

FKH - / VSE – Fachtagung

15. November 2005

Isolationsdiagnose an Hochspannungsbetriebsmitteln

Erfahrungen mit dielektrischen Verlustmessungen vor Ort, Folgerungen auf das Betriebsverhalten

Dr. Vahe Der Houhanessian

Dipl. El.-Ing. ETH

Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich

1993	Abschluss als El.-Ing ETHZ
1998	Promotion als Dr. sc. techn. an der ETHZ
1998-2001	Presco AG, CH-8104 Weiningen, Entwicklungsingenieur
2001-2002	ALFF ENGINEERING, CH-8915 Hausen am Albis, Entwicklungsingenieur
seit 2002	FKH, CH-8044 Zürich, Versuchsingenieur / ALFF ENGINEERING, CH-8915 Hausen am Albis, Entwicklungsingenieur

Erfahrungen mit dielektrischen Verlustmessungen vor Ort, Folgerungen auf das Betriebsverhalten

Dr. Vahe Der Houhanessian

Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich

1 Einleitung

Im vorliegenden Referat wird über praktische Erfahrungen mit der Messung von elektrischen Verlusten in Isolationssystemen berichtet. Dabei spielen kleine Ausgleichsströme in der Isolation, d.h. sogenannte Polarisationsvorgänge eine zentrale Rolle. Bei einer Änderung der elektrischen Feldstärkebeanspruchung laufen Ladungsverschiebungen ab, die mit Reibungsverlusten verbunden sind und die unter Umständen erst nach sehr langer Zeit zum Stillstand kommen. Solche Ausgleichsvorgänge können in Form einer dielektrischen Antwortfunktion beschrieben werden, die einige wichtige Informationen über den Zustand einer Isolation enthält.

Die Ausführungen schliessen an den zweiten Teil des Einführungsreferats von Prof. Zaengl (Kapitel 5) an und beschreiben die praktischen Anwendungen von Messmethoden, welche die elektrischen Ausgleichsvorgänge in Isolationssystemen erfassen.

Es wird gezeigt, dass die genaue Vorgehensweise bei den Messmethoden, z.B. die Wahl der Zeit- bzw. Frequenzbereiche aber auch die Bedeutung der erhaltenen Messresultate je nach Isolationssystem, prinzipiell sehr verschieden sein können und deshalb einzeln untersucht werden müssen. Heute ist die Messtechnik in allen Frequenzbereichen weitgehend ausgereift. Der Wissensstand bezüglich einer Zustandsbeurteilung ist aber je nach Isolationssystem noch sehr unterschiedlich weit fortgeschritten.

2 Messung dielektrischer Verluste an Apparaten mit Öl-Papier-Isolation

Bei Transformator-Isolationen (Öl-Zellulose-Isolationen) besitzt die Messung bzw. Überwachung von Kapazitäten und von Verlustwinkel $\tan\delta$ bei Betriebsfrequenz eine lange Tradition.

Da Messungen bei Betriebsfrequenz oft keine abschliessende Beurteilung zulassen und da die langsamen Polarisationsvorgänge im Öl-Papier-Dielektrikum entscheidende Zusatzinformationen ergeben, haben sich in den letzten Jahren Polarisationsmessungen über lange Zeiten (im Bereich von Minuten bis Stunden) bzw. im Bereich sehr tiefer Frequenzen immer mehr durchgesetzt. Der Autor hat während seiner Zeit im Hochspannungslabor an der ETH selbst zur Entwicklung einer Messmethode und zur Beurteilung langsamer Polarisationsvorgänge in Öl-Papier-Isolationen beigetragen (V. Der Houhanessian, Diss. ETH Nr. 12832, 1998).

Die Polarisations- und Depolarisationsstrommessung (PDC) stellt eine einfache Methode zur Bestimmung der dielektrischen Antwortfunktion von Öl-Zellulose-Isolationssystemen dar. Bei dieser Methode werden die Parameter der Antwortfunktion

aus den zeitlichen Verläufen sehr kleiner gemessener Lade- und Entladeströme über eine Dauer von je 2 bis 3 Stunden bestimmt.

Das Schema der Messanordnung für die PDC-Messung an Transformatoren ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei dieser Anordnung bilden die Primär- und Sekundärwicklungen ein koaxiales Elektrodensystem worin sich die untersuchte geschichtete Hauptisolation befindet (siehe Abbildung 2).

Abbildung 3 zeigt die Polarisations- und die Depolarisationsströme, die an einem 370-MVA-27/420-kV-Transformator gemessen wurden (schwarz dargestellte Kurven).

