

# Richtlinien für den Messaufbau für eine hohe Reproduzierbarkeit der FRA-Messergebnisse

Dipl.-Ing. René Wimmer

Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Kurt Feser

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart, Deutschland

Dr.-Ing. Michael Krüger

Omicron electronics GmbH, Klaus / Austria

## Kurzfassung

Die FRA (**F**requency **R**esponse **A**nalysis) ist ein Diagnoseverfahren, mit dem ein Wicklungsschaden an Großtransformatoren detektiert werden soll. Die Methode basiert auf den Vergleich zwischen einer vergangenen und der aktuellen FRA-Messung des Transformators. Der Theorie nach darf zwischen diesen beiden Messungen erst dann ein Unterschied auftreten, wenn sich das elektrische Netzwerk des Transformators verändert. Ursache solcher Veränderungen sind Wicklungsschäden wie z.B. Buckling, Veränderung der Leitungsführung im Transformator, Kurzschlüsse, etc. Der Erfolg und die Sensitivität dieses Diagnoseverfahrens hängt in erster Linie davon ab wie reproduzierbar die FRA Ergebnisse sind. Werden Kurvenveränderungen bei der FRA durch die Variation des Messaufbaus verursacht, kann das zu einer kostspieligen Fehlinterpretation führen. Begünstigt durch die Betrachtung bis zu 1,5 oder 2 MHz, dem großen Transformatorgebilde und die damit verbundenen weite Weg führt ein falsches Erdungskonzept oder ungeschirmte Leitungsteile unweigerlich zu nicht reproduzierbaren FRA-Ergebnisse. In diesem Beitrag wird gezeigt worauf bei einem Messaufbau zu achten ist um reproduzierbare Messungen zu erhalten.

## 1 Die FRA als Diagnosetool

### 1.1 Die Bestimmung der FRA

Der Transformator kann als ein Netzwerk, bestehend aus Widerständen, Eigeninduktivitäten, Erdkapazitäten, Koppelinduktivitäten und Längskapazitäten, betrachtet werden [1, 2]. Bei Frequenzen größer 10 kHz werden die Feldlinien nahezu vollständig aus dem Kerninneren verdrängt und der Eisenkern führt keinen magnetischen Fluss mehr [3]. In diesem Bereich haben daher die nichtlinearen Effekte des Kerns keine Bedeutung mehr und es können die theoretischen Grundlagen der Vierpoltheorie angewendet werden. Es bieten sich daher zwei unterschiedliche Bestimmungsarten an:

1. Im Zeitbereich [4]:

Der Transformator wird mit einem breitbandigen Impuls angeregt. Ein- und Ausgangssignal werden simultan erfasst und unter Benutzung der **F**ast **F**ourier **T**ransformation (FFT) in den Frequenzbereich transformiert. Durch die anschließende Quotientenbildung zwischen den fouriertransformierten Aus- und Eingangssignal erhält man die komplexe FRA.

2. Im Frequenzbereich [5]:

Der Transformator wird mit einem sinusförmigen Signal angeregt. Das Ausgangssignal ist ebenfalls sinusförmig, allerdings unterscheidet es sich im Vergleich zum Eingangssignal in der Amplitudenhöhe und in der Phasenlage. Das Amplitudenverhältnis und die Phasenverschiebung zwischen Aus- und Eingangssig-

nal ergeben den Wert der Betrags- und Phasenfunktion der FRA.

### 1.2 Die Vergleichsmethoden

Die FRA ist, wie in der Einleitung erwähnt, eine vergleichende Messmethode und muss auf eine Referenzkurve bezogen werden. Ergeben sich bei diesem Vergleich Unterschiede im Kurvenverlauf ist das ein Indiz auf eine Veränderung des elektrischen Netzwerkes des Transformators. Der Auswertebereich der FRA kann bis 1 oder 2 MHz betragen. Es gibt prinzipiell drei Vergleichsarten für die FRA [6]:

