschirme, als auch bei einer einseitigen Leitungsschirmerdung am Prüfling, kein bedeutender Unterschied im Verlauf der FRA in Abhängigkeit der Leitungsanordnung festzustellen ist [Christian - 2002]. Allerdings sollte auf Grund der Feldverhältnisse in einem Umspannwerk sowie zum Schutz des Messgerätes auf die zusätzliche Erdung am Messgerät nicht verzichtet und die Leitungsschirme daher beidseitig geerdet werden.

Um die Koaxialkabelschirme am Transformator erden zu können muss eine Leitung vom Kessel des Transformators zum Trafoklemmen-Adapter geführt werden. Prinzipiell kann diese Distanz mit jeder Art von Leitung überwunden werden, solange die Leitung die Reproduzierbarkeit der FRA Ergebnisse nicht gefährdet. Dabei ist zu beachten, dass in einem Umspannwerk immer mit externen Störgrößen zu rechnen ist, die eine FRA-Messung beeinflussen können.

In einer Versuchsanordnung wird zunächst die Auswirkung der Störempfindlichkeit von einem Draht und einem gewebten Erdungsband auf die FRA ermittelt. Als Prüfkreis dient ein normaler FRA-Messaufbau mit den jeweiligen Erdungsleitungen. Unterhalb der Durchführung eines 333 MVA Spartransformators ist eine Schleife mit einer Windung aufgebaut, die ein sinusförmiges Störsignal von 80 kHz emittiert. Die Erzeugung des 80 kHz Signals erfolgt mit einem Signalgenerator und wird von einem Audioverstärker entsprechend verstärkt. Bei einer Gesamtlänge der Schleife von ca. 12 m und einem Leitungsquerschnitt von 2,5 mm<sup>2</sup> wird am Ausgang des Verstärkers ein Strom von 1,8 A gemessen.

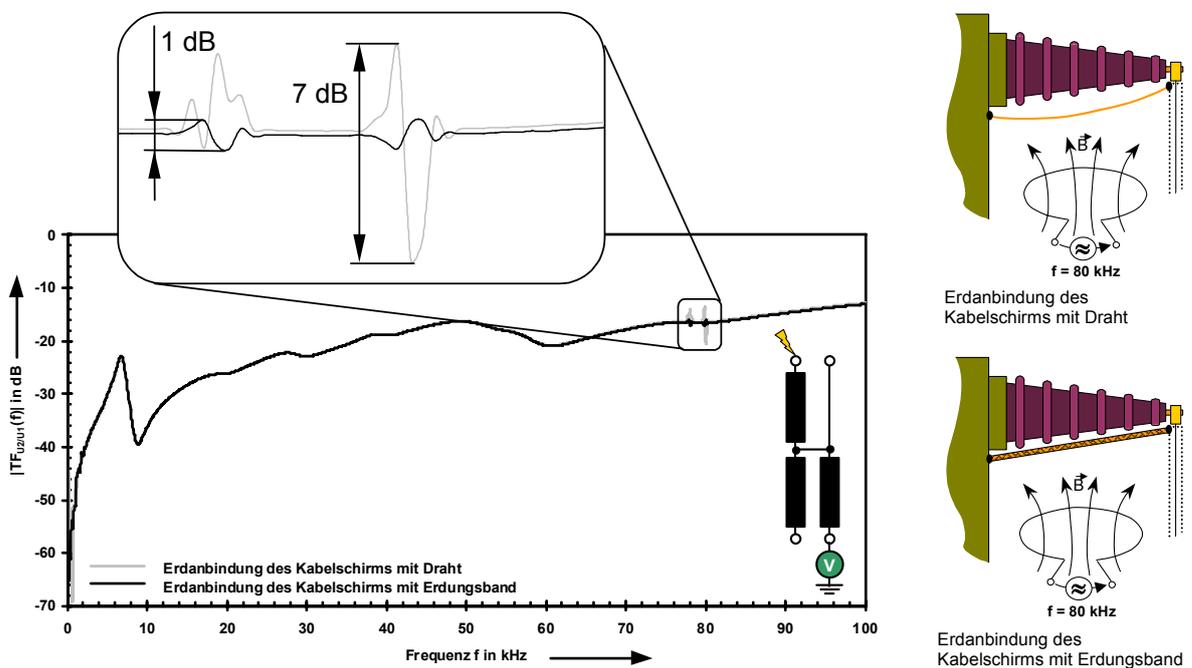


Abb. 15: Störempfindlichkeit gegenüber der FRA bei Erdanbindung mit Draht und Erdungsband

In Abb. 15 ist das Störsignal bei einer Erdanbindung mit Draht deutlich in Form von zusätzlichen Resonanzfrequenzen im FRA-Verlauf zu erkennen. Die maximale Schwanungskbreite beträgt hierbei 7 dB. Da der Audioverstärker bei 80 kHz nicht in seinem Nennfrequenzbereich betrieben wird, verzerrt er das Signal derart, dass neben der 80 kHz Störung auch eine 78 kHz Störung erkennbar ist.