Ein Vergleich zwischen gemessenen und simulierten PDC-Kurven unter Berücksichtigung der Geometrie der Hauptisolation und der dielektrischen Eigenschaften der Öl-Zellulose-Isolation ermöglicht die Ermittlung der Ölleitfähigkeit wie auch der Feuchte in der Zellulosebarriere des untersuchten Transformators. Ein Beispiel einer solchen Simulation für den oben erwähnten Transformator mit einer Feuchte in der Zellulose von 2.5% und einer Ölleitfähigkeit von 0.72 pS/m ist in der Abbildung 3 (grau) dargestellt.

Die dielektrische Antwortfunktion im Frequenzbereich (z. B. $\tan\delta(f)$) kann durch die Anwendung der Fast-Fourier-Transformation aus den dielektrischen Daten im Zeitbereich bestimmt werden. Ein Beispiel einer solchen Transformation ist in der Abbildung 4 dargestellt. Die $\tan\delta$ -Werte bei tiefen Frequenzen <0.5 Hz sind aus dem gemessenen Polarisationsstrom am Transformator (siehe Abbildung 3) berechnet worden. Die eingetragenen Werte bei hohen Frequenzen ($15 \text{ Hz} \leq f \leq 400 \text{ Hz}$) sind direkt mit einer modernen Brücke gemessen worden.

Die PDC-Messungen sind temperaturabhängig. Bei Vor-Ort-Messungen müssen die Temperaturänderungen des Prüflings registriert und bei der Auswertung berücksichtigt werden. Eine solche Registrierung kann mit einem Datalogger durchgeführt werden. Abbildung 5 zeigt die Temperaturänderung der Umgebung (Sonde 4) und des Trafos während einer PDC-Messung an drei verschiedenen Positionen an der Oberfläche des Kessels (Sonden 1 bis 3).

