

	DIN IEC 60034-27 (VDE 0530-27)	DIN
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE

ICS 29.160.01

Einsprüche bis 2005-08-31

Entwurf

**Drehende elektrische Maschinen –
Teil 27: Off-line Teilentladungsmessungen an der Statorwicklungsisolation
drehender Maschinen
(IEC 2/1327/CD:2005)**

Rotating electrical machines –
Part 27: Partial discharge off-line measurements on the stator winding insulation of rotating machinery
(IEC 2/1327/CD:2005)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an **dke@vde.com** in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter **www.dke.de/stellungnahme** abgerufen werden
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 90 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

– Entwurf –

E DIN IEC 60034-27 (VDE 0530-27):2005-07

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 2/1327/CD:2005 „Rotating electrical machines – Part 27: Partial discharge off-line measurements on the stator winding insulation of rotating machinery“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den mit aufgenommenen englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 2 „Rotating machinery“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für den vorliegenden Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium K 311 „Drehende elektrische Maschinen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE zuständig.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist nachstehend wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
HD 588.1 S1:1991	IEC 60060-1 + Corr. 1990-03	DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1):1994-06	VDE 0432-1
EN 60060-2:1994 + A11:1998	IEC 60060-2:1994	DIN EN 60060-2 (VDE 0432-2):1996-03 DIN EN 60060-2/A11 (VDE 0432-2/A11):1998-09	VDE 0432-2 VDE 0432-2/A11
EN 60270:2001	IEC 60270:2000	DIN EN 60270 (VDE 0434):2001-08 DIN EN 60270 Berichtigung 1 (VDE 0434 Berichtigung 1):2002-11	VDE 0434 VDE 0434 Berichtigung 1

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1), *Hochspannungs-Prüftechnik – Teil 1: Allgemeine Festlegungen und Prüfbedingungen.*

DIN EN 60060-2 (VDE 0432-2), *Hochspannungs-Prüftechnik – Teil 2: Messsysteme.*

DIN EN 60060-2/A11 (VDE 0432-2/A11), *Hochspannungs-Prüftechnik – Teil 2: Messsysteme.*

DIN EN 60270 (VDE 0434), *Hochspannungs-Prüftechnik – Teilentladungsmessungen (IEC 60270:2000); Deutsche Fassung EN 60270:2001.*

DIN EN 60270 Berichtigung 1 (VDE 0434), *Berichtigungen zu DIN EN 60270 (VDE 0434):2001-08.*

– Entwurf –

E DIN IEC 60034-27 (VDE 0530-27):2005-07

Drehende elektrische Maschinen Teil 27: Off-line Teilentladungsmessungen an der Statorwicklungsisolation drehender Maschinen

Inhalt

	Seite
Einleitung.....	6
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen.....	8
3 Begriffe.....	8
4 Eigenschaften von TE in drehenden Maschinen	10
4.1 Grundlagen	10
4.2 Arten von TE in drehenden Maschinen	10
4.3 Impulsausbreitung in Wicklungen	11
5 Messverfahren und Messgeräte	12
5.1 Allgemeines	12
5.2 Einfluss der Frequenzantwort des Messsystems	12
5.3 Auswirkungen der Kopplereinheiten	12
5.4 Breitband- und Schmalband-Messsysteme	13
6 Visualisierung der Messungen.....	15
6.1 Allgemeines	15
6.2 Minimaler Umfang der TE-Datendarstellung	15
6.3 Weitere Möglichkeiten der TE-Datendarstellung	16
7 Prüfschaltungen	17
7.1 Allgemeines	17
7.2 Einzelne Wicklungskomponenten.....	18
7.3 Vollständige Wicklung.....	19
8 Normalisierung der Messungen.....	21
8.1 Einführung.....	21
8.2 Einzelne Wicklungskomponenten.....	21
8.3 Vollständige Wicklungen.....	21
9 Prüfverfahren	23
9.1 Durchführung von TE-Messungen an Wicklungen und Wicklungskomponenten	23
9.2 Identifizierung und Lokalisierung von Teilentladungsquellen	26
10 Interpretation der Messergebnisse	27
10.1 Allgemeines	27
10.2 Interpretation von PDIV, PDEV und Q.....	28
10.3 TE-Mustererkennung	30
11 Prüfbericht.....	31
Anhang A Nichtelektrische Methoden der TE Erfassung und Methoden zur Lokalisierung	33
A.1 Nicht-vergleichbar und nicht quantifizierbar	33

	Seite
Anhang B On-line Teilentladungsmessungen	34
Anhang C Externes Rauschen, Störungen und Empfindlichkeit	36
C.1 Allgemeines	36
Anhang D Methoden zur Rauschunterdrückung	38
D.1 Frequenzbereich Beschränkung.....	38
D.2 Ausblenden von Phasenfenstern	38
D.3 Ausblendung durch Störsignal-Triggerung.....	39
D.4 Störsignalerkennung durch Messung der Laufzeit.....	39
D.5 Zwei-Kanal Differenzmessung.....	39
D.6 Unterdrückung von sinusfrequenten (CW-) Signalen durch digitale Filterung.....	40
D.7 Störunterdrückung mit Methoden der Signalverarbeitung.....	40
Anhang E Interpretation von TE-Amplitudendaten und phasenaufgelösten TE Mustern.....	43
E.1 Anleitungen zur Interpretation der TE-Muster	43
Literaturhinweise.....	47
 Bild 1 – Frequenzgang eines TE-Impulses und Koppler mit unterschiedlichen Zeitkonstanten	 13
Bild 2 – Typische Impulsantworten des Breitband- und Schmalband-TE-Systems	14
Bild 3 – TE-Amplitude als eine Funktion der normalisierten Prüfspannung $Q=f(U/U_{\max})$	16
Bild 4 – Beispiel eines ϕ -q-n Teilentladungsmusters	17
Bild 5 – Grundlegende Prüfschaltungen nach IEC 60270	18
Bild 6 – Prüfschaltung für TE-Messung (S1.1) an vollständiger Wicklung	19
Bild 7 – Normalisierung der Prüfschaltung zur Messung S1.1	22
Bild 8a – Stufenförmige Spannungssteigerung in Schritten von $U/U_{\max} = 0.2$	25
Bild 8b – Kontinuierliche Spannungssteigerung mit rampenförmiger Prüfspannung	25
Bild 9 – Beispiel für die Identifizierung und Lokalisierung von TE-Quellen	30
Bild C.1 – Umladung des Prüfobjektes durch unterschiedliche Stromkomponenten	36
Bild D.1 – Ungerade Harmonische	38
Bild D.2 – Ohne Fensterausblendung.....	38
Bild D.3 – Mit Fensterausblendung.....	38
Bild D.4 – Impulsströme durch die Messgeräte	39
Bild D.5 – Beispiel zur Störunterdrückung	41
Bild D.6 – Beispiel Unterdrückung von Übersprechen	42
 Tabelle 1 – Anschlussvarianten S1 für offenen Sternpunkt.....	 19
Tabelle 2 – Anschlussvarianten S2 für verschalteten Sternpunkt	19
Tabelle 3 – Anschlussvarianten E1 für offenen Sternpunkt.....	20
Tabelle 4 – Anschlussvarianten E2 für verschalteten Sternpunkt	20

Einleitung

Seit vielen Jahren wird die Messung von Teilentladungen (TE) als eine empfindliche Methode zur Bewertung der Qualität neuwertiger Isolationssysteme verwendet, sowie zur Erfassung lokaler TE-Quellen in gealterten elektrischen Wicklungsisolationen, die infolge der Beanspruchungen im Betrieb entstehen. Im Vergleich zu anderen dielektrischen Prüfungen (z. B. Messung des Verlustfaktors oder des Isolationswiderstandes) erlauben die differenzierenden Eigenschaften der Teilentladungsmessung auch die Identifikation lokal begrenzter Schwachstellen im Isolationssystem.

Die TE-Prüfung von drehenden Maschinen wird auch bei der Qualitätskontrolle von neu montierten und fertigen Statorwicklungen, neuen Wicklungskomponenten (z. B. Formspulen und Statorstäbe, HS-Durchführungen usw.) und komplett imprägnierten Statorn verwendet.

In Zusammenhang mit der Wartung und Revision von drehenden Maschinen kann die Messung von Teilentladungen auch Information liefern bezüglich:

- Schwachstellen im Isolationssystem;
- Alterungsverhalten;
- weiteren Massnahmen und Zeitabständen zwischen Revisionen.

