

Beitrag zum 2. Regensburger Trafosymposium am 4.-5.11.2004

Rückkehrspannungsmessungen zur Charakterisierung des Zustandes von Öl-Papier-Isolierungen

Rainer Patsch und Oleg Kouzmine
Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik & Diagnostik
Universität Siegen, Deutschland

Einleitung

Im Rahmen einer zustandsorientierten Wartung und Instandhaltung energietechnischer Anlagen ist es von entscheidender Wichtigkeit, den aktuellen Zustand der unterschiedlichen Betriebsmittel zu kennen. Neben anderen Kenngrößen sind es speziell die elektrischen bzw. **dielektrischen Eigenschaften**, die von betriebsentscheidender Wichtigkeit sind. Darüber hinaus eignen sich dielektrische Untersuchungen auch zur Charakterisierung nicht-elektrischer Eigenschaften und Zustände, sofern diese eine Änderung der dielektrischen Eigenschaften hervorrufen.

Dielektrische Eigenschaften können grundsätzlich im Frequenz- und im Zeitbereich untersucht werden, wobei eine Möglichkeit der Umrechnung der Ergebnisse prinzipiell besteht. Gängige Verfahren sind z.B. die Frequency Domain Spectroscopy (FDS) [1], die Polarisations-Depolarisations-Strommessung (PDC) [2] sowie die Rückkehrspannungsmessung (RVM) [3]. Während das erstgenannte Verfahren mit Wechselspannungen unterschiedlicher Frequenzen arbeitet, erfassen die beiden letztgenannten Verfahren die **Antwort des Systems auf das Anlegen einer Gleichspannung**. Im Prüfling selbst laufen bei den letztgenannten Verfahren die gleichen Prozesse ab, bei richtiger Interpretation der Meßergebnisse müssen daher die Aussagen der beiden Verfahren gleich sein. Prinzipbedingt können bei allen dielektrischen Verfahren nur elektrische bzw. dielektrische Kenngrößen erfasst werden. Es können daher nur die physiko-chemischen Änderungen erfasst werden, die elektrische, bzw. **dielektrische Änderungen** hervorrufen.

Meßverfahren

Aus meßtechnischen Gründen eignen sich **Rückkehrspannungsmessungen** (RVM) gut zur Diagnose des dielektrischen Zustandes von Öl-Papier-Isolierungen. Die Meßergebnisse liefern verlässliche Aussagen, allerdings nur, wenn sie nach gewissen Kriterien durchgeführt und ausgewertet werden. Kommerziell werden z.Z. zwei Verfahren zur Rückkehrspannungsmessung eingesetzt. Für Transformatoren vorzugsweise das Verfahren mit der Analyse der "dominanten Zeitkonstante" [4] mit unterschiedlich langen Auflade- und Kurzschlußzeiten, für Mittelspannungskabel ein Verfahren mit langer Aufladezeit und kurzzeitigem Kurzschluß des Prüflings [5, 6].

Die Erfassung der sich nach dem Öffnen des Kurzschlusses an den Anschlußklemmen des Prüfobjektes einstellenden Rückkehrspannung erfolgt mit einem **hochohmigen Elektrometer** und führt zu Spannungsverläufen mit einem Maximum im Bereich einiger, einiger **10** oder gar mehrerer **1000** Sekunden. Soweit die objektive Meßtechnik, die i. allg. zu hinreichend reproduzierbaren Ergebnissen führt. Der wichtige und entscheidende Punkt im weiteren Diagnoseprozeß ist die subjektive Frage, welche der **Kenngrößen der Rückkehrspannungskurven** als hinsichtlich des Untersuchungsziels aussagefähig angesehen werden. Naheliegenderweise

werden hierzu ausgezeichnete Punkte der Spannungskurve benutzt wie z.B. das Maximum U_m , dessen Zeitpunkt t_m oder der Anfangsanstieg s der Kurve. Hierbei zeigt sich allerdings, daß diese Größen z.B. von der **Temperatur des Prüfobjektes** abhängen. Für den Vergleich von Messungen zu unterschiedlichen Jahreszeiten oder nach unterschiedlichen Lastzuständen des Betriebsmittels müssen folglich empirische Korrekturfaktoren eingeführt werden. Besser wäre es, wenn aus den Meßkurven Größen abgeleitet werden könnten, die - trotz geänderter Rand- und Umgebungsbedingungen - bei wiederholten Messungen gleich sind, falls zwischenzeitlich keine Alterung des geprüften Gerätes erfolgte.

Grundsätzlich sollte die Interpretation von Meßergebnissen auf Basis eines adäquaten Modells, d.h. eines die Verhältnisse **physikalisch richtig wiedergebenden Ersatzschaltbildes** des Isoliersystems erfolgen. Ein rein formaler Fit gemessener Kurven z.B. durch eine Summe mehrerer Exponentialfunktionen ist zwar immer möglich, liefert aber lediglich "formale Vergleichszahlen" ohne Bezug zu realen physikalischen Phänomenen im Prüfobjekt.

Geometrieorientierte Ersatzschaltbilder

Bei Öl-Papier-Isolierungen, wie sie z.B. in **Leistungstransformatoren**, aber auch unter einfacherer Geometrie in **Öl-Papier-Kabeln** eingesetzt sind, liegt physikalisch als Grundtyp die **Serienschaltung zweier Dielektrika** mit unterschiedlichen Eigenschaften vor. Das einfachste Ersatzschaltbild hierfür ist das **Maxwell-Ersatzschaltbild**.