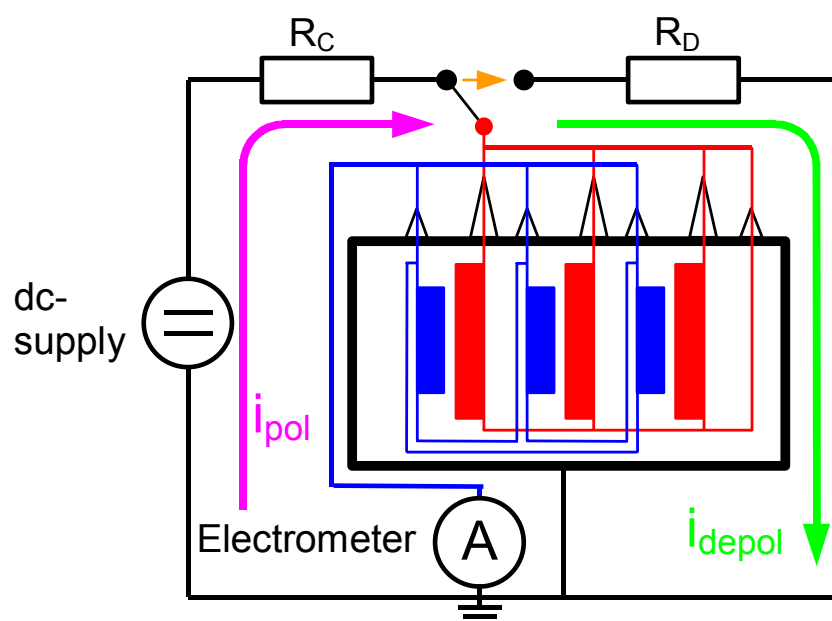


Abbildung1: PDC-Messung an einem Transformator

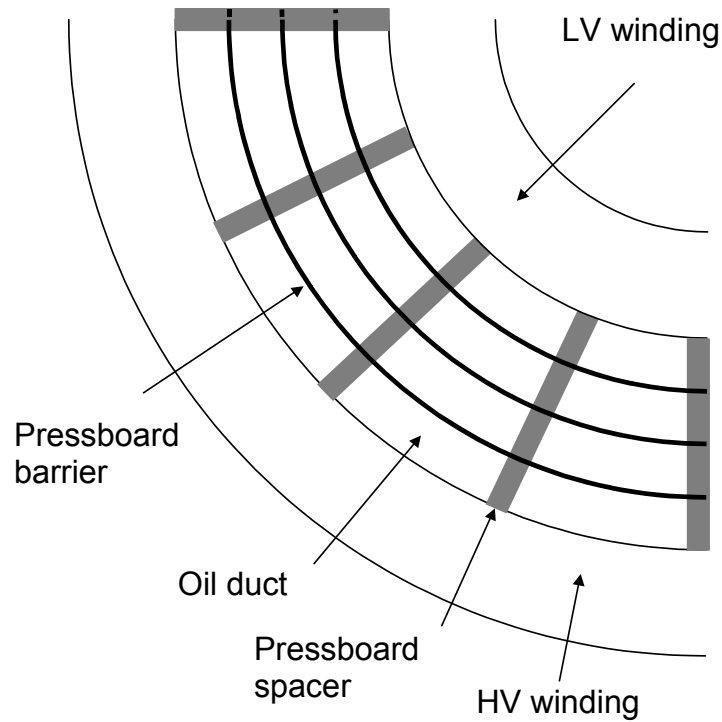


Abbildung 2: Aufbau der Hauptisolation

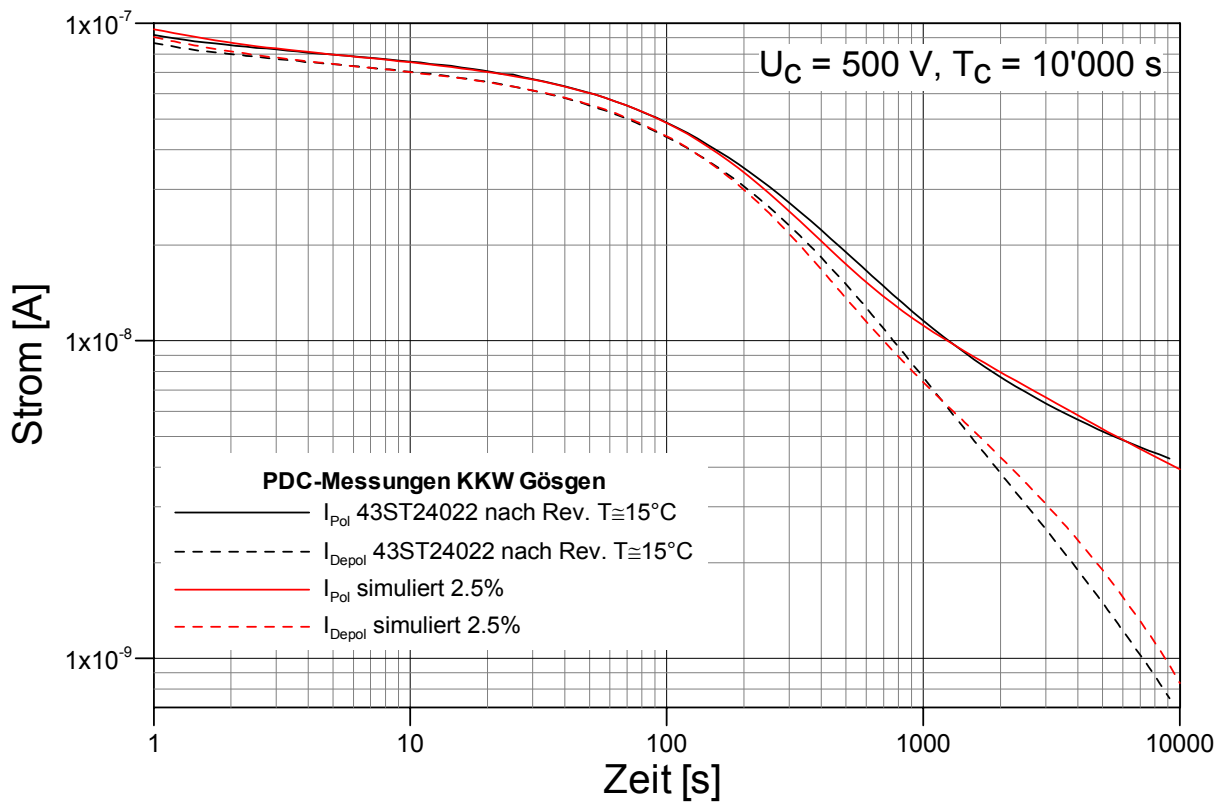


Abbildung 3: Vergleich zwischen den gemessenen und simulierten PDC-Kurven mit 2.5% Feuchte im Zelluloseanteil der Barrieren. Die Simulation wurde mit einem Ölleitfähigkeitswert von 0.72 pS/m durchgeführt