Obwohl die TE-Prüfung von drehenden Maschinen eine weitverbreitete Akzeptanz gefunden hat, zeigen viele Studien, dass nicht nur zahlreiche unterschiedliche Messmethoden existieren, sondern insbesondere auch die Kriterien und Methoden zur Analyse und letztendlich zur Bewertung der gemessenen Daten oft sehr unterschiedlich und daher nicht vergleichbar sind. Demzufolge besteht die dringende Notwendigkeit zur Erstellung eines Leitfadens für Anwender, die den Einsatz von TE-Messungen zur Bewertung des Zustandes ihrer Isolationssysteme beabsichtigen.

Teilentladungsmessungen an Statorwicklungen können in zwei grosse Bereiche unterteilt werden,

1. Off-line-Messungen, bei denen die Statorwicklung vom Netz getrennt ist und eine separate Spannungsversorgung verwendet wird, um die Wicklung mit Spannung zu beaufschlagen.
2. On-line-Messungen, bei denen die drehende Maschine im normalen Betrieb läuft und mit dem Netz verbunden ist.

Beide dieser Ansätze haben in Bezug aufeinander Vor- und Nachteile. Eine kurze Diskussion der Vor- und Nachteile von On-line-Messungen ist im informativen Anhang B zu finden. Unter Anerkennung des weitgehenden, weltweiten Einsatzes von On-line Methoden und ihrem nachweislichen Wert für die Industrie beschränkt sich dieses Dokument jedoch auf Off-Line Methoden. Dies wird als notwendig erachtet, um diese Norm für die Nutzung im Bereich der TE-Prüfungen auch für Nicht-Spezialisten ausreichend prägnant gestalten zu können.

Einschränkungen

Bei der Prüfung von Statorwicklungen ergeben sich bei Verwendung unterschiedlicher TE-Messgeräte unvermeidbar unterschiedliche Messergebnisse, weshalb TE-Messungen nur unter bestimmten Bedingungen vergleichbar sind. Daher lassen sich absolute Grenzwerte für Wicklungen von drehenden Maschinen, z. B. als Abnahmekriterium für die Fertigung oder den Betrieb, nur schwer definieren. Dies resultiert hauptsächlich aus Impulsausbreitungsphänomenen, speziellen Problemen mit der Kalibrierung und den individuellen Frequenz-Übertragungseigenschaften der Statorwicklungen und der TE-Messsysteme.

Darüber hinaus hängt der Umfang der Schädigung und daher das Risiko für den Ausfall des Isolationssystems vom speziellen Typ der TE-Quelle sowie deren Lage innerhalb der Statorwicklungsisolation ab, die beide die Messergebnisse wesentlich beeinflussen können.

Als Basis für die Bewertung von Messungen können in der Praxis verifizierte, empirische Limits verwendet werden. Ferner werden die TE-Trendbewertung und Vergleiche mit Maschinen gleicher Konstruktion und gleichen Isolationssystemen, gemessen unter gleichen Bedingungen mit der gleichen Messeinrichtung, empfohlen, um eine zuverlässige Bewertung des Zustandes der Statorwicklungsisolation sicherzustellen.

Anwender der TE-Messung sollten sich darüber bewusst sein, dass aufgrund der Prinzipien der Methode nicht alle Isolationsrelevanten Probleme in Statorwicklungen mit Hilfe von TE-Messungen erkannt werden können (z. B. Isolationsfehler mit kontinuierlichen Kriechströmen infolge leitfähiger Pfade zwischen unterschiedlichen Elementen des Isolationssystems oder impulslose Entladungsphänomene).

Bei der Prüfung von einzelnen Wicklungskomponenten brauchen die auf Impulsausbreitungsphänomenen basierenden Einschränkungen bei der Interpretation der Messergebnisse nicht berücksichtigt zu werden.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der IEC 60034 liefert eine gemeinsame Basis für

- Messverfahren und Messgeräte;
- den Aufbau von Prüfschaltungen;
- Normalisierung und Prüfverfahren;
- Störunterdrückung;
- die Dokumentation von Prüfergebnissen;
- die Interpretation von Prüfergebnissen

für Off-line Teilentladungsmessungen an der Statorwicklungsisolation von drehenden elektrischen Maschinen, wenn diese mit Wechselspannungen bis zu 400 Hz geprüft werden. Diese Norm gilt für drehende Maschinen mit Stab- oder Formspulenwicklungen mit Außenglimmschutz. Dies ist üblicherweise für Maschinen mit Bemessungsspannung von 6 kV und höher der Fall. Die in diesem Dokument beschriebenen Messverfahren können auch für Maschinen ohne Außenglimmschutz angewendet werden. Da die Ergebnisse jedoch unterschiedlich sein können, wird dies in der vorliegenden Norm nicht behandelt.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60060-1, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

IEC 60060-2, *High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems*

IEC 60270:2000, *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*

3 Begriffe

Allgemeine Begriffe und Definitionen für Teilentladungsmessungen sind in IEC 60270 gegeben. Daher werden nur spezifische Begriffe und Definitionen angegeben, die für TE Messungen an drehenden Maschinen Anwendung finden.

3.1

Off-line-Messung

eine Messung, die im Stillstand der Maschine durchgeführt wird. Die Maschine ist vom Netz getrennt. Die erforderliche Prüfspannung wird mit einer separaten Spannungsquelle an die Wicklung angelegt.

3.2

On-line-Messung

eine Messung im Betrieb der drehenden Maschine, die Leistung, Kraft, Bewegung oder Elektrizität überträgt oder umwandelt.

3.3

Endenglimmschutz

Anstrich oder Band auf der Oberfläche der Hauptisolation, der/die sich in Hochspannungs-Statorstäben und -spulen über den leitfähigen Außenglimmschutz hinaus erstreckt. Der Endenglimmschutz verringert die elektrische Feldbelastung entlang der Spulen- oder Staboberfläche im Wickelkopfbereich unter einen kritischen Wert, der TE auf der Oberfläche verursachen würde. Der Endenglimmschutz überlappt mit dem Außenglimmschutz, um einen elektrischen Kontakt zwischen beiden sicherzustellen.

3.4

Außenglimmschutz

leitfähiger Anstrich oder leitfähiges Band in direktem Kontakt mit der Hauptisolation im Nutbereich des Stator-Blechpaketes, auch oft halbleitender Belag genannt. Dieser Belag stellt einen guten elektrischen Kontakt zum Stator-Blechpaket sicher.

3.5

Widerstands-Temperaturfühler (RTD)

ein Temperaturfühler, der in Statorwicklungen üblicherweise zwischen Oberstab und Unterstab oder Spulenschenkeln innerhalb einer gegebenen Nut eingesetzt wird.

3.6

Nutentladungen

Entladungen, die zwischen der äußeren Oberfläche einer Spule oder eines Stabes und dem geerdeten Blechpaket entstehen.

3.7

Innere Entladungen

Entladungen, die innerhalb des Isolationssystems entstehen.

3.8

Oberflächenentladungen

Entladungen, die an der Oberfläche der Isolation oder an der Oberfläche von Wicklungskomponenten im Wickelkopfbereich oder im Aktivteil der Maschinenwicklung entstehen.

3.9

Impulshöhenverteilung

die Anzahl der Impulse innerhalb einer Reihe von Klassen der Impulsamplitude mit gleicher Klassenbreite für eine vordefinierte Messdauer

3.10

Impulsphasenverteilung

die Anzahl der Impulse innerhalb einer Reihe von Klassen der Phasenlage mit gleicher Klassenbreite für eine vordefinierte Messdauer

3.11

Teilentladungsmuster

eine Abbildung der TE-Verteilung zur Visualisierung des TE-Verhaltens während einer vordefinierten Messdauer, in der spezifische TE-Kenngrößen zur graphischen Darstellung verwendet werden.

3.13 ^{N1)}

Ankopplungseinheit

Die Ankopplungseinheit ist üblicherweise ein aktiver oder passiver Vierpol, der die Eingangsströme in Ausgangsspannungssignale umwandelt. Diese Signale werden mit Hilfe eines Übertragungssystems zum Messgerät übertragen. Die Frequenzantwort der Ankopplungseinheit wird üblicherweise so gewählt, dass die Prüfungsfrequenz sowie ihre Harmonischen effizient vom Messgerät ferngehalten werden.

3.14

TE-Kopplereinheit

Eine TE-Kopplereinheit besteht aus einem Hochspannungs-Koppelkondensator mit niederinduktivem Aufbau sowie einer Niederspannungs-Ankopplungseinheit in Serie.

