

Bringen Sie Licht ins Dunkle: Erhalten Sie klaren Einblick in Ihre Durchführungen mithilfe erweiterter Diagnosemethoden

Zusammenfassung:

Die Diagnose von Durchführungen kann mit verschiedenen Methoden durchgeführt werden: von einfachen Sichtprüfungen oder konventionellen Verlustfaktormessungen bis hin zu modernen, ausgereiften dielektrischen Antwortmessungen über einen breiten Frequenzbereich. In diesem Artikel erklären wir die unterschiedlichen Isolationsarten von Durchführungen und zeigen, welche Probleme in Durchführungen typischerweise auftreten und mit welchen Diagnosemethoden diese Probleme identifiziert werden können. Jede Messung hat Vor- und Nachteile: Manche Messungen eignen sich gut für Vor-Ort-Messungen, andere sind eher für eine strenge Qualitätskontrolle von neuen Durchführungen gedacht. Fallstudien zeigen die Wirksamkeit erweiterter dielektrischer Messmethoden, um etwa Feuchte und Alterung zu erkennen.

Autoren:

Martin Anglhuber, OMICRON electronics GmbH, Österreich
Juan L. Velásquez Contreras, Hubert Göbel GmbH, Deutschland

1. Einführung

Durchführungen spielen eine entscheidende Rolle für Leistungstransformatoren und andere Betriebsmittel, da sie als Isolierung agieren und Strom in einen bzw. aus einem Leistungstransformator leiten. Sie sind rein passive Komponenten, die keine beweglichen Teile besitzen. Instandhaltungsmaßnahmen, wie der Austausch abgenutzter Teile, entfallen ebenso. Im Vergleich zu den anderen Transformatorbestandteilen sind Durchführungen auch vergleichsweise günstig. All diese Faktoren könnten den Eindruck entstehen lassen, dass die Zustandsdiagnose von Durchführungen nicht wirtschaftlich sei, da sie bei einem Ausfall einfach ausgetauscht werden könnten.

Allerdings wäre eine solche Schlussfolgerung zu kurzfristig: Ungefähr 41 % aller Ausfälle von Durchführungen in Hochspannungsleistungstransformatoren verursachen einen Brand oder eine Explosion des Transformators (

Abbildung 1) und enden somit in einem Totalausfall des Transformators [1]. Darüber hinaus sind Ausfälle von Durchführungen die Ursache von ungefähr 37 % aller Brände oder Explosionen von Leistungstransformatoren [1]. Dies zeigt, wie wichtig es ist, einen Ausfall von Durchführungen zu vermeiden, und zwar nicht nur, um ungeplante Ausfälle zu verhindern, sondern auch um Betriebsmittel vor ihrer Zerstörung zu schützen.

In diesem Artikel wird gezeigt, welche Probleme zu einem Ausfall von Durchführungen führen und wie Diagnosemethoden eingesetzt werden können, um diese Probleme frühzeitig zu erkennen.

