

Betriebserfahrungen und Instandhaltungsstrategien bei Durchführungen

Michael Gabriel, Profit Center Leiter Durchführungen, Micafil AG, Zürich

1 EINLEITUNG

Ziel dieses Dokumentes ist, durch Wissen über optimalen Unterhalt, Erkennen des Ist-Zustandes der Durchführung, Früherkennung von Fehlerquellen, richtige Empfehlungen und geeignete Massnahmen die Betriebszeit der Durchführungen und die Verfügbarkeit des Systems zu steigern.

Grundsätzlich sind alle Isoliersysteme einer gewissen Alterung als Folge der zeitlichen, elektrischen, thermischen und mechanischen Beanspruchungen unterworfen. Als Dimensionierungsbasis für die Lebensdauer von mindestens 25 Jahren werden in der Regel die Betriebsfeldstärken zu Grunde gelegt. Die zulässigen Betriebsfeldstärken variieren je nach Isoliersystem.

Die Resultate aus vielen tausend Messungen zeigen, dass schadhafte oder erhöht gealterte Isolationen entdeckt werden können und durch die Kenntnis des Isolationszustandes die Betriebsdauer unter Umständen wesentlich verlängert werden kann.

Auf der andern Seite sind die Erfahrungswerte aus dem Betrieb sehr wichtig und notwendig um eine ständige Weiterentwicklung auf dem Gebiet von neuen Durchführungs-Generationen, neuen Isolationssystemen und den Objekt- und Personenschutz zu erreichen.

Um den Isolationszustand richtig zu analysieren und zu diagnostizieren, ist ein breites Informationsband nötig. Umfangreiche Erfahrungswerte sind vor allem von Hartpapier-Durchführungen vorhanden, an denen Micafil nun seit 28 Jahren neben den Nachmessungen im Labor auch vor-Ort-Messungen durchführt.

2 ANFORDERUNGEN AN DIE BETREIBER

Ziel eines jeden Betreibers ist es, eine technische und wirtschaftliche Optimierung der Netze zu erlangen um den langfristigen wirtschaftlichen Erfolg sicherzustellen. Es gilt Strategien zu erarbeiten um die Verfügbarkeit der Systeme bei minimiertem Kostenaufwand zu erreichen.

Um die strategische Lücke zwischen geforderter Verfügbarkeit und Kostenreduktion zu schliessen, werden die verschiedenen Instandhaltungsstrategien verfolgt:

- Ereignisorientiert
- Vorbeugend
- Zustandsorientiert
- Wichtigkeitsorientiert

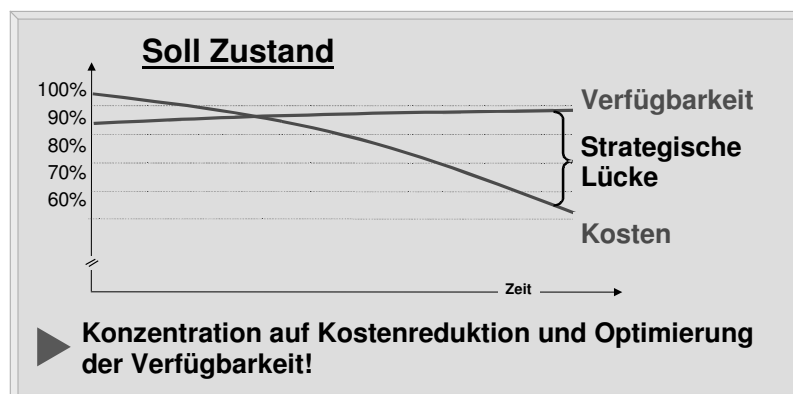


Bild 1: Soll-Zustand der Verfügbarkeit in Abhängigkeit der Kosten

Diese Strategien gelten für alle Systeme und haben einen Einfluss auf die einzelnen Komponenten, wie auch auf die Durchführungen. Der Zustand jeder einzelnen Komponente hat einen direkten Einfluss auf das System und somit auf die Versorgungsqualität.