3.15

größte wiederholt auftretende TE-Amplitude Q

Q kann definiert werden als die größte Amplitude, die von einem Messgerät erfasst wird, das die Impulsantwortfunktion nach IEC 60270, 4.3.3 aufweist oder als die mit einer TE-Impuls-Wiederholrate von

^{N1)} 3.12 fehlt in dem IEC-Schriftstück.

10 Impulsen pro Sekunde (pps) auftretende Amplitude, die direkt aus einer Impulshöhenverteilung abgeleitet werden kann.

4 Eigenschaften von TE in drehenden Maschinen

4.1 Grundlagen

Im allgemeinen können Teilentladungen (TE) an Stellen entstehen, an denen die dielektrischen Eigenschaften der Isoliermaterialien inhomogen sind. An solchen Stellen kann die lokale elektrische Feldstärke erhöht sein. Infolge einer lokalen elektrischen Überbeanspruchung kann dies zu einem lokalen Teildurchschlag führen. Dieser Teildurchschlag führt jedoch nicht zu einem vollständigen Durchschlag des Isolationssystems. TE benötigen für ihre Entstehung im allgemein ein Gasvolumen, wie z. B. in gasgefüllten Hohlräumen innerhalb der Isolation, angrenzend an Leiter oder aber an dielektrischen Grenzschichten.

Im Falle einer Wechselspannungsbeanspruchung erhöht sich die lokale elektrische Feldstärke innerhalb des Isolationssystems mit der anliegenden Spannung; jedes Mal, wenn die lokale elektrische Feldstärke über einer Fehlstelle die lokale Durchschlagfeldstärke überschreitet, kann eine Teilentladung auftreten. Dies kann zu zahlreichen TE-Impulsen während einer Periode der angelegten Spannung führen.

Die bei einer Entladung umgesetzte Ladungsmenge hängt eng mit den spezifischen Eigenschaften der Fehlstelle wie den Abmessungen, der tatsächlichen Durchschlagspannung und den spezifischen dielektrischen Eigenschaften der beteiligten Materialien zusammen, z. B. Oberflächeneigenschaften, Art des Gases, Gasdruck usw.

Die Isolationssysteme der Statorwicklung von Hochspannungsmaschinen weisen üblicherweise eine gewisse TE-Aktivität auf, zeigen aber aufgrund ihrer anorganischen Glimmerkomponenten eine inhärente Resistenz gegenüber Teilentladungen. Eine ausgeprägte TE-Aktivität in diesen Maschinen ist üblicherweise eher ein Anzeichen für Isolationsmängeln, infolge von Fertigungsproblemen oder Schädigung im Betrieb, als eine unmittelbare Ursache für einen Ausfall. Abhängig von den individuellen Prozessen können TE in Maschinen die Isolation jedoch auch direkt angreifen und damit den Alterungsprozess beeinflussen. Die Zeit bis zu einem Ausfall wird möglicherweise nicht mit den TE-Amplituden korrelieren, sondern hängt im wesentlichen von anderen Faktoren ab, wie z. B. von der Betriebstemperatur, dem Verkeilungszustand, dem Grad der Verunreinigung usw.

Die Messung und Analyse des spezifischen TE-Verhaltens kann effizient für die Qualitätskontrolle neuer Wicklungen und Wicklungskomponenten eingesetzt werden sowie für die frühzeitige Erfassung von Isolationsmängeln, die durch thermische, elektrische, mechanische sowie Umgebungsbeanspruchungen im Betrieb hervorgerufen werden und zu einem Isolationsfehler führen können.

4.2 Arten von TE in drehenden Maschinen

Teilentladungen können im Isolationssystem der Statorwicklung infolge spezifischer Fertigungstechnologien, aufgrund von Fertigungsmängeln, durch normale betriebliche Alterung oder durch anormale Alterung entstehen. Die Maschinenkonstruktion, die Art der verwendeten Werkstoffe, die Fertigungsmethoden, die Betriebsbedingungen usw. können Intensität, Ort, Kennwerte, Entwicklung und die Bedeutung der TE maßgeblich beeinflussen. Für eine gegebene Maschine können die verschiedenen TE-Quellen in vielen Fällen durch ihr charakteristisches TE-Verhalten identifiziert und unterschieden werden.

4.2.1 Innere Entladungen

4.2.1.1 Innere Hohlräume

Obwohl die Fertigungsprozesse auf die Minimierung innerer Hohlräume ausgelegt sind, ist in einem harz-impregnierten Glimmerband-isolierten System, das üblicherweise in drehenden Hochspannungsmaschinen verwendet wird, ein geringfügiger Gehalt an Hohlräumen unvermeidbar. Der Glimmer im Isolationssystem verhindert, dass sich aus den Teilentladungen ein vollständiger Durchschlag entwickelt. So lange die inneren Hohlräume klein sind und sich nicht wesentlich vergrößern, wird die Zuverlässigkeit im Betrieb nicht beeinträchtigt.

4.2.1.2 Innere Delamination

Innere Delaminationen innerhalb der Hauptisolation können durch unvollständige Aushärtung des Isolationsystems während der Fertigung oder durch mechanische oder thermische Überbeanspruchung im Betrieb verursacht werden. Grosse Hohlräume können sich über eine grosse Fläche erstrecken und damit verhältnismäßig energiereiche Entladungen verursachen und damit die Isolation signifikant angreifen. Delaminationen reduzieren insbesondere die Wärmeleitfähigkeit der Isolation und führen damit zu einer beschleunigten Alterung oder sogar zur thermischen Instabilität. Daher müssen Delaminationen bei der Bewertung der TE-Aktivität besondere Beachtung finden.

4.2.1.3 Delamination zwischen Leiter und Isolation

Delaminationen an der Grenzfläche zwischen Kupferleiter und Hauptisolation, die üblicherweise infolge von übermässigen Wärmezyklen entstehen, sind gefährlich, da die Windungs- oder Teileleiterisolation des Leiters stark beschädigt werden kann.

4.2.2 Nutentladungen

Nutentladungen in Hochspannungsmaschinen entstehen, wenn der Außenglimmschutz infolge von Stab/Spulen-Bewegungen innerhalb der Nut oder im Nutaustrittsbereich beschädigt ist, z. B. durch Verlust des Verkeildruckes durch Setzeffekte, Materialerosion, Abrieb, chemische Angriffe oder Fertigungsmängel. Wenn bereits eine starke mechanische Beschädigung vorhanden ist, entstehen hochenergetische Entladungen, die eine weitere Beschädigung der Hauptisolation verursachen und damit schließlich einen Isolationsfehler hervorrufen können. Im Anfangsstadium stellen Nutentladungen eher Kontaktfunken als klassische Teilentladungen dar. Diese Kontaktfunken können auch an Stellen geringer Spannungsbelastung entstehen, z. B. in der Nähe des Sternpunktes der Wicklung. Obwohl die absolute Zeitdauer zwischen der Erfassung dieses Phänomens und dem endgültigen Ausfall des Isolationssystems unbekannt ist, jedoch kurz sein kann, ist eine zuverlässige Erfassung im Anfangsstadium notwendig, um entsprechende Korrekturmassnahmen einleiten zu können.

4.2.3 Oberflächenentladungen im Wickelkopf

Teilentladungen im Wickelkopfbereich können an zahlreichen Stellen mit hohen lokalen elektrischen Feldstärken entstehen. Solche Entladungen entstehen üblicherweise an Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Elementen des Wickelkopfes der Statorwicklung. Bei mangelnder Funktionalität des Endenglimmschutzes im Wickelkopf, infolge von mangelhaft ausgeführten Grenzschichten, Verunreinigungen, Porosität, thermischen Effekten usw., ist eine zuverlässige Feldsteuerung nicht mehr gewährleistet und es können Oberflächenentladungen entstehen, die die Materialien allmählich erodieren. Dies ist normalerweise ein sehr langsamer Fehlermechanismus, obwohl das TE-Verhalten verhältnismäßig schnellen Änderungen aufgrund von Oberflächeneffekten unterliegen kann. Zusätzlich können TE zwischen den einzelnen Phasen entstehen, z. B. aufgrund unzureichender Abstände, an Elementen der Wickelkopfabstützung oder als Entladungen von Phase zur Erde an der Wickelkopfoberfläche.

