

# Dielektrische Analyseverfahren: Algorithmen zur Überführung der Ergebnisse eines Verfahrens in andere Verfahren

Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried, Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe (TH)  
Dipl.-Ing. Manfred Stach, E.ON Engineering GmbH, Gelsenkirchen

## Kurzfassung

Die dielektrische Analyse ist ein leistungsfähiges Diagnosewerkzeug zur Bestimmung des Zustandes von Isolationssystemen bei Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik, z. B. Leistungstransformatoren. Derzeit werden 3 Methoden, die Analyse der Relaxationsströme (PDC, Polarisation and Depolarisation Current), des Verlustfaktors  $\tan \delta$  (FDS, Frequency Domain Spectroscopy) und der Rückkehrspannung (RVM, Recovery Voltage Measurement), angewandt. In der Praxis führen die Verfahren teilweise zu sehr unterschiedlichen Wassergehalten im Isolationssystem der untersuchten Transformatoren. In dem vorliegenden Beitrag wird eine Umrechnung des Polarisationsstromes in den Verlustfaktor  $\tan \delta$  vorgestellt. Damit lässt sich zeigen, dass unterschiedliche Ergebnisse der dielektrischen Analyse nur durch eine unterschiedliche Modellierung des Isolationssystems der Transformatoren zustande kommen. Die Basis, d. h. die Messungen selbst sind identisch und ineinander überführbar.

## 1 Einleitung

Zur Diagnostik des Isolationssystems von vielen Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik spielt die dielektrische Analyse eine wesentliche Rolle. Bei Leistungstransformatoren wird die dielektrische Analyse dazu benutzt, den Wassergehalt in der Feststoffisolation zu bestimmen. Hierzu kommen derzeit 3 Methoden zum Einsatz: die Analyse der Relaxationsströme (PDC, Polarisation and Depolarisation Current), des Verlustfaktors  $\tan \delta$  (FDS, Frequency Domain Spectroscopy) und der Rückkehrspannung (RVM, Recovery Voltage Measurement).

In der praktischen Anwendung zeigten die 3 Methoden jedoch in einigen Fällen deutlich unterschiedliche Ergebnisse. Dies führte bereits zu größeren Verunsicherungen und Diskussionen. Die Ursache kann sowohl in der Messtechnik als auch in der Modellierung des Isolationssystems liegen.

In dem vorliegenden Beitrag werden Messungen des Polarisationsstromes im Zeitbereich in den Verlustfaktor  $\tan \delta$  im Frequenzbereich umgerechnet. Die Äquivalenz der Umrechnung zeigt, dass die Ursache etwaiger unterschiedlicher Ergebnisse verschiedener dielektrischer Analysen in der Modellierung zu suchen ist. Weiterhin wird in dem Beitrag über dielektrische Messungen an baugleichen Transformatoren berichtet.

## 2 Messtechnik bei der dielektrischen Analyse

**Bild 1** zeigt den Messaufbau bei den 3 genannten dielektrischen Analysemethoden. Das Dielektrikum wird dabei durch seine RC-Ersatzschaltung beschrieben.

Diese besteht aus dem ohmschen Widerstand  $R_0$  aufgrund der endlichen Leitfähigkeit des Mediums, der Kapazität  $C_0$  der Anordnung und den RC-Serienschaltungen  $R_1, C_1, \dots, R_N, C_N$ , welche die zeitabhängige Polarisation des Mediums modellieren.