In den letzten Jahren werden in der Literatur [7-9] zunehmend Ersatzschaltbilder für Leistungstransformatoren dargestellt, die den Aufbau hinsichtlich der Dielektrika richtig wiedergeben. **Abb. 1** zeigt ein Beispiel. Andererseits wird für die Auswertung, d.h. für einen Fit der Meßkurven, fast durchweg ein anderes Ersatzschaltbild benutzt, bei dem, ausgehend von Polarisations- und Depolarisationsströmen [9, 10], eine Parallelschaltung von Serien-RC-Gliedern zugrundegelegt wird (**Abb. 2**).

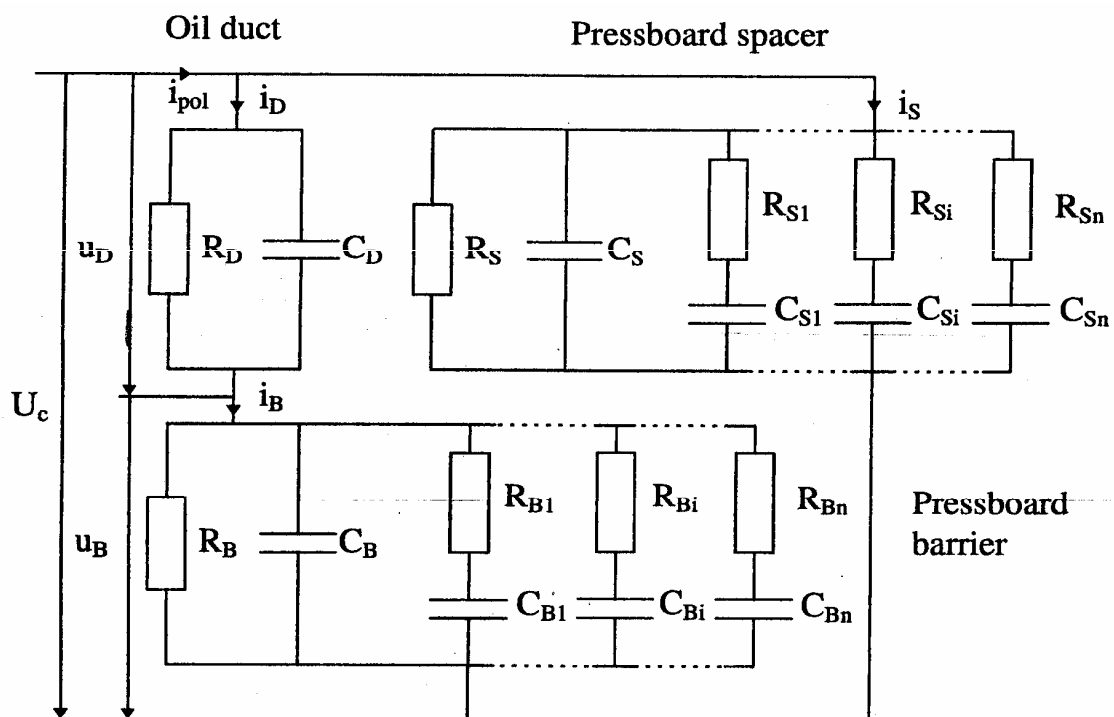


Abb. 1: Ersatzschaltbild der Hauptisolation eines Leistungstransformators (nach [9])

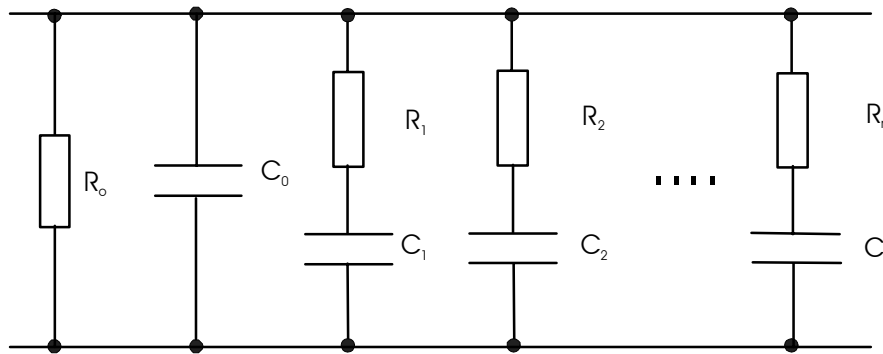


Abb. 2: Üblicherweise verwendetes formales Ersatzschaltbild zur Beschreibung von Polarisations- und Depolarisationsprozessen unter Verwendung einer Parallelschaltung von Serien-RC-Elementen

Dieser Ansatz stammt aus der Interpretation von Polarisations- und Depolarisationsströmen in **homogenen**, meist organischen **Dielektrika**. Die bei homogenen Dielektrika gefundene Zeitabhängigkeit des Depolarisationsstromes von der Zeit läßt sich meist gemäß $I \sim t^m$ beschreiben, wobei $m \leq 1$ gilt [11]. Die Ursache hierfür sind meist **Raumladungsprozesse** mit Auf- und Abbaueiten im Bereich von Minuten oder Stunden.

Die Annahme atomarer oder molekularer Polarisations-, Depolarisations- oder Orientierungsprozesse als Ursache für Phänomene im Langzeitbereich entspricht nicht den physikalischen Realitäten, da molekulare Prozesse in der Regel im Zeitbereich weit unterhalb einer Sekunde ablaufen.

Effekte im Bereich von Sekunden oder darüber können entweder durch **Raumladungsprozesse** entstehen, d.h. dem Auf- bzw. Abbau ortsfester Raumladungen, z.B. in Haftstellen, oder aber – speziell im Falle der Serienschaltung unterschiedlicher Dielektrika - durch **Grenzflächenpolarisation** auftreten. Letzteres trifft für den Fall der Öl-Papier-Isolierungen zu und sollte folglich bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Ein Ersatzschaltbild auf Basis atomarer oder molekularer Orientierungspolarisation kann keine physikalisch relevanten Kennwerte liefern, sondern nur formale Beschreibungsgrößen, die zudem häufig in nicht direkt nachvollziehbarer Art und Weise z.B. von den experimentellen Rand- und Umgebungsbedingungen abhängen.