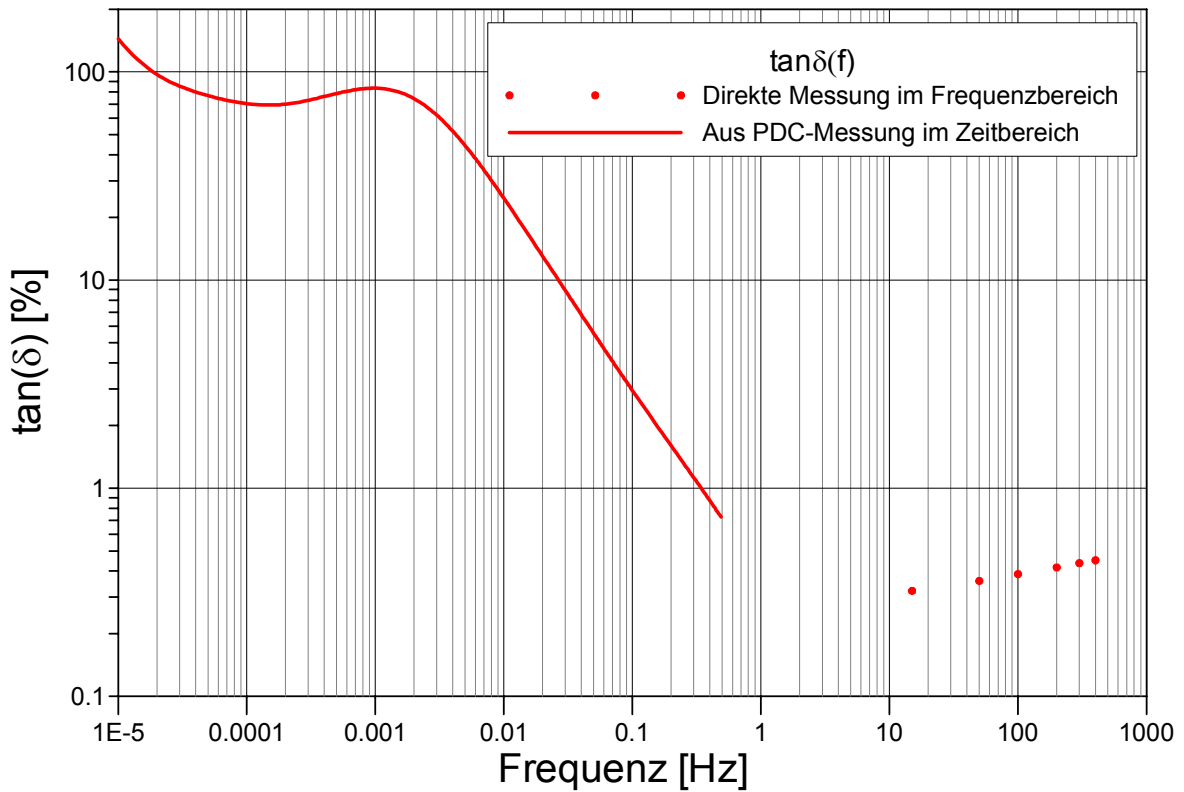


Abbildung 4: Bestimmung der Verluste im Frequenzbereich

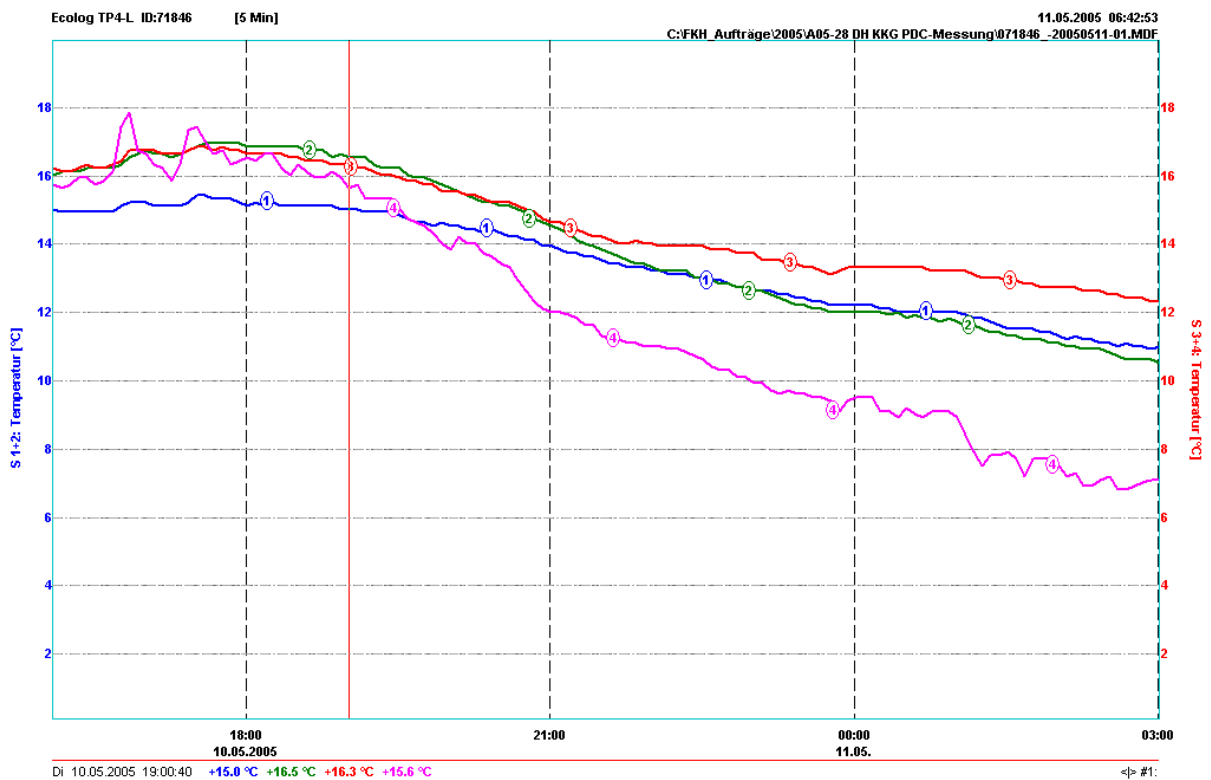


Abbildung 5: Aufzeichnung der Umgebungs- bzw. Transformatortemperatur mit einem Datalogger während der PDC-Messung

3 Messung dielektrischer Verluste in Giessharzisolierungen

Als weiteres Beispiel für die Bestimmung der dielektrischen Antwortfunktion an elektrischen Betriebsmitteln wird die Messung der Verluste an giessharzisolierten Mittelspannungsstromschienen (Duresca-Schienen) vorgestellt. Abbildung 6a zeigt die untersuchten gebogenen und geraden Schienen in einer Mittelspannungsschaltanlage. Die Testspannungen für Durchführung der PDC- und der $\tan\delta$ -Messungen wurden am Innenleiter angelegt und die Polarisationsströme wurden an ausgeführten Anschlüssen der Erdbeläge gemessen. Die Messsysteme für die PDC-Messung (PDC-Analyser im Vordergrund) und für die $\tan\delta$ -Messung (Trafo-Brücke im Hintergrund) sind in der Abbildung 6b dargestellt.

Abbildung 7 zeigt den Verlauf der gemessenen Polarisations- und Depolarisationsströme von drei untersuchten Schienen. Die Kurvenverläufe entsprechen den von einer mikroskopisch homogenen