

Leitfaden für diagnostische  
Isolationsprüfungen über 1 kV

**Megger**<sup>®</sup>



# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

## WARUM EIN 10-KV-ISOLATIONS-PRÜFGERÄT?

Megger hat die Isolationsprüfung vor Beginn des 20. Jahrhunderts erfunden und ist weiterhin marktführend in Innovation und technologischem Fortschritt. Warum haben wir also ein 10-kV-Modell entwickelt, als alle anderen Anbieter bei 5 kV aufgehört haben? Die Antwort liegt in den IEEE-Normen. Megger hat ein 10-kV-Gerät entwickelt, um die neuen Prüfeempfehlungen des IEEE zu erfüllen. Megger bietet seit 2001 ein 10-kV-Isolationswiderstands-Prüfgerät an.

Im März 2000 genehmigte das IEEE-SA Standards Board eine Überarbeitung der IEEE Std 43-1974. Die „IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery“, Std. 43-2000, betont die Notwendigkeit, die derzeitigen Praktiken zu verbessern, um Änderungen und Verbesserungen bei Isoliermaterialien und den Wert von Prüfungen mit höherer Spannung zu berücksichtigen, die sonst versteckte Fehler aufdecken.

Es folgt eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Punkte der Norm:

- Für Wicklungen über 12 kV werden Prüfspannungen bis 10 kV empfohlen.
- Sowohl die Isolationswiderstandsprüfung als auch die Polarisationsindex-Prüfung werden empfohlen.
- Prüfergebnisse müssen mit historischen Werten verglichen werden, um Veränderungen zu erkennen.
- Anstelle von historischen Aufzeichnungen werden für beide Prüfungen zulässige Mindestwerte (je nach Gerätetyp) angegeben.
- Je nach Maschinenleistung müssen die Messwerte für eine oder beide Prüfungen die zulässigen Mindestwerte überschreiten.
- Liegen die Messwerte unter den zulässigen Mindestwerten, wird die Wicklung für eine Überspannungsprüfung oder für den Betrieb nicht empfohlen.

IEEE Std 43-2000 empfiehlt ein Verfahren zur Messung des Isolationswiderstandes von Anker- und Feldwicklungen in rotierenden Maschinen ab 1 PS, 750 W oder höher und gilt für Synchronmaschinen, Induktionsmaschinen, Gleichstrommaschinen und Synchronkondensatoren. Sie gilt nicht für kleinmotorische Maschinen. Sie empfiehlt auch die Isolationsprüfspannung (basierend auf der Wicklungsleistung) und die minimal zulässigen Werte des Isolationswiderstandes für rotierende Maschinenwicklungen mit Wechselstrom und Gleichstrom.

Weitere Informationen zur IEEE-Norm finden Sie unter Seite 23 in dem Leitfaden.

## WARUM EIN 15-KV-ISOLATIONS-PRÜFGERÄT?

15-kV-Isolations-Prüfgeräte sind jetzt gefragt, da Ingenieure eine frühere Degradationserkennung und eine bessere Fehlererkennung an Hochspannungsgeräten erleben. Viele Energieversorger in Südamerika haben bereits 15-kV-Prüfungen in ihre Verfahren integriert, und dieser Trend breitet sich nun auch auf Europa, den Mittleren Osten und Asien aus. In den US-NETA-Normen ist eine Prüfspannung von 15 kV vorgeschrieben. Die NETA Pearl-Rekonditionierungsnorm/NETA MTS-1997 spezifiziert 15-kV-Prüfungen an Geräten mit einer maximalen Spannung von 35 kV und mehr. Motoren, die nach NETA ATS 2007 mit 34.500 V oder mehr auf dem Typenschild getestet wurden, müssen ebenfalls bei 15 kV geprüft werden.

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

<b>Einführung</b> .....	<b>2</b>	Rampenspannungsprüfung .....	17
<b>Was ist Isolation?</b> .....	<b>2</b>	Dielektrische Entladungsprüfung .....	19
Was führt zu einer Verschlechterung der Isolation? .....	3	Verschiedene Probleme/Verschiedene Prüfungen .....	21
Elektrische Belastung .....	3	<b>Anhänge</b> .....	<b>22</b>
Mechanische Belastung .....	3	Mögliche Fehlerquellen/Sicherstellen von Qualitätsprüfergebnissen .....	22
Chemischer Angriff .....	3	Prüfleitungen.....	22
Thermische Belastung.....	3	Durchführung von Messungen über 100 GΩ .....	22
Umgebungslasten.....	3	Genauigkeitsangaben.....	22
Wie kann vorausschauende Wartung helfen?.....	3	Ausgabe der angegebenen Spannung .....	22
Der Nutzen neuer Technologien .....	4	Störunterdrückung .....	23
<b>Wie der Isolationswiderstand gemessen wird</b> .....	<b>4</b>	Regeln zum Prüfen und Vergleichen .....	23
Funktionsweise eines Isolationswiderstandsprüfgerätes .....	4	Messkategorie (CAT)-Einstufung .....	24
Komponenten des Prüfstroms .....	4	CAT-Einstufungsrichtlinien .....	24
Kapazitiver Ladestrom .....	4	Die Bedeutung einer CAT-Einstufung .....	24
Absorptions- oder Polarisationsstrom.....	4	Einige CAT-Einstufungs-Basisstatistiken .....	25
Oberflächenableitstrom .....	5	Prüfung in großen Höhen .....	25
Leitungsstrom.....	5	Prüfung des Isolationswiderstandes von rotierenden Maschinen .....	25
Anschluss Ihres Isolations-Prüfgerätes.....	6	Auswirkungen der Temperatur .....	26
Ausgewählte typische Verbindungen.....	6	Auswirkungen der Luftfeuchtigkeit .....	27
Abgeschirmtes Netzkabel .....	6	Schutz vor Eindringen .....	28
Leistungsschalter/Buchsen .....	6	Hochspannungsprüfung.....	29
Netztransformator .....	6	Strom (nA)-Messwerte vs. Widerstands (MΩ)- Messwerte.....	29
Wechselstromgenerator.....	7	Durchbrennfähigkeit .....	29
Skala der Isolationswiderstands-Prüfgeräte.....	7	Trocknen von Elektrogeräten.....	29
Spannungseigenschaften .....	8	Prüflingsentladung.....	30
<b>Die Schutzklemme</b> .....	<b>9</b>	Ladezeit für Großgeräte .....	31
Einführung.....	9	Motorbetriebene Isolations-Prüfgeräte .....	31
So funktioniert die Schutzklemme .....	10	<b>Prüfleitungsdesign</b> .....	<b>32</b>
Leistung der Schutzklemme .....	10	Signifikante Sicherheitsverbesserungen .....	32
Ergebnisse vergleichen.....	11	Zu beachtende Punkte für einen sicheren Betrieb .....	32
Die Schutzklemme als Diagnosetool.....	11	Sicherheitshinweise.....	33
Schutzklemmenschutz .....	11	<b>Design des Prüfgerätekoffers</b> .....	<b>33</b>
Abschließende Worte .....	12	Sicherheit mittels feuerhemmenden Stoffen .....	34
<b>Auswertung und Interpretation der Ergebnisse</b> .....	<b>13</b>	<b>Megger-Isolations-Prüfgeräte</b> .....	<b>35</b>
Interpretation der Unendlichkeitsmesswerte.....	13	MIT515, MIT525, MIT1025, MIT1525 .....	35
<b>Diagnostische Hochspannungsisolationsprüfungen</b> .....	<b>13</b>	S1-568, S1-1068 und S1-1568.....	35
Stichprobenprüfung.....	14	Prüfleitungen .....	36
Zeit vs. Widerstandsprüfung .....	15	Modelle MJ15 und BM15.....	36
Polarisationsindex-Prüfung .....	15		
Stufenspannungsprüfung.....	17		

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

## EINFÜHRUNG

Die elektrische Isolation verschlechtert sich im Laufe der Zeit durch verschiedene Belastungen, die ihr während ihrer normalen Lebensdauer auferlegt werden. Die Isolation ist so ausgelegt, dass sie diesen Belastungen über einen Zeitraum von Jahren standhält, was als Lebensdauer der Isolation angesehen werden kann. Dies hält häufig über Jahrzehnte an.

Abnormale Belastungen können zu einer Verstärkung dieses natürlichen Alterungsprozesses führen, was die Lebensdauer der Isolation stark verkürzen kann. Aus diesem Grund ist es ratsam, regelmäßig zu prüfen, ob ein verstärkter Alterungsprozess stattfindet, und, wenn möglich, festzustellen, ob die Auswirkungen reversibel sind oder nicht.

Der Zweck der diagnostischen Isolationsprüfung ist:

- Identifizierung eines verstärkten Alterungsprozesses.
- Identifizierung der Ursache dieser Alterung.
- Identifizierung, wenn möglich, der geeignetsten Maßnahmen zur Korrektur des Zustands.

In ihrer einfachsten Form ist die diagnostische Prüfung eine „Stichprobenprüfung“. Der größte Teil elektrischen Wartungspersonals hat Stichproben durchgeführt, bei denen eine Spannung an die Isolation angelegt und ein Widerstand gemessen wird. Die Diagnose beschränkt sich in diesem Fall auf „die Isolation ist gut“ oder „die Isolation ist schlecht“. Aber was tun wir, nachdem wir diese Diagnose erstellt haben? Es ist etwa so, als ob Sie mit einem starken Husten zum Arzt gehen und der Arzt einfach sagt: „Sie haben einen starken Husten“. Sie wären nicht zufrieden, wenn Sie nur diese Information erhielten. Sie erwarten, dass der Arzt/die Ärztin Sie untersucht, ein paar Tests durchführt und Ihnen sagt, warum Sie einen starken Husten haben und was Sie tun müssen, um den Husten zu behandeln.

Bei der Isolationsprüfung ist die alleinige Stichprobenprüfung das Äquivalent einer ärztlichen Feststellung, die besagt, ob es Ihnen gut geht oder ob Sie krank sind. Das sind sehr geringfügige Informationen. Dies ist die Art der Prüfung, die normalerweise auf Niederspannungsschaltungen angewendet wird, bei denen die Kosten eines Ausfalls gering sind und die Geräte einfach und kostengünstig ausgetauscht werden können. Da es sich bei den zu prüfenden Geräten um Niederspannungsgeräte handelt, werden diese Prüfungen in der Regel mit einer Prüfspannung von 500 oder 1000 V durchgeführt und sind dem gesamten elektrischen Wartungspersonal bekannt.

Wenn der Arzt/die Ärztin jedoch die Ergebnisse seiner Untersuchung notiert und mit den vorigen vergleicht, kann sich ein Verlauf abzeichnen, der zur Verschreibung von Medikamenten führen könnte. Werden also Isolationswiderstands-Messwerte aufgezeichnet und mit zuvor ermittelten Werten verglichen, kann möglicherweise ein Trend erkennbar sein, und gegebenenfalls sind Abhilfemaßnahmen erforderlich.

Die diagnostische Isolationsprüfung bei Spannungen über 1 kV ist ein Bereich, der dem elektrischen Wartungspersonal größtenteils weniger vertraut ist. Zweck dieses Leitfadens ist daher:

- Den Leser mit der Durchführung diagnostischer Isolationswiderstandsprüfungen vertraut zu machen.
- Richtlinien für die Auswertung der Ergebnisse dieser diagnostischen Isolationswiderstandsprüfungen vorzugeben.
- Informieren über die Vorteile der Mehrspannungsprüfung bei höheren Spannungen zu geben.

Am Ende des Leitfadens finden Sie eine Reihe von Anhängen, die dem Leser zusätzliche Informationen zur diagnostischen Isolationsprüfung geben.

Dieser Leitfaden basiert auf den Prinzipien, die von der James G. Biddle Company zum ersten Mal im 1966 veröffentlichten Handbuch „A Stitch in Time... The Complete Guide to Electrical Insulation Testing“ dargelegt wurden.

## WAS IST ISOLATION?

Jede elektrische Leitung in einer Anlage, ob in einem Motor, Generator, Kabel, Schalter, Transformator usw., ist mit einer Art elektrischer Isolation versehen. Während der Draht selbst ein guter Leiter (normalerweise aus Kupfer oder Aluminium) des elektrischen Stroms ist, der Elektrogeräte antreibt, muss die Isolation dem Strom widerstehen und den Strom in seinem Pfad entlang des Leiters halten. Das Verständnis des Ohmschen Gesetzes, das in der folgenden Gleichung ausgedrückt wird, ist der Schlüssel zum Verständnis der Isolationsprüfung:

$$E = I \times R$$

Hierbei gilt:

E = Spannung in Volt

I = Strom in Ampere

R = Widerstand in Ohm

Für einen bestimmten Widerstand gilt: Je höher die Spannung, desto größer der Strom. Je geringer der Widerstand des Drahtes, desto mehr Strom fließt bei gleicher Spannung.

Keine Isolation ist perfekt (hat einen unendlichen Widerstand), also fließt etwas Strom entlang der Isolation oder durch sie zur Erde. Ein solcher Strom mag für die meisten praktischen Zwecke unbedeutend klein sein, aber er ist die Grundlage für Isolations-Prüfgeräte.

Was ist also „gute“ Isolation? „Gut“ bedeutet einen relativ hohen Widerstand gegen den Stromfluss. Bei der Beschreibung eines Isoliermaterials bedeutet „gut“ auch „die Fähigkeit, einen hohen Widerstand aufrechtzuerhalten“. Die Messung des Widerstandes kann Ihnen sagen, wie „gut“ die Isolation ist.

## Was führt zu einer Verschlechterung der Isolation?

Es gibt fünf Hauptursachen für die Verschlechterung der Isolation. Sie wirken aufeinander ein und führen zu einer allmählichen Abnahme der Isolationsqualität.

### Elektrische Belastung

Die Isolation ist für eine bestimmte Anwendung ausgelegt. Über- und Unterspannungen verursachen anormale Spannungen innerhalb

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

der Isolation, die zu Rissen oder Delamination der Isolation führen können.

## **Mechanische Belastung**

Mechanische Schäden, wie z. B. das Treffen eines Kabels während des Grabens, können sehr leicht passieren, aber auch mechanische Belastungen können auftreten, wenn eine Maschine unausgewogen betrieben wird oder es zu häufigem Ein- und Ausschalten kommt. Die durch den Betrieb der Maschine entstehenden Schwingungen können zu Defekten in der Isolation führen.

## **Chemischer Angriff**

Es wird normalerweise erwartet, dass die Isolation durch korrosive Dämpfe beeinträchtigt wird, doch auch Schmutz und Öl können die Wirksamkeit der Isolation verringern.

## **Thermische Belastung**

Das Betreiben einer Maschine bei übermäßiger Hitze oder Kälte führt zu einer Überdehnung oder Kontraktion der Isolation, was zu Rissen und Ausfällen führen könnte. Aber auch bei jedem Ein- und Ausschalten einer Maschine entstehen thermische Belastungen. Wenn die Maschine nicht für einen unregelmäßigen Betrieb ausgelegt ist, wird jedes Ein- und Ausschalten den Alterungsprozess der Isolation negativ beeinflussen.

## **Umgebungslasten**

Umgebungslasten umfassen eine Vielzahl von Faktoren, die von Luftfeuchtigkeit aus Prozessen über Luftfeuchtigkeit an einem schwülen Tag bis hin zu Angriffen durch Nagetiere reichen, die sich in die Isolation fressen.

Die Isolation beginnt sich zu verschlechtern, sobald sie in Betrieb genommen wird. Die Isolation ist in jeder Anwendung so ausgelegt, dass sie unter normalen Betriebsbedingungen über viele Jahre hinweg gute Leistungen erbringt. Anormale Bedingungen können jedoch einen schädigenden Effekt haben, der, wenn er nicht überprüft wird, die Verschlechterung beschleunigt und letztendlich zu einem Versagen der Isolation führt. Eine Isolation gilt als fehlerhaft, wenn sie nicht ausreichend verhindert, dass elektrischer Strom in unerwünschten Pfaden fließt. Dazu gehört der Stromfluss über die Außen- oder Innenflächen der Isolation (Oberflächenableitstrom), durch den Isolierkörper (Leitungsstrom) oder andere Gründe.

So können z. B. Nadellöcher oder Risse in der Isolation entstehen oder Feuchtigkeit und Fremdkörper in die Oberfläche(n) eindringen. Diese Verunreinigungen ionisieren leicht unter der Wirkung einer angelegten Spannung und bieten einen niederohmigen Pfad für den Oberflächenableitstrom, der im Vergleich zu trockenen, nicht verschmutzten Oberflächen zunimmt. Die Reinigung und Trocknung der Isolation kann jedoch leicht Abhilfe schaffen.

Andere Störfaktoren der Isolation können eine Verschlechterung hervorrufen, die nicht so leicht zu beheben ist. Sobald sich jedoch die Isolation verschlechtert, tragen die verschiedenen Verursacher untereinander dazu bei, die Verschlechterung zu verstärken.

## **Wie kann vorausschauende Wartung helfen?**

Während es Fälle gibt, in denen eine Abnahme des Isolationswiderstandes plötzlich auftreten kann, wie z. B. bei

Überschwemmungen, fällt er in der Regel allmählich ab, und es kommt bei regelmäßigen Prüfungen zu vielen Warnmeldungen. Diese regelmäßigen Überprüfungen ermöglichen eine geplante Instandsetzung vor einem Betriebsausfall und/oder einem Schockzustand.

Ohne ein regelmäßiges Prüfprogramm werden alle Ausfälle überraschend, ungeplant, unpraktisch und möglicherweise zeitaufwändig und deshalb kostspielig sein. Nehmen Sie zum Beispiel um eine Aufbereitungsanlage herum einen kleinen Motor, der zum Pumpen von Material verwendet wird, das sich verfestigt, wenn es stehen gelassen wird. Ein unerwarteter Ausfall dieses Motors wird Zehntausende, vielleicht sogar Hunderttausende von Dollar kosten, wenn auch die Ausfallzeit der Anlage mitberechnet wird. Wären jedoch diagnostische Isolationsprüfungen in das vorbeugende Wartungsprogramm aufgenommen worden, wäre es möglich gewesen, die Wartung oder den Austausch des ausgefallenen Motors zu einem Zeitpunkt zu planen, zu dem die Leitung inaktiv war, wodurch die Kosten minimiert worden wären. So hätte der Motor möglicherweise nachgebessert werden können, solange er noch in Betrieb war.

Wenn eine fortgeschrittene Isolationsverschlechterung nicht erkannt wird, steigt die Möglichkeit eines elektrischen Schlages oder gar eines Todes für die Benutzer; die Möglichkeit von elektrisch induzierten Bränden steigt; die Lebensdauer der Elektrogeräte kann reduziert werden und/oder bei der Anlage kann es zu ungeplanten und teuren Ausfallzeiten kommen. Die regelmäßige Messung der Isolationsqualität ist ein wichtiger Bestandteil eines jeden Wartungsprogramms, da sie dazu beiträgt, den Ausfall von Elektrogeräten vorherzusagen und zu verhindern.

Dies ist besonders angebracht, wenn man bedenkt, dass große Teile des Stromnetzes in den USA und Europa in den 1950er-Jahren in einem Ausbruch von Nachkriegsinvestitionen installiert wurden. Einige Geräte nähern sich dem Ende ihrer Lebensdauer, andere haben sie bereits überschritten, arbeiten aber immer noch zufriedenstellend.

Da diagnostische Prüfungen in der Regel für kritischere Punkte reserviert sind, stellen wir normalerweise, aber nicht immer, fest, dass diagnostische Prüfgeräte Spannungsausgänge von 5 oder 10 kV haben. Diese Spannungen eignen sich besser für die Prüfung der Anlagen, die in der Regel selbst Mittelspannungsmaschinen, Kabel, Transformatoren usw. sind.

## **Der Nutzen neuer Technologien**

Isolations-Prüfgeräte reichen bis in das frühe 20. Jahrhundert zurück, als Sidney Evershed und Ernest Vignoles ihr erstes Isolations-Prüfgerät entwickelten (das 1903 in die Megger®-Prüfproduktreihe aufgenommen wurde).

In der Anfangszeit wurden die meisten Geräte von Hand mit Kurbel betrieben. Dies schränkte ihre Fähigkeit zur Durchführung von Prüfungen ein, die eine längere Zeit in Anspruch nahmen, und beschränkte die Spannungsstabilität auf das Vermögen des Bedieners, ununterbrochen zu kurbeln. Später konnten dieselben Geräte mit einem externen Motorantrieb ausgestattet werden, was zwar bei Langzeitprüfungen half, aber nur sehr wenig zur Verbesserung der Spannungsstabilität beitrug. Der Messbereich dieser Geräte überstieg jedoch selten 1.000 MΩ. Die analogen Bewegungen waren sehr schwer und dienten dazu, vorübergehende Ereignisse

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

abzuschwächen.

Das Erscheinungsbild der Elektronik und die Entwicklung der Batterietechnologie revolutionierten das Design von Isolations-Prüfgeräten. Moderne Geräte sind netz- oder batteriebetrieben und erzeugen unter verschiedensten Bedingungen sehr stabile Prüfspannungen. Sie können auch sehr kleine Ströme messen, so dass ihr Isolationswiderstandsmessbereich um mehrere Tausendfach in den Teraohm-Bereich ( $T\Omega$ ) erweitert wird. Einige können sogar den Bleistift, das Papier und die Stoppuhr, die früher zur Erfassung der Ergebnisse von Hand verwendet wurden, ersetzen, indem sie Daten im Speicher für spätere Downloads und Analysen speichern. Glücklicherweise wurden diese erstaunlichen Verbesserungen vorgenommen, da auch die Hersteller von Isoliermaterial viele Jahre daran gearbeitet haben, mit dem Ergebnis, dass moderne Isoliermaterialien heute deutlich höhere Beständigkeiten aufweisen als zu Beginn des frühen 20. Jahrhunderts.

Neuere Technologien bieten eine höhere Leistung, so dass gängige Verfahren bessere Erkenntnisse liefern und neue Methoden zur Verfügung gestellt werden können. Moderne Geräte liefern eine stabile Spannung über ihren gesamten Widerstandsbereich, wobei die Mikroprozessorempfindlichkeit im Messkreis Messungen im Bereich von  $T\Omega$  ermöglicht. Die Kombination aus stabiler Spannung und erhöhter Empfindlichkeit ermöglicht es dem Prüfgerät, die geringen Strommengen zu messen, die durch eine hochwertige Isolation in neuen Investitionsgütern fließen. Dementsprechend wurden ausgereifte Verfahren entwickelt, die auf einer präzisen Messung beruhen und leicht umgesetzt werden können.

Da das Isolations-Prüfgerät nun nicht mehr auf Werte beschränkt ist, die mit defekten oder gealterten Geräten zusammenhängen, kann es die Position des Prüflings entlang seiner Alterungskurve bestimmen. Die „unendliche“ Anzeige, die dem Reparaturtechniker weiterhilft, fehlt dem Diagnostiker. Einige Geräte verfügen über in ihrer Software vorprogrammierte Diagnoseprüfungen und können diese automatisch ausführen, so dass die Lücke mit wertvollen Analysedaten gefüllt wird.

## WIE DER ISOLATIONSWIDERSTAND GEMESSEN WIRD

### Funktionsweise eines Isolationswiderstandsprüfgerätes

Das Megger®-Isolations-Prüfgerät ist ein tragbares Gerät, das unabhängig von der gewählten Prüfspannung ein direktes Ablesen des Isolationswiderstandes in Ohm, Megohm, Gigaohm oder Teraohm (je nach Modell) ermöglicht. Für eine gute Isolation liegt der Widerstand in der Regel im Megohm-Bereich oder höher. Das Megger-Isolations-Prüfgerät ist im Wesentlichen ein Hochohmmeter mit eingebautem Gleichstromgenerator.

Der Generator des Gerätes, der von Hand gekurbelt, batterie- oder netzbetrieben werden kann, erzeugt eine hohe Gleichspannung, die mehrere kleine Ströme durch die und über den Oberflächen der zu prüfenden Isolation verursacht. Der Gesamtstrom wird mit dem Ohmmeter gemessen, das über eine analoge Anzeigeskala, eine Digitalanzeige oder beides verfügt.

### Komponenten des Prüfstroms

Wenn wir eine Prüfspannung an eine Isolation anlegen, dann können wir durch Messung des resultierenden Stroms und Anwendung

des Ohmschen Gesetzes ( $R = E/I$ ) den Widerstand der Isolation berechnen. Leider fließt mehr als ein Strom, was die Sache eher erschwert.