Serienschaltung zweier Dielektrika

Ein physikalisch adäquates Ersatzschaltbild für die Vorgänge in geschichteten Dielektrika ist das sogenannte **Maxwell-Modell (Abb. 3)**, das im einfachsten Falle aus einer Serienschaltung zweier RC-Parallel-Schaltungen besteht. Dieses entspricht im Prinzip genau den wesentlichen Komponenten R_D , C_D , R_B und C_B des oft diskutierten Ersatzschaltbildes einer **Öl-Papier-Isolierung in Transformatoren** (siehe Abb. 1). Die in diesem Ersatzschaltbild gezeigten Elemente R_S und C_S führen im Falle der Rückkehrspannungsmessungen nur zu einer Vergrößerung der Gesamtkapazität und nicht zu einer relevanten Beeinflussung des Kurvenverlaufs. Für eine physikalisch sinnvolle Diskussion der Meßergebnisse ist es hilfreich, den Einfluß **physikalisch sinnvoller Einzelelemente** des Ersatzschaltbildes auf die aus dem Kurvenverlauf ableitbaren Kenngrößen zu kennen.

Für ein Maxwell-Ersatzschaltbild ist es möglich, bei ausreichend großem Meßwiderstand R_m den Verlauf der Rückkehrspannungskurve in Abhängigkeit der physikalischen Größen C_1 , C_2 , R_1 und R_2 anzugeben [12, 13]. Dies ist analytisch möglich, falls der durch den Meßwi-

derstand fließende Strom gegenüber den Ausgleichsströmen in den RC-Elementen vernachlässigbar ist. Andernfalls verkompliziert der Meßwiderstand \mathbf{R}_m (ebenso wie im Prüfling oder im Gesamtkreis vorhandene **parasitäre Widerstände**, z.B. \mathbf{R}_s in Abb. 1) über eine Kopplung der Ausgleichsströme gegebenenfalls die Verhältnisse. Auf diesen Einfluß soll hier nicht eingegangen werden, obwohl die genauere Analyse der Rückkehrspannungskurven unter Einbeziehung dieses Einflusses weitere Rückschlüsse auf das untersuchte Objekt erlaubt.

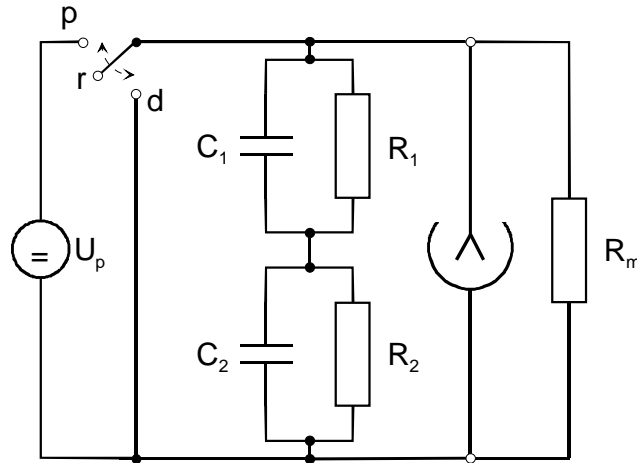


Abb. 3: Ersatzschaltbild eines Öl-Papier-Dielektrikums gemäß dem Maxwell-Modell und prinzipielle Beschaltung bei einer Rückkehrspannungsmessung

Für den Verlauf der Rückkehrspannungskurven (ohne Berücksichtigung des Einflusses von \mathbf{R}_m sowie anderer parasitärer Widerstände) sowie die angesprochenen Kenngrößen ergeben sich nachfolgende Beziehungen:

$$U_r(t) = U_s \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad \text{mit} \quad \tau_1 = R_1 C_1 \quad , \quad \tau_2 = R_2 C_2 \quad \text{und} \quad \lambda = \tau_2 / \tau_1$$

$$U_s = \frac{\lambda - 1}{1 + \lambda + \frac{R_2}{R_1} + \frac{C_2}{C_1}} U_p \left(1 - e^{-t_p / \tau} \right) e^{-t_d / \tau} \quad \text{mit} \quad \tau = \frac{\tau_2 R_1 + \tau_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Für die ausgewählten Kenngrößen ergibt sich

$$U_m = U_s \left(\lambda^{1/(1-\lambda)} - \lambda^{\lambda/(1-\lambda)} \right)$$

$$s = \frac{U_s}{\tau_1} \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda} \right)$$

$$\frac{U_m}{s} = \tau_1 \left(\frac{\lambda}{\lambda - 1} \right) \left(\lambda^{1/(1-\lambda)} - \lambda^{\lambda/(1-\lambda)} \right)$$

$$t_m = \tau_1 \left(\frac{\lambda}{\lambda - 1} \right) \ln \lambda$$

$$p = \frac{U_m}{s t_m} = \frac{\lambda^{1/(1-\lambda)} - \lambda^{\lambda/(1-\lambda)}}{\ln \lambda}$$

Bei den Berechnungen zeigt sich, daß z.B. für den Quotienten U_m/s aus dem Maximum U_m der Spannung und der Anfangssteigung s der Spannungskurve von der Geometrie des Prüflings beeinflusste Größen wie C_1 , C_2 , R_1 und R_2 keine Rolle spielen, sondern daß nur eine der beiden Zeitkonstanten (o.B.d.A. τ_1) und das Verhältnis $\lambda = \tau_2/\tau_1$ der beiden Zeitkonstanten in den Wert eingehen. Auch der Zeitpunkt t_m des Maximums der Rückkehrspannung hängt nur noch von einer der beiden Zeitkonstanten und dem Verhältnis der beiden Zeitkonstanten $\lambda = \tau_2/\tau_1$ ab. Während z.B. die Höhe U_m des Spannungsmaximums von der Temperatur des Prüfobjektes bei der Messung abhängt, sind nur von λ abhängige Größen weitgehend temperaturunabhängig [12] und bedürfen daher keiner Korrekturannahmen.