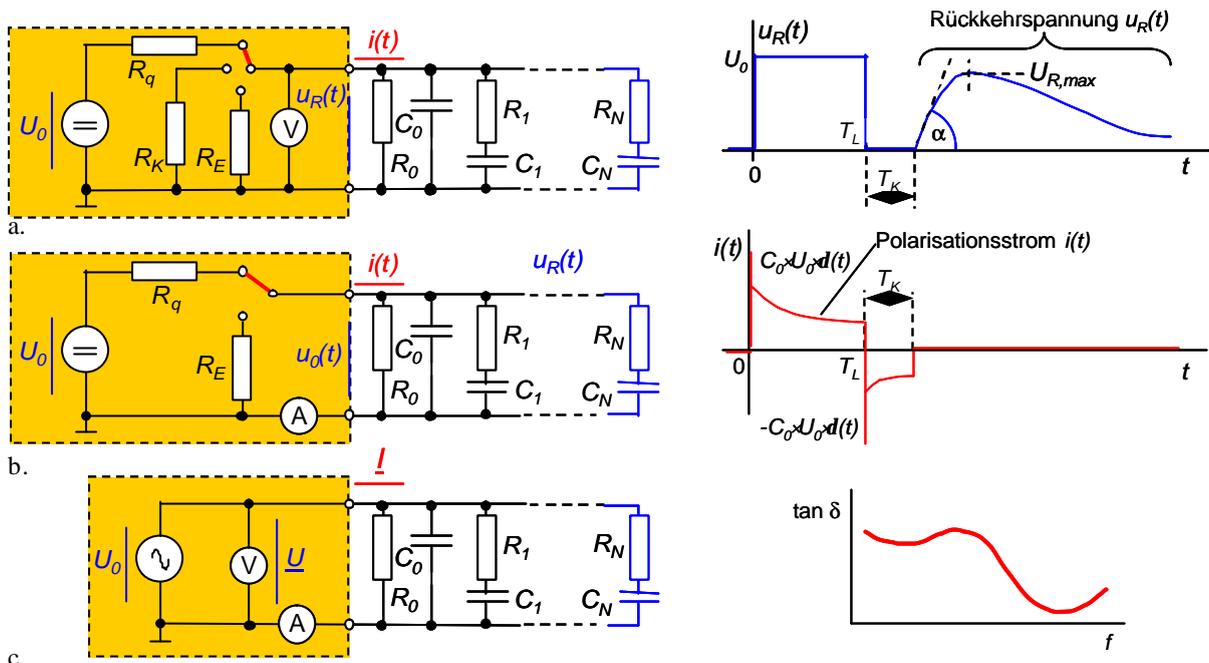
### 2.1 Rückkehrspannung

Zur Messung der Rückkehrspannung wird das Dielektrikum zunächst während der Ladezeit  $T_L$  an die Gleichspannung  $U_0$  gelegt und daraufhin während einer Zeit  $T_k$  kurzgeschlossen (Bild 1a). Danach wird die Spannung gemessen, die sich bei offenen Klemmen an der Anordnung einstellt – die so genannte Rückkehrspannung. Sie ergibt sich physikalisch gesehen aufgrund der noch vorhandenen Polarisation des Dielektrikums. Möchte man die Rückkehrspannung berechnen, so müssen rechnerisch alle Schritte der Messung durchlaufen und mathematisch beschrieben werden. Da dies mehrere Schritte sind (Bild 1a), wird die Berechnung deutlich aufwändiger als bei den anderen Methoden.

Die Kapazität  $C_0$  ist sofort ( $R_q$  vernachlässigbar) geladen. Die Spannungen der anderen Kapazitäten ergeben sich nach Ablauf der Ladezeit  $T_L$  durch:

$$U_{Ci,0} = u_{Ci}(t = T_L) = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_L}{R_i C_i}}\right) \quad (1)$$

Im nächsten Schritt werden die Klemmen des Prüfbjcktes während der Zeit  $T_k$  kurzgeschlossen, dadurch werden die Kapazitäten entladen. Unter der Voraussetzung, dass der Entladewiderstand  $R_k$  vernachlässigbar ist ( $R_k \approx 0$ ), wird die Kapazität  $C_0$  sofort entladen. Die Kapazitäten  $C_i$  der Serienschaltungen entladen sich entsprechend ihren Vorwiderständen  $R_i$ .



**Bild 1** Messverfahren bei der dielektrischen Analyse und Verläufe der zugehörigen Messgrößen im Zeit- oder Frequenzbereich  
 a. Messung der Rückkehrspannung  
 b. Messung des Polarisations- und Depolarisationsstromes  
 c. Messung des Verlustfaktors  $\tan \delta$  im Frequenzbereich

Nach Ablauf der Entladezeit  $T_k$  erhält man für die Spannungen dieser Kapazitäten

$$U_{C1} = u_{C1}(t^* = T_k) = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_L}{R_i \cdot C_i}}\right) \cdot e^{-\frac{T_k}{R_i \cdot C_i}} \quad (2)$$

Die Kapazitäten sind nach Ablauf der Zeit  $T_k$  nicht vollständig entladen, was nach dem Öffnen der Klemmen zu der „Rückkehrspannung“ führt. Analytisch ergibt sich für eine einzige RC-Serienschaltung mit  $R_1$ ,  $C_1$  und  $U_{C1}$  als der Spannung an  $C_1$  nach Ende der Kurzschlussdauer  $T_k$ :

$$u_0(t) = U_{C1} \cdot \frac{R_0 C_1}{2 \sqrt{\left(\frac{R_0 C_0 + R_0 C_1 + R_1 C_1}{2}\right)^2 - R_1 C_1 R_0 C_0}} \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right) \quad (3)$$

$$\text{mit } \tau_1 = A + \sqrt{B^2 - R_1 C_1 R_0 C_0} \quad \tau_2 = A - \sqrt{B^2 - R_1 C_1 R_0 C_0}$$

$$A = \left(\frac{R_0 C_0 + R_0 C_1 + R_1 C_1}{2}\right) \quad B = \left(\frac{R_0 C_0 + R_0 C_1 + R_1 C_1}{2}\right)$$

Diese einfache Berechnung, die doch mit einigen Näherungen behaftet ist ( $R_q \approx 0$  und  $R_k \approx 0$ ), und auch bereits die Darstellung der zeitlichen Verläufe des Stromes und der Spannung in Bild 1 zeigen, dass die Rückkehrspannung eine sehr „indirekte“ Größe darstellt, die zwar einfach messbar ist, die aber mathematisch erst nach einigen Rechenschritten zugänglich ist. In die exakte Berechnung gehen außerdem auch die Eigenschaften des Meßsystems ( $R_q$  und  $R_k$ ) ein.

