

# Einfluss äußerer Grenzflächen auf die dielektrische Diagnose betriebsgealterter Hochspannungsdurchführungen

Andreas Küchler, FHWS Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt  
Frank Hüllmandel, FHWS Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt  
Konrad Böhm, FHWS Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt  
Norbert Koch, HSP Hochspannungsgeräte Porz GmbH, Köln

## Kurzfassung

Dielektrische Diagnosen an Durchführungen können vor Ort in undefinierter Weise von parasitären Strömen beeinflusst werden, die über äußere Grenzflächen Zutritt zu den Steuerbelägen finden. U.U. sind Verlustfaktoren sowie Polarisations- und Depolarisationsströme (PDC) scheinbar erhöht oder erniedrigt, bis hin zur Polaritätsumkehr. Es wird deshalb untersucht, inwieweit dielektrische Messungen auf die Eigenschaften des Hauptdielektrikums bezogen werden dürfen. Hierzu werden Messungen an Durchführungen mit Simulationsrechnungen auf der Basis einer räumlichen Diskretisierung und auf der Basis gemessener Materialparameter verglichen. Dabei zeigt sich, dass eine Empfindlichkeit gegen Umgebungseinflüsse auch bei betriebsfrequenten Verlustfaktoren vorhanden ist, allerdings schwächer ausgeprägt als bei langsam veränderlichen PDC-Strömen. Es wird vorgeschlagen, durch Messungen ohne und mit leitfähigen Bandagen an Hochspannungs- bzw. Erdpotential Grenzen (Worst-Case-Szenarien) zu ermitteln, mit der eigentlichen Diagnosemessung zu vergleichen und eine Schätzung für die Eigenschaften des Hauptdielektrikums abzuleiten. Durch dieses Vorgehen konnten kritisch gealterte Öl-Papier-Transformator-Durchführungen durch PDC-Analyse erkannt werden, obwohl der 50 Hz-Verlustfaktor bei Raumtemperatur noch keine entsprechenden Indikationen lieferte. Damit ergeben sich neue Möglichkeiten für die Bewertung von Durchführungsisolierungen im eingebauten Zustand vor Ort und bei Umgebungstemperatur.

## 1 Einführung

Dielektrische Messungen von Kapazitäten, Verlustfaktoren sowie Polarisations- und Depolarisationsströmen (PDC) können an den Messanschlüssen von Durchführungen auch im eingebauten Zustand vor Ort, z.B. auf dem Transformator erfolgen. Sie sollen der Erkennung von *Teildurchschlägen* sowie der Beurteilung von *Alterungszustand*, thermischer *Stabilität* und *Befeuchtung* des Hauptdielektrikums dienen.

Es hat sich jedoch gezeigt, dass dielektrische Messungen teilweise verfälscht sein können. Erkennbar ist dies im Frequenzbereich an scheinbar negativen Verlustfaktoren [1] und im Zeitbereich an PDC-Strömen mit Polaritätsumkehr [2]. Hierbei handelt es sich offensichtlich um eine Verfälschung von Messergebnissen durch *Umgebungseinflüsse* in Form von parasitären Strömen, da das Dielektrikum nicht als elektrische Energiequelle angesehen werden kann. Auch in weniger extremen Fällen kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine undefinierte und unerkannte Veränderung der Messgrößen eintritt (Kap. 2).

Der Beitrag untersucht mit Hilfe von Simulationen und Messungen (Kap. 3 u. 4) unter welchen Bedingungen dielektrische Messungen auf die Eigenschaften des *Hauptdielektrikums* und auf den *Alterungszustand* bezogen (Kap. 5 u. 6) werden dürfen.

## 2 Umgebungseinflüsse

Ein Verständnis der parasitären Umgebungseinflüsse ergibt sich aus der Diskussion vereinfachter Ersatzschaltbilder im Frequenz- bzw. Zeitbereich, **Bild 1** bzw. **2**. Die Hauptisolation der Durchführung zwischen Leiter und Erdbelag wird dabei als Reihenschaltung zweier Teilkapazitäten  $C_a$  und  $C_b$  aufgefasst. Ein Widerstand  $R$  bildet den angenommenen *leitfähigen Pfad* mit Zutritt zu den Steuerbelagskanten nach. Erfolgt der Zugriff des leitfähigen Pfades in der Mitte der Steuerstrecke, so sind die Teilkapazitäten gleich groß. Bei dielektrischen Messungen im Frequenz- bzw. Zeitbereich wird am Messanschluss der Durchführung nur der Strom  $I_b$  bzw.  $i_b(t)$  erfasst.

