

# Vergleich von Verlustfaktormessverfahren sowie das Teilentladungsverhalten von Generatorstabmodellen

Prof. M. Muhr, Dr. R. Schwarz, Dr. C. Sumereder, DI. G. Knollseisen

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, Österreich

## Kurzfassung

Durch die Liberalisierung des europäischen Elektrizitätsmarktes ist ein Wechsel von einer zeitorientierten zu einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie zu beobachten. Aufgrund dieser Entwicklung spielen unterschiedliche Monitoring-, Analyse- und Diagnostiksysteme zunehmend eine wichtige Rolle in der Energieerzeugung, -übertragung und -verteilung, mit dem Ziel die Zuverlässigkeit des gesamten Systems zu erhalten und zu erhöhen.

Zu den wichtigsten Verfahren im Bereich der dielektrischen Diagnostik zählen die Messung des Verlustfaktors und des Teilentladungsverhaltens. So führen z.B. Teilentladungen und thermische Alterung zu einer Änderung der physikalischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften des Isoliermaterials und in der Folge zur Veränderung von elektrischen Parametern wie zum Beispiel des Verlustfaktors. Die klassische Methode zur Bestimmung des Verlustfaktors ist die Messung mit einer wechsellspannungsbetriebenen Scheringbrücke. Neuentwicklungen auf dem Gebiet der elektronischen Messsysteme, bei denen kein Brückenabgleich mehr notwendig ist, kommen vermehrt zur Anwendung. Neue computergestützte Messsysteme arbeiten auf Basis einer vektoriellen Impedanzmessung im Frequenzbereich indem die Grundschiwingung der Ströme durch das Messobjekt und einen Referenzzweig analysiert wird.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Verlustfaktors ist die Berechnung aus den Ergebnissen einer Gleichspannungsmethode mittels Polarisation und Depolarisation des Testobjektes. Der zeitbasierende Messstrom wird mittels Fourieranalyse in den Frequenzbereich transformiert.

In diesem Paper werden die drei  $\tan\delta$  Messverfahren (Scheringbrücke, elektronische Brücke und PDC-Analyser) gegenübergestellt. Einem theoretischen Überblick über die Technologien und Messmethoden folgen praktische Untersuchungen an Generatorstabmodellen, die die Funktion der einzelnen Methoden demonstrieren und die Vor- und Nachteile herausstreichen sollen. Begleitend zu diesen Untersuchungen werden Teilentladungsmessungen durchgeführt, wobei auf die Vergleichbarkeit der einzelnen Messergebnisse (Umgebungsbedingungen) geachtet wird.

## 1 Einleitung

Mit zunehmendem Alter der elektrischen Isolierung, die meist einer kombinierten thermischen, elektrischen und mechanischen Beanspruchung sowie Umgebungsbedingungen ausgesetzt ist, kommt es zu einer Veränderung der dielektrischen Eigenschaften, die in weiterer Folge zu einem Versagen der Isolation und damit zu einem Ausfall des Betriebsmittels führen kann. Mit Hilfe einsprechender Diagnosemethoden ist man bestrebt solche Veränderungen vorzeitig zu erkennen um Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Im Bereich der dielektrischen Diagnostik stehen unterschiedliche Messverfahren zur Beurteilung von elektrischen Isoliersystemen zu Verfügung, wobei zwischen Methoden die im Zeit- und Frequenzbereich arbeiten unterschieden wird. Polarisations- und Depolarisationsströme (PDC) und der Wiederkehrspannung (RVM) werden im Zeitbereich gemessen, die Messung des Verlustfaktors und der komplexen Kapazität

bei unterschiedlichen Frequenzen (FDS) erfolgt im Frequenzbereich [1].