### Kapazitiver Ladestrom

Wir alle kennen den Strom, der benötigt wird, um die Kapazität der zu prüfenden Isolation aufzuladen. Dieser Strom ist zunächst groß, aber relativ kurzlebig und fällt exponentiell auf einen Wert nahe Null, wenn der Prüfling aufgeladen wird. Isoliermaterial wird wie ein Dielektrikum in einem Kondensator aufgeladen.

### Absorptions- oder Polarisationsstrom

Der Absorptionsstrom setzt sich aus bis zu drei Komponenten zusammen, die über einen Zeitraum von mehreren Minuten mit abnehmender Geschwindigkeit auf einen Wert nahe Null fallen.

Die erste wird durch einen allgemeinen Antrieb der freien Elektronen durch die Isolation unter dem Einfluss des elektrischen Feldes verursacht.

Die zweite wird durch molekulare Verzerrung hervorgerufen, wobei das auferlegte elektrische Feld die negative Ladung der um den Kern zirkulierenden Elektronenschalen in Richtung positiver Spannung verzerrt.

Die dritte ist auf die Ausrichtung der polarisierten Moleküle innerhalb des angelegten elektrischen Feldes zurückzuführen, siehe Abbildung 1. Diese Ausrichtung ist in einem neutralen Zustand ziemlich selten, aber wenn ein elektrisches Feld angelegt wird, richten sich diese polarisierten Moleküle mehr oder weniger stark an dem Feld aus.

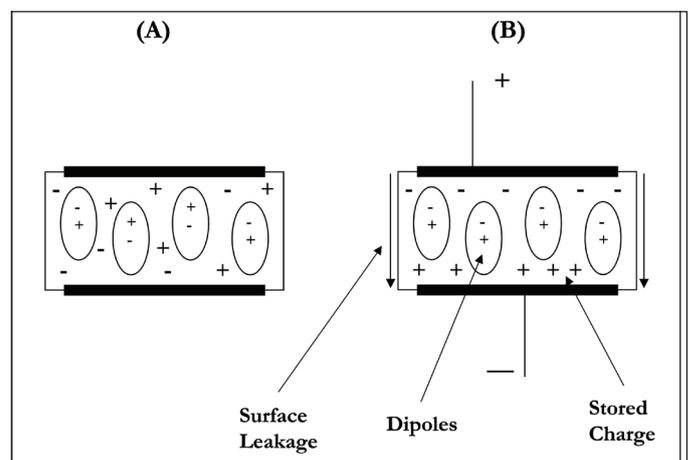


Abbildung 1: Ausrichtung polarisierter Moleküle

Die drei Ströme werden in der Regel zusammen als ein Strom betrachtet und sind hauptsächlich von der Art und dem Zustand des in der Isolation verwendeten bindenden Mittels abhängig. Obwohl der Absorptionsstrom sich Null nähert, dauert der Prozess wesentlich länger als mit kapazitivem Strom.

Die Orientierungspolarisation wird bei absorbiertter Feuchtigkeit erhöht, da verunreinigte Materialien stärker polarisiert sind. Dies erhöht den Polarisationsgrad. Die Depolymerisation der Isolation führt ebenfalls zu einem erhöhten Absorptionsstrom.

Nicht alle Materialien besitzen alle drei Komponenten, und in der Tat

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

weist Material wie Polyethylen nur eine geringe, wenn überhaupt, Polarisationsabsorption auf.

## Oberflächenableitstrom

Der Oberflächenableitstrom ist vorhanden, weil die Oberfläche der Isolation mit Feuchtigkeit oder Salzen verunreinigt ist. Der Strom ist mit der Zeit konstant und hängt vom Grad der vorhandenen Ionisierung ab, der wiederum temperaturabhängig ist. Er wird oft als separater Strom ignoriert und beim Leitungsstrom unter dem gesamten Ableitstrom eingeschlossen.

## Leitungsstrom

Der Leitungsstrom ist durch die Isolation konstant und wird in der Regel durch einen sehr hochwertigen Widerstand parallel zur Kapazität der Isolation dargestellt. Er ist Bestandteil des Ableitstroms, also des Stroms, der gemessen wird, wenn die Isolation vollständig aufgeladen ist und die volle Absorption stattgefunden hat. Beachten Sie, dass es sich dabei um eine Oberflächenableitung handelt, die durch die Verwendung der Schutzklemme (wird später erwähnt) reduziert oder beseitigt werden kann.

Die Kurve in Abbildung 2 zeigt die Art der einzelnen Stromkomponenten in Bezug auf die Zeit.

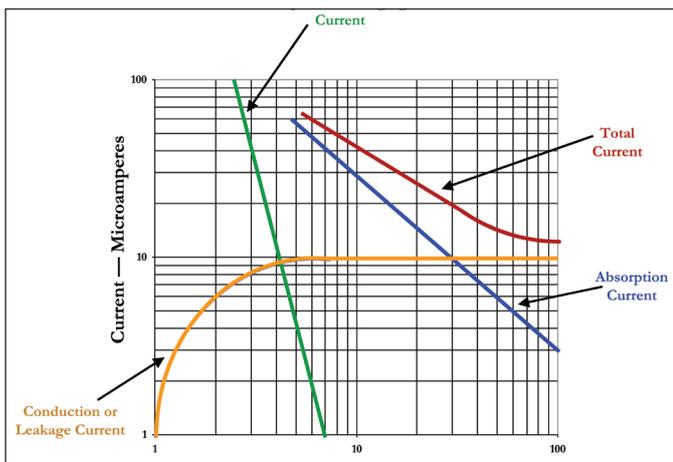


Abbildung 2: Komponenten des Prüfstroms

Der Gesamtstrom ist die Summe dieser Komponenten. (Ableitstrom wird als ein Strom angezeigt.) Dieser Strom kann direkt mit einem Mikroamperemeter oder, in Megohm ausgedrückt, mit einem Megger-Isolations-Prüfgerät bei einer bestimmten Spannung gemessen werden. Einige Geräte bieten die Möglichkeit, eine Messung in Bezug auf Strom oder Widerstand anzuzeigen.

Da der Gesamtstrom von der Zeit abhängt, in der die Spannung angelegt wird, gilt das Ohmsche Gesetz ( $R = E/I$ ) theoretisch nur zu einer unendlichen Zeit (was bedeutet, dass ewig gewartet werden muss, bevor eine Messung durchgeführt wird). Sie ist auch stark abhängig von einem Basisniveau der Gesamtentladung. Der erste Schritt bei jeder Isolationsprüfung ist daher sicherzustellen, dass die Isolation vollständig entladen ist.

**Beachten Sie:** Der Ladestrom verschwindet relativ schnell, wenn der Prüfling aufgeladen wird. Größere Einheiten mit mehr Kapazität brauchen länger, um geladen zu werden. Dieser Strom ist gespeicherte Energie und muss aus Sicherheitsgründen nach der Prüfung entladen werden. Glücklicherweise erfolgt die Entladung dieser Energie relativ schnell. Während der Prüfung nimmt der Absorptionsstrom je nach Art der Isolation relativ langsam ab. Auch diese gespeicherte Energie muss am Ende einer Prüfung freigesetzt werden und benötigt eine wesentlich längere Entladungszeit als der kapazitive Ladestrom.

## Anschluss Ihres Isolations-Prüfgerätes

Bei modernen Isoliermaterialien gibt es, wenn überhaupt, nur geringe Unterschiede bei den erzielten Messwerten, unabhängig davon, wie die Anschlüsse verbunden sind. Bei älteren Isolationen führt jedoch ein kleines, eher unbekanntes Phänomen, die Elektroendosmose, dazu, dass der niedrigere Messwert erreicht wird, wenn der Pluspol mit der geerdeten Seite der zu prüfenden Isolation verbunden ist. Bei der Prüfung eines Erdkabels wird der Pluspol normalerweise mit der Außenseite des Kabels verbunden, da dieser durch Bodenkontakt geerdet wird, wie in Abbildung 3 dargestellt. Bitte beachten Sie, dass Sie das Gerät nicht direkt an die Isolation, sondern an den Neutralleiter oder Masseleiter anschließen.

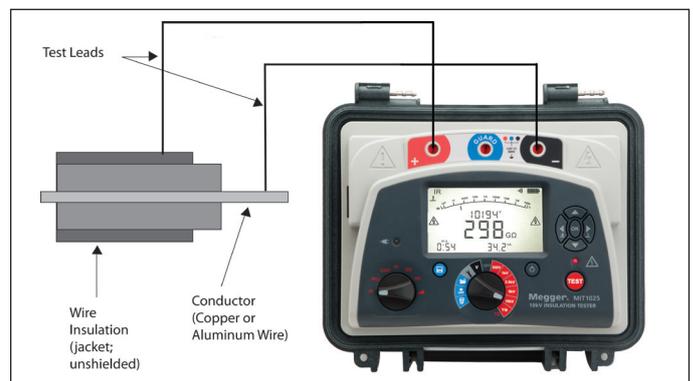


Abbildung 3: Einfacher Anschluss an ein Kabel

## Ausgewählte typische Verbindungen

### Abgeschirmtes Netzkabel

Wird zur Messung des Isolationswiderstandes zwischen einem Leiter und der Erde angeschlossen.

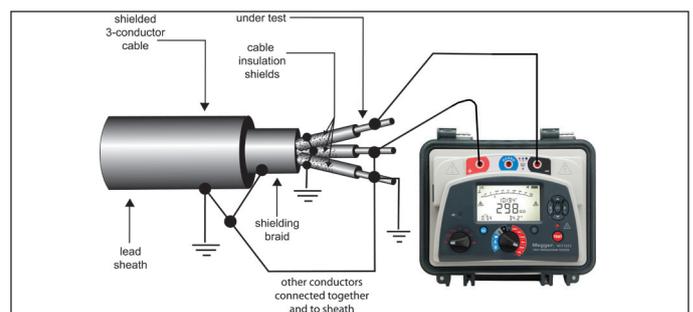


Abbildung 4: Anschluss an ein abgeschirmtes Netzkabel



# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

Stichprobenmessung angenehmer sein als entscheiden zu müssen, wann sich eine digitale Anzeige halbwegs stabilisiert hat. Keine digitale Anzeige „erstarrt“ bei einer präzisen Zahl, ohne dass wenigstens Schwankungen auf dem niedrigsten Stellenwert auftreten.

Diese Art von Detail ist für das Auge schwierig oder unmöglich aus den durchlaufenden Ziffern auf einem elektronischen Display auszumachen. So wünschenswert der Zeigerlauf möglicherweise ist, wenn er anhält, muss der Bediener den Messwert zwischen den Skalenmarkierungen erkennen können und eine Beurteilung abgeben, was eine Fehlerquelle sein kann. Digitale Modelle stellen kein solches Problem dar, da sie dem Bediener genau (innerhalb der Genauigkeitsspezifikation des Gerätes) mitteilen, welche Messung durchgeführt wurde. Und denken Sie daran, die meisten geben Ihnen einen Kapazitätswert am Ende der Prüfung.

Die meisten Megger-Isolations-Prüfgeräte über 1 kV verfügen über eine analoge/digitale Anzeige. Einer der Vorteile dieser Anzeige ist, dass der analoge Teil des Messgerätes schwankt und pendelt, was dem Bediener anzeigt, dass der Prüfling noch keinen stabilen Zustand erreicht hat und noch immer unter dem Einfluss des Absorptions- und Ladestroms steht. Diese Angabe bedeutet, dass der Prüfling länger geprüft werden sollte oder dass ein Problem vorliegt. Wenn der analoge Teil der Anzeige ruhig wird, zeigt das Gerät das Ergebnis in einer eindeutigen digitalen Messform an, ohne Multiplikatoren oder Mathematik.

Im Gegensatz zur oben genannten analogen/digitalen Anzeige liefert ein „Durchschnittsabtastung“-Balkendiagramm-Messinstrument keine Echtzeitanzeige des Isolationswiderstandes. Einige Geräte bieten anstelle eines echten logarithmischen Bogens ein gebogenes Balkendiagramm, bei dem das untere Ende der Skala relativ zum oberen Ende ausgedehnt ist. Das Balkendiagramm verzeichnet die Messwerte über eine bestimmte Zeit, führt Berechnungen durch und zeigt dann die Ergebnisse an. Das Problem bei diesem Messtyp ist sein Betriebsprinzip. Tritt ein Ereignis ein, wenn das Balkendiagramm keine Messwerte erfasst, wird es nicht angezeigt. Außerdem erscheinen Balkendiagramm-Simulationen des Zeigerlaufs möglicherweise dem Auge nicht wie der bekannte Zeigerlauf und bilden eine mechanische Bewegung nicht wie erwartet nach.

Je mehr der Bediener über die Ergebnisse (während und nach der Isolationsprüfung) weiß, desto besser ist seine Entscheidung, wie er das Problem beheben kann, falls vorhanden. Wenn während einer Prüfung etwas fehlt, weil das Gerät über ein Balkendiagramm-Messinstrument verfügt, können auch wichtige Informationen verloren gehen.

## Spannungseigenschaften

Die Ausgangsspannung eines Isolations-Prüfgerätes hängt vom gemessenen Widerstand ab. Bei niedrigen Widerständen, etwa zehn Ohm, beträgt die Ausgangsspannung nahe Null, vielleicht ein paar Volt. Wenn die Widerstandslast erhöht wird, steigt die Prüfspannung, bis sie die gewünschte Spannung erreicht. Mit zunehmendem Widerstand steigt die Prüfspannung langsam an, bis ein konstanter Wert erreicht ist. Dieser Wert wird wahrscheinlich etwas über der gewünschten Nennspannung liegen (z. B. 5.104 V bei einer Auswahl von 5.000 V).

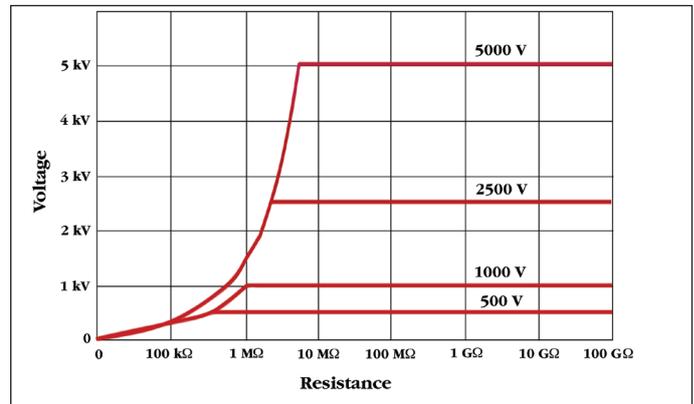


Abbildung 9: Gute Lastkurve

Sie müssen immer darauf achten, dass ein Isolations-Prüfgerät mit einer „Lastkurve“ versehen ist, die den Verlauf der Ausgangsspannung gegen den Lastwiderstand anzeigt, oder alternativ mit einem integrierten Voltmeter, das die Anschlussspannung während einer Prüfung tatsächlich misst und kontinuierlich anzeigt. Auf diese Weise können Sie sicherstellen, dass über den gewünschten Widerstandsbereich eine ausreichende Spannung erzeugt wird.

Ein Qualitäts-Isolations-Prüfgerät hat eine Spannungseigenschaft, die einen starken Spannungsanstieg bis zu einem Widerstand aufweist, der einer guten Isolation entspricht. Eine schnelle Anstiegszeit sorgt für eine effektive Messung. Die in Abbildung 9 gezeigte Spannungscharakteristik stellt eine gute Kennlinie dar. In diesem Beispiel hat die Ausgangsspannung 500 V bei einer Last von nur 500 kΩ und 1.000 V bei 1 MΩ erreicht. Diese Werte gelten als internationale Normen für die Prüfung von Verkabelungen in Häusern, Geschäften usw. Dies ist zwar kaum eine übliche Anwendung für typische diagnostische Isolations-Prüfgeräte, stellt aber einen guten Maßstab für den seriösen Hersteller dar. Ähnliche Werte gelten bei höheren Spannungen. Die Spannung sollte je nach Auswahl von einem bis zu fünf Megohm stark ansteigen und diese Spannung bei allen höheren Widerständen halten.

Bei Isolations-Prüfgeräten geringerer Qualität ist die Spannungsrampe wesentlich langsamer. Die durch die schlechte Kurve in Abbildung 10 gekennzeichneten Geräte erzeugen erst dann die Nennspannung, wenn wesentlich höhere Widerstände erreicht sind. So können Prüfungen zu Ergebnissen führen, die zwar Isolationsdurchgangswerte liefern, aber nur der Hälfte der gewünschten Prüfspannung ausgesetzt sind.

*Hinweis: Vorsicht vor Geräten, die keine veröffentlichten Lastkurven haben.*

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

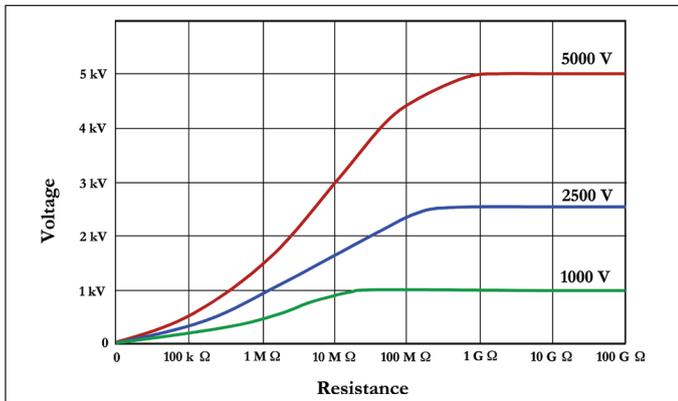


Abbildung 10: Schlechte Lastkurve

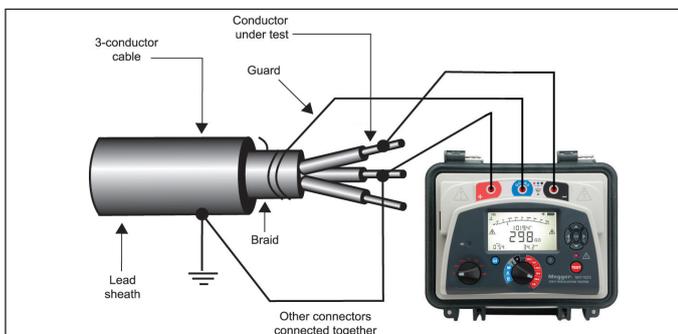


Abbildung 11: Verwendung der Schutzklemme an einem Netzkabel

## DIE SCHUTZKLEMME

### Einführung

Bei einer Isolationsprüfung beschäftigen wir uns oft so sehr mit dem Widerstand des eigentlichen Isolators, dass wir den Widerstandspfad auf der Außenseite des Isoliermaterials vergessen. Dieser Widerstandspfad kann ein wesentlicher Bestandteil unserer Messung sein und die Ergebnisse erheblich beeinflussen.

Als kleine Auffrischung: Der Gesamtstrom, der während einer Isolationswiderstandsprüfung fließt, besteht aus drei Hauptkomponenten:

1. Dem Ladestrom, der die Kapazität des Objekts auflädt.
2. Einem Absorptionsstrom, d. h. dem Strom, der durch die Polarisation der Elektronen in die Isolation gezogen wird und anfänglich hoch ist, aber mit der Zeit abnimmt (langsamer als der Ladestrom).
3. Dem Leitungs- oder Ableitstrom, also der wenige, ständig fließende Strom, der sich in zwei Teile teilt:
  - a. Den Leitungspfad durch die Isolation.
  - b. Den Strom, der über die Oberfläche der Isolation fließt.

Der über die Oberfläche fließende Strom ist die Stromkomponente, die wir nicht messen wollen, wenn der Isolationswiderstand des

Materials zu messen ist. Eine Oberflächenableitung führt zu Fehlern bei der Messung des Isolationswiderstandes. Die Entfernung des Oberflächenableitstroms aus der Messung wird umso kritischer, je höher die zu erwartenden Isolationswiderstände sind.

Einige Isolations-Prüfgeräte haben zwei Anschlüsse, andere drei. Da es sich hierbei um Gleichspannungs-Prüfgeräte handelt, sind zwei der Anschlüsse + und -. Der dritte (falls vorhanden) ist ein Schutzanschluss. Er muss nicht verwendet werden, und viele Bediener arbeiten mit Isolations-Prüfgeräten, ohne jemals den Schutzanschluss benutzt zu haben. Er bietet dem Bediener jedoch eine zusätzliche Funktion zur Diagnose von Geräteproblemen. Der Schutzanschluss ist eine Nebenschlusschaltung, die den Oberflächenableitstrom um die Messfunktion leitet. Existieren parallele Ableitpfade, werden diese durch einen Schutzanschluss aus der Messung eliminiert, was einen genaueren Messwert der Ableitung zwischen den übrigen Elementen ergibt.

Die Oberflächenableitung ist im Wesentlichen ein Widerstand parallel zum tatsächlichen Isolationswiderstand des zu prüfenden Materials. Bei einer Messung mit zwei Anschlüssen ist dieser Widerstandspfad ein wesentlicher Bestandteil der Messung und kann die Messwerte erheblich beeinflussen. Eine Messung mit drei Anschlüssen, die den Einsatz der Schutzklemme beinhaltet, ignoriert die Oberflächenableitung. Dies kann bei der Prüfung von Hochspannungskomponenten wie Isolatoren, Durchführungen und Kabeln, bei denen hohe Widerstandswerte erwartet werden, sehr wichtig sein.

Schmutz und Feuchtigkeit an einer Transformatorendurchführung fördern z. B. die Oberflächenableitung zwischen den Anschlüssen + und -, wodurch der Messwert sinkt und möglicherweise der falsche Eindruck entsteht, dass die Durchführung defekt sei. Das Anschließen der Schutzklemme an einen um die Durchführung gewickelten blanken Draht fängt diesen Strom ab und liefert eine Messung, die überwiegend auf Ableitstrom durch Defekte in der Keramik basiert.

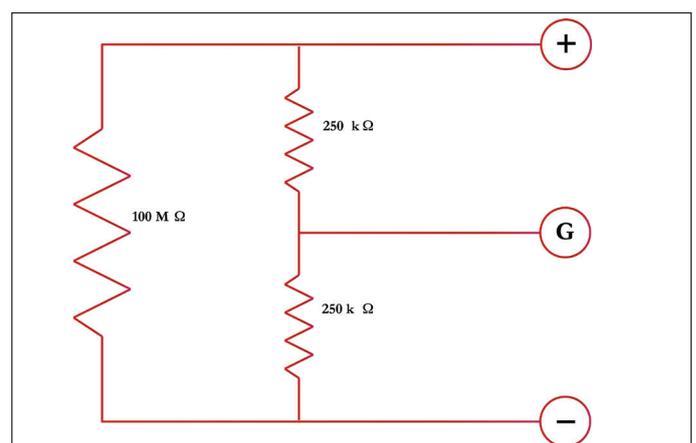


Abbildung 12: Schutzklemmen-Schaltplan

Es ist sehr wichtig, die Schutzklemme nicht mit einem Erder zu verwechseln. Das Anschließen der Schutz- und Rücklaufleitung an das gleiche Element des Prüflings führt nur zu einem Nebenschluss des zu messenden Stroms und damit zu einem Kurzschluss der Messfunktion. Berücksichtigen Sie bei der Auswahl eines Prüfgerätes:

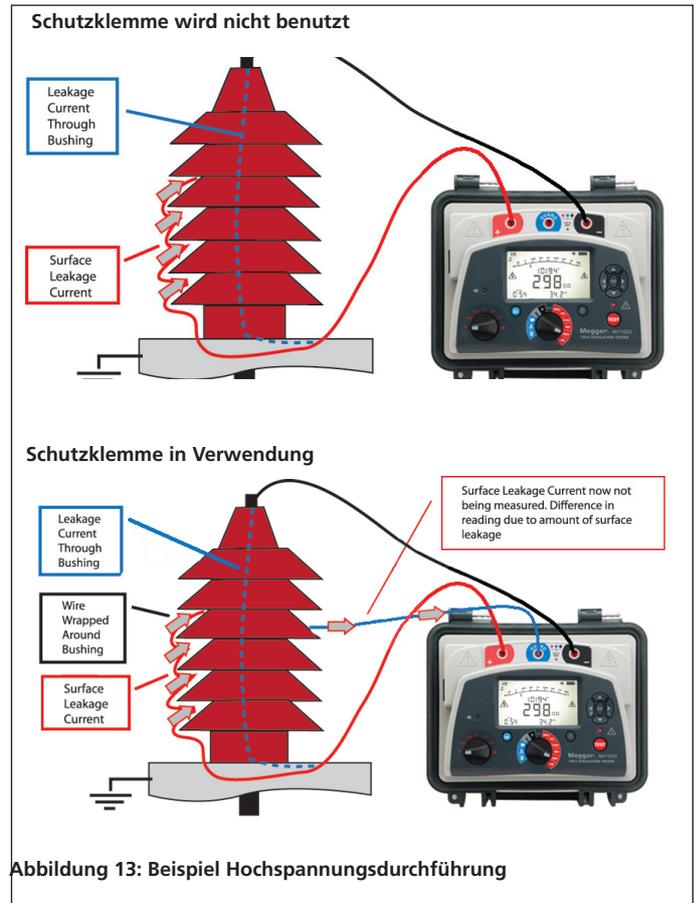
# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

- Die Ziele der Prüfung (grundlegende Installationsprüfungen erfordern in der Regel keinen Schutz).
- Die elektrische Zusammensetzung der zu prüfenden Teile (Motoren und Transformatoren können auf Ableitung zwischen den Wicklungen geprüft werden, wobei Erdschlüsse ausgeschlossen sind).
- Die möglichen Auswirkungen von Oberflächenableitung (Draht und Kabel können Strom über die Oberfläche, über Schmutz und Feuchtigkeit sowie durch das Isoliermaterial transportieren).
- Inwieweit die Ergebnisse analysiert werden müssen (werden „schlechte“ Artikel, lediglich ersetzt oder verworfen, oder wird es notwendig sein, Fehler für eine mögliche Reparatur zu lokalisieren).