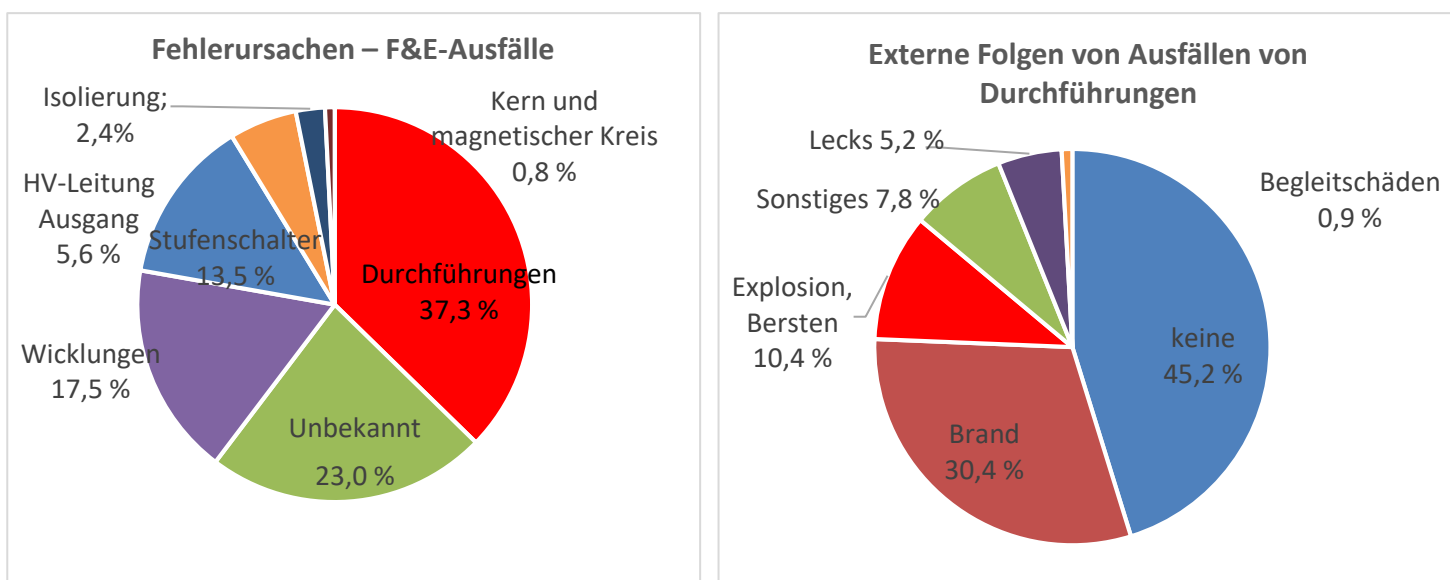


Abbildung 1. Ursachen von Bränden und Explosionen durch Fehler in Leistungstransformatoren (links) und externe Folgen von Durchführungsausfällen (rechts) [1]

2. Durchführungstypen und typische Probleme

2.1 Moderne Durchführungstypen

In den letzten Jahrzehnten wurden Durchführungen mit unterschiedlichen Technologien produziert, wobei sich auch die Qualität der verfügbaren Materialien verbessert hat. Zurzeit gibt es die folgenden nach der Art der Isolierung klassifizierten Durchführungstypen:

- Ölimprägniertes Papier (engl.: oil impregnated paper, kurz: OIP)
- Hartpapier (engl.: resin bonded paper, kurz: RBP)
- Harzprägniertes Papier (engl.: resin impregnated paper, kurz: RIP)
- Harzprägnierte Synthetik (engl.: resin impregnated fiber/synthetic, kurz: RIF/RIS)

Durchführungen aus ölprägniertem Papier (OIP) sind der häufigste Typ und ist seit vielen Jahren in Verwendung, entsprechend liegen sehr viele Erfahrungswerte vor. Ihre Isolierung besteht aus eng gewickelten, ölprägnierten Papierschichten, die empfindlich auf einen Ölaustritt reagieren. Dieser Durchführungstyp stellt besondere Anforderungen an den Transport, die Lagerung und die Einbaupositionen. Er weist auch eine höhere Brandgefahr bei einem Ausfall auf [2].

Hartpapier-Durchführungen (RBP) bestehen aus gewickeltem Papier, das mit einem Harz miteinander verklebt ist. In der Isolierung eingeschlossene Luft oder Lunker erhöhen die Teilentladungswerte während des Betriebs und begrenzen den maximalen Spannungswert für diesen Durchführungstyp. Darüber hinaus reagieren RBP-Durchführungen sehr empfindlich auf den Eintritt von Feuchtigkeit. Trotz der geringen Kosten für dieses Art von Durchführung haben die meisten Versorgungsunternehmen und Hersteller die Nutzung dieses Typs eingestellt [2].

Durchführungen mit harzprägniertem Papier (RIP) sind eine Verbesserung der RBP-Technologie, da das Papier vollständig mit Harz imprägniert wird. Auf diese Weise wird das Problem der Teilentladungen im Betrieb gelöst, entsprechend sind höhere Spannungswerte möglich. Ein weiterer Vorteil von RIP-Durchführungen sind ihre niedrigen dielektrischen Verluste. Trotz der Imprägnierung kann Feuchte beim Transport und der Lagerung eintreten [2].

Durchführungen mit harzprägniertem Synthetik (RIF/RIS) sind eine Weiterentwicklung der RIP-Technologie. Hier werden Kunstfasern (RIF) oder Kunstfasergewebe (RIS) anstelle von Papier mit Epoxidharz imprägniert. Dadurch wird die Isolierung sehr robust gegen eindringende Feuchte. Wie RIP-Durchführungen haben RIF- und RIS-Durchführungen sehr niedrige Teilentladungswerte, niedrige dielektrische Verluste und können in jeder Position eingesetzt und transportiert werden [3]. Da die RIF-/RIS-Technologie allerdings relativ neu ist, wird sie in vielen Normen und Prüfanleitungen noch nicht berücksichtigt.

2.2 Typische Probleme von Durchführungen

Wie bereits erwähnt, haben die unterschiedlichen Durchführungstechnologien Vorteile und Nachteile. Darüber hinaus sollte berücksichtigt werden, dass manche Probleme nur typisch für einen spezifischen Durchführungstyp sind. Ein Beispiel: Einige Probleme treten nur in OIP-Durchführungen und nicht in RIP-Durchführungen auf. Andere Probleme wiederum treten bei allen Durchführungstypen auf. Dies muss bei der Erstellung einer intelligenten Prüf- und Instandhaltungsstrategie für Durchführungen und Transformatoren berücksichtigt werden.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die gängigsten Probleme von Durchführungen und zeigt, welches Problem typischerweise bei welchem Durchführungstyp auftreten kann.