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

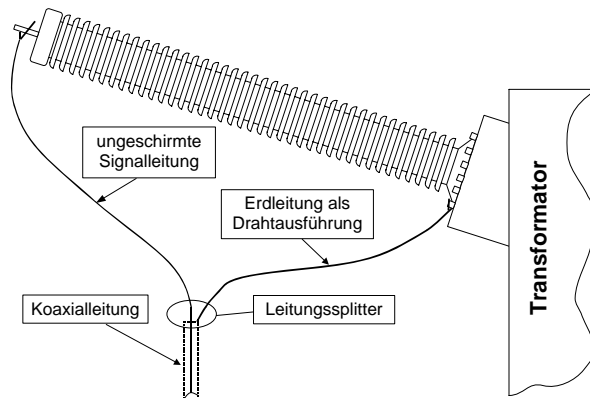
Der Konstruktionsvergleich ist nur dann an einem Transformator sinnvoll, wenn keine Fingerprint vorhanden ist. Die unsymmetrische geometrische Anordnung der Wicklungen im Transformator, sowie Herstellungstoleranzen führen hier bei einer Stern-Stern-Wicklung zu einer leichten Variation der FRA-Ergebnisse. Noch problematischer wird der Vergleich bei vorhandener Dreieck- bzw. Zick-Zack-Wicklung. Der Typvergleich führt aufgrund von Herstellungsto-

lerenzen und unterschiedliche Spezifikationen ebenfalls zu unterschiedlichen FRA-Ergebnisse. Vom Trafotyp unabhängig und am Sensibelsten ist der zeitabhängige Vergleich. Allerdings werden hier hohe Anforderungen an den Messaufbau gestellt, weil zwischen den einzelnen Messungen Jahre liegen können.

Voraussetzung bei allen Methoden ist, dass die Messungen weitestgehend vom Messaufbau unabhängig sein müssen. Des weiteren sind auf Grund der Größe der Transformatoren selbst bei der Frequenzbereichsmessung mittels Networkanalyzer nicht alle Einflussgrößen des Messaufbaus herauszukalibrieren. Dem Erdungskonzept, der Leitungsführung und der Anlusstechnik kommt daher eine besondere Bedeutung zu um eine hohe Reproduzierbarkeit der FRA zu erhalten

## 2 Die Anlusstechnik und Leitungskonzept

Aufgrund der großen Dimensionen von Leistungstransformatoren sind weite Wegstrecken zwischen den Anschlussklemmen des Transformators und dem Messgerät zu überwinden. Die Signalleitungslänge kann hierbei bis zu 30 m betragen und sollte zur Vermeidung elektromagnetischer Einkopplung geschirmt ausgeführt sein.

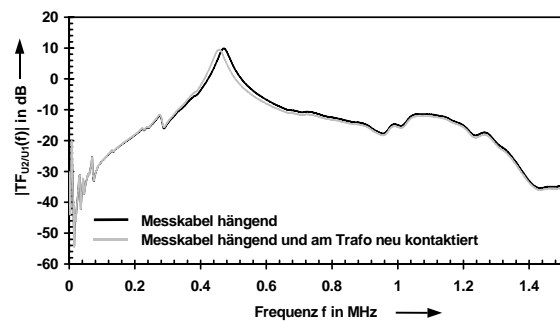


**Bild 1** Anlusstechnik mit ungeschirmten Leitungen ab dem Leitungssplitter

Eine Anforderung an die Anlusstechnik ist, dass die Leitungen für den Anwender möglichst schnell und einfach montiert werden können. Aufgrund des Erdungskonzeptes müssen die Schirme der Koaxialleitung am Transformatorkegel geerdet werden. Daher wird an einem 220 MVA Spartransformator die Wiederholbarkeit der FRA mit folgender Signalleitungstechnik untersucht: Ab einem Leitungssplitter wird der Innenleiter und der Schirm eines Koaxialkabels in ungeschirmten, separaten Leitungen geführt (Bild 1). Während die Leitung, die mit dem Innenlei-

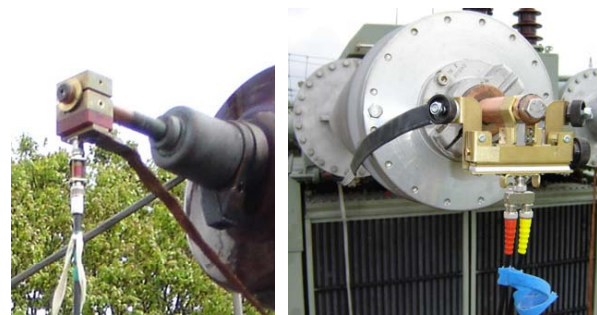
ter des Koaxialkabels verbunden ist, zur Anschlussklemme des Transformators führt, wird die Leitung, die mit dem Schirm des Koaxialkabels verbunden ist, mit dem Kessel des Transformators verbunden. Die elektrische Verbindung an der Transformatorkelemme und an dem Kessel findet jeweils mit Zangen statt.