## So funktioniert die Schutzklemme

Das folgende Beispiel einer Hochspannungsdurchführung zeigt eine typische Anwendung für die Schutzklemme. In der ersten Kurve wird die Schutzklemme nicht verwendet und die durch die Durchführung und über die Oberfläche fließenden Ableitströme werden vom Gerät kombiniert und gemessen. In der zweiten Kurve wurde der Draht um die Durchführung gewickelt und mit der Schutzklemme verbunden, so dass die Oberflächenableitung zur Schutzklemme fließt. Der in die Schutzklemme fließende Strom wird vom Gerät nicht gemessen, d. h., er wird bei der Isolationswiderstandsmessung ignoriert.

Um besser zu verstehen, was tatsächlich im Gerät geschieht, betrachten Sie Abbildung 14. Das Isolations-Prüfgerät besteht aus drei Hauptelementen: der Hochspannungs-Gleichstromquelle, dem Hochspannungs-Voltmeter und dem Stromzähler. Die Isolationswiderstandsmessung ist einfach das Ohmsche Gesetz, gemessene Spannung geteilt durch den gemessenen Strom. Die Schutzklemme lässt den Ableitstrom die Strommessung umgehen und wird ignoriert.



## Leistung der Schutzklemme

Prüfgeräte mit Schutzanschlüssen kosten in der Regel etwas mehr als Modelle mit zwei Anschlüssen, aber in vielen Anwendungen wird ein Modell mit zwei Anschlüssen nicht das gesamte Spektrum an Informationen vermitteln, das durch Isolationsprüfungen gewonnen werden kann.

Was oft vergessen wird, ist der Unterschied in den Fähigkeiten der Schutzschaltung. Die Leistung der Schutzklemme ist oft im Datenblatt des Gerätes nicht ersichtlich oder wird ganz weggelassen. Die Schutzfunktion des Isolations-Prüfgerätes ist bei der Messung von undichten Isolationen viel wichtiger als die üblicherweise angegebene Messgenauigkeit, die 5 % betragen kann.

Die Oberflächenableitung ist Teil der Messunsicherheit. Je mehr Oberflächenableitung die Strommessung umgeht, desto weniger bleibt zu messen. Bei der Messung von elektrischen Hochspannungskomponenten ist die Isolationswiderstandsmessung umso genauer, je besser die Leistung der Schutzklemme ist. Eine effektive vorausschauende Wartung hängt von einer zuverlässigen Tendenz der Prüfergebnisse ab, um eine frühzeitige Fehleranzeige zu ermöglichen. Fehlerhafte Messwerte, die durch nicht ordnungsgemäß geschützte Oberflächenableitung verursacht werden, können ein Wartungsprogramm verzerren.

Betrachten wir das folgende Beispiel, einen Extremfall, bei dem der Kriechweg 200 mal kleiner ist als der Widerstand der Isolation.

Hier zeigen wir einen Isolator mit einem Wert von 100 M $\Omega$ , den wir messen wollen. Er ist verschmutzt und verunreinigt und hat somit

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

einen Kriechweg von 500 k $\Omega$ . Wenn wir unsere Prüfspannung von den Plus- und Minuspolen anlegen, ohne den Stromkreis zu schützen, fließt 20 mal so viel Strom durch die Oberflächenableitung wie der Strom, der durch die zu messende Isolation fließt, und wir werden einen Widerstand von nur 497 k $\Omega$  ablesen.

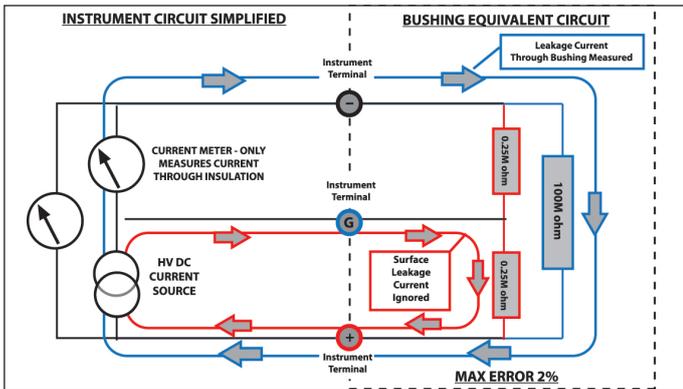


Abbildung 14: Vereinfachter Geräteschaltkreis

Wenn wir den Prüfling „schützen“, hier als geschützt dargestellt, so dass wir den Ableitwiderstand auf beiden Seiten des Schutzanschlusses gleichmäßig aufteilen, können wir den Effekt der Oberflächenableitung bis zu einem gewissen Grad eliminieren. Wie sehr wir den Effekt der Oberflächenableitung eliminieren, hängt von der Schutzschaltung des verwendeten Isolations-Prüfgerätes ab. Je nach gewähltem Gerät kann diese Fehlergrenze zwischen weniger als 1,0 % und mehr als 80,0 % liegen. Wenn Sie die Schutzklemme verwenden wollen, überprüfen Sie die Fehlergrenze, bevor Sie ein Gerät kaufen.

Dies ist ein klassisches Beispiel für die Notwendigkeit, Prüfungen auf einer ähnlichen Basis zu vergleichen. Eine ungeschützte Messung und eine geschützte Messung ergeben sehr unterschiedliche Ergebnisse. Wie kann ein Bediener wissen, ob die Schutzklemme vorher benutzt wurde, wenn die Prüfprotokolle dieses scheinbar unwichtige Detail nicht aufnehmen?

## Ergebnisse vergleichen

Eine Möglichkeit, die Leistung der Schutzklemme zu überprüfen, besteht darin, die Ergebnisse mit und ohne die verwendete Schutzklemme auf einer Kalibrierbox mit einem bekannten Ableitwert zu vergleichen, der dem Stromkreis hinzugefügt wird (zu überwachen). Ein hochwertiges Gerät (und Schutzklemme) liefert das gleiche Ergebnis, bevor der Ableitwert zum Stromkreis addiert wird (ungeschützt gemessen) und nachdem er zum Stromkreis addiert wird (und geschützt gemessen wird). Zusätzlich bleibt die Prüfspannung auf dem gewählten Niveau.

Geräte mit schlechten Schutzklemmen können eine Abweichung (Fehler) von mehr als 95 % in der Messung mit der verwendeten Schutzklemme aufweisen. Darüber hinaus zeigen sie oft einen deutlichen Abfall der gelieferten Spannung von der gewählten Spannungsebene. Selbst Geräte mit genaueren Schutzklemmen können noch einen deutlichen Abfall der gelieferten Prüfspannung aufweisen, so dass das Messergebnis fraglich ist.

Nachfolgend einige Ergebnisse von tatsächlichen Geräten, die die Position 1 T $\Omega$  auf einer Kalibrierbox verwenden und dann 5 M $\Omega$ -Ableitung einführen, die überwacht werden sollen. Alle Namen und Modellnummern außer der Megger-Einheit wurden entfernt. Diese Daten werden verwendet, um zu zeigen, wie viele Fehler in den Messwerten durch eine schlechte Schutzklemme auftreten können.

## Die Schutzklemme als Diagnosetool

Der Anwender kann schnell erkennen, wann und wie viel Oberflächenableitung vorhanden ist, indem er zwei Prüfungen durchführt, eine mit und eine ohne Schutzklemme. Wenn es mit dem Gerät möglich ist, die Messung des Ableitstroms statt Widerstandsmessungen durchzuführen, subtrahiert der Anwender einfach den Messwert mit der verwendeten Schutzklemme von dem Wert ohne Schutzklemme. Das Ergebnis zeigt genau an, wie hoch die Oberflächenableitung ist.

Schlechte Isolationswiderstandsmessungen können zu teuren Abhilfemaßnahmen wie dem Austausch einer Durchführung führen. Möglicherweise trugen alle benötigten Durchführungen zur Sauberkeit bei. Der Einsatz der Schutzklemme trägt dazu bei, solche Situationen zu erkennen und Geld zu sparen.

Hinweis: Vorsicht vor Spezifikationen, die eine Eingangsimpedanz liefern.

## Schutzklemmenschutz

Die Schutzklemme ist ein wichtiger Bestandteil eines >1-kV-Isolations-Prüfgerätes. Die Schutzklemme muss nicht nur gut funktionieren, sondern auch gut geschützt sein. Die Leistung ist ihre Fähigkeit, die Einflüsse von Oberflächen- oder unerwünschtem Ableitstrom aus einer Isolationsmessung effizient zu entfernen. Der Schutz ist gegen unbeabsichtigtes Anlegen von Spannung oder Transienten gemäß der spezifizierten Sicherheitskategorie CAT nach IEC61010.

Die Megger MIT- und S1-Familien mit 5-kV- und 10-kV-Isolations-Prüfgeräten haben eine einzigartige Spezifikation für die Leistung ihrer Schutzklemmen. Die Spezifikation bedeutet, dass das Gerät in der Lage ist, IR-Messungen durchzuführen, wenn der geschützte Ableitstrom das 200-fache der Größe des gemessenen Isolationsableitstroms beträgt und nicht mehr als 2 % Genauigkeitsfehler aufweist.

Dies zu erreichen und dennoch den erforderlichen Sicherheitsschutz nach IEC61010 einzuhalten, ist natürlich wichtig. Der häufigste Ansatz einiger Gerätehersteller ist jedoch die Verwendung einer höheren Eingangsimpedanz, um den erforderlichen Schutz zu gewährleisten. Dadurch wird die Messleistung der Schutzklemme effektiv zerstört.

Um diesen Effekt zu verstehen, ziehen wir eine Fallstudie eines Geräteherstellers zurate, der die Vorteile einer Schutzklemme mit 200-k $\Omega$ -Eingangsimpedanz hervorgehoben hat.

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

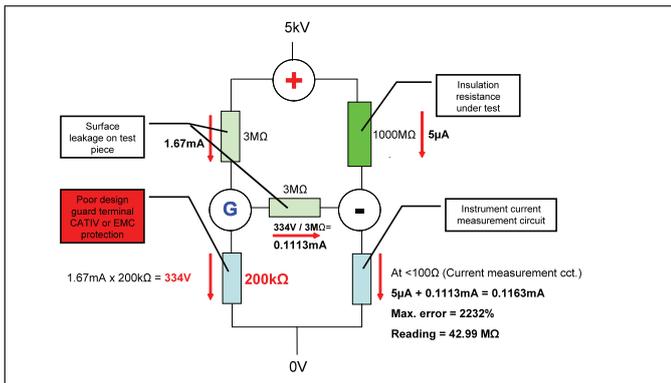


Abbildung 15: Messkreis „geschützt“ durch Hochimpedanzschutz

Abbildung 15 oben zeigt einen Ersatzschaltkreis eines 1.000-M $\Omega$ -Isolationswiderstandes, der mit einer Oberflächenableitung von 6 M $\Omega$  gemessen wird. Die Oberflächenableitung wurde an die Schutzklemme angeschlossen, um sicherzustellen, dass sie nicht gemessen wird. Dieses Gerät ist jedoch mit einer Eingangsimpedanz von 200 k $\Omega$  geschützt. Das Ergebnis ist ein Messwert von ca. 43 M $\Omega$ , über 2.000 % entfernt von den 1.000 M $\Omega$ , die gemessen werden müssen.

In einem Megger-Isolations-Prüfgerät bietet die Schutzklemme wirksamen Schutz, aber die Eingangsimpedanz bleibt auf einem akzeptablen Niveau, wie im Beispiel unten in Abbildung 16 gezeigt.

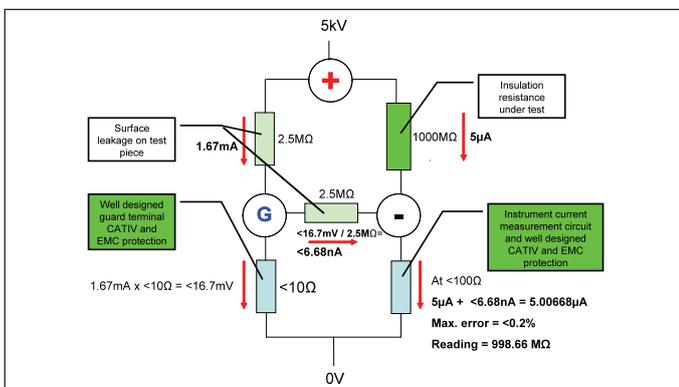


Abbildung 16: Messkreis mit niederohmiger, hochgenauer Schutzeinrichtung

In Abbildung 16 ist der Eingangsschutz der Megger-Schutzklemme niederohmig, entspricht aber dennoch den Anforderungen der IEC61010. Die Bedeutung des niederohmigen Schutzes wird deutlich, da der zusätzliche Fehler, der bei der geschützten Messung auftritt, in diesem Beispiel nicht mehr als 0,2 % beträgt.

Bei der Auswahl eines 5-kV- oder 10-kV-Isolations-Prüfgerätes ist darauf zu achten, dass das Gerät an allen Anschlüssen einschließlich der Schutzklemme ordnungsgemäß geschützt ist, aber auch, dass der verwendete Schutz die Funktion des Gerätes als Isolationsprüfer nicht beeinträchtigt. Megger macht keine Kompromisse.

## Abschließende Worte

Natürlich ist die Schutzklemme eine sehr nützliche Funktion, aber ein paar Vorsichtshinweise sind notwendig. Das Vorhandensein der

Schutzklemme allein garantiert nicht, dass ein Isolations-Prüfgerät bei hoher Oberflächenableitung genaue Ergebnisse liefert. Insbesondere ist es schwierig, die Leistung der Schutzklemme aufrechtzuerhalten, wenn das Gerät auch eine CAT-IV-600-V-Sicherheitseinstufung bieten soll. Stellen Sie sicher, dass das Isolations-Prüfgerät in der Lage ist, seine CAT-Einstufung zu erreichen, ohne die Leistung der Schutzklemmen zu beeinträchtigen.

Es kann viele Gründe geben, warum manche Geräte eine schlechte Leistung der Schutzklemmen erreichen, aber einer der offensichtlichsten ist, dass das Gerät bei einer Schutzklemme nicht nur den für die eigentliche Isolationsprüfung benötigten Strom liefern muss, sondern auch den umgeleiteten Strom, der über die Schutzklemme fließt. Wenn der Spannungsgenerator im Prüfgerät eine unzureichende Kapazität hat – effektiv mit einem hohen internen Widerstand – führt dies zu einem Abfall der Prüfspannung und damit zu ungenauen Ergebnissen. Dies ist sehr wichtig, da der Strom im Schutzklemmenkreis zehn- oder mehrfach so hoch sein kann wie im Prüfkreis selbst.

Die Stabilität des Prüfgerätes wirkt sich auch auf die Genauigkeit der Ergebnisse bei der Verwendung der Schutzklemme aus, ebenso wie die Ableitung an der Oberfläche der verwendeten Prüflösungen. Es gibt derzeit Geräte, die bei Verwendung der Schutzklemme bis zu 80 % fehlerhafte Ergebnisse liefern können. Solche großen Fehler machen natürlich die Vorteile der Schutzklemme zunichte. In der Tat kann es sogar noch schlimmer kommen, weil sie echte Probleme verbergen können, indem sie falsche Ergebnisse liefern. Was können Käufer von Hochspannungs-Isolations-Prüfgeräten also tun, um solche Probleme zu vermeiden?

Glücklicherweise ist die Antwort einfach. Es genügt, vor dem Kauf den Gerätehersteller zu fragen, welche Genauigkeit das Gerät bei Verwendung der Schutzklemme liefern wird. Wenn keine klaren Informationen gegeben werden, sind entsprechende Schlüsse zu ziehen und die richtige Kaufentscheidung zu treffen!

Hochspannungsisolationsprüfungen sind sowohl in der Fehlerdiagnose als auch in der Zustandsüberwachung von unschätzbarem Wert. Die Qualität der erzielten Ergebnisse hängt jedoch von der Qualität der verwendeten Prüfgeräte ab. Prüfgeräte mit drei Anschlüssen, die eine Schutzklemme enthalten, sind immer etwas teurer als ihr Äquivalent mit zwei Anschlüssen.

Wie jedoch zu sehen ist, zahlen sich die geringen Mehrkosten aus, vorausgesetzt, die Verwendung der Schutzklemme zerstört nicht die Genauigkeit des Gerätes. Vergessen Sie nicht, diese Genauigkeitsangaben vor dem Kauf zu erfragen.

## AUSWERTUNG UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE

### Interpretation der Unendlichkeitsmesswerte

Eines der wichtigsten Merkmale eines Isolations-Prüfgerätes ist der Bereich, den das Gerät messen kann. Die Prüfziele bestimmen, ob die Grundfunktion ausreichend ist oder ob ein erweiterter Bereich empfohlen wird. Einfache Nachweisanwendungen, wie z. B. das Abzeichnen von Arbeiten durch einen Elektriker, können mit einem Basisbereich von tausend Megohm erfüllt werden (M $\Omega$ ). Zugegeben, neue Geräte, wenn bei der Installation nicht defekt oder beschädigt, werden alle anderen bis auf die modernsten Prüfgeräte übertreffen;

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

dies ist jedoch akzeptabel. In solchen Fällen konzentriert sich der Elektriker nicht auf einen Ist-Wert, sondern möchte einen hohen Wert erhalten, und „unendlich“ erfüllt sicher dieses Kriterium. Allerdings ist „unendlich“ keine Messung; es ist ein Hinweis darauf, dass die zu prüfende Isolation einen Widerstand hat, der die Messmöglichkeiten des Prüfgerätes übersteigt und immer als „größer als 1.000 MΩ“ oder als die höchste verfügbare Zahl auf Ihrem Isolations-Prüfgerät aufgezeichnet werden sollte. Normalerweise ist dies ausreichend, da der minimal zulässige Widerstandswert wahrscheinlich viel niedriger ist als der maximal verfügbare Wert.

Gerät	Messwert ohne Schutzkl- emme	Gelieferte Spannung ohne Schutzkl- emme	Zusätzli- che Ablei- tung	Messwert mit Schutzkl- emme	Gelieferte Spannung mit Schutz- klemme
Megger MIT525	978 MΩ	5.090 V	5 MΩ	978 MΩ	5.001 V
Gerät 1	1,01 TΩ	5.010 V	5 MΩ	37,6 MΩ	3.287 V
Gerät 2	975 MΩ	5.103 V	5 MΩ	961 MΩ	3.757 V
Gerät 3	978 MΩ	5.269 V	5 MΩ	746 MΩ	3.680 V

Aber für die Wartung von Investitionsgütern ist ein Prüfgerät mit nur begrenztem Messbereich ein „Kurzschluss“ für den Bediener. Für die vorbeugende/vorausschauende Wartung sind unendliche Messwerte nutzlos. Der Bediener weiß, dass der Prüfling „gut“ ist, aber nicht viel mehr. Prüfgeräten mit erweitertem Messbereich, bis hin zu Teraohm (1 TΩ = 1.000.000 MΩ), ermöglichen tatsächliche Messungen ab dem Zeitpunkt der Installation und schaffen so einen langen Zeitraum, der dem Wartungsfachmann eine längere „Atempause“ gibt.

Signifikante Veränderungen der Isolationsqualität können bei hohen Isolationswiderständen auftreten, die über den Bereich begrenzter Geräte hinausgehen, wie die Kurve in Abbildung 17 zeigt.

In diesem Beispiel würde ein Prüfgerät mit begrenztem Messbereich diese wertvollen Daten nicht erfassen. Wir sehen deutlich, dass die Verschlechterung zunimmt, obwohl der letzte erfasste Isolationswert über 10 GΩ liegt; etwas stimmt nicht. Ein Gerät mit einem Messbereich von 2.000 MΩ würde dies völlig verfehlen. Wenn die Messwerte in den Bereich des Geräts abgesenkt sind, bleibt dem Wartungspersonal vergleichsweise wenig Zeit für die Planung der routinemäßigen Offline-Wartung. (Es kann sogar zu spät sein, den Fehlerzustand zu beheben.)

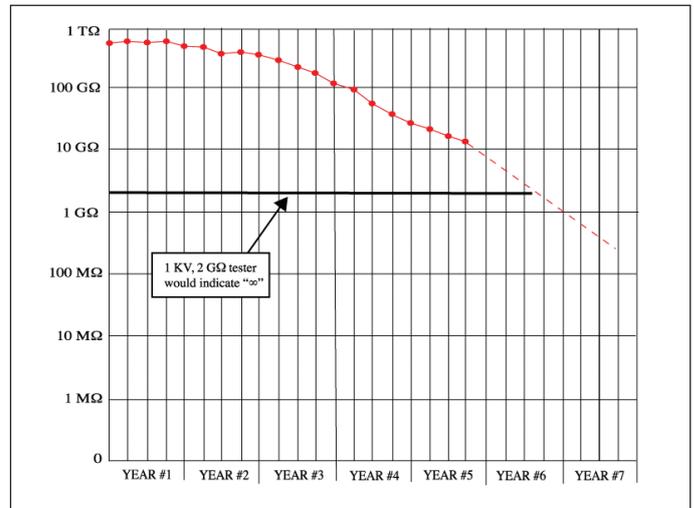


Abbildung 17: Änderungen des Isolationswiderstandes bei hohen Werten

## DIAGNOSTISCHE HOCHSPANNUNGSISOLATIONSPRÜFUNGEN

Diagnostische Isolationsprüfungen stimulieren die Isolation elektrisch und messen die Reaktion. Abhängig von dieser Reaktion können wir einige Rückschlüsse auf den Zustand der Isolation ziehen.

Die diagnostische Isolationsprüfung umfasst eine große Vielzahl an Techniken, von denen einige mit tragbaren Geräten und andere mit fest eingebauten Geräten durchzuführen sind. Hier werden nur die Prüfungen berücksichtigt, die mit einem leicht tragbaren Gleichstrom-Isolations-Prüfgerät durchgeführt werden können. Diese sind:

- Trending-Spot-Prüfungen
- Zeitkonstante
- Polarisationsindex (PI)
- Stufenspannung (SV)
- Rampenprüfung
- Dielektrische Entladung (DD)

Jede Prüfung gibt einen anderen Einblick in den Zustand der Isolation; die vollständige Abbildung ist erst dann verfügbar, wenn alle erforderlichen Prüfungen abgeschlossen sind.

### Stichprobenprüfung

Die Stichprobenprüfung ist die einfachste aller Isolationsprüfungen und diejenige, die am häufigsten mit Isolations-Prüfgeräten mit niedrigerer Spannung in Verbindung gebracht wird; die Prüfspannung wird für eine kurze, bestimmte Zeit angelegt (typischerweise 60 Sekunden, da normalerweise jeder kapazitive Ladestrom bis zu diesem Zeitpunkt verfallen ist), und dann wird eine Messung durchgeführt. Der Messwert kann dann mit den minimalen Installationspezifikationen verglichen werden. Wenn das Ergebnis nicht katastrophal niedrig ist, kann es verwendet werden, sollte aber mit zuvor erzielten Werten verglichen werden.

Der Isolationswiderstand ist jedoch stark temperaturabhängig, so dass die Ergebnisse auf eine Standardtemperatur, in der Regel 40 °C,

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

korrigiert werden müssen. Während die Temperatureffekte später abgedeckt werden, gilt als Faustregel, dass sich der Strom pro 10 °C Temperaturanstieg verdoppelt (Widerstandshälften). Die wichtigsten Faktoren, um die Stichprobenprüfung wertvoll zu machen, sind eine konsistente Zeitmessung, eine effektive Protokollierung und der Trend der Ergebnisse.