Bei einem **leitfähigen Pfad zur Erdseite** ergibt die Analyse im *Frequenzbereich* einen scheinbar negativen Verlustfaktor [1], Bild 1 links, weil die Phasenverschiebung zwischen dem gemessenen Strom  $I_b$  und der treibenden Spannung  $\underline{U}$  größer als  $90^\circ$  werden kann:

$$\tan \delta = - \frac{1}{\omega (C_a + C_b) \cdot R} \quad (1)$$

Dabei ist der Verlustfaktor nur *scheinbar* negativ, weil die nicht zusammengehörenden Größen  $I_b$  und  $\underline{U}$  verglichen werden, für den Gesamtstrom  $\underline{I}$  ergäbe sich ein physikalisch sinnvoller positiver Wert.

Bei Materialien mit positivem Verlustfaktor ergibt Gl. (1) denjenigen Wert  $\Delta \tan \delta$ , um den der Verlustfaktor *gesenkt* wird. Gl. (1) beschreibt somit einen **Messfehler** mit verlustfaktorsenkender Wirkung. Er verschwindet für einen Zugriff in der Nähe des Erdbelages ( $C_b$  wird sehr groß) bzw. in der Nähe der Spannungsseite ( $C_a$  wird sehr groß) und wird in der Mitte der Steuerstrecke maximal ( $C_a = C_b = 2 C_1$ ). Beispielsweise wäre für eine Durchführungskapazität von  $C_1 = 400 \text{ pF}$  bei  $f = 50 \text{ Hz}$  ein Widerstand  $R < 2 \text{ G}\Omega$  erforderlich, um den Verlustfaktor um 1 % abzusenken. Bei niedrigeren Frequenzen würde die Verlustfaktormessung noch empfindlicher auf leitfähige Pfade reagieren.

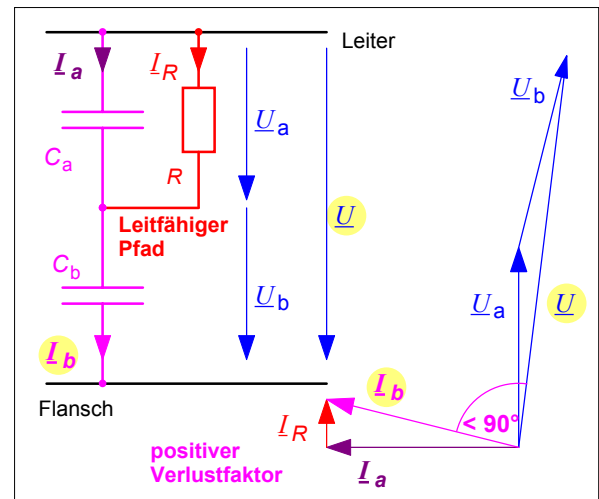
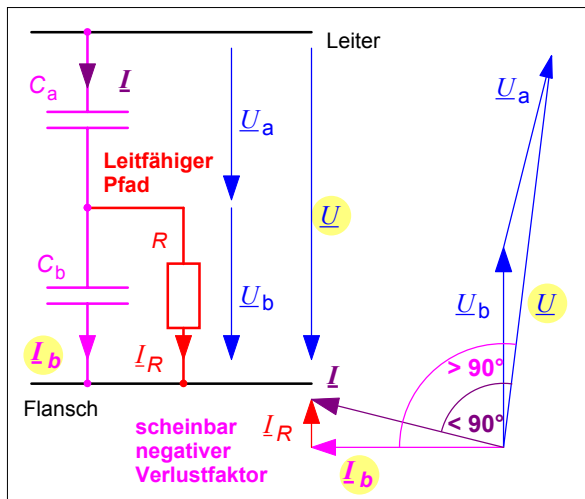
Bei der Analyse im *Zeitbereich* wird ein erweitertes Ersatzbild verwendet, das parallel zu  $C_a$  und  $C_b$  noch Polarisationsvorgänge und Leitfähigkeit berücksichtigt, Bild 2 (links). Nach dem Zuschalten der sprung-

förmigen Diagnosespannung ergibt sich ein positiver Stromimpuls  $i_b$  der die Kapazitäten  $C_a$  und  $C_b$  lädt. Danach fließen weiterhin positive Polarisationsströme zur Aufladung der zusätzlichen RC-Glieder. Der überlagerte Entladestrom  $i_R$  führt zu einer Absenkung des gemessenen Stromes  $i_b$  bis zu einer *ersten Polaritätsumkehr*. Aufgrund der Leitfähigkeit des Dielektrikums muss sich letztlich aber ein positiver Endwert für  $i_b$  und damit eine *zweite Polaritätsumkehr* einstellen.