Bei einer Erdanbindung mit Erdungsband ist das Störsignal im FRA-Verlauf zwar auch erkennbar, jedoch mit einer maximalen Schwanungskbreite von 1 dB stärker gedämpft. Die daraus abzuleitende Schlussfolgerung ist, dass das Erdungsband nicht so störanfällig ist wie der Draht. Dieser Effekt ist mit der Eigeninduktivität der jeweiligen Erdverbinungsleitung zu erklären. Gewebte Leitungen aus dünnen Einzelleitungen besitzen eine

sehr große Oberfläche und weisen, abhängig von der Frequenz, eine erheblich geringere Impedanz als vergleichbare Kabel auf. Vermutlich trägt auch der Skineneffekt zu der besseren Störfestigkeit des Erdungsbandes bei, da bei 80 kHz schon eine erhebliche Stromverdrängung stattfindet und das Störsignal je nach Material eine Eindringtiefe von nur 0,25 mm bis 0,3 mm hat. Das gewebte Erdungsband besitzt aufgrund der genannten Eigenschaften die bessere Leitfähigkeit bei höherfrequenten Signalen als normale Kabel, und Störungen fließen mit einem geringeren Widerstand zur Masse ab.

In einer weiteren Untersuchung wird die Abhängigkeit der FRA-Ergebnisse bezüglich der Signalleitungsanordnung und den Masseleitungen untersucht. Der Messaufbau ist auch hier wie bei einer normalen FRA-Untersuchung. Nach einer ersten FRA-Messung mit den jeweiligen Erdanbindungen werden die Messleitungen entfernt, das Messequipment an einen anderen Ort gestellt, die Messleitungen neu ausgelegt und angeschlossen. Die anschließende FRA-Messung mit den jeweiligen Erdverbindungen wird dann mit der ersten FRA-Messung verglichen.

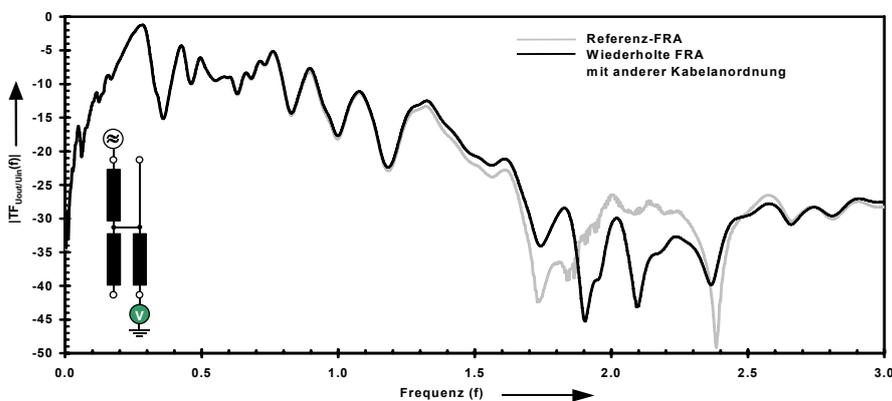


Abb. 16: FRA-Messungen mit Draht für die Erdungsanbindung des Kabelschirms

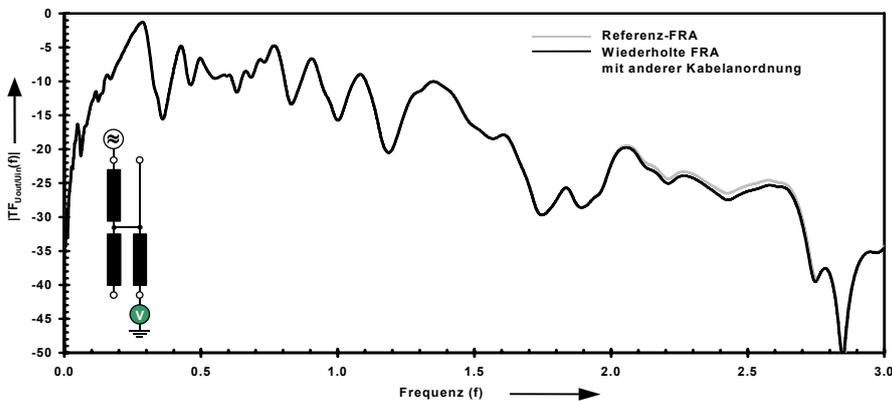


Abb. 17: FRA-Messungen mit Erdungsband für die Erdungsanbindung des Kabelschirms

Wie schon bei der Untersuchung der Störfestigkeit zeigt sich auch hier, dass die Erdanbindung mit Draht schlechter ist als mit dem Erdungsband (Abb. 16 und 17). Ab ca. 550 kHz stellt sich bei der FRA mit Draht als Kabelschirmerdung eine andere Dämpfung bei einer neuen Leitungsanordnung ein. Mit steigender Frequenz nimmt dieser Dämpfungsunterschied zu, bis sich bei ca. 1,6 MHz auch eine Verschiebung der Reso-

nanzfrequenz einstellt. Diese Effekte sind bei der Kabelschirmerdung mit Erdungsband bis zu einer Frequenz von 2 MHz nicht zu erkennen. Erst im darüber liegendem Frequenzbereich stellt sich eine andere Dämpfung ein. Dieser Frequenzbereich ist aber für die Beurteilung des Wicklungszustandes nicht mehr wichtig, da die Resonanzstellen der Wicklungen von Leistungstransformatoren im Frequenzbereich kleiner 1 MHz liegen.

