

Leitfaden für Messverfahren zur Ermittlung des Isolationszustandes von Ständer- und Läuferwicklungen rotierender elektrischer Maschinen

Ausgabe 1.1 (2024)

Erstellt vom OVE-Energietechnik Fachausschuss „Rotierende elektrische Maschinen“

Vorwort

Dem OVE-Energietechnik Fachausschuss „Rotierende elektrische Maschinen“ (FA REM) obliegt unter anderem die Aufgabe, Beiträge zur fachlichen Weiterbildung der Mitglieder zu leisten. Vorliegendes Dokument ist eine Überarbeitung des Kapitels „Bedingt zerstörungsfreie Hochspannungsprüfverfahren“ des 1990 herausgegeben OVE-Merkblattes 2 „Empfehlungen für die Zustandserfassung der Aktivteile rotierender elektrischer Maschinen“. Es erfolgt eine Neubewertung der Eignung für Zustandsbeurteilungen durch in der Anwendung gewonnene Erfahrungen aus der Sicht der Anwender. Zielgruppe sind Betriebsingenieure und Techniker, die mit der Wartung und Instandsetzung von elektrischen Maschinen betraut sind.

Um weitere nationale und internationale Fachkollegen, welche nicht Mitglied im FA REM sind, anzusprechen, erfolgt die Veröffentlichung über die Homepage der OVE-Energietechnik.

Wien im November 2024

Im Namen der Mitglieder des FA REM
Karl Zikulnig (Vorsitzender)

Verfasser: Martin Althoff, Fabian Öttl, Jürgen Weidner, Bernhard Windisch
Redaktionelle Leitung: Martin Althoff
Revisionsteam: Martin Althoff, Thomas Hildinger, Werner Ladstätter, Fabian Öttl, Alexander Schwery, Karl Zikulnig

Änderungsverzeichnis:

Version	Datum	Verfasser		Kapitel	Änderung, Ergänzung
1.1	11 / 2024	Althoff, Öttl, Weidner, Windisch		Alle	Basisversion

Copyright:

Die Urheberrechte an dieser Publikation liegen bei der OVE-Energietechnik im Österreichischen Verband für Elektrotechnik (OVE)

A-1010 Wien ■ Eschenbachgasse 9
Tel. +43 1 587 63 73 - 0 ■ E-Mail: oge@ove.at ■ www.ove.at

Inhalt

1	Messverfahren zur Ermittlung des Isolationszustandes von Wicklungen	5
1.1	Einleitung.....	5
2	Isolationswiderstandsmessung	5
2.1	Allgemeines, Zweck der Prüfung bzw. Messung.....	5
2.2	Normen und Empfehlungen:.....	6
2.3	Physikalische Grundlagen und Beschreibung des Mess- oder Prüfverfahrens	6
2.3.1	Physikalische Grundlagen	6
2.3.2	Messverfahren	8
2.3.2.1	Direkte Messung mit Isolationsmessgerät.....	8
2.3.2.2	Indirekte Messung (Strom – Spannungsmessung)	9
2.4	Anforderungen an das Mess- und Prüfequipment.....	9
2.5	Prüfung von Ständerwicklungen	10
2.5.1	Anforderungen an das Prüfobjekt	10
2.5.2	Sicherheit	10
2.5.3	Direkte Messung mit dem Isolationsmessgerät.....	10
2.5.3.1	Messschaltungen.....	10
2.5.3.2	Messspannung	11
2.5.3.3	Durchführung der Messung	12
2.5.4	Indirekte Messung durch Strom-Spannungsmessung.....	12
2.5.4.1	Messschaltungen.....	12
2.5.5	Durchführung der Messung / Prüfung.....	13
2.5.5.1	Ständerwicklung	13
2.5.5.2	Läuferwicklung	13
2.6	Auswertung und Interpretation	13
2.6.1	Ständerwicklung	13
2.6.1.1	Isolationswiderstand.....	14
2.6.1.2	Polarisationsindex	14
2.6.1.3	Bestimmung der Trockenheitsgrenze für Ständerwicklungen.....	15
2.6.2	Läuferwicklung	16
2.6.2.1	Isolationswiderstand.....	16
3	Verlustfaktormessung	17
3.1	Zweck und Zielsetzung der Prüfung.....	17
3.2	Normen und Empfehlungen.....	17

3.3	Messtechnische Grundlagen	18
3.3.1	Einflussfaktoren auf den Verlustfaktor ($\tan\delta$)	19
3.4	Prüfaufbau für Verlustfaktormessungen	20
3.4.1	Messsysteme.....	20
3.4.1.1	Schering Brücke.....	20
3.4.1.2	Messbrücke mit Differentialtransformator	21
3.4.1.3	Digitale Messbrücke.....	22
3.5	Messung an betriebsfertig eingebauten Ständerwicklungen	24
3.5.1	Messaufbau.....	24
3.5.2	Durchführung der Messung	25
3.5.2.1	Darstellung der Messergebnisse.....	26
3.5.3	Interpretation der Messergebnisse	26
3.5.4	Betriebsabhängiges Alterungsverhalten	27
3.6	Einflussfaktoren auf das Messergebnis	28
3.6.1	Oberflächenleitfähigkeit des Wickelkopfs	28
3.6.1.1	Isolationsdesign.....	29
3.6.1.2	Leitfähige Beläge im Wickelkopfbereich.....	30
3.6.1.3	Temperaturverhalten.....	30
4	Off-Line Teilentladungsmessung	32
4.1	Zweck, Übersicht	32
4.2	Normen und Empfehlungen.....	32
4.3	Grundlagen.....	32
4.4	Messmethode	33
4.4.1	Messgeräte	34
4.4.2	Auswertung.....	36
4.5	Zusammenfassung	39

1 Messverfahren zur Ermittlung des Isolationszustandes von Wicklungen

1.1 Einleitung

Wicklungen rotierender elektrischer Maschinen sind während des Betriebs dauerhaft thermischen, elektrischen und thermomechanischen Beanspruchungen und den Umweltbeanspruchungen ausgesetzt. Diese können mit zunehmender Betriebszeit zu einer Alterung und schließlich zu einer Schädigung des Isoliersystems führen. So kann zum Beispiel eine durch Delamination, elektrische Alterung oder Fehlfunktion der Glimmschutzsysteme geschwächte Hochspannungsisolierung den sicheren Betrieb eines Generators oder Motors gefährden. Werden entsprechende Anzeichen nicht rechtzeitig erkannt, können ein einphasiger Erdschluss oder sogar ein zweiphasiger Kurzschluss die Folge sein, die einen ungeplanten Stillstand mit entsprechenden Ausfallkosten verursachen können.

Um einen eventuell beschleunigten Lebensdauerverbrauch sowie betriebsgefährdende Alterungserscheinungen frühzeitig erkennen zu können, ist es ratsam, den dielektrischen Zustand der Wicklung periodisch während eines geplanten Revisionsstillstands zu überprüfen. So empfiehlt beispielsweise die deutsche Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber (VGB) in ihrer Richtlinie VGB-R 167 „Revisionsempfehlungen für Turbogeneratoren“ (Februar 2010) hierzu regelmäßige Diagnosemessungen an Generatorständerwicklungen. Ähnliche betriebssichernde Inspektionsvorschriften existieren weltweit beispielsweise auch für andere wichtige Industrieanlagen in der Chemie oder Energieerzeugung.

Anhand der Auswertungen der Messergebnisse können mögliche Schäden der Wicklung frühzeitig erkannt werden und Reparaturmaßnahmen – gegebenenfalls noch während der laufenden Revisionsarbeiten – eingeleitet werden, so dass ein unvorhergesehener Ausfall mit hohen Kosten vermieden wird. Standardmäßig umfasst die Wicklungsinspektion eine Isolationswiderstandsmessung einschl. Bestimmung des Polarisationsindex, eine Verlustfaktormessung und eine Teilentladungsmessung. Der Prüfumfang kann nach Absprache mit dem Betreiber um eine Hochspannungsprüfung ergänzt werden, um einen spontanen Ausfall innerhalb der nächsten Betriebsperiode unwahrscheinlich werden zu lassen.

2 Isolationswiderstandsmessung

2.1 Allgemeines, Zweck der Prüfung bzw. Messung

Der Isolationswiderstand ist eine wichtige Kenngröße, der Aufschluss über den Zustand der Wicklungsisolierung von Ständer- und Läuferwicklungen gibt. Er wird durch reversible Vorgänge wie Feuchtigkeitsaufnahme im Inneren von älteren Isolierungen, Befeuchtung oder leitfähige Verschmutzung der Oberflächen der Epoxidharz-Glimmer-Isolierungen bestimmt. In seltenen Fällen kommt es aber auch zu irreversiblen Veränderungen des Isolierungsmaterials, wie zum Beispiel zu Rissen in der Isolierung oder auch zu chemischen Umwandlungen, die den Isolationswiderstand negativ beeinflussen.

Der Isolationswiderstand einer Wicklung setzt sich aus Parallel- und Serienschaltungen von Durchgangs- und Oberflächenwiderständen zusammen und wird von verschiedenen Faktoren wie Feuchtigkeit und Verschmutzung, durch die Maschinengröße und von der Wicklungstemperatur beeinflusst.

Bei erhöhtem Feuchtigkeitsgehalt der Isolierung nimmt die Ionenleitung in starkem Maße zu. Durch leitfähige Verschmutzung entstehen erhöhte Oberflächenströme. Insbesondere bei

kunstharzgebundenen Wicklungsisolierungen wird der Isolationswiderstand maßgeblich durch den Oberflächenwiderstand bestimmt, da das Kunstharz praktisch keine Feuchtigkeit aufnimmt.

Der gesamte Isolationsstrom ist eine Funktion der Ionenleitung und der Oberflächenströme und lässt Rückschlüsse auf die Verfeuchtung und Verschmutzung vor allem der Oberfläche der Isolierung zu. In Einzelfällen können damit bedingt auch grobe Fehler in Isolierungsanordnungen erfasst werden.

Wie oben ausgeführt, ist die Messung des Isolationswiderstandes eine wichtige Maßnahme, um den Zustand der Isolierung einer Ständer- und Läuferwicklung zu beurteilen. Hierbei ist es sinnvoll, diese Messung im Rahmen von Wartungs- und Revisionsarbeiten regelmäßig durchzuführen und zu dokumentieren.

Die Messung des Isolationswiderstandes kann prinzipiell entweder durch eine direkte Messung mit einem handelsüblichen Isolationswiderstandsmessgerät oder durch eine indirekte Messung mit einer DC-Spannungsquelle und einem geeigneten Strommesser (Mikro-Amperemeter) erfolgen.

Weitergehende Messungen des Isolationsstromes sowie die Bestimmung des Polarisationsindex im Rahmen von Diagnosemessungen als Teil einer Funktionsprüfung des Isoliersystems geben zusätzliche Informationen über den Zustand der Isolierung.

Vor einer Hochspannungsprüfung an einer Wicklung ist grundsätzlich eine Isolationswiderstandsmessung durchzuführen, um nachzuweisen, dass eine gewisse dielektrische Mindestfestigkeit des Isoliersystems zu erwarten ist.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass die Resultate der Messungen nicht zwangsläufig auf mögliche örtliche Schwachstellen der Isolierung hinweisen.

2.2 Normen und Empfehlungen:

- **DIN EN IEC 60034-27-4 (VDE 0530-27-4)**
Messung des Isolationswiderstands und des Polarisationsindex der Wicklungsisolierung drehender elektrischer Maschinen
- **IEEE Std. 43**
Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery

2.3 Physikalische Grundlagen und Beschreibung des Mess- oder Prüfverfahrens

2.3.1 Physikalische Grundlagen

Wie oben bereits beschrieben, stellt das Isoliersystem einer Wicklung die Parallelschaltung von verschiedenen Widerständen und Kapazitäten der entsprechenden Materialkomponenten dar.

Im vereinfachten Ersatzschaltbild kann das Isolationssystem auch durch eine Parallelschaltung eines einzigen ohmschen Widerstandes R mit einer Kapazität C dargestellt werden.

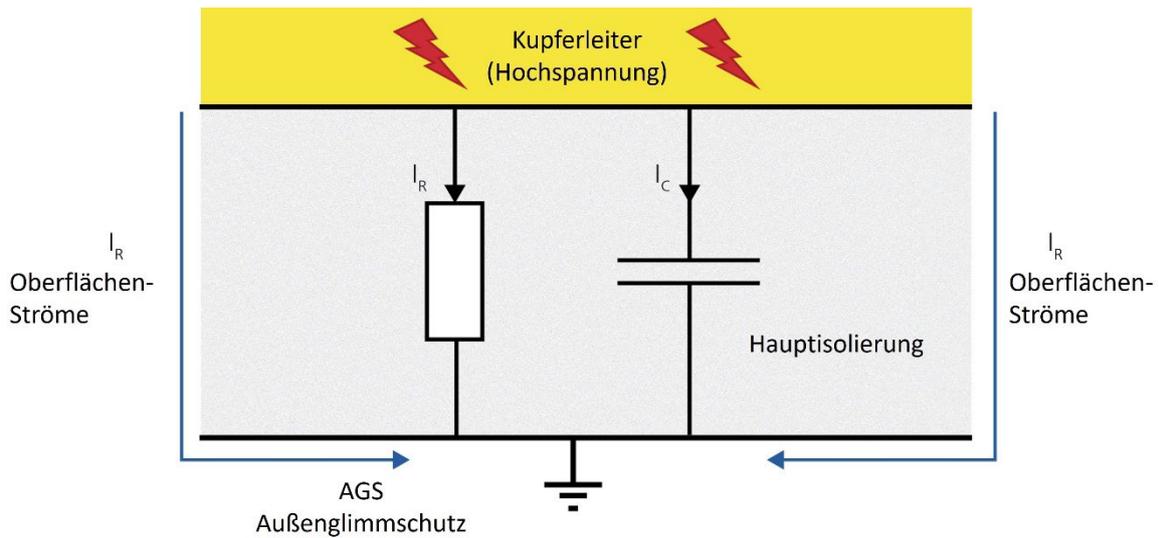


Abbildung 2-1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild für eine Wicklungsisolierung

Für die detaillierte und weitergehende Beschreibung und Definition der verschiedenen Komponenten des Isolationsstromes sei auf die EN IEC 60034-27-4 Kap. 4 verwiesen.

Nach dem Anlegen der Gleichspannung an eine Isolierung fließt zunächst ein Ladestrom, der mit der Zeitkonstante $T = R \times C$ exponentiell abklingt.

Der nach dem Abklingen des Einschaltstromes fließende Ladestroms setzt sich zusammen aus dem konstanten Isolationsstrom und einem zeitlich veränderlichen Anteil i' , der als Nachladestrom bezeichnet wird und auf Polarisationsvorgänge in der Isolierung zurückzuführen ist.