Wie bereits erwähnt, ermöglicht es die erhöhte Empfindlichkeit des mikroprozessorgesteuerten diagnostischen Isolations-Prüfgeräts dem Anwender, Isolationsprobleme bereits in einem frühen Stadium zu erkennen, anstatt sie zu erkennen, wenn sie bereits dabei sind, ein katastrophales Ausmaß anzunehmen. In vielen Fällen ist der Trend weitaus wichtiger als der absolute Wert.

Vergleichen Sie die beiden Kurven in Abbildung 18. Gerät „A“ weist einen hohen Isolationswiderstand auf, während Gerät „B“ einen niedrigen Wert aufweist. Wird jedoch der Trend untersucht, so gibt das Gerät „B“ wenig Grund zur Beunruhigung, da der Trend seit mehreren Jahren etwa gleich hoch ist und die Tendenz angibt, dass es auch in den nächsten Jahre so weitergehen wird. Umgekehrt stürzt die Kurve für Gerät „A“ dramatisch ab und das Gerät wird, wenn nichts dagegen unternommen wird, in den nächsten Jahren versagen.

Während Gerät „A“ viel höhere absolute Widerstandswerte hat als Gerät „B“, ist der Trend recht besorgniserregend. Gerät „B“ hat einen ziemlich konstanten flachen Trend, was darauf hindeutet, dass die Qualität der Isolation wahrscheinlich akzeptabel ist.

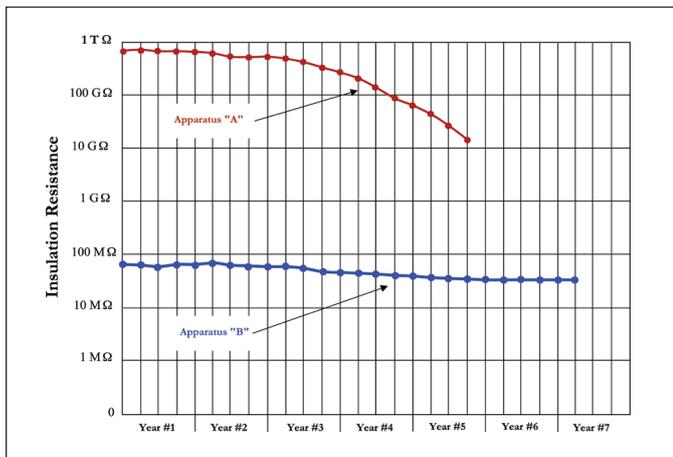


Abbildung 18: Vergleich der Trend-Prüfergebnisse

Isolationswiderstandsmessungen müssen eher als relativ denn als absolut betrachtet werden. Sie können bei einem Motor oder eine Maschine, die drei Tage hintereinander getestet wurde, sehr unterschiedlich ausfallen, trotzdem bedeutet dies keine schlechte Isolation. Wie bereits erwähnt, ist die wichtige Information die Tendenz der Messwerte über einen bestimmten Zeitraum, da sie verringernden Widerstand zeigt und vor auftretenden Problemen warnt. Regelmäßige Prüfungen sind daher entscheidend für die vorausschauende Wartung von Elektrogeräten. Der Abstand zwischen den Prüfungen (monatlich, zweimal im Jahr, einmal im Jahr usw.)

hängt von der Art, dem Standort und der Wichtigkeit der Geräte ab. Die Auswertung einer Reihe von Messwerten über mehrere Monate oder Jahre hinweg macht den Bediener zum Diagnostiker.

Wiederkehrende Prüfungen müssen jedes Mal auf die gleiche Weise durchgeführt werden. Verwenden Sie die gleichen Prüfanschlüsse und legen Sie die gleiche Prüfspannung für die gleiche Zeit an. Die Prüfungen müssen auch bei etwa der gleichen Temperatur durchgeführt werden, oder der Bediener muss sie auf die gleiche Temperatur korrigieren. Eine Aufzeichnung der relativen Luftfeuchtigkeit in der Nähe des Geräts zum Zeitpunkt der Prüfung ist hilfreich bei der Beurteilung des Messwertes und des Trends, da niedrige Temperaturen und hohe Luftfeuchtigkeit Kondensation auf der Oberfläche der Isolation vermuten lassen. Aus diesem Grund ist darauf zu achten, dass die zu prüfenden Geräte eine Temperatur über dem Taupunkt haben, da sich sonst Kondenswasser bildet, das die Messwerte verfälscht, wenn die Messung nicht gut „geschützt“ wird.

Die folgende Tabelle enthält einige allgemeine Bemerkungen zur Interpretation der regelmäßigen Isolationswiderstandsprüfungen und das, was mit dem Ergebnis zu tun ist.

Zustand	Was zu tun ist
a) Geeignete bis hohe Werte und gut gewartet	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nichts Auffälliges, gut gewartet.</li> </ul>
b) Geeignete bis hohe Werte, aber mit konstanter Tendenz zu niedrigeren Werten	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Lokalisieren und beheben Sie die Ursache und überprüfen Sie den Abwärtstrend.</li> </ul>
c) Niedrige Werte, aber gut gewartet	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Zustand ist wahrscheinlich akzeptabel, aber die Ursache für niedrige Werte sollte überprüft werden. Könnte mit der Art der verwendeten Isolation zusammenhängen.</li> </ul>
d) So niedrig, dass sie unsicher sein könnten	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reinigen, trocknen oder erhöhen Sie die Werte, bevor Sie das Gerät in Betrieb nehmen (nasse Geräte während des Trocknens prüfen).</li> </ul>
e) Geeignete oder hohe Werte, die vorher gut aufrechterhalten wurden, aber plötzlich abnehmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Prüfungen in regelmäßigen Abständen durchführen, bis die Ursache für niedrige Werte gefunden und behoben ist oder</li> <li>■ Bis die Werte auf einem niedrigeren, aber betriebssicheren Niveau stabil geworden sind oder</li> <li>■ Bis die Werte so niedrig werden, dass es unsicher ist, das Gerät weiter zu betreiben.</li> </ul>

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

## Zeit vs. Widerstandsprüfung

Vertraute, standardisierte und seit Jahren eingesetzte Prüfverfahren profitieren von den verbesserten Möglichkeiten der erweiterten Diagnostik. Die grundlegendste davon ist die Zeit-Widerstands-Methode. Eine wertvolle Eigenschaft der Isolation, die aber verstanden werden muss, ist, dass sie sich im Laufe einer Prüfung durch die Bewegung der Elektronen, wie zuvor beschrieben, „auflädt“. Diese Bewegung der Elektronen erzeugt einen Strom.

Sein Wert als diagnostischer Indikator basiert auf zwei gegensätzlichen Faktoren: Der Strom verschwindet, wenn der Aufbau seine endgültige Ausrichtung erreicht, während „Ableitung“, die durch Feuchtigkeit oder Abnutzung gefördert wird, einen vergleichsweise großen, konstanten Strom passiert. Das Ergebnis ist, dass bei „guter“ Isolation der Ableitstrom relativ klein ist und der Widerstand mit abnehmendem Strom durch Aufladung und dielektrische Absorption kontinuierlich ansteigt. Eine verschlechterte Isolation führt relativ große Mengen an Ableitstrom mit einer konstanten Rate für die angelegte Spannung durch, was die Lade- und Absorptionseffekte verdeckt.

Die grafische Darstellung des Widerstandswertes in Zeitintervallen ab Beginn der Prüfung ergibt eine glatte, ansteigende Kurve für „gute“ Isolation, aber eine „flache“ Kurve für abgenutzte Geräte. Das Konzept der Zeit-Widerstandsprüfung besteht darin, zu bestimmten Zeitpunkten aufeinanderfolgende Messungen durchzuführen. Sie basiert auf den relativen Größen der Ableit- und Absorptionsströme bei sauberer, trockener Isolation im Vergleich zur feuchten oder verunreinigten Isolation. Eine gute Isolation zeigt eine kontinuierliche Erhöhung des Widerstandes im Laufe der Zeit. Bei verunreinigter Isolation ist der Ableitstrom viel größer und die Auswirkungen des Absorptionsstroms sind daher deutlich geringer.

Der Vorteil der Zeit-Widerstandsprüfung liegt darin, dass sie relativ temperaturunabhängig ist und aussagekräftige Informationen ohne die Aufzeichnungen vergangener Prüfungen liefern kann.

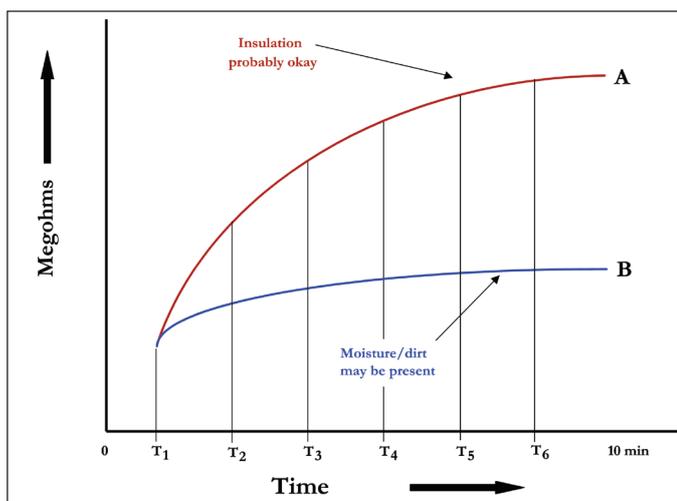


Abbildung 19: Zeit-Widerstands-Prüfungs-Diagramm

## Polarisationsindex-Prüfung

Die einfachste Umsetzung der Zeit-Widerstands-Prüfung für feste Isolation ist die beliebte Polarisationsindex (PI)-Prüfung, die nur zwei Messwerte erfordert, gefolgt von einer einfachen Teilung. Der einminütige Messwert wird in den zehnminütigen Messwert unterteilt, um ein Verhältnis zu liefern. Das Ergebnis ist eine reine Zahl und kann normalerweise als temperaturunabhängig gesehen werden, da die thermische Masse der zu prüfenden Geräte in der Regel so groß ist, dass die Gesamtabkühlung, die während der 10 Minuten der Prüfung stattfindet, unerheblich ist.

Im Allgemeinen bedeutet ein niedriges Verhältnis wenig Veränderung, also schlechte Isolation, während ein hohes Verhältnis das Gegenteil aufweist. Verweise auf typische PI-Werte sind in der Literatur üblich, was diese Prüfung sehr einfach und leicht anwendbar macht. Wir sagen jedoch „allgemein“, weil es, wie bereits erwähnt, Materialien gibt, die eine sehr geringe oder keine dielektrische Absorption aufweisen. Die Durchführung einer Prüfung an diesen Materialien würde dann zu einem Ergebnis führen, das sehr nahe bei 1 liegt.

Beachten Sie, dass Widerstandsmessungen allein schwierig zu handhaben sind, da sie von enormen Werten in neuen Geräten bis hinunter zu einigen Megohm kurz vor der Außerbetriebnahme reichen können.

Eine Prüfung wie der PI ist besonders nützlich, da er auch an den größten Geräten durchgeführt werden kann und eine in sich geschlossene Auswertung auf der Basis relativer Werte statt absoluter Werte liefert. Mit einem Prüfgerät mit begrenztem Messbereich kann aber kein PI berechnet werden, denn „unendlich“ ist keine Zahl! Moderne Prüfgeräte erreichen den Teraohm-Bereich und bleiben daher auf der Kurve. Die größten und neuesten Investitionsgüter können problemlos geprüft werden, um wiederholbare Daten für die Aufzeichnung und anschließende Trendauswertung zu erhalten. Die folgende Tabelle zeigt ausgewählte PI-Werte und deren Bedeutung für den Bediener.

Polarisationsindex	Isolationsbedingung
<1	Schlecht
1-2	Fragwürdig
2-4	In Ordnung
>4	Gut

Werte über 4 deuten auf eine ausgezeichnete Ausrüstung hin, für die im Rahmen der sofortigen Wartung wahrscheinlich keine Maßnahmen erforderlich sind. Der Bediener kann jedoch zu kritischen Beurteilungen herangezogen werden. Einige hohe Werte des PI (über 5) können auf eine spröde oder rissige Isolation hinweisen; dies müsste ziemlich offensichtlich sein. Eine plötzliche Erhöhung des PI um mehr als 20 %, ohne dass eine Wartung durchgeführt wurde, sollte als Warnung dienen. Die Isolation kann ihren Wert über lange Zeiträume halten, wird sich aber wahrscheinlich nicht von selbst erheblich verbessern.

Ein Vorteil der PI-Prüfung ist, dass sie bei sehr großen Geräten, die eine Stunde oder länger zum vollständigen Aufladen benötigen, innerhalb von zehn Minuten einen Hinweis auf die Isolationsqualität liefern kann, siehe hierfür Abbildung 20. Bei einer Stichprobenprüfung müsste der Bediener warten, bis sich der Messwert stabilisiert hat. Aus diesem Grund ist es normal, eine PI-

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

Prüfung mit relativ niedriger Spannung durchzuführen, bevor die für eine Widerstandsprüfung typischen hohen Spannungen angelegt werden.

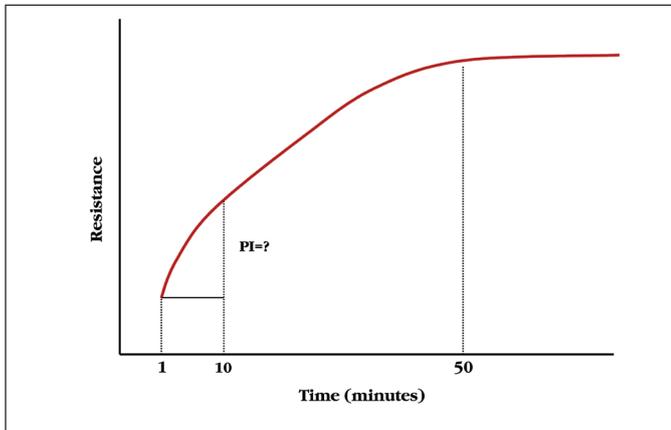


Abbildung 20: Nutzen des Polarisationsprüfung für Großgeräte

Obwohl die PI-Wertetabelle seit vielen Jahren verwendet wird und akzeptiert sind, können gelegentlich PI-Werte auftreten, die außergewöhnlich sind. Vor vielen Jahren wurde der neu hergestellte Stator eines 3.750-kVA-Generators geprüft und hat einen PI von 13,4 erreicht. Der Stator war abgekühlt und befand sich zweifellos noch in der Aushärtungsphase. Nachfolgende Prüfungen ergaben reduzierende PI-Werte, bis sie sich um 4,7 stabilisierten. Bei der routinemäßigen Wartung erreichen die PI-Werte diese Höhen nicht.

Es ist auch interessant festzustellen, dass viele Personen versucht haben, die PI-Prüfung an ölgefüllten Transformatoren anzuwenden und nicht verstehen können, warum ein bekannter guter Transformator ihnen Ergebnisse nahe 1 liefert. Die Antwort ist einfach. Die PI-Prüfung ist für ölgefüllte Transformatoren nicht geeignet. Das Konzept beruht auf den relativ starren Strukturen von festen Isoliermaterialien, bei denen Absorptionsenergie benötigt wird, um die elektronische Struktur von vergleichsweise festen Molekülen gegen das angelegte Spannungsfeld zu rekonfigurieren. Da dieser Prozess bis zu einem theoretischen Stand der Vollendung gehen kann (in „unendlicher Zeit“, was in der Praxis offensichtlich nicht erreicht werden kann, aber vernünftigerweise angenähert werden kann), ist das Ergebnis eine stetige Verminderung des Stroms, wenn die Moleküle ihre „endgültige“ Ausrichtung erreichen. Da die PI-Prüfung durch dieses Phänomen definiert ist, kann sie nicht erfolgreich auf flüssige Materialien angewendet werden, da der Durchgang des Prüfstroms durch einen ölgefüllten Prüfling Konvektionsströme erzeugt, die das Öl ständig verwirbeln, was zu einem großen Mangel an Struktur führt, der der Grundprämisse entgegensteht, auf der die PI-Prüfung beruht.

## Stufenspannungsprüfung

Da eine gute Isolation widerstandsfähig ist, führt eine Erhöhung der Prüfspannung zu einem Anstieg des Stroms, so dass der Widerstand konstant bleibt. Jede Abweichung davon kann eine fehlerhafte Isolation bedeuten. Bei niedrigeren Prüfspannungen, z. B. 500 V oder 1.000 V, ist es durchaus möglich, dass diese Fehler unbeobachtet bleiben, aber mit steigender Spannung erreichen wir einen Punkt, an

dem die Ionisation in Rissen oder Hohlräumen stattfinden kann, was zu einer Erhöhung des Stroms und damit zu einer Verringerung des Isolationswiderstandes führt. Beachten Sie, dass es nicht notwendig ist, die Bemessungsspannung der Isolation zu erreichen, damit diese Defekte sichtbar werden, da wir lediglich nach einer Ionisierung im Defekt suchen.

Die Stufenspannungsprüfung folgt genau diesem Prinzip und kann bei Spannungen ab 2.500 V sinnvoll eingesetzt werden. Die Stufenspannungsprüfung kann als Unter- oder Überspannungsprüfung eingesetzt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass eine Überspannungsprüfung zu einem katastrophalen Ausfall führen kann, wenn die Isolation ausfällt, weil Hochspannungsprüfgeräte (d. h. High-Pots) viel Strom zur Verfügung haben. Eine von einem Isolations-Prüfgerät durchgeführte Unterspannungsprüfung hat relativ wenig Leistung zur Verfügung und führt daher weitaus seltener zu einer zerstörenden Prüfung.

Als anerkanntes Standardverfahren gilt, die Spannung in fünf gleichen Schritten im Abstand von einer Minute zu erhöhen und den endgültigen Isolationswiderstand auf jeder Ebene aufzuzeichnen. Jede ausgeprägte oder ungewöhnliche Widerstandsreduktion ist ein Hinweis auf eine beginnende Schwäche. Moderne Elektronik ermöglicht die automatische Erfassung dieser Messwerte.

Nachfolgend finden Sie einige mögliche Ergebnisse einer Stufenspannungsprüfung an einem Motor von 500 bis 2.500 Volt und deren Bedeutung für den Bediener:

- Keine nennenswerten Wertunterschiede – Isolation in zuverlässigem Zustand.
- Deutliche Wertunterschiede – Die Isolation erfordert eine gründlichere Instandsetzung.
- Isolation versagt bei 2.500 V – Motor ist in Frage gestellt; würde höchstwahrscheinlich auch dann versagen, wenn versucht würde, ihn nur aufgrund von Niederspannungsprüfungen zu überholen.

Die Diagramme in Abbildung 21 zeigt einen Motor, der feucht und verschmutzt war (untere Kurve) und nach der Reinigung und Trocknung (obere Kurve).

Im Allgemeinen ist eine Abweichung von 25 % bei Widerstandsmessungen über den Bereich der aufeinanderfolgenden Spannungen ein Hinweis auf das Vorhandensein von Feuchtigkeit oder anderen Verunreinigungen. Lokale physische Schäden können durch Ausfall oder Lichtbogenbildung weiter aufgedeckt werden. Eine „stotternde“ oder „nervöse“ Zeigerbewegung kann diesen Zustand vorwegnehmen, da die Durchbruchspannung sich nähert. Es kann wünschenswert sein, die Prüfung an dieser Stelle abzubrechen, bevor der Zustand des Prüflings durch Isolationsausfall weiter verschlechtert wird.

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

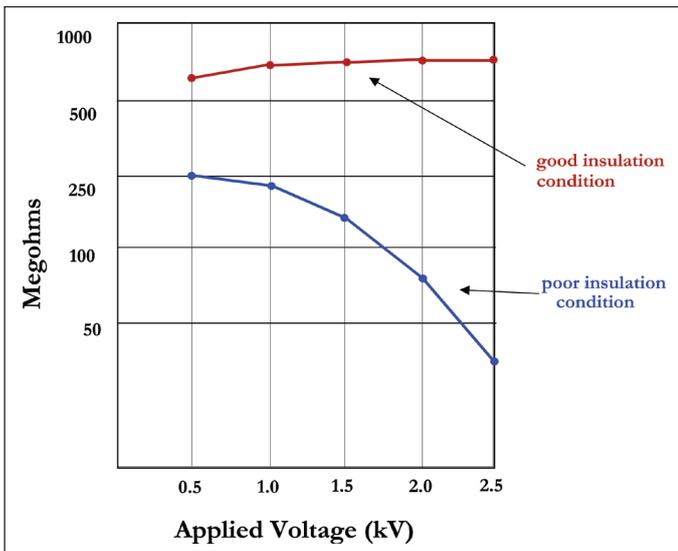


Abbildung 21: Stufenspannungsdiagramm

Die Stufenspannungsprüfung ist wie die PI-Prüfung eine wiederholbare, selbstauswertende Prüfung, die aufgrund ihrer kurzen Dauer frei von Fremdeinflüssen wie Temperatureinfluss ist.

## Rampenspannungsprüfung

Die Rampenspannungsprüfung ist in IEEE 95-2002 als Teil der empfohlenen Praxis für die Isolationsprüfung von elektrischen Wechselstrommaschinen (ab 2.300 V) mit hoher Gleichspannung anerkannt. Bei dieser Prüfmethode wird die Prüfspannung allmählich und wie festgelegt auf ein Endniveau erhöht (rampenförmig), was zu einem Anstieg des Stroms führt. Jede Stromschwankung im Vergleich zur Erhöhung der angelegten Prüfspannung kann nützliche diagnostische Informationen über den Zustand der Isolation liefern. Diese Prüfung, die häufig bei rotierenden Maschinen eingesetzt wird, hilft bei der Diagnose von verschiedenen Isolationsfehlern und Verschlechterungen, wie z. B.:

- Risse oder Sprünge
- Oberflächenverschmutzung
- Ungehärtetes Harz
- Feuchtigkeitsaufnahme
- Delamination
- Hohlräume

Diese Prüfung wird vom US Bureau of Reclamation für eine breiten Palette von rotierenden Maschinen mit Polyester-, Asphalt- und Epoxid-Glimmer-Isolationen empfohlen. Eine weitere mögliche Anwendung für die Rampenprüfung ist die Prüfung von Spannungsunterdrückern durch Überwachung der angelegten Spannung bei einem vorgegebenen Strom.

Die Rampenprüfung bietet eine bessere Kontrolle der angelegten Prüfspannung als die Stufenspannungsprüfung, was eine bessere Warnung vor drohendem Isolationsausfall und damit eine Möglichkeit zur Vermeidung von Isolationsschäden bietet. Darüber

hinaus beträgt der Spannungsanstieg typischerweise 1.000 V pro Minute, während der größere Spannungsanstieg bei einem Stufenanstieg typischerweise 1.000 V pro Sekunde beträgt. Der langsamere Spannungsanstieg führt auch weniger wahrscheinlich zu Isolationsschäden.

Zusätzlich erlaubt die Rampenprüfung dem Anwender, den Ableitstrom von den kapazitiven und Polarisationsströmen zu trennen. Dadurch können kleine Isolationsfehler leichter erkannt werden.

Die Rampenspannungsprüfung erfordert wie auch die Stufenspannungsprüfung, dass der Bediener die Prüfergebnisse interpretiert und den Isolationszustand aus den erstellten Diagrammen ermittelt. Nachfolgend finden Sie eine kurze Anleitung darüber, was die grafische Darstellung der Ergebnisse anzeigt:

- Wicklungen in gutem Zustand müssen eine glatte, nahezu lineare Stromanstiegskurve gegenüber der angelegten Spannung erzeugen.
- Jede Abweichung von einer glatten Kurve ist als Warnung anzusehen, dass sich die Isolationsprüfung einem möglichen Ausfall nähern könnte (Abweichungen können bis zu 5 % unter der Durchbruchspannung erreicht werden.)
- Ein drohender Ausfall wird in der Regel durch einen plötzlichen Stromanstieg angezeigt.
- Ein abrupter Stromabfall ist selten, aber wenn er auftritt, wenn die Prüfspannung über der Spitzenbetriebsspannung der Wicklung liegt, kann er auch ein Hinweis auf einen drohenden Ausfall sein.