## 2 Verlustfaktor - Messmethoden

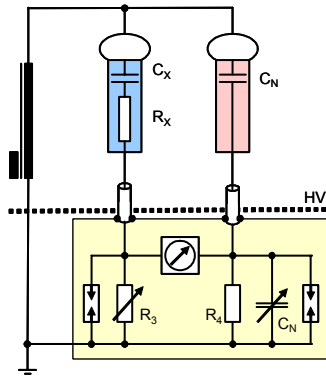
Kapazitäten und Verlustfaktoren sind stoff- und gerätespezifische Größen. Der Verlustfaktor ist ein Parameter des Isolationssystems und ein Maß für die Höhe der elektrischen Verluste durch die Isolierung. Er wird aber auch als Messgröße zur Bewertung der Veränderung innerhalb der Isolierung herangezogen. Durch die Veränderung der Messfrequenz (z.B. Reduktion auf 0,1 Hz) kann zusätzlich die Messempfindlichkeit erhöht werden.

Niedrige Werte für den  $\tan\delta$  sind üblicherweise für eine einwandfreie Isolierung charakteristisch. Ein rascher Anstieg des Verlustfaktors ist ein Zeichen starker Verschlechterung des Isolationszustandes.

Die klassische Messung erfolgt mit Hilfe der Kapazitäts- und Verlustfaktormessbrücke nach Schering.

## 2.1 Verlustfaktormessbrücke nach Schering

Bei der Scheringbrücke wird üblicherweise das zu messende Objekt realitätsnahe mit Hochspannung beansprucht (siehe **Bild 1**). Die Abgleichelemente hingegen liegen auf Niederspannungspotential.



**Bild 1** Kapazitäts- und Verlustfaktormessbrücke nach Schering [2]

Die Abgleichbedingung der Brücke lautet:

$$Z_X / Z_3 = Z_N / Z_4$$

$$\tan \delta = \omega C_X R_X = \omega C_4 R_4$$

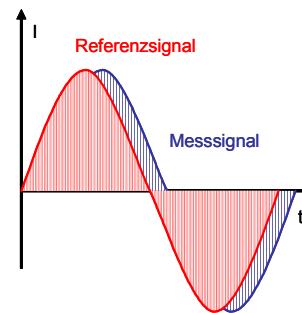
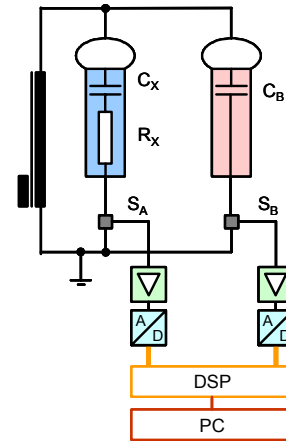
Bei der Messung sind gewisse Parameter zu berücksichtigen die auf die Messergebnisse einen entscheidenden Einfluss haben können:

- Erdstreukapazitäten des Messobjektes (Einbaulage und Einbauart) und des Vergleichskondensators. Die Erdstreukapazitäten stellen die häufigsten Fehlerquellen der Schering Messbrücke dar. Eine Abhilfemaßnahme bieten doppelt geschirmte Kabel.
- Oberflächenzustand des Prüfobjektes
- Ableitströme über die Wickelköpfe
- Umweltverhältnisse zum Zeitpunkt der Messung (relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur)

Der Verlustfaktor  $\tan \delta$  ist eine Materialgröße, die wesentlich von den Polarisationsverlusten und den Leitfähigkeitsverlusten bestimmt wird. Für Hochspannungsisolierungen werden in der Regel Materialien mit einem Verlustfaktor unter  $10^{-2}$  (1%) eingesetzt.

## 2.2 Computerbasierte Verlustfaktormessung aus der Phasenverschiebung der Ströme im Mess- und Vergleichszweig

Die Weiterentwicklung im Bereich der Digitaltechnik ermöglicht den Einsatz digitaler Vektormetermethoden.