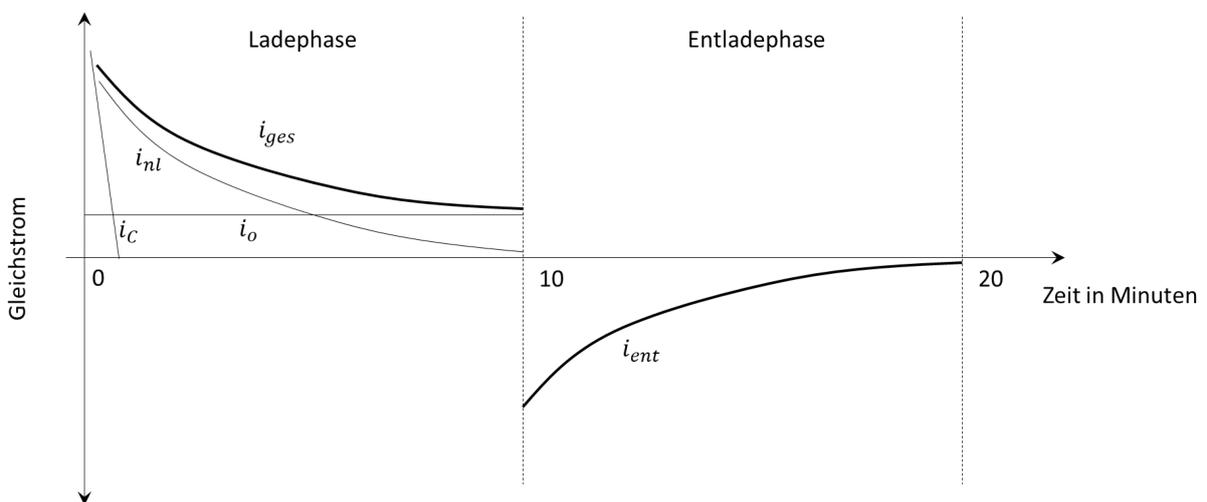


Abbildung 2-2: Strom-Zeit Diagramm für die Gleichstrommessung, mit i_{ges} als resultierendem Aufladestrom, i_{nl} als Nachladestrom, i_o als Leckstrom dominiert durch die Oberflächenströme und i_c als Ladestrom der Kapazität

Die Werterfassung erfolgt üblicherweise 1 Minute (i_1 bzw. R_1) und 10 Minuten (i_{10} bzw. R_{10}) nach Anlegen der Prüfspannung.

Zur Berechnung gilt

- R_{it} der Isolationswiderstand in MOhm zum Zeitpunkt t
 U die gemessene Spannung in V der Gleichspannungsquelle
 I_t der vom Amperemeter gemessene Strom in A zum Zeitpunkt t

Aus den Messwerten können dann die folgenden Kenngrößen abgeleitet werden:

Polarisationsindex bzw. Nachladezahl: $PI = N = i_1/i_{10} = R_{10}/R_1$

Isolationszeitkonstante: $T = R_{10} \times C$

Für die tägliche betriebliche Praxis ist die Messung des Isolationswiderstandes nach 1 min mit einem handelsüblichen Isolationsmessgerät völlig ausreichend, um anschließend die Maschine wieder in Betrieb zu nehmen.

Die Messung des Isolationswiderstandes der gesamten Wicklung sowie der Einzelphasen sollte mit den 1- und 10- Minutenwerten regelmäßig bei Instandhaltungs- und Wartungsmaßnahmen gemessen werden.

Aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit des Isolationswiderstandes ist eine Protokollierung der Wicklungstemperatur notwendig. Ebenso sollen nach Möglichkeit die relative Feuchte und die Temperatur des Mediums, in dem sich die Wicklungen befinden, aufgezeichnet werden, um die Möglichkeit einer Oberflächenbefeuchtung abschätzen zu können.

Es ist empfohlen die Messung des Isolationswiderstandes bei Umgebungsbedingungen oberhalb des Taupunktes durchzuführen. Gegebenenfalls kann dies durch den Einsatz einer Stillstands-Heizung erreicht werden.

2.3.2 Messverfahren

2.3.2.1 Direkte Messung mit Isolationsmessgerät

Als direkte Messung mittels eines Isolationsmessgerätes werden jene Verfahren bezeichnet, bei welchen die Messung mittels eines Prüfgerätes mit integrierter Hochspannung-Gleichspannungsquelle, Messwerk und Messanzeige stattfindet.

Je nach Hersteller und Typ erfolgt die Erzeugung der hohen Gleichspannung elektronisch, durch Vervielfachungsschaltungen oder durch das Gleichrichten einer hohen Wechselspannung.

Die Messung der hohen Gleichspannung erfolgt in der Regel mittels resistivem Widerstandsteiler, die des Gleichstromes mit einem sensitiven, auf Ohmwerte kalibrierten Amperemeter, welches isoliert aufgebaut im Strompfad liegt.

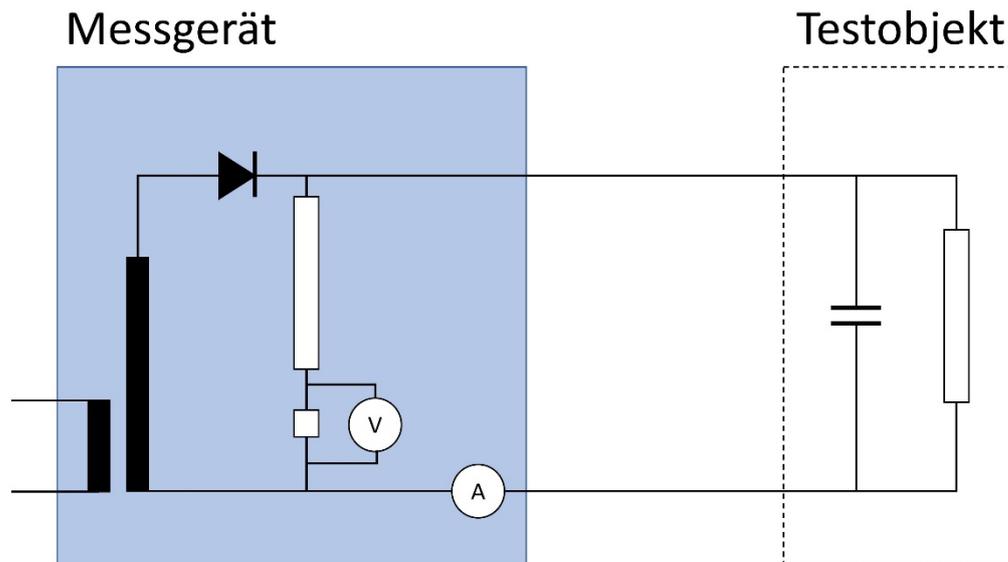


Abbildung 2-3: Schematisches Ersatzschaltbild der direkten Messung

Es ist darauf zu achten, dass der sehr kleine Messstrom noch sicher detektiert werden kann. Speziell bei rotierenden Maschinen und ihren oft sehr hohen Isolationswiderständen im Ständer ist dies essenziell.

2.3.2.2 Indirekte Messung (Strom – Spannungsmessung)

Für weitergehende und genauere Bestimmung der Isolationswerte für Diagnosemessungen bietet sich die indirekte Messung mit Hilfe einer Spannungsquelle mit stabilisierter Gleichspannung und Strom- und Spannungsmessgeräten an.

Hierbei ist darauf zu achten, dass der beim Einschalten fließende hohe Ladestrom durch geeignete Maßnahmen zum Schutz des Amperemeters (Schutzwiderstand oder Kurzschließen des Messgerätes) begrenzt wird, der auch im Fall eines vorliegenden Erdschlusses den Strom im Amperemeter begrenzt.

Bei der indirekten Messung wird der Isolationswiderstand dann aus den von Volt- und Amperemeter abgelesenen Werten errechnet.

2.4 Anforderungen an das Mess- und Prüfequipment

Die Isolationswiderstandsmessungen sollten mit einer Gleichspannungsquelle ausreichender Leistung (Kapazität), Stabilität und geringer Restwelligkeit von mindestens 500 VDC durchgeführt werden. Die Höhe der Prüfgleichspannung ist gemäß Abschnitt 2.5.3.2 auszuwählen.

Die volle Prüfspannung sollte nach max. 5 Sekunden an der Wicklung anstehen.

2.5 Prüfung von Ständerwicklungen

2.5.1 Anforderungen an das Prüfobjekt

Alle nicht zur Wicklung gehörenden Komponenten und Bauteile wie Stromwandler, Koppelkondensatoren, Schalter, Kabel etc. sind elektrisch vollständig und mit ausreichendem Kontaktabstand von der Wicklung zu trennen. Bei Einzelstrangmessung ist nur der zu messende Wicklungsstrang an die Prüfgleichspannung zu legen. Die nicht gemessenen Stränge sind am Gehäuse der Maschine zu erden. Nicht zur Prüfung vorgesehene Komponenten der Wicklung wie z.B. Wicklungsthermometer etc. sind mit der Maschinenerde zu verbinden.

Für die Messung des Isolationswiderstandes ist innerhalb der Wicklung eine möglichst konstante Temperaturverteilung anzustreben.

2.5.2 Sicherheit

Aufgrund der meist großen Wicklungskapazität sowie des Polarisierungseffekts ist die Wicklungsisolierung noch für lange Zeit nach Abschalten der Spannungsversorgung geladen. Daher ist es wichtig, nach Beendigung der Prüfung die Spannung auf null zu regeln und das Prüfobjekt zu erden, bevor das Messinstrument abgetrennt wird. Die Erdverbindung zu den Phasen- oder Wicklungsanschlüssen muss mindestens viermal so lange bestehen bleiben, wie die Prüfspannung angelegt wurde.

2.5.3 Direkte Messung mit dem Isolationsmessgerät

2.5.3.1 Messschaltungen

Die Schaltungsvarianten zur Prüfung der gesamten Wicklungsisolierung gegen das geerdete Gehäuse sind in Bild 4 und zur Prüfung der einzelnen Wicklungsstränge in Bild 5 dargestellt.

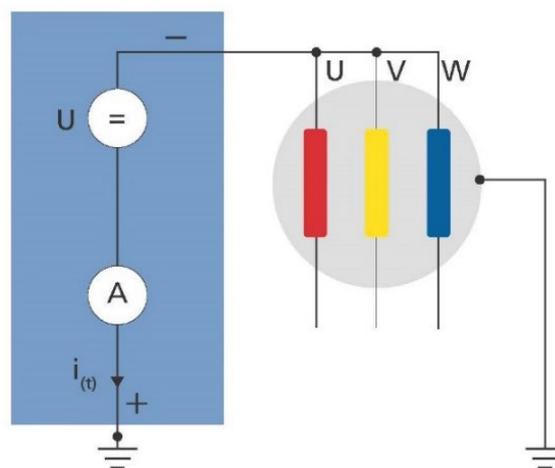


Abbildung 2-4: Prüfung der gesamten Wicklung (U, V, W) gegen das geerdete Gehäuse (UVW→E)

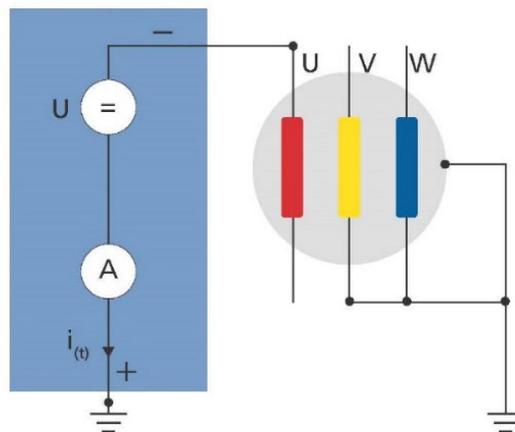


Abbildung 2-5: Prüfung eines einzelnen Wicklungsstranges gegen die anderen Stränge und das geerdete Gehäuse (U → VWE)

2.5.3.2 Messspannung

Bei der Auswahl der Höhe der an das Isoliersystem anzulegenden Messspannung ist die Bemessungsspannung für die die Wicklung ausgelegt ist, sowie der Zustand der Wicklungsisolierung zu berücksichtigen.

Dies ist insbesondere bei feuchten bzw. verschmutzten Wicklungen von Bedeutung. Zu hohe Spannungen können die Isolierung überlasten und zu einem Isolierungsfehler führen.

Die empfohlenen Richtwerte für die Höhe der Messspannung nach DIN EN IEC 60034-33 sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Bemessungsspannung in (kV)	Erregerwicklung (V _{DC})	Ständerwicklung (V _{DC})
< 12	500	2.500 bis 5.000
12 bis 19		5.000 bis 10.000
> 19		10.000

Tabelle 2-1: Bemessungsspannung des Prüfobjektes und dementsprechend anzulegende Gleichspannung in Abhängigkeit der Bemessungsspannung gemäß DIN EN IEC 60034-33 Tabelle 9

2.5.3.3 Durchführung der Messung

Der Isolationswiderstand wird nach festgelegten Zeiten nach Anlegen der Prüfspannung abgelesen, d.h. nach 1 min für den Isolationswiderstand R_{i1} und nach 10 min für den Isolationswiderstand R_{i10} .

2.5.4 Indirekte Messung durch Strom-Spannungsmessung

Zu weitergehenden Messungen wie Diagnosemessungen an Isolationssystemen bietet sich die Strom-Spannungsmessmethode mit Hilfe einer hochkonstanten Gleichspannungsquelle von mindestens 500 V und einem Microamperemeter an.

2.5.4.1 Messschaltungen

- a. Prüfung gesamte Wicklung gegen Erdpotential (UVW → E)

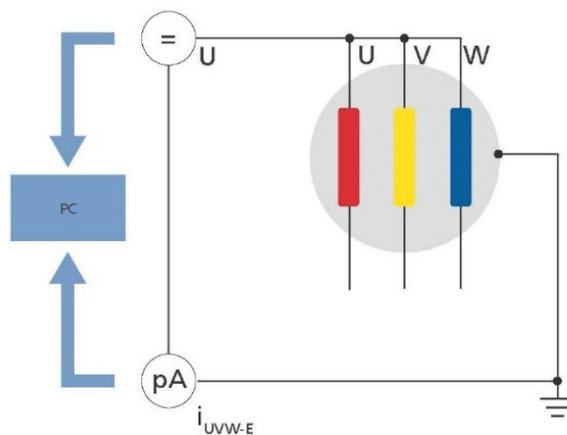


Abbildung 2-6: Gleichspannung-Isolationsmessung Gesamwicklung UVW → E

- b. Prüfung Phase gegen Erdpotential und die anderen Stränge (V → UW, V → UWE)

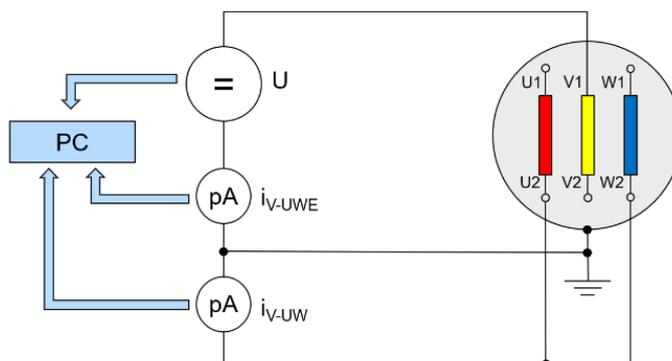


Abbildung 2-7: Gleichspannung-Isolationsmessung Phase V → UW und Phase V → UWE

2.5.5 Durchführung der Messung / Prüfung

2.5.5.1 Ständerwicklung

Der Isolationsstrom wird wegen der normalerweise recht hohen Nachladeströme bei Ständerwicklungen im Lade- bzw. Entladevorgang als Funktion der Zeit über eine Zeitspanne von jeweils 10 min (ggf. bis 15 min) beobachtet und dokumentiert.

2.5.5.2 Läuferwicklung

Zur Bestimmung des Isolationswiderstandes wird eine konstante Gleichspannung mit geringer Restwelligkeit von 500 VDC bei Läuferwicklungen an die Isolierung gelegt.

Wegen der geringen Nachladeströme der Polspulenisolierung bei Wasserkraftgeneratoren genügt die Ermittlung des 1-Minutenwertes.