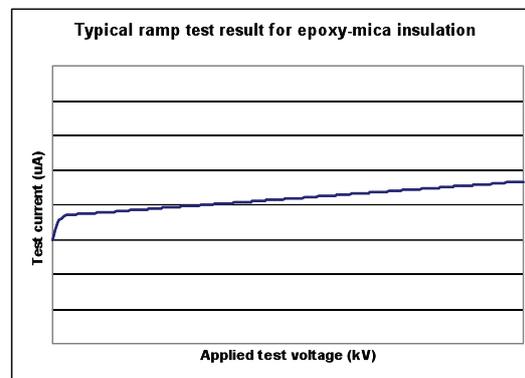


Abbildung 22: Typisches Rampenprüfergebnis für die Epoxid-Glimmer-Isolation

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

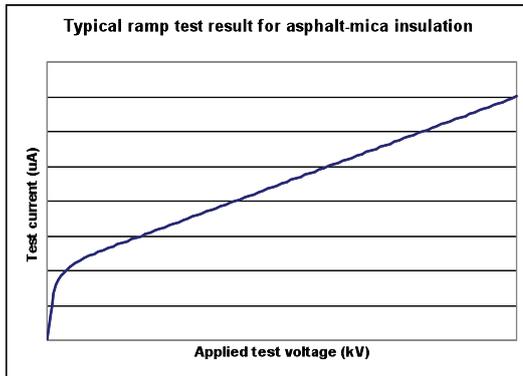


Abbildung 23: Typisches Rampenprüfergebnis für Asphalt-Glimmer-Isolation

Werden die Ergebnisse der Epoxid-Glimmer-Isolation in Abbildung 22 mit denen der Asphalt-Glimmer-Isolation in Abbildung 23 verglichen, so ist der Unterschied auf den vorhandenen Absorptionsstrom zurückzuführen. Die Asphalt-Glimmer-Isolation hat einen wesentlich höheren Absorptionsstrom im Verhältnis zum Ableitstrom. Dies führt zu einem deutlich steileren Gefälle. Beide Isolationen wurden jedoch aufgrund des linearen Ansprechens als in gutem Zustand diagnostiziert.

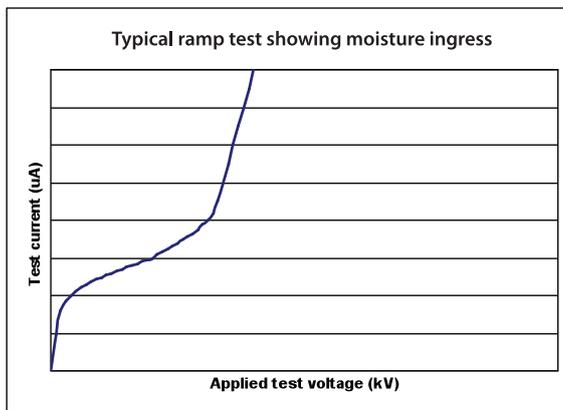


Abbildung 24: Typische Rampenprüfung mit Eindringen von Feuchtigkeit

Abbildung 24 ist die Reaktion der Isolation mit aufgenommener Feuchtigkeit. Dies kann z. B. durch einen längeren Zeitraum der Nichtbenutzung verursacht werden. Diese Prüfung wäre wegen des plötzlichen Stromanstiegs abgebrochen worden, um einen Ausfall zu verhindern.

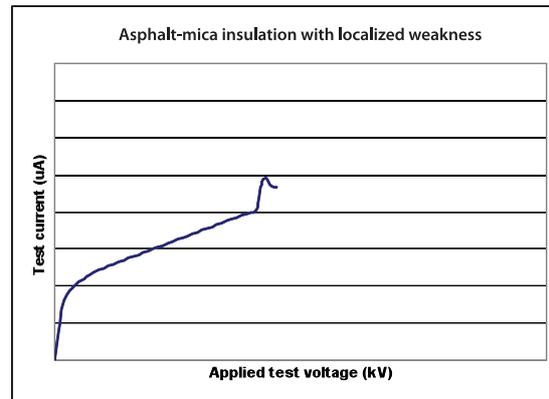


Abbildung 25: Asphalt-Glimmer-Isolation mit lokaler Schwachstelle

Alte Asphaltisolationen können ein leicht nichtlineares Verhalten aufweisen und sehr kleine Abweichungen oder Markierungen in der Stromkurve aufweisen. Signifikante lokale Schwächen zeigen einen viel größeren, plötzlichen Stromanstieg, wie in Abbildung 25 zu sehen ist. In diesem Fall wurde die Prüfung abgebrochen, da die Kurve sich der Vertikalen näherte; ein Zusammenbruch wäre in diesem Fall unmittelbar bevorstehend gewesen.

Risse in der Boden-Wand-Isolation zeigen ebenfalls eine plötzliche, nahezu vertikale Stromreaktion, der oft kleine Spitzen vorausgehen, bevor es schließlich zum Ausfall kommt. Abbildung 26 zeigt eine typische Reaktion, die in diesem Fall eine Epoxid-Glimmer-Isolation ist.

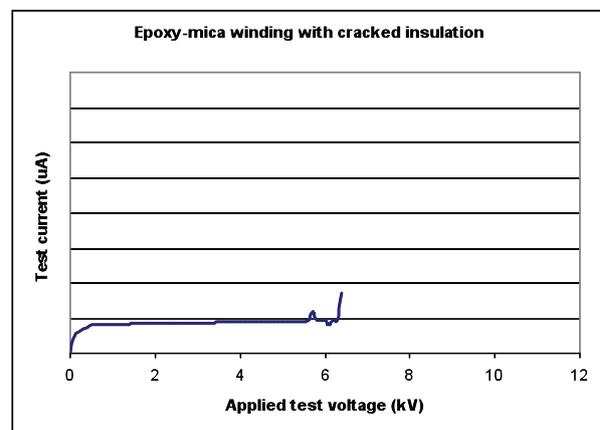


Abbildung 26: Epoxid-Glimmer-Wicklung mit gerissener Isolation

Auch die Stromkurven verschiedener Phasen können verglichen werden. Alle drei Wicklungen müssen vergleichbare Ergebnisse liefern. Eine Phase, die eine andere Reaktion aufweist, wie in Abbildung 27 gezeigt, zeigt normalerweise ein Problem mit dem Isolationszustand an.

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

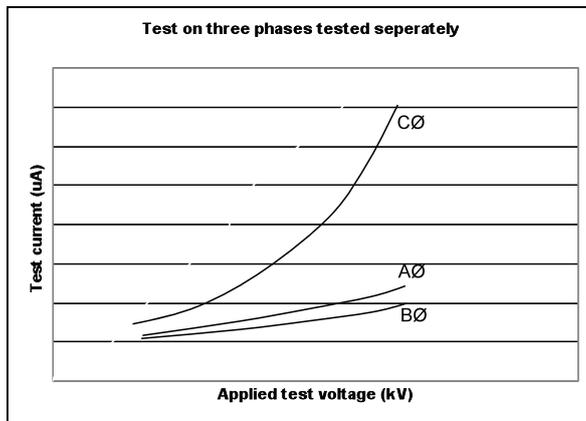


Abbildung 27: Prüfung an drei getrennt geprüften Phasen

Die gezeigten Kurven sind Beispiele für die Art der Fehler, die mit der Rampenprüfung diagnostiziert werden können. Unter Bezugnahme auf IEEE 95-2002 wird die Diagnosefähigkeit der Prüfung wesentlich detaillierter beschrieben.

## Dielektrische Entladungsprüfung

Die Dielektrische Entladungsprüfung (DD) ist eine relativ neue Prüfmethode, die von EDF, dem nationalen Energieversorger Frankreichs, entwickelt wurde und auf jahrelanger Forschung basiert. Während die anderen genannten Methoden, während des Ladevorgangs fließende Ströme messen, misst die DD-Prüfung den Strom, der während der Entladung des Prüflings fließt. Als solche ist sie nicht eine reine Isolationswiderstandsprüfung, sondern ein Zusatz zu üblichen Isolationsprüfungen. Die bei einer Isolationsprüfung gespeicherte Ladung wird am Ende der Prüfung automatisch entladen, wenn die Entladungswiderstände des Isolations-Prüfgerätes über die Anschlüsse geschaltet werden.

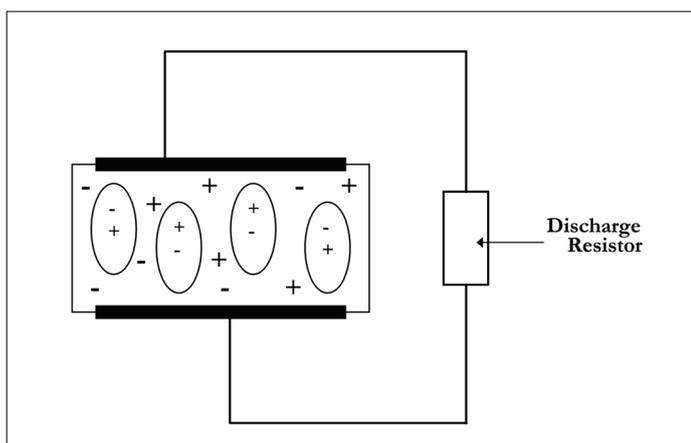


Abbildung 28: Entladung der gespeicherten Ladung des Prüflings

Die Entladungsgeschwindigkeit hängt nur von den Entladungswiderständen und der Menge der gespeicherten Ladung aus der Isolation ab. Die kapazitive Ladung wird jedoch schnell entladen, bis sich die Spannung an der Isolation auf nahezu Null reduziert hat. Zu diesem Zeitpunkt sind die Auswirkungen von Ableitströmen unerheblich. Es bleibt also nur noch die Umkehrung der dielektrischen

Absorption. Dies wird als dielektrische Reabsorption bezeichnet und ist ein Spiegelbild der dielektrischen Absorption.

Der kapazitive Strom fällt schnell von einem hohen Wert mit einer relativ kurzen Zeitkonstante (wenige Sekunden) ab. Der Absorptionsstrom (oder Reabsorption während einer Entladung) beginnt immer auf einem hohen Niveau, hat aber eine viel längere Zeitkonstante (bis zu mehreren Minuten). Sie wird dadurch verursacht, dass die Dipole ihre Ausrichtung innerhalb der Isolation zufällig bestimmen und die Elektronenhülle in eine unverzerrte Form zurückkehrt. Dies hat den Effekt, dass ein Strom fließt, wenn der Entladungskreis noch angeschlossen ist, oder dass eine Spannung an dem Prüfling wieder auftritt, wenn er offen bleibt. Die schnelle Beseitigung der Auswirkungen von Ableitströmen und kapazitiven Strömen ermöglicht es, den Polarisationsgrad der Isolation zu interpretieren und mit Feuchtigkeit und anderen Polarisierungseffekten in Beziehung zu setzen.

Der Prüfling wird zunächst 10 bis 30 Minuten bei Hochspannung aufgeladen, bis die volle Absorption erreicht ist. (Die Megger-Isolations-Prüfgeräte, die diese Prüfung automatisieren, laden den Prüfling 30 Minuten lang auf.) Zu diesem Zeitpunkt ist die Kapazität voll geladen und die dielektrische Absorption ist im Wesentlichen vollständig. Nur der Ableitstrom fließt weiter. An diesem Punkt wird die Prüfspannung entfernt und die Isolation durch die internen Entladungswiderstände des Gerätes entladen, um die kapazitive Ladung schnell abzuführen. Nach 60 Sekunden Entladung wird der verbleibende Stromfluss gemessen. Zu diesem Zeitpunkt ist die Kapazität entladen und die Spannung zusammengebrochen, so dass die in den Dipolen gespeicherte Ladung unabhängig von den während der Ladephase einer Isolationsprüfung dominierenden „verschleiernenden“ Strömen betrachtet werden kann.

Die Messergebnisse werden dann in die folgende Formel eingetragen und ein Index berechnet.

$$\frac{\text{Stromfluss nach 1 Minute (nA)}}{\text{Prüfspannung (V) x Kapazität (µF)}}$$

Die Messung ist temperaturabhängig, daher ist es wichtig, bei einer Referenztemperatur zu prüfen oder die Temperatur aufzuzeichnen.

Die Isolation in Hochspannungsanlagen besteht oft aus Schichten mit jeweils eigener Kapazität und zugehörigem Ableitwiderstand. Bei diesem Aufbau der Isolation ist es das Ziel, jede Schicht so anzuordnen, dass die Spannung gleichmäßig zwischen den Schichten verteilt wird. Wenn der Isolator entladen wird, nimmt die Ladung jeder Schicht gleichmäßig ab, bis keine Spannung mehr vorhanden ist.

Wenn eine Schicht zwischen guten Schichten fehlerhaft ist, nimmt ihr Ableitwiderstand ab, während die Kapazität wahrscheinlich gleich bleibt. Eine Standard-Isolationsprüfung wird durch die guten Schichten bestimmt und wird diesen Zustand wahrscheinlich nicht aufdecken. Aber während der dielektrischen Entladung wird die Zeitkonstante der fehlerhaften Schicht nicht mit den anderen übereinstimmen, um einen höheren DD-Wert zu erhalten. Ein niedriger DD-Wert zeigt an, dass der Reabsorptionsstrom schnell abfällt und die Zeitkonstante jeder Schicht ähnlich ist. Ein hoher Wert deutet darauf hin, dass die Reabsorption lange Relaxationszeiten aufweist, die auf ein Problem hinweisen können.

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

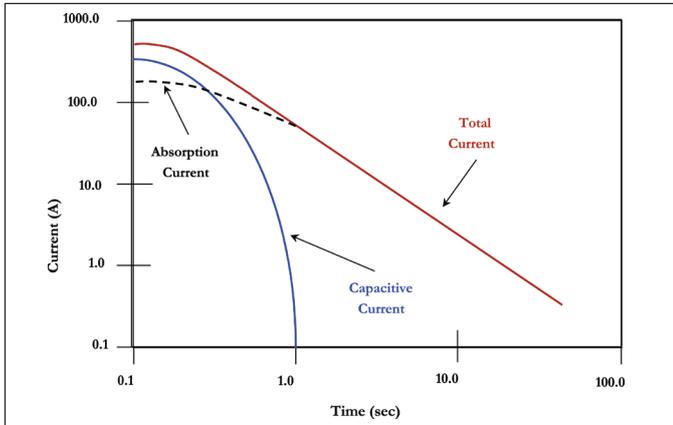


Abbildung 29: Reabsorptionsströme

Typische Bedingungen aus der praktischen Forschung, die hauptsächlich an Generatoren von EdF durchgeführt wurden, sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Diese Technik wurde für Hochspannungsgeneratoren entwickelt, findet aber auf jeder mehrschichtigen Isolation Anwendung.

D Wert (in mA V <sup>-1</sup> F <sup>-1</sup> )	Isolationsbedingung
>7	Miserabel
4–7	Schlecht
2–4	Fragwürdig
<2	In Ordnung

## Verschiedene Probleme/Verschiedene Prüfungen

Wie wir gerade gesehen haben, kann die dielektrische Entladungsprüfung verwendet werden, um Probleme in einer einzigen Schicht einer mehrschichtigen Isolation zu identifizieren. Andere Prüfmethode weisen möglicherweise nicht auf Probleme bei dieser speziellen Art von Isolierstruktur hin. In ähnlicher Weise ist die Polarisationsindex-Prüfung besonders wertvoll, um das Eindringen von Feuchtigkeit und Öl und ähnliche Verunreinigungen festzustellen. Diese eindringenden Verunreinigungen bieten geeignete Pfade für elektrische Ableitströme, die die umgebende Isolation beschädigen und schließlich als „Kurzschluss“ durchbrennen. Diese Art von Problem zeigt sich bei fast jeder Prüfspannung und erscheint als charakteristischer „flacher“ PI. Feuchtigkeit und Verunreinigungen führen ebenfalls zu einer Verschlechterung der Messwerte, aber dies erfordert einen vorherigen Vergleichswert; die PI-Prüfung hat den Vorteil, dass ein interner Vergleich durchgeführt werden kann.

Andere Probleme können jedoch eine PI- oder einfache Stichprobenprüfung „bestehen“, indem sie bei einer bestimmten Spannung hohe Widerstandswerte ergeben. Solche Probleme sind z. B. örtlich begrenzte physische Schäden wie Nadellöcher oder trockene, spröde Isolation in gealterten Geräten. Stufenspannungsprüfungen zeigen solche Probleme auf. Eine zunehmende Zahl von Mängeln beeinträchtigt den Stromdurchfluss, wann immer höhere Spannungen angelegt werden, und sind in einem abnehmenden Widerstand erkennbar. Eine höhere Spannung zieht Lichtbögen über kleine Luftspalten und warnt so frühzeitig vor einem beginnenden Problem. Mit zunehmendem Alter der Geräte können sich diese Lücken durch Ansammlung von Schmutz und Feuchtigkeit verdichten, bis sich ein Erdschluss entwickelt.

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

## ANHÄNGE

### Mögliche Fehlerquellen/Sicherstellen von Qualitätsprüfergebnissen

Im folgenden Abschnitt werden einige Bereiche mit möglichen Fehlern bei Isolationsprüfungen über 1 kV identifiziert. Diese Faktoren können bei der 1-kV-Prüfung von untergeordneter Bedeutung sein, aber erhöhte Spannungen und Empfindlichkeiten machen sie für die Prüfung höherer Spannungen kritisch.

#### Prüfleitungen

Vorsicht vor Geräten mit minderwertigen Leitungen, deren Nennspannung kleiner ist als die verwendeten Prüfspannungen. Es ist äußerst wichtig, dass die einzigen Ableitströme während einer Messung diejenigen sind, die von der zu prüfenden Isolation entwickelt werden. Wenn die Leitungen selbst Ableitströme verursachen, kann es sein, dass Sie den Isolationswiderstand der Leitungen messen und nicht den Prüfling.

Alle Leitungen, die mit Megger-Isolations-Prüfgeräten geliefert werden, sind hochwertige Leitungen, die auf Spannungen geprüft wurden, welche weit über der höchsten vom jeweiligen Gerät erzeugten Prüfspannung liegen. Auch dann ist es wichtig, Streuverluste zu reduzieren, indem verhindert wird, dass die Leitungen sich gegenseitig, den Boden und vor allem das Wasser berühren.

Weitere Informationen zum Aufbau und zur Bedeutung des sicheren Betriebs finden Sie auf Seite 31.

#### Durchführung von Messungen über 100 G $\Omega$

Messungen bis zu 100 G $\Omega$  können ohne besondere Vorsichtsmaßnahmen durchgeführt werden, vorausgesetzt, die Leitungen sind einigermaßen sauber und trocken. Die Schutzklemme kann verwendet werden, um bei Bedarf die Auswirkungen von Oberflächenableitung zu beseitigen. Größere Vorsichtsmaßnahmen sind erforderlich, wenn Widerstände über 100 G $\Omega$  gemessen werden, da Streustrom die Qualität der Messwerte beeinträchtigen kann. Beachten Sie Folgendes:

- Prüfleitungen dürfen sich oder andere Gegenstände nicht berühren, da dies zu Ableitung führen kann.
- Scharfe Stellen an den Prüfleitungsanschlüssen müssen vermieden werden, da dies eine Korona-Entladung begünstigt.
- Die Prüfbuchsen des Gerätes müssen tief sein, damit es nicht zu unerwünschter Ableitung zwischen den Anschlüssen kommt.

#### Genauigkeitsangaben

Achten Sie besonders auf die Genauigkeitsangabe eines Isolations-Prüfgerätes. Akzeptieren Sie keine reinen Plus/Minus-Prozentsätze für digitale Geräte. Die Anweisung muss auch plus/minus eine Anzahl von Ziffern enthalten, da keine digitale Anzeige die letzte Ziffer (kleinstbedeutende Ziffer oder l.s.d.) auf eine einzige Zahl festlegen kann. Die als „Prozent vom Messwert“ angegebenen Genauigkeiten zeigen an allen Punkten der Skala den gleichen Fehler an.

Analoge Aussagen, die als „Prozent der Skala“ oder „Vollausschlag“ (f.s.d.) angegeben sind, können irreführend sein. Da das

Genauigkeitsintervall auf der vollen Skalenlänge basiert, ergibt sich ein zunehmender prozentualer Fehler, wenn die Messwerte gegen eine logarithmische Skala ansteigen. Mit anderen Worten, die gleiche Anzahl von Zeigerbreiten am erweiterten unteren Ende der Skala wird nur wenige Megohm betragen, während dies am zusammengezogenen oberen Ende Hunderte von Megohm sein werden. Daher müssen Sie bei der Erfüllung einer gewünschten oder geforderten Genauigkeitsangabe nicht bei der Prozentangabe stoppen, sondern auch die Begriffe überprüfen.

Genauigkeitsangaben können auch irreführend sein, wenn sie nicht sorgfältig erklärt werden. Achten Sie darauf, den Bereich zu überprüfen, der von der Genauigkeitsangabe im Datenblatt abgedeckt wird, da er von Gerät zu Gerät stark variieren kann. Es gibt einen signifikanten Unterschied in einem Gerät, das eine Genauigkeit von 5 % bis zu 40 G $\Omega$  oder 100 G $\Omega$  aufweist und eine Genauigkeit, die einen Unterschied von 5 % bis zu 1 T $\Omega$  aufweist. Einige Geräte zeigen eine Genauigkeitsangabe, geben aber nicht den anwendbaren Bereich an. Fragen Sie immer nach dem Bereich für eine bestimmte Genauigkeit, wenn diese nicht angegeben ist.

Hinweis: Vorsicht vor Geräten, die keine veröffentlichten Lastkurven haben.

#### Ausgabe der angegebenen Spannung

Die Spannungsregelung ist bei einem Isolations-Prüfgerät mit einer Lastkurve in der Bedienungsanleitung angegeben, die die Ausgangsspannung gegen Widerstandslast anzeigt. Die Lastkurve stellt sicher, dass das Isolations-Prüfgerät bei typischen Isolationswiderstandswerten die volle Nennprüfspannung an den Prüfling abgibt. Dies mag zwar offensichtlich erscheinen, ist aber nicht unbedingt der Fall, es sei denn, der Hersteller eines bestimmten Prüfgeräts gibt dies an. Ein schlecht reguliertes Prüfgerät kann unter einer hochohmigen Last belastet werden, so dass die Isolation des Prüflings tatsächlich nur einen Bruchteil der Nennprüfspannung erfährt, die der Transformator nur unter maximalen Bedingungen abgeben kann. Ein derartiges Messgerät ist wahrscheinlich nicht mit einer Lastkurve ausgestattet.

Diese Bedingung stellten Inspektoren von Untersuchungsorganisationen wie etwa UL® bei den „Prüfern“ fest, die mit Hilfe von Transformatoren und anderen Komponenten auf den Baustellen „behelfsmäßig“ zu Geräten gemacht wurden, um High-Potential-Tests durchzuführen. Die Unzulänglichkeiten solcher Systeme führten zu der sehr spezifischen Sprache der Ausgangsspannung, die heute in der Normenliteratur üblich ist. Megger-Isolations-Prüfgeräte passen sich an, indem sie die Nennprüfspannung liefern und aufrechterhalten, sobald eine Mindestlast entsprechend den typischen Isolationswerten (in der Regel 1 bis 10 M $\Omega$ , je nach Modell und Spannungsauswahl) angelegt wird. Die Prüfspannung liegt typischerweise einige Volt über der Nennspannung, sollte aber nicht unterschritten werden, um die Integrität der Prüfungen und die Wiederholbarkeit bei der Durchführung planmäßiger vorbeugender Wartung zu gewährleisten. Wenn besonders genaue Berichtsdaten vorgeschrieben sind, zeigen einige Modelle neben der gewählten Spannung auch die tatsächliche Prüfspannung an, und diese Informationen gehören zu den Daten, die bei Abschluss der Prüfung zur Verfügung gestellt werden.

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

## Störunterdrückung

Störung ist das elektrische Rauschen, das bei einer Vielzahl von Frequenzen entsteht, die in dem Prüfling auftreten können. Es handelt sich in der Regel um induzierte Ströme oder Spannungen von benachbarten Geräten und ist sehr häufig in Umspannwerken, insbesondere in Hochspannungsumspannwerken, in denen Netzfrequenzen vorherrschen. Dieses elektrische Rauschen überlagert ein Wechselstromsignal mit dem Gleichstrom-Prüfstrom und kann zu erheblichen Schwankungen der Messwerte führen und den Bediener daran hindern, einen Messwert zu erhalten, wenn er die Fähigkeiten Ihres Gerätes übersteigt. Beispielsweise sind 4 mA mit 50/60 Hz-Rauschen durchaus typisch für das elektrische Rauschen, das in großen Umspannwerken (400+ kV) auftreten kann.