Isolation mit einem relativ hohen DC-Verlust und unterschieden sich grundsätzlich von den gemessenen Stromverläufen an Transformatoren mit geschichteter Öl-Zellulose-Isolation (siehe Abbildung 3). Auch hier ist es möglich, durch Anwendung der Fast-Fourier-Transformation die Verluste im Frequenzbereich zu bestimmen. Die Resultate dieser Transformation und die von direkt gemessenen $\tan\delta$ -Werten im Frequenzbereich von $15 \text{ Hz} \leq f \leq 400 \text{ Hz}$ sind in Abbildung 8 dargestellt.

Der heutige Stand des Wissens über den Einfluss der Alterung der Duresca-Isolation und deren hygroskopischen Verhaltens auf die dielektrische Antwortfunktion ist sehr beschränkt. Zur Zeit sind nur Grenzwerte für $\tan\delta$ -Werte bei 50 Hz und der Raumtemperatur basierend auf Erfahrungen aus Messungen bekannt. Deshalb kann die Messung der dielektrischen Antwort bis heute nur für Vergleichszwecke bei Vorliegen mehrerer Prüflinge oder im Sinne einer Trendanalyse an einem Prüfobjekt eingesetzt werden.



a)



b)

Abbildung 6: a) Messung der dielektrischen Eigenschaften der Duresca-Schienen in einer Mittelspannungs-Schaltanlage
b) Messsysteme für die PDC- und die $\tan\delta$ -Messung