Für eine bestmögliche Zustandserfassung ist ein umfassender Kenntnisstand folgender Daten notwendig:

- Kenntnisse der Bauweise und Empfindlichkeiten einer Durchführung
- Kenntnisse der Charakteristiken der Isoliermaterialien
- Originalwerte der Gütewerte Verlustfaktor $\tan\delta$ und Kapazität sowie des TE-Verhaltens
- Interpretation der Qualität der Neuwerte und Vergleichswerte aus gleicher Fabrikationsperiode
- Kenntnisse der Messmethode und möglicher Messwert-Beeinflussungen
- Interpretation von Nachmesswerten, Erkennen von Trends oder Defekt-Szenarien
- Vergleichsdaten von Durchführungen aus der gleichen Station, dem gleichen Trafo
- Kenntnisse über die Betriebsgeschichte, Vorfälle im Betrieb, frühere Manipulationen
- Kenntnisse über die Umwelt (Verschmutzung, atmosphärische Bedingungen, el. Fremdfelder)

Die wichtigkeitsorientierte Instandhaltung kann in der Praxis folgendermassen dargestellt werden:

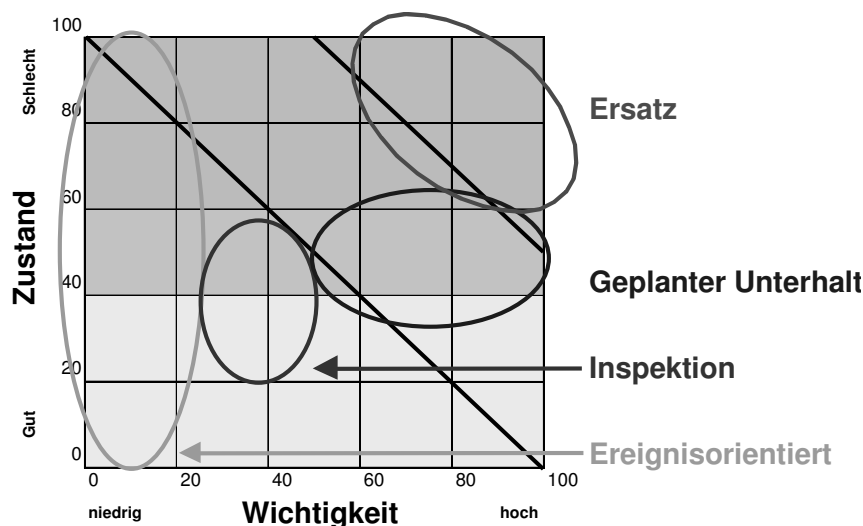


Bild 2: Betriebsmittel nach Zustand und Wichtigkeit

3 HAUPTISOLATION UND CHARAKTERISTIK VON DURCHFÜHRUNGEN

Man beschränkt sich in dieser Abhandlung auf die Hauptisolation und verzichtet auf die Berücksichtigung der mechanischen Einflussfaktoren.

3.1 Hartpapier-Durchführungen (HP)

Hartpapier besteht aus mit Kunstharz beschichtetem Isolierpapier, das unter Hitze und Druck verklebt wird. Die Micafil-Markennamen lauten *Superresocel* (Kresolharz) bzw. *Drysomic* (Epoxidharz). Die Feldsteuerung erfolgt durch halbleitende, zylindrische Kondensatorbeläge.

- Hartpapier gehört in die Wärmeklasse E (Dauertemperatur 120°C).
- Luftanteil im Isolierkörper 15-25 Volumen% (fein verteilt in der Zellulose und in Schwundrissen).
- $\tan\delta$ neu 0,50 bis 0,70%, Anstieg des $\tan\delta$ mit der Temperatur bis ca. 60 °C gering.
- TE bei Betriebsspannung mit Superresocel bis 150 pC, mit Drysomic < 5 pC.

3.2 Durchführungen mit ölprägnierter Isolation (WP)

Der gewickelte Isolierkörper aus reinem Kraftpapier wird nach einer Trocknungsperiode mit Isolieröl niedriger Viskosität unter Vakuum imprägniert. Die Feldsteuerung erfolgt durch halbleitende oder metallische Kondensatorbeläge. Die Weichpapier-Durchführung benötigt am Unterteil einen dicht abschliessenden Überwurf, der in der Regel aus Porzellan besteht. Das Öl ist hier auch aktive Isolation.