4.2.4 Leitende Partikel

Leitende Partikel, insbesondere kleine Partikel, z. B. infolge von Verunreinigungen der Wicklung, können zu einer starken lokalen Konzentration der Teilentladungen führen. Dies kann zu einem „Nadelloch“ in der Isolation führen.

4.3 Impulsausbreitung in Wicklungen

An seinem Entstehungsort kann der Teilentladungsstrom als transientscher Impuls mit einer Anstiegszeit von wenigen Nanosekunden aufgefasst werden. Für diese kurzen TE-Impulse mit einem hochfrequenten Spektrum stellen Statorwicklungen Objekte mit verteilten Parametern dar, in denen Wanderwellen, komplexe kapazitive und induktive Kopplungen sowie Resonanzphänomene auftreten. Daher müssen TE-Impulsausbreitungsphänomene berücksichtigt werden. Aufgrund der Dämpfung, Verzerrung, Reflexion und dem Übersprechen von Wanderwellensignalen weichen Form und Amplitude des an den Klemmen der Wicklung erfassten TE-Signals von denen am Entstehungsort ab. Unter Beachtung dieser Tatsache sind die folgenden Punkte bezüglich der Interpretation von TE-Messungen an drehenden Maschinen besonders wichtig:

E DIN IEC 60034-27 (VDE 0530-27):2005-07

- Die Übertragungsfunktion von der TE-Quelle zum TE-Sensor ist unbekannt und hängt von der spezifischen Konstruktion der Maschine ab, die das Frequenzübertragungsverhalten der Statorwicklung bestimmt. Die Energie am Ort der TE-Quelle, die als Maß für die Erosion der Isolierung angenommen werden kann, kann daher nicht direkt gemessen werden.
- Das individuelle Hochfrequenz-Übertragungsverhalten einer Statorwicklung führt zu TE-Signalen an den Klemmen, die charakteristisch für die geprüfte Maschine und den Ort der TE-Quelle sind.
- Die sehr hochfrequenten Komponenten der TE-Signale werden bei der Ausbreitung durch die Wicklung sehr stark gedämpft und sind, abhängig vom Entstehungsort der TE, an den Klemmen des Prüfobjektes möglicherweise nicht erfassbar.

Als Folge der oben beschriebenen Phänomene beeinflusst nicht nur die genaue Konstruktion der Statorwicklung, sondern auch der spezifische Frequenzgang des TE-Erfassungssystems, einschließlich Koppler, die Eigenschaften des an den Klemmen der Wicklung erfassten Signals ganz wesentlich.

5 Messverfahren und Messgeräte

5.1 Allgemeines

In Übereinstimmung mit IEC 60270 behandelt dieser Abschnitt nur elektrische Methoden der Teilentladungsmessung, da die elektrische, leitungsgebundene Messung von Teilentladungen die am häufigsten verwendete Methode zur Bewertung der Wicklungsisolations von drehenden Maschinen ist. Nicht-elektrische Methoden zur Messung und Lokalisierung sind in Anhang A aufgelistet.

Teilentladungsmesssysteme können in Teilsysteme eingeteilt werden: Ankopplungseinheit, Übertragungssystem (z. B. Anschlussleitung oder optische Verbindung) und Messgerät. Im Allgemeinen trägt das Übertragungssystem, von möglichen Signaldämpfungen abgesehen, nicht zu den Eigenschaften der Schaltung bei und wird daher nicht weiter berücksichtigt.

5.2 Einfluss der Frequenzantwort des Messsystems

Die Frequenzantwort des TE-Erfassungssystems, einschließlich der TE-Kopplereinheit, bestimmt, wie viel Energie des TE-Signals aus der Wicklung erfasst werden kann. Damit hat die Frequenzantwort des Systems, insbesondere der Typ der verwendeten Kopplereinheit, einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtempfindlichkeit der Signalerfassung. Infolge unterschiedlicher Werte der unteren Grenzfrequenz gelten grundsätzlich für die Prüfung von vollständigen Wicklungen die folgenden qualitative Beziehungen:

- Messungen im unteren Frequenzbereich gewährleisten nicht nur für Teilentladungen aus Stäben/Spulen in der Nähe des Sensors eine gute Empfindlichkeit, sondern auch für solche, die von weiter entfernt in der Wicklung stammen. Der untere Frequenzbereich ist jedoch anfälliger gegenüber Störungen.
- Messungen im sehr hohen Frequenzbereich erfassen nur einen geringen Anteil der gesamten TE-Energie und besitzen damit nur für Signale, die in der Nähe des Sensors entstehen, eine gute Empfindlichkeit. Dieser Frequenzbereich ist jedoch weniger anfällig gegenüber Störungen.

Um eine angemessene Empfindlichkeit für TE aus der gesamten Wicklung zu erzielen, ist es für Off-line TE-Prüfungen ratsam, breitbandige TE-Messsysteme zu verwenden, die eine Frequenzantwort mit einer oberen Grenzfrequenz von ungefähr 1 MHz haben, auch wenn das Signal-zu-Rausch-Verhältnis in einem höheren Frequenzbereich verbessert werden kann. Die untere Grenzfrequenz sollte nach IEC 60270 im Bereich von einigen 10 kHz liegen. Für detaillierte Analysen der in direkter Nähe der Klemmen auftretenden TE können zusätzliche Messungen mit einem erweiterten höheren Frequenzbereich weitere nützliche Information liefern.

Es sollte beachtet werden, dass abhängig von der Wicklungskonstruktion und der verwendeten Messanordnung Resonanzphänomene auftreten können, die im Frequenzbereich des TE-Messgerätes liegen und daher die TE-Ergebnisse ebenfalls beeinflussen können.

5.3 Auswirkungen der Kopplereinheiten

Für Off-line TE-Messungen an Statorwicklungen und TE-Prüfungen an Wicklungskomponenten werden meist kapazitive Kopplereinheiten verwendet. Diese bestehen aus einem Hochspannungskondensator und einer

Niederspannungs-Ankopplungseinheit in Serie. Bei der Prüfung von einzelnen Wicklungskomponenten kann die Ankopplungseinheit auch in Serie zum Testobjekt angeschlossen werden (siehe Bild 5b). Die Niederspannungs-Ankopplungseinheit ist mit dem Übertragungssystem verbunden.

Der Hochspannungskondensator, die Ankopplungseinheit, das Übertragungssystem und die Eingangsimpedanz des Messsystems stellen einen Hochpassfilter dar. Daher führen erhöhte Eingangsimpedanzen oder höhere Kapazitätswerte zu einer erhöhten Empfindlichkeit.

Bild 1 zeigt schematisch das Frequenzspektrum eines idealisierten TE-Impulses sowie die Übertragungsfunktionen verschiedener TE-Kopplereinheiten mit einem Hochspannungskondensator und einer resistiven Messimpedanz $Z_m=R$ auf der Niederspannungsseite. Die markierte Überlappung der Spektren des TE-Impulses und der Kopplereinheit, hier dargestellt für eine RC-Zeitkonstante von 5 Nanosekunden, bestimmt die Signalenergie, die gemessen werden kann. In praktischen Fällen zeigen solche Systeme aufgrund von parasitären L und C Komponenten Bandpass-Filtereigenschaften.

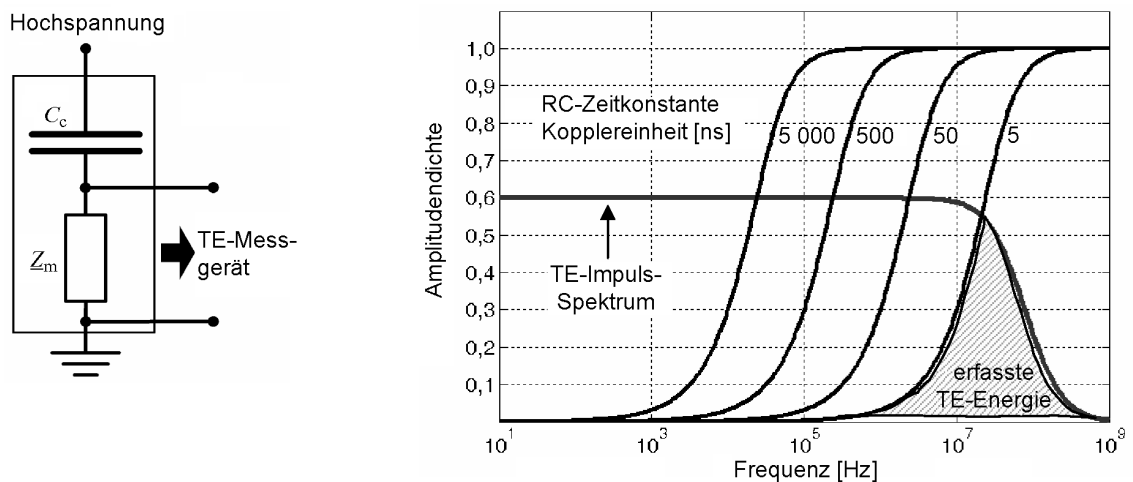


Bild 1 – Frequenzgang eines TE-Impulses und Koppler mit unterschiedlichen Zeitkonstanten

TE-Impulse werden bei der Ausbreitung durch die Wicklung insbesondere bei höheren Frequenzen gedämpft und verzerrt. Daher liefern Messsysteme im Bereich niedriger Frequenzen normalerweise eine durchweg gute Empfindlichkeit für TE aus der gesamten Wicklung.