**Bild 2** Schematischer Aufbau und Signal

Die verwendete Brücke besteht aus einem Referenzzweig mit einer Hochspannungskapazität  $C_B$  und einem resistiven Stromsensor  $S_B$  in Serie. Der Messzweig besteht entsprechend aus dem Prüfobjekt und einem weiteren Stromsensor  $S_A$ . Die beiden kontinuierlich gemessenen Ströme werden amplituden- und phasenbezogen gemessen, digitalisiert und mittels PC-Software vollautomatisch verarbeitet (**Bild 2**). Mit einer DFT (Discrete Fourier Transformation) werden die beiden an den Sensoren gemessenen Signale selektiv in den Frequenzbereich transformiert. Die Phasenverschiebung der Grundfrequenzen der beiden Signale wird zur Berechnung des  $\tan \delta$  verwendet.

### 2.2.1 Polarisations-/ Depolarisationsstrom

Bei der PDC-Messung wird an den Prüfling (lineares Isolationssystem) eine Gleichspannung angelegt und die Sprungantwort gemessen, der Polarisationsstrom wird dabei messtechnisch erfasst. Beim Entladen (Kurzschluss des Prüflings) wird der Depolarisationsstrom gemessen.

Als Antwort auf einen Feldsprung im Zeitbereich kann durch die Polarisationsstrommessung ein Netzwerkmodell mit entsprechenden Elementen zur Nachbildung eines dielektrischen Ersatzschaltbildes aufgestellt werden. Mittels Approximation der gemessenen Polarisationsströme mit Hilfe von Exponentialfunktionen kann das vollständige dielektrische Ersatzschaltbild ermittelt werden.

Zusätzliche Informationen über die Eigenschaften der Isolierung liefert die Erfassung des Depolarisationsstromes nach einer bestimmten Ladezeit.

Da die PDC-Messung als Sprungantwortmessung die gesamte Systeminformation enthält, können durch entsprechende Transformationen (Transformation in den Frequenzbereich) oder durch Anwendung des ermittelten Materialersatzschaltbildes alle anderen diagnostischen Kenngrößen wie z. B. Verlustfaktor errechnet werden [2].

Dabei wird die Antwort vom Zeitbereich in den Frequenzbereich unter Verwendung einer diskreten Fourier-Transformation umgewandelt.

$$f(t) = \frac{-i_d(t)}{C_0 U_0} \quad f(\omega) = \int f(t) e^{-j\omega t} dt$$

Im Frequenzbereich wird die Antwortfunktion durch die Parameter Leitfähigkeit, Dielektrizitätskonstante und Polarisation beschrieben.

$$\tan \delta = \tan \delta_L + \tan \delta_{POL} = \frac{\kappa + \omega \epsilon_0 \epsilon_r''}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r'} \quad (1)$$

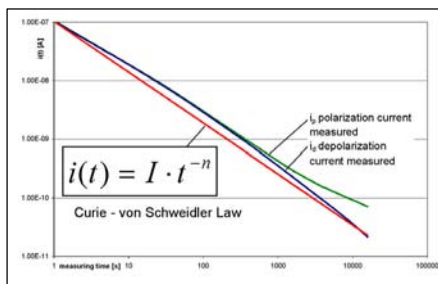
$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j \epsilon_r''$$

$\epsilon_r^*$  ... komplexe Dielektrizitätskonstante

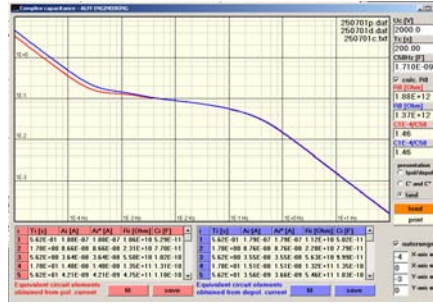
Nach Gleichung (1) kann der Verlustfaktor ausgedrückt werden. Die Leitfähigkeit und der Realteil der komplexen Dielektrizitätskonstante zeigen dabei eine geringe Frequenzabhängigkeit im Gegensatz zu deren Imaginärteil.