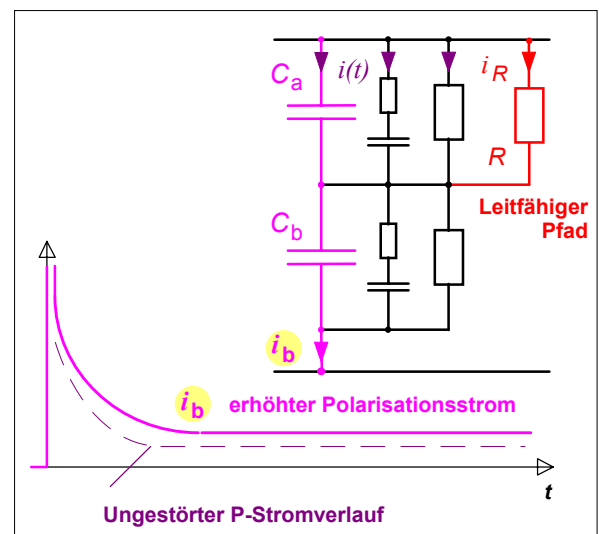
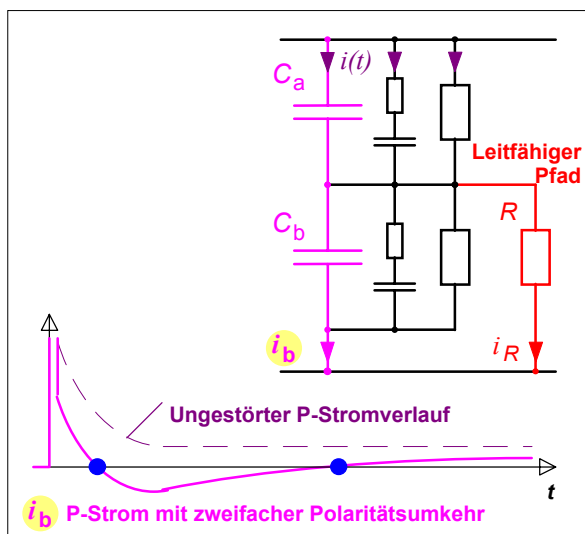
Auch ein **leitfähiger Pfad zur Hochspannungsseite** ergibt in analoger Weise einen **Messfehler**, im *Frequenzbereich* einen scheinbar um

$$\Delta \tan \delta = + \frac{1}{\omega(C_a + C_b) \cdot R} \cdot \frac{C_b}{C_a} \quad (2)$$

erhöhten Verlustfaktor und im *Zeitbereich* einen erhöhten Polarisationsstrom  $i_b(t)$ , Bild 1 u. 2 (rechts).



**Bild 1** Leitfähiger Pfad zwischen den Steuerbelägen einer Durchführung und der Erd- bzw. Hochspannungsseite (links bzw. rechts) mit Erniedrigung bzw. Erhöhung des scheinbaren Verlustfaktors (Frequenzbereich).



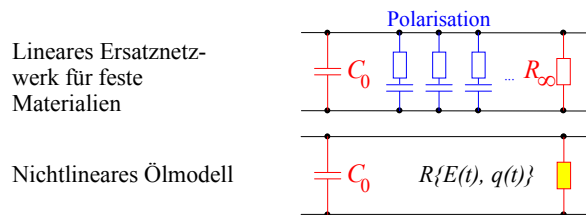
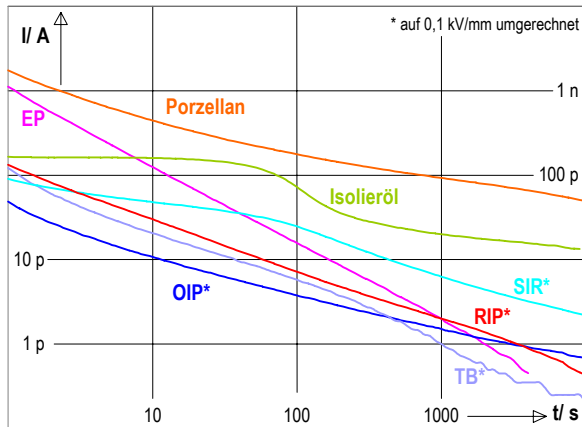
**Bild 2** Leitfähiger Pfad zwischen den Steuerbelägen einer Durchführung und der Erd- bzw. Hochspannungsseite (links bzw. rechts) mit Erniedrigung bzw. Erhöhung des Polarisationsstroms (Zeitbereich). Für das Durchführungsdielektrikum wird hier ein erweitertes Materialersatzschaltbild eingesetzt, vgl. Bild 1.