Aus dem Zusammenhang zwischen U_m/s und t_m läßt sich auch ein Quotient bilden, der als **p-Faktor** in der Literatur eingeführt wurde [13]. Der Zahlenwert von **p** hängt nur vom Verhältnis der beiden Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 ab, nicht aber von den Zeitkonstanten selber und auch nicht von den physikalischen Einzelwerten C_1 , C_2 , R_1 und R_2 des Ersatzschaltbildes. Aus physikalischen Gründen (vergleichbare Temperaturabhängigkeit der beiden Dielektrika) ergibt sich eine weitgehende Unabhängigkeit des **p-Faktors** von der Prüflingstemperatur, die z.B. die Höhe des Spannungsmaximums U_m oder den Anfangsanstieg s beeinflusst [12]. Trägt man die Werte von U_m/s über t_m auf, so zeigt sich, daß die Werte für ein Prüfobjekt (unabhängig von der verwendeten Polarisationsspannung oder dem Meßzeitpunkt) auf einer stetigen, monoton ansteigenden Kurve liegen.

Einfluss der Feuchtigkeit im Papier auf berechnete Rückkehrspannungskurven von Transformatormodellen

Mit geeigneten Simulationsprogrammen läßt sich das dielektrische Verhalten von Isolieranordnungen berechnen. **Tabelle 1** zeigt die Ergebnisse von Modellrechnungen von Rückkehrspannungskurven für ein Transformatormodell mit unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt in der Papierisolierung mit 1000 s Polarisations- und 500 s Depolarisationszeit [nach 9], sowie daraus abgeleitete Werte des **p-Faktors**. Man erkennt deutlich dessen Zunahme mit steigender Feuchtigkeit, während andere Parameter kein monotonen Verhalten aufweisen.

	Prüfling	U_m in % von U_p	t_m in s	s in % von U_p pro s	U_m/s in s	p
A	m.c. 0,2 % $\sigma_0 = 1,39 \cdot 10^{-16}$ S/m	19,1	21286,0	0,0128	1492,2	0,070
B	m.c. 0,2 % $\sigma_1 = 3 \sigma_0$	17,4	14813,0	0,0128	1359,4	0,092
C	m.c. 0,2 % $\sigma_2 = 6 \sigma_0$	15,8	11045,0	0,0128	1234,4	0,112
D	m.c. 1,0 %	52	5243,6	0,0693	750,4	0,143
E	m.c. 2,5 %	122,9	1526,7	0,4723	260,1	0,170

Tabelle 1: Werte berechneter Rückkehrspannungskurven für ein Trafomodell (nach [9]), sowie abgeleitete Größen U_m/s und **p**

Abb. 4 zeigt die Darstellung der aus den Rechenergebnissen abgeleiteten Größen U_m/s und t_m . Der Einfluß der Feuchtigkeit auf diese Kenngrößen ist deutlich erkennbar. Aus dem Zusammenhang zwischen U_m/s über t_m lassen sich gemäß dem Maxwell-Modell auch die beiden Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 der beiden Dielektrika berechnen, die eine direkte Aussage über die dielektrischen Eigenschaften bzw. den Feuchtigkeitsgehalt der beiden Isolierkomponenten Öl und Papier oder Hartpapier ergeben. **Abb. 5** zeigt die gemäß den aus dem Maxwell-Modell

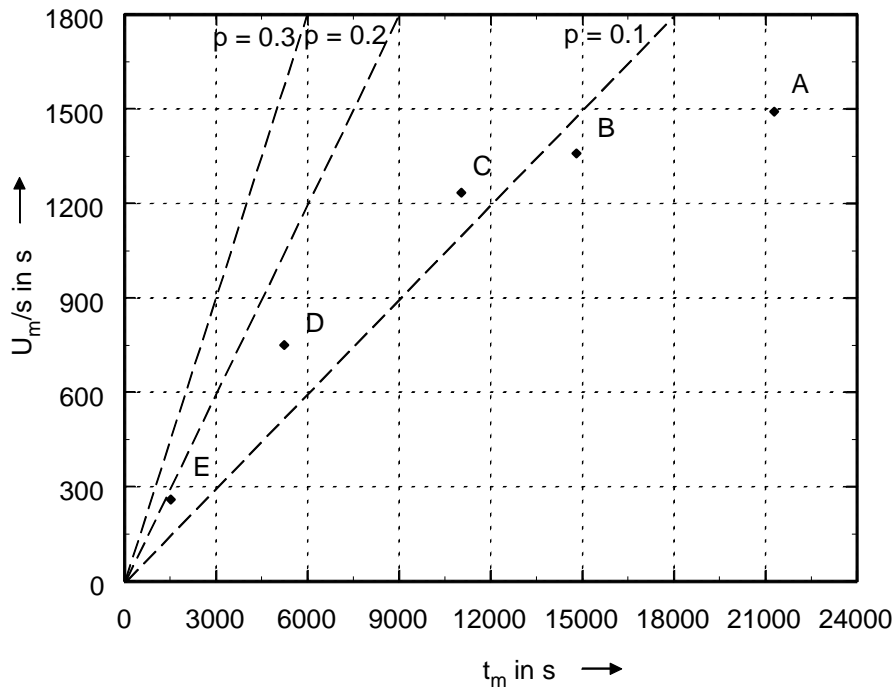


Abb. 4: Werte aus berechneten Rückkehrspannungskurven an 2 mm Trafo-Pressboard für unterschiedliche angenommene Wassergehalte für $U_p = 1$ V, $t_p = 1000$ s, $t_d = 500$ s (siehe Tab. 1)