Der PDC-Analysator wurde entwickelt, um das dielektrische Verhalten an Betriebsmitteln der Energietechnik festzustellen. Kapazität und Verlustfaktor ergeben sich aus der Kalkulation der Messung des Polarisations- und Depolarisationsstromes in Abhängigkeit von der Zeit (siehe Bild 3 und Bild 4).

Der PDC-Analysator wird häufig dazu verwendet um Informationen über den Wassergehalt in Isolationssystemen festzustellen (Transformatoren oder Kabel).



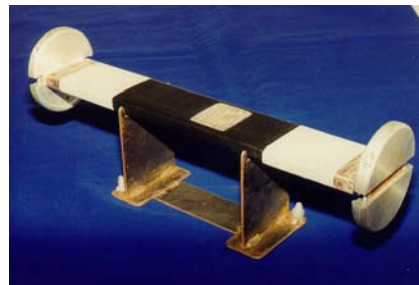
**Bild 3** Polarisation and Depolarisationsstrom



**Bild 4** Verlustfaktor im Frequenzbereich

### 3 Messaufbau – Versuchsdurchführung

Als Prüflinge für einen Vergleich der oben angeführten Messtechniken wurden unterschiedliche Generatorstäbe und Generatorstabmodelle einer realen Maschine untersucht: Drei durch langjährigen Betrieb natürlich gealterte Stäbe sowie zwei Stabmodelle (ohne und mit künstlicher Fehlerstelle (5x5cm)) (Bild 5).



**Bild 5** Generatorstäbe/ -stabmodell

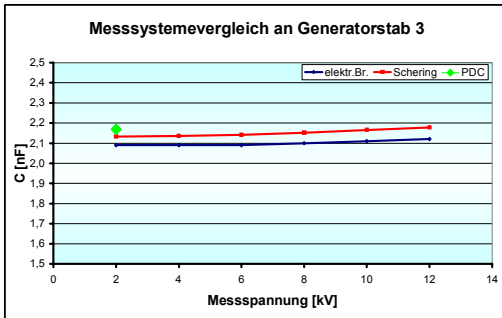
Um eine Korrelation zwischen  $\tan \delta$  und TE-Aktivität aufzuzeigen erfolgte zusätzlich zu den durchgeführten Untersuchungen eine Teilentladungsmessung nach IEC 60270 mittels digitalem TE-Messsystem.

Nr.	Testobjekt	Technologie
1	Generatorstab	Resin Rich
2	Generatorstab	Resin Rich
3	Generatorstab	Resin Rich
4	Generatorstabmodell	ohne Fehlerstelle
5	Generatorstabmodell	mit Fehlerstelle

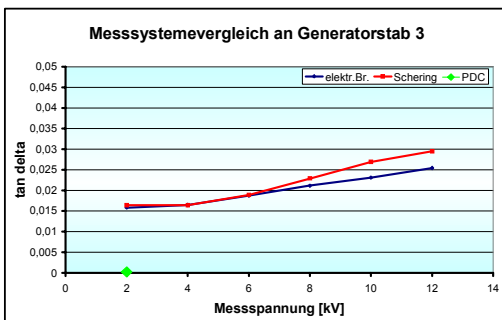
**Tabelle 1** Testobjekte

## 4 Ergebnisse

Im Folgenden werden einige Ergebnisse aus den Messungen bei unterschiedlicher Spannungsbeanspruchung dargestellt. **Bild 6** und **Bild 7** zeigen den Verlauf des Verlustfaktors und der Kapazität in Abhängigkeit von der Spannung am Generatorstab 3.