Das Ziel eines standardisierten Messaufbaus ist, dem Anwender möglichst wenig Freiheitsgrade zu überlassen, die zur Verschlechterung der Reproduzierbarkeit der FRA führen. Ein Freiheitsgrad wäre die Wahl des Erdungsbandes, denn sie sind mit unterschiedlichen Maßen und Materialien erhältlich. Bei der nachfolgenden Untersuchung werden zwei Erdungsbandertypen in folgender Konfiguration verglichen.

1. 1 Erdungsband aus Aluminium und straff gezogen mit den Maßen (Breite x Dicke): (22 x 2) mm
2. 2 Erdungsbänder aus Aluminium parallel verlaufend und straff gezogen (Abb. 18 a)) mit den Maßen (Breite x Dicke): (22 x 2) mm
3. 1 Erdungsband aus Kupfer und straff gezogen mit den Maßen (Breite x Dicke): (35 x 3) mm
4. 1 Erdungsband aus Kupfer und durchhängend (Abb. 18b)) mit den Maßen (Breite x Dicke): (35 x 3) mm

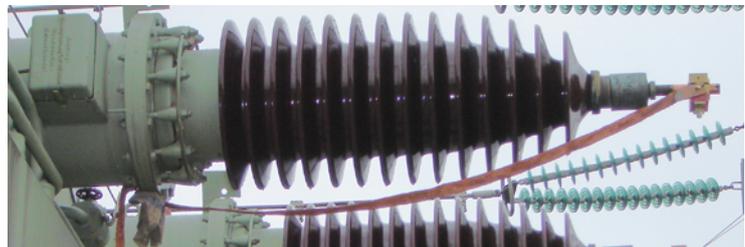


Abb. 18 a): Erdungsbänder entlang der Durchführung straff gezogen

Abb. 19 b): Erdungsband unter der Durchführung durchhängend

Abb. 20 zeigt, dass die FRA eine Abhängigkeit von Konfiguration und Typ des Erdungsbandes aufweist. So wandert die Resonanzfrequenz bei 570 kHz um 30 kHz nach oben, wenn statt einem zwei Erdungsbänder verwendet werden. Ein ähnliches Verhalten zeigt die Verwendung eines anderen Erdungsbandtyps. Hier verschieben sich die Resonanzfrequenz um 8 kHz. Selbst bei der Verwendung des gleichen Erdungsbandes, welches bei der zweiten Messung unter der Durchführung durchhängt anstatt wie bei der ersten Messung entlang der Durchführung straff gezogen zu sein, ist die Resonanzfrequenz bei 570 kHz um 20 kHz verschoben (Abb. 20). Eine Veränderung der Anbindung des Kabelschirms zum Trafokessel hat nicht unbedingt eine Verschiebung der Resonanzfrequenz zur Folge. Abb. 22 zeigt wiederholt den Einfluss eines zweiten, parallel verlaufenden Erdungsbandes auf die FRA jedoch an einem anderen Testobjekt. Darin ist zu erkennen,

dass sich ab ca. 660 kHz ein anderes Dämpfungsverhalten einstellt. Verschiebungen einzelner Resonanzfrequenzen sind hingegen nicht feststellbar.

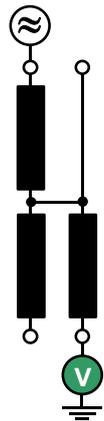
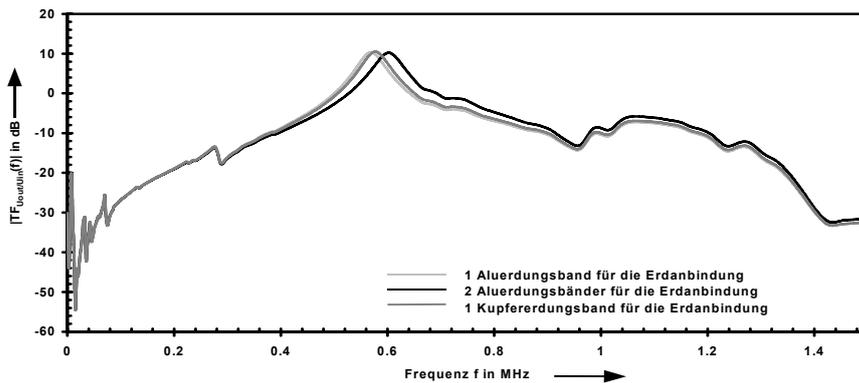