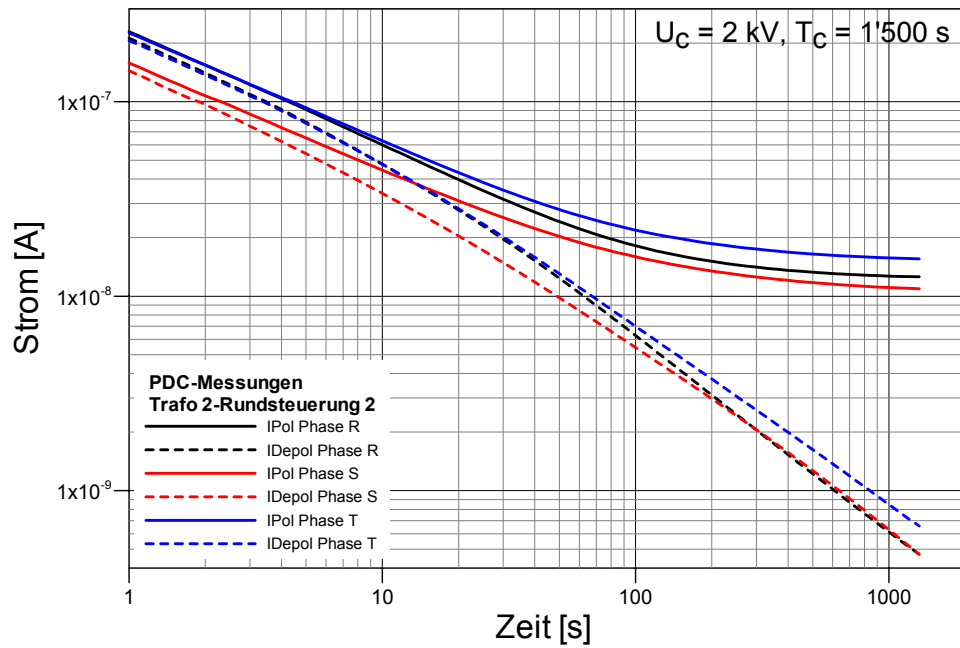


Abbildung 7: Gemessene PDC-Kurven an drei Duresca-Schienen

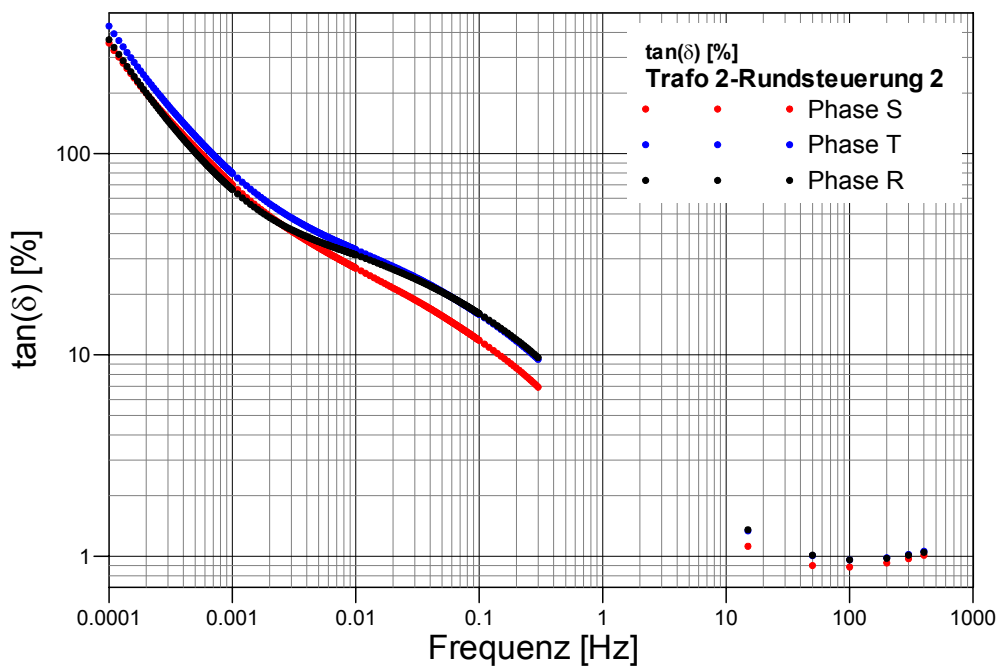


Abbildung 8: Bestimmung der dielektrischen Verluste (tanδ) im Frequenzbereich

4 Messung dielektrischer Verluste an Hochspannungskabeln

Polarisations- und Depolarisationsströme an Kabeln weisen je nach Isolationsart stark unterschiedliche zeitliche Verläufe und Amplituden auf. Abbildung 9 zeigt eine Gegenüberstellung der PDC-Messungen an einem XLPE-isolierten Mittelspannungskabel mit der Messung an einem dreidradigen Öl-Papier-isolierten Kabel. Um die Resultate sinnvoll vergleichen zu können, wurden die Amplituden der gemessenen

Ströme durch den Wert der angelegten Spannung und durch den Kapazitätswert bei 50 Hz dividiert.