Hier liegt der wesentliche Vorteil der beiden anderen Verfahren. Sowohl der Polarisationsstrom als auch der

Verlustfaktor werden ohne „Vorbehandlung“ des Mediums gemessen.

## 2.2 Relaxationsstrom

Die Relaxationsstrom-Theorie wurde bereits vielfach behandelt [1, 2, 3]. Mit  $R_q \approx 0$  führt ein Spannungssprung  $s(t) \cdot U_0$  zu einem Polarisationsstrom gemäß

$$i(t) = s(t) \cdot \frac{U_0}{R_0} + \epsilon_{r0} C_0 U_0 \cdot \delta(t) + s(t) \cdot C_0 U_0 \cdot f^*(t) \quad (4)$$

Da ein idealer Spannungssprung in der Praxis durch keine Quelle realisierbar ist, und zusätzlich die Messung erst ab einer Zeit  $t = t_0$  beginnt, wird der Dirac-Impuls nicht gemessen und man erhält in der Praxis:

$$i(t) = s(t) \cdot \left[\frac{U_0}{R_0} + C_0 \cdot U_0 \cdot f^*(t)\right] = s(t) \cdot \left[\frac{U_0}{R_0} + \sum_{k=1}^N \frac{U_0}{R_k} \cdot e^{-\frac{t}{R_k C_k}}\right] \quad (5)$$

Die dielektrische Antwortfunktion  $f^*(t)$  kann durch eine Summe abklingender Exponentialfunktionen modelliert werden. Dies entspricht einer Parallelschaltung von genau so vielen RC-Serienschaltungen, wie sie zu einer exakten Modellierung von  $f^*(t)$  benötigt werden. Der Polarisationsstrom  $i(t)$  eines Dielektrikums bei Anregung durch eine sprungförmige Spannung ist also bis auf einen konstanten Anteil aufgrund der endlichen Leitfähigkeit des Mediums nichts anderes als die dielektrische Antwortfunktion  $f^*(t)$ .

### 2.3 Verlustfaktor $\tan \delta$

Für die Admittanz  $\underline{Y}$  der RC-Ersatzschaltung eines Dielektrikums gemäß Bild 1 gilt:

$$\begin{aligned} \underline{I}(\omega) &= \underline{Y} \cdot \underline{U}(\omega) \quad \text{mit} \\ \underline{Y} &= \frac{1}{R_0} + j\omega \cdot \epsilon_{r0} C_0 + \sum_{i=1}^N \frac{j\omega C_i}{1 + j\omega R_i C_i} \\ &= \frac{1}{R_0} + \sum_{i=1}^N \frac{(\omega R_i C_i)^2}{R_i (1 + (\omega R_i C_i)^2)} + j\omega \left[ \epsilon_{r0} C_0 + \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Aus der Admittanz gemäß (6) lässt sich dann sehr einfach der Verlustfaktor bestimmen:

$$\tan \delta = \frac{\operatorname{Re}\{\underline{Y}\}}{\operatorname{Im}\{\underline{Y}\}} = \frac{\frac{1}{R_0} + \sum_{i=1}^N \frac{(\omega R_i C_i)^2}{R_i (1 + (\omega R_i C_i)^2)}}{\omega \epsilon_{r0} C_0 + \sum_{i=1}^N \frac{\omega C_i}{1 + (\omega R_i C_i)^2}} \quad (7)$$

## 3 Stand bei der Modellierung des Isolationssystems von Transformatoren

**Bild 2** zeigt die prinzipielle Vorgehensweise bei der dielektrischen Modellierung des Isolationssystems von Transformatoren wie sie von den kommerziell verfügbaren Diagnosesystemen derzeit angewandt wird.

Bisher wird das Isolationssystem nur im homogenen Bereich zwischen den Wicklungen (z. B. zwischen OS und US) modelliert. Das Randfeld bleibt unberücksichtigt. Zwischen den Wicklungen befindet sich ein zylindersymmetrischer Aufbau bestehend aus durchgehenden Barrieren (Zylindern), den Leisten und den Ölkanälen. Man kann nun alle gleichartigen Elemente zusammenfassen und sich die Wicklung aufgerollt vorstellen. Dadurch erhält man eine Bockdarstellung mit den 3 Isoliermedien Öl, Leisten und Zylinder in Form eines Trapezes. Aufgrund des großen Durchmessers von Transformatorwicklungen kann das Trapez zu einem Rechteck vereinfacht werden. Man rechnet dann mit einem „mittleren Durchmesser“ des Streukanals, was angesichts anderer Unsicherheiten zu keinem großen Fehler führt.