Abb. 20: Einfluss mehrerer Erdungsänder auf die FRA

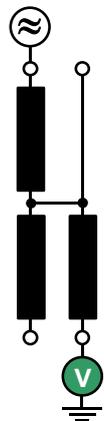
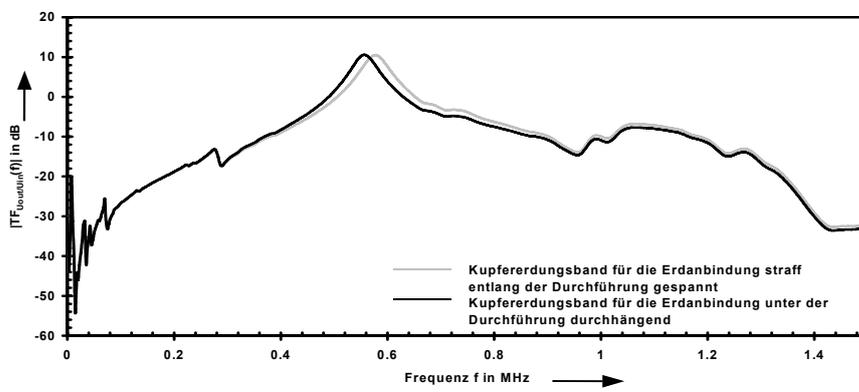


Abb. 21: Einfluss unterschiedlicher Konfigurationen und Typen bei Erdungsänder auf die FRA

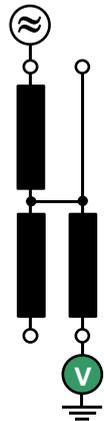
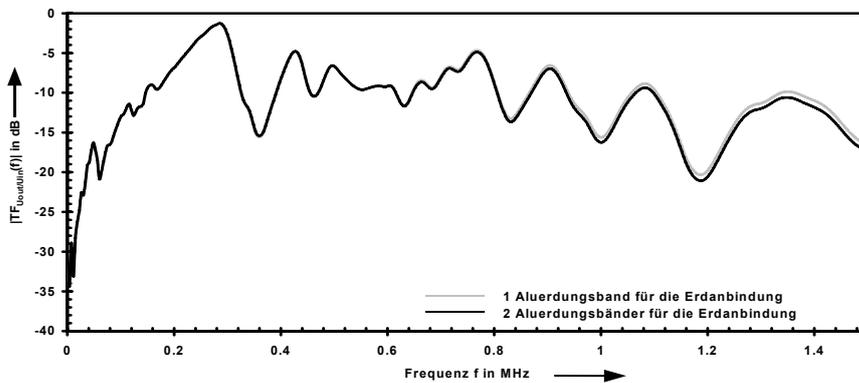


Abb. 22: Einfluss mehrerer Erdungsänder auf die FRA an einen anderen Testobjekt

Diese Untersuchungen zeigen, dass der Reproduzierbarkeit wegen mit mindestens einem Erdungsänder für die Kabelschirmerdung gearbeitet werden muss, das entlang der Durchführung straff zu ziehen ist. Durch die Verwendung eines zweiten Erdungsänderes hat man den Vorteil, dass sich aufgrund der Parallelschaltung die Impedanz der Erdanbindung halbiert und sich daher eine bessere Störunterdrückung herstellen lässt. Die

Wahl des Erdungsbandes und die Konfiguration der Erdanbindung können die FRA beeinflussen. Daher muss unbedingt in einem Prüfprotokoll angegeben sein, welchen Querschnitt das Erdungsband besitzt und aus welchem Material es besteht. Ferner muss noch angegeben werden ob für die Erdanbindung der Kabelschirme ein oder zwei Erdungsbander verwendet wurden.

### 3.2 Der Einfluss des Kerns auf die FRA

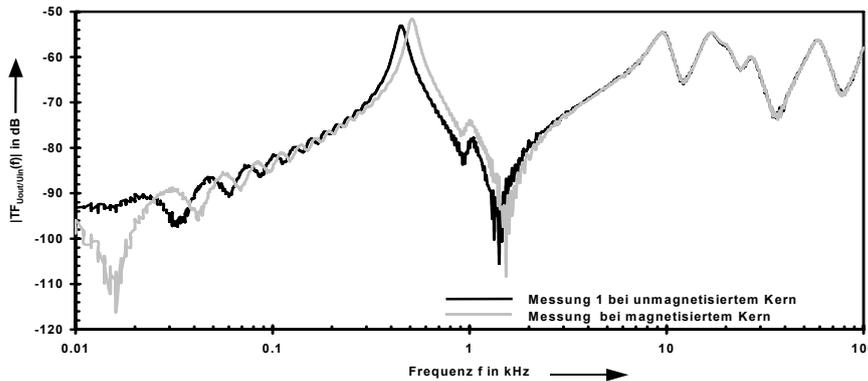


Abb. 23: Einfluss des Kerns auf die FRA bei offenen Anschlüsse der nichtuntersuchten Phasen