Die Messungen zeigen sofort, dass XLPE-isolierte Kabel wesentlich verlustärmer als Öl-Papier-isolierte Kabel sind. Ausserdem laufen unterschiedliche Polarisationsmechanismen ab. Beispielsweise führt die mikroskopische Struktur des Öl-Papier-isolierten Kabels mit Cellulosefasern und ölgefüllten Zwischenräumen zu Grenzschichtpolarisationen. Im Kabel mit extrudierter Kunststoffisolation spielen dagegen sehr geringe ggf. variierende Volumenleitfähigkeiten eine dominante Rolle.

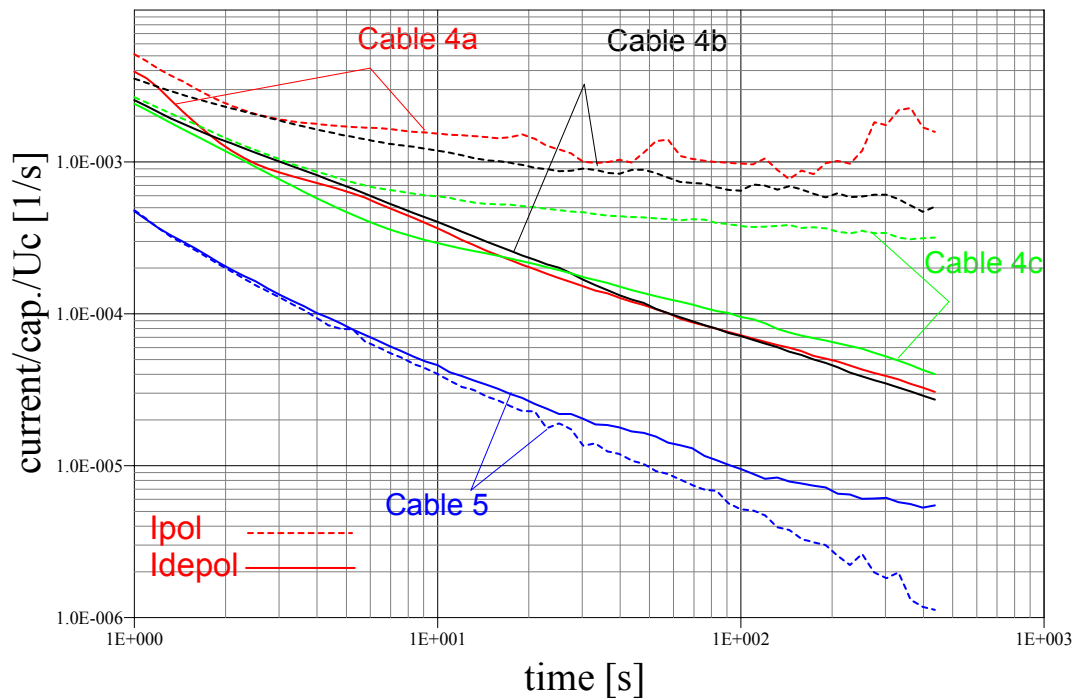


Abbildung 9: Durchgeführte PDC-Messungen an einem dreierigen Oil-Papier Kabel (cable 4a, 4b und 4c) und an einem XLPE-Kabel (cable 5). Die Messungen wurden an nicht verlegten Kabelmustern durchgeführt

Die Isolation von extrudierten Polyäthylenkabeln besitzt extrem geringe Leitfähigkeiten, welche bei Präsenz von sogenannten Wasserbäumchen allerdings zunimmt und feldstärkeabhängig wird. Diese Nichtlinearität der sehr kleinen Verlustströme im Bereich der Wasserbäumchen wird durch sog „Trapping“- und „Hopping“-Effekte, d.h. durch Anlagerung und Ablösung von Ladungsträgern hervorgerufen. Aufgrund der Feldstärkeabhängigkeit können in solchen Kabeln Wasserbäumchen durch Polarisationsmessungen mit variierenden DC-Spannungspegeln nachgewiesen werden, wenn sie in ausgedehnten Bereichen der Kabel vorhanden sind (siehe Abbildung 10).