Tabelle 1. Potenzielle Probleme für unterschiedliche Durchführungstypen

Problem	Durchführungstyp				
	Ölprägniertes Papier (OIP)	Hartpapier (RBP)	Harzprägniertes Papier (RIP)	Harzprägnierte synthetische Stoffe (RIS)	Harzprägnierte Fasern (RIF)
Ölverluste, niedriger Ölstand	■	–	–	–	–
Erhöhter/hoher Kontaktwiderstand	■	■	■	■	■
Überhitzung	■	■	■	■	■
Teilentladungen	■	■	■	■	■
Teildurchschläge zwischen den kapazitiven Lagen	■	■	■	■	■
Risse	–	■	–	–	–
Defekte an Messanschlüsse	■	■	■	■	■
Feuchte	■	■	■	–	–

Ölverlust und ein niedriger Ölstand treten nur in OIP-Durchführungen auf. Dies ist aus zwei Gründen bedenklich: Erstens fehlt bei einem ausreichend hohen Ölverlust die Isolierflüssigkeit mindestens teilweise. Dies kann Teilentladungen und letztendlich einen Ausfall der gesamten Isolierung verursachen. Zweitens kann Feuchte eindringen, wenn Öl aus einer undichten Stelle der Durchführung austritt, was die Isolierung der Durchführung gefährdet.

Hohe Kontaktwiderstände können aufgrund fehlerhafter Kontakte auf beiden Seiten des Leiters der Durchführung auftreten, was normalerweise zu Überhitzung führt. Überhitzung kann auch entstehen, wenn der Durchführungsstrom höher als der Nennstrom ist. Eine Überhitzung hat oft weitere Folgen: Sie kann Kontakte oder die Isolierung schädigen, was wiederum zu einem Wärmedurchschlag der Isolierung führen kann.

Das Design der Durchführung erzeugt mit seinen kapazitiven Schichten ein homogenes elektrisches Feld in der Isolierung und vermeidet hohe lokale Feldstärken. Fehler, Hohlräume und Risse in der Isolierung können hohe lokale Feldstärken verursachen, die wiederum zu Teilentladungen führen. Diese Teilentladungen haben weitere Auswirkungen, wie lokale Schäden und Verkohlungen, was zu einem Durchschlag zwischen benachbarten kapazitiven Schichten führen kann. Als Folge daraus erhöht sich das Feld zwischen den übrigen Schichten. Eine weitere Folge ist die fortschreitende Beschädigung: Sie hört nicht bei einer Schicht auf, sondern greift auf die nächsten Schichten über. Beides führt zu einer höheren elektrischen Beanspruchung der verbleibenden Isolierung, was insbesondere bei transienten Überspannungen zu einem Isolationsversagen führen kann.

Der Messanschluss einer Durchführung ist mit dem äußeren Feldsteuerbelag der Durchführung verbunden. Im Betrieb muss er mit dem Erdpotential verbunden werden. Diese Verbindung wird oft über einen Federkontakt realisiert, welcher den Stift des Messanschlusses auf Erdpotential kontaktiert, wenn an ihm kein Messgerät angeschlossen ist. Der Anschluss wird normalerweise mit einer Schutzkappe gegen äußere Einflüsse verschlossen und versiegelt. Typische Probleme am Messanschluss sind:

- Undichte (oder fehlende) Schutzkappe, was zu einem Eindringen von Feuchte und zu Korrosion der Erdungsfeder führen kann.
- Fehlerhafter oder offener Kontakt der Erdungsfeder, was zu Entladungen und Lichtbögen führen kann.
- Fehlerhafter oder unzureichender Kontakt des Messanschlusses zum letzten Steuerbelag. Da transiente Spannungen sehr hohe kapazitive Ströme in diesem Pfad verursachen, können Teildefekte und Entladungen auftreten. Dies ist insbesondere in der Nähe von gasisolierten Schaltanlagen (GIS) ein Problem, an denen transiente Vorgänge häufig vorkommen.

Eindringende Feuchte ist für alle traditionellen Durchführungstypen (OIP, RBP und RIP) ein Problem, da die Isolierung aus Zellulose besteht, die Wasser absorbiert. Insbesondere für „Ersatzdurchführungen“ ist es ein typisches Problem, da diese oft über einen längeren Zeitpunkt auf unsachgemäße Weise gelagert werden. Feuchte ist grundsätzlich bedenklich, da sie die dielektrischen Verluste erhöht. Dies kann zu lokalen Wärmedurchschlägen führen, was wiederum Teilentladungen und einen Ausfall verursachen kann.

3. Methoden für die Diagnoseprüfung

Für die Zustandsbewertung von Durchführungen können unterschiedliche Methoden angewandt werden. Es können regelmäßige Diagnosemessungen und Sichtprüfungen durchgeführt werden. In einigen Fällen können aber auch Online-Systeme für eine kontinuierliche Überwachung installiert werden. In den letzten Jahrzehnten wurden neue Ansätze für regelmäßige Diagnosemessungen entwickelt, weshalb die Diagnosemethoden hier analog in konventionelle und erweiterte Methoden unterteilt werden.

3.1 Konventionelle Diagnosemethoden

Für die Zustandsbewertung von Durchführungen gibt es mehrere konventionelle Diagnosemethoden, die visuelle, thermische, chemische und dielektrische Ansätze verwenden. Tabelle 2 zeigt die Anwendbarkeit und Wirksamkeit dieser Methoden in Bezug auf die typischen Probleme von Durchführungen von Tabelle 1.