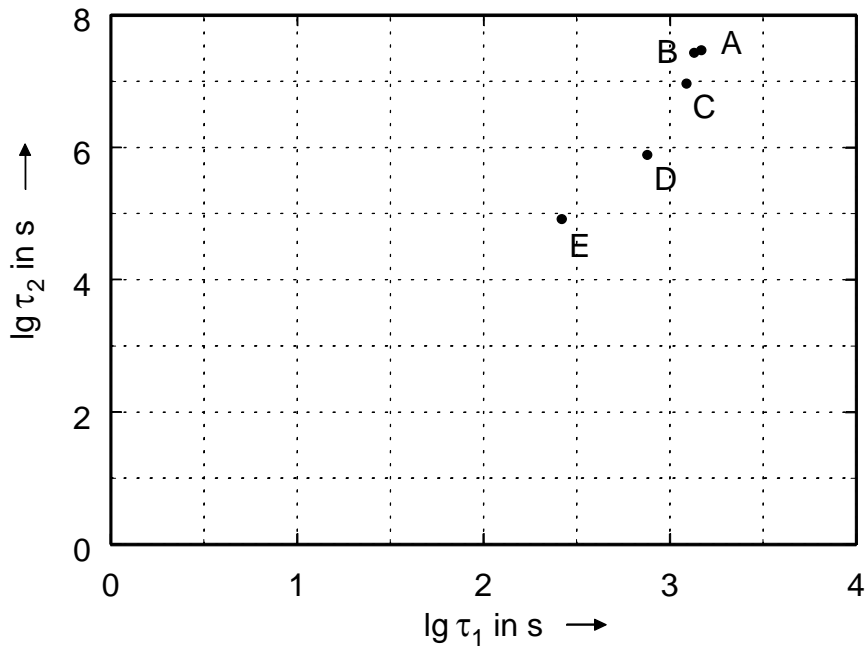


Abb. 5: Aus den Werten in Abb. 4 bzw. Tab. 1 errechnete Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 für unterschiedliche Wassergehalte

hergeleiteten Zusammenhängen aus den Werten U_m/s und t_m berechneten Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 . Auch bei diesen Darstellungen zeigt sich deutlich der Einfluß der Feuchtigkeit sowie der Leitfähigkeit des Papiers in der Isolierung. Geht man von Meßwerten aus, so läßt sich aus den berechneten Zeitkonstanten, oder aus deren Änderung bei Wiederholungsmessungen, auf den Feuchtegehalt der Isolierung oder dessen Änderung schließen.

Alterungsnachweis von Isolierungen

Der primäre Alterungseffekt bei Öl-Papier-Isolierungen besteht in einer **Depolymerisation** der Zellulose. Dabei entsteht Wasser, das im Papier erhalten bleibt bzw. gemäß den unterschiedlichen Löslichkeiten in das Öl übergeht. Das **Wasser** ändert die dielektrischen Eigenschaften des Papiers, d.h. speziell dessen **spezifische Leitfähigkeit**. Damit ergibt sich eine Änderung der dem Papier zugeordneten Zeitkonstanten (o.B.d.A. τ_2) und auch des Quotienten λ sowie der dadurch bestimmten Kenngröße **p-Faktor**. Die **Abbn. 6** und **7** zeigen die Darstellungen von U_m/s über t_m von Messungen an zwei Kabeln im Abstand eines halben Jahres. Bei dem einen Kabel (GER28) ergibt sich keine Änderung des **p-Faktors**, bei dem anderen (GER6) eine Zunahme. Bei den Untersuchungen im März 2000 wurden auch die Isolationswiderstände jeder Ader gemessen. Es zeigte sich, daß sich bei den Adern, bei denen sich der **p-Faktor** verschlechtert d.h. vergrößert hatte, der Durchgangswiderstand deutlich abgenommen hatte.

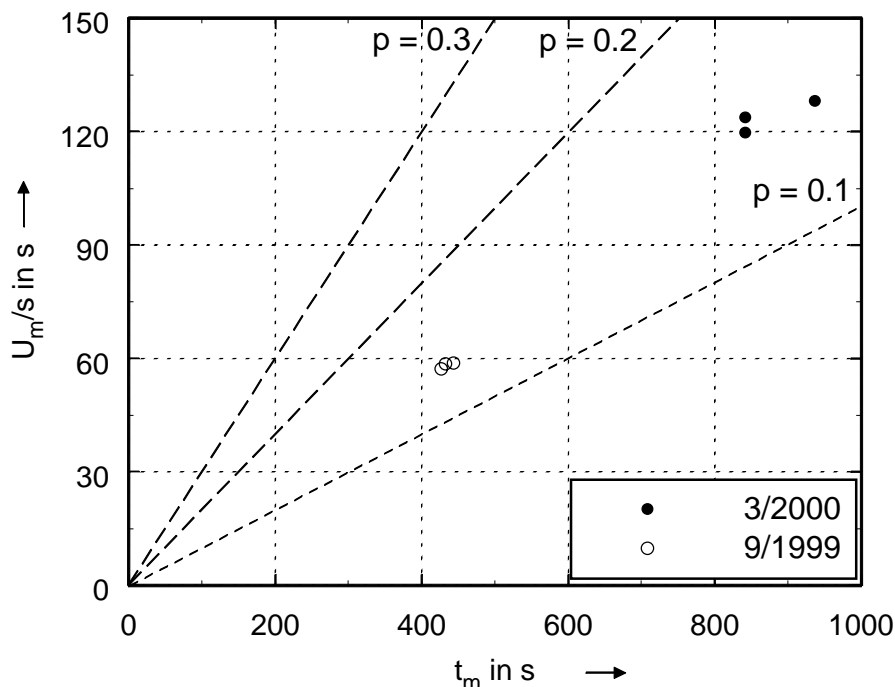


Abb. 6: Rückkehrspannungsmessungen an den Adern eines Papier-Massekabels (GER28) zu unterschiedlichen Jahreszeiten bei $U_p = 2$ kV; $t_p = 900$ s (9/99) und $U_p = 6$ kV; $t_p = 1800$ s (3/00) und $t_d = 2$ s