Wie in Bild 2 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.



**Bild 2** Einfluss ungeschirmter Leitungsabschnitte auf die FRA

In Bild 3 sind entsprechende Anschlussadapter an die Trafoklemmen zu sehen, die eine Anbindung der Koaxialkabel ermöglichen.



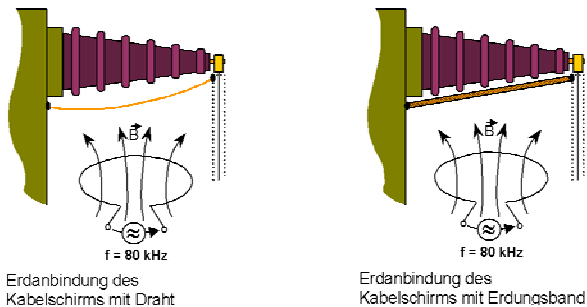
**Bild 3** Verschieden Klemmenanschlussadapter

## 3 Das Erdungskonzept

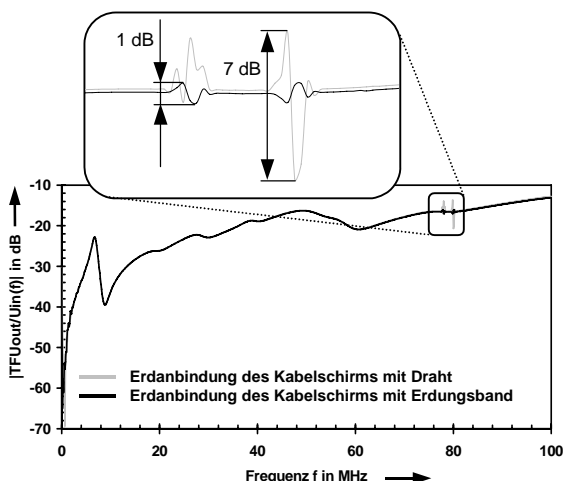
In früheren Untersuchungen wurde festgestellt, dass sowohl bei einer beidseitigen Erdung der Leitungsschirme, als auch bei einer einseitigen Leitungsschirmerdung am Prüfling, kein bedeutender Unterschied im Verlauf der FRA in Abhängigkeit der Leitungsanordnung festzustellen ist [6]. Allerdings sollte 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.

### 3.1 Die Störfestigkeit der Erdungsleitung

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.



**Bild 4** Messaufbau mit Störquelle



**Bild 5** Störimpfindlichkeit gegenüber der FRA bei Erdanbindung mit Draht und Erdungsband

In einer Versuchsanordnung (Bild 4) wird zunächst die Auswirkung der Störimpfindlichkeit von einem Draht und einem gewebten Erdungsband auf die FRA ermittelt. Als Prüfkreis dient ein normaler FRA-Messaufbau, d.h. Signalübertragung über geschirmte Leitungen bis zur Trafoklemme, beidseitige Erdung der Leitungsschirme und feste Klemmenanbindung nach Bild 3 und 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 Ge-

samtlänge 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.

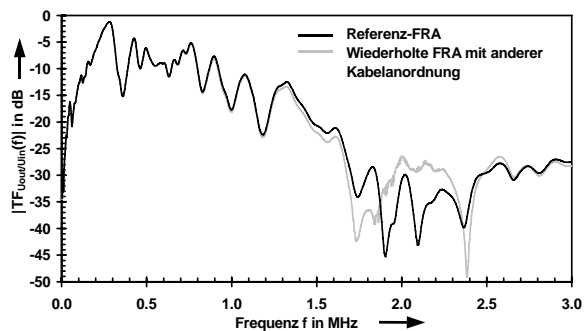
In Bild 5 ist das Störsignal bei einer Erdanbindung mit Draht deutlich in Form von zusätzlichen Resonanzfrequenzen im FRA-Verlauf zu erkennen. Die maximale Schwankungsbreite beträgt hierbei 7 dB. Da der Audioverstärker bei 80 kHz nicht in seinem Nennfrequenzbereich betrieben wird, verzerrt er das Signal 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 Schwankungsbreite von nur 1 dB. Die daraus abzuleitende Schlussfolgerung ist, dass das Erdungsband nicht so störanfällig ist wie der Draht. Dieser Effekt ist mit der Eigeninduktivität der jeweiligen Erdverbindungsleitung 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. Dieser Effekt ist mit der Eigeninduktivität der jeweiligen Erdverbindungsleitung 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.