Wichtig ist auch hier die Protokollierung der Wicklungstemperatur und der relativen Feuchte der Umgebung. Im Hinblick auf einen störungsfreien Betrieb ist es zweckmäßig, den Isolationswert der neuen Wicklung bzw. bei gealterten Läuferwicklungen den nach der Reinigung und Trocknung erhaltenen Wert in gewissen Zeitabständen zu kontrollieren, um ggf. Veränderungen im Isoliervermögen frühzeitig erkennen zu können.

Die Messung ist ohne aufgesetzte Kohlebürsten bzw. bei kurzgeschlossenen Dioden (bei bürstenloser Erregermaschine) durchzuführen.

2.6 Auswertung und Interpretation

2.6.1 Ständerwicklung

Bei kunstharzgebundenen Wicklungsisolierungen wird die Größe des Isolationswiderstandes vorwiegend vom Oberflächenwiderstand beeinflusst. Diese bilden den größten Teil der heute im Einsatz befindlichen Maschinen. Lediglich bei sehr alten Maschinen und speziellen Ausführungen kann dies nicht der Fall sein.

Bei gealterten Isolierungen, bei denen sich infolge Verfeuchtung bei Spannungsbeanspruchung auch der Durchgangswiderstand ändert, kann es bei hohem Feuchtigkeitsgehalt infolge von inneren Dampfspannungen zu bleibenden Gefügelockerungen kommen. Im Allgemeinen ist jedoch die Verfeuchtung bei intaktem Isolationsgefüge reversibel. Für die Beurteilung der Verfeuchtung einer Ständerwicklung genügt prinzipiell die Messung der gesamten Wicklung gegen Erde (UVW-E), nach Abbildung 2-4.

Dadurch werden - zumindest bei kontinuierlichen Isolationssystemen - hauptsächlich die Ströme über die Oberflächen erfasst.

Eine Verringerung des Oberflächenwiderstandes kann bei Spannungsbeanspruchung speziell bei Stoßstellen diskontinuierlicher Isolierungssysteme zu Gleitüberschlägen führen.

Die Schaltungen U-VWE, V-UWE und W-UVE (siehe Abbildung 2-5) ergeben den Isolationswiderstand der Einzelstränge gegen das geerdete Ständerblechpaket und die annähernd auf Erdpotential liegenden anderen Stränge (Isolationsstrom im Wickelkopf und im Nutabschnitt).

Zusätzliche Messungen in den Schaltungen U-VW, V-UW und W-UV (Wickelkopfströme) werden zur Beurteilung von Verschmutzungen der Wicklung im Wickelkopfbereich herangezogen.

Etwaige Restströme sollten vor jedem Messzyklus (Laden, Entladen) erfasst und die Messwerte entsprechend korrigiert werden.

2.6.1.1 Isolationswiderstand

In der nachfolgenden Tabelle 2-2 sind die empfohlenen Mindestwerte des Isolationswiderstandes wiedergegeben.

Es ist zu beachten, dass für die alten Isoliersysteme aus Schellack oder Asphalt spannungsabhängig deutlich geringere Mindestwerte gelten.

Prüfobjekt	Mindestisolationswiderstand R_{i1} (M Ω m)
Hochspannungswicklungen auf Schellack- und Asphaltbasis	Bemessungsspannung (kV) + 1
Niederspannung-Runddraht- und Formspulenwicklungen sowie Gleichstromankerwicklungen	5
Hochspannungsisoliersysteme auf Kunstharzbasis	100

Tabelle 2-2: Empfohlenen Mindestwerte für den Isolationswiderstand der Wicklung bei einer Bezugstemperatur von 40°C in Anlehnung an EN IEC 60034-27-4 Kap. 8.2

Bei den vorstehend empfohlenen Richtwerten für den Isolationswiderstand und den Polarisationsindex handelt es sich um Mindestwerte gemäß EN IEC 60034-27-4 Kap. 8.2, die für den Betrieb einer Wicklung oder die Durchführung einer Spannungsprüfung an einer Wicklung empfohlen werden. In einigen Fällen sind, bedingt durch spezielle Isolierstoffe oder eine besondere Auslegung, niedrigere Werte möglich (z. B. für spezielle, sehr lange Ausführungen des Endenglimmschutzes).

Die Beurteilung der Mindestwerte dieser Maschinen sollten auf einem Vergleich mit früheren Daten beruhen.

2.6.1.2 Polarisationsindex

Der Polarisationsindex PI oder die Nachladezahl N ist definiert aus dem Verhältnis

$$P_1 = N = I_1/I_{10} = R_{10}/R_1$$

also aus dem Aufladestrom bei 1 min. und 10 min. bzw. den Isolationswiderständen zu diesen Zeiten und sollte für die Beurteilung einer Verfeuchtung eher nicht herangezogen werden, da zwischen der Nachladezahl und der Wicklungstemperatur bei unterschiedlicher Verfeuchtung kein einfacher Zusammenhang besteht.

Sie wird firmenspezifisch verwendet, z.B., um in Verbindung mit hohen Strömen über die Stirnseiten festzustellen, ob durch hohe Feuchtigkeitsaufnahme eine Zersetzung des Bindemittels bestimmter Lackglasbänder eingetreten ist. Der Polarisationsindex kann jedoch zur Beurteilung einer eventuellen Verschmutzung herangezogen werden.

Prüfobjekt	Mindestpolarisationsindex P_i
Hochspannungsisoliersysteme auf Schellack- und Asphaltbasis	1,5
Hochspannungsisoliersysteme auf Kunstharzbasis	2,0
Diese Mindestwerte basieren auf dem Verhältnis der gemessenen Isolationswerte R_i nach 10 min und nach 1 min	

Tabelle 2-3: Empfohlenen Mindestwerte für den Polarisationsindex bei mit Hochspannung betriebenen Wicklungen gemäß EN IEC 60034-27-4

Bei der montierten Ständerwicklung im Neuzustand muss der Messwert jedes Stranges gegen Erde mindestens 100 MOhm und der Polarisationsindex muss mindestens 2 betragen.

Der angegebene Grenzwert von 2 gilt nicht für Maschinen mit galvanischem Kontakt der Glimmschutzschicht zu den Anschlüssen. Für diese Maschinen gilt IEC 60037-27-4. Darüber hinaus kann bei Maschinen mit galvanischem Kontakt der Glimmschutzbeschichtung zu den Anschlüssen das Erreichen des Mindestwertes des Eine-Minute-Mindestisolationswiderstandes einige Betriebsstunden bei normaler Betriebstemperatur erfordern.

Es wird in unterschiedlichen internationalen Normen angegeben, dass der Polarisationsindex bei einem Widerstandswert von > 5 GOhm nach 1 Minute nicht für die Interpretation herangezogen werden kann/muss. Grund dafür ist, dass bei solch kleinen Strömen (natürlich abhängig von der Amplitude der angelegten Spannung) geringste Änderungen in den Testbedingungen wie kleine Schwankungen in der Testspannung, Umgebungsfeuchte, geringste Änderungen in den Verbindungen und andere nicht relevante Faktoren bereits signifikanten Einfluss auf das Ergebnis haben können.

2.6.1.3 Bestimmung der Trockenheitsgrenze für Ständerwicklungen

Für die Trocken-Feucht-Beurteilung der Ständerwicklung kann die empirisch ermittelte Trockenheitsgrenze nach Abbildung 2-8 herangezogen werden.

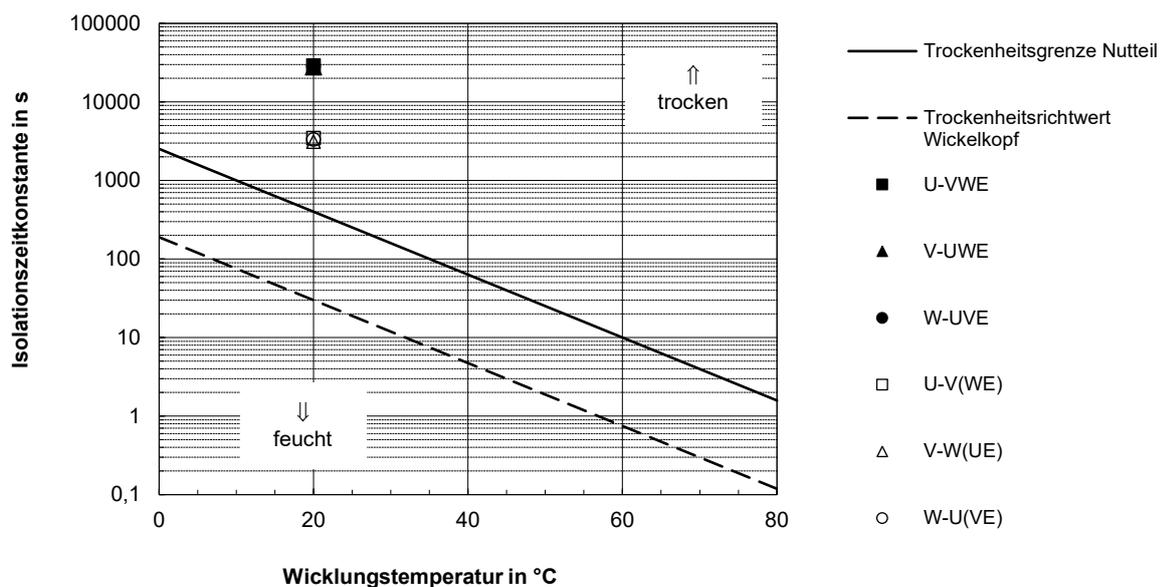


Abbildung 2-8: Trockenheitsgrenzen

Diese Darstellung macht problematische Temperaturkorrekturen der Widerstandswerte überflüssig. Man ersieht aus Abbildung 8, dass einer Abkühlung um 10 K eine Erhöhung des Isolationswiderstandes um das 2,0 bis 2,5-fache entspricht.

Die Isolationszeitkonstante τ berücksichtigt annähernd die Maschinengröße und erlaubt so den Vergleich unterschiedlich großer Maschinen bei gleicher Wicklungstemperatur. Die Trockenheitsgrenze muss mindestens erreicht werden, bevor die Wicklung als betriebs- und prüftauglich angesehen werden kann.

2.6.2 Läuferwicklung

Aufgrund des konstruktiv anderen Isolierungsaufbaues der Läuferwicklung hat bei ihr die empirisch ermittelte Trockenheitsgrenze keine Gültigkeit. Der erzielbare Isolationswiderstand hängt sehr stark von der ausgeführten Konstruktion und den verwendeten Isolierungsmaterialien ab; er streut daher von Maschine zu Maschine und reicht von kOhm bis in den MOhm-Bereich.

2.6.2.1 Isolationswiderstand

Für eine bereits in Betrieb befindliche trockene Läuferwicklung sollte ein Isolationswiderstand von 100 kOhm nicht unterschritten werden. Für neue Wicklungen gilt ein Mindestwert von 100 MOhm.

3 Verlustfaktormessung

3.1 Zweck und Zielsetzung der Prüfung

Der dielektrische Verlustfaktor $\tan \delta$ ist ein Maß für die dielektrischen Verluste in der Wicklungsisolierung. Durch Messung dieses dielektrischen Verlustfaktors kann die Qualität von neuen, aber auch gealterten Wicklungsisolierungen drehender elektrischer Maschinen bewertet werden. Insbesondere kann die Einhaltung einer gleichbleibenden Fertigungsqualität und das dielektrische Verhalten des gesamten Isoliersystems der Wicklung überwacht werden. Beispielsweise liefert der Verlustfaktor, der an gealterten Ständerwicklungen gemessen wird, wichtige Informationen über den aktuellen Zustand des Isoliersystems und mögliche Schädigungen.

Verlustfaktormessungen liefern allerdings keine Anhaltspunkte über die Verteilung der dielektrischen Verluste innerhalb der gesamten Isolierung und somit ist es – im Gegensatz zur Teilentladungsmessung – nicht möglich, örtliche Schwachstellen im Isoliersystem direkt zu lokalisieren.

Verlustfaktormessungen werden bei drehenden elektrischen Maschinen üblicherweise durchgeführt:

- (1) an einzelnen Ständerstäben und -spulen mit Wicklungen aus vorgeformten Elementen, die noch nicht in das Blechpaket eingebaut sind
- (2) an einzelnen Ständerstäben und -spulen oder Stab- bzw. Spulengruppen, die bereits in das Blechpaket eingebaut sind
- (3) an kompletten Ständerwicklungen von Maschinen im Neuzustand und
- (4) an Ständerwicklungen von gealterten Maschinen im Rahmen von Inspektionen und Revisionen

Zweck und Zielsetzung der Verlustfaktormessung an glimmerhaltigen Isoliersystemen für Hochspannungswicklungen von rotierenden elektrischen Maschinen ist:

- (5) Die Qualitätssicherung für die einzelnen Spulen und Stäbe bei der Neufertigung,
- (6) Die Erfüllung der vertraglichen QC-Abnahmebedingungen (QC = Quality Control) kompletter Wicklungen vor Auslieferung oder Inbetriebnahme,
- (7) Die Ermittlung des Alterungszustandes der Wicklungsstränge bei Inspektionen oder geplanten Maschinenrevisionen,
- (8) Die Verwendung der Verlustfaktorergebnisse zusammen mit anderen charakteristischen Kenngrößen zur Abschätzung der Restlebensdauer von Generatoren/Motoren bei ökonomischen Portfoliobetrachtungen elektrischer Betriebsmittel.

3.2 Normen und Empfehlungen

- **DIN EN IEC 60034-27-3 (VDE 0530-27-3)**
Messung des dielektrischen Verlustfaktors an der Ständerwicklungsisolierung drehender elektrischer Maschinen
- **IEEE 286**
IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation

3.3 Messtechnische Grundlagen

Der dielektrische Verlustfaktor $\tan \delta$ ist der Tangens des dielektrischen Verlustwinkels δ (Komplement zum dielektrischen Leistungsfaktor-Winkel ϕ) bei vorgegebener Spannung U , Drehfrequenz ω und Temperatur ϑ , vgl. Zeigerdiagramm in Abbildung 3-1.

Die dielektrischen Verluste im Isoliersystem können in einem entsprechenden Ersatzschaltbild mit parallel geschalteten Elementen (R_p, C_p), gemäß Abbildung 3-1, dargestellt werden.

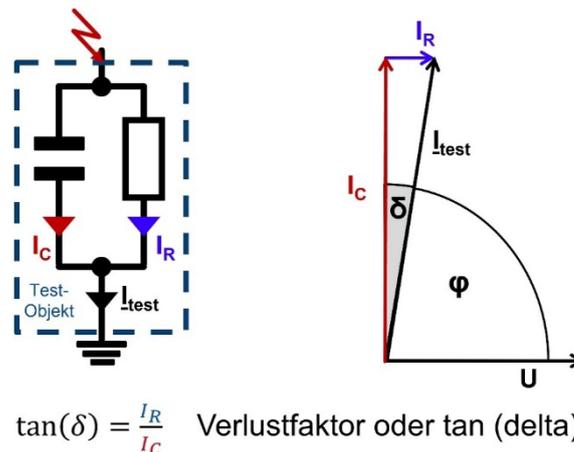


Abbildung 3-1: Parallelersatzschaltbild und Zeigerdiagramm der dielektrischen Verluste; I_{test} als Gesamtstrom durch den Prüfling, I_C als kapazitiver Anteil des Stromes und I_R als resistiver Anteil (Verluste)

Das Ersatzschaltbild in Abbildung 3-1 verdeutlicht, dass der Strom I , der durch die Isolierung fließt, aus einem kapazitiven Stromanteil I_C und einem resistiven Anteil I_R besteht. Der kapazitive Strom I_C entspricht dem reinen Blindstrom der idealen verlustfreien Isolierungskapazität C und der resistive Stromanteil I_R fasst alle ohmschen Verluste R in dem nicht perfekt kapazitiven Isoliersystem zusammen.