Zeitkonstanten im Maxwell-Ersatzschaltbild

Aus dem Zusammenhang zwischen U_m/s über t_m lassen sich bei Zugrundelegung des Maxwell Ersatzschaltbildes die beiden Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 berechnen, die eine direkte Aussage über die Qualität bzw. den Feuchtigkeitsgehalt der beiden Isolierkomponenten Öl und Papier oder Hartpapier beinhalten. Die **Abbn. 8** und **9** zeigen für die in den Abbn. 6 und 7 dargestellten Ergebnisse die zugehörigen Werte von $\lg \tau_2$ und $\lg \tau_1$.

Feuchtigkeit erhöht die spezifische Leitfähigkeit von Öl und besonders stark die von Papier und damit die materialcharakteristische dielektrische Zeitkonstante. Damit ergibt sich eine Möglichkeit aus der **Abnahme der Zeitkonstanten** im Laufe der Zeit eine Alterung, d.h. präzise gesprochen, eine **Zunahme des Wassergehaltes** in den Dielektrika festzustellen.

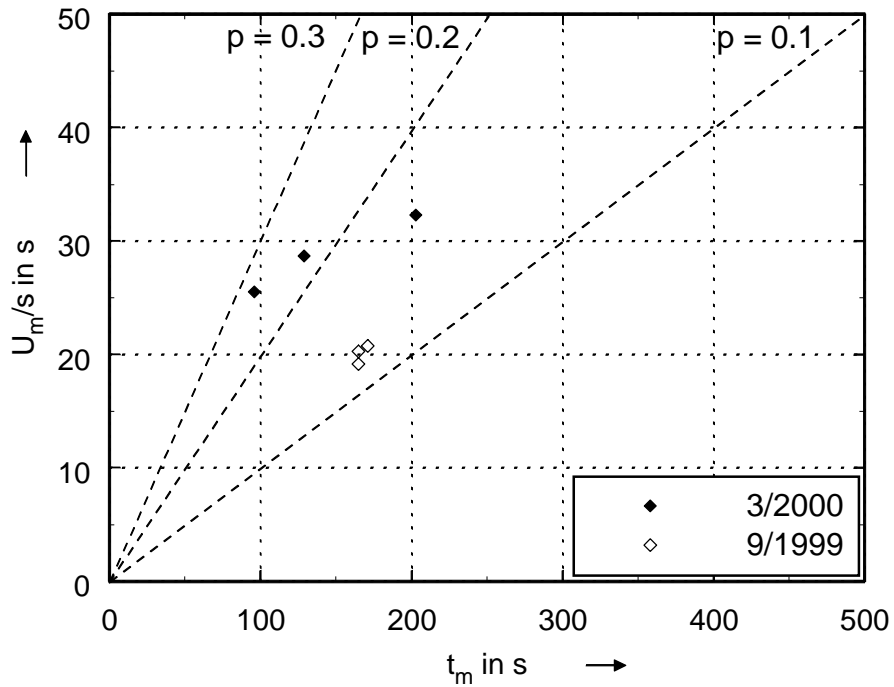


Abb. 7: Rückkehrspannungsmessungen an den Adern eines Papier-Massekabels (GER6) zu unterschiedlichen Jahreszeiten bei $U_p = 2$ kV; $t_p = 900$ s (9/99) und $t_p = 1800$ s (3/00) und $t_d = 2$ s