Achten Sie auf die Fähigkeit des Isolations-Prüfgerätes, die Auswirkungen dieses Wechselspannungsrauschens effektiv auszugleichen, was dazu führt, dass Messungen unter immer schwierigeren Bedingungen durchgeführt werden können. Nicht alle Geräusche sind jedoch auf die Netzfrequenzen beschränkt. Um andere Frequenzen unterzubringen, verfügen einige Spitzengeräte über weitere Softwarefilter, die die Auswirkungen dieses Rauschens eliminieren können. Es ist wichtig, dass das von Ihnen verwendete Gerät an die zu erwartenden Störungen angepasst ist.

## Regeln zum Prüfen und Vergleichen

Der Vergleich der Ergebnisse zur Bestimmung der Degradationsgrade ist der Schlüssel für das gesamte vorbeugende/vorausschauende Wartungskonzept. Es muss jedoch betont werden, dass dieses Konzept für Messungen in separaten Wartungsintervallen gilt. Auch dann ist eine strikte Standardisierung der Prüfverfahren und -bedingungen unerlässlich. Der Vergleich von „Vor-Ort“-Messungen ist ein ganz anderes Szenario und mit potenziellen Fehlern behaftet.

Es ist verlockend zu versuchen, Prüfungen mit zusätzlichen Messwerten zu untermauern. Möglicherweise nehmen Sie einige Anpassungen am Prüfling oder an der Einrichtung vor, oder eine andere Person kann nur schwer das Ergebnis akzeptieren und möchte es daher überprüfen. Aber ein Isolations-Prüfgerät ist nicht wie ein Multimeter! Die Hochspannungsprüfung verhält sich sehr ähnlich wie die Heisenberg Unbestimmtheitsrelation (Sie können nicht sowohl die Geschwindigkeit als auch die Position eines Elektrons kennen), das auf die Isolation angewendet wird. Das heißt, die Messung wirkt sich auf den Prüfling aus, so dass nachfolgende Messungen nicht genau an dem gleichen Prüfling vorgenommen werden.

Wie bereits beschrieben, wird durch die Anwendung einer Isolationsprüfung das Isoliermaterial polarisiert. Dadurch ändern sich die elektrische Konfiguration und dielektrische Eigenschaften. Da Isoliermaterial von der Konstruktion her ein schlechter Leiter ist, kann es sehr lange dauern, bis eine „Relaxation“ oder die Rückkehr zu einer zufälligen Konfiguration eintritt. Unmittelbar nach Beendigung einer Prüfung ist der Prüfling nicht genau derselbe wie vor der Prüfung. Eine sofortige Folgeprüfung wird durch die Restladung der ersten Prüfung zum Teil erheblich beeinträchtigt. Welche Messung ist richtig? Beide! Von beiden ist zu erwarten, dass sie den Zustand der Isolation zum Zeitpunkt der Prüfung korrekt messen. Darüber hinaus reichen branchenübliche Entladungsverfahren für die Durchführung einer Wiederholungsprüfung nicht aus. Solche Verfahren zielen

auf die Sicherheit des Personals ab, nicht auf die Qualifikation des Prüflings. Restladungen können stunden- oder sogar tagelang bestehen, was außerhalb der menschlichen Wahrnehmung liegt, sind aber für ein empfindliches Messgerät enorm. Das Gerät sollte mehrere Stunden lang oder vorzugsweise bis zum nächsten Tag geerdet bleiben, bevor weitere Prüfungen durchgeführt werden. Und dann dürfen äußere Faktoren, insbesondere die Temperatur, nicht außen vor gelassen werden.

Dies bedeutet nicht, dass eine Nachprüfung vor Ort nicht durchgeführt werden sollte. Für wichtige Informationen kann sie sehr wertvoll sein. Aber sie muss weiterhin berücksichtigt werden. Erwarten Sie nicht, dass die Werte übereinstimmen.

Zwei verschiedene Bediener können auch nicht den gleichen Grad an Details in Bezug auf das Verfahren beobachten. Die Temperatur ist ein Faktor. Wenn das Gerät eingeschaltet ist, um beispielsweise die Leistung zu überprüfen, und dann erneut geprüft wird, ist die zweite Prüfung nicht unbedingt mit der ersten vergleichbar. Auch der Zeitpunkt der Prüfung wird leicht übersehen. Ein Bediener kann die Prüfung zeitlich genau festlegen, während ein anderer lediglich auf die Stabilisierung des Messwertes wartet. Dies kann dazu führen, dass an verschiedenen Stellen der Zeit-Widerstandskurve gemessen wird (wie in der „Stichprobenprüfung“ dargestellt), und auch hier sind die beiden Ergebnisse nicht vergleichbar.

Wenn dies penibel erscheint, halten Sie sich die Normungsagenturen vor Augen. Organisationen wie UL® und ASTM® verfassen keine Prozeduren, die auf „einen Zähler anschließen und ablesen“ hinauslaufen. Vielmehr spezifizieren sie jedes variable Verfahren, einschließlich Aufbau, Vorgehensweise und Eigenschaften des Prüfgeräts, bevor die Ergebnisse in Übereinstimmung gebracht werden können. Standard-Wartungsverfahren verdienen nicht weniger Sorgfalt.

## Messkategorie (CAT)-Einstufung

Zusätzlich zu den offensichtlichen Leistungsdaten müssen die Messgeräte auch nach verschiedenen Qualitätsstandards bewertet werden. Im Vordergrund steht dabei die Sicherheit. Eine der am meisten anerkannten und geschätzten Sicherheitsnormen wurde von der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) in EN 61010-1:2001 festgelegt. Diese Norm definiert die Anforderungen, die Prüfgeräte erfüllen müssen, um in bestimmten Umgebungen vor Lichtbogenblitzen und Lichtbogenblasen geschützt zu sein. Es reicht nicht aus, nur festzustellen, dass ein Gerät „CAT-bewertet“ ist, wie gemeinhin genannt wird. Die CAT-Einstufung muss verstanden werden, da sie genau beschreibt, wo in der elektrischen Umgebung ein bestimmtes Gerät sicher eingesetzt werden kann und wo nicht.



**Abbildung 30: Die Megger MIT-Modelle stellen sicher, dass aus Sicherheitsgründen die CAT-Einstufung für alle Anschlüsse gilt. Einige der heute auf dem Markt befindlichen Geräte sind irreführend.**

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

## CAT-Einstufungsrichtlinien

Die „CAT-Einstufung“ wird in zwei Parametern dargestellt: Der eine zeigt die Systemebene an und der andere gibt die Bemessungsbetriebsspannung an. Die Bezeichnung „CAT IV 600 V“ bedeutet, dass das Gerät in jeder elektrischen Umgebung bis einschließlich CAT IV an Kabeln oder Geräten mit einer Spannung von bis zu 600 Volt Phase zu Erde betrieben werden kann. Vorsicht vor Produkten, die die CAT-Einstufung angeben, ohne den Spannungspegel aufzulisten. Dies sind unvollständige Informationen und die Nichtangabe kann im Sinne eines sicheren Betriebs kostspielig sein. Die CAT-Einstufung definiert den Transientenpegel (Spike oder Surge), für den das Gerät ausgelegt ist. Transienten variieren in Größe und Dauer je nach Quelle. Ein Transient kann mehrere kV in der Amplitude haben, aber seine Dauer ist auffallend kurz, ein typisches Intervall beträgt 50  $\mu$ s (Mikrosekunden). Seine Hauptgefahr besteht darin, dass er, wenn er auf die sinusförmige Spannung auffährt, einen Lichtbogen auslösen kann, der sich bis zum Ende des Zyklus fortsetzt. In einer CAT IV-Umgebung kann der verfügbare Kurzschlussstrom 1.000 Ampere übersteigen. In einem Gerät, das gerade die Schaltung testet, kann dies Hunderte von Kilowatt Wärme auf kleinstem Raum für ein paar Millisekunden erzeugen. Die schnelle Ausdehnung der Luft kann dazu führen, dass das Gerät zerfällt oder explodiert. Feuer, Verbrennungen und gefährliche herumfliegende Teile sind die Folge.

Geräte, die für eine Kategorie ausgelegt sind, haben einen ausreichenden Abstand zwischen den kritischen Teilen, um zu verhindern, dass ein Lichtbogen beim Auftreten einer Transiente den anfänglichen Ausfall verursacht. Die EN 61010 definiert die Designanforderungen, damit Geräte eine bestimmte Kategorie angeben können, und legt sowohl die elektrischen als auch die physikalischen Anforderungen (sogenannte Kriech- und Luftstrecken) fest, aus denen sich die Schaltung und das Gehäuse zusammensetzen.

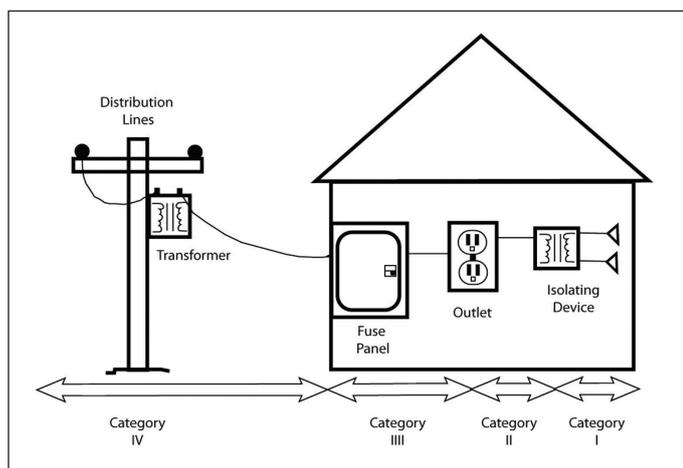


Abbildung 31: Elektrische Versorgung nach Kategorien gegliedert

## Die Bedeutung einer CAT-Einstufung

Die CAT-Einstufung wird durch die Entfernung nach dem Transformator bestimmt, der die Anlage wartet. Die Freileitungen oder unterirdischen Übertragungsleitungen bilden die CAT IV-Umgebung, da die verfügbare Energie in der Nähe des Transformators viel höher ist. Dies ist die gefährlichste Umgebung und erfordert ein Höchstmaß an Schutz. Wenn die Spannung durch die Sicherungstafel in das Gebäude fließt, ist die Impedanz der Schaltung höher und

die Transienten werden gedämpft, wodurch die verfügbare Energie in der Transiente reduziert wird. Dieser Prozess der progressiven Dämpfung, Energieeinsparung und Gefahrenreduzierung setzt sich in den übrigen Kategorien fort. Nach dem Serviceeingang befindet sich die CAT-III-Umgebung. Aus der Steckdose oder dem Ausgang wird die Einstufung zu CAT II, und innerhalb von Geräten (Fotokopierer, Fernseher usw.), die durch einen internen Transformator isoliert sind, ist die Umgebung CAT I. Diese Dämpfung ist der Grund dafür, dass Geräte nicht explodieren, ein Multimeter aber möglicherweise schon. Der Spannungsbereich eines Multimeters kann die Einstufung für die CAT-IV-Umgebung beinhalten, wodurch der falsche Eindruck entsteht, dass das Prüfgerät dort eingesetzt werden kann.

## Einige CAT-Einstufungs-Basisstatistiken

Verwechseln Sie Arbeits- oder Dauerspannung nicht mit transienten Spannungen. Das Prüfgerät muss Transienten von mehreren Vielfachen der Nennspannung sicher widerstehen können. Um z. B. auf einer 300 Vrms-Phasen-Neutralleitung in einer CAT-IV-Umgebung als sicher eingestuft zu werden, muss das Prüfgerät einem Impuls von 4 kV standhalten können!

Die Megger-Geräte der Serien MIT und S1 mit 5-kV- und 10-kV-Maximalleistung sind für CAT IV 600V ausgelegt, d. h., sie halten einem Impuls von 8 kV stand. Die neu eingeführten 15-kV-Geräte MIT1525 und S1-1568 sind für CAT IV 1.000 V ausgelegt und halten 12-kV-Impulsen stand.

Wie hoch ist das tatsächliche Risiko solcher Vorkommnisse? Kleine Transienten von einigen hundert Volt treten am häufigsten auf, aber glücklicherweise kommen große Transienten (5 bis 12 kV) nicht häufig vor. Aber das bedeutet nicht, dass sie diskontiert werden können. Wenn mit einem richtig eingestuftem Gerät gearbeitet wird, liegt die Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls in der Größenordnung von einer Million pro Stunde, die an das Netz angeschlossen ist. Reduzieren Sie jedoch den Schutz um eine Kategorie und die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls steigt um den Faktor 30. Das bedeutet, dass von 100 Bedienern, die Geräte der falschen Kategorie für eine Stunde pro Tag und 200 Tage pro Jahr an Live-Systemen einsetzen, alle 18 Monate eine gefährliche Situation eintreten kann.

## Prüfung in großen Höhen

Die Norm EN 61010-1:2001 der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) legt fest, dass die CAT-Einstufung bis zu einer Höhe von 2.000 m gültig sein muss. Denn mit zunehmender Höhe nehmen die Dichte der Luft und damit auch ihre Isolationseigenschaften ab. Dies ist ein Problem für Standorte wie z. B. Tagebau in Chile, wo die Höhenlage etwa 4.000 m betragen kann, was bedeutet, dass die CAT-Einstufung der meisten Geräte ungültig wird. Tatsächlich werden viele Geräte intern unter ihrer eigenen Prüfspannung in diesen Höhen ausfallen.

Mit der Einführung der neuesten Geräte der MIT- und S1-Reihe kam es zur Einführung der von für größere Höhen spezifizierten CAT-Einstufungen und dadurch wurden die Anforderungen der Norm EN 61010-1:2001 übertroffen. Die MIT515, MIT525 und MIT1025 können ihre Sicherheitskategorie bis 3.000 m ein- und beibehalten und die S1-568, S1-1068 und S1-1568 können ihre Sicherheitskategorie bis 4.000 m Höhe beibehalten.

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

## Prüfung des Isolationswiderstandes von rotierenden Maschinen

Im März 2000 genehmigte das IEEE-SA Standards Board eine Überarbeitung der IEEE Std 43-1974 durch das Electric Machinery Committee (Ausschuss für Elektrische Maschinen) der IEEE Power Engineering Society. Diese Revision ist IEEE Std 43-2000, die „IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery“. Änderungen an den in elektrischen rotierenden Maschinen verwendeten Isolationstypen haben zu unterschiedlichen Isolationswiderständen geführt und erforderten daher eine wesentliche Überarbeitung der IEEE-Norm. Nach dem IEEE zielt die Norm ab auf:

- Personen/Organisationen, die rotierende Maschinen herstellen.
- Personen/Organisationen, die für die Abnahme neuer rotierender Maschinen verantwortlich sind.
- Personen/Organisationen, die rotierende Maschinen prüfen und warten.
- Personen/Organisationen, die rotierende Maschinen bedienen.

Megger empfiehlt allen, die an der Prüfung und/oder Wartung von rotierenden Maschinen beteiligt sind, diese Norm im Detail zu überprüfen. Wir stellen einige der wichtigsten Punkte vor.

IEEE Std 43-2000 empfiehlt ein Verfahren zur Messung des Isolationswiderstandes von Anker- und Feldwicklungen in rotierenden Maschinen ab 1 PS, 750 W oder höher und gilt für Synchronmaschinen, Induktionsmaschinen, Gleichstrommaschinen und Synchronkondensatoren. Sie gilt nicht für kleinstmotorische Maschinen. Sie empfiehlt auch die Isolationsprüfspannung (basierend auf der Wicklungsleistung) und die minimal zulässigen Werte des Isolationswiderstandes für rotierende Maschinenwicklungen mit Wechselstrom und Gleichstrom.

Die folgende Tabelle gibt einen Anhaltspunkt für die bei einer Isolationswiderstandsprüfung anzulegende Gleichspannung. Beachten Sie, dass für Wicklungen über 12-kV-Spannungen bis zu 10 kV empfohlen werden.

*Wicklung Nennspannung (V)	Isolationswiderstandsprüfung Gleichspannung (V)
<1.000	500
1.000–2.500	500–1.000
2.501–5.000	1.000–2.500
5.001–12.000	2.500–5.000
>12.000	5.000–10.000

\* Phase-an-Phase-Nennspannung für Drehstrommaschinen, Phase-an-Erde-Spannung für Einphasenmaschinen und Direkt-nennspannung für Gleichstrommaschinen oder Feldwicklungen

Die Norm empfiehlt, jede Phase separat zu isolieren und zu prüfen (wenn möglich), da dieser Ansatz Vergleiche zwischen den Phasen ermöglicht. Die beiden nicht zu prüfenden Phasen müssen mit der gleichen Masse wie der Statorkern oder der Rotorkörper geerdet

werden. Wenn alle Phasen gleichzeitig geprüft werden, wird nur die Isolation zur Erde geprüft. Isolationswiderstandsmessungen müssen mit allen externen Geräten (Kabel, Kondensatoren, Überspannungsableiter usw.), die wie diese Geräte getrennt und geerdet sind, durchgeführt werden, da diese den Widerstandswert beeinflussen können. Eine gemeinsame Masse sollte verwendet werden, um Streuverluste im Erdungskreis zu vermeiden, die die Prüfergebnisse beeinflussen könnten.

Die Norm fordert sowohl die Isolationswiderstandsprüfung als auch die Polarisationsindex-Prüfung (PI) und empfiehlt, dass beide Prüfungen (wenn möglich) durchgeführt werden. Sie gibt an, dass die Prüfhistorie verwendet werden sollte, um Änderungen zu verfolgen. Wenn keine Historie vorhanden ist, gibt die Norm für beide Prüfungen Mindestwerte vor, die zur Abschätzung der Eignung der Wicklung herangezogen werden können. Dies sind die niedrigsten Werte, bei denen eine Wicklung für eine Überspannungsprüfung oder für den Betrieb empfohlen wird.

Die empfohlenen Mindestwerte für PI basieren auf der Wärme Klasse der Isoliermaterialien und gelten für alle Isoliermaterialien unabhängig von der Anwendung nach EN 60085-01: 1984. Die PI-Prüfung gilt nicht für nicht isolierte Feldwicklungen. Beachten Sie, dass ein sehr hoher PI-Wert (größer als 8) für lackierte Statorwicklungen aus Batist, Schellack-Glimmer oder Asphalt darauf hinweisen kann, dass die Isolation thermisch gealtert ist und ein Ausfallrisiko besteht. Durch eine physikalische Prüfung kann festgestellt werden, ob die Isolation trocken und spröde ist.

Wärme Klasse	Minimaler PI-Wert
Klasse A	1,5
Klasse B	2,0
Klasse F	2,0
Klasse H	2,0

Der empfohlene Mindestisolationswiderstand nach einer Minute bei 40 °C kann der folgenden Tabelle entnommen werden. Der Mindestwiderstand einer Phase einer dreiphasigen Ankerwicklung, die mit den beiden anderen geerdet ist, sollte etwa doppelt so hoch sein wie der der gesamten Wicklung. Wenn jede Phase einzeln geprüft wird (wobei Schutzschaltungen an den nicht zu prüfenden Phasen verwendet werden), sollte der beobachtete Mindestwiderstand das Dreifache der gesamten Wicklung betragen.

Minimaler Isolationswiderstand (MΩ)	Prüfling
kV* + 1	Für die meisten Wicklungen vor etwa 1970, alle Feldwicklungen und andere, die im Folgenden nicht beschrieben werden.
100	Für die meisten Gleichstromanker- und Wechselstromwicklungen ab ca. 1970 (formgespulte Spulen).
5	Für die meisten Maschinen mit wildgewickelten Statorspulen und formgewickelten Spulen unter 1 kV.

\* kV ist die Maschinen-Nennspannung von Anschluss zu Anschluss in rms kV.

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

Die Leistung der Maschine bestimmt, ob die Motorwicklungen entweder den Mindestwert für die Isolationswiderstandsprüfung oder die PI-Prüfung erreichen müssen oder das Minimum für beide Prüfungen.

Maschinenbewertung	Bewertungskriterien
10.000 kVA oder weniger	Sollte ENTWEDER einen Wert der PI-Prüfung oder einen Wert der Isolationswiderstandsprüfung (bei 40 °C) über den empfohlenen Mindestwerten haben.
Über 10.000 kVA	Sollte SOWOHL einen Wert der PI-Prüfung als auch einen Wert der Isolationswiderstandsprüfung (bei 40 °C) über den empfohlenen Mindestwerten haben.

## Auswirkungen der Temperatur

Temperaturschwankungen können einen erheblichen Einfluss auf die Isolationswiderstandswerte haben. Der Widerstand sinkt deutlich mit steigender Temperatur für das gleiche Gerät. Jede Art von Isoliermaterial hat einen unterschiedlichen Grad der Widerstandsänderung in Bezug auf Temperatur. Temperaturkorrekturfaktortabellen wurden für verschiedene Typen von elektrischen Geräten entwickelt und können vom Hersteller bezogen werden. Andernfalls empfiehlt es sich, eigene Korrekturfaktortabellen zu entwickeln, indem zwei Widerstandswerte für dasselbe Gerät bei zwei verschiedenen Temperaturen aufgezeichnet werden. Anschließend kann eine Kurve des Widerstands (auf einer logarithmischen Skala) gegenüber der Temperatur (auf einer linearen Skala) erstellt werden. Das Diagramm ist eine gerade Linie und kann auf eine beliebige Temperatur extrapoliert werden, so dass Korrekturfaktoren direkt abgelesen werden können.

Anstelle von detaillierten Daten gilt die „Faustregel“, dass für jede 10-°C-Temperaturerhöhung der Widerstand halbiert oder für jede 10-°C-Temperaturabsenkung der Widerstand verdoppelt wird. Zum Beispiel wird ein Widerstand von 100 GΩ bei 20 °C zu 25 GΩ bei 40 °C.

Warum ist die Temperaturkorrektur wichtig? Betrachten Sie das Beispiel in der folgenden Tabelle eines Motors, der zu verschiedenen Jahreszeiten bei unterschiedlichen Temperaturen (alle innerhalb eines 15-°C-Bandes) geprüft wurde. Die Temperaturanpassungen erfolgten mit Hilfe der Faustregel-Korrektur.

Datum	Isolationswiderstand (MΩ)	Temperatur °F	Temp. Angepasster Isolationswiderstand (MΩ)
1. Jan.	15.000	68	14.990
1. Jun.	9.000	80	14.276
2. Jan.	14.500	68	14.490
2. Jun.	8.500	82	14.562
3. Jan.	14.300	68	14.290
3. Jun.	8.700	81	14.341
4. Jan.	14.500	68	14.490
4. Jun.	8.900	81	14.671
5. Jan.	14.200	69	14.748
5. Jun.	8.900	80	14.117
6. Jan.	13.600	68	13.591
6. Jun.	8.900	78	13.071
7. Jan.	13.500	66	12.491
7. Jun.	7.500	80	11.896
8. Jan.	11.300	68	11.292
8. Jun.	6.500	80	10.310
9. Jan.	8.000	67	7.693

Die gemessenen Werte schaffen Verwirrung, wenn sie nicht temperaturkorrigiert werden. Wenn sie aufgetragen werden, erzeugen sie ein Diagramm, das für die Bestimmung eines Trends von begrenztem Nutzen ist.

Wenn die gleichen Daten für die Temperatur korrigiert und aufgetragen werden, beginnt die Kurve, eine wertvolles Bild für die Verschlechterung der Isolation anzugeben.

Die Temperaturkorrektur ist besonders wichtig bei Prüfungen mit höheren Spannungen und höherer Empfindlichkeit.