Der Phasenwinkel δ wird durch die Größe der ohmschen Verluste des Isoliermaterials im Vergleich zum reinen kapazitiven Anteil gebildet. Je geringer die ohmschen Verluste in der Isolierung sind, desto kleiner sind die Verluste und somit auch der Verlustwinkel δ , bzw. der dielektrische Verlustfaktor $\tan \delta$.

Als Verluste einer kompletten Wicklungsstrangisolierung zwischen der Kupferleiteranordnung (einschließlich Innenpotentialsteuerung, falls vorhanden) und dem leitfähigen Außenglimmschutz an der geerdeten Blechpaketnut sind die dielektrischen Verluste der glimmerhaltigen Hauptisolierung und etwaige Verluste durch Oberflächenströme über den Endenglimmschutz (EGS) im Wickelkopfbereich in Betracht zu ziehen.

3.3.1 Einflussfaktoren auf den Verlustfaktor ($\tan\delta$)

Die Verlustfaktormessung kann durch vielfältige Einflussfaktoren in unterschiedlicher Stärke verändert werden, so dass die eigentliche Information über die Qualität der glimmerhaltigen Hochspannungsisolierung verfälscht wird.

Diese möglichen Einflüsse müssen erkannt werden, um sie einschätzen zu können. Mögliche Einflussfaktoren, die direkt auf die gemessenen $\tan\delta$ -Werte wirken, sind:

- (1) Materialeigenschaften des glimmerhaltigen elektrischen Isoliersystems (EIS)
 - Art und Qualität des verwendeten Glimmerbandes (Trägermaterial, Glimmerstruktur, Beschleunigertyp)
 - Art und Qualität des Tränkeharzes oder des Imprägnierlackes
 - Produktionsparameter des Vakuumtränk- oder Imprägnier-Prozesses
 - Art der Enden- und Außenglimmschutzanordnungen

- (2) Konstruktive Einflüsse, die die Eigenschaften des EGS mitbestimmen
 - Höhe der elektrischen Feldstärkebeanspruchung
 - Art des verwendeten Isoliersystems wie Einzelstab- oder Ganztränkung, Resin-Rich-Isolierung
 - Innenpotentialsteuerung
 - Elektrische Auslegung des Endenglimmschutz (EGS)

- (3) Einflüsse des Fertigungsprozesses im Herstellerwerk oder an der Maschine
 - Wickelverfahren der Glimmerbänder auf den Kupferleiter
 - Imprägnierungs- und Härtingsbedingungen der Isolierung
 - Neuwicklungsqualität bei Wiederverwendung alter Kupferleiter

- (4) Umgebungseinflüsse während der $\tan\delta$ -Messung
 - Temperatur und Luftfeuchtigkeit
 - Oberflächenverschmutzung und -leitfähigkeit
 - Oberwellenanteil und Stabilität der Messspannung

Die Interpretation der Verlustfaktormesswerte kompletter Wicklungen oder einzelner Phasen, welche etwa während eines Revisionsintervalls aufgenommen werden, erfolgt durch Trendanalysen und Phasenvergleiche.

Um eine Aussage über den Alterungszustand des Ständerisolationssystems tätigen zu können, sollten daher der Neuzustand der Wicklung und alle vorhergehenden Diagnosemessungen bekannt sein. Auch Kenntnisse über den Neuzustand der Wicklungsisolierung der Einzelstäbe können hilfreich sein.

3.4 Prüfaufbau für Verlustfaktormessungen

Bei der Messung des dielektrischen Verlustfaktors $\tan \delta$ müssen die üblicherweise kleinen Phasenwinkelunterschiede zwischen dem reinen kapazitiven Blindstrom I_C und dem verlustbehafteten Gesamtstrom I präzise erfasst werden. Hierfür können Brückenschaltungen oder handelsübliche digitale Messsysteme verwendet werden, mit denen der Verlustwinkel δ präzise gemessen werden kann.

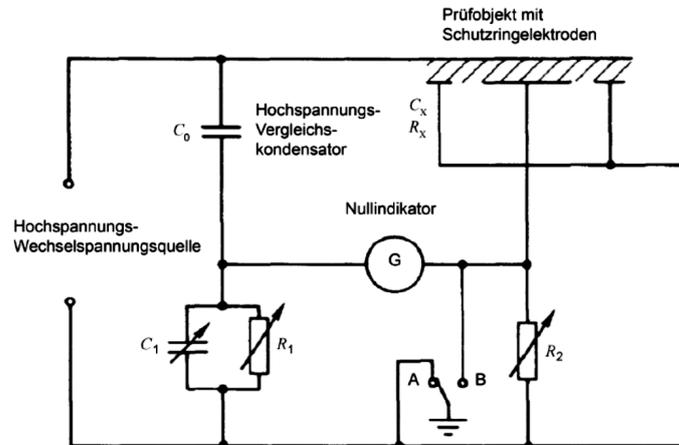
Die Messung an einer betriebsfertig eingebauten Ständerwicklung erfordert neben der Verlustfaktor- und Kapazitätsmesseinrichtung eine ausreichend leistungsfähige Hochspannungsquelle, die in der Lage ist, den erforderlichen kapazitiven Ladestrom bis zur höchsten Prüfspannung des Prüflings zu liefern.

3.4.1 Messsysteme

Zur messtechnischen Ermittlung des Verlustfaktors stehen verschiedene Messsysteme zur Verfügung.

3.4.1.1 Schering Brücke

Die klassische Brückenschaltung nach Schering (Schering-Brücke) ist in Abbildung 3-2 ohne schaltungstechnische Zusätze schematisch dargestellt. Die Brücke wird durch eine Hochspannungsquelle mit möglichst oberwellenfreier Wechselspannung gespeist, wobei die Leistung ausreichend groß sein muss, um die Prüflings- und Normalkondensatorkapazitäten ohne Verzerrungen der sinusförmigen Wechselspannung zu versorgen. Für den Abgleich der Brücke ist ein hochempfindlicher Nullindikator erforderlich, der die Phasenverschiebung und Amplitudenunterschiede getrennt anzeigt.



Legende

Stellung des Erdschalters	A	für die Prüfung nicht geerdeter Spulen oder Stäbe	
	B	für die Prüfung geerdeter Wicklungen	
C_0	Kapazität des Vergleichskondensators	C_x	Kapazität des Prüfbjcktes
C_1	einstellbare Kapazität im Abgleichszweig 1	R_2	einstellbarer Widerstand im Abgleichszweig 2
R_1	einstellbarer Widerstand im Abgleichszweig 1	R_x	Widerstand des Prüfbjcktes

Abbildung 3-2: Prinzipschaltbild der klassische Hochspannungs-Brückenschaltung nach Schering (Schering-Brücke)

Die analoge Schering-Brücke reagiert sehr empfindlich auf Störungen durch kapazitive Streukapazitäten gegen Erde. Es wird deshalb empfohlen, doppelt geschirmte koaxiale Messkabel mit einem aktiven Potentialausgleich am Schirm, z. B. eine Wagner-Kompensationsschaltung, zu verwenden.

3.4.1.2 Messbrücke mit Differentialtransformator

Die Messbrücke mit Differentialtransformator ist eine Weiterentwicklung der klassischen Schering-Brücke.

Hierbei wird der Isolationsstrom I_x in einen Zweig des Differentialtransformators geführt. Mit der Messbrücke wird ein Strom I_N eingestellt, der in Größe und Phasenlage dem über die Isolation fließenden Ladestrom entspricht und in den zweiten Zweig des Transformators geführt. Die vektorielle Addition dieser beiden Ströme im Differentialtransformator ist im abgeglichenen Zustand = 0.

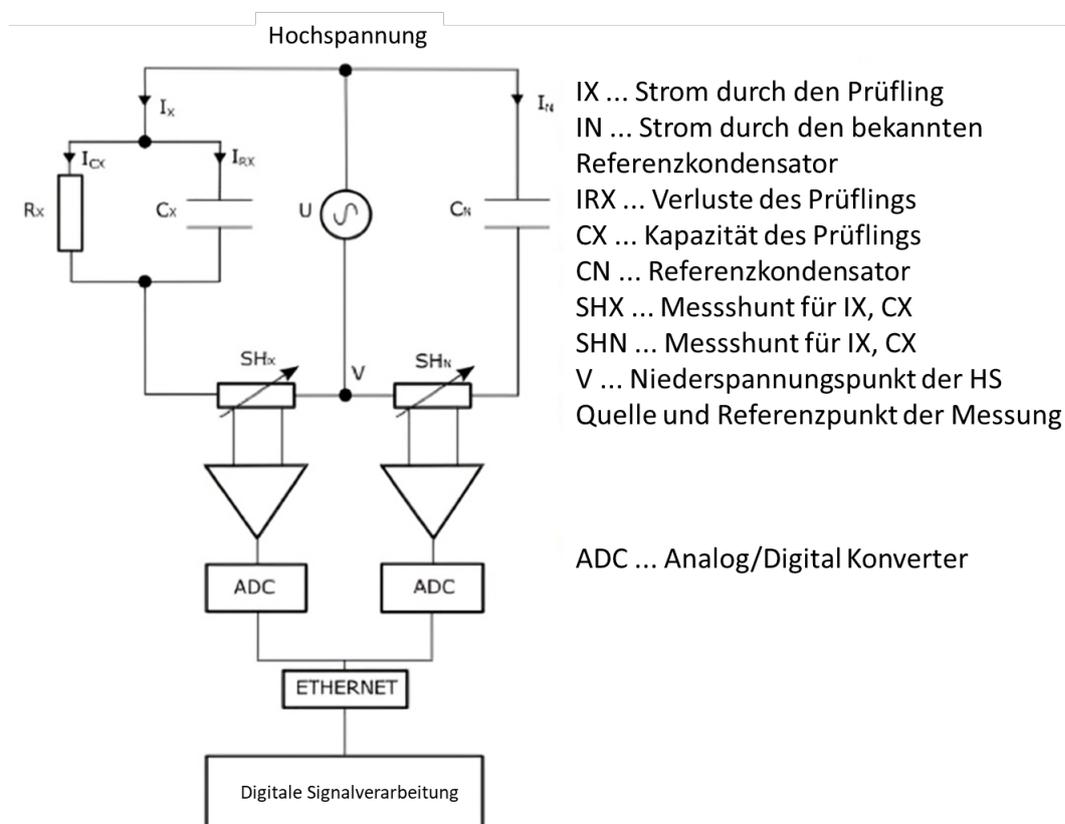


Abbildung 3-3: Prinzipschaltbild einer Messbrücke mit Differentialtransformator

3.4.1.3 Digitale Messbrücke

Heutzutage werden überwiegend automatisch abgleichende digitale Messbrücken gemäß Abbildung 3-4 verwendet und in kommerziellen Verlustfaktormesssystemen angeboten. Die digitale Messdatenerfassung erlaubt insbesondere in der Fertigung von neuen Spulen oder Stäben für Hochspannungswicklungen eine vollautomatische Messung zur Qualitätssicherung und Dokumentation.

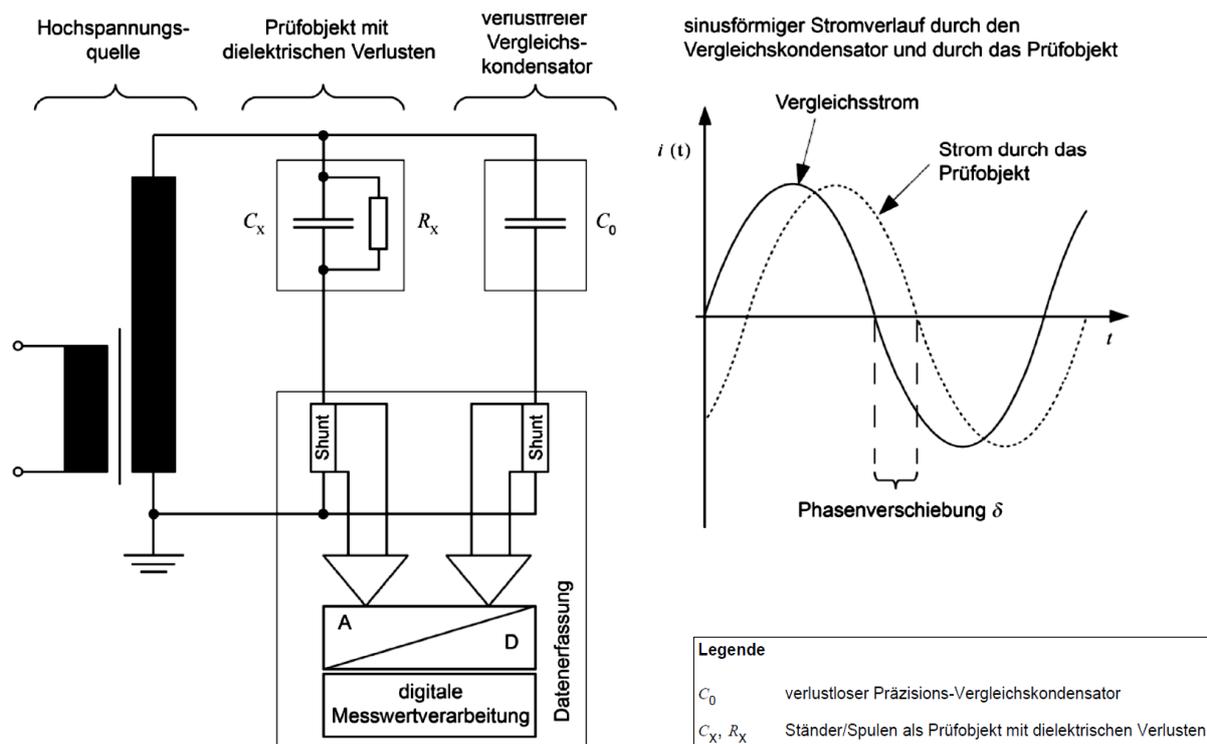


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung eines digitalen Messsystems mit zugehöriger Hochspannungsprüfanordnung und den Strömen bei einer automatischen Verlustfaktormessung

Weiters kommen schlüsselfertige Komplettlösungen, bestehend aus einer Kontrolleinheit mit integriertem Inverter, sowie integrierter Hochspannungsquelle inklusive Referenzkondensator oder Vergleichskondensator (Abbildung 3-5) und Messlogik zum Einsatz. Solche kommerziell erhältlichen Prüfsysteme können Spannungen bis 15 kV erzeugen und werden üblicherweise aus einer 16 A Steckdose gespeist. Die Erregung der hohen kapazitiven Last einer Statorwicklung erfolgt durch die Kompensation mittels paralleler Induktivitäten. In den Abbildungen 3-5 und 3-6 sind Beispiele solcher Anlagen ersichtliche.