- Weichpapier gehört in die Wärmeklasse A (Dauertemperatur 105°C).
- Isolierkörper kompakt, luftfrei und ölprägniert.
- Verlustfaktor $\tan\delta$ zwischen 0,2 und 0,4%, kein Anstieg des $\tan\delta$ mit der Temperatur bis ca. 70°C.
- Ölqualität des Füllöls < 10 ppm H₂O, Durchschlag > 70kV/2,5mm, entgast.
- TE-frei bis doppelte Betriebsspannung.

3.3 Harzprägnierte Durchführungen (RIP)

Die neueste Entwicklung im Bereich der Durchführungen ist derzeit der Durchführungskörper aus harzprägniertem Papier. Dabei wird ein Wickel aus Krepppapier mit entsprechenden Aluminiumeinlagen zur Potentialsteuerung vakuumgetrocknet und unter Vakuum mit Epoxidharz imprägniert. Bei diesem Verfahren erreicht man völlig luftfreie Durchführungskörper, die bis zu einem Mehrfachen der Phase-Erde-Spannung teilentladungsfrei sind. Mit dieser Methode wurden vor ca. 25 Jahren erste Prototypen produziert. Serienmässig werden diese RIP-Durchführungen seit gut 20 Jahren hergestellt. Bei Freiluftdurchführungen kann der Zwischenraum zwischen Isolator und Durchführungskörper mit Öl, SF₆ oder einer Trockenfüllung gefüllt werden. Die Anzahl der RIP-Durchführungen, die pro Jahr hergestellt werden, nahm in den letzten Jahren erheblich zu.

- Diese Isolation gehört in die Wärmeklasse E (Dauertemperatur 120°C).
- Öl- und gasdichter Feststoff-Isolierkörper, völlig luftfrei.
- Verlustfaktor $\tan\delta$ neu zwischen 0,25 und 0,45%, kein Anstieg des $\tan\delta$ mit der Temperatur bis ca. 70°C.
- TE-frei bis doppelte Betriebsspannung.

Dies resultiert aus den verschiedenen Vorteilen, die diese Durchführungen gegenüber allen anderen Typen vorweisen können:

- Hauptisolation vollständig ölfrei - keine Überwachung notwendig
- Bei Einsatz einer Trockenfüllung - keine Einschränkung der Einbaulage
- Kein zusätzlicher Unterteilüberwurf nötig, da Wickelkörper dicht
- Durch Eigenstabilität bei Innenraumanwendung kein Isolator notwendig
- Einsatz als Öl-SF₆- oder Öl-Öl-Durchführung ohne Isolatoren möglich
- Mit Verbundisolator wird eine sehr hohe mechanische Stabilität erreicht, wodurch die Durchführungen erdbebensicher werden
- Bei Trockenfüllung und Verbundisolator - Gewichtsersparnis ca. 20%, bei Wanddurchführungen bis zu 40%
- Sehr einfaches Handling bei der Montage durch geringes Gewicht und Ölfreiheit
- Bei einer fein gesteuerten Durchführung ist die Potentialverteilung deutlich besser über den ganzen Isolator verteilt, sodass Verschmutzungen auf der Oberfläche keinen so grossen

Einfluss haben wie bei grob gesteuerten Durchführungen. Dazu zusätzlich bringt der Einsatz eines Verbundisolators eine wesentliche Verbesserung der Eigenschaften der Durchführung.