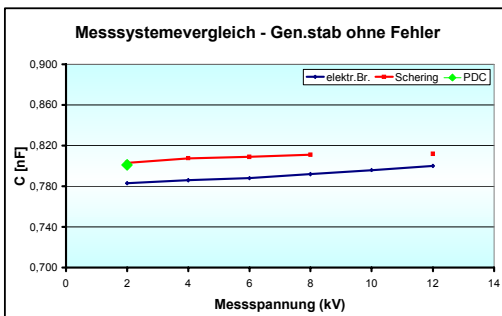
**Bild 6** Kapazität am Generatorstab 3



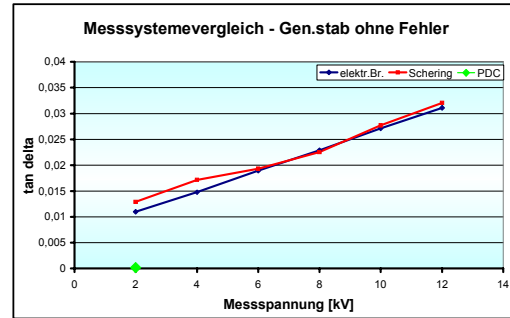
**Bild 7** Verlustfaktor am Generatorstab 3

Die Kapazität und der Verlustfaktor zeigen dabei eine sehr gute Korrelation zwischen elektronischer Brücke und Schering Brücke. Die errechnete Kapazität bezogen auf 50 Hz ermittelt durch die PDC-Analyse unterscheidet sich um ca. 4 – 5% von den gemessenen Werten. Der Wert des  $\tan \delta$  liegt jedoch um zwei Potenzen daneben.

**Bild 8** und **Bild 9** zeigen den Verlauf der Kapazität und des Verlustfaktors am Generatorstabmodell ohne Fehlerstelle.

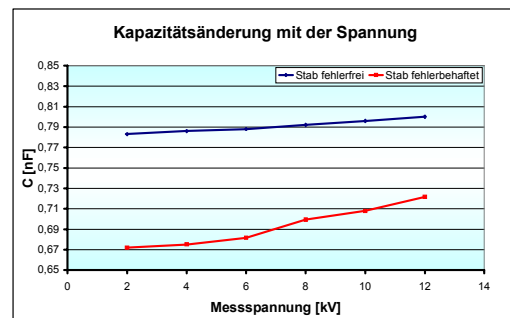


**Bild 8** Kapazität am Generatorstabmodell ohne Fehlerstelle

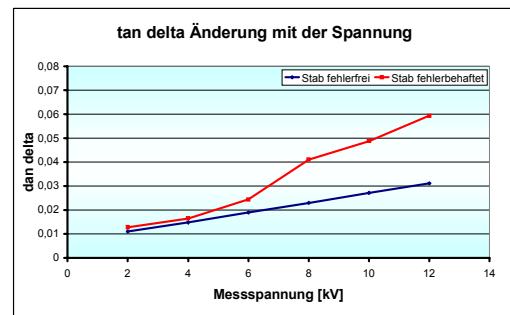


**Bild 9** Verlustfaktor am Generatorstabmodell ohne Fehlerstelle

Auch hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung in den Ergebnissen aus den Messungen mittels elektronischer Brücke und Schering Brücke. Die Kapazität gemessen mit dem PDC-Analysator liegt genau im Bereich zwischen den Ergebnissen aus elektronischer und Schering Brücke. Beim Verlustfaktor hingegen ergibt sich wiederum eine große Abweichung.



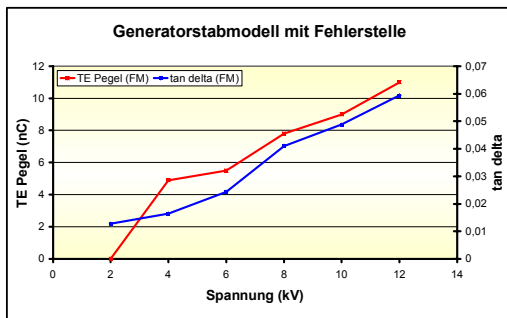
**Bild 10** Kapazität der beiden Generatorstabmodelle