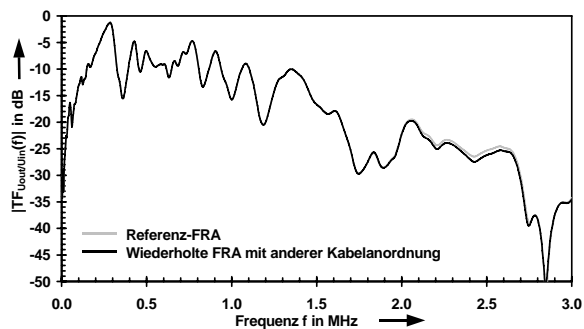
### 3.2 Die Abhängigkeit der geometrischen Signalleitungsanordnung bei unterschiedlichen Erdungsleitungen

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.

Wie schon bei der Untersuchung der Störimpfindlichkeit zeigt sich auch hier, dass die Erdanbindung mit Draht schlechter ist als mit dem Erdungsband (Abb. 16 und 17).



**Bild 6** FRA-Messungen mit Draht für die Erdungsanbindung des Kabelschirms

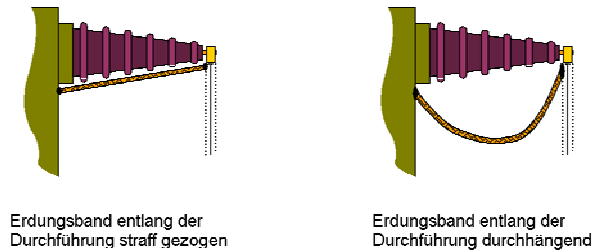


**Bild 7** FRA-Messungen mit Erdungsband für die Erdungsanbindung des Kabelschirms

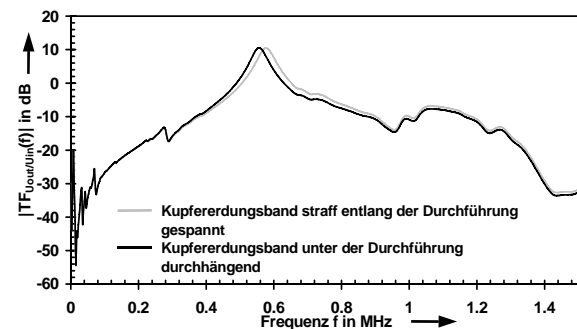
Ab ca. 550 kHz stellt sich bei der FRA mit Draht als Kabelschirmerdung eine andere Dämpfung bei einer neuen Leitungsanordnung ein. Mit steigender Frequenz nimmt dieser Dämpfungsunterschied zu, bis sich bei ca. 1,6 MHz auch eine Verschiebung der Resonanzfrequenz einstellt. Diese Effekte sind bei der Kabelschirmerdung 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 2 MHz liegen.

### 3.3 Die Abhängigkeit der FRA bei unterschiedlichen geometrischen Anordnung des Erdungsbandes

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 geometrische Anordnung des Erdungsbandes. Es kann bei der Erstmessung entlang der Durchführung straff gezogen sein und bei einer nachfolgenden Messung durchhängen (Bild 8).



**Bild 8** Unterschiedliche geometrische Anordnung der Erdungsbänder



**Bild 9** Einfluss unterschiedlicher geometrischer Anordnung der Erdungsbänder auf die FRA

Wie in Bild 9 festzustellen ist, ist die Resonanzfrequenz bei 570 kHz um 20 kHz verschoben. Die Anordnung des Erdungsbandes hat demnach auf die Reproduzierbarkeit der FRA einen entscheidenden Einfluss. Die Erklärung hierzu ist, dass bei der FRA nicht nur das elektrische Netzwerk des Transformators, sondern auch das elektrische Netzwerk des Messaufbaus erfasst wird. Hängt nun das Erdungsband bei einer nachfolgenden Untersuchung durch anstatt wie bei der Erstmessung straff gezogen zu sein, vergrößert sich dadurch die Längsinduktivität des Erdungsbandes und auch die Koppelkapazitäten zur Durchführung und zum Kessel werden sich entsprechend ändern.