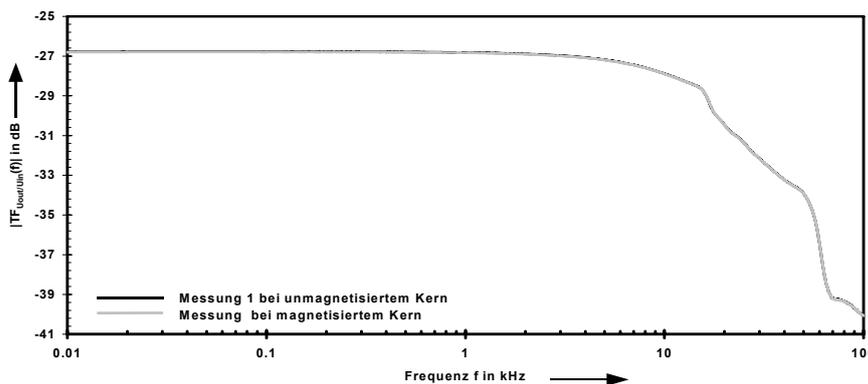


Abb. 24: Einfluss des Kerns auf die FRA bei geerdeten Anschlüsse der nichtuntersuchten Phase

Wie in Kapitel 2.1 erwähnt, sind bei Frequenzbetrachtungen unterhalb von 10 kHz die nichtlinearen Eigenschaften des Eisenkerns vom Transformator zu beachten. Sie können sich unterschiedlich äußern und sind stark von der Prüfschaltung abhängig. Werden bei einer FRA-Untersuchung die Trafoklemmen, an denen keine Untersuchung erfolgt, offen gelassen (Schaltbild in Abb. 23), wirkt sich der Kerneinfluss direkt auf die FRA aus.

Am Beispiel eines magnetisierten Kerns ist in Abb. 23 deutlich zu erkennen, dass sich im Vergleich zu einem unmagnetisiertem Kern die Resonanzfrequenz bei 470 Hz um 70 Hz nach rechts verschiebt. Im weiteren Frequenzverlauf nähern sich die Kurven wieder an und sind ab ca. 6 kHz deckungsgleich. Dieser Effekt des Kerns kann zu einer Fehlinter-

pretation führen, denn Wicklungsschäden weisen ein ähnliches Verhalten der FRA auf (vgl. Abb. 1). Werden hingegen alle nichtuntersuchten Klemmen geerdet (Schaltbild in Abb. 24) hat der Kern, wie in Abb. 24 zu erkennen ist, keinen Einfluss auf die FRA.

Der Grund, dass der Kern bei geerdeten Anschlussklemmen keinen Einfluss auf die FRA hat ist folgender: Sind die Wicklungsanschlüsse einer Spannungsebene auf Masse gelegt, kann aufgrund des Induktionsgesetzes in diesem Schenkel des Eisenkerns kein zeitlich veränderbarer magnetischer Fluss mehr fließen. Es gilt:

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0V \quad (7)$$

Werden bei einem Transformator die Wicklungsanschlüsse zweier Phasen auf Masse gelegt, existiert bei einem Dreischenkel-Kern kein magnetischer Rückschluss für den Fluss. Demzufolge fließt im gesamten Kern kein zeitlich veränderbarer Fluss und die FRA-Messung wird unabhängig vom Kern. Die magnetische Kopplung für die Spannungsübertragung erfolgt bei der zu untersuchenden Phase ausschließlich über den Fluss der Streukanäle.

In großen Leistungstransformatoren wird hauptsächlich eine Fünfschenkel-Kern-Technologie eingesetzt. Werden bei diesem Kerntyp die Wicklungsanschlüsse zweier Phasen auf Masse gelegt, könnte immer noch aufgrund der äußeren Schenkel ein magnetischer Rückschluss erfolgen. Allerdings weisen solche Transformatoren aufgrund der Tertiärwicklung drei Spannungsebenen pro Schenkel auf. Wird bei der FRA darauf geachtet, dass nur an den Anschlüssen zweier Spannungsebenen simultan gemessen wird, können alle Anschlussklemmen der übriggebliebenen Spannungsebene geerdet werden. Somit kann kein zeitlich veränderbarer magnetischer Fluss im Kern entstehen und die FRA-Messung wird auch in diesem Fall unabhängig vom Kern.

Der Auswertebereich der FRA hängt demnach von der Prüfschaltung und der Bauweise des Transformators ab. Kann durch eine äußere Beschaltung ein magnetischer Fluss im Kern verhindert werden, gibt es zu den niedrigeren Frequenzen hin keine Einschränkung hinsichtlich des Auswertebereichs der FRA. Kann hingegen der magnetische Fluss im Kern nicht verhindert werden, sollte die Auswertung der FRA-Kurven erst ab 10 kHz erfolgen. Durch die Einschränkung des Auswertebereichs gehen kaum Informationen für die Bewertung des Wicklungszustandes verloren, weil sich Wicklungsveränderungen eher in einem höherfrequenten Bereich bemerkbar machen.