**Bild 11** Verlustfaktor der beiden Generatorstabmodelle

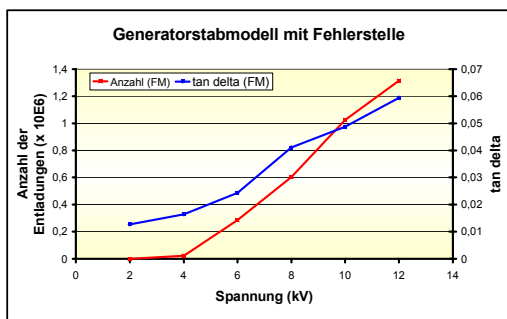
**Bild 10** und **Bild 11** zeigen einen Vergleich des Verlustfaktors- und den Kapazitätsverlauf beider Generatorstabmodelle. Dabei ist ein deutlicher Anstieg der Werte mit zunehmender Spannung beim fehlerbehafteten Generatorstabmodell zu erkennen.

**Bild 12** zeigt eine Gegenüberstellung des Verlaufs des Verlustfaktors und des Teilentladungsverhaltens. Der Verlustfaktor wurde mittels elektronischer Brücke ermittelt, das Teilentladungsverhalten mittels digitalem TE-Messsystem ICM. Bei der Teilentladungsmessung wurde dabei der maximal auftretende Teilentladungspegel in Abhängigkeit von der Spannung aufgetragen.



**Bild 12** Verlustfaktor und maximale Teilentladungspegel in Anhängigkeit von der Spannung beim Generatorstabmodell mit Fehlerstelle

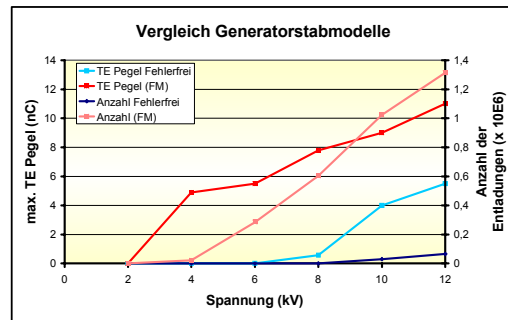
Die Tendenz des ansteigendes Verlustfaktors, welche durch zunehmende ohmsche Verluste im Dielektrikum interpretiert werden kann, spiegelt sich auch in der Zunahme der Teilentladungsaktivität, der Entladungsstärke (max. Pegel) sowie in der Anzahl der Entladungen wieder (**Bild 13**).



**Bild 13** Verlustfaktor und Entladungsanzahl in Anhängigkeit von der Spannung beim Generatorstabmodell mit Fehlerstelle

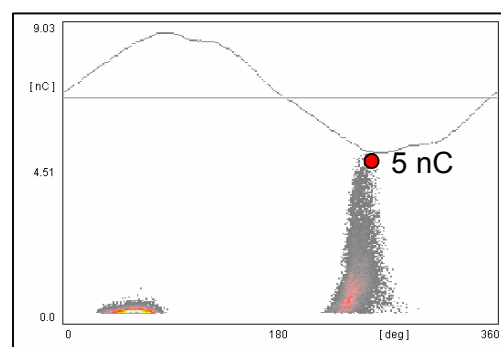
Bereits bei niedrigen Spannungswerten (4kV) steigt der Verlustfaktor stark an wobei gleichzeitig ein starker Anstieg der Teilentladungsaktivität beobachtet werden kann.

In **Bild 14** ist eine Gegenüberstellung der Teilentladungsaktivität (max. Pegel) und der Anzahl der Entladungen beider Generatorstabmodelle über die Spannung dargestellt. Bedingt durch die Fehlerstelle ist die Anzahl der Entladungen auf ein Vielfaches gestiegen, der maximal auftretende Pegel hat sich verdoppelt.