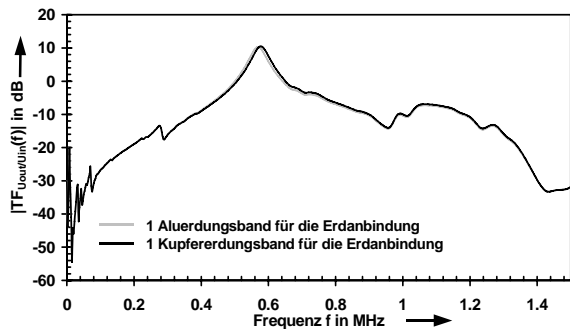
### 3.4 Der Einfluss des Erdungsbandtyps

Ein weiterer Freiheitsgrad ist die Wahl des Erdungsbandes, denn sie sind mit unterschiedlichen Maßen und Materialien erhältlich. Bei der nachfolgenden Untersuchung werden zwei Erdungsbandertypen verglichen.

1. Erdungsband aus Aluminium und straff gezogen mit den Maßen (Breite x Dicke): (22 x 2) mm
2. Erdungsband aus Kupfer und straff gezogen mit den Maßen (Breite x Dicke): (35 x 3) mm

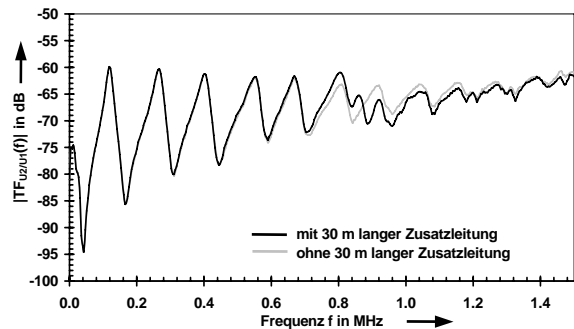
Bild 10 zeigt, dass die FRA bei den zwei betrachteten Erdungsbänder kaum beeinflusst wird. Die Resonanzfrequenz bei 570 kHz verschiebt sich lediglich um 8 kHz. Diese Verschiebung kann allerdings bei der Ver-

wendung anderer Erdungsbandtypen stärker ausfallen.



**Bild 10** Einfluss des Erdungsbandtyps auf die FRA

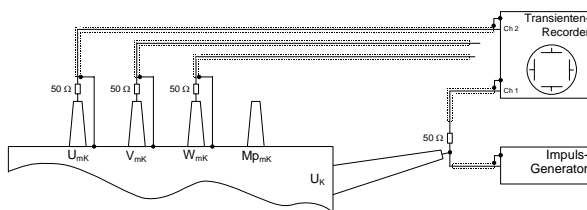
wird. Das entspricht die Hälfte des Quotienten 30 m/7 m.



**Bild 12** Einfluss auf die FRA bei zusätzlichen Leitungen

## 4 Weitere Einflussgrößen

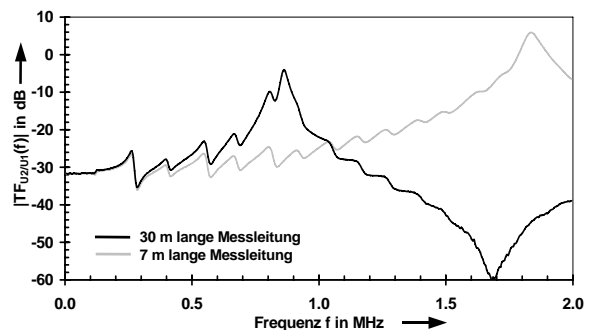
Neben den Einflussgrößen des Erdungskonzeptes und der Anschlusstechnik gibt es eine Reihe weiterer Faktoren, die sich auf die FRA auswirken. So können z.B. aus Bequemlichkeitsgründen an den offenen nichtuntersuchten Klemmen Koaxialleitungen angebracht werden, um bei der Untersuchung der jeweiligen Phase nur noch die entsprechenden Messleitung mit dem Messgerät verbinden zu müssen (Bild 11). Wird in einer späteren Nachuntersuchung auf diese Leitungen verzichtet, verringert sich aufgrund dessen die Erdkapazität und es verändert sich, wie es auch dem Bild 12 zu entnehmen ist, der Kurvenverlauf der FRA. Daher sollte schon im Vorfeld auf unnötige Leitungsanschlüsse verzichtet werden.