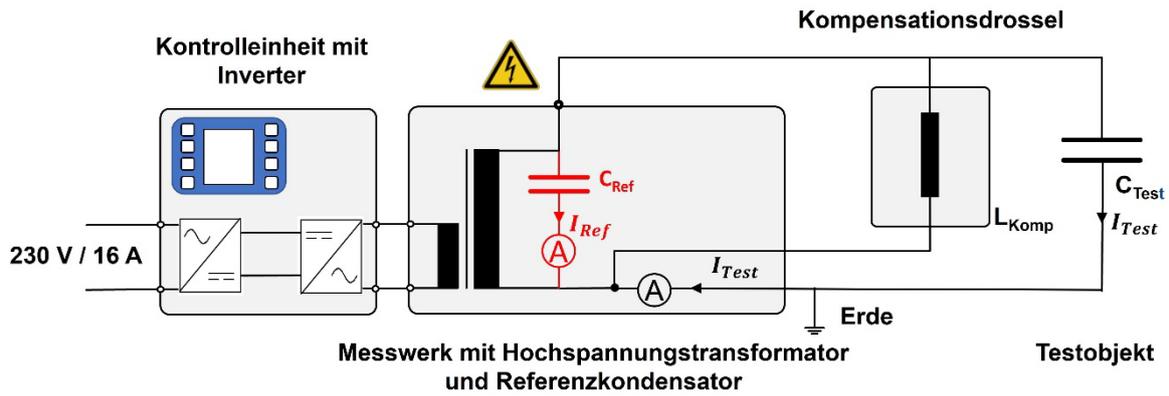


Abbildung 3-5: Schematische Darstellung des Komplettsystems mit Inverter, digitalem Messsystem inklusive Referenzkondensator und Induktivitäten zur Kompensation der kapazitiven Last des Testobjekts.

Vorteile von Komplettlösungen sind die geringe Abweichung der Hochspannung von der Sinusform, da der Inverter diese in Kombination mit einem Trafo unabhängig der Spannungsform aus dem Netz generiert, der schnelle und intuitive Aufbau, da die Anschlusstechnik für diesen Zweck optimiert wurde, sowie ein vergleichsweise kleines und leichtes Packmaß.



Abbildung 3-6: Beispiel eines schlüsselfertigen digitalen Messsystems. Die Kontrolleinheit und der Inverter sind unterhalb des Laptops. Noch einmal darunter befinden sich der Transformator, sowie die digitale Messwerterfassung zusammen mit dem Referenzkondensator. Die Kompensationsdrosseln (in diesem Fall 4 Stück, abhängig von der Wicklungskapazität) befinden sich aufgereiht in der linken Bildhälfte.

Nachteil ist die Limitierung der Leistung durch den 220 V Netzanschluss, welcher die ohmschen Verluste des Prüflings, die eventuell nicht perfekte Kompensation sowie die ohmschen Verluste des Parallelschwingkreises ausgleichen muss. Für den Großteil der Maschinen und speziell für den Fall der wiederkehrenden Routinemessungen im Feld stellt der Leistungsbedarf allerdings kein Problem für derartige schlüsselfertige Systeme dar.

3.5 Messung an betriebsfertig eingebauten Ständerwicklungen

3.5.1 Messaufbau

Zum Zweck der Verlustfaktormessung wird die Maschine abgeklemmt und – falls möglich – die einzelnen drei Phasen aufgetrennt und voneinander isoliert. Anschließend werden die einzelnen Phasen hintereinander gegen Erde gemessen. Grund ist der Mehrwert an Information, welche die Einzelphasenmessung bietet.

Eine Messung aller drei kurzgeschlossen Phasen gegen Erde sowie die Messung des Verlustfaktors zwischen den Phasen ist ebenfalls möglich.

Es ist ratsam, die Wicklungstemperatur sowie die Umgebungsbedingungen wie Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit am Beginn und am Ende der Messung zu messen und zu protokollieren. Generell sollte auf ähnliche Bedingungen bei den zeitlich voneinander getrennten Verlustfaktormessungen geachtet werden auch in Bezug auf den Verschmutzungsgrad des Wickelkopfs, sofern möglich.

Des Weiteren ist auch darauf zu achten, dass Läufer, Lager, Gehäuse, Nutthermometer, Schirmung von Messeinrichtungen usw. gut geerdet sind.

Das Foto in Abbildung 3-7 rechts zeigt einen Prüfplatz in der Generatorstabfertigung, in dem die Wicklungsstäbe einer Hochspannungsprüfung und Verlustfaktormessung als Teil der Qualitätskontrolle unterzogen werden. Der Hochspannungsprüftransformator mit Spannungswandler und Normalkondensator stehen auf dem Dach des abgeschlossenen klimatisierten Mess- und Steuerraumes. Die bis zu 11 m langen Wicklungsstäbe werden direkt von der Fertigung in die Prüfzelle gelegt und dort einzeln geprüft.

Die Verlustfaktor- und Hochspannungsprüfung einer kompletten Ständerwicklung ist in Abbildung 3-7 links dargestellt. Dieser Prüfplatz hängt von dem Montageplatz des Generatorständers im Herstellerwerk oder im Kraftwerk ab und ist daher mobil aufgebaut und schnell umzusetzen. Das etwas ältere Foto aus den 1990-er Jahren zeigt neben den Stell- und Hochspannungstransformatoren sowie den verschiedenen Hochspannungskondensatoren, die direkt unterhalb des Generatorständers aufgebaut sind, direkt im Vordergrund auch die einzelnen Messgeräte für die Verlustfaktor- und Teilentladungsmessung mit verschiedenen Messsystemen.

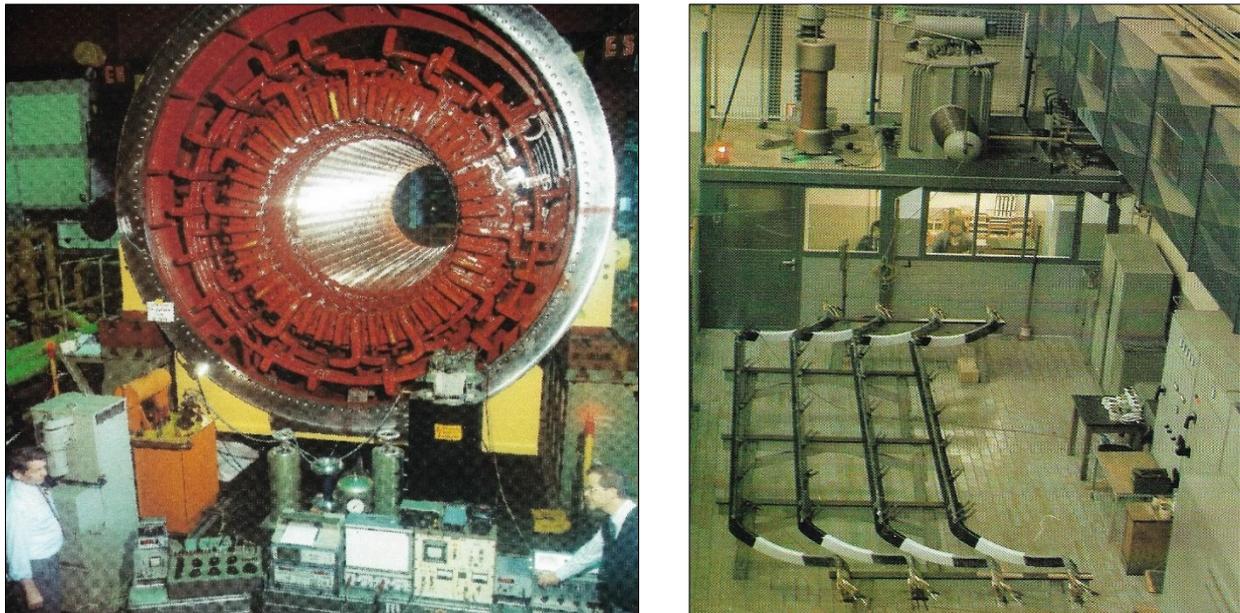


Abbildung 3-7: Prüfaufbau für die Verlustfaktormessung an einzelnen Generatorwicklungsstäben in der Fertigung (rechts) und an kompletten Ständerwicklungen im Prüffeld (links)

3.5.2 Durchführung der Messung

Die Verlustfaktormessung wird mit einer netzfrequenten Wechselspannung mit geringem Anteil von Oberwellen entsprechend IEC 60060-1 durchgeführt, da Oberwellen das Messergebnis bei analogen Messgeräten verfälschen. Kommen digitale Messbrücken zum Einsatz so werden in der Regel die von der Messfrequenz unterschiedlichen Frequenzen mittels Filter ausgeblendet.

Es ist üblich, den dielektrischen Verlustfaktor in einem bestimmten auf die Bemessungsspannung U_N bezogenen Spannungsbereich U/U_N in festgelegten Spannungsstufen zu messen. Beginnend bei der ersten Stufe von $0,2U_N$ wird die Spannung in Stufen von $0,1U_N$ oder $0,2U_N$ bis hin zur Bemessungsspannung von $1,0U_N$ gesteigert.

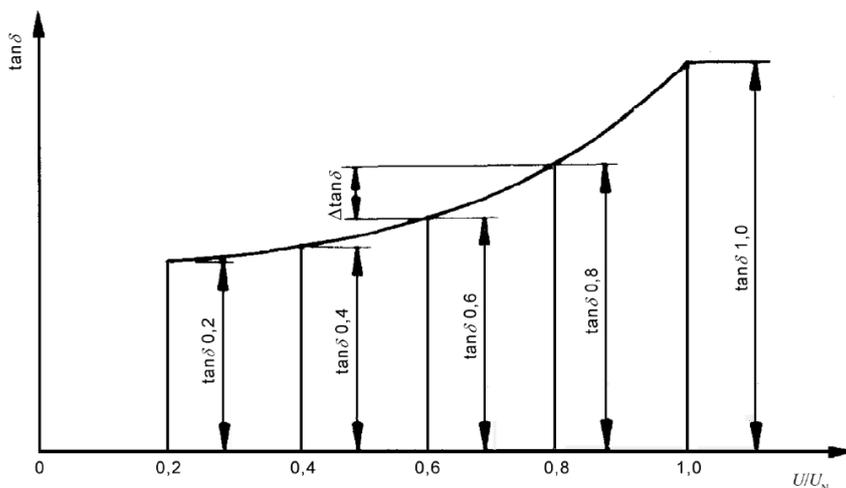


Abbildung 3-8: Beispiel für eine Verlustfaktoranstiegskurve in Abhängigkeit der normierten Prüfspannung U/U_N und gemessen in den Spannungsstufen von $0,2U_N$ bis zur Bemessungsspannung U_N [1]

Abbildung 3-8 zeigt ein typisches Beispiel für eine Verlustfaktoranstiegskurve in Abhängigkeit der normierten Prüfspannung U/U_N , die in den Spannungsstufen von $0,2U_N$ bis zur Bemessungsspannung U_N gemessen wurde.

3.5.2.1 Darstellung der Messergebnisse

Die Messergebnisse können tabellarisch (siehe Tabelle 3-1) erfasst werden und grafisch in Kurvenform dargestellt werden.

In Tabelle 3-1 ist ein Beispiel für die Darstellung der Messergebnisse einer Verlustfaktor- und Kapazitätsmessung an einer großen direkt wassergekühlten Generatorständerwicklung mit einer Leistung von 1600 MVA und einer Bemessungsspannung von $U_N = 27$ kV wiedergegeben. Neben den Verlustfaktorwerten $\tan\delta$ und den Kapazitätswerten C ist als Maß der Isolierungsqualität auch der Verlustfaktoranstieg $\Delta \tan\delta$ je Spannungsstufe von $0,1U_N$ und $0,2U_N$ bis zur Bemessungsspannung U_N angegeben.

Der maximale Verlustfaktoranstieg $\Delta \tan\delta$ je Spannungsstufe von $0,2U_N$, der bis zur Bemessungsspannung von U_N 27 kV ermittelt wird, beträgt $\Delta \tan\delta/\Delta U = 0,72 \cdot 10^{-3}/0,2U_N$ und liegt damit weit niedriger als der in IEC 60034-27-3 [1] angegebene Grenzwert für einzelne neuwertige Wicklungsspulen/stäbe von $\Delta \tan\delta/\Delta U = 5 \cdot 10^{-3}/0,2U_N$.

U / U _N	U [kV]	C [nF]	Tan δ [10 ⁻³]	Δ Tan δ [10 ⁻³]		C _N = 1043,64 pF
				per 0.1U _N	per 0.2U _N	
0,1	2,70	901,168	12,710			Phase U R _{ISO} (5kV) = 1.670 MΩ C _{0,2UN} = 902,332 nF Hochspannungsprüfung: High Potential Test: 57,75 kV 1 min.
0,2	5,40	902,332	13,330	0,620		
0,3	8,10	903,589	14,150	0,820		
0,4	10,80	904,501	14,600	0,450	1,270	
0,5	13,50	905,057	14,940	0,340		
0,6	16,20	905,780	15,260	0,320	0,660	
0,7	18,90	906,484	15,640	0,380		
0,8	21,60	907,220	16,000	0,360	0,740	
0,9	24,30	907,905	16,350	0,350		
1,0	27,00	908,532	16,660	0,310	0,660	
1,2	32,40	909,904	17,390			
1,4	37,80	911,006	17,960			

Tabelle 3-1: Beispiel einer Verlustfaktor- und Kapazitätsmessung an einer Generatorständerwicklung mit einer Bemessungsspannung von $U_N = 27$ kV bis $1,4 U/U_N$

3.5.3 Interpretation der Messergebnisse

Der Vergleich von Messungen über die Zeit bzw. der Vergleich der einzelnen Phasen einer Messung haben sich als das geeignetste Mittel herausgestellt, um eine verlässliche Aussage zu den Verlustfaktorwerten tätigen zu können. Dazu ist es ratsam die Verlustfaktormessung in bestimmten Zeitabständen zu wiederholen. Einen Grenzwert gibt es bei der Messung von gesamten Wicklungen oder Wicklungssträngen nicht. Die Gründe hierfür sind in Kapitel 3.6 ausführlich beschrieben. Die Interpretation der Messung wird an folgenden Parametern festgemacht:

- $\tan(\delta)$ bei der geringsten Spannung: Dieser Wert wird herangezogen, um den Verlustfaktor mit relativ geringem Einfluss von Oberflächenströmen im Wickelkopf zu erhalten
- $\Delta \tan(\delta)$: Wie verhält sich der Verlustfaktor über die einzelnen Spannungsstufen?
- $\tan(\delta)$ bei Nennspannung bzw. Phase/Erde Spannung: Wie hoch steigt der Verlustfaktor bei dieser Spannungsstufe?

- Haben sich die zuvor genannten Werte seit der letzten Messung verändert? Ist diese Änderung in allen drei Phasen ähnlich?
- Sind die einzelnen Phasen zueinander unterschiedlich: Durch das Auftrennen der einzelnen Phasen erhält man die dreifache Anzahl der Prüflinge. Einzelne Schwachstellen treten nicht gleich verteilt in allen drei Phasen auf, wodurch Anomalitäten erkannt werden können.
- Gibt es einen „Ionisationsknick“: Ein Knick in der Kurve der Verlustfaktorergebnisse wird oft als ein Zeichen für das Einsetzen von Teilentladungen interpretiert. Dieser ersetzt jedoch nicht die Teilentladungsmessung in Kapitel 4.
- Um eine Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Messungen garantieren zu können, ist es ratsam, die Messungen dann durchzuführen, wenn die Umgebungsbedingungen gleich bzw. ähnlich wie bei den vorangegangenen Messungen sind (Kapitel 3.5.2 und 3.6).

3.5.4 Betriebsabhängiges Alterungsverhalten

Aus dem spannungsabhängigen Verlauf der Verlustfaktorkurve können Rückschlüsse über den Zustand des glimmerhaltigen Isoliersystems gewonnen werden. Anhand der drei Kurvenverläufe in Abbildung 3-9 lässt sich dies exemplarisch verdeutlichen.