### 3.3 Weitere Einflussgrößen

Neben den Einflussgrößen des Erdungskonzeptes und der Anschluss technik gibt es eine Reihe weiterer Faktoren, die sich auf die FRA auswirken. So können z.B. aus Bequemlichkeitsgründen an den offenen nichtuntersuchten Klemmen Koaxialleitungen angebracht werden, um bei der Untersuchung der jeweiligen Phase nur noch die entsprechenden Messleitung mit dem Messgerät verbinden zu müssen (Abb. 25). Wird in einer späteren Nachuntersuchung auf diese Leitungen verzichtet, wirkt sich das, wie es der Abb. 26 zu entnehmen ist, direkt auf die FRA aus. Daher sollte schon im Vorfeld auf unnötige Leitungsanschlüsse verzichtet werden.

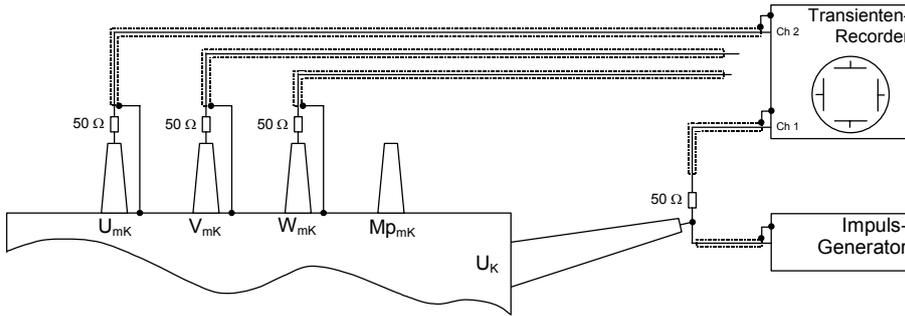


Abb. 25:  
Messaufbau mit zusätzlichen, unbenutzten Leitungen

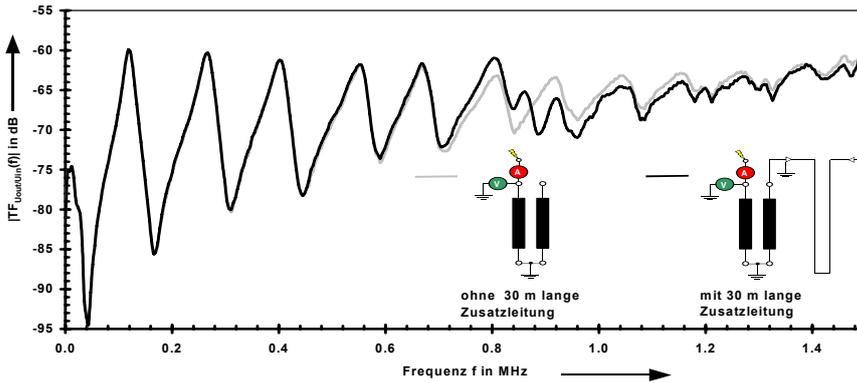


Abb. 26:  
Einfluss auf die FRA bei zusätzlichen Leitungen

Die Leitungslängen haben bei einer hochohmigen Spannungsmessung aufgrund von Reflektionsvorgängen auch einen Einfluss auf die FRA und können bei der Frequenzbereichsmessung nicht durch eine 0-dB-Kalibration eliminiert werden. Wird hingegen eine Wellenwiderstandsanpassung am Messgerät vorgenommen, so hat die Leitungslänge keinen Einfluss mehr auf die FRA. Beide Sachverhalte sind in der Abb. 27 und Abb. 28 dargestellt.

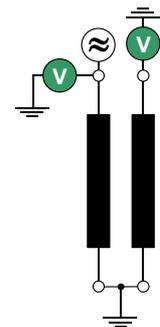
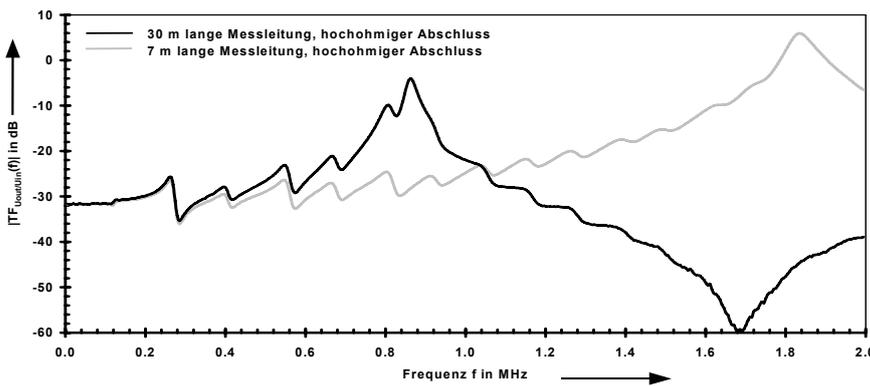