Tabelle 2. Wirksamkeit unterschiedlicher Verfahren für die Ermittlung spezifischer Durchführungsprobleme

Problem	Konventionelle Methoden				Erweiterte Methoden			
	Sichtprüfung	Wärmebild	Gas-in-Öl-Analyse (nur OIP-Durchführungen)	C und tan (δ) bei Netzfrequenz	C und tan (δ) bei unterschiedlichen Spannungen	C und tan (δ) zwischen 15 Hz ... 400 Hz	Dielektrische Frequenzantwort	Teilentladungsmessung
Ölverluste; niedriger Ölstand	++	+++						
Erhöhter Kontaktwiderstand		+++	+					
Überhitzung		+++	+					
Teilentladungen			+++					+++
Teildurchschläge zwischen den kapazitiven Lagen				+		++	+++	+++
Rissbildung				+		++	+++	+++
Defekte am Messanschluss	++				+++			
Feuchte				+		++	+++	

+ Niedrige Wirkung ++ Mittlere Wirkung +++ Hohe Wirkung

Messungen der Kapazität und des Verlustfaktors bei einer einzelnen Frequenz werden üblicherweise bei Netzfrequenz ausgeführt. Diese Messung ist ein jahrzehntelang angewandtes Verfahren. Eine Änderung der Kapazität weist auf einen Ausfall zwischen den kapazitiven Belägen hin und eine Erhöhung des Verlustfaktors lässt auch auf andere Probleme, wie Wasser, Alterung, verkohlte Teile oder fehlerhafte Kontakte, schließen. IEEE- und IEC-Normen für Durchführungen schreiben die Messung des Verlustfaktors bei Raumtemperatur als Stückprüfung für neue Durchführungen vor und legen Grenzwerte für die Verluste fest (Tabelle 3).

Tabelle 3. Grenzwerte und typische Werte für den Verlustfaktor (VF oder $\tan(\delta)$) und den Leistungsfaktor (LF) bei Netzfrequenz gemäß IEC 60137 und IEEE C57.19.01 bei $1,05 \text{ Um}\sqrt{3}$ und $20 \text{ °C}/70 \text{ °F}$ [3], [4]

	Ölimprägniertes Papier (OIP)	Hartpapier (RBP)	Harzprägniertes Papier (RIP)
Tan δ (Quelle IEC 60137)	< 0,7 %	< 1,5 %	< 0,7 %
LF (Quelle IEEE C57.10.01)	< 0,5 %	< 2 %	< 0,85 %
Typische Werte für neue Durchführungen	0,2 % - 0,4 %	0,5 % - 0,6 %	0,3 % - 0,4 %

Eine weitere gängige Praxis ist die Durchführung von Wärmebildaufnahmen von Durchführungen [5]. Mit diesem Verfahren können heiße Bereiche der Durchführungen oder Bereiche mit erhöhtem Kontaktwiderstand identifiziert werden. Hierzu zählt zum Beispiel die Verbindung der Durchführung mit den Sammelschienen der Anlage. Ein weiterer Vorteil der Wärmebildmessung für OIP-Durchführungen ist, dass auch niedrige Ölstände ermittelt werden können.

Insbesondere für OIP-Durchführungen ist die Gas-in-Öl-Analyse (engl.: dissolved gas analysis, kurz: DGA) eine alternative konventionelle Diagnosemethode. Damit können zahlreiche Probleme, wie Entladungen und Überhitzung, identifiziert werden. In Anbetracht der kleinen Ölmenge in Durchführungen sind besondere Techniken zur Probeentnahme erforderlich. Außerdem muss die Auswertung der Ergebnisse entsprechend angepasst werden. Weitere Informationen zur DGA– insbesondere für Durchführungen – sind unter [6] zu finden.

3.2 Erweiterte Diagnosemethoden

Auf der Grundlage konventioneller Diagnosemethoden wurden unterschiedliche erweiterte Messmethoden entwickelt. Tabelle 2 zeigt deren Anwendbarkeit und Wirksamkeit in Bezug auf die unterschiedlichen Probleme von Durchführungen.

Eine verbesserte Version der dielektrischen Messung bei reiner Netzfrequenz ist die Messung über einen breiten Frequenzbereich rund um die Netzfrequenz. Der typische Frequenzbereich liegt dabei zwischen 15 Hz und 400 Hz. Aufgrund des größeren Frequenzbereiches kann die Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften analysiert werden. Eindringende Feuchte beeinflusst insbesondere niedrigere Frequenzen: Eine Messung bei 15 Hz reagiert somit empfindlicher auf das Eindringen von Feuchte als eine Messung bei Netzfrequenz.

Tabelle 4 zeigt die indikativen Grenzwerte bei unterschiedlichen Frequenzen der CIGRE-Empfehlungen für die Instandhaltung von Leistungstransformatoren [7].