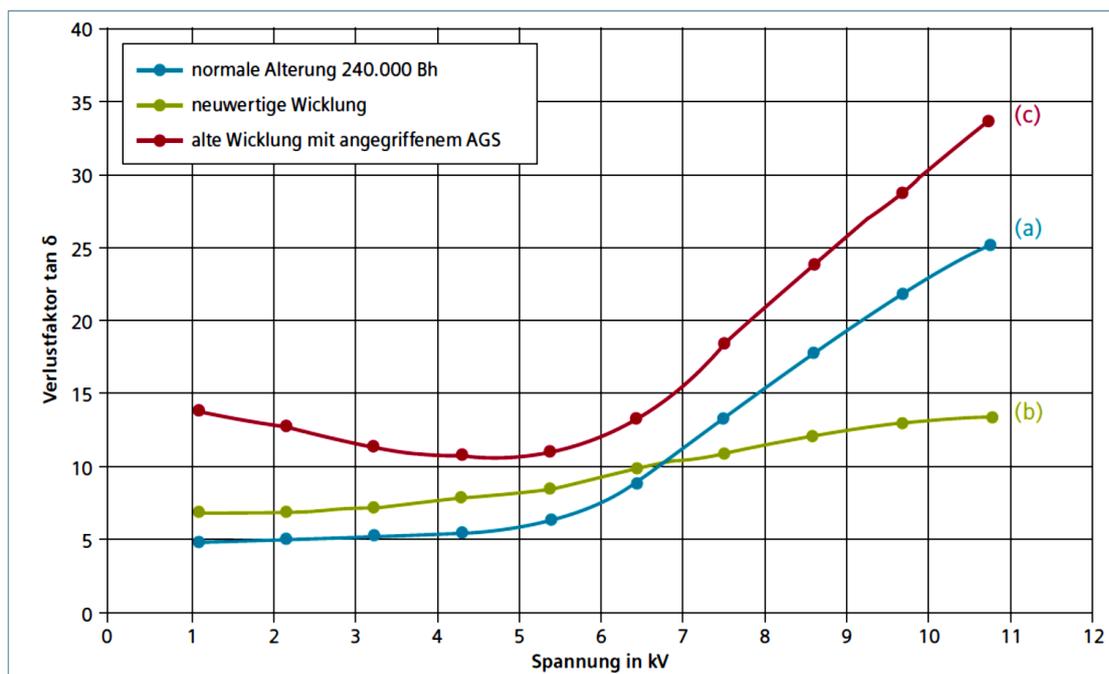


Abbildung 3-9: Beispiel für spannungsabhängige Verlustfaktormessungen $\tan\delta = f(U)$ an verschiedenen Ständerwicklungen mit unterschiedlichen Alterungszuständen

(a) normal gealterte Wicklungsisolierung nach ca. 240.000 Betriebsstunden

(b) neuwertige Wicklung im Herstellerwerk

(c) alte Wicklung mit angegriffenem Außenglimmschutz (AGS)

Eine neuwertige Wicklung, die direkt im Herstellerwerk zur Qualitätssicherung gemessen wird, zeigt einen spannungsabhängigen Verlauf gemäß Kurve (b) in Abbildung 3-9. Der Verlustfaktor steigt ab 3 kV mit zunehmender Spannung kontinuierlich leicht an. Ursache hierfür ist die bei

glimmerhaltigen Isolierungen trotz hervorragender Harzprägung immer vorhandene lokale Aufspaltung der anisotropen Glimmerpartikel in der Isolierung, die kleine flache Spalte bilden, in denen es ab ca. 3 kV zu verlustbehafteten Teilentladungen (TE) kommt. Mit zunehmender Spannung nehmen diese TE-Verluste langsam zu und erzeugen so die kontinuierlich leicht ansteigenden dielektrischen Verluste in der $\tan\delta$ -Kurve.

Bei normaler Alterung einer Generatorwicklung zeigt der spannungsabhängige Verlustfaktor nach einem jahrzehntelangen Leistungsbetrieb mit ca. 240.000 Betriebsstunden einen Verlauf gemäß der Kurve (a) in Abbildung 3-9. Gegenüber dem Neuzustand (b) sind die $\tan\delta$ -Werte bei niedriger Spannung bis etwa 6 kV deutlich abgefallen, weil das Harzsystem durch die Betriebstemperaturen nachgehärtet ist und sich dadurch freie polare Gruppen im hochpolymeren Harzsystem vernetzt haben, wodurch sie nicht mehr zu den Umpolarisationsverlusten im netzfrequenten Wechselfeld beitragen und die dielektrischen Verluste abnehmen.

Die betriebsbedingten thermischen, thermo-mechanischen und dynamisch-mechanischen Beanspruchungen des Isoliersystems führen zu spaltförmigen Delaminationen zwischen den Glimmerschichten, sowie zu lokalen Rissen und Hohlräumen, in denen bei Spannungen ab 5 kV viele kleine Teilentladungen zünden und somit die $\tan\delta$ -Werte deutlich ansteigen lassen. Der maximale Verlustfaktoranstieg von $9 \cdot 10^{-3}/0,2U_N$ ist ein typischer $\tan\delta$ -Wert für einen langjährigen Leistungsbetrieb und entsprechend gealterte Ständerwicklungen.

Die $\tan\delta$ -Kurve (c) in Abbildung 3-9. zeigt den spannungsabhängigen Verlauf des Verlustfaktors $\tan\delta = f(U)$ für eine alte Ständerwicklung mit einem durch Hochspannungsfunkenerosion angegriffenem Außenglimmschutz (AGS), der durch Nutentladungen teilweise erodiert ist. Durch den zum Teil fehlenden AGS-Kontakt zum Blechpaket ist der AGS-Widerstand zum geerdeten Blechpaket insbesondere bei niedriger Spannung von 1 – 2 kV deutlich schlechter, d.h. der Kontaktwiderstand zwischen der Isolierung und dem Blechpaket hat sich erheblich vergrößert und somit ist auch der gemessene $\tan\delta$ -Wert höher geworden. Mit zunehmender Spannung entstehen kleine elektrische Überschläge zwischen der Staboberfläche ohne AGS und der Blechpaketnut, wodurch der Erdkontakt wieder hergestellt wird und sich der Erdwiderstand des Wicklungsstabes verringert, so dass sich der $\tan\delta$ -Wert reduziert.

Dies zeigt sich in den mit anwachsender Spannung U abnehmenden Verlustfaktorwerten $\tan\delta$ bis zu einer Spannung von etwa 5 kV. Bei höheren Spannungen kommt dann die alterungsbedingte Delamination des Isoliersystems mit den Verlusten durch die Vielzahl der Teilentladungen in den spaltförmigen Hohlräumen der Isolierung wie bei der alten Wicklung mit 240.000 Betriebsstunden (Kurve a) zum Tragen und die Verlustfaktorwerte steigen deutlich an.

3.6 Einflussfaktoren auf das Messergebnis

Im nachfolgenden Kapitel sind einige wichtige Einflussfaktoren auf die Messung beschrieben und mit praktischen Beispielen erklärt. Diese untermauern die in dem vorausgegangenen Kapitel beschriebenen Argumente für gleichbleibende Umgebungsbedingungen und die Vorgehensweise bei der Interpretation.

3.6.1 Oberflächenleitfähigkeit des Wickelkopfs

Im Gegensatz zu der Verlustfaktormessung an einzelnen Stäben oder Spulen, können die Oberflächenströme im Wickelkopf bei kompletten Wicklungen oder Wicklungssträngen nicht über zusätzliche Elektroden abgeleitet werden. Somit beeinflussen diese die

Verlustfaktormessung unterschiedlich stark, abhängig vom Isolationsdesign und/oder dem Zustand des Wickelkopfs.

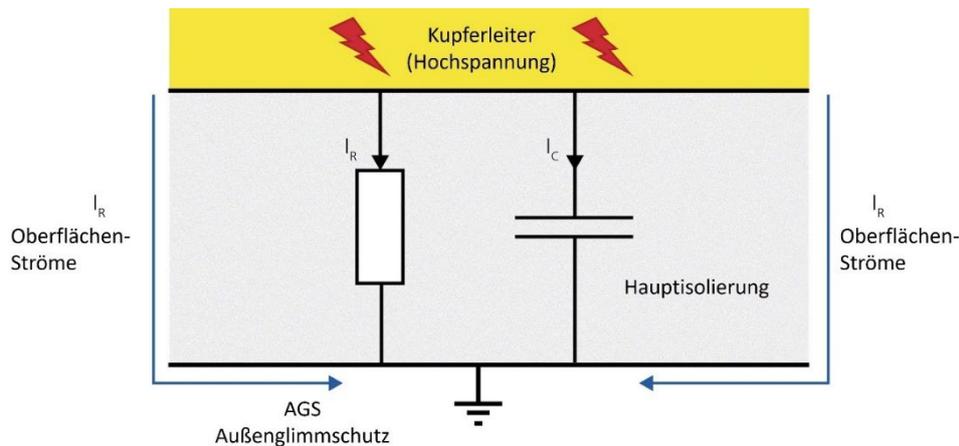


Abbildung 3-10: Bypass der Isolation durch Ströme im Wickelkopf, abhängig von der Leitfähigkeit dessen.

Abbildung 3-10 zeigt dabei das Prinzip dieser Überbrückung der Hauptisolierung. Der Kupferleiter ist auf Hochspannungspotential und wird über die verlustbehaftete Isolierung, dargestellt durch einen idealen Kondensator und einen Widerstand, vom Ständer-Kern getrennt. Die Oberflächenströme über den Wickelkopf umgehen die Isolierung und verursachen dabei zusätzliche Verluste, was zu einer Anhebung des Verlustfaktors führt. Je nach Leitfähigkeit des Wickelkopfes kann diese größer oder kleiner ausfallen.

3.6.1.1 Isolationsdesign

Das Isolationsdesign und hier vor allem, welches Glimmerband, welches Harz verwendet wird, ob ein Innenglimmschutz (IPS) angebracht ist und welcher Endenglimmschutz zum Einsatz kommt, beeinflusst das Verlustfaktorverhalten maßgeblich.

Abbildung 3-11 zeigt dies an einem Beispiel von zwei unterschiedlichen Wasserkraft-Generatoren mit intakten Wicklungen. Die einzelnen Parameter wie Alter der Wicklung, Temperatur sowie Verschmutzungen im Wickelkopfbereich sind vergleichbar. Auch die Betriebsart ist ähnlich, lediglich der Hersteller und somit auch das Isolationsdesign ist unterschiedlich.

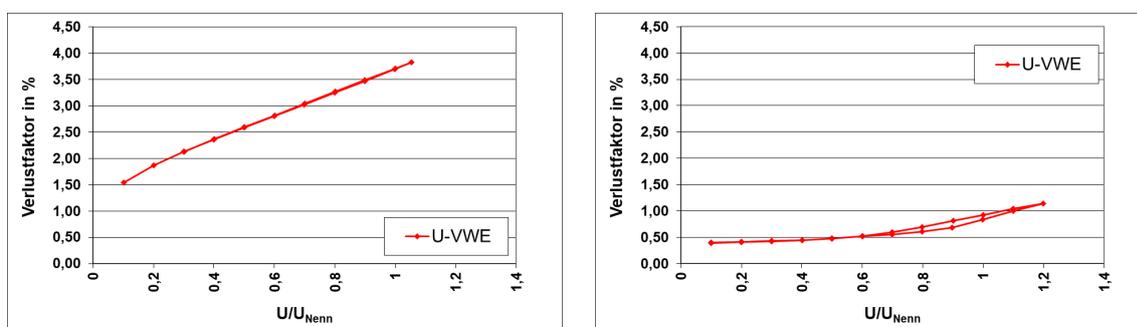


Abbildung 3-11: Phase U von zwei unterschiedlichen Generatoren mit vergleichbaren Eigenschaften und intakten Wicklungen. In beiden Fällen wurde der Verlustfaktor bei auf- und absteigender Rampe aufgenommen.

3.6.1.2 Leitfähige Beläge im Wickelkopfbereich

Leitfähige Beläge im Wickelkopf können durch Verschmutzungen aus dem Generator, zum Beispiel Kohlestaub in Verbindung mit der Umgebungfeuchte entstehen. Eine weitere Ursache kann bedingt durch den Aufstellungsort der rotierenden Maschine ihren Ursprung haben. Typische Orte hierfür sind etwa nahe dem Meer oder in Industriebetrieben mit fertigungsspezifischen Stäuben. Diese können von Haus aus leitfähig sein, oder wie zum Beispiel Salze erst in gelöstem Zustand leitfähige Ionen ausbilden.

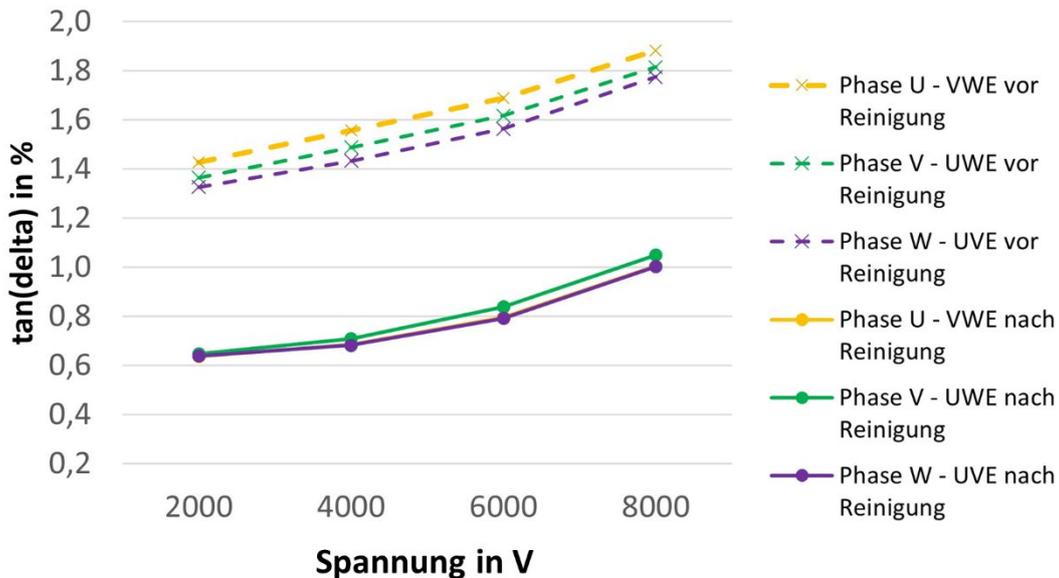


Abbildung 3-12: Einfluss von leitfähigen Belägen im Wickelkopf auf den Verlustfaktor, vor und nach der Reinigung.

Der Einfluss von leitfähigen Belägen im Wickelkopf wird besonders deutlich in Abbildung 3-12 ersichtlich. In diesem Fall wurden zwei Messreihen an ein und derselben Maschine vor und nach dem Reinigen mittels Trockeneis aufgenommen. Der Standort ist in Meeresnähe und der Unterschied nach der Reinigung kommt deutlich zum Vorschein. In solchen Fällen kann auch das Trocknen der Oberfläche mittels Stillstandheizung das Ergebnis verbessern.

3.6.1.3 Temperaturverhalten

Bei erhöhten Wicklungstemperaturen, die beim Leistungsbetrieb von drehenden elektrischen Maschinen üblicherweise auftreten, steigen die Verlustfaktorwerte temperaturabhängig deutlich an. Die Ursache liegt in den dielektrischen Eigenschaften des Isoliermaterials begründet, dessen Elektronen- und Ionenleitfähigkeit aufgrund der stärkeren Ladungsträgerbeweglichkeit und der Brownschen Bewegung mit anwachsender Temperatur zunimmt.