Jeder Isolierstoff kann prinzipiell durch seine RC-Ersatzdarstellung aus der Parallelschaltung eines ohmschen Widerstandes, der Kapazität der Anordnung und den RC-Serienschaltungen zur Modellierung der Polarisationsseigenschaften beschrieben werden. Im Falle der Feststoffisolation findet das vollständige Modell Verwendung, beim Öl werden in dem betrachteten Zeitbereich keine zeitabhängigen Polarisationsseffekte berücksichtigt. Deswegen wird Öl oft nur durch seine Leitfähigkeit und die jeweils wirksame Kapazität der Ölkanäle berücksichtigt. Ersetzt man jeden „Block“

in dem Rechteck durch das jeweilige RC-Modell, so erhält man eine RC-Schaltung, die das dielektrische Verhalten des gesamten Isolationssystems beschreibt.

Nun werden die Parameter (R- und C-Werte) der jeweiligen Materialmodelle benötigt - und da man im Voraus weder Temperatur noch Wassergehalt des Isolationssystems genau kennt - in Abhängigkeit dieser beiden Parameter Wassergehalt und Temperatur. Dazu sind in Labors Messungen an Materialproben mit unterschiedlichen Wassergehalten (und ggf. auch unterschiedlichen Temperaturen) durchgeführt worden. Die aus diesen Messungen ermittelten Kenngrößen sind in den kommerziell verfügbaren Meßsystemen hinterlegt und bilden die Basis der Modellbildung.

Sind die Parameter des gesamten RC-Modells bekannt, so können die Rückkehrspannung  $u_{rück}$ , der Polarisationsstrom  $i_{pol}$  und der Verlustfaktor  $\tan \delta$  für einen bestimmten Wassergehalt und eine bestimmte Temperatur berechnet werden. Ein Vergleich mit der Messung einer dieser Größen am Transformator erlaubt dann über einen iterativen Prozess die Bestimmung des Wassergehaltes. Man verändert dazu den Wassergehalt, für den die Berechnung durchgeführt wird so lange, bis Rechnung und Messung der betreffenden Größe gut übereinstimmen. Die Temperatur am Deckel des Transformators, bei der die Messung durchgeführt wurde, kann zumindest näherungsweise als Temperatur des Isolationssystems angesetzt werden.

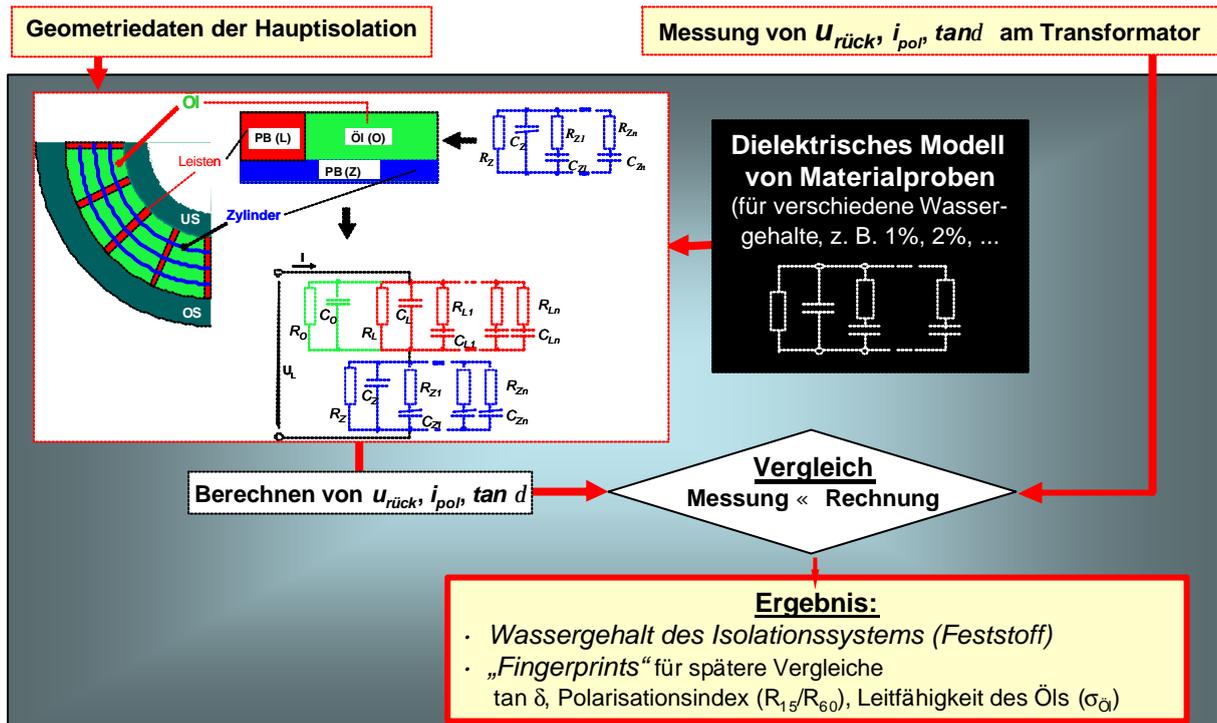
## 4 Messungen an Transformatoren Vor Ort

### 4.1 Umrechnung des Polarisationsstromes in den Verlustfaktor $\tan \delta$

Die Umrechnung erfolgt unter Zuhilfenahme der RC-Ersatzschaltung eines Dielektrikums. Dazu werden die einzelnen Isolierstoffe des Transformator-Isolationssystems nicht unterschieden, sondern das gesamte Isolationssystem durch ein RC-Modell gemäß Bild 1 modelliert. Im ersten Schritt werden die Werte der R- und C-Elemente so bestimmt, dass der gemessene Polarisationsstrom bestmöglich angenähert wird. Ein dazu geeignetes Verfahren ist die nichtlineare Approximation.