Bei der Durchführung von Messungen an einzelnen Wicklungskomponenten ist der Hochspannungs-Koppelkondensator am Kupferleiter angeschlossen. Für TE-Messungen an vollständigen Wicklungen wird die Kopplereinheit an den Klemmen der Maschine oder innerhalb des Maschinengehäuses direkt an den Leitern der Wicklung angeschlossen.

Die folgenden Niederspannungs-Ankopplungseinheiten werden typischerweise mit dem Hochspannungskondensator kombiniert:

- RLC-Filter oder Vierpol-Netzwerke (siehe IEC 60270), in denen eine Induktivität zur Unterdrückung der Netzfrequenz dient;
- Hochfrequenzstromwandler (RF-CT), die gleichzeitig zur galvanischen Entkopplung des Hochspannungskreises vom Messgerät dienen.

Im Erdungskreis angeschlossene RF-CT können auch als eigenständige Ankopplungseinheit verwendet werden. Bei Verwendung einer faseroptischen Signalübertragung können die Ankopplungseinheiten auch auf der Hochspannungsseite des Kondensators installiert werden.

5.4 Breitband- und Schmalband-Messsysteme

Der Hauptunterschied zwischen den verschiedenen TE-Messsystemen ist deren Bandbreite. Die an den Klemmen ankommenden TE-Impulse haben ein Frequenzspektrum, das durch die Übertragungsfunktion der Maschinenwicklung bestimmt wird. Die gemessenen TE-Signale werden in Abhängigkeit der Bandbreite des

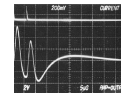
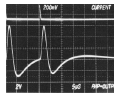
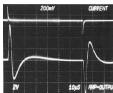
– Entwurf –

E DIN IEC 60034-27 (VDE 0530-27):2005-07

Messsysteme mehr oder weniger stark beeinflusst. Weiterhin sind glimmerhaltige Isolationssysteme durch eine hohe TE Impulswiederholrate gekennzeichnet. Bild 2 zeigt typische Impulsantworten unterschiedlicher Messsysteme. In der oberen Kurve der Oszillogramme ist der Eingangsimpuls dargestellt, die untere Kurve zeigt die Impulsantwort des Messsystems:

- (1) Breitband System, (a) niedrige Impuls-Wiederholrate, (b) erhöhte Rate, (c) hohe Rate, die zur Überlagerung von Impulsen führt;
- (2) Schmalband System, (a) niedrige Impuls-Wiederholrate, (b) erhöhte Rate, (c) hohe Rate, die zur Überlagerung von Impulsen führt.

Breitband-Messsystem



Schmalband-Messsystem

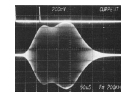
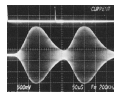
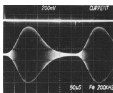


Bild 2 – Typische Impulsantworten des Breitband- und Schmalband-TE-Systems

(1) Breitbandsysteme

Nach IEC 60270 werden TE-Messsysteme als Breitbandsysteme definiert, wenn ihre Bandbreite 100 kHz überschreitet. Bei drehenden Maschinen werden Breitband-Messsysteme typischerweise bis zu einer Bandbreite von ungefähr 1 MHz eingesetzt. Einige Systeme verwenden Bandbreiten bis zu 500 MHz. Die Systembandbreite wird durch die Frequenzantwort der Kopplereinheit sowie durch die Signalverarbeitung im Messgerät bestimmt.

Die meisten breitbandigen TE-Messgeräte entsprechen den Anforderungen nach IEC 60270. Die untere Grenzfrequenz wird auf ≥ 10 kHz eingestellt, um die Netzfrequenz und ihre Harmonischen zu unterdrücken. Die untere Grenzfrequenz kann bis zu einigen Hundert kHz variiert werden, um externe Störungen, wie z. B. Kommutierungsimpulse von Leistungshalbleitern, zu unterdrücken. Typische Bandbreiten zahlreicher Messgeräte liegen zwischen 100 kHz und 1 MHz.

Einige TE-Messgeräte verwenden Bandbreiten von mehreren 100 MHz und beinhalten optional digitale Oszilloskope. Die gemessenen Werte der Impulsamplituden sind nicht nach IEC 60270 in Ladungseinheiten kalibriert oder normalisiert, sondern werden in mV angegeben. Einige dieser Messgeräte sind in der Lage, externe Störsignale mittels differentieller Messungen zu unterdrücken.

(2) Schmalbandsysteme

Schmalbandige TE-Messgeräte sind durch eine geringe Bandbreite von 9 kHz bis 30 kHz mit einer einstellbaren Mittenfrequenz in einem weiten Bereich bis zu 1 MHz gekennzeichnet. Die große Anzahl von Teilentladungen in Glimmerisolationen, in Verbindung mit der langen Ausschwingzeit der oszillierenden Impulse, kann zu einer Überlagerung von aufeinanderfolgenden Entladungen führen (siehe Bild 2). Damit können die Messwerte der einzelnen Impulsentladungen fehlerhaft sein. Schmalbandige Messsysteme werden daher seltener für die Messung von Teilentladungen an drehenden Maschinen verwendet.

(3) Systeme zur Messung der quadratischen Ladungsgröße

Die quadratische Ladungsgröße nach IEC 60270 wird in $(\text{Coulomb})^2$ pro Sekunde angegeben und gewichtet damit größere Impulse stärker. Die Mittenfrequenz eines Schmalbandfilters wird auf einige kHz, mit einer geringen Bandbreite von mehreren Hundert Hz, eingestellt. Das Ausgangssignal des Filters wird einem Detektor zugeführt, der die quadratische Ladungsgröße erfasst und die Messwerte in Dezibel oberhalb eines

bestimmten Pegels in C^2/s ausgibt. Die Erfassung der quadratischen Ladungsgrösse eliminiert, innerhalb gewisser Grenzen, die Verfälschung der Messwerte, wenn die Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Entladungen zufällig ist. In diesem Fall ist die Anzeige proportional zur der in inneren Entladungen umgesetzten Energie.

6 Visualisierung der Messungen

6.1 Allgemeines

Aufgrund der Tatsache, dass der Zustand des Isolationssystems bewertet werden soll, müssen die mit einem der in Abschnitt 5 beschriebenen Messgeräte erfassten TE-Daten angemessen weiterverarbeitet werden. Da der Grad der Schädigung des Isolationssystems und damit das Ausfallrisiko direkt mit den besonderen Eigenschaften der Teilentladungsquellen zusammenhängt, ist es notwendig, zuverlässige Informationen über die Art der gemessenen Teilentladungsquellen zu erhalten. Unterschiedliche Arten der Datenvisualisierung können für diesen Zweck eingesetzt werden.

6.2 Minimaler Umfang der TE-Datendarstellung

Um das TE-Verhalten zu bewerten, wird empfohlen, mindestens die klassischen Parameter der Teilentladungsmessung zu verwenden. Dies sind:

- die *TE-Amplitude* und
- der Effektivwert der Prüfspannung.

Die TE-Amplitude als die größte wiederholt auftretende Amplitude kann als Spannung [mV] oder als scheinbare Ladung [pC] angegeben und nach IEC 60270 bewertet werden. Die zur Quantifizierung der TE-Amplitude verwendete Einheit ist prinzipiell willkürlich. In der aus diesen beiden Parametern abgeleiteten Darstellung wird die *TE-Amplitude* Q in Abhängigkeit der an die Wicklung oder das Wicklungselement angelegten Prüfspannung U als Funktion $Q = f(U)$ für steigende und fallende Spannung dargestellt. Hierbei wird die Prüfspannung nach 9.1.5 entweder kontinuierlich oder in geeignet ausgewählten Stufen bis zu einem spezifischen Maximalwert erhöht und anschließend auf die minimale Prüfspannung reduziert.