Abb. 27: Einfluss der Kabellänge auf die FRA bei hochohmigem Abschluss

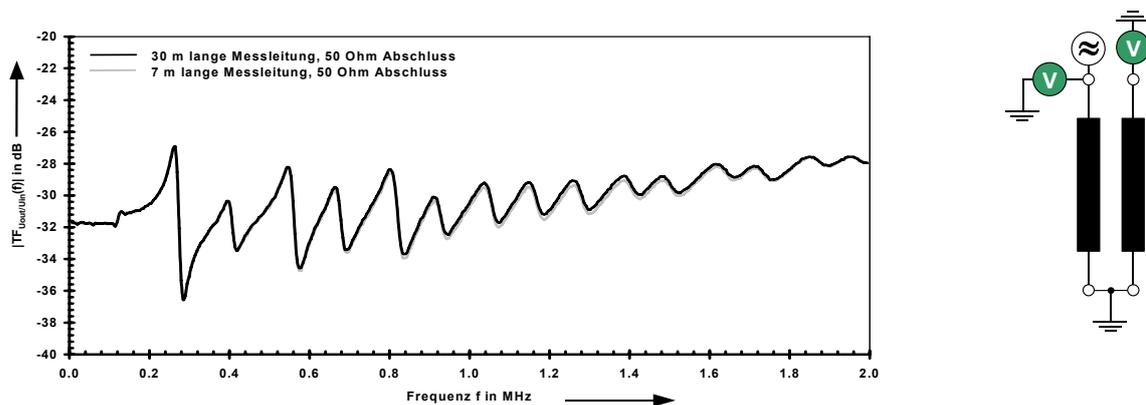


Abb. 28: Einfluss der Kabellänge auf die FRA bei angepasstem Abschluss

Die Stufenschalterstellung hat einen großen Einfluss auf die FRA, denn je nach Stellung werden Wicklungsteile hinzu- oder weggenommen. Durch die Vorwählkontakte des Stufenschalters hat nicht nur die aktuelle sondern auch die vorangegangener Schalterstellung einen Einfluss auf die FRA [Christian -2002]. Je nach Schaltrichtung ergeben sich unterschiedliche Positionen des Vorwählkontaktes. Bei der Nennstellung ergeben sich die größten Unterschiede. Es stellen sich dabei folgende Kontaktanordnungen her:

Von der oberen Schalterstellung kommend:

Die Anbindung der Stammwicklung an die Feinregelwicklung erfolgt vor der Grobstufenwicklung. Ein Vorwählkontakt steht dabei am Ende der Feinstufenwicklung.

Von der unteren Stufenschalterstellung kommend:

Die Anbindung der Stammwicklung an die Feinstufenwicklung erfolgt über die Grobstufenwicklung. Ein Vorwählkontakt steht dabei am Anfang der Feinstufenwicklung.

Keine Unterschiede ergeben sich bei der ersten und letzten Stufenschalterstellung. Sollen mit einer FRA-Untersuchung Rückschlüsse auf den Wicklungszustand gezogen werden, empfiehlt es sich die Stufenschalterstellung 1 zu wählen, weil hier alle Wicklungsteile der OS-Wicklung erfasst werden.

#### 4 Zusammenfassung

Bei einer späteren FRA-Untersuchung sollte auf das gleiche Messverfahren zurückgegriffen werden. Aus dem Vergleich zwischen SFRA und IFRA geht hervor, dass es kaum Verschiebungen der Resonanzfrequenzen gibt aber erhebliche Unterschiede bezüglich der Dämpfung. Dies kann zwischen Kunden und Anwender zu unnötigen Diskussionen führen. Die Daten der FRA-Messung sollten möglichst als Rohdaten abgespeichert werden. Insbesondere bei der IFRA sollten die Zeitsignale abgespeichert werden, weil für die Bestimmung der FRA viele Signalverarbeitungsschritte notwendig sind. Werden hingegen die aufgearbeiteten Daten abgespeichert, darf sich die Signalverarbeitungsprozedur nicht ändern, weil das wiederum eine Veränderung der FRA-Kurve nach sich ziehen würde.

Für die Signalübertragung dürfen, bei einer potentialgebundenen Übertragung, ausschließlich nur geschirmte Leitungen verwendet werden, um elektromagnetische Einkopplungen zu unterbinden. Selbst für die Ankopplung von Sensoren sollte weitestgehend auf ungeschirmte Leitungen verzichtet werden. Am Besten wird für die Sensorik eine entsprechende Aufnahme an dem Trafoklemmenadapter für die Koaxialkabel angebracht.

Neben der Anschluss- und Leitungstechnik kommt auch dem Erdungskonzept eine besondere Bedeutung zu. Ein schlechtes Erdungskonzept kann dazu führen, dass die FRA-Ergebnisse nicht reproduzierbar und damit unbrauchbar sind. Um möglichst gute FRA-Messungen zu erzielen sollten die Erdverbindungen eine möglichst große Oberfläche haben. Daher sind Erdungsbänder einem drahtähnlichen Leiter vorzuziehen. Diese sind weniger störanfällig und die FRA ist unabhängig von der Kabelanordnung. Um ein hohes Maß der Vergleichbarkeit zu haben, sollte die Anbindung des Kabelschirms an den Kessel nur mit Erdungsbändern erfolgen, welche entlang der Durchführung straff zu ziehen sind. Des weiteren müssen in einem Prüfprotokoll die Anzahl, das Material und der Querschnitt des Erdungsbandes festgehalten werden.