In Abbildung 3-13 ist der Verlustfaktorverlauf eines neuwertigen Wicklungsstranges ($U_N = 10,5 \text{ kV}$) in Abhängigkeit der normierten Spannung für verschiedene Temperaturen dargestellt. Bei Raumtemperatur RT liegt die spannungsabhängige Verlustfaktorkurve linear leicht ansteigend noch um Werte von $20 \cdot 10^{-3}$, während bei einer Wicklungstemperatur von 113°C bereits $\tan\delta$ -Werte leicht über $40 \cdot 10^{-3}$ erreicht werden. Der $\tan\delta = f(U)$ Kurvenverlauf ist

temperaturabhängig parallel verschoben worden und steigt bis 140°C nochmals um fast den doppelten $\tan\delta$ -Wert an.

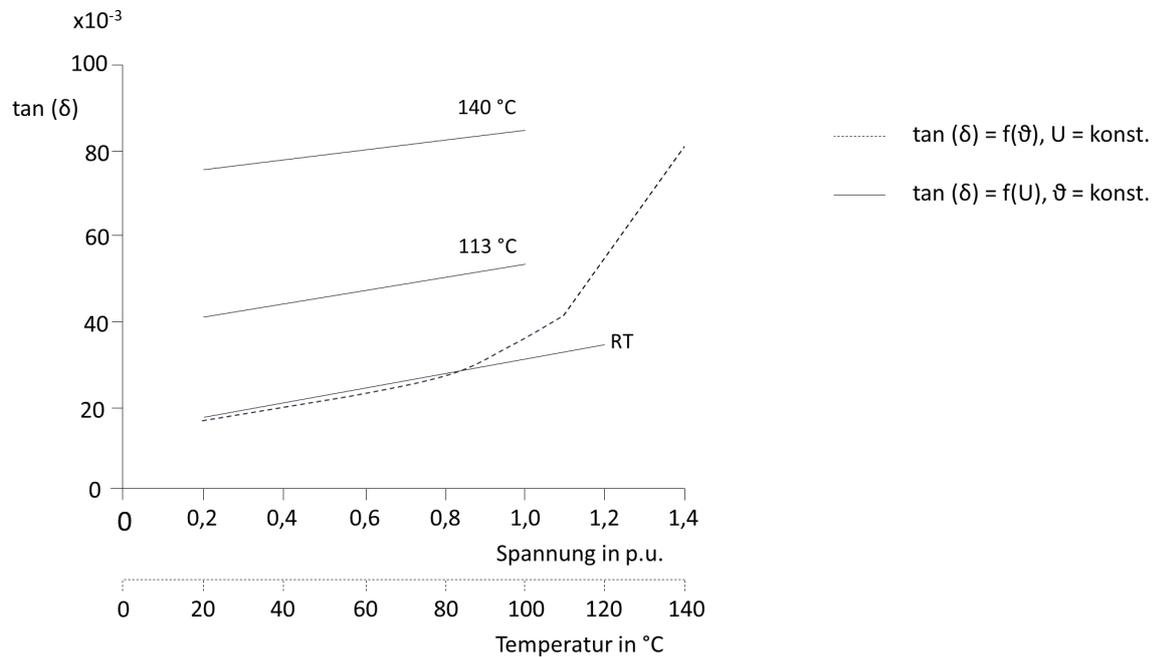


Abbildung 3-13: Verlustfaktorverlauf eines neuwertigen Wicklungsstranges in Abhängigkeit der Spannung ($U_N = 10,5 \text{ kV}$) und der Temperatur bis 140°C

Die starke temperaturabhängige Zunahme der dielektrischen Leitungsverluste der Ladungsträger im EP-Harz-Glimmer-Isoliersystem zeigt sich insbesondere in der temperaturabhängigen Darstellung des Verlustfaktors $\tan\delta = f(\vartheta)$ für Temperaturen zwischen RT (23°C) und 140°C – gestrichelte Temperaturkurve in Abbildung 3-13.

4 Off-Line Teilentladungsmessung

4.1 Zweck, Übersicht

Die Messung von elektrischen Teilentladungen (TE) an Ständerwicklungen von Generatoren und Motoren ist ein seit vielen Jahren erfolgreich praktiziertes Verfahren zur Zustandsbewertung des Isoliersystems. Mit der TE-Messung kann sowohl die Qualität neu gefertigter Wicklungen und Wicklungselemente überwacht werden als auch der Zustand betrieblich gealterter Wicklungen bei Maschinenrevisionen vor Ort beurteilt werden. Während andere dielektrische Untersuchungsmethoden wie die Isolationsstrommessung oder die Verlustfaktormessung nur integrale Informationen über die Eigenschaften der gesamten Isolierung liefern, kann die TE-Messung aufgrund ihres differenzierenden Charakters lokal begrenzte Schwachstellen im Isoliersystem erkennen.

Im Laufe der jahrelangen Nutzung der TE-Messung bei Herstellern und Betreibern drehender Maschinen haben sich unterschiedliche Messverfahren herausgebildet, deren Messergebnisse untereinander nicht vergleichbar waren. Es entstand daher international der Wunsch, so wie auch bei allen anderen Betriebsmitteln der Energietechnik, einen Standard für die TE-Messung an Generatoren und Motoren im Stillstand zu erstellen, mit dessen Hilfe nachvollziehbare Prüfverfahren festgelegt werden, die unter definierten Rahmenbedingungen vergleichbare Resultate liefern. Dieser Standard ist daher unter dem Gesichtspunkt erstellt worden, eine detaillierte, schrittweise umsetzbare Prüfanweisung anzubieten, die es auch Nichtfachleuten ermöglicht, vergleichbare TE-Messungen mit aussagekräftigen Ergebnissen zu erzielen, siehe unten, Abschnitt Normung.

4.2 Normen und Empfehlungen

- **IEC 60270**
High-voltage test techniques – Partial discharge measurements
- **IEC 60034-27-1**
Off-line Teilentladungsmessungen an Ständerwicklungsisolierungen drehender elektrischer Maschinen
- **IEEE 1434**
Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery

4.3 Grundlagen

Teilentladungen (TE) sind Entladungen innerhalb oder an der Oberfläche eines Isoliermediums, welche – wie der Name schon sagt – die Isolierung teilweise überbrücken. Dabei treten Teilentladungen an jenen Stellen auf, an welchen die lokale Feldstärke die dortige Durchschlagsfestigkeit übersteigt. Dies kann vielerlei Ursachen haben wie z.B. Hohlräume oder Fremdkörper (unterschiedliche Permittivität ϵ), an Spitzen oder Kanten, zu geringe Abstände an den Phasentrennstellen oder erodierte bzw. nicht vorhandene elektrische Potentialabsteuerungen.

Der große Vorteil der Teilentladungsmessung ist dabei ihre Selektivität. Im Unterschied zu den meisten anderen Bewertungsmethoden, können einzelne Fehlstellen identifiziert und auf Grund ihrer Form im phasenaufgelösten Muster bestimmten Fehlerbildern zugeordnet werden.

In den Epoxidharz-Glimmer Isolierungen von rotierenden elektrischen Maschinen sind Teilentladungen bis zu einem bestimmten Pegel bzw. mit einer bestimmten Form im phasenaufgelösten Muster als normal und unkritisch anzusehen. Die kommerziellen Fertigungsprozesse erlauben es nicht diese Isoliersysteme teilentladungsfrei herzustellen. Der teilentladungsresistente Glimmer wirkt dabei als Barriere, wodurch bestimmte Entladungen kein Problem für einen sicheren Fortbetrieb der Maschine darstellen.

Diese unkritischen Entladungen gilt es von den kritischen TE-Arten zu unterscheiden. Dies geschieht mit Hilfe des phasenaufgelösten Musters, wie im Kapitel „Auswertung“ erklärt wird.

4.4 Messmethode

Teilentladungen können elektrisch, akustisch, optisch oder deren Beiprodukte über eine Gasmessung ermittelt werden. Die beiden letzteren Methoden funktionieren vor allem bei äußeren Entladungen. Da sich die elektrische TE-Messung mittels Koppel-Kondensator und Ankoppelvierpol bei der rotierenden Maschine durchgesetzt hat, beschränkt sich das Merkblatt auf diese Methode.

Jede Teilentladung erzeugt einen schnellen, unipolaren Stromimpuls, welcher sich vom Entstehungsort in beide Richtungen ausbreitet. Dabei können die Entladungen nicht direkt an ihrer Entstehung gemessen werden, sondern an den zugänglichen Punkten der Wicklung. Meist sind dies Ausleitung und Sternpunkt. Da es sich nicht um die Ladung direkt an der Entstehungsstelle handelt, spricht man von einer „scheinbaren Ladung“ die in Coulomb (C) bzw. in pC oder nC gemessen wird. Bei erfolgter Normierung (Kalibrierung) vor der TE-Messung ist diese ein guter Indikator für den Energiegehalt der Ladung am Entstehungsort.

Details hierzu werden in IEC 60034-27-1 *Off-line partial discharge measurements on the winding insulation of rotating electrical machines* beschrieben.

Der Teilentladungsimpuls wird an den Anschlusspunkten mittels eines Teilers bestehend aus Koppelkondensator und Ankoppelvierpol ausgekoppelt und gemessen. Abbildung 4-1 zeigt exemplarisch ein Schema eines solchen Aufbaus.

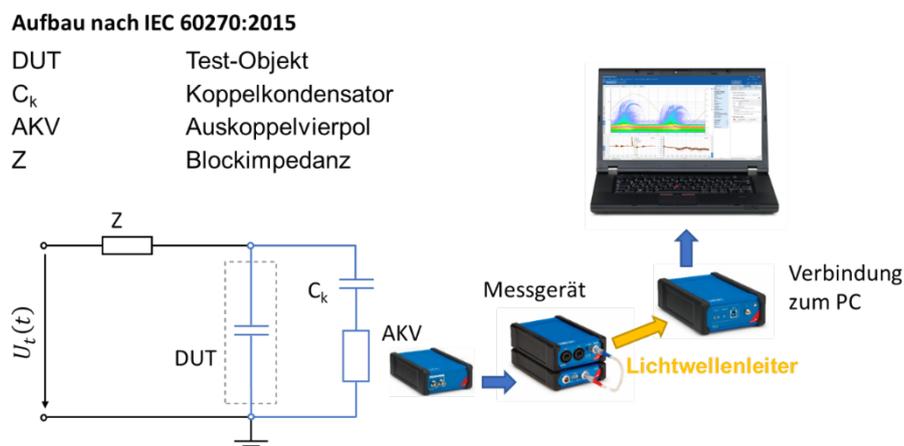


Abbildung 4-1: Schema des Prüfaufbaus mittels Koppelkondensator und Ankoppelvierpols

Die Ermittlung der scheinbaren Ladung erfolgt mittels eines quasiintegrierenden Messverfahrens innerhalb zweier Grenzfrequenzen. Bei normierbaren TE-Messverfahren nach IEC 60034-27-1 (Messgröße in pC oder nC) liegt der Bandpass innerhalb von einigen 10 kHz bis max. einigen wenigen 100 kHz. Grund für verhältnismäßig tiefe Filterfrequenzen ist die Tatsache, dass die schnellen Anteile des Impulses sehr schnell sehr stark nach ihrer Entstehung gedämpft werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass durch die Anwendung der tiefen Filterfrequenzen, der Wert der scheinbaren Ladung sich in einer ähnlichen Größenordnung bewegt, wie jener der Ladung am Entstehungsort. Durch die so gewählten Filterfrequenzen, sowie eine beidseitige Messung an den Phasen- und Sternpunkt клемmen resultiert eine hohe Wicklungsabdeckung. Gleichzeitig sind die Messungen robuster in Bezug auf Aufbau und Kabellängen und somit reproduzierbarer als TE-Messverfahren im hochfrequenten MHz- oder GHz-Bereich.

Um Vergleiche zwischen den einzelnen Messungen ziehen zu können, sollten diese stets mit derselben oder ähnlichen Filterfrequenz und dem gleichen TE-Messsystem gemäß den Vorgaben in IEC 60034-27-1 durchgeführt werden.

Wenn die Spulen oder Wicklungen nicht gleich sind und unterschiedliche Induktivitäts- und Kapazitätswerte aufweisen, so muss vor jeder Messung eine Normalisierung (Kalibrierung) nach IEC 60034-27-1 durchgeführt werden. Dabei wird der Kalibrierfaktor ermittelt, jener Wert, mit welchem die Messung multipliziert wird, um das Ergebnis der scheinbaren Ladung zu erhalten, welchen für diesen Prüfaufbau gilt.

4.4.1 Messgeräte

Das Messsystem besteht aus einem Koppelkondensator, einem Ankoppelvierpol und einer Auswerteeinheit als TE-Messgerät. Eine synchrone 2-kanalige Messung an Phasenklemme und Sternpunkt, sofern dieser zugänglich, ermöglicht die Korrelation der Teilentladungsphänomene beider Messpunkte und generiert entsprechende Mehrinformationen.

Zusätzlich wird eine externe Hochspannungsquelle benötigt, welche im Stande ist, den Blindleistungsbedarf der Wicklung und der Koppelkondensatoren bereitzustellen. Um diese möglichst kompakt zu halten, besteht diese meist aus einem Resonanzsystem mit einer entsprechenden Blindleistungskompensation. Die Teilentladungsmessung zeigt dabei keine wesentlichen Unterschiede auf Grund der Frequenz der angelegten Hochspannung, sofern sich diese in einem Band von 20 Hz bis 400 Hz befindet. Die Hochspannungsquelle muss möglichst teilentladungsarm bzw. -frei sein, um die Messung nicht zu beeinflussen. Ist dies nicht der Fall, so können entsprechende Filter und/oder Blockimpedanzen Abhilfe schaffen. Es muss der externe Störpegel als Referenzniveau für die maximal erreichbare Messempfindlichkeit aufgezeichnet werden.

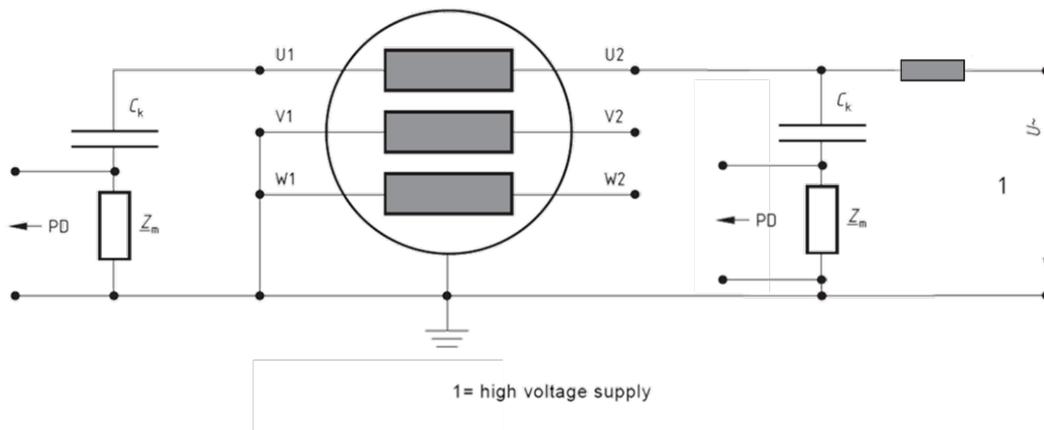


Abbildung 4-2: Prüfaufbau bei einer zweikanaligen Teilentladungsmessung aus IEC 60034-27-1; Ck... Koppelkondensator; Zm... Ankoppelvierpol und Abgang zum TE-Messsystem; U~... Hochspannungsquelle mit Blockimpedanz und Einspeisung am Sternpunkt

Die Spannungsform der erregenden Hochspannung muss weitgehend oberwellenfrem sein. Die zuvor angesprochenen Formen der phasenaufgelösten TE-Muster haben ihre Geltung bei sinusförmiger Hochspannung. Es ist deshalb darauf zu achten, dass das Messgerät eine Echtzeit-Spannungsform-Anzeige für die Hochspannung besitzt, um mögliche Einflüsse direkt zu erkennen. Ein Beispiel ist in Abbildung 4-3 dargestellt. In diesem phasenaufgelösten TE-Muster besitzt die Hochspannung eine starke dritte Harmonische, wodurch die inneren Entladungen zweimal pro Halbwelle auftreten, da sie von der zunehmenden Spannungsdifferenz in den Hohlräumen gezündet werden. Das Spannungsverhältnis aus Spitzenwert/SQRT 2 und Effektivwert ist ein guter Indikator für die Form der Grundschwingung und sollte nicht größer als 5% sein.