Zusätzlich kann aus der Kurve $Q = f(U)$ in Bild 3 die Einsetzspannung U_i (PDIV) sowie die Aussetzspannung U_e (PDEV) der Teilentladungen aus dem Prüfobjekt nach IEC 60270 ermittelt werden. Die Einsetz- und Aussetzspannungen sind in Bezug auf einen spezifizierten niedrigen Schwellenwert der TE-Amplitude festgelegt; dieser entspricht üblicherweise dem Hintergrundrauschen. Folglich kann die Empfindlichkeit zur Ermittlung von PDIV und PDEV, in Abhängigkeit des Hintergrundrauschens während der Prüfung, stark variieren.

Bild 3 zeigt beispielhaft ein $Q = f(U)$ Diagramm. Die Spannung wird vorzugsweise auf der Abszisse und die TE-Amplitude auf der Ordinate aufgetragen. Die Spannungsachse wird dann linear skaliert. Eine Normalisierung der Spannungswerte auf einen vordefinierten Bezugswert, z. B. die maximale Prüfspannung $U_{\max}$, erleichtert dabei Vergleiche. Die TE-Amplitudenachse kann entweder linear oder logarithmisch skaliert werden.

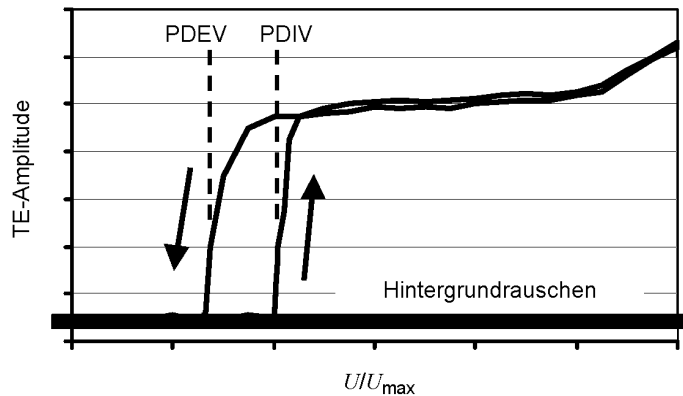


Bild 3 – TE-Amplitude als eine Funktion der normalisierten Prüfspannung $Q=f(U/U_{\max})$

6.3 Weitere Möglichkeiten der TE-Datendarstellung

6.3.1 Allgemeines

Bei der Verwendung von digitalen TE-Messgeräten wird die TE-Amplitude q_i für jedes einzelne TE-Ereignis der TE-Impulsfolge während der Messzeit aufgenommen sowie die zugehörige Momentanspannung u_i zum Zeitpunkt t_i oder, für periodische AC Spannungen, der Phasenwinkel ϕ innerhalb der entsprechenden Periode der netzfrequenten Prüfspannung. In jedem Fall werden die gemessenen Parameter der TE mit einem geeigneten Messgerät erfasst und gespeichert, so dass diese später mit entsprechenden Methoden analysiert werden können.

Aus den TE-Daten können entsprechend IEC 60270 zusätzliche Parameter abgeleitet werden, wie *integrierte Ladung*, *Entladestrom*, *quadratische Ladungsgröße*, *TE-Leistung*, *TE-Energie* und *NQN*. Bei digitalen Systemen sind die abgeleiteten TE-Parameter jedoch abhängig von den spezifischen Einstellungen der Geräte während der Prüfung, z. B. Triggerpegel usw. Durch Verwendung von geeigneten Diagrammen ist es bei der anschließenden Analyse möglich, die TE-Messungen so zu visualisieren, dass der Zustand des Isolationssystems bewertet werden kann. Für diesen Zweck können entweder statistische Verteilungen der TE-Parameter, phasenaufgelöste oder zeitaufgelöste Darstellungen der einzelnen gemessenen TE-Parameter oder sogenannte Streudiagramme der spezifischen Parameter verwendet werden (z. B. Impulshöhenverteilung, Impulsphasenverteilung, phasenaufgelöste Impulshöhenverteilung, Oszillogramme der Impulsfolgen, TE-Verteilungsmuster usw.).

Detailliertere Informationen zu geeigneten Arten von TE-Mustern und TE-Diagrammen für weitergehende Analysen finden sich in Referenz [2], CIGRE Technical Brochure 226.

6.3.2 Empfohlenes Teilentladungsmuster

Ein Teilentladungsmuster kann als eine Abbildung der TE-Verteilung angesehen werden, in dem spezifische TE-Parameter in Form eines Streudiagramms miteinander korreliert werden, um Information über die Quelle der TE-Aktivität zu erhalten. Normalerweise wird eine 2-dimensionale Abbildung der TE-Verteilung zur Visualisierung verwendet.

Ein TE-Muster, das zur Identifizierung der Ursachen von TE in Isolationssystemen der Statorwicklung empfohlen wird, ist das ϕ - q - n Muster, in dem für jeden einzelnen TE-Impuls die TE-Amplitude q_i auf der Ordinate und die Phasenlage des TE-Ereignisses ϕ auf der Abszisse aufgetragen wird. In dem Streudiagramm kann die Häufigkeit der TE-Ereignisse innerhalb eines jeden Phasen/Amplituden-Fensters mittels einer geeigneten Farbkodierung visualisiert werden. Bild 4 zeigt ein Beispiel für ein ϕ - q - n Muster.

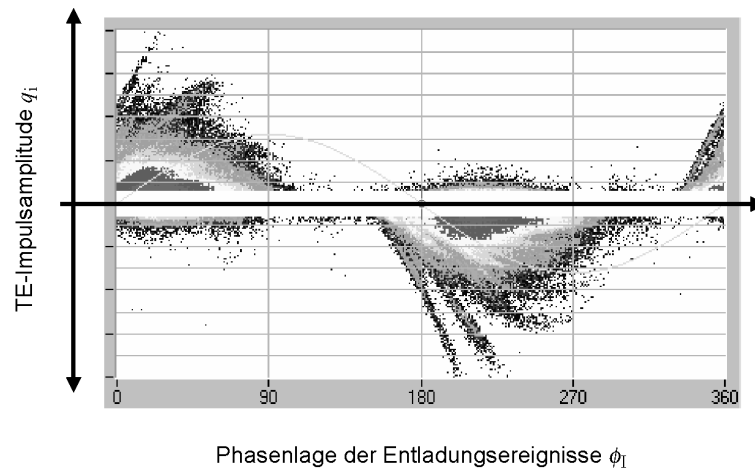


Bild 4 – Beispiel eines ϕ - q - n Teilentladungsmusters

7 Prüfschaltungen

7.1 Allgemeines

Die wesentliche Aufgabe einer Prüfschaltung zur Teilentladungsmessung ist es, angemessene Bedingungen für die Erfassung von Teilentladungen innerhalb eines Prüfobjektes zu liefern. Dies lässt sich am besten erreichen, wenn die unterschiedlichen Komponenten der Prüfschaltung, ohne angeschlossenes Prüfobjekt, ausreichend TE frei sind.

Die wesentlichen Komponenten der Prüfschaltung sind:

- eine Hochspannungsquelle nach IEC 60060, Teil 1 und Teil 2. Der durch die Quelle bei maximal geforderter Prüfspannung erzeugte Störpegel darf 100 pC nicht überschreiten;
- eine Spannungsmesseinrichtung;
- eine geeignete TE-Kopplereinheit;
- eine Anschlussleitung von der Messimpedanz zum TE-Gerät mit ausreichend niedriger Dämpfung und guter Schirmung;
- ein Teilentladungsmesssystem;
- Hochspannungsverbindungen mit einem geringen Grundstörpegel, der bei der maximal geforderten Prüfspannung 100pC nicht überschreitet.

Um sicherzustellen, dass die Prüfschaltung die Messung von Teilentladungen aus dem Prüfobjekt nicht beeinflusst, sollte die Anordnung zunächst nach dem in 9.1.6 angegebenen Prüfverfahren bis zur maximalen Prüfspannung auf ausreichende TE Freiheit geprüft werden.