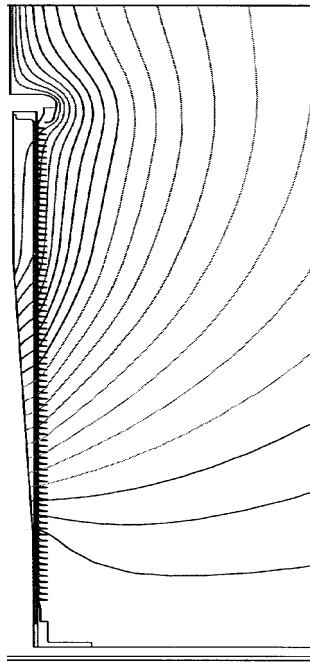


Bild 3: Schnittbild einer feingesteuerten Durchführung mit harzprägniertem Papier

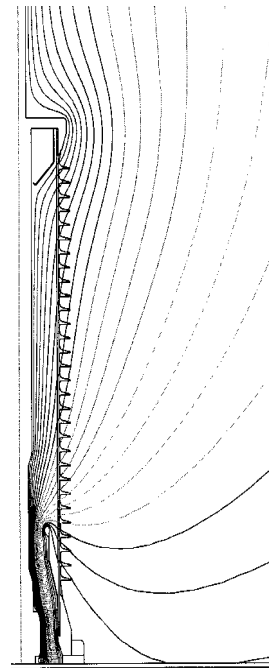


Bild 4: Äquipotentiallinien an einer grob gesteuerten, gasisolierten Dfg.

4 VERURSACHER UND MERKMALE DER ALTERUNG

4.1 Hartpapier-isolierte Durchführung

- Risse durch Temperaturzyklen
- Abbau des Harzes oder des Papiers (Erosion) durch starke Teilentladungen
- Versteuerung der Spannungsverteilung durch ungleichmässigen Anstieg der Kapazitätswerte infolge Eindringen von Öl und der Verdrängung der naturgemäss im Hartpapier vorhandenen Luft (lokale Erhöhung der diel. Konstante). Öl dringt in der Regel durch die entstandenen Risse ein. Die Tränkung des harzbeschichteten Papiers weitet sich von den Rissen beginnend aus
- Umwandlung des in den Körper eingedrungenen Öls in X-Wachs als Folge starker Teilentladungen; Eindringen von Feuchtigkeit in die Isolation, Verschlechterung von Potentialverbindungen (Ölfilm bei Federkontakten, Risse)
- Die Isolation kann am Trägerrohr oder an den Alubelägen erd- und hochspannungsseitig verrutschen (Schwächung der Klebfestigkeit durch das eingedrungene Öl), dadurch können Unterbrüche an den Potentialverbindungen entstehen
- Erhöhung des Verlustfaktors $\tan \delta$ in Funktion der Temperatur als Folge der Alterung
- Erhöhung des Verlustfaktors $\tan \delta$ in Funktion der Temperatur als Folge eingedrungener Feuchtigkeit

Durch höhere dielektrische Verluste wird mehr Eigenwärme erzeugt. Durch weitere Faktoren wie Sonnenbestrahlung oder hohe Temperaturen an den Stromverbindungen steigt dann das Risiko einer thermischen Instabilität, was zum Wärmedurchschlag führen kann.

4.2 Ölimprägnierte Durchführung

Wegen des grösseren Wärmetransportes vom Transformator zur Durchführung durch die natürliche Ölzirkulation im Innern der Durchführung entstehen wesentlich höhere Durchschnittstemperaturen der Durchführungs-Isolation als bei trockenen Isolationen.

- Teilentladungen in der Isolation z.B. infolge Lufteinschlüsse durch falsche Transport- oder Ein-baumanipulationen, welche eine Beschädigung des Isolieröls und Papiers zur Folge haben
- Schmutzablagerungen im Fussbereich (im Bereich hoher Feldstärken)

4.3 Harzprägnierte Durchführungen

Bis heute sind keine Erkenntnisse betreffend Alterung vorhanden. Gründe dafür sind:

- Trockenlaufeigenschaften sind jederzeit gewährleistet, auch bei Verlust des Isolators freiluftseitig.
- RIP Material verfügt kaum über Alterungserscheinungen in Bezug auf mechanische und elektrische Eigenschaften, auch bei erhöhten Temperaturen.
- Die hohe Temperaturbeständigkeit von dauerhaft 120°C machen einen breiten Einsatz möglich
- Die mechanische Beständigkeit des RIP Materials (Nachgewiesen bei Temperaturzyklen von bis zu 145 °C) lässt ein vielfältiges Portfolio zu.