### 3 Modellbildung

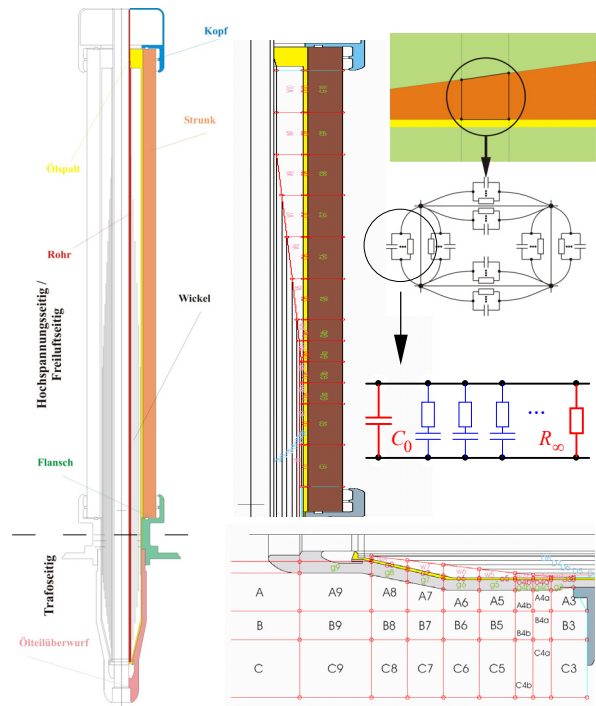
An den relevanten Isolationsmaterialien wurden **dielektrische Systemantworten** bestimmt, um Ersatzbilder für die numerische Simulation von Durchführungen abzuleiten, **Bild 3**. Hierfür dienten Messungen, die in anderem Zusammenhang an aufbereiteten, ebenen Originalproben in ebener Schutzringanordnung aus Edelstahl Elektroden unter Isolieröl erfolgten [3], [4]. Dabei wurde ein weites Parameterbereich ( $E = 0,1$  bis  $30$  kV/mm,  $T = -10$  bis  $90$  °C) untersucht. Aufnahme und Analyse der Systemantworten erfolgte mit einem PDC-Analyser und mit stabilisierten Spannungsquellen [5], Bild 3 (oben).

Es ergab sich, dass **festen Isolationsmaterialien** in erster Näherung mit linearen Ersatznetzwerken beschrieben werden dürfen, Bild 3 (mittig). Sie zeigen allerdings bei Raumtemperatur über lange Zeit hinweg eine erhebliche Polarisierbarkeit, die sich in langandauernden Polarisations- und Depolarisationsströmen äußert. Dies muss durch eine Reihe von RC-Gliedern berücksichtigt werden, ein Ersatzbild aus 50 Hz-Kapazität  $C_0$  und stationärem Gleichstromwiderstand  $R_\infty$  ist *nicht* ausreichend [3]. Vollständige Ersatzbilder können im Rahmen einer PDC-Analyse durch Kurvenfitting mit Exponentialfunktionen ermittelt werden [5].

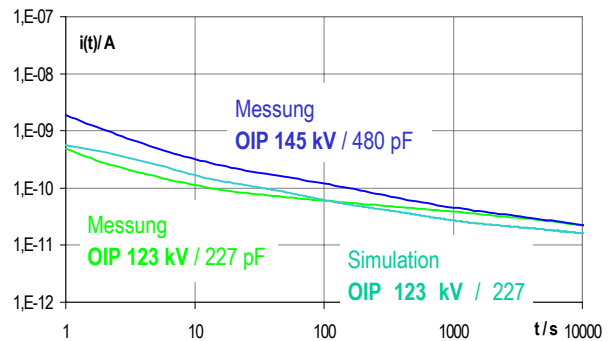
**Isolieröl** zeigt ein stark nichtlineares dynamisches Verhalten, weil anfänglich vorhandene Ionen in einer feldstärke- und geometrieabhängigen Transitzeit abgesaugt werden. Dies kann mit linearen Ersatzbildern nicht beschrieben werden. Es wurde deshalb ein neu-



**Bild 3** Dielektrische Systemantworten verschiedener Isolationswerkstoffe bei  $E = 0,1$  kV/mm und Raumtemperatur (oben) sowie Modellbildung für lineare und nichtlineare Materialien (unten).



**Bild 4** 123 kV Transformator durchführung mit ölprägniertem (OIP-) Wickel (links), mit räumlicher Diskretisierung (mittig u. unten) sowie mit Zuordnung von materialspezifischen Ersatzbildern (rechts).



**Bild 5** Vergleich zwischen Messung und Simulation an OIP-Transformator durchführungen.

es „**Ölmodell**“ entwickelt, das den physikalischen Prozess der Ionendrift durch funktionale Zusammenhänge beschreibt [6], [3], Bild 3 (unten).

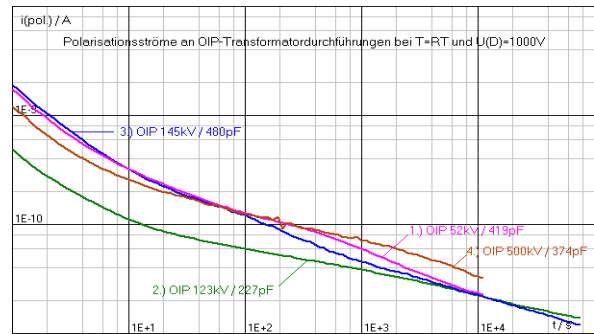
Für die **Simulation realer Durchführungen** wurde das Schnittbild einer 123 kV-OIP-Transformator durchführung in rechteckige und trapezförmige Bereiche zerlegt, **Bild 4**. Die so definierten Knoten wurden mit den aus Messungen gebildeten linearen und nichtlinearen Materialmodellen räumlich vernetzt.