Falls die Prüfanordnung zur Messung eines spezifizierten unteren Grenzwertes der TE-Amplitude nicht ausreichend störungsfrei ist, kann hochspannungsseitig zwischen dem Prüfobjekt und der Hochspannungsquelle eine Impedanz oder ein Filter eingebracht werden. Dies dient dazu, Störungen von der Hochspannungsquelle zu dämpfen, z. B. TE vom Prüftransformator, den Hochspannungsleitern oder von Durchführungen, oder höhere Harmonische der Prüfspannung innerhalb oder in der Nähe der Bandbreite des Messsystems. Weitere Information zu externem Rauschen, Störungen und zur Messempfindlichkeit finden sich in Anhang C und D.

Die gesamte Prüfschaltung sollte niederinduktiv aufgebaut sein. Es ist notwendig, Erdungsschleifen zu vermeiden. Als Erdverbindungen werden niederinduktive Zuleitungen empfohlen.

7.2 Einzelne Wicklungskomponenten

Für Teilentladungsmessungen an einzelnen Wicklungskomponenten (Statorstäbe, Spulen usw) ist es von Vorteil, zwei grundlegende Prüfschaltungen nach IEC 60270 zu verwenden. Diese Schaltungen sind in Bild 5 dargestellt.

Die Niederspannungs-Ankopplungseinheit wird in der Schaltung von Bild 5a an der Erdseite des Koppelkondensators angeschlossen. Diese Anordnung hat den Vorteil, dass sie für einseitig geerdete Prüfobjekte geeignet ist, bei denen das Prüfobjekt direkt zwischen der Hochspannungsquelle und Erde angeschlossen ist. Im Falle eines Isolationsdurchschlags während der Prüfung ist die Messeinrichtung keinen gefährlichen hohen Spannungen ausgesetzt.

In der Schaltung von Bild 5b wird die Niederspannungs-Ankopplungseinheit an der Erdseite des Prüfobjektes angeschlossen. Die Niederspannungsseite des Prüfobjektes sollte daher von der Erdung getrennt sein. Im Vergleich zu Bild 5a weist diese Prüfschaltung für Komponenten mit geringer Kapazität eine bessere Empfindlichkeit auf. Die Polarität der gemessenen TE-Signale ist für Bild 5a und 5b jeweils entgegengesetzt.

In beiden Prüfanordnungen sollte die Ankopplungseinheit eine Schutzbeschaltung beinhalten, die auf den Fehlerstrom des Prüfobjektes, das während der Prüfung durchschlagen kann, ausgelegt ist.

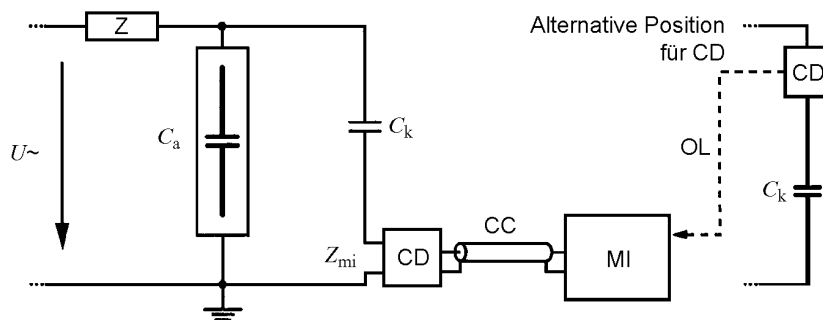


Bild 5a – Koppeleinheit CD in Reihe mit dem Koppelkondensator

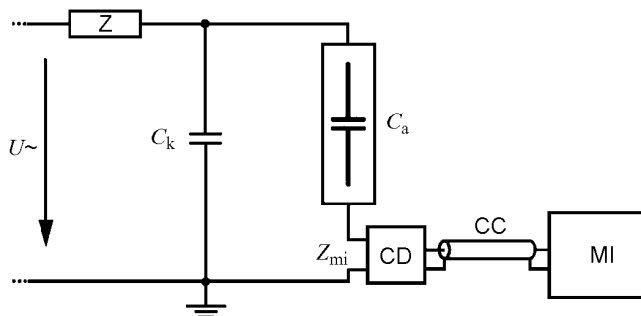


Bild 5b – Koppeleinheit CD in Reihe mit dem Prüfling

Bestandteile

$U\sim$	Hochspannungsversorgung
Z_{mi}	Eingangsimpedanz des Messsystems
CC	Verbindungsleitung
OL	Lichtwellenleiterstrecke
C_a	Prüfling
C_k	Koppelkondensator
CD	Koppeleinheit
MI	Messgerät
Z	Filter

Bild 5 – Grundlegende Prüfschaltungen nach IEC 60270

7.3 Vollständige Wicklung

Die aus Teilentladungsmessungen an Hochspannungswicklungen ableitbare Information hängt von der Zugänglichkeit des Sternpunktes sowie der Art des Anschlusses des Messgerätes ab.

Die Hochspannungsquelle und der TE-Koppler sollten, wann immer möglich, an jeweils gegenüberliegenden Wicklungsklemmen angeschlossen werden, um die Dämpfungswirkung der Wicklungsstränge bezüglich leitungsgebundener Störungen von der Spannungsversorgung zu nutzen. Der TE-Koppler sollte so nah wie möglich an den Wicklungsklemmen angeschlossen werden. Das Statorblechpaket sollte normalerweise geerdet sein.

In Bild 6 ist eine Prüfschaltung für eine TE-Messung an der Phase U gezeigt; hierbei sind die Klemmen U, V, W die Hochspannungsklemmen der Stränge und X, Y, Z die Sternpunktseite der Wicklung.

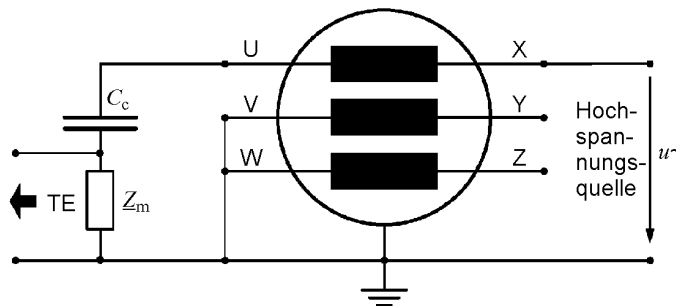


Bild 6 – Prüfschaltung für TE-Messung (S1.1) an vollständiger Wicklung

7.3.1 Empfohlene Standard-Messungen (SX.X)

Für Messungen an Wicklungen mit offenem Sternpunkt werden die in Tabelle 1 angegebenen Anschlussvarianten empfohlen. Tabelle 2 gibt die Messungen an, die bei verschaltetem, entweder zugänglichem oder nicht zugänglichem Sternpunkt empfohlen werden. Um die Fertigungsqualität nach der Herstellung zu prüfen und um eine Anfangsmessung zu haben, die zukünftige Vergleiche sowie Trenduntersuchungen der Teilentladungsergebnisse ermöglicht, wird empfohlen, die in Tabelle 1 und 2 angegebenen Messungen sowohl an neuen als auch an betriebsgealterten Wicklungen durchzuführen.

Tabelle 1 – Anschlussvarianten S1 für offenen Sternpunkt

ID Nummer	Name	HS	Erdung	C _c
S1.1	U-VW	X	VW	U
S1.2	V-UW	Y	UW	V
S1.3	W-UV	Z	UV	W
S1.4	UVW	XYZ	-	UVW

Tabelle 2 – Anschlussvarianten S2 für verschalteten Sternpunkt

ID Nummer	Name	HS	Erdung	C _c
zugänglicher Sternpunkt				
S2.1	UVW	XYZ	-	UVW
nicht zugänglicher Sternpunkt				
S2.2	UVW	UVW	-	UVW

Ein Vergleich der Messergebnisse von S1.1 bis S1.3 mit Messung S1.4 für offenen Sternpunkt (Tabelle 1) erlaubt die Erfassung und Unterscheidung der spezifischen Teilentladungsquellen zwischen zwei Phasen der Wicklung, z. B. infolge von Fertigungsmängeln oder als Folge von Alterung im Betrieb (siehe 9.2).