Ob die Trafoklemmen, an denen keine Untersuchung stattfindet, geerdet oder offengelassen werden, muss von Fall zu Fall entschieden werden und bleibt dem Anwender überlassen. Bei einer SFRA-Untersuchung kann eine Erdung dieser Klemmen auch deswegen scheitern, weil die Eingangsimpedanz der Wicklung so gering ist, dass der Networkanalyzer nicht mehr die dafür benötigte Leistung aufbringen kann.

Bei einer FRA-Nachuntersuchung ist es generell wichtig, dieselbe Messkonstellation herzustellen wie bei der Referenzmessung. Gerade, wenn gewisse Freiheitsgrade bei Prüfschaltung, Kabellänge und -typ, Stufenschalterstellung, Sensortyp und Ort der Erfassung bei einer Strommessung existieren, sollte das in einem Prüfprotokoll genau dokumentiert sein. Unnötige Leitungsanschlüsse können bei einer Nachuntersuchung zu Fehlern führen. Deswegen sollte bei einer FRA-Untersuchung nach dem Minimalprinzip verfahren und nur solche Leitungen und Sensoren angeschlossen werden, die für die Messung nötig sind.

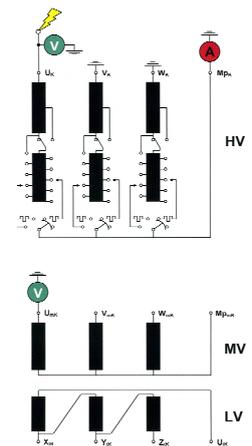
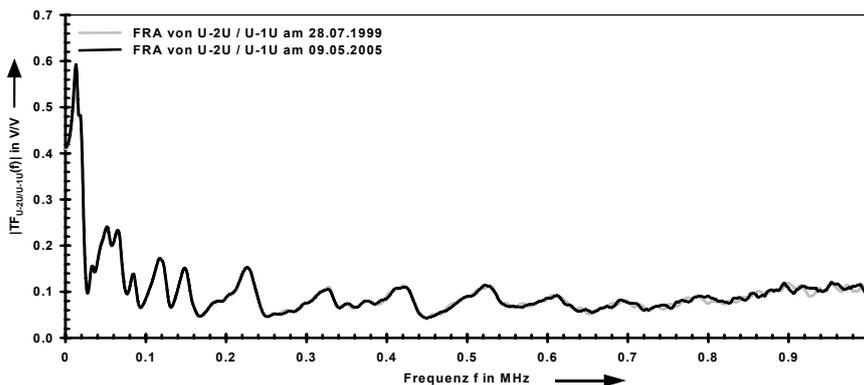


Abb. 29: Wiederholungsmessungen der FRA nach 6 Jahren

Mit dem hier vorgestellten Messaufbau können, wie in Abb. 29 zu sehen ist, reproduzierbare FRA-Messkurven erzielt werden.

## Referenzen

- [Bak-Jensen – 1995] J. Bak-Jensen, B.Bak-Jensen, S.D. Mikkelsen: "Detection of Faults and Aging Phenomena in Transformers by Transfer Functions", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, Jan. 1995, pp. 308-314
- [Christian – 2002] J. Christian: "Erkennung mechanischer Wicklungsschäden in Transformatoren mit der Übertragungsfunktion", Dissertation, Universität Stuttgart, 2002
- [Coffeen – 2003] L. T. Coffeen, J. A. Britton, J. Rickmann, E. Gockenbach: "A New Objective Technique to Detect Winding Displacements in Power Transformers Using Frequency Response Analysis, Without the Need for Historical Data", 13th ISH 2003, Delft
- [Gharehpetian – 1996] G. B. Gharehpetian: "Modellierung von Transformatorwicklungen zur Untersuchung schnellveränderlicher transients Vorgänge", Dissertation, RWTH Aachen und Universität Teheran, 1996
- [Leibfried – 1996] T. Leibfried: "Die Analyse der Übertragungsfunktion als Methode zur Überwachung des Isolationszustandes von Großtransformatoren", Dissertation, Universität Stuttgart, 1996
- [Nothaft – 1994] M. Nothaft: "Untersuchung der Resonanzvorgänge in Wicklungen von Hochspannungsleistungstransformatoren mittels eines detaillierten Modells", Dissertation, Technische Hochschule Karlsruhe
- [Rahimpour 2001] E. Rahimpour: "Hochfrequente Modellierung von Transformatoren zur Berechnung der Übertragungsfunktion", Dissertation, Universität Stuttgart und Universität Teheran, 2001
- [Wimmer – 2003] R. Wimmer, K. Feser, J. Christian: "Reproducibility of Transfer Function Results", 13th ISH 2003, Delft