Tabelle 4. Indikative $\tan(\delta)$ -Grenzwerte für Durchführungen bei 20 °C [7]

Frequenz	Ölimprägniertes Papier (OIP)		Hartpapier (RBP)		Harzprägniertes Papier (RIP)	
	neu	gealtert	neu	gealtert	neu	gealtert
15 Hz	< 0,5 %	< 0,7 %	< 0,7 %	< 1,5 %	< 0,6 %	< 0,7 %
50 Hz / 60 Hz	< 0,4 %	< 0,5 %	< 0,6 %	< 1,0 %	< 0,5 %	< 0,5 %
400 Hz	< 0,5 %	< 0,7 %	< 0,7 %	< 1,5 %	< 0,6 %	< 0,7 %

Die so genannte Spannungsanstiegsprüfung, auch bekannt als „Tip-Up-Test“, ist eine Messung bei einer Frequenz mit ansteigender Spannung. Damit können die dielektrischen Eigenschaften in einem Spannungsbereich, meistens bei

Netzfrequenz, gemessen werden. Messungen von Durchführungen bei unterschiedlichen Spannungen können Probleme wie fehlerhafte Kontakte von Messanschlüssen, Teilentladungen oder einen bevorstehenden Durchschlag zwischen kapazitiven Schichten aufdecken. Bei einem Kontaktproblem nimmt der Verlustfaktor üblicherweise mit zunehmender Spannung ab, weil die Lichtbogenbildung bei höheren Spannungswerten Pfade überbrückt. Eine hohe Teilentladungsaktivität, die nur oberhalb der Einsetzspannung vorkommt, kann den Verlustfaktor aufgrund von Ionisierungsverlusten erhöhen. Deshalb ist jede Änderung des Verlustfaktors ein Anzeichen für ein potenzielles Problem.

Breitbandige dielektrische Messungen werden eingesetzt, um die dielektrische Eigenschaft eines Betriebsmittels in einem sehr breiten Frequenzbereich zu messen, wobei dieser Bereich normalerweise von niedrigen kHz-Werten über wenige mHz bis hin zu μ Hz-Werten reichen kann. Der große Vorteil der Verwendung eines solchen breiten Frequenzbereichs ist die hohe Empfindlichkeit für verschiedene Einflussgrößen, insbesondere für Feuchte [6]. Mit dieser Methode kann auch der absolute Wassergehalt in Öl-Papier-Isolierungen ermittelt werden, z. B. in Leistungstransformatoren und OIP-Durchführungen [8]. Diese Messung erkennt bereits kleine Unterschiede im Wassergehalt und kann somit auch für die Qualitätskontrolle neuer Durchführungen eingesetzt werden. Da die dafür verwendete Datenbank nur für reine Öl-Papier-Isolierungen gültig ist, ist eine Bestimmung des Wassergehalts für andere Durchführungstypen wie RBP und RIP nicht möglich [9]. Allerdings beeinflusst der Wassergehalt auch die dielektrischen Eigenschaften dieser Isolierungen, weshalb kleine Änderungen durch einen Vergleich unterschiedlicher Messungen erkannt werden können.

Ein weitere erweiterbare Diagnosemethode ist die Messung von Teilentladungen an Durchführungen. Hierfür benötigt man eine Hochspannungsquelle für die Prüfspannung, die im Bereich der Nennspannung liegt. Aufgrund des hohen Aufwands der Prüfung werden Messungen von Teilentladungen an Durchführungen meistens beim Hersteller oder in besonderen Fällen durchgeführt. Als Alternative kann ein Monitoring-System für Online-Teilentladungsmessungen installiert werden.

4. Fallstudien für die Zustandsdiagnose von Durchführungen

Die folgenden Fallstudien zeigen, wie unterschiedliche Ausfälle mit den in diesem Artikel beschriebenen erweiterten dielektrischen Diagnosemethoden erkannt werden können. Alle Daten wurden anonymisiert, somit können an dieser Stelle keine Angaben zum spezifischen Modell oder dem Hersteller gemacht werden. Aus demselben Grund werden auch keine Fotos gezeigt.

4.1 Feuchte RIP-Durchführung

Das erste Beispiel zeigt mehrere Messungen an 123 kV-RIP-Durchführungen. Die Messungen wurden mit OMICRONs CPC 100 in Kombination mit dem Hochspannungsmodul CP TD1 durchgeführt, das bis 12 kV bei Netzfrequenz und bis 2 kV zwischen 15 Hz und 400 Hz liefern kann. Die Messungen erfolgten bei 2 kV. Der Hochspannungsausgang war am Leiter angeschlossen, die Messung erfolgte am Messanschluss. Flansch sowie Kessel wurden mit Guard verbunden. Alle fünf gemessenen Durchführungen sind in etwa gleich alt und vom selben Typ. Die Messungen der dielektrischen Kapazität und des Verlustfaktors erfolgten an allen Durchführungen zwischen 15 Hz und 400 Hz (Abbildung 2). Insbesondere bei niedrigen Frequenzen, die am empfindlichsten auf den Einfluss von Feuchte reagieren, ist die Abweichung der Verluste von Durchführung 1N im Vergleich zu den anderen Durchführungen eindeutig zu erkennen. Es wurde vermutet, dass die Durchführung während der Lagerung feucht wurde, was eines der typischen Probleme bei RIP-Durchführungen ist. Aus diesem Grund wurde empfohlen, diese Durchführung vor der Inbetriebnahme des Transformators zu ersetzen. Dieses Beispiel zeigt den Vorteil einer Messung bei unterschiedlichen Frequenzen im Vergleich zu einer einzelnen Messung bei Netzfrequenz. Dabei wäre die Abweichung zwar ebenfalls sichtbar geworden, allerdings weniger signifikant.