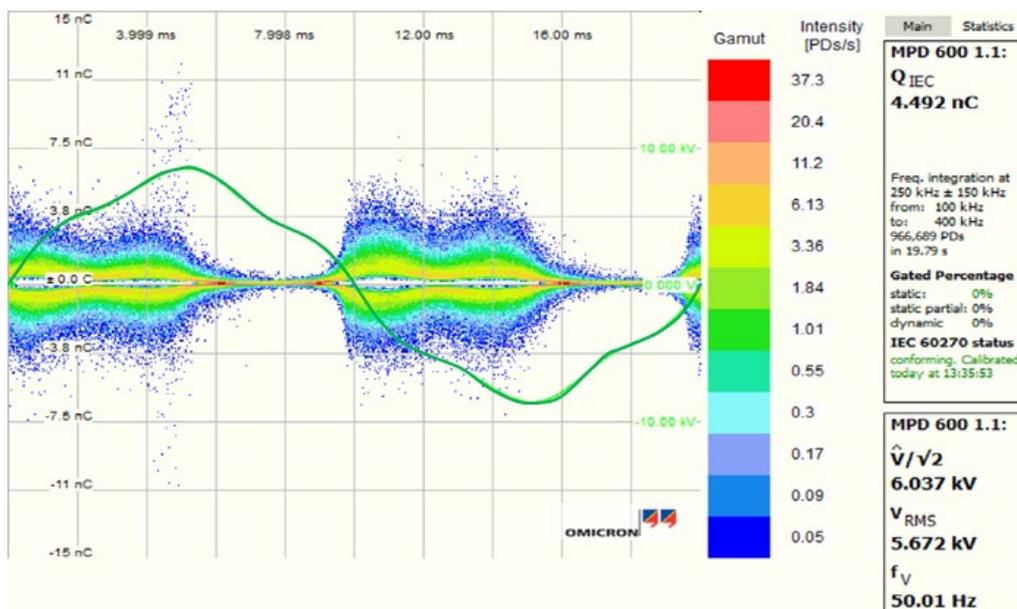


Abbildung 4-3: Beispiel der Auswirkung einer nicht-sinusförmigen Hochspannungserregung

Bei der Anwendung von Hochspannung ist auf entsprechende Abstände und Sicherungsmaßnahmen zu achten. Überspannungsableiter im Ankoppelvierpol sowie im Koppelkondensator und/oder galvanisch isolierte Signalübertragung in den Bedienbereich werden dringend empfohlen.

4.4.2 Auswertung

Auch in diesem Fall wird der Vergleich mit vorhergehenden Messungen, der Phasenvergleich, sowie der Vergleich mit Schwestermaschinen empfohlen. Unabhängig davon gibt es kritischere und unkritischere Entladungen, ersichtlich in internationalen Standards, welche durch ihre phasenaufgelösten Muster unterschieden werden können.

Die Klassifizierung der Teilentladungsphänomene erfolgt also neben der Amplitude auf Grund der phasenaufgelösten Muster (im Englischen auch als Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) pattern bezeichnet). Dabei werden die Teilentladungsphänomene mit ihrer Amplitude und ihrer Auftretungshäufigkeit mit der Hochspannung aus der Prüfvorrichtung gegenübergestellt. Abbildung 4-4 stellt diesen Vorgang anhand einer Spitze-Platte Anordnung vereinfacht dar. Es sei angenommen, dass die Entladungen für diese Anordnung typischerweise in der negativen Halbwelle auftreten. Pro Halbwelle können dabei mehrere Impulse gemessen werden. Werden diese festgehalten, so entsteht, nach einer bestimmten Anzahl n von Halbwellen eine Punktwolke, welche eine Corona Entladung identifiziert.

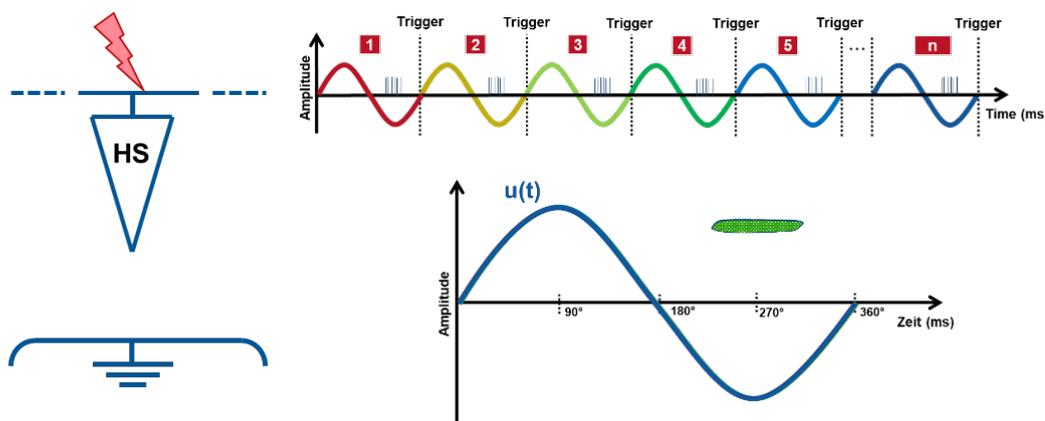


Abbildung 4-4: Prinzip des phasenaufgelösten Musters. Die Sinusform repräsentiert die Hochspannung, die einzelnen Impulse, bzw. die Punktwolke die Entladungen

Der Klassifizierung der verschiedenen Teilentladungsquellen anhand ihrer phasenaufgelösten Muster liegt zu Grunde, dass unterschiedliche Elektroden- und Gasstreckenarrangierungen, unterschiedliche phasenaufgelöste TE-Muster erzeugen. Somit kann auf Grund der Musterformen ein Rückschluss auf den Ort der Entladung in der Wicklung bzw. in der Maschine gezogen werden.

Als Beispiel sind in nachstehenden Abbildungen zwei unterschiedliche Defekte an Ständerwicklungen und deren phasenaufgelöste TE-Muster dargestellt.



Abbildung 4-5: Simulierter Schaden am Außenglimmschutz AGS – Nutentladungen (slot discharges), Nutverschlusskeil zur besseren Erkennbarkeit entfernt

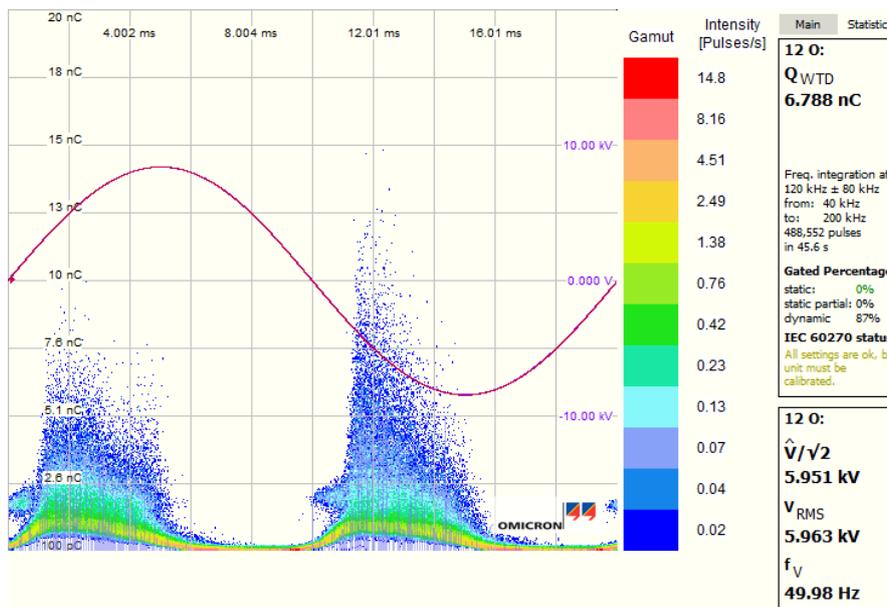


Abbildung 4-6: Typisches TE-Muster (PD-Pattern) für AGS-Nutentladungen (slot discharges)

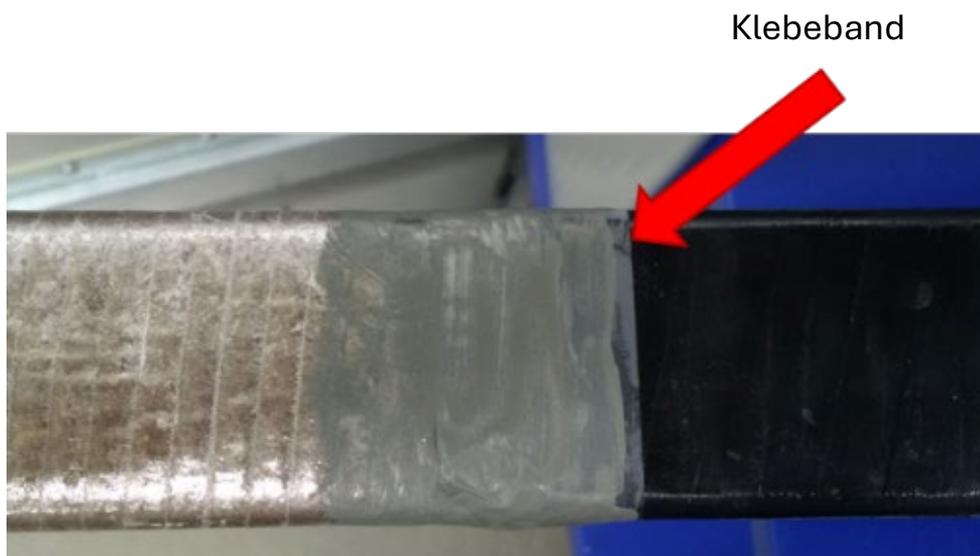


Abbildung 4-7: Schlechter Kontakt zwischen AGS und EGS, simuliert durch ein Klebeband zwischen den beiden Absteuerungen – typischer Erosionsschaden bei luftgekühlten Generatoren mit zu hoch ausgenutzten Glimmschutzanordnungen

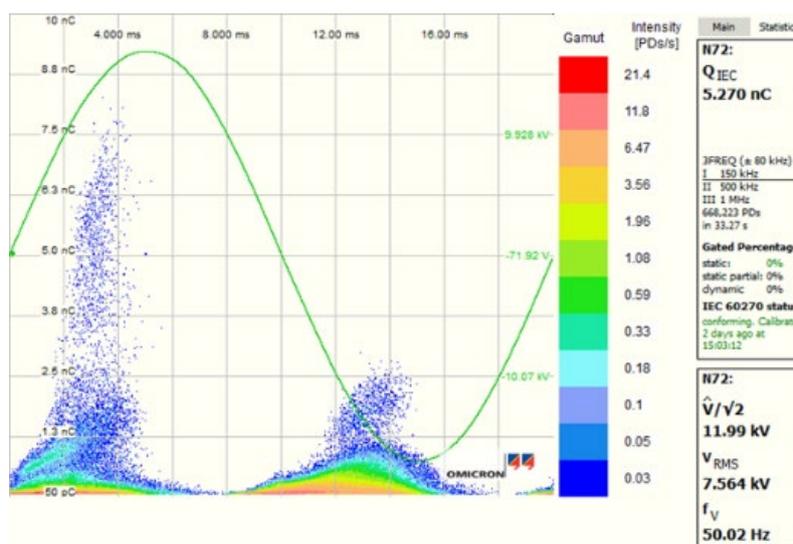


Abbildung 4-8: Typisches TE-Muster (PD-Pattern) für schlechten Kontakt zwischen AGS und EGS

Da bei der Offline-Messung die Spannungshöhe variiert werden kann, kann auch die Ein- und Aussetzspannung der einzelnen Teilentladungsphänomene identifiziert werden. Dies ist eine nützliche Zusatzinformation, um Aussagen darüber treffen zu können, ob die energiereichen, das Isoliersystem schädigenden Teilentladungen auch während des Betriebes aktiv sind (bei Erregung über die Phase-Erde Spannung hinaus) bzw. ob deren Verhalten bei zeitlich versetzten Messungen gleichbleibt.

Abgesehen von der scheinbaren Ladung und den phasenaufgelösten Mustern können auch weitere TE-Messgrößen zur Interpretation herangezogen werden. Da deren Relevanz in der Praxis jedoch nicht so hoch einzuschätzen ist, sei hier auf diese nicht weiter eingegangen.

4.5 Zusammenfassung

Die Messung von Teilentladungen (TE) wird seit vielen Jahren als aussagefähige Methode zur Zustandsbeurteilung des Isolationssystems elektrischer Maschinen eingesetzt. Dies umfasst die Beurteilung der Qualität von neu gefertigten Wicklungen und Wicklungselementen sowie die Zustandsbeurteilung betriebsgealterter Wicklungen im Rahmen von Vor-Ort Untersuchungen. Im Gegensatz zu anderen dielektrischen Untersuchungsmethoden, wie z. B. der integralen Messung des Verlustfaktors $\tan\delta$, können mit der TE-Messung lokal begrenzte Fehlstellen im Isolationssystem der Maschine erfasst und bewertet werden.

Die EN IEC 60034-27-1 beschreibt die Durchführung und Bewertung von TE-Messungen am Isolationssystem der Ständerwicklung elektrischer Maschinen mit sinusförmiger Wechselspannung (AC) im Frequenzbereich von 0,1 Hz bis zu 400 Hz. Dabei handelt es sich ausschließlich um Stillstandsmessungen (off-line), die im Rahmen von Fertigungsprüfungen und für die Vor-Ort-Diagnose eingesetzt werden können. Diese Norm findet Anwendung bei Maschinen mit Stab- oder Formspulenwicklungen, die Glimmschutzsysteme (Außen- und Endenglimmschutz) im Aktivteil aufweisen.

Zur Qualitätssicherung neuer Maschinen kann die TE-Prüfung an Wicklungskomponenten, z. B. an Formspulen, Einzelstäben und Stromdurchführungen (eigener Standard IEC 60127), aber auch an kompletten Wicklungssträngen bei ganzgetränkten Ständern (Global Vacuum Pressure Impregnation GVPI) oder bei Versandprüfungen und Kundenabnahmen durchgeführt werden.

Die TE-Messung bei älteren Maschinen im Kraftwerk dient als Offline Messung in erster Linie dem Erkennen lokaler Schwachstellen, der Einschätzung des Alterungszustandes und der Verfolgung des Lebensdauer verbrauchs durch Beobachtung der Trendentwicklung über einen längeren Zeitraum.