Ein Vergleich zwischen *gemessenen* und *simulierten* Polarisationsströmen ergibt eine ausreichende Übereinstimmung, wenn die unterschiedlichen Kapazitäten der 123- und der 145-kV-Durchführungen und ein möglicherweise leicht erhöhter Feuchtigkeitsgehalt in der gemessenen 123 kV-Durchführung berücksichtigt werden, **Bild 5**.

## 4 Äußere Einflüsse

Zunächst wurden an sauberen und thermisch nicht gealterten OIP-Durchführungen PDC-Messungen vorgenommen, **Bild 6**. Als Referenz sind die neuwertigen Objekte 1 und 3 (52 und 145 kV) anzusehen. Interessant ist dabei, dass die Ströme selbst für weit auseinander liegende Spannungsebenen weitgehend deckungsgleich sind. Dies gilt auch für Durchführung 2 (123 kV) im Anfangsbereich der Kurve, wenn beachtet wird, dass ihre Kapazität nur halb so groß ist wie die der anderen. Für lange Zeiten ist der Strom der 123 kV-Durchführung angesichts ihrer geringen Kapazität allerdings etwa um den Faktor zwei zu groß, was möglicherweise auf erhöhte Befeuchtung zurückzuführen sein könnte. Eine ähnliche Folgerung wurde bereits durch den Vergleich zwischen Messung und Simulation gezogen, Bild 5. Messungen der Ölfeuchte bei 70 °C legen nahe, dass der Feuchtigkeitsgehalt des OIP während der zehnjährigen Lagerung im Freien geringfügig auf ca. 1 % gestiegen sein könnte. Auch Durchführung Nr. 4 (500 kV) zeigt leicht erhöhte Endwerte, sie ist ca. 20 Jahre alt und als Prüfdurchführung nur mäßig gealtert.

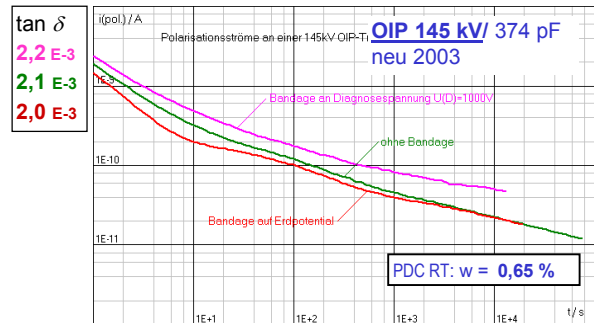
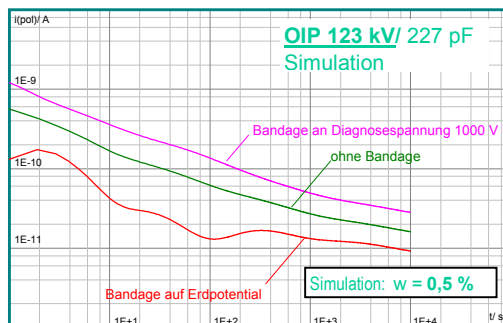
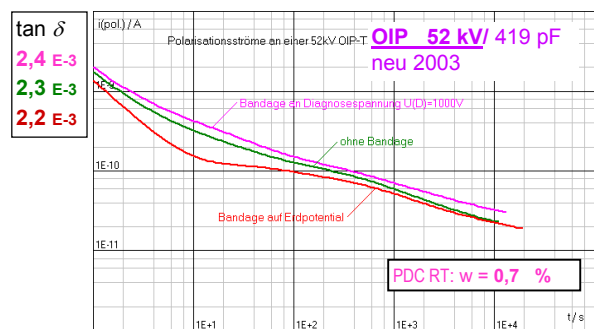
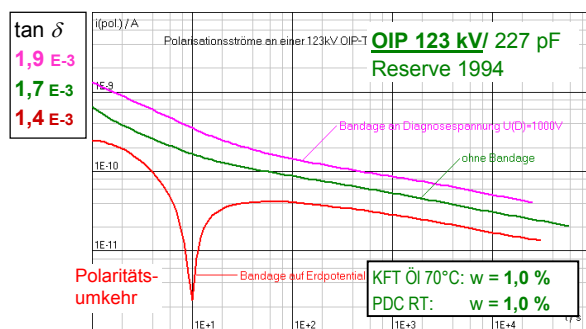
Um die Wirkung **äußerer Einflüsse** durch Oberflächenbeläge zu erfassen, wurden die in Bild 2 angenommenen **worst-case-Szenarien** mit leitfähigen Pfaden zur Erd- und Hochspannungsseite durch **leitfähige Bandagen** in der Mitte der freiluftseitigen Steuerstrecke nachgestellt, **Bild 7** (oben l.u.r. sowie unten r.), und mit Simulationen verglichen (u.l.). Sowohl Messungen als auch Simulationen zeigen die erwarteten Absenkungen und Erhöhungen der **Polarisationsströme**



**Bild 6** Polarisationsmessungen an OIP-Durchführungen von 52 bis 500 kV.

me. Bei der 123 kV-Durchführung besteht offenbar eine erhöhte Empfindlichkeit gegen Umgebungseinflüsse, es tritt sogar eine Polaritätsumkehr, Bild 7 (o.l.). Hierfür könnte die mit 227 pF vergleichsweise kleine Kapazität der Durchführung sowie ein durch Befeuchtung verminderter radialer Widerstand der Decklagenisolation verantwortlich sein. Die *simulierten Verläufe* zeigen die gleiche relative Lage zueinander wie in der Messung, Bild 7 (l. u. und o.). Abweichungen können durch die höherohmige Materialien in der Simulation erklärt werden.

Ein vergleichbares Bild ergibt sich auch bei Betrachtung der netzfrequenten **Verlustfaktoren**, Bild 7. Durch leitfähige Pfade zur Erd- und Hochspannungsseite zeigen sich in Übereinstimmung mit Gl. (1) und (2) Absenkungen und Erhöhungen des  $\tan \delta$ , allerdings in kaum noch detektierbarem Maße. Auch hier zeigt die 123 kV-Durchführung in Übereinstimmung mit Gl. (1) und (2) aufgrund ihrer vergleichsweise kleinen Kapazität die größten Verlustfaktoränderungen.



**Bild 7** Nachbildung äußerer Einflüsse durch Bandagen mit Erd- und Hochspannungspotential in der Mitte der Steuerstrecke, Vergleich einer Simulation (unten links) mit Messungen bei 1000 V.

## 5 Eigenschaften des Hauptdielektrikums

Durch zwei Messungen (Bandage an Diagnosespannung bzw. an Erde) werden *Grenzen* festgelegt, zwischen denen der Polarisationsstrom durch die *Hauptisolation* liegen muss. Die übliche Diagnosemessung ohne Bandage liegt zwischen diesen Extremfällen und zeigt durch ihre relative Lage, ob leitfähige Beläge zur Erd- oder Spannungsseite von Einfluss sind.

In Simulationen ergibt sich, dass in keinem der drei Fälle der am Messanschluss abnehmbare Strom dem durch das Hauptdielektrikum fließenden idealisierten Strom entspricht, **Bild 8** (rechts). Die Eigenschaften des Hauptdielektrikums werden somit nicht erfasst.

Wird die Bandage jedoch über die **Kante des Erdbelages** gelegt, so entspricht der Messstrom mit geerdeter Bandage genau dem idealisierten Strom durch das *Hauptdielektrikum*, Bild 8 (links).

Bei der Messung von **Polarisationsströmen** sind somit **vier Situationen** denkbar, die Schätzungen für den Verlauf des idealisierten Stromes im Hauptdielektrikum und eine Eingrenzung desselben erlauben. Das Prinzip der Bandagenmessungen ist dabei auch im Frequenzbereich auf *Kapazitäts- und Verlustfaktor-messungen* anwendbar:

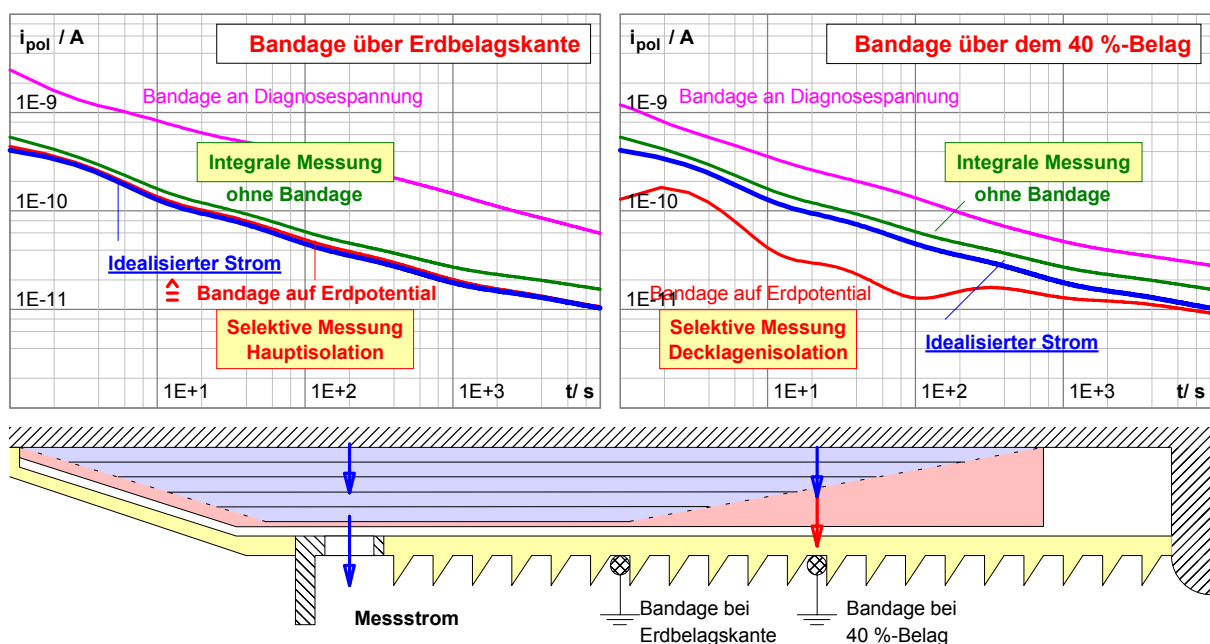
1. Eine Bandage in der Mitte der Steuerstrecke an Diagnosespannung ergibt eine **obere Grenze**.
2. Eine Bandage in der Mitte der Steuerstrecke an Erdpotential ergibt eine **untere Grenze**.
3. Die übliche Messung **ohne Bandage** ergibt eine Schätzung mit unbekannter Genauigkeit.
4. Eine **Bandage über dem Erdbelag** an Erdpotential ergibt eine wesentlich verbesserte Schätzung.

Fallen die mit Bandagen gemessenen Grenzwerte mit den Werten einer normalen Diagnosemessung zusammen, kann davon ausgegangen werden, dass der gemessene *Strom durch die Hauptisolation* fließt und die Bewertung ihrer integralen Eigenschaften erlaubt. Messungen mit geerdeter Bandage über der Mitte der Steuerstrecke erlauben zusätzlich eine *Aussage über die Decklagenisolation*. Je größer die Stromabsenkung (bis hin zur Polaritätsumkehr) ist, desto niederohmiger (und feuchter) ist die Decklagenisolation.

## 6 Betriebsgealterte Durchführungen

Bei der Messung stark betriebsgealterter Durchführungen können die Polarisationsströme weit über den für neuwertige Objekte üblichen Werten liegen. Die Bandagenmessungen ergeben dann eng beieinander liegende Kurven, die somit dem Hauptdielektrikum zugeordnet werden dürfen, **Bild 9**.

An mehreren baugleichen 420 kV-Durchführungen mit unterschiedlichem Alterungszustand wurden PDC-Messungen durchgeführt, **Bild 10**. In den Durchführungen Nr. 1 und 5 hatten der **Gas-in-Öl-Analyse** zufolge Teilentladungen (TE) stattgefunden, die sich auch im Prüffeld nachweisen ließen. Sie zeigten darüber hinaus hohe **Verlustfaktoren oberhalb der Umgebungstemperatur**, so dass die Teilentladungen durch eine vorausgegangene thermische Instabilität im Betrieb, verbunden mit Gasbildung, verursacht gewesen sein können. Interessant ist, dass diese Objekte in einer **PDC-Messung** bereits *bei Raumtemperatur eindeutig* an stark erhöhten **Anfangswerten** des Polarisationsstromes erkannt werden können (vgl. Bild 10 für  $t$



**Bild 8** Erfassung der Eigenschaften des Hauptdielektrikums durch Veränderung der Bandagenposition.



= 1 s). Für die Objekte 1 bis 4 kann nach Auswertung der PDC-Kurven aufgrund niedriger **Leitfähigkeiten** des OIP von einem ausreichend trockenen Zustand ausgegangen werden [4], [5], Bild 10 (rechte Spalte). Bei Objekt 5 würde man zunächst von einer signifikanten Befeuchtung ausgehen, die jedoch durch Gleichgewichtsmessungen der Ölfeuchte bei 70°C und durch Messungen an Papierproben aus dem seziierten Objekt nicht nachweisbar war. Die Kenntnis des weit fortgeschrittenen Alterungszustandes zeigt jedoch, dass sich offensichtlich die Wirkung der *Feuchtigkeit* und der *Alterung* auf die dielektrischen Messgrößen überlagern können. Untersuchungen an Materialproben zeigen, dass hierbei vor allem der Einfluss der *Ölleitfähigkeit* eine Rolle spielt [4].

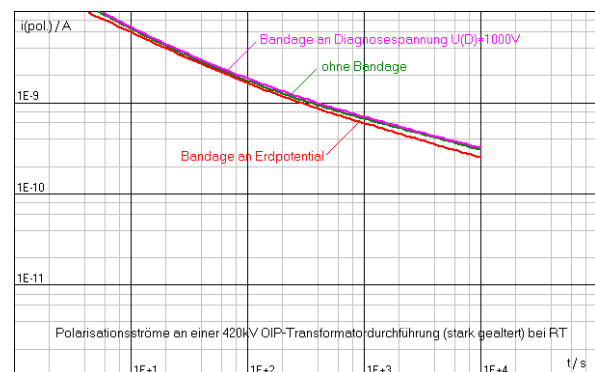
## 7 Schlussfolgerungen

Dielektrische Messungen von Verlustfaktoren sowie Polarisations- und Depolarisationsströmen (PDC) an Durchführungen können von **parasitären Strömen**, die Zutritt zu den Steuerbelägen finden, beeinflusst werden. Durch neuartige Messungen mit **Bandagen** auf den äußeren Oberflächen können die dem **Hauptdielektrikum** zuzuordnenden Ströme aber nach oben sowie nach unten eingegrenzt und störende Umgebungseinflüsse abgeschätzt werden.

Weiterhin hat sich ergeben, dass weit fortgeschrittene **Alterung**, die zu thermischen Instabilitäten führen kann, die aber mit netzfrequenten Verlustfaktormessungen erst bei erhöhten Temperaturen nachweisbar ist, durch **PDC-Messung bereits bei Raumtemperatur** eindeutig an stark erhöhten Anfangswerten des Polarisationsstromes erkennbar ist. Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten zur Differenzierung der Einflussgrößen Alterung und Feuchtigkeit in dielektrischen Signalen.

## 8 Referenzen

- [1] L. Pong; *Review Negative Power Factor Test Results and Case Study Analysis*; The 2002 Int. Conference of Doble Clients; Boston/ USA, 2002
- [2] J. Lapworth; Fachkorrespondenz
- [3] A. Küchler, F. Hüllmandel; J. Hoppe, C. Krause, N. Koch; *Transiente Belastungen durch Grenzflächen- und Materialpolarisation in HGÜ-Transformatoren*; ETG-Fachtagung „Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen“, Hanau, 8.-9.3.2005
- [4] A. Küchler, F. Hüllmandel, K. Böhm, N. Koch, P. Bruppacher, C. Krause; *Das dielektrische Verhalten von Öl-Papier-Isolationen unter der Wirkung von Grenzflächen-, Material- und Prüfparametern*; ETG-Fachtagung „Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen“, Hanau, 8.-9.3.2005
- [5] J.J. Alff, V. Der Houhanessian, W.S. Zaengl, A.J. Kachler; *A Novel, Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Relaxation Currents Conceived for On-Site Diagnosis on Electric Power App.*; IEEE Symp.on El. Insulation, Anaheim, USA, 2000
- [6] A. Kuechler, F. Huellmandel, J. Hoppe, D. Jahnel, C. Krause, U. Piovan, N. Koch; *Impact of Dielectric Material Responses on the Performance of HVDC Power Transformer Insulations*; ISH 03 International Symposium on High Voltage Engineering, Delft, NL, 2003



**Bild 9** Polarisationsströme einer betriebsgealterten 420 kV-OIP Durchführung (Nr. 5 in Bild 10).

Nr.	Gas-in-Öl-Analyse	tan δ(50 Hz) bei 70/ 80 °C	PDC bei t = 1 s und RT (1000 V)	Gleichgewichtsfeuchte 70°C		KF-Feuchte Papierprobe	PDC-Messung Feuchte- und Alterungsindikator	
				Öl	Papier			
(1)	TE	1,6 % (Dfg. 80°C)	13 nA Alterung				0,65 %	Feuchte
(2)			0,9 nA				0,65 %	Feuchte
(3)		0,2 % (Dfg. 80°C)	0,5 nA				< 0,5 %	Feuchte
(4)			0,7 nA				< 1 %	Feuchte
(5)	TE	1,9 % (Dfg. 70°C) 6,1 % (Papierprobe)	27 nA Alterung	6 ppm	0,6–0,7 %	0,3 – 0,8 %	2,4 %	Alterung oder Feuchte

**Bild 10** Feuchtigkeits- und Alterungsindikation an betriebsgealterten 420 kV OIP-Durchführungen durch dielektrische Messungen (PDC) bei Raumtemperatur.

### Danksagung:

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung der Arbeiten.

**Anschrift:** Prof. Dr.-Ing. A. Küchler, FHWS Schweinfurt, Hochspannungslabor, Ignaz-Schön-Str. 11, 97421 Schweinfurt, Tel. (09721)940-840, Email: akuechler@fh-sw.de