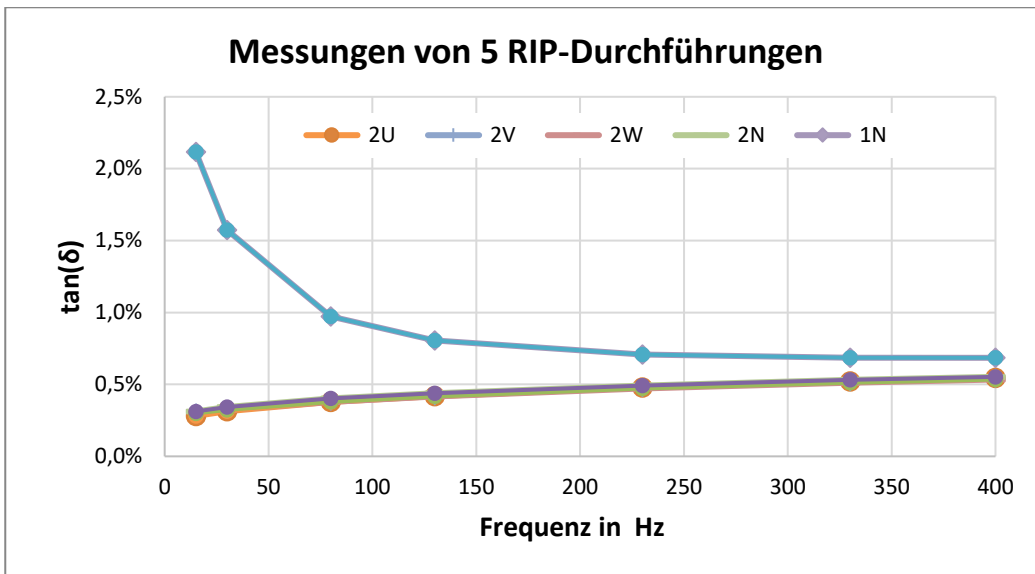


Abbildung 2. Messung des dielektrischen Verlusts an 123 kV-RIP-Durchführungen

4.2 Gealterte RBP-Durchführungen

Die zweite Fallstudie zeigt $\tan(\delta)$ -Messungen an drei 245 kV-RBP-Durchführungen, für die ebenfalls OMICRONs CPC 100 in Kombination mit dem Hochspannungsmodul CP TD1 in einem Frequenzbereich von 15 Hz bis 400 Hz verwendet wurde. Die Messungen erfolgten bei 2 kV. Der Hochspannungsausgang wurde am Leiter angeschlossen, die Messung erfolgte am Messanschluss. Flansch und Kessel waren mit Guard verbunden. Referenzmessungen wurden acht Jahre früher mit demselben Prüfsystem durchgeführt. Dadurch ist es möglich, die Änderung der Verluste während dieses Zeitraums aufzuzeigen (Abbildung 3). Auch wenn keiner der Messwerte die Grenzwerte der Normen (Tabelle 3) überschreitet, deutet ein erhöhter $\tan(\delta)$ insbesondere bei niedrigen Frequenzen auf Alterung hin. Ein Phänomen, das für alle Durchführungen eindeutig sichtbar ist. Insbesondere die Durchführung an Phase V zeigt eine deutliche Alterung. Im Vergleich dazu weist die zum Zeitpunkt der Referenzmessungen schlechteste Durchführung an Phase W die geringsten Veränderungen auf.