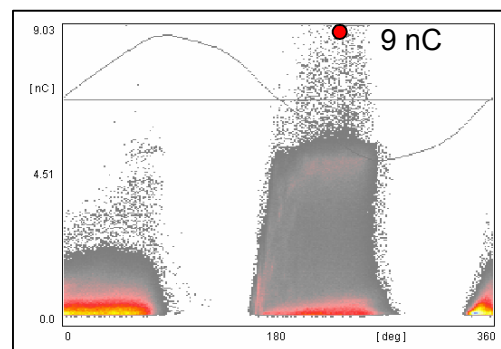


**Bild 14** Teilentladungsaktivität der beiden Generatorstabmodelle

In **Bild 15** und **Bild 16** ist die Teilentladungsaktivität am Generatorstabmodell mit Fehlerstelle bei unterschiedlichen Spannungswerten zu sehen.



**Bild 15** Teilentladungsaktivität am Generatorstabmodell mit Fehlerstelle bei 4kV



**Bild 16** Teilentladungsaktivität am Generatorstabmodell mit Fehlerstelle bei 12kV

Unter der Voraussetzung gleicher Umgebungsbedingungen (Raumtemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit) ergibt sich mit zunehmender Spannung ein deutlicher Anstieg der Teilentladungsaktivität (siehe **Bild 16**).

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchungen wurden unterschiedliche Messmethoden zur Bestimmung des Verlustfaktors und der Kapazität anhand von Generatorstäben eingesetzt.

Bei der Kapazitätsmessung zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der elektronischen Brücke und der Schering Brücke. Ebenso kann eine gute Korrelation mit allen drei Messsystemen (Schering-, elektronische Brücke und PDC-Analyse) festgestellt werden. Die Abweichung, der durch die PDC-Messung erhaltenen Ergebnisse liegt unter 5%. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass der Messwert der PDC-Analyse von einer Gleichspannungsmessung resultiert und der „50Hz Wert“ errechnet wird. Untersuchungen und Tendenzen bei unterschiedlichen Spannungswerten sind dabei nicht möglich.

Bei der Verlustfaktormessung zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse beider Brücken. Der aus der PDC-Analyse ermittelte Wert zeigt jedoch große Abweichungen wodurch diese Ergebnisse mit Vorsicht zu bewerten sind, da auch hier der Wert des Verlustfaktors aus einer Gleichspannungsmessung berechnet wird. Ein Verlustfaktor in Abhängigkeit der Messspannung kann nicht angegeben werden.

Als Resümee der Untersuchungen kann die Aussage getroffen werden, dass die elektronische Brücke und die Schering Brücke gleichwertig sind.

Als Vorteil der elektronischen Brücke kann hervorgehoben werden, dass sämtliche Ergebnisse in digitaler Form vorliegen und dadurch eine einfache Weiterverarbeitung und Archivierung möglich ist. Durch die Ankopplung der Messfühler an das Messsystem mittels Lichtwellenleiter ist eine galvanische Trennung gegeben, wodurch das Messsignal hochspannungsseitig ausgekoppelt werden kann. Speziell für diese Anwendung erweist sich der Akkubetrieb als vorteilhaft. Neue Generationen der Schering Brücke ermöglichen einen automatischen Abgleich und erlauben die Kommunikation mittel PC.

Der Vorteil des PDC-Analysators liegt darin, dass keine zusätzliche Hochspannungsversorgung benötigt wird, und ebenso eine softwaremäßige Datenverarbeitung inkludiert ist.

Begleitende Teilentladungsuntersuchungen zeigen eine sehr gute Korrelation zwischen der festgestellten Teilentladungsaktivität und der Veränderung des Verlustfaktors bei diesen Prüfobjekten.

## 6 Literatur

[1] M. Farahani, H. Borsi, E. Gockenbach, M. Kaufhold; Zustandsdiagnose der Isolierung von rotie-

rotierenden Hochspannungsmaschinen durch dielektrische Antwortmessung im Frequenzbereich, Universität Hanover, Siemens AG Nürnberg

[2] Küchler, A, Hochspannungstechnik, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2005

[3] Lemke LDV-6  
<http://www.hvtechnologies.com/images/products/hv%20products/LDV-6.pdf>