5 MESSMETHODEN UND MESSERFAHRUNGEN

Durch viele Nachprüfungen im Labor während Reparaturen und Revisionen, auch von bereits vor Ort gemessenen Durchführungen, konnte ein umfangreicher und breit gefächelter Wissensstand aufgebaut werden.

5.1 Messmethoden

Bei allen drei beschriebenen Isolationssystemen

- Verlustfaktor- und Kapazitätsmessung in regelmässigen Spannungsschritten
- Im Labor zusätzlich Teilentladungsmessung
- Thermovisuelle Messung bei Verdacht auf Heissstellen
- Wassergehaltsbestimmung des Öls sowie Gas-in-Öl-Analyse (bei WP-Typen)
- Auf Verdacht hin auch weitere Messungen im anschliessenden Transformatorraum

In einzelnen Fällen werden sich in Zukunft auch TE-Messungen vor Ort anbieten.

5.2 Messerfahrung bei vor-Ort-Messungen

- Mit den heutigen Messmethoden sind Durchführungen aller Isolationssysteme überwachbar
- Die Interpretation bei trockenen Isolationen ist etwas einfacher
- Durch regelmässige Messungen können Veränderungen, Alterszustand und Lebenserwartung ermittelt werden
- Je höher die Informationsbreite, desto präziser ist die Bewertung
- Sauberes Reinigen der Isolatoren ist unerlässlich; verschmutzte Isolatoren verursachen falsche Messwerte oder können unter Umständen sogar gesunde Isolationen vortäuschen

- Bei zu niedrigen Temperaturen ($< \text{ca. } 12\text{ }^{\circ}\text{C}$) sollte nicht gemessen werden, da die Oberflächen beim Reinigen schlecht trocknen
- Referenzmessungen im Neuzustand sind eine enorm wichtige Basis. Man erkennt: Die Differenzen zwischen Labor- und Feldbedingungen, d.h. die Einflüsse durch die Nachbartrafos, umliegende Leitungen, Abstände gegen Erde und Hochspannung usw.
- Das Notieren aller Daten wie Temperatur (Luft und Trafoöl), Transformatordaten, Umgebung, Wetter, Abstände, ist sehr wichtig
- Informationen über Betriebsstillstände, Manipulationen müssen erfragt werden
- Auch die durchschnittlichen Betriebstemperaturen des Transformators sind wichtig
- Sorgfältige visuelle Kontrollen anlässlich von Feldmessungen bringen zusätzliche wichtige Informationen über den Alterungszustand und sind ein Bestandteil der Bewertung

Kapazitäts-Korrektur wegen unterschiedlichem Einbau	
Un [kV]	delta C (pF)
123	ca. 4
245	ca. 6
420	ca. 8

Temperatur-Korrektur der Kapazität	
Superresocel	0,08 % / $^{\circ}\text{C}$
Drysomic	0,06 % / $^{\circ}\text{C}$
Weichpapier	0,03 % / $^{\circ}\text{C}$
Harz-imprägn.	0,03 % / $^{\circ}\text{C}$

5.3 Messerfahrung bei Nachmessungen im Labor

- Teilentladungswerte bei Hartpapier-Durchführungen sind oft besser als im Neuzustand (Risse füllen sich mit Öl)
- Teilentladungswerte von ausgebauten Durchführungen aus dem Betrieb verschlechtern sich in Funktion mit der Zeit (Öl läuft aus den Rissen)
- Evakuieren von Hartpapier-Durchführungen am Transformator sollte man unterlassen (TE kann sich stark verschlechtern)

6 BEWERTUNG UND INTERPRETATION DER MESSUNGEN

Die Verlustfaktor $\text{tg}\delta$ - und Kapazitätsmessungen sollten vor Ort (wie auch im Labor) immer bei regelmässigen Spannungsstufen z.B. 2, 4, 6, 8, 10 kV, durchgeführt werden.