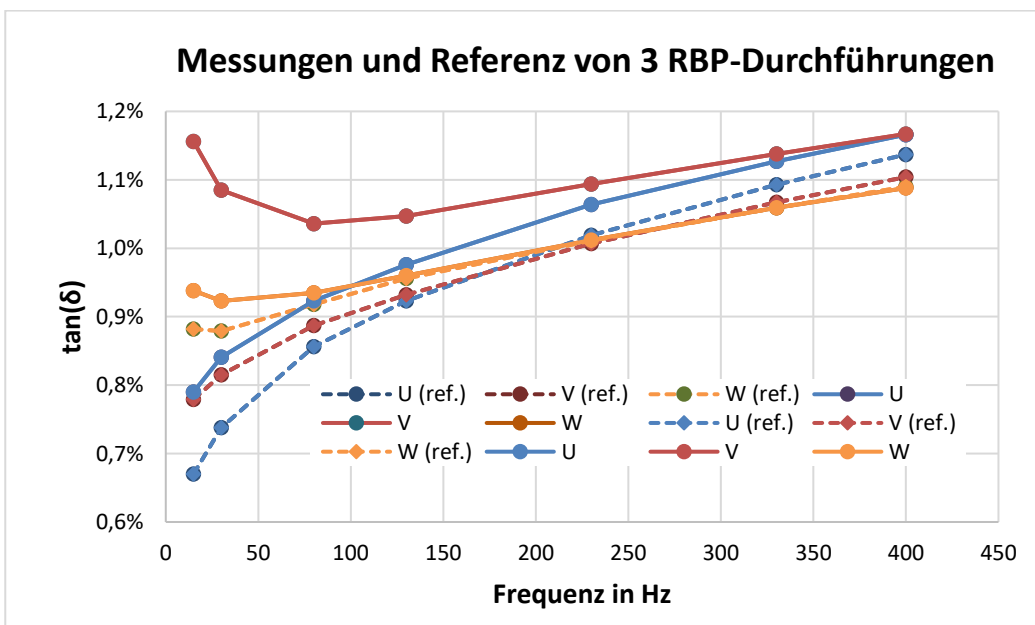


Abbildung 3. Dielektrische Messungen und Referenzmessungen an drei RBP-Durchführungen

4.3 Kontaktproblem am Messanschluss

Tan(δ)-Messungen von zwei 123 kV-RBP-Durchführungen desselben Typs wurden mit OMICRONs CPC 100 in Kombination mit dem CP TD1 bei 50 Hz mit ansteigender Spannung durchgeführt. Für die Messungen wurde der Hochspannungsausgang am Leiter angeschlossen. Die Messungen wurden am Messanschluss durchgeführt, wobei Flansch und Kessel mit Guard verbunden waren. Das Ergebnis war ein abnehmender tan(δ) bei höheren Spannungen für Durchführung C (Daten von [8]). Dies kann auf Kontaktprobleme am Messanschluss hinweisen [8], die durch eine fehlerhafte Versiegelung oder eine fehlende, defekte oder nicht korrekt angebrachte Schutzkappe zurückgeführt werden können. Eine Messung mit einem einzigen Spannungswert, z. B. bei 10 kV, hätte nur eine leichte Abweichung von den Werten ergeben.

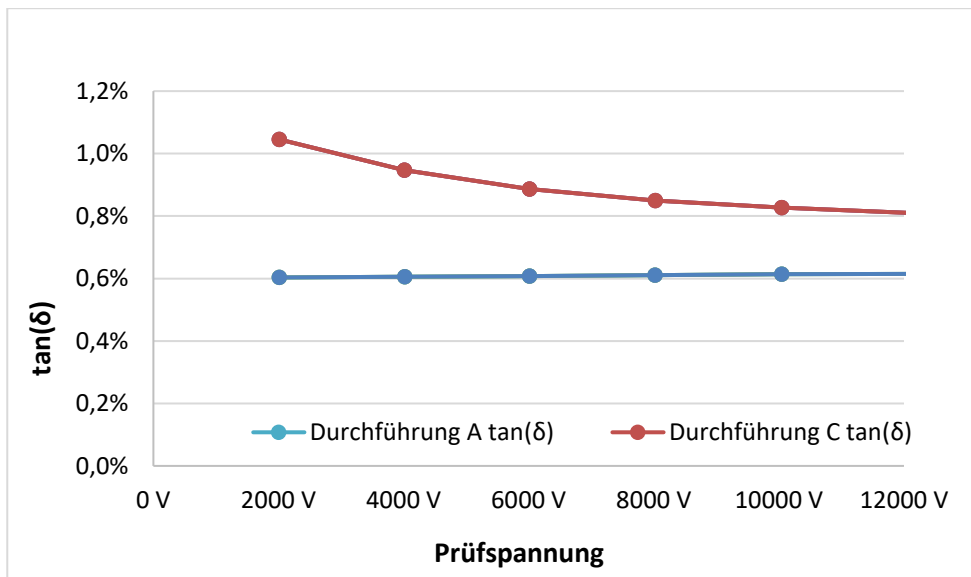


Abbildung 4. Tan(δ)-Messungen von zwei 123 kV-RBP-Durchführungen mit unterschiedlichen Spannungswerten (Daten von [8])

Fazit

Die Zustandsdiagnose von Durchführungen spielt für Betreiber von HS-Betriebsmitteln eine wichtige Rolle. Ziel ist es, die Risiken von Durchführungsausfällen zu minimieren. Mit einer umfassenden Zustandsbewertung können die Durchführungen mit dem kritischsten Zustand identifiziert werden. Auf diese Weise können Instandhaltungsmaßnahmen nach ihrer Dringlichkeit geplant werden. Hierunter fällt zum Beispiel der Austausch von Durchführungen auf wirtschaftliche Weise.