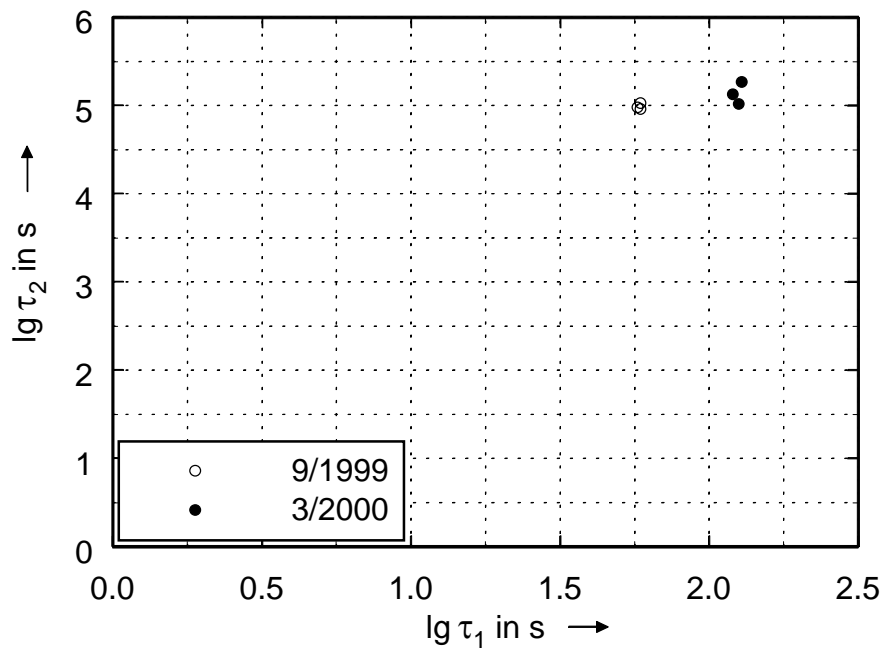


Abb. 8: Aus den Werten in Abbildung 6 errechnete Zeitkonstanten

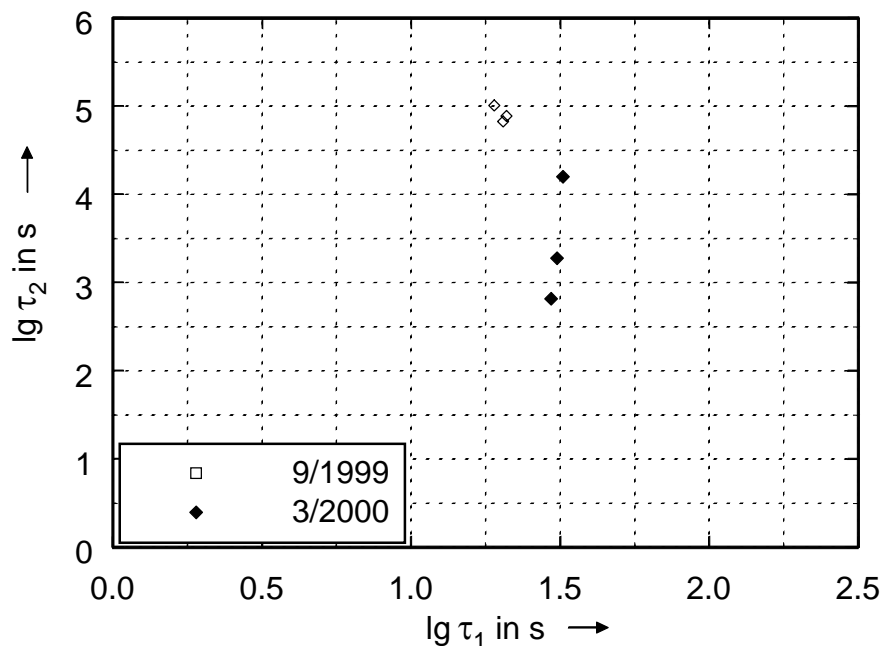


Abb. 9: Aus den Werten in Abbildung 7 errechnete Zeitkonstanten

Einfluß des Meßwiderstandes

Der einheitliche Kurvenverlauf von Diagrammen U_m/s über t_m tritt auch dann noch auf, wenn der gleiche Prüfling mit unterschiedlichen Meßwerten R_m gemessen wird. **Abb. 10** zeigt zur Demonstration die Ergebnisse von Rückkehrspannungsmessungen mit unterschiedlichen Meßwiderständen R_m an einem Öl-Papier-Kabel. Die Lage der jeweiligen Meßpunkte hängt hierbei von R_m ab, desgleichen auch der sich ergebende **p-Faktor**. Kleinere Meßwiderstände führen dabei zu höheren **p**-Faktoren.

Aus den in **Abb. 10** gezeigten Werten lassen sich auch die zugrundeliegenden Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 berechnen. **Abb. 11** zeigt die entsprechenden Werte. Es zeigt sich, daß der Meßwiderstand R_m den berechneten Wert für τ_2 , aber nicht den Wert für τ_1 beeinflusst.

Wiederholungsmessungen an diesem Kabel im Zeitraum von 2 Jahren zeigten, daß sich – infolge geänderter Umgebungstemperaturen – zwar unterschiedliche Rückkehrspannungskurven, aber ungeänderte **p**-Faktoren ergaben, daß also keine Alterung des Kabels aufgetreten war. Mit Hilfe von Diagrammen U_m/s über t_m sowie den Korrelationsdarstellungen der daraus berechenbaren Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 der Dielektrika lassen sich Änderungen in der Isolierung von Öl-Papier-Kabeln zuverlässig nachweisen.

Zusammenfassung

Rückkehrspannungsmessungen an energietechnischen Geräten mit Öl-Papier-Isolierung ermöglichen bei Auswahl geeigneter aus dem Kurvenverlauf abgeleiteter Parameter diagnostische Aussagen über den Zustand der Isolierung. Durch Interpretation der gemessenen Kurven auf der Basis eines die Verhältnisse physikalisch korrekt beschreibenden Modells (Maxwell-Ersatzschaltbild) lassen sich die Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 der Dielektrika berechnen und aus ihrer Änderung im Laufe des Betriebes Aussagen über eine Alterung gewinnen.

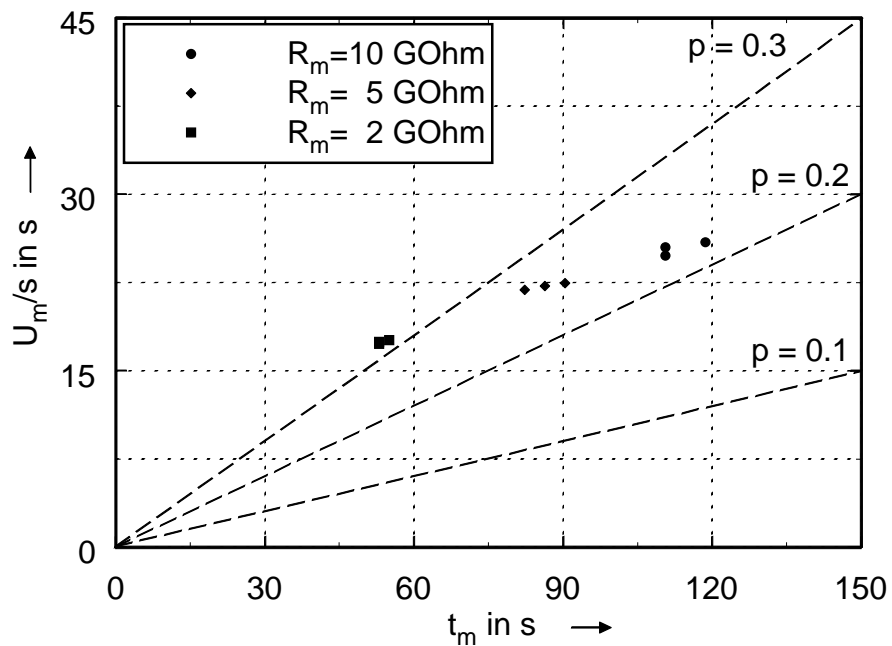


Abb. 10: Rückkehrspannungsmessungen an einem Papier-Massekabel (S2) mit unterschiedlichen Meßwiderständen bei $U_p = 2$ kV; $t_p = 900$ s und $t_d = 2$ s