Bei guter Annäherung der Messung durch die Berechnung erhält man eine Beschreibung des Isolationssystems in Form einer RC-Schaltung. Daraus lässt sich dann gemäß (7) der Verlustfaktor bestimmen.

Falls die gefundene mathematische Beschreibung des Isolationssystems korrekt modelliert, sollten der so berechnete Verlustfaktor  $\tan \delta$  und der zur Kontrolle gemessene Verlustfaktor (nahezu) identisch sein.



**Bild 2** Vorgehensweise bei der Modellbildung des Isolationssystems von Transformatoren und der Interpretation der dielektrischen Analyse

## 4.2 Nichtlineare Approximation

Zunächst wird ein Funktional

$$\varphi(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{j}^T(\mathbf{p}) \cdot \mathbf{j}(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^N f_i^2(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^N (f_i(\mathbf{p}) - y_i)^2 \quad (8)$$

mit  $\mathbf{j}(\mathbf{p}) = \mathbf{f}(\mathbf{p}) - \mathbf{y}$

definiert. Dabei ist

$$\mathbf{j}(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{p}) \\ f_2(\mathbf{p}) \\ \vdots \\ f_N(\mathbf{p}) \end{bmatrix}_{1 \times N} = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{p}) - y_1 \\ f_2(\mathbf{p}) - y_2 \\ \vdots \\ f_N(\mathbf{p}) - y_N \end{bmatrix}_{1 \times N} \quad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_M \end{bmatrix}_{1 \times M} \quad (9)$$

In obigen Gleichungen bezeichnet  $f(\mathbf{p})$  die Modellfunktion, mit der die Meßwerte  $y$  approximiert werden sollen. Der Index  $i$  bezeichnet dabei den einzelnen Meßwert  $y(t = t_i)$ , kurz  $y_i$ , gemessen zur Zeit  $t = t_i$  und den zugehörigen Funktionswert  $f(\mathbf{p}, t = t_i)$ , kurz  $f_i(\mathbf{p})$ .  $\mathbf{p}$  ist der Parametervektor, d. h. die Gesamtheit der Parameter, die in der Modellfunktion  $f(\mathbf{p})$  enthalten sind.  $\mathbf{j}(\mathbf{p})$  ist damit ein Spaltenvektor mit  $N$  Elementen, wobei  $N$  die Anzahl der Meßwerte ist.  $M$  sei die Anzahl der Parameter. Der Faktor  $\frac{1}{2}$  wird hier nur eingeführt, um später zu übersichtlicheren Beziehungen zu gelangen. Die Funktion  $f(\mathbf{p})$  approximiert die Messwerte dann optimal, wenn das Funktional  $\varphi(\mathbf{p})$  ein Minimum annimmt. Aufgabe ist es also, einen Parametervektor  $\mathbf{p}$  zu finden, für den dies der Fall ist.

Um das Problem zu vereinfachen, nimmt man eine Linearisierung vor. Dazu wird das Funktional  $\varphi(\mathbf{p})$  in

eine Taylor-Reihe um einen Parametervektor  $\mathbf{p}_0$  bis zum Term 2. Ordnung entwickelt:

$$\varphi(\mathbf{p}) \approx \varphi(\mathbf{p}_0) + (\nabla \varphi(\mathbf{p}_0))^T (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0) + \frac{1}{2} (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0) \cdot \nabla^2 \varphi(\mathbf{p}_0) \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0) \quad (10)$$

Die Forderung

$$\nabla \varphi(\mathbf{p}) = 0 \quad (11)$$

angewandt auf die Taylor-Entwicklung Gl. (10) ergibt

$$\nabla \varphi(\mathbf{p}) \approx \nabla \varphi(\mathbf{p}_0) + \nabla^2 \varphi(\mathbf{p}_0) \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0) \stackrel{!}{=} 0 \quad (12)$$

Daraus folgt:

$$(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0) = -[\nabla^2 \varphi(\mathbf{p}_0)]^{-1} \cdot \nabla \varphi(\mathbf{p}_0) \quad (13)$$