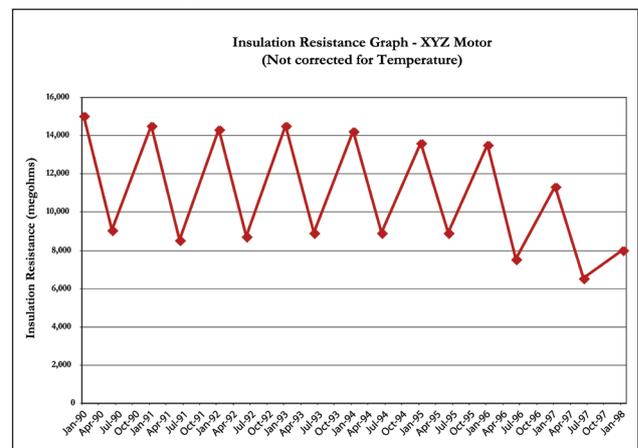


Abbildung 32: Isolationswiderstandskurve nicht temperaturkorrigiert

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

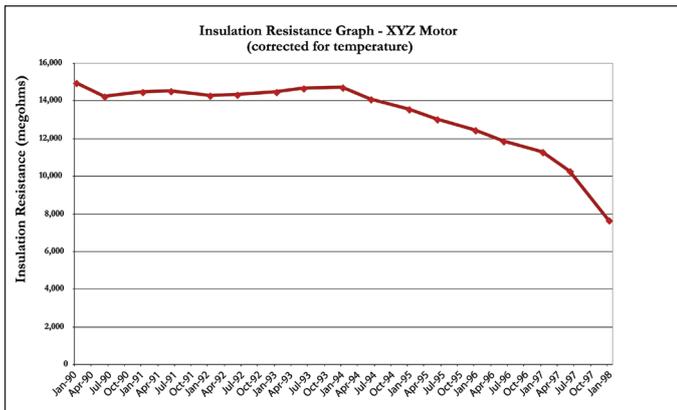


Abbildung 33: Isolationswiderstandskurve temperaturkorrigiert

## Auswirkungen der Luftfeuchtigkeit

Luftfeuchtigkeit (Feuchtigkeitsgehalt) hat einen Einfluss auf den Isolationswiderstand, kann aber nicht so genau quantifiziert werden wie der Temperatureinfluss, da verschiedene Arten von Isolationen Feuchtigkeit in unterschiedlichem Maße absorbieren, ebenso wie unterschiedliche Altersgruppen und Zustände desselben Typs. Bestenfalls lässt sich sagen, dass Luftfeuchtigkeit ein Faktor ist, der bei der Auswertung der Prüfergebnisse nicht außen vor gelassen werden sollte. Im Gegensatz zur Temperatur ist der Einfluss der Luftfeuchtigkeit nicht konstant, und solange die Temperatur über dem Taupunkt bleibt, hat die Luftfeuchtigkeit keinen nennenswerten Einfluss auf die Isolationswerte.

Steigende Luftfeuchtigkeit in der Umgebungsluft kann den Isolationswiderstand unterschiedlich stark beeinflussen. Wenn das Gerät regelmäßig über der Taupunkttemperatur (der Temperatur, bei der der Wasserdampf in der Luft als Flüssigkeit kondensiert) arbeitet, wird der Prüfmesswert durch die Luftfeuchtigkeit nicht wesentlich beeinflusst. Auch wenn das zu prüfende Gerät im Leerlauf ist, gilt das Gleiche – solange seine Temperatur über dem Taupunkt gehalten wird (und die Isolationsflächen frei von Verunreinigungen wie bestimmten Flusen und Säuren oder Salzen sind, die die Eigenschaft haben, Feuchtigkeit aufzunehmen).

Bei Elektrogeräten geht es vor allem um die Bedingungen auf den exponierten Oberflächen, wo Feuchtigkeit kondensiert und den Gesamtwiderstand der Isolation beeinflusst. Studien zeigen jedoch, dass sich in den Rissen und Spalten der Isolation Tau bildet, bevor er an der Oberfläche sichtbar wird. Taupunktmessungen geben Aufschluss darüber, ob solche unsichtbaren Zustände vorliegen und die Prüfergebnisse verändern.

Luftfeuchtigkeitseffekte erfordern größere Aufmerksamkeit, da die Prüfspannungen ansteigen, weil die höheren Spannungen die Ionisation viel leichter fördern können als bei niedrigen Spannungen. Folglich kann Luftfeuchtigkeit, die bei 1 kV keinen spürbaren Effekt hat, bei 5 kV zu verblüffend niedrigen Messwerten führen. Das ist nicht unbedingt ein Problem. Der Unterschied im Ansprechverhalten bei zwei verschiedenen Spannungen kann zur Erkennung von Feuchtigkeit verwendet werden, und die durchgeführten Prüfungen können zur Erkennung von Oberflächenfeuchtigkeit oder innerer Feuchtigkeit verwendet werden.

## Schutz vor Eindringen

Im Kleingedruckten der meisten Prüfproduktbulletins steht eine IP-Schutzart, eine Zahl, die dem Bediener wichtige Informationen liefert. Die IP-Schutzart gibt dem Bediener Auskunft darüber, ob ein Prüfgerät für seine Anwendung und Prüfumgebung geeignet ist.

„IP“ steht für „Ingress Protection“ (Schutz vor Eindringen). Das ist der Grad, in dem das Gerät dem Eindringen von Fremdkörpern standhalten kann. Das IP-Schutzartsystem wurde von der IEC (International Electrotechnical Commission) in ihrer Norm 529 festgelegt und dient dem Bediener als Leitfaden zum Schutz des Gerätes. Es kann dem Bediener auch helfen, eine fundiertere Kaufentscheidung zu treffen, indem es sicherstellt, dass das Prüfgerät für die Umgebung(en), in der/denen es sich befindet, ausgelegt ist.

Die IP-Schutzart besteht aus zwei Ziffern, die jeweils für ein separates Merkmal stehen. Die Bezeichnung gibt an, wie gut das Gerät gegen das Eindringen von Fremdkörpern, sowohl Feuchtigkeit als auch Staub, abgedichtet ist (je höher die Zahl(en), desto besser der Schutzgrad). Was würde eine typische Schutzart von IP54 einem Käufer über die Anwendungsmöglichkeiten eines Modells sagen? Wenn Sie zeigen wollen, dass Sie sich gut auskennen, dann liegt IP fünf vier, nicht IP vierundfünfzig vor. Jede Ziffer bezieht sich auf eine eigene Bewertung, nicht aufeinander.

Die erste Ziffer bezieht sich auf das Eindringen von Partikeln und spiegelt den Grad wider, in dem Feststoffe in das Gehäuse eindringen können. Ein Grad von „5“ bedeutet „staubgeschützt“ sowie gegen Eindringen mit einem Draht bis zu 1,0 mm geschützt, es gibt nur eine höhere Kategorie: „staubdicht“. Die zweite Ziffer bezieht sich auf die Feuchtigkeit. Ein Wert von „4“ bedeutet Beständigkeit gegen „Spritzwasser, in jede Richtung“. Die höheren Werte von 5 bis 8 bedeuten „Strahlwasser“ und „temporäres“ oder „kontinuierliches“ Eintauchen.

Und nun? Angenommen, ein in Frage kommendes Gerät ist nur nach IP43 eingestuft. Was würde das dem Bediener über seine Benutzerfreundlichkeit sagen? Kann es in einem Steinbruch oder Zementwerk umfassend genutzt werden? Kaum! Die Partikelzahl 4 bedeutet „Objekte gleich oder größer als 1 mm“, das ist ein Felsbrocken im Vergleich zu Partikeln, die typischerweise bei industriellen Prozessen entstehen. Fliegender Staub könnte das Gerät außer Betrieb setzen.

Angenommen, das Gerät hat die Schutzart IP42. Eine Feuchtigkeitsklasse von 2 bedeutet Tropfwasser. Daher wäre es nicht beständig gegen Sprühnebel. Der Erwerb eines Gerätes für eine Umgebung, die seine IP-Fähigkeiten übersteigt, bedeutet wahrscheinlich, dass der Bediener sehr bald ein weiteres benötigt. Wie wäre es mit einer Schutzart von IP40? Ein Feuchtwert von 0 bedeutet, dass das Gerät nicht gegen das Eindringen von Flüssigkeiten geschützt ist.

Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die verschiedenen IP-Schutzarten und deren Bedeutung für den Bediener:

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

Schutz gegen Zugang zu gefährlichen Teilen (erste Ziffer)	
Zahl	Beschreibung
0	Nicht geschützt
1	Geschützt gegen Zugang mit dem Handrücken (50 mm)
2	Geschützt gegen Zugang mit einem Finger (12 x 80 mm)
3	Geschützt gegen Zugang mit einem Werkzeug (2,5 mm)
4, 5, 6	Geschützt gegen Zugang mit einem Draht (1,0 mm)

Schutz gegen Eindringen von festen Fremdkörpern (erste Ziffer)	
Zahl	Beschreibung
0	Nicht geschützt
1	Objekte gleich oder größer als 50 mm
2	Objekte gleich oder größer als 12,5 mm
3	Objekte gleich oder größer als 2,5 mm
4	Objekte gleich oder größer als 1 mm
5	Staubgeschützt
6	Staubdicht

Schutz gegen Eindringen von Flüssigkeiten (zweite Ziffer)	
Zahl	Beschreibung
0	Nicht geschützt
1	Senkrecht tropfendes Wasser
2	Tropfwasser, Gehäuse bis 15° geneigt
3	Sprühwasser, bis zu einem Winkel von 60° zur Senkrechten
4	Spritzwasser, jede Richtung
5	Strahlwasser, jede Richtung
6	Starkes Strahlwasser, jede Richtung
7	Temporäres Eintauchen in Wasser
8	Kontinuierliches Eintauchen in Wasser

## Hochspannungsprüfung

Es gibt keine tatsächlich einzigartige Definition der „Hochspannungsprüfung“. Sie wird häufig verwendet, aber ihre Definition ist situationsbedingt, anders ausgedrückt, sie liegt im „Auge des Betrachters“. Grundsätzlich ist eine Hochspannungsprüfung ein elektrischer Belastungstest, der bei zwei- oder mehrfacher Nennspannung durchgeführt wird und manchmal auch als Stehspannungs- oder Prüfspannungsprüfung bezeichnet wird.

Da die Prüfung mit einer Spannung durchgeführt wird, die wesentlich höher ist als die Nennspannung des zu prüfenden Gerätes, spricht man von einer Überspannungsprüfung im Gegensatz zur Hochspannungsisolationsprüfung, die in der Regel bei einer Spannung unterhalb der Nennspannung des Gerätes durchgeführt wird. Die Überspannungsprüfung erzeugt anormale Spannungen im Prüfling und kann zur Beschleunigung der Alterung der Isolation beitragen. In der Tat verlangen einige Normen, dass die Spannung erhöht wird, bis der Prüfling zusammenbricht.

Soll eine Überspannungsprüfung durchgeführt werden, ist es üblich, vorab eine Unterspannungs-PI-Prüfung durchzuführen, um die Isolation vorzuqualifizieren.

Hochspannungsprüfungen können je nach Bedarf mit Wechsel- oder Gleichspannung durchgeführt werden. Prüflinge mit beträchtlicher Kapazität erscheinen als Kurzschluss zu einer Wechselstromprüfung und erfordern ein Prüfgerät mit sehr großen Leistungsmöglichkeiten, um die kapazitiven Ladeströme zu überwinden. In solchen Situationen ist es ganz normal, eine Gleichstromprüfung mit dem entsprechenden Spitzenwert durchzuführen.

## Strom (nA)-Messwerte vs. Widerstands (MΩ)-Messwerte

Isolations-Prüfgeräte messen den Strom und wandeln ihn in einen Widerstandswert um. Warum tun wir das? Nun, hauptsächlich weil es üblich ist. Eine gute Isolation führt zu einem hohen Messwert, während eine schlechte Isolation zu einem niedrigen Messwert führt. Außerdem ist eine gute Isolation überwiegend resistiv. Wenn wir die Prüfspannung verdoppeln, verdoppeln wir den Stromfluss, aber der Widerstand bleibt konstant. Manchmal ist es jedoch einfacher, Probleme zu diagnostizieren, indem die tatsächlich fließenden Ströme berücksichtigt werden.

Sie haben die Wahl, denn viele moderne Isolations-Prüfgeräte sind in der Lage, ihre Messungen in beiden Geräten darzustellen.

## Durchbrennfähigkeit

Voll funktionsfähige Isolations-Prüfgeräte über 1 kV verfügen oft über einen „Brennmodus“. Es ist eine Funktion, die vielleicht nie verwendet wird, aber in einem beschränkten Anwendungsbereich brauchbar ist.

Isolations-Prüfgeräte erzeugen hohe Spannungen in signifikanten Widerständen. Tritt jedoch ein Durchschlag innerhalb der Isolation auf, sinkt der Widerstand, der Strom steigt und die Spannung sinkt. Wenn die Geräte sich selbst überlassen würden, würde der Störlichtbogen erlöschen, der Widerstand steigen und die Spannung ansteigen, was wiederum zu einem Durchschlag führt und so weiter. Dieser fortlaufende Zyklus erlaubt keine Widerstandsmessung und könnte sogar Nadellöcher öffnen oder Brennsuren vergrößern. Anstatt weitere Schäden zu verursachen, werden die meisten Isolations-Prüfgeräte abgeschaltet.

Wenn Sie jedoch die Stelle des Durchschlags finden möchten, kann dies sehr schwierig sein. Aus diesem Grund bieten einige Geräte einen vom Bediener wählbaren „Brennmodus“; die automatische Abschaltung wird aufgehoben und ein niedriger Lichtbogen bleibt erhalten. Es ist jedoch zu beachten, dass die Kurzschlussbegrenzung des Gerätes weiterhin gilt. Das Prüfgerät liefert keinen „toten“ Kurzschluss. Die Funktion ermöglicht es dem Bediener, den Fehler zu lokalisieren oder zu identifizieren, indem er nach einem Funken

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

oder einer Rauchfahne sucht oder einen Ionisationsdetektor verwendet. Nadellöcher in Wicklungen können identifiziert werden, indem sie mit Isolierlack überzogen werden und das Gerät wieder in Betrieb genommen wird. In der Kabelwartung wird ein Hochpotential-Prüfgerät mit viel höheren Strömen als Isolations-Prüfgeräte eingesetzt, um einen hochohmigen Fehler „abzubrechen“ und in einen „offenen“ Fehler umzuwandeln, der durch Lichtbogenreflexionstechniken viel leichter zu erkennen ist.

## Trocknen von Elektrogeräten

Strom und Wasser passen nicht gut zueinander und so ist es oft notwendig, die Isolation „auszutrocknen“. Dies kann notwendig sein, um Oberflächenfeuchtigkeit zu entfernen oder um Feuchtigkeit aus dem Inneren der Isolation zu treiben. In der Tat haben einige Geräte eingebaute Heizschlangen, die für diesen Zweck verwendet werden können. Aber auch für die Trocknung von Elektrogeräten stehen verschiedene andere Verfahren zur Verfügung.

Die zufriedenstellendste Lösung des Problems besteht darin, die Wicklungen in einen Ofen mit geeigneter Temperaturregelung und richtiger Luftzirkulation zu stellen. Wenn dies nicht möglich ist, können Infrarotlampen verwendet werden, oder es kann ein geeignetes Gehäuse um die Maschine herum gebaut werden, wobei Dampfschlangen oder elektrische Widerstandsgeräte als Wärmequelle eingesetzt werden. Für die freie Luftzirkulation sind Öffnungen vorzusehen, da sonst durch den Austrag von Feuchtigkeit die Luftfeuchtigkeit in der Trockenkammer ansteigen würde. Zur Erhöhung der Luftbewegung können Gebläse eingesetzt werden.

Die Vakuumtrocknung wurde auch effektiv eingesetzt, um die Wiederinbetriebnahme des Gerätes zu beschleunigen, aber diese Methode erfordert zusätzliche Vorsichtsmaßnahmen und sollte nur von erfahrenem Personal durchgeführt werden.

Eine weitere häufig verwendete Methode ist die Zirkulation von Niederspannungsstrom durch die Wicklungen. Diese Methode sollte jedoch erst angewendet werden, wenn der Isolationswiderstand einen Wert von mindestens 100 M $\Omega$  erreicht hat. Der Strom sollte auf einen Bruchteil der auf dem Typenschild stehenden Ampere begrenzt werden, und die maximalen Temperaturen an den isolierten Teilen müssen sorgfältig überprüft werden. Die maximale Trocknungstemperatur an den Wicklungen sollte, gemessen mit einem Thermometer, 90 °C nicht überschreiten. Dies verhindert nicht nur die schnelle thermische Verschlechterung der Isolation, sondern auch Schäden durch die hohen Dampfdrücke, die bei der Dampferzeugung entstehen würden.

Wenn eine Trocknung erforderlich ist, können Sie mit Hilfe von Aufzeichnungen feststellen, wann die Isolation feuchtigkeitsfrei ist. Als Beispiel für die Bedeutung vergangener Messungen ist ein unter Wasser gesetzter Motor zu nennen. Nach Reinigung zeigt eine Stichprobenmessung mit dem Megger-Prüfgerät 15 M $\Omega$  an. Wenn die bisherigen Aufzeichnungen zeigten, dass der Isolationswiderstand zwischen 10 und 20 M $\Omega$  beträgt, wäre der Motor in gutem Zustand. Wenn hingegen die bisherigen Aufzeichnungen die normalen Widerstandswerte von 100 bis 150 M $\Omega$  anzeigten, wüsste der Bediener, dass noch Feuchtigkeit in den Motorwicklungen vorhanden ist.

Bei Trocknungsvorgängen, bei denen Isolationswiderstandswerte als Indikator für die Gebrauchstauglichkeit von Wicklungen oder für das

Anlegen von Prüfpotential verwendet werden, muss die Trocknung für eine ausreichende Zeit fortgesetzt werden, um sicherzustellen, dass die Werte zuverlässig sind. Häufig nimmt die Widerstandskurve einen oder mehrere scharfe Einbrüche, bevor sie sich ausgleicht oder weiter in eine positive Richtung ansteigt. Das liegt an der Feuchtigkeit, die aus den Wicklungen austritt. Wenn die Maschine vollständig getrocknet ist, sind weitere Arbeiten erforderlich, um den verbleibenden Staub zu entfernen. Dies kann durch die Verwendung von trockener Druckluft mit einem Druck von nicht mehr als 40 psi erfolgen.

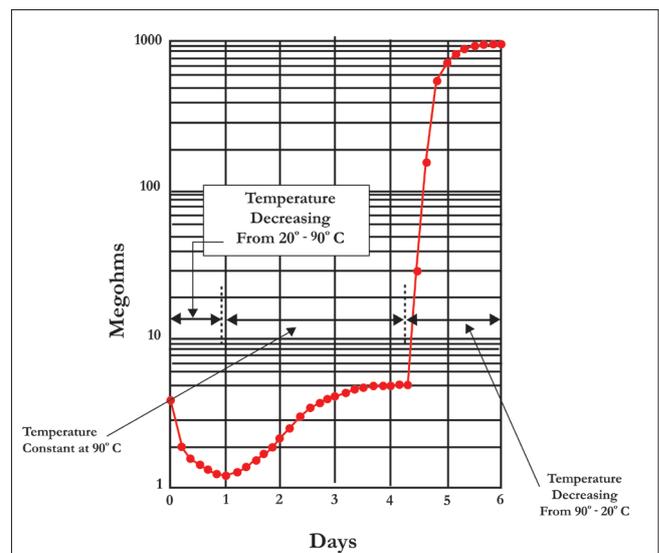


Abbildung 34: Typische Trocknungswiderstandskurve

Abbildung 34 zeigt eine typische Trocknungskurve für einen Gleichstrommotoranker, die angibt, wie sich der Isolationswiderstand ändert. Im ersten Teil des Verlaufes nimmt der Widerstand wegen der höheren Temperatur ab. Dann steigt er bei konstanter Temperatur mit fortschreitender Trocknung an. Schließlich steigt er auf einen hohen Wert an, da die Raumtemperatur (20 °C) erreicht wird.

Bei der Prüfung der Nass-Isolation mit einem Isolations-Prüfgerät gibt es einen erheblichen Vorbehalt; nasse Geräte sind anfällig für Spannungseinbrüche. Wenn Wicklungen viel Feuchtigkeit aufgenommen haben, können auch niedrige Spannungen die Isolation durchschlagen. Daher sollte der Bediener vor dem Anlegen hoher Spannungen sehr vorsichtig sein. Modernere Megger-Isolations-Prüfgeräte ermöglichen die Einstellung der Prüfspannung von 25 Volt bis zu 5.000 Volt in 25-Volt-Schritten.

## Prüflingsentladung

Vielleicht wurde Ihnen beigebracht, einen Kondensator zu entladen und dann den Kondensator mit kurzgeschlossenen Anschlüssen zu lagern. Haben Sie sich jemals gefragt, warum Sie, wenn Sie den Kondensator entladen haben und vielleicht überprüft haben, dass keine Spannung an den Klemmen anliegt, die Anschlüsse kurzschließen mussten?

Der Grund dafür ist der dielektrische Absorptionsstrom. Wenn die Anschlüsse nicht kurzgeschlossen sind, wird die durch dielektrische

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

Absorption gespeicherte Energie langsam freigesetzt, wobei negative Ladung zu einem Anschluss und positive Ladung zum Pluspol wandert. Im Laufe der Zeit kann sich diese Ladung auf ein gefährliches Niveau aufbauen, das so hoch ist wie die ursprüngliche Prüfspannung, und mit einer beträchtlichen Menge an Energie in der Hinterhand. Diese Energie kann tödlich sein.

Am Ende einer Isolationsprüfung ähnelt der Prüfling einem geladenen Kondensator; im Isolationsdielektrikum bleibt eine beträchtliche Menge an Energie gespeichert.

Es gibt eine wichtige „Faustregel“ zum Laden und Entladen von Prüflingen. Diese Regel besagt, dass der Bediener den Prüfling fünfmal so lange entladen muss, wie er geprüft wurde. Wenn der Bediener eine 10-minütige PI-Prüfung durchführt, sollte er das Gerät 50 Minuten lang entladen.

Ein qualitativ hochwertiges Gerät entlädt den Prüfling automatisch, sobald eine Prüfung beendet oder unterbrochen wird. Einige Geräte geringerer Qualität haben einen separaten Entladungsauswahlknopf oder -schalter, der einen Schritt zu einer Prüfung hinzufügt. Wird dieser Schritt vergessen, kann der Prüfling für die nächste Person, die ihn handhabt, tödlich sein.

Megger-Isolations-Prüfgeräte erfassen auch die Spannung am Prüfling während der Entladungsphase und zeigen diese Spannung an, bis sie auf ein sicheres Niveau gefallen ist. Zu diesem Zeitpunkt ist das Gerät sicher zu handhaben.

Zu diesem Punkt haben wir jedoch nur die gespeicherte kapazitive Ladung entladen. Wie zu Beginn dieses Leitfadens erläutert, wird eine beliebige Kapazität zu Beginn einer Prüfung relativ schnell aufgeladen. Ebenso wird die kapazitive Ladung am Ende einer Prüfung relativ schnell entladen. Aber der dielektrische Absorptionsstrom braucht viel länger, um hineinzugelangen und auch viel länger, um herauszukommen.

Während der Prüfling also sofort sicher verwendet werden kann, werden die Anschlüsse, wenn sie nicht kurzgeschlossen sind, allmählich aufgeladen und stellen wieder eine Gefahr dar. Stellen Sie also sicher, dass die Anschlüsse kurzgeschlossen und geerdet sind, wenn das Gerät nicht wieder in Betrieb genommen wird.

## Ladezeit für Großgeräte

Eine Frage, die uns oft gestellt wird, ist: „Wie lange dauert es, ein bestimmtes Gerät zu laden?“ Die Antwort ist: „Wir wissen es nicht!“

Warum nicht? Nun, die Antwort hängt von der tatsächlichen Konfiguration des jeweiligen betroffenen Gerätes ab. Beispielsweise gibt das Megger S1-5010 eine Ladezeit von „weniger als 5 Sekunden pro Mikrofarad bei 2 mA-Kurzschlussstrom“ und „2,5 Sekunden pro Mikrofarad bei 5 mA-Kurzschlussstrom“ an. Wenn Sie also die Kapazität des Prüflings kennen, können Sie die Ladezeit berechnen, egal ob es sich um einen Motor, ein Kabel oder nur eine Platte aus Isoliermaterial handelt.

## Motorbetriebene Isolations-Prüfgeräte

Eine weitere Frage, die uns häufig gestellt wird, ist: „Was ist mit den alten motorbetriebenen Isolations-Prüfgeräten in Holzkisten passiert?“ Einige Personen waren anscheinend der Meinung, dass sie

den Standard für Isolationsprüfungen gesetzt haben und immer noch tun.

Diese motorbetriebenen Holzkisten mit einem externen Motor wurden zwischen 1910 und 1972 hergestellt und verwendeten das original Evershed-patentierete „Kreuzspulenoammeter“. Dies war ein großes, schweres Messwerk, das, wie der Name schon sagt, zwei Spulen in einem Winkel zueinander hatte. Das war das erste „wahre Ohmmeter“. Die Konstruktion des Messwerks hatte Vor- und Nachteile.

Der Hauptvorteil war, dass es aufgrund des Gewichts des Messwerks eine beträchtliche Trägheit hatte und daher unempfindlich gegen Störungen oder transiente Ereignisse war. Dies führte zu einer sehr ruhigen Bewegung. Leider war das Messwerk durch sein reines Gewicht recht empfindlich, und so mussten die Geräte mit Vorsicht behandelt werden. Außerdem mussten die Geräte vor dem Gebrauch nivelliert werden und wurden deshalb mit einer Nivellierwaage auf der Skala und verstellbaren Füßen geliefert. Die Messwerke waren auch ziemlich unempfindlich und mit maximalen Widerstandsfähigkeiten, die in hohen Megohm oder niedrigen Gigaohm gemessen werden konnten.