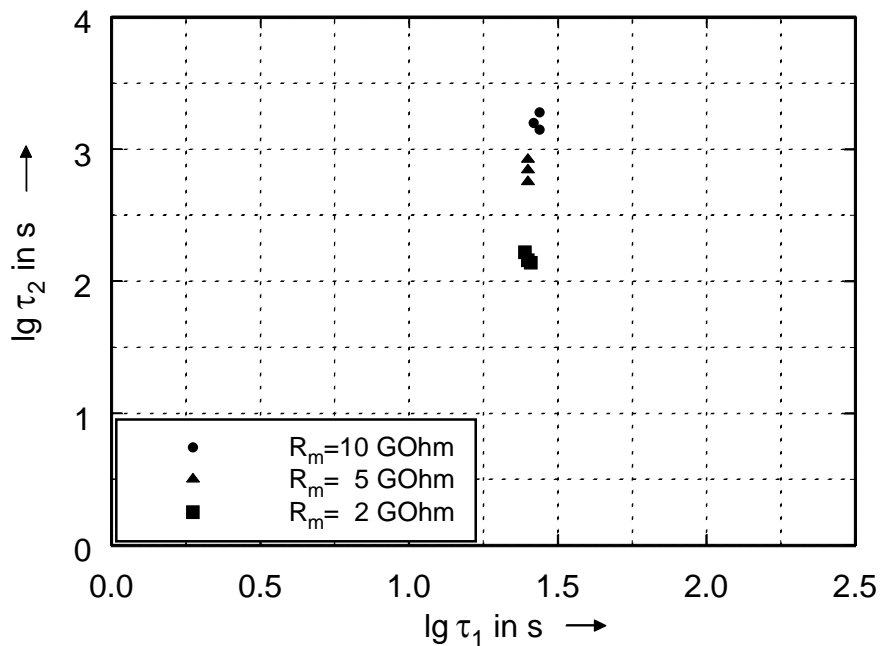


Abb. 11: Aus den Werten in Abbildung 10 errechnete Zeitkonstanten

Literatur

- [1] Gunkel, G.: Determination of Moisture Content in Oil Paper Insulation Systems of Power Transformers using Frequency Domain Spectroscopy. **IWK'03**, Ilmenau, Deutschland, (2003), 468-9
- [2] Küchler, A.; Leibfried, T., Breitenbach, B.; Alff, J.J.; der Houhanessian, V.; Zaengl, W.S.: Transformer Insulation Diagnosis by Polarization and Depolarization Current Analysis. **IWK'03**, Ilmenau, Deutschland, (2003), 470-1

- [3] Gubanski, S.M.; Kvarngren, M.; Stec, C.: Return Voltage Characteristics of Oil-Paper insulated HVDC Cables. **ISH'93**, Yokohama, Japan, (1993), 189-92
- [4] Urbani, G.M.; Brooks, R.S.: Using the Recovery Voltage Method to evaluate Aging in Oil-Paper Insulation. **ICSD'98**, Västerås, Sweden, (1998), 93-7
- [5] Beigert, M.; Kamenka, D.; Kouzmine, O.: Dielektrische Alterungsdiagnose an Öl-Papier-Isolierungen. *EVU-Betriebspraxis*, **10**, (2000), 22-30
- [6] Kouzmine, O.; Patsch, R.: Analyse und Auswahl von Meß- und Diagnoseparametern bei Rückkehrspannungsmessungen an Mittelspannungskabeln mit unterschiedlichen Isolierungen. *ETG-Fachtagung 2004, Fachbericht 97*, Köln, Deutschland, (2004), 227-32
- [7] Porzel R.: Elektrische und physikalisch/chemische Diagnoseverfahren an Hochspannungstransformatoren. Symposium „Geriatric des Transformators“, 7.-8.11.2002, Regensburg, Deutschland
- [8] Kuchler, A.; Leibfried, T.: Berücksichtigung geometrischer und parasitärer Einflüsse bei der Bestimmung des Wassergehalts in Öl-Papier Isolationen durch dielektrische Diagnose., *ETG-Fachtagung 2004, Fachbericht 97*, Köln, Deutschland, (2004), 85-90
- [9] Houhanessian, V. D.: Measurement and Analysis of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems. PhD-Thesis, ETH-Zürich, (1998)
- [10] Zaengl, W.S.: Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations. **Electrical Insulation Magazine**, **Vol.19**, No.5, (2003), 5-19
- [11] Jonscher, A.K.: The Universal Dielectric Response and its Physical Significance, *IEEE Trans. on El. Ins.*, **Vol. 27**, (1992), 407-23
- [12] Patsch, R.; Kouzmine, O.: The Influence of Climatic Conditions on the Diagnostic Results of Return Voltage Measurements. **ISEI'02**, Boston, USA, (2002), 191-4
- [13] Patsch, R.; Kouzmine, O.: p-Factor, a Meaningful Parameter for the Evaluation of Return Voltage Measurements. **CEIDP'02**, Cancun, Mexico, (2002), 906-9