Zur Berechnung des Parametervektor  $\mathbf{p}_{min}$ , für den das Funktional  $\varphi(\mathbf{p})$  ein Minimum annimmt, eignen sich rekursive Verfahren. Aus dem Parametervektor  $\mathbf{p}^q$  des  $q$ -ten Iterationsschritts und einem Korrekturvektor  $\mathbf{s}^q$  wird ein neuer Parametervektor  $\mathbf{p}^{q+1}$  berechnet:

$$\mathbf{p}^{q+1} = \mathbf{p}^q + \alpha \cdot \mathbf{s}^q \quad (14)$$

Der Faktor  $\alpha$  dient der Anpassung der Geschwindigkeit der Konvergenz.  $\nabla \varphi$  ist ein Spaltenvektor mit  $M$  Zeilen:

$$\nabla \varphi(\mathbf{p}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{p}) \cdot \mathbf{j}(\mathbf{p}) \quad (15)$$

mit der Jacobi-Matrix

$$\mathbf{J}(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} \frac{dj_1(\mathbf{p})}{dp_1} & \frac{dj_1(\mathbf{p})}{dp_2} & \dots & \frac{dj_1(\mathbf{p})}{dp_M} \\ \frac{dj_2(\mathbf{p})}{dp_1} & \frac{dj_2(\mathbf{p})}{dp_2} & \dots & \frac{dj_2(\mathbf{p})}{dp_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dj_N(\mathbf{p})}{dp_1} & \frac{dj_N(\mathbf{p})}{dp_2} & \dots & \frac{dj_N(\mathbf{p})}{dp_M} \end{bmatrix}_{N \times M} \quad (16)$$

Die Anzahl der Spalten der Jacobi-Matrix  $\mathbf{J}$  ist gleich der Anzahl  $M$  der Parameter der Modellfunktion  $f(\mathbf{p})$  und die Zeilenzahl ist gleich der Anzahl  $N$  der Meßwer-

te des Vektors  $\mathbf{y}$ . Die Hesse-Matrix  $\nabla^2 \mathbf{y}$  ist eine (symmetrische)  $M \times M$ -Matrix, für die vereinfachend

$$\nabla^2 \mathcal{L}(\mathbf{p}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{p}) \cdot \mathbf{J}(\mathbf{p}) + \mathbf{S}(\mathbf{p}) \quad (17)$$

geschrieben werden kann.

Neben dem Gradientenverfahren, dem Newton-Verfahren, dem Gauss-Newton-Verfahren ist vor allem das Levenberg-Marquardt-Verfahren geeignet, eine schnelle Konvergenz zu erreichen. Der Korrekturvektor  $\mathbf{s}^q$  lautet für das Levenberg-Marquardt-Verfahren

$$\mathbf{s}^q = \left( \mathbf{J}^T(\mathbf{p}^q) \times \mathbf{J}(\mathbf{p}^q) + \lambda \times \mathbf{E} \right)^{-1} \times \left( -\mathbf{J}^T(\mathbf{p}^q) \times \mathbf{f}(\mathbf{p}^q) \right) \quad (18)$$

Darin sind  $\lambda$  ein Konditionierungsfaktor und  $\mathbf{E}$  ist die Einheitsmatrix. Zu Anfang wird für  $\lambda$  ein hoher Wert gewählt, z. B. 10. Dadurch wird im Wesentlichen das Gradientenverfahren realisiert. Mit jeder Iteration wird der Wert von  $\lambda$  nach folgendem Schema neu berechnet, wobei der Wert des Parameters  $\beta > 1$  konstant gehalten wird, z. B.  $\beta = 2$ :

$$\text{Wenn } \|\mathbf{s}^q\| < \|\mathbf{s}^{q-1}\| \quad \text{dannist} \quad \lambda^{q+1} = \frac{1}{\beta} \cdot \lambda^q \quad (19)$$

und

$$\text{wenn } \|\mathbf{s}^q\| > \|\mathbf{s}^{q-1}\| \quad \text{dannist} \quad \lambda^{q+1} = \beta \cdot \lambda^q$$

Der Polarisationsstrom wird durch

$$i_{pol}(t) = I_0 + \sum_{k=1}^N A_{p,k} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{p,k}}} \quad (20)$$

modelliert. In dieser Funktion werden die  $M$  Zeitkonstanten  $\tau_{p,k}$  vorgegeben, sie sind also bekannt. Unbekannt sind die  $M$  Koeffizienten  $A_{p,k}$  ( $k = 1, 2, \dots, M$ ) sowie der Strom  $I_0$ . Diese Parameter müssen durch die nichtlineare Approximation gefunden werden.

### 4.3 Vor-Ort-Messungen

**Bild 3** zeigt an 2 Beispielen die Approximation des gemessenen Polarisationsstromes durch den theoretischen Ansatz gemäß Gleichung (20) (jeweils obere Bilder). Die Approximation liefert die Werte der RC-Elemente des Modells gemäß Bild 1. Untersuchungen an einer Vielzahl von Messungen zeigen, dass eine gute Approximation erreicht werden kann, wenn  $I_0$  zu 90% des letzten Wertes des gemessenen Polarisationsstromes gewählt wird. Die jeweils unteren Bilder zeigen den Vergleich des gemessenen Verlustfaktors  $\tan \delta$  und der gemäß Gleichung (7) berechnete Verlauf.