Alternative Energiequellen wurden entwickelt. Der alte Generator war groß und schwer, wie jeder, der versucht hat, eines dieser alten Geräte in die Hand zu nehmen, bestätigen wird; Sie würden sicherlich keine PI-Prüfung beim Handkurbeln machen wollen, aber wenn keine Netzstromversorgung vorhanden war, gab es keine Alternative.

Durch den technischen Fortschritt konnten „elektronische Messwerke“ eingesetzt werden, die robuster und genauer waren. Es wurden neue Niederspannungsgeneratoren entwickelt, die das Handkurbeln wesentlich erleichterten und schließlich die Batterietechnik den Einsatz von reiner Batterieleistung ermöglichten. Dies führte zu einer langfristigen, sehr stabilen Stromversorgung, wie wir sie heute sehen.

Der Einsatz von Elektronik hat zu leichteren, robusteren und präziseren Geräten geführt, die schneller reagieren. Sie können mehr Informationen liefern, was dazu führt, dass wir transiente Ereignisse sehen, die vorher durch die relative Instabilität der Stromversorgung und die Trägheit des Messwerks völlig verdeckt wurden.

Was ist besser? Die Entscheidung liegt bei Ihnen.

## PRÜFLEITUNGSDESIGN

Das Design der Prüfleitungsätze ist so ausgelegt, dass sie leicht an zahlreiche spannungslose Anlagen zur Messung des Isolationswiderstandes angeschlossen werden können. In allen Fällen liegt es in der Verantwortung des Anwenders, sichere Arbeitspraktiken umzusetzen und vor dem Anschluss zu überprüfen, ob das System sicher ist. Selbst elektrisch isolierte Anlagen können beträchtliche Kapazität aufweisen und sich während der Anwendung der Isolationsprüfung stark aufladen. Die dabei entstehenden Ladungen können tödlich sein. Deshalb dürfen Verbindungselemente (auch Prüfkabel und Prüfklemmen) während der Prüfung nicht berührt werden. An der Anlage angebrachte Verbindungselemente dürfen erst berührt werden, wenn die Anlage sicher entladen wurde.

Prüfleitungen sind ein Schlüsselbestandteil jedes Präzisionsgerätes. Sicherheit, Langlebigkeit und verlässliche Anschlüsse an unterschiedliche Prüfkörper aus echten Anwendungen sind von

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

höchster Wichtigkeit.

Sorgfältiges Design sorgt für wiederholbare Verbindungen, die praktisch und sicher in der Anwendung sind. Nur die besten Materialien und die geeignetsten Materialien müssen verwendet werden, um die notwendige Mischung aus Leistung und Sicherheit zu bieten. Die sorgfältige Spezifikation des Kabels sorgt beispielsweise dafür, dass es unter allen Bedingungen flexibel bleibt und extrem gute Isolationseigenschaften aufweist, die die durchgeführten Messungen nicht beeinträchtigen.

Die Verwendung eines doppelt isolierten Silikonkabels gewährleistet zuverlässige und sichere Messungen. Die Prüfung mit schlechten oder elektrisch undichten Leitungen kann irreführende Messungen zur Folge haben und dazu führen, dass eine einwandfreie Isolation fehlerhaft diagnostiziert wird, was sowohl Zeit als auch Geld für unnötige Reparaturen verschwendet. Dies gilt insbesondere bei langen Prüfleitungen.

## Signifikante Sicherheitsverbesserungen

Die internationale Norm EN 61010-031 beschreibt die Sicherheitsanforderungen für Handmessprüfgeräte für die elektrische Messung und Prüfung. Eine Reihe von Änderungen wurde an der Norm vorgenommen, insbesondere: Vermeidung von Gefahren durch Lichtbogenblitz und Kurzschlüsse.

Zwei Gefahren werden berücksichtigt: (1) Die Gefahr, dass eine Sondenspitze oder eine Krokodilklemme zwei Hochenergieleiter vorübergehend überbrückt, und (2) die Gefahr, dass ein Kontakt unterbrochen wird, während Strom fließt.

Diese Gefahren gelten insbesondere für viele Umgebungen, in denen 5-kV- und 10-kV-Isolationswiderstandsprüfgeräte eingesetzt werden. Sollte eine Sonde oder eine Klemme während des Anschlusses zwei Hochenergieleiter kurzzeitig kurzschließen, fließt ein extrem hoher Strom, der das Metall erwärmt und die Isolation zum Schmelzen bringt. Dies selbst kann zu schweren Verbrennungen beim Bediener oder Zuschauer in der Nähe der Klemme oder der Sonde führen. Sollte der Kontakt während des Stromflusses unterbrochen werden, kann ein Lichtbogen entstehen, der zu einer äußerst ernstesten Situation führt, die als Lichtbogenblitz bezeichnet wird.

Die Norm beschreibt die Gefahr des Lichtbogens wie folgt: „Der Lichtbogen ionisiert die Luft in der Nähe des Lichtbogens und ermöglicht einen kontinuierlichen Stromfluss in der Nähe der Sondenspitze oder der Krokodilklemme. Wenn genügend Energie zur Verfügung steht, breitet sich die Ionisation der Luft weiter aus, und der Stromfluss durch die Luft nimmt weiter zu. Das Ergebnis ist ein Lichtbogenblitz, der einer Explosion ähnelt und zu Verletzungen oder zum Tod eines Bedieners oder Zuschauers führen kann.“

Nach EN 61010-031:2008 müssen Sondenspitzen und Krokodilklemmen so konstruiert sein, dass das Risiko von Lichtbogenblitzen und Kurzschlüssen minimiert wird, und diese Anforderung gilt für alle Krokodilklemmen oder Klemmen, die der Installationskategorie III oder IV (CAT III oder CAT IV) entsprechen. Die Außenflächen von Krokodilklemmen dürfen daher nicht leitfähig sein, und es dürfen keine Metallteile (wie in der Norm definiert) bei geschlossener Klemme zugänglich sein.

Während der Konstruktionsphase werden detaillierte Mess- und

Prüfverfahren zur Beurteilung der elektrischen Kriech- und Luftstrecken eingesetzt, um die Einhaltung der Norm zu gewährleisten. Die Zugänglichkeit von leitfähigen Metallteilen wird mit einem Prüffinger nach EN-Norm beurteilt.

## Zu beachtende Punkte für einen sicheren Betrieb

In elektrischen Prüfumgebungen sind sichere Arbeitspraktiken unerlässlich, um die Sicherheit der Bediener zu gewährleisten. Isolationsprüfungen in Hochspannungs- und Hochenergieumgebungen stellen eine Reihe von einzigartigen Gefahren dar, die im Folgenden aufgeführt sind:

### 1. Beibehalten der Durchführbarkeit mit einer vollisolierten Klemme

Wenn die zusätzliche Isolation einer Klemme den Betrieb und die Fähigkeit behindert, eine zuverlässige Verbindung mit der Vielzahl der benötigten Stromschienen, Drähte und Anschlüsse herzustellen, ist das Design nutzlos und der Bediener kann versucht sein, die zusätzliche Isolation zu entfernen, um die Verbindung herzustellen.

### 2. Schutz vor geladener Kapazität von langen Kabeln

Verschließbare Hochspannungsstecker am Geräteende verringern die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stecker die Verbindung verliert oder abfällt, was dazu führen könnte, dass die Last am Ende einer Prüfung zu einer tödlichen Gefahr werden kann und das Gerät fälschlicherweise meldet, dass keine Spannung vorhanden war. Die Verriegelung ist einfach zu bedienen und verhindert das Lösen des Steckerendes und trägt auch dazu bei, die Integrität der Lastabfuhr nach einer Prüfung zu gewährleisten.

### 3. Schutz vor Hochspannung in einer CAT-IV-600-V- oder CAT-IV-1000-V-Umgebung

Da der Anschluss an weitere vorgelagerte Versorgungsnetze erfolgt (Überspannungskategorie IV bezieht sich auf die Einspeisung von Industrieanlagen), ist ein erhöhter Schutz vor Überspannungen erforderlich. Dabei handelt es sich um natürlich am Netz auftretende Transienten, die typischerweise durch Schaltvorgänge oder entfernte Blitzschläge verursacht werden und die angeschlossenen Geräte, Prüfleitungen, Klemmen usw. mit Impulsen von vielen tausend Volt versorgen. Diese Geräte müssen den Bediener während des Anschlussvorgangs schützen. Eine Klemme, die für den Einsatz an einer 600-V-Versorgung in der Überspannungskategorie CAT IV ausgelegt ist, muss solchen Impulsen bis zu 8 kV standhalten können.

Eine Klemme, die für den Einsatz an einer 1000-V-Versorgung in der Überspannungskategorie CAT IV ausgelegt ist, muss solchen Impulsen bis zu 12 kV standhalten können

Klemmen, die aus einem hochspannungsfesten, isolierenden Polymer mit genau definierten Abmessungen geformt sind, sorgen dafür, dass die elektrischen Kriech- und Luftstrecken auch unter ungünstigen Bedingungen eingehalten werden.

### 4. Schutz von Geräteausgang (5 kV, 10 kV oder 15 kV)

Viele Personen befürchten, dass die elektrische Leistung ihres Isolations-Prüfgerätes 5, 10 oder sogar 15 kV betragen könnte.

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

In der Realität ist der vom Gerät zur Verfügung stehende Strom jedoch in der Regel auf wenige Milliampere begrenzt und stellt an sich eine relativ geringe Gefahr dar.

Die Gefahr liegt hier nicht so sehr in der Leistung des Gerätes, sondern vielmehr in der Arbeitsumgebung. Wenn die angeschlossene Last kapazitiv ist, kann diese beim Aufladen auf Hochspannung durch das Gerät sehr viel Energie liefern und bei Berührung tödlich sein. Darüber hinaus ist es in vielen Hochspannungsumgebungen nicht ungewöhnlich, dass Leitern erforderlich sind, um Anschlüsse an Geräten wie Transformatoren zu erreichen, mit dem Risiko, in der Höhe zu arbeiten. In solchen Situationen kann ein ansonsten harmloser elektrischer Impuls dazu führen, dass der Benutzer automatisch reagiert und sich bei einem Sturz möglicherweise schwer verletzt. Vollisolierte Klemmen minimieren das Risiko.

## Sicherheitshinweise

Der zu prüfende Stromkreis muss ausgeschaltet, spannungslos, isoliert und auf Sicherheit geprüft werden, bevor Anschlüsse zur Isolationsprüfung erfolgen dürfen. Stellen Sie sicher, dass der Stromkreis nicht wieder unter Spannung gesetzt wird, während das Messgerät angeschlossen ist. Die Anschlüsse des Stromkreises dürfen bei einer Isolationsprüfung nicht berührt werden.

Nach Abschluss einer Prüfung müssen die kapazitiven Stromkreise vollständig entladen werden, bevor die Prüfleitungen abgeklemmt werden. Kapazitive Ladungen können tödlich sein.

Geprüfte Geräte müssen nach der Entladung mit einem Kurzschlussglied bis zur Verwendung auf Dauer kurzgeschlossen sein. Damit soll verhindert werden, dass gespeicherte dielektrische Absorptionsladung nachträglich freigesetzt wird und die Spannung auf potenziell gefährliche Werte ansteigt.

Prüfleitungen, einschließlich Krokodilklemmen, müssen intakt, sauber und trocken sein, und die Isolation darf keine Brüche oder Risse aufweisen. Das Prüfgerät darf nicht verwendet werden, wenn irgendein Teil davon beschädigt ist.

## DESIGN DES PRÜFGERÄTEKOFFERS

5-kV- bis 15-kV-Isolations-Prüfgeräte werden in verschiedenen Umgebungen eingesetzt, von der Motorprüfung in einer Werkstatt bis hin zur Prüfung von Starkstromleitungen und Schaltanlagen in Hochspannungsschaltanlagen. Die Art der Arbeit erfordert höchste Mobilität und Robustheit. Im Gegensatz zu den meisten Geräten in Schaltanlagen, bei denen Haltbarkeit und Sicherheit durch stabile, mit Erde verbundene Metallgehäuse gewährleistet sind, müssen Isolations-Prüfgeräte klein und leicht sein, um Arbeiten an allen Orten und in allen Höhen durchführen zu können. Um dies zu erreichen, verwenden Gerätehersteller in der Regel Spritzguss-Kunststoff, typischerweise ABS oder ähnliches Material, das ein leichtes und langlebiges Gehäuse bietet.

Um maximale Sicherheit für den Anwender zu gewährleisten, müssen die Produkte die strengen Anforderungen der internationalen Norm EN 61010 (Safety of Electrical Equipment for Measurement, Control and Laboratory use) erfüllen.

Isolations-Prüfgeräte sind nicht nur für die Messung des Isolationswiderstandes an spannungslosen Systemen, sondern auch für Spannungsmessungen an spannungsführenden Systemen bis 600 V AC ausgelegt. (Phase zu Erde). In beiden Fällen muss sichergestellt sein, dass mit dem Gerät nicht nur die angelegte Spannung, sondern auch Transienten, die an anderer Stelle im System auftreten können, gemessen werden und bis zum angeschlossenen Gerät übertragen werden können. An externen Standorten mit Stromverteilungssystemen können solche Transienten, die eine sehr große Energiemenge transportieren und eine erhebliche Gefahr für den Benutzer darstellen, signifikant sein. Auch bei einer Isolationsprüfung im spannungslosen Zustand des angeschlossenen Stromkreises kann ein Schaltvorgang an anderer Stelle im Netz oder ein entfernter Blitzschlag eine große transiente Spannung im spannungslosen System hervorrufen, die das Gerät zum Schutz des Anwenders sicher aushalten muss.

## Sicherheit mittels feuerhemmenden Stoffen

Die EN 61010 kategorisiert solche Transienten je nach Standort und Versorgungsspannung innerhalb des Verteilersystems in unterschiedliche Schweregrade. Immer stärkere Transienten treten auf, wenn die Leistungen im Verteilersystem erhöht werden. Geräte für den Anschluss an externe Systeme müssen in die Kategorie IV (CAT IV) eingestuft werden. So müssen z. B. Geräte nach CAT IV 600 V in der Lage sein, Transienten von 8.000 V sicher auszuhalten.

Sollte bei Anschluss an ein solches System ein Fehler auftreten und die Transiente einen Überschlag im Gerät verursachen, kann die lokale Ionisation der Luft einen wirksamen Kurzschluss über eine potentiell sehr energiereiche Versorgung erzeugen, der eine erhebliche Gefahr für den Anwender darstellt. Daher verlangt die EN 61010-2-030, dass die Geräte sicher bleiben, wenn solche Transienten auftreten.

Darüber hinaus schreibt Teil 1 der EN 61010 vor, dass im Falle eines einzelnen Fehlers im Gerät, z. B. einer defekten Batterie, keine Brandausbreitung außerhalb des Gerätes stattfindet. Es gibt zwei Möglichkeiten, die Konformität zu überprüfen: Erstens, eine „Einzelfehlerprüfung“ im Gerät durchzuführen, und zweitens, einfach ein feuerhemmendes Gehäuse anzubringen. Wenn die Konformität voll erfüllt wird, dann sind die Geräte sicher.

Leider sind die für die Gehäusefertigung geeigneten Spritzgussmaterialien aufgrund ihres geringen Gewichts und ihrer Langlebigkeit ideal, jedoch sind sie in der Regel nicht feuerhemmend und bieten im Fehlerfall keinen ausreichenden Schutz. Materialien mit feuerhemmenden Zusätzen sind erhältlich, haben aber eine reduzierte Haltbarkeit, so dass sie auch den Belastungen des täglichen Gebrauchs nicht standhalten. Dieses Rätsel stellt die Gerätehersteller vor große Herausforderungen.

Megger hat einen einzigartigen Designansatz gewählt, indem es ein duales Gehäusedesign entwickelt hat, bei dem das innere Gehäuse einen wesentlichen Brandschutz bietet und das äußere Gehäuse in seiner Robustheit und Langlebigkeit kompromisslos bleibt.

# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

## MEGGER-ISOLATIONS-PRÜFGERÄTE

Megger-5-kV-, 10-kV- und 15-kV-Isolations-Prüfgeräte sind für Industrie- und Stromversorgungsanwendungen konzipiert. Alle Megger-Isolations-Prüfgeräte sind robust und zuverlässig für den Hochleistungseinsatz. Sie bieten bis zu CAT IV 1000-V-Sicherheit an allen Anschlüssen und haben ein robustes Polypropylen-Gehäuse mit voller Schutzart IP65 für den Transport. Ein einzigartiges duales Gehäusedesign aller Geräte ermöglicht einen feuerhemmenden Schutz bei gleichzeitiger Robustheit.

Die 10-kV-Geräte entsprechen vollständig der Norm IEEE 43-2000 „Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery“. So kann der Anwender jeden vorhandenen Motor effektiv prüfen. Das 15-kV-Gerät erfüllt vollständig die NETA-Anforderungen für Prüfgeräte über 35 kV.

## MIT515, MIT525, MIT1025, MIT1525

**Die MIT-Serie besteht aus vier Geräten:** zwei 5-kV-Modellen, einer 10-kV-Einheit und einer 15-kV-Einheit. Die Baureihe ist für die Industrie- und Energieverteilung konzipiert. Mit dem MIT515 (5-kV-Modell) können sowohl einfache Go/No-Go-Isolationsprüfungen als auch grundlegende diagnostische Isolationsprüfungen wie der Polarisationsindex (PI) durchgeführt werden. Zwei neue erweiterte Modelle, MIT525 (5-kV-Modell), MIT1025 (10-kV-Modell) und MIT1525 (15-kV-Modell), bieten Speicher- und diagnostische Isolationsprüfungen. Das MIT1025 und MIT1525 eignen sich für strengere Prüfungen von Geräten mit höherer Spannung.

Die MIT-Geräte verfügen über eine vollständig spezifizierte Schutzklemme/-schaltung, um genaue Ergebnisse in einer Vielzahl von Prüfsituationen zu ermöglichen. Die Prüfungen können mit Batterie oder Wechselstrom durchgeführt werden und profitieren von einer langen Batterielebensdauer und einer schnellen Wiederaufladezeit. Um das Speichern und Verlaufen der Ergebnisse zu unterstützen, enthalten das MIT525, MIT1025 und MIT1525 Speicher und Download auf den PC über USB sowie zusätzliche diagnostische Prüfungen wie Stufenspannung (SV) und Rampenprüfung.

Einige der Merkmale der MIT-Serie sind:

- Intuitive Bedienung mit Drehschalter
- Netz- oder Batteriebetrieb
- Einfacher Batteriewechsel
- Rampenprüfung

## S1-568, S1-1068 und S1-1568

Die S1-Serie besteht aus drei Modellen, 5 kV, 10 kV und 15 kV (S1-568, S1-1068 und S1-1568). Die S1-Geräte wurden speziell für Energieversorger entwickelt, insbesondere für Übertragungs- und Erzeugungsanwendungen, bei denen höhere elektrische Störungen und lange Kabelwege auftreten, sowie für Dienstleistungsunternehmen. Alle S1-Modelle sind mit einer hohen Ausgangsleistung von 6 mA für kapazitive Lasten und erhöhter elektrischer Störfestigkeit ausgestattet, um auch die anspruchsvollsten Umgebungen in Schaltanlagen und Übertragungsspannungen zu bewältigen.

Die S1-Geräte verfügen über fünf diagnostische Prüfungen, darunter PI-, SV- und Rampenprüfungen. Die Geräte können die Ergebnisse über ihre USB-Anschlüsse und über Bluetooth speichern und herunterladen. Darüber hinaus kann die S1-Serie über USB und Power DB Lite-Software ferngesteuert werden, was für zusätzliche Sicherheit und Komfort sorgt.

Einige der Merkmale der S1-Serie sind:

- 6-mA-Ausgangsstrom für schnelles Laden und Prüfen von kapazitiven Lasten
- 8-mA-Störfestigkeit für stabile Messungen in EHV-Umgebungen
- Messbereich bis 15 TΩ (5-kV-Modelle) und 35 TΩ (10-kV- und 15-kV-Modelle)
- USB- und Bluetooth-Streaming von Live-Prüfdaten und Download der gespeicherten Ergebnisse
- Integrierter Speicher zur Speicherung der Ergebnisse
- Fernbedienung über USB



# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

## Modelle MJ15 und BM15

### 5-kV-Isolations-Prüfgeräte

- Pass/Fail-Overlays für schnelle Go/No-Go-Prüfungen
- Isolationswiderstand bis 20 GΩ
- Spannungsbereich bis 600 V signalisiert Selbstentladung

Die BM15 und MJ15 sind kompakte 5-kV-Isolations-Prüfgeräte, die einfach zu bedienen sind und einen schnellen, genauen Messwert des Isolationswiderstandes ermöglichen. Beide Geräte bieten vier Prüfspannungen (500 V, 1 kV, 2,5 kV, 5 kV), analoge Skalen und Messempfindlichkeit bis 20 GΩ.

Das BM15 wird mit 8 „AA“-Batterien oder wiederaufladbaren Alkalibatterien betrieben, während das MJ15 zusätzlich zur Batterieleistung einen Handkurbelgenerator enthält.

## Prüfleitungen

Megger bietet ein komplettes Sortiment an Prüfleitungssätzen, die für die Sicherheitsisolation gemäß EN 16010-031:2008 ausgelegt sind. Sie bieten eine doppelte Isolation, wo es sinnvoll ist. Bei höheren Spannungen, bei denen die großen physikalischen Abmessungen dies für eine verwendbare Klemme unpraktisch machen würden, ist jedoch eine Einzelisolation vorgesehen. Es müssen sichere Arbeitsverfahren angewendet werden, und Klemmen und Verbindungen dürfen unter Spannung nicht berührt werden.

Weitere Informationen zu Megger-Prüfleitungen finden Sie auf unserer Website [www.megger.com](http://www.megger.com) unter der Produktgruppe 5-kV- und 10-kV-Isolations-Prüfgeräte.



# Leitfaden für diagnostische Isolationsprüfungen über 1 kV

## Ihre „One Stop“-Quelle für alle Ihre elektrischen Prüfgeräteanforderungen

- Batterie-Prüfgeräte
- Kabelfehlerortungsgeräte
- Leistungsschalter-Prüfgeräte
- Datenkommunikationsprüfgeräte
- Faseroptische Prüfgeräte
- Bodenwiderstandsprüfgeräte
- Isolationsleistungsfaktor (C&DF)-Prüfgeräte
- Isolationswiderstandsprüfgeräte
- Leitungsprüfgeräte
- Mikroohmmeter
- Motor- und Phasendrehungsprüfgeräte
- Multimeter
- Ölprüfgeräte
- Tragbare Geräte und Werkzeugprüfgeräte
- Netzqualitätsmessgeräte
- Recloser-Prüfgeräte
- Relais-Prüfgeräte
- Reflexionsmessgerät (TDR)
- Transformator-Prüfgeräte
- Wattstundenzähler-Messgeräte
- STATES® Reihenklemmen und Prüfschalter
- Professionelle Hands-On Technik und Sicherheit
- Schulungsprogramme

Megger ist ein weltweit führender Hersteller und Lieferant von Prüf- und Messgeräten für die Strom-, Gebäudeverkabelungs- und Telekommunikationsindustrie.

Mit Forschungs-, Entwicklungs- und Produktionsstätten in den USA, Großbritannien und Schweden, kombiniert mit Vertrieb und technischem Support in den meisten Ländern, ist Megger einzigartig positioniert, um die Bedürfnisse seiner Kunden weltweit zu erfüllen.

Weitere Informationen über Megger und unser breit gefächertes Angebot an Prüf- und Messgeräten erhalten Sie folgendermaßen:

**Rufen Sie an unter:** 1-866-254-0962

**E-Mail:** [vfmarcom@megger.com](mailto:vfmarcom@megger.com)

**Oder besuchen Sie unsere Website:**  
[www.megger.com](http://www.megger.com)



Megger · Seba Dynatronic  
Mess- und Ortungstechnik GmbH  
Dr.-Herbert-lann-Str. 6 96148 Baunach Germany  
T: +49 (0)9544/68-0  
F: +49 (0)9544/2273  
E: team.international@megger.de  
[www.megger.com](http://www.megger.com)

Above 1kV\_AG\_DE\_V06

The word 'Megger' is a registered trademark. Copyright © 2021

**Megger**®