Für eine umfassende Zustandsbewertung müssen alle potenziellen Probleme berücksichtigt werden. Deshalb sollten mehrere Diagnosemethoden angewendet werden. Einige konventionelle Methode haben sich in der Vergangenheit bewährt und werden von den meisten Netzbetreibern auch heute noch als Standardverfahren eingesetzt. Erweiterte Methoden sind überwiegend optimierte konventionelle Verfahren, mit denen spezifische Probleme besser erkannt werden können. Diese Methoden schließen sich jedoch nicht gegenseitig aus. Die meisten erweiterten Methoden beinhalten sogar traditionelle Messwerte. Somit können Nutzer mit viel Erfahrung in der Anwendung konventioneller Methoden problemlos von den Vorteilen der neuen Messmethoden profitieren.

Die in diesem Artikel vorgestellten Fallstudien zeigen vor allem die erhöhte Empfindlichkeit der erweiterten dielektrischen Diagnose im Vergleich zur konventionellen Messung der Kapazität und des Verlustfaktors bei Netzfrequenz auf.

Literatur

- [1] CIGRE, "TB 642 - Transformer Reliability Survey," 2015.
- [2] D. Egger, U. Krüsi, A. Dais, Z. Zic, W. Odermatt, J. Czyzewski und J. Rocks, „New paper-free insulation technology for dry high-voltage condenser bushings,“ in *CIGRE*, Paris, 2012.
- [3] IEC, *60137 - Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V*, IEC, 2003.
- [4] *IEEE Std C57.19.01: Performance Characteristics and Dimensions for Outdoor Apparatus Bushings*, 2000.
- [5] M. B. Goff, „Substation Equipment (Bushings),“ in *InfraMation*, 2001.
- [6] IEC, *TS 61464:1998 - Insulated bushings - Guide for the interpretation of dissolved gas analysis (DGA) in bushings where oil is the impregnating medium of the main insulation (generally paper)*, IEC, 1998.
- [7] CIGRE, „TB 445: Guide for Transformer Maintenance,“ 2011.
- [8] M. Krueger, A. Kraetge, M. Puetter und L. Hulka, „New diagnostic tools for high voltage bushings,“ in *CIGRE VI Workspot – international workshop on power transformers*, Foz do Iguacu, Brazil, 2010.
- [9] M. Krueger und M. Koch, „A fast and reliable dielectric diagnostic method to determine moisture in power transformers,“ in *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 2008.

Autoren



Martin Anghuber schloss 2007 das Studium der Elektro- und Informationstechnik an der TU München mit dem Diplom ab. Von 2007 bis 2011 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Hochspannungs- und Anlagentechnik der TU München und beschäftigte sich mit der Untersuchung polymerer Nanokompositwerkstoffe als Isolierstoff sowie der Modernisierung der Hochspannungslabore des Instituts. 2012 wurde er dort zum Dr.-Ing. promoviert. Seit 2012 arbeitet er bei OMICRON als Produktmanager im Bereich der dielektrischen Diagnose.



Juan L. Velásquez Contreras kommt aus Venezuela. 2002 erhielt er seinen Bachelor of Science in Elektrotechnik von der UNEXPO (Nationale Experimentell Polytechnische Universität) in Venezuela. Nach seinem Abschluss arbeitete er als Instandhaltung- und Projekt Ingenieur für HS-Betriebsmittel bei CVG Venalum in Venezuela. 2006 kam Juan zum CITCEA (Zentrum für technologische Innovationen) in Spanien. Als Projekt Ingenieur arbeitete er an der Implementierung von Monitoring-Systemen für die Zustandsüberwachung von Leistungstransformatoren. Von 2008 bis 2011 war er Produktmanager für Diagnoselösungen bei OMICRON electronics. 2011 erhielt er seinen PhD auf dem Gebiet des Asset Management von Leistungstransformatoren an der Polytechnischen Universität von Katalonien in Barcelona, Spanien. Von 2011 bis 2016 arbeitete Juan als Ingenieur für HGÜ-Technologie bei der Amprion GmbH. Seit August 2016 ist er als Entwicklungs- und Servicetechniker bei der Hubert Göbel GmbH tätig.

OMICRON ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das innovative Prüf- und Diagnoselösungen für die elektrische Energieversorgung entwickelt und vertreibt. Der Einsatz von OMICRON-Produkten bietet höchste Zuverlässigkeit bei der Zustandsbeurteilung von primär- und sekundärtechnischen Betriebsmitteln. Umfassende Dienstleistungen in den Bereichen Beratung, Inbetriebnahme, Prüfung, Diagnose und Schulung runden das Leistungsangebot ab.

Kunden in mehr als 140 Ländern profitieren von der Fähigkeit des Unternehmens, neueste Technologien in Produkte mit überragender Qualität umzusetzen. Servicezentren auf allen Kontinenten bieten zudem ein breites Anwendungswissen und erstklassigen Kundensupport. All dies, zusammen mit einem starken Netz von Vertriebspartnern, ließ OMICRON zu einem Marktführer der elektrischen Energiewirtschaft werden.

Mehr Informationen, eine Übersicht der verfügbaren Literatur und detaillierte Kontaktinformationen unserer weltweiten Niederlassungen finden Sie auf unserer Website.