– Entwurf –

E DIN IEC 60034-27 (VDE 0530-27):2005-07

In Abhängigkeit der Eigenschaften der verfügbaren Spannungsversorgung und der Wicklungskapazität kann es schwierig oder sogar unmöglich sein, die gesamte Wicklung mit Spannung zu beaufschlagen. In diesem Fall kann die Messung S1.4 der vollständigen Wicklung gegen Erde bei offenem Sternpunkt in Tabelle 1 weggelassen werden. Im Falle von neuen Wicklungen darf, z. B. für kleinere Maschinen, entschieden werden, ein vereinfachtes Prüfverfahren nach der Fertigung anzuwenden, bei dem auch für offenen Sternpunkt nur Messung S1.4 durchgeführt wird. Dies liefert jedoch weniger Information für zukünftige Vergleiche und Trenduntersuchungen des Wicklungszustandes und gibt keine Hinweise auf mögliche Entladungen zwischen zwei Phasen der Wicklung.

Für den Fall, dass leitungsgebundene Störungen von der Spannungsversorgung ausgeschlossen sind, können beide Wicklungsenden, d. h. die Phasen- und Sternpunkt-Seite (UX, VY, WZ) für die Messungen S1.1 bis S1.4 und S2.1 verbunden werden, um hiermit gleiche Empfindlichkeiten für Isolationsfehler und/oder Fertigungsmängel auf beiden Seiten der Wicklung zu erhalten.

7.3.2 Optionale, erweiterte Messungen (EX.X)

Zusätzlich zu den in Tabelle 1 und 2 in 7.3.1 gegebenen Standardmessungen können optional zusätzliche, erweiterte Messungen durchgeführt werden, um das TE-Verhalten der Wicklungsisolation detaillierter zu untersuchen. Eine geeignete Auswahl aus diesen Messungen sollte auch durchgeführt werden, wenn die Ergebnisse der Standardmessungen auf spezifische Entladungsquellen hinweisen, die eine weitere Untersuchung erfordern. Ob dies erforderlich ist oder nicht und welche spezifische Form der erweiterten Messungen benötigt wird, muss vom Betreiber oder Hersteller entschieden werden.

Tabelle 3 – Anschlussvarianten E1 für offenen Sternpunkt

ID Nummer	Name	HS	Erdung	C _c
E1.1	X-YZ	U	YZ	X
E1.2	Y-XZ	V	XZ	Y
E1.3	Z-XY	W	XY	Z
E1.4	XYZ	UVW	-	XYZ

Tabelle 4 – Anschlussvarianten E2 für verschalteten Sternpunkt

ID Nummer	Name	HS	Erdung	C _c
zugänglicher Sternpunkt				
E2.1	U	XYZ	-	U
E2.2	V	XYZ	-	V
E2.3	W	XYZ	-	W
E2.4	XYZ	UVW	-	XYZ
nicht zugänglicher Sternpunkt				
E2.5	U	V	-	U
E2.6	V	W	-	V
E2.7	W	U	-	W

Durch Verwendung der in Tabelle 3 und 4 angegebenen, erweiterten Messungen als Ergänzung zu den Standardmessungen der Tabelle 1 und 2 in 7.3.1 lassen sich weitere detailliertere Informationen bezüglich der spezifischen Lage dominierender Entladungsquellen innerhalb des Statorwicklungssystems ableiten, da diese Prüfungen die Dämpfung der Impulse bei der Ausbreitung entlang der Wicklung ausnutzen.

8 Normalisierung der Messungen

8.1 Einführung

Aufgrund der in 4.3 erwähnten Impulsausbreitung, Resonanzphänomene und dem gegenseitigen Übersprechen in Maschinenwicklungen ist eine Kalibrierung nicht möglich. Das Ziel der Normalisierung ist es, unterschiedliche Einflüsse der Prüfschaltung, z. B. durch Verbindungen zur Spannungsversorgung, Streukapazitäten, Koppelkapazität und Prüflingskapazität, zu beseitigen, indem ein definierter Referenzimpuls an den Maschinenklemmen mit vollständig angeschlossener Prüfschaltung eingespeist wird. Eine Normalisierung ist erforderlich, um sicherzustellen, dass das TE-Messsystem eine ausreichende Empfindlichkeit aufweist, um eine spezifizierte TE-Amplitude, wie sie an den Maschinenklemmen während der Messung auftritt, korrekt messen zu können und um zu zeigen, dass das verwendete TE-Messsystem reproduzierbare Ergebnisse liefert. Zusätzlich ermöglicht die Normalisierung den Vergleich von Messungen, die an Prüflingen mit gleichem Design mit dem gleichen TE-Messgerät durchgeführt wurden. Die Normalisierung der Prüfschaltung sollte durch Einspeisung kurzzeitiger Stromimpulse bekannter Amplitude mittels einem nach IEC 60270 spezifizierten Impulsgenerator (Kalibrator) vorgenommen werden.

Es ist wichtig, die folgenden Punkte nachdrücklich zu betonen:

- Mittels Normalisierung ist es nicht möglich die unbekannte, von der Maschine abhängige Signalübertragungsfunktion zwischen der eigentlichen TE-Quelle in der Wicklungsisolation und dem Ort des angeschlossenen Sensors zu ermitteln, die im Allgemeinen eine Funktion des Ortes der TE-Quelle und der jeweiligen Wicklungskonstruktion ist.
- Die Normalisierung an den Maschinenklemmen repräsentiert nicht in ausreichendem Maße die TE-Impulse, die eigentlich an einer unbekannten Stelle innerhalb der Statorwicklung auftreten. Daher liefert die Normalisierung einer Messung an vollständigen Wicklungen kein absolutes Maß für die Qualität des Isolationssystems.
- Die Normalisierung kann keinen Referenzwert für den direkten Vergleich von unterschiedlichen Maschinen liefern.

Da Impulsausbreitungsphänomene bei der Prüfung von vollständig verarbeiteten Spulen, Stäben und anderen individuellen Wicklungskomponenten, die als konzentrierte Kapazitäten behandelt werden können, nicht berücksichtigt werden müssen, kann die Normalisierung der TE-Amplitude nach IEC 60270 auch als eine Basis für absolute Vergleiche von unterschiedlichen Objekten dienen und somit als ein Maß für die Qualität, z. B. bei Qualitätsprüfungen während der Fertigung, herangezogen werden.

8.2 Einzelne Wicklungskomponenten

Zur Prüfung von einzelnen Wicklungskomponenten sollte die in 7.2 beschriebene Prüfschaltung nach IEC 60270 (Abschnitt 5, Bild 4) durch Einspeisung von Stromimpulsen mit definierter Impulsamplitude normalisiert werden, wobei die Prüfschaltung für die nachfolgende Messung vollständig aufgebaut ist. Dies wird mit Hilfe eines an den Klemmen des Prüfobjektes angeschlossenen Referenzimpulsgenerators durchgeführt, wobei die Hochspannungsquelle an den Prüfkreis angeschlossen, aber nicht eingeschaltet ist.

Die Normalisierung sollte mit einer Amplitude vorgenommen werden, die in dem zu erwartenden Amplitudenbereich liegt, um eine gute Genauigkeit für die spezifizierte TE-Amplitude zu gewährleisten. Für einzelne Wicklungskomponenten wird die Messung der TE-Amplitude als scheinbare Ladung q in [pC] nach IEC 60270 empfohlen.

8.3 Vollständige Wicklungen

Zur Prüfung von vollständigen Wicklungen wird die in 7.3 beschriebene Normalisierung der Prüfschaltungen durch Einspeisung von Stromimpulsen mit einer spezifizierten TE-Amplitude an den Maschinenklemmen oder am Ort des TE-Kopplers mit Hilfe eines Referenzimpulsgenerators vorgenommen. Dies dient der Simulation von TE-Impulsen, wie sie an den Maschinenklemmen während der Messung auftreten. Es soll jedoch bemerkt werden, dass die Verwendung von pC oder mV keinen Referenzwert für einen direkten Vergleich von unterschiedlichen Maschinen liefern kann.

– Entwurf –

E DIN IEC 60034-27 (VDE 0530-27):2005-07

Eine Normalisierung ist vor Durchführung der eigentlichen Messung prinzipiell für jede Art der in 7.3 beschriebenen Prüfschaltungsanordnung notwendig. Wenn eine Reihe von TE-Prüfungen durchgeführt wird, z. B. S1.1, S1.2, S1.3, in der die Symmetrie der Dreiphasenwicklung genutzt werden kann, ist die Normalisierung nur für die erste dieser Messungen erforderlich.

In Abhängigkeit der Größe der jeweils zu prüfenden Maschine kann eine getrennte Normalisierung für jede Phase ratsam sein, da eine Symmetrie der drei Phasen für sehr große Maschinen aufgrund des Einflusses des Designs der Umfangsverbinders nicht notwendigerweise gegeben ist.