Störspannungen durch Fremdfelder sind zu unterdrücken (moderne Geräte) oder es sind zwei Messungen mit umgekehrter Messpolarität und anschliessender Mittelwertbildung auszuführen.

Danach sind für den Vergleich mit den Werksmessungen folgende Korrekturen anzubringen:

- Temperatur-Korrektur von $\text{tg}\delta$ und C (mit steigender Temperatur steigt die Kapazität)
- Kapazitäts-Korrektur unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Einbauanordnung (die auf dem Trafo gemessene Kapazität ist immer tiefer als diejenige im Prüffeld)

6.1 Beurteilung der Messresultate und deren mögliche Ursachen:

Befund	mögliche Ursachen bei Hartpapier	ölimprägnierter Isolation	Harzimprägnierter Isolation
tgδ sinkend in Funktion der Spannung	<ul style="list-style-type: none"> • Schlechte Potentialverbindungen • Teildurchschläge 	<ul style="list-style-type: none"> • schlechte Potentialverbindungen 	<ul style="list-style-type: none"> • schlechte Potentialverbindungen
Kapazitätsanstieg	<ul style="list-style-type: none"> • Öltränkung • Teildurchschlag 	<ul style="list-style-type: none"> • Teildurchschläge 	<ul style="list-style-type: none"> • Teildurchschläge
Hoher Kapazitätsanstieg in kurzer Zeit (Vergleiche relevante Durchführungen)	<ul style="list-style-type: none"> • Teildurchschläge 	<ul style="list-style-type: none"> • 	<ul style="list-style-type: none"> •
hohe tgδ Werte	<ul style="list-style-type: none"> • Teildurchschläge • Feuchtigkeit und/oder Schmutz aussen (Isolator reinigen) • Alterung oder Feuchtigkeit in der Isolation, Öltränkung 	<ul style="list-style-type: none"> • Teildurchschläge • Feuchtigkeit und/oder Schmutz aussen (Isolator reinigen) • feuchte Isolierkörper 	<ul style="list-style-type: none"> • Teildurchschläge • Feuchtigkeit und/oder Schmutz aussen (Isolator reinigen) • feuchte Isolierkörper
Tgδ-Verlauf stark ansteigend mit der Temperatur	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Feuchtigkeit oder sehr starke Alterung des Materials 	<ul style="list-style-type: none"> • 	<ul style="list-style-type: none"> •

Anmerkung:

Bei ölimprägnierten Durchführungen

- sind Teildurchschläge oft nur mit höheren Messspannungen nachweisbar
- sollten zur Interpretation möglichst Gas-in-Öl-Analysen oder mindestens Wassergehaltsmessungen zugezogen werden

6.2 Nachmessungen im Labor

- gewährleisten eine genauere Beurteilung
- Teilentladungsmessungen sind möglich

Erschwert wird die Beurteilung von Hartpapier-Durchführungen durch die Tatsache, dass bis weit in die 70er Jahre keine Teilentladungsmessungen gemacht wurden.

6.3 Richtwerte für tgδ- / Kapazitätsgrenzen von Transformator-Durchführungen mit Hartpapier

Grenzen erreicht in durchschnittlich 25 Jahren. **Gilt nicht für feuchte Isolierkörper!**

Un (kV)	36	73	123	170	245	300	362	420
Verlustfaktor tgδ (%)	2,5	2,3	2,0	1,8	1,5	1,3	1,15	1,0
Kapazitätserhöhung ΔC (%)	25	23	20	18	15	13	12	10

7 ENTSCHEIDUNGSFINDUNG

Massgebend sind:

- Veränderung und Abweichung zum Neuzustand
- Analyse des Alterungszustandes in Bezug auf die gesetzten Limiten
- Zustand der Isolation im Quervergleich (Nachbar-Durchführungen, Durchführungen der gleichen Fabrikationsperiode)
- Anwenderprioritäten wie weitere Betriebsdauer und geplante Revisionen

8 MASSNAHMEN

- Einfache Abdichtungen bei Leckagen im eingebauten Zustand oder mindestens vor Ort
- Reparaturen, Beheben der Ursache von Leckagen im Werk
- Nachmessungen im Labor
- Ersatz der Isolierkörper unter Wiederverwendung der Armaturen
- Kompletter Durchführungs-Ersatz

9 GESAMTERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNG DER ÜBERWACHUNG IM BETRIEB

Durch die periodischen Messungen hat man ein für die Betreiber wichtiges und nützliches Bild über den Alterungszustand und über die zu erwartende weitere Betriebsdauer der Durchführungen erhalten. Massnahmen und Aktionen können dadurch rechtzeitig geplant werden.