Die Messung des Polarisationsstromes beginnt bei  $t_1$  und endet bei  $t_2$  mit

$$t_1 = 1 \text{ s} \quad t_2 = \begin{cases} 40000 \text{ s} & \text{Bild 3a} \\ 20000 \text{ s} & \text{Bild 3b} \end{cases} \quad (21)$$

Die beiden Beispiele zeigen, dass im Frequenzbereich  $f < 1 \dots 2$  Hz eine gute Übereinstimmung zwischen berechnetem und gemessenem  $\tan \delta$  vorliegt. Die Abwei-

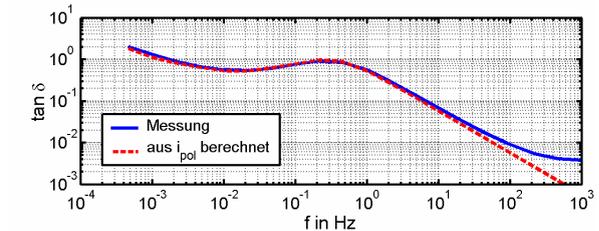
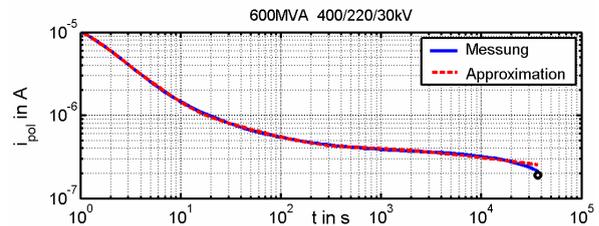
chung für  $f \geq 2$  Hz entsteht, weil die Messung des Polarisationsstromes erst nach 1s beginnt. Die obere Grenzfrequenz  $f_o$ , bis zu der sich der Polarisationsstrom in den Verlustfaktor umrechnen lässt, gilt:

$$f_o \approx (1 \dots 2) \cdot \frac{1}{t_1} \quad (22)$$

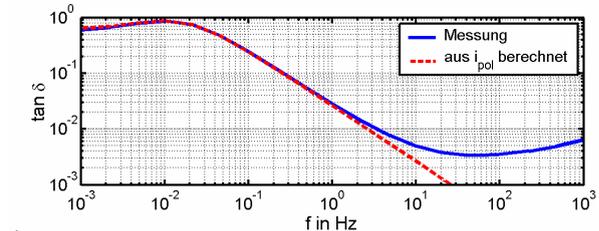
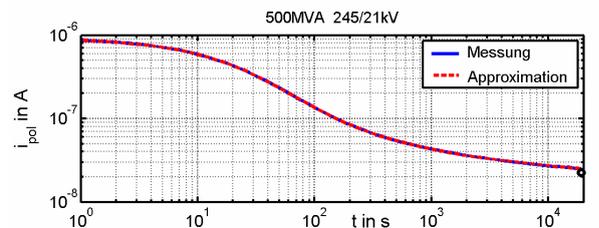
Wollte man also den Verlustfaktor bis zu 100 Hz aus dem Polarisationsstrom berechnen, so müsste der Polarisationsstrom ab  $t_1 \leq 20$  ms gemessen werden.

Aus weiteren Untersuchungen wurde umgekehrt die Zeitdauer  $t_2$  bestimmt, bis zu welcher der Polarisationsstrom aufgezeichnet werden muss, um eine gute Übereinstimmung des berechneten und gemessenen Verlustfaktor  $\tan \delta$  über der unteren Grenzfrequenz  $f_u$  zu erreichen. Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$f_u \approx \frac{1}{t_2} \quad (23)$$



a.



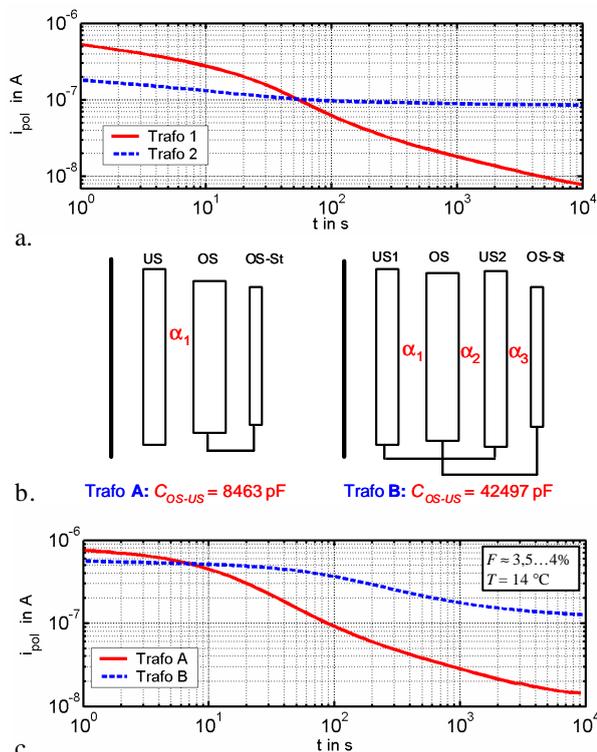
b.