**Bild 11** Messaufbau mit zusätzlichen, unbenutzten Leitungen

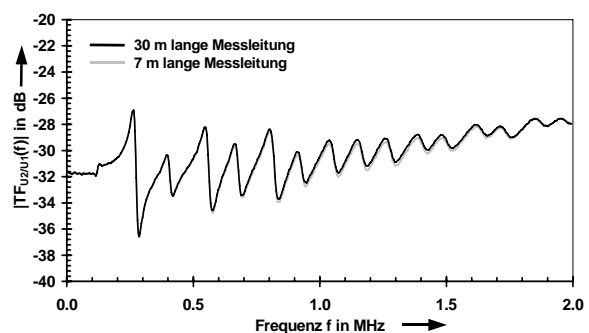
Die Leitungslängen haben bei einer hochohmigen Spannungsmessung aufgrund von Reflektionsvorgängen auch einen Einfluss auf die FRA und können bei der Frequenzbereichsmessung nicht durch eine 0-dB-Kalibration eliminiert werden. Wird hingegen eine Wellenwiderstandsanpassung am Messgerät vorgenommen, so hat die Leitungslänge einen wesentlich geringeren Einfluss auf die FRA.

Bild 13 zeigt, dass bei einer hochohmigen Spannungsmessung die FRA stark von der verwendeten Leitungslänge abhängt. Die Hauptresonanzstelle bei 850 kHz der 7 m langen Leitung verschiebt sich um das 2.15fache, wenn die Leitung um 23 m verlängert



**Bild 13** Einfluss der Kabellänge auf die FRA bei hochohmigem Abschluss

Bei der Messung mit Leitungsanpassung sind hingegen keine Resonanzfrequenzverschiebungen feststellbar. Allerdings zeigt sich in einem Bereich von 0.6 MHz und 1.8 MHz eine geringfügig andere Dämpfung (Bild 14).



**Bild 14** 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 [7]. 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.

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.

Um Netzstörungen zu unterbinden darf die Spannungsversorgung der Messgeräte nur über einen Netzfilter erfolgen. Ein Trenntransformator stellt zu dem sicher, dass das Bezugspotential, welches fast immer der Transformatorkegel ist, frei wählbar bleibt. Am Besten erfüllen diese Anforderung Messgeräte dessen Spannungsversorgung durch Akkumulatoren erfolgen.

## 5 Zusammenfassung

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 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. Diese sind weniger störanfällig als drahtähnliche Leitungen und die FRA ist unabhängig von der Kabelanordnung. Damit ergibt sich ein Messaufbau nach Bild 14.

Des weiteren müssen in einem Prüfprotokoll das Material und der Querschnitt (Breite x Höhe) des Erdungsbandes festgehalten werden.

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.

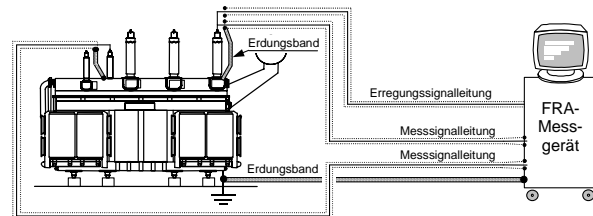


Bild 14 Schematische Darstellung des Messaufbaus

## 6 Literatur

- [1] A. Miki, T. Hosoya, K. Okuyama: „A Calculation Method for Impulse Voltage Distribution and Transferred Voltage in Transformer Windings“, IEEE Trans., Vol.PAS-97, No. 3, 1978, pp. 930-939
- [2] G. B. Gharehpetian: „Modellierung von Transformatorwicklungen zur Untersuchung schnellveränderlicher transients Vorgänge“, Dissertation, RWTH Aachen und Universität Tehran, 1996
- [3] E. Rahimpour: „Hochfrequente Modellierung von Transformatoren zur Berechnung der Übertragungsfunktion“, Dissertation, Universität Stuttgart und Universität Teheran, 2001
- [4] R. Malewski, B. Poulin: „Impulse Testing of Power Transformers Using the Transfer Function Method“, IEEE Trans., Vol. 3, No. 2, Apr. 1988, pp. 476-489
- [5] Y. Liu, S.A. Sebo, S.E. Wright: „Modelling Of Converter Transformers Using Frequency Domain Terminal Impedance Measurements“, IEEE Trans., Vol. 8, No. 1, Jan 1993, pp. 66-72
- [6] J. Christian: „Erkennung mechanischer Wicklungsschäden in Transformatoren mit der Übertragungsfunktion“, Dissertation, Universität Stuttgart, 2002
- [7] R. Wimmer, K. Feser, J. Christian: „Reproducibility of Transfer Function Results“, 13th ISH 2003, Delft