Seit in den frühen 70er-Jahren mit regelmässigen Kontrollen begonnen wurde, haben sich nach unserem Kenntnisstand keine Betriebsausfälle mehr ereignet.

Hartpapier-Durchführungen

Auf Grund von Messungen bzw. visuellen Kontrollen anlässlich der Messungen wurde die Ausserbetriebnahme von 32 Hartpapier-Durchführungen verlangt.

- 6 Stück wurden aus mechanischen Gründen ausser Betrieb genommen
- Bei 26 Stück wurde auf Grund hoher tgδ- oder Kapazitätswerte der Ausbau verlangt
- Davon wurden bei 14 Stück Teildurchschläge festgestellt

Weichpapier-Durchführungen

Insgesamt wurde bei 14 Stück aus unterschiedlichen Gründen die Ausserbetriebnahme verlangt.

Harz imprägnierte Durchführungen

Bisher musste auf Grund von Messungen noch kein Ausbau verlangt werden.

Generell

- Die Schadensstatistiken zeigen, dass viele Schäden auf Manipulations-, Handlings- oder Überwachungsfehler zurückzuführen sind
- Der Anteil solcher Fehler in Mitteleuropa ist um ein Vielfaches geringer als in anderen Ländern
- Dies zeigt auch, wie wichtig verständliche Beschreibungen und Betriebsvorschriften sind
- Diese Statistiken beinhalten auch ein grosses Kompliment an unsere Elektrizitätsgesellschaften und an ihr qualifiziertes Personal

10 BEISPIEL EINER SERVICE-DIENSTLEISTUNG

Das Problem:

Sollten die Messwerte Ihrer Durchführung nicht mehr innerhalb der durch Erfahrung gewonnenen Grenzen liegen, muss die Durchführung ausgetauscht werden. Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, den Isolierkörper auszutauschen.



Das Bild zeigt Kriechspuren am Unterteil einer Mauer-Durchführung. Die Gefahr von Durchschlägen ist hierbei sehr hoch. Da solche Durchführungen z. B. an Trafohäusern in teilweise stark besiedeltem Gebiet im Einsatz sind, besteht auch die Gefahr von Personenschaden.

Hier wird der Isolierkörper ausgetauscht. Dadurch werden die elektrischen Eigenschaften einer neuen Durchführung erreicht, obwohl nur der Isolierkörper und einige weitere Teile wie Dichtungen, Flansch usw. ausgetauscht werden. Vorteile sind:

- Tiefere Kosten als bei einem Komplettaustausch
- Geringere Montagezeiten
- Beibehaltung der alten Dimensionen
- Keine Änderung der Anschlussleitung



Die Micafil-Lösung:

Beim Austausch des Isolierkörpers einer Durchführung wird

- der Isolierkörper, die Dichtungen, der Messanschluss
- und eventuell der Flansch

ausgetauscht. Nach Ausführen der Arbeiten wird eine Abschlussprüfung nach IEC 60137 durchgeführt.

Unser Leistungsumfang:

- Visuelle Eingangskontrolle
- Komplette Demontage
- Bestandsaufnahme und Kontrolle der Bauteile
- Entsorgung des alten Isolierkörpers
- Herstellung eines neuen Isolierkörpers aus RIP (Resin-Impregnated-Paper)
- Beschaffung von Bauteilen und Dichtungsmaterialien
- Montage unter Wiederverwendung von Porzellan, Kopfpartie und eventuell Flansch
- Einbau eines Messanschlusses
- Neue Ölfüllung
- Elektrische Schlussprüfung nach IEC 60137