**Bild 3** Approximation des gemessenen Polarisationsstromes (oberes Bild) und Vergleich der aus dem Modell berechneten und dem gemessenen Verlustfaktor  $\tan \delta$   
a. 600-MVA -Transformator (400/220/30kV)  
b. 500-MVA -Transformator (245/21kV)

## 4.4 Baugleiche Transformatoren

**Bild 4a** zeigt die Polarisationsströme von 2 baugleichen 360-MVA-Maschinentransformatoren, Baujahr 1970. Der Polarisationsstrom von „Trafo 2“ zeigt einen völlig flachen Verlauf, was theoriegemäß auf eine extreme Degradation des Isolationssystems hindeuten würde. Die Ölanalyse ergab jedoch keinen Hinweis auf einen hohen Wassergehalt oder eine sonstige Auffälligkeit. Auch die Isolationswiderstände liegen in beiden Fällen im  $\Omega$ -Bereich. Es wird vermutet, dass eine lokale Fehlerstelle zu dem dargestellten Verlauf des Polarisationsstromes geführt hat. Dieses Beispiel zeigt, dass dielektrische Analysen in der Lage sind, Auffälligkeiten aufzufinden, die mit der reinen Ölanalyse so nicht gefunden werden können.

Bei dielektrischen Untersuchungen an Transformatoren muss trotz identischer elektrischer Nenndaten sichergestellt werden, dass auch ein identischer Isolationaufbau vorliegt. In den in **Bild 4b/c** dargestellten Fall von Maschinentransformatoren unterschiedlicher Hersteller (A, B) mit identischen Nenndaten und äußerem Erscheinungsbild zeigte sich ein völlig anderer innerer Isolationaufbau, der zu unterschiedlichen Wicklungskapazitäten  $C_{OS-US}$  und auch zu einem unterschiedlichen dielektrischen Verhalten führt.



**Bild 4** a. Polarisationsströme an 2 baugleichen 360-MVA-Maschinentransformatoren  
 Vergleich von 2 725-MVA-Transformatoren  
 b. Wicklungsaufbau  
 c. Polarisationsströme für gleiche Meßtemperatur  $T$  und etwa gleichen Wassergehalt  $F$

## 5 Schlußfolgerungen

Aus den dargestellten Untersuchungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

1. In einem bestimmten Frequenzbereich  $f_u \ll f \ll f_o$ , abhängig von dem Zeitbereich ( $t_1$  und  $t_2$ ) in dem der Polarisationsstrom gemessen wird, ergibt sich eine gute Übereinstimmung des über das RC-Modell aus dem Polarisationsstrom berechneten und des direkt gemessenen Verlustfaktors  $\tan \delta$ .
2. Dies zeigt, dass die reine Messtechnik trotz völlig unterschiedlicher Methoden zu identischen Ergebnissen kommt. Unterschiede im Wassergehalt des Transformators als Endergebnis der Diagnose resultieren daher nur aus der Modellbildung. Unsicherheitsfaktoren dort sind die zugrunde gelegten Messungen an Materialproben und die Art der Modellierung des Isolationssystems.

## 6 Ausblick

Jede der dielektrische Analysemethoden hat ihre spezifischen Vor- und Nachteile. So ist ein Vorteil  $\tan \delta$ -Messung, dass im Protokoll der Abnahmeprüfung, d. h. im Neuzustand des Transformators, Vergleichswerte für den  $\tan \delta$  bei 50 Hz für verschiedene Isolierstrecken vorliegen, beispielsweise OS-US oder OS-Erde. Die Polarisationsstrommessung bietet hingegen den Vorteil, dass man damit auch die Isolationswiderstände und den so genannten Polarisationsindex erhält – beides erprobte Kenngrößen zur Bewertung der Qualität eines Isolationssystems.

Günstig wäre es nun, wenn man die Ergebnisse der einzelnen Verfahren vollständig ineinander umrechnen könnte. Dies würde es ermöglichen, die einfachste und effektivste der dielektrischen Meßmethoden Vor Ort einzusetzen und alle relevanten dielektrischen Kenngrößen zu ermitteln, die einer direkten Messung nur durch alle 3 dielektrische Verfahren zugänglich wären.

## 7 Literatur

- [1] V. Der Houhannessian; Measurement and Analysis of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems.; PhD Thesis, ETH Zuerich 1998
- [2] W.S. Zaengl; Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment (Transformers, Cables etc.); 12th ISH, Bangalore India, Aug. 2001
- [3] A. Küchler; T. Leibfried; Berücksichtigung geometrischer und parasitärer Einflüsse bei der Bestimmung des Wassergehaltes in Öl-Papier-Isolationen durch dielektrische Diagnose; ETG-Fachtagung „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, Köln 2004