Die Hauptschwierigkeiten bei der Messung und Auswertung der dielektrischen Antwortfunktion an verlegten Kabeln sind folgende:

- Die Temperatur des verlegten Kabels ist in der Regel unbekannt.
- Bei den dielektrischen Untersuchungen werden auch die Eigenschaften von Muffen und Endverschlüssen mitgemessen, welche die Eigenschaften des Kabels überdecken können.
- Eine Kabelstrecke kann aus mehreren Kabelabschnitten mit verschiedenem Alterungszustand oder sogar mit verschiedenen Isoliermaterialien zusammengesetzt sein.

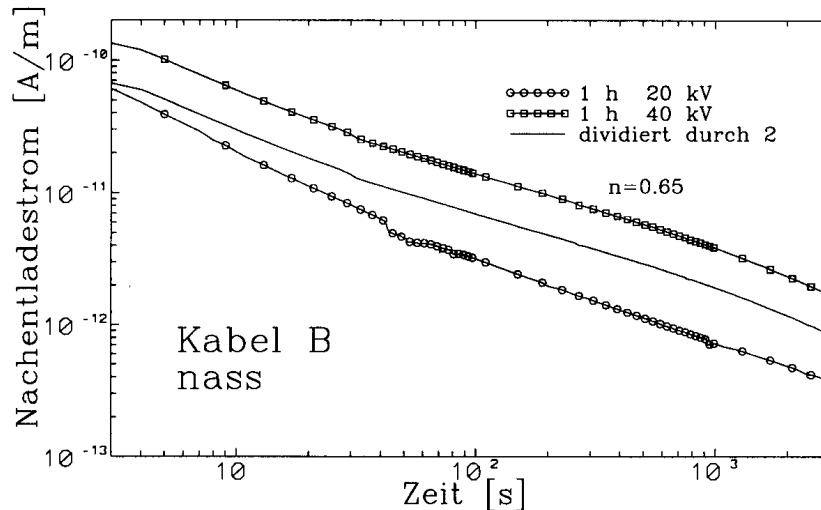


Abbildung 10: Nichtlineares Verhalten eines mit Wasserbäumchen behafteten Kabels (Th. Heizmann, Diss. ETH Nr. 10858, 1994). Die mit 20 kV und 40 kV gemessenen Kurven unterscheiden sich um wesentlich mehr als einen Faktor 2

5 Schlussfolgerung

Dank moderner Messtechnik ist es heute möglich, die dielektrische Antwortfunktion von elektrischen Apparaten genau und zuverlässig sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich unter Vor-Ort-Bedingungen zu bestimmen.

Für eine korrekte Auswertung der gemessenen dielektrischen Antwortfunktionen ist es wichtig, den Aufbau des Prüfobjektes und seine "Vorgeschichte" bis zum Zeitpunkt der Prüfung möglichst genau zu kennen. Weiter ist es wichtig, die zeitveränderlichen Messparameter, wie z. B. die Umgebungs- und die Prüflingstemperatur genau zu erfassen.

Die dielektrischen Antwortfunktionen beinhalten mehr Informationen über den Zustand der Isolierstoffe als einzelne gemessene Punkte dieser Funktion. Beispielsweise wird bei der bekannten Messung des Polarisationsindex der Polarisationsstrom nur zu zwei diskreten Zeitpunkten gemessen. Bei der $C - / \tan\delta$ -Messung wird der Verlustfaktor nur bei einer Frequenz bestimmt.

Für eine quantitative Interpretation der dielektrischen Antwortfunktionen, welche an einem elektrischen Apparat gemessen wird, ist eine dielektrische Charakterisierung der Isolierstoffe notwendig. Ohne diese Grundkenntnisse über den eingesetzten Isolierstoff können solche Messungen nur für Vergleichszwecke oder für Trendanalyse eingesetzt werden.

Der Stand des Wissens über Öl-Papier-Isolation ermöglicht aus den gemessenen dielektrischen Antwortfunktionen an Transformatoren heute bereits eine zuverlässige Quantifizierung der Feuchte im Papier und der Leitfähigkeit des Öls. Die Genauigkeit dieser Quantifizierung kann allerdings mit weiteren Forschungsarbeiten im Materialbereich noch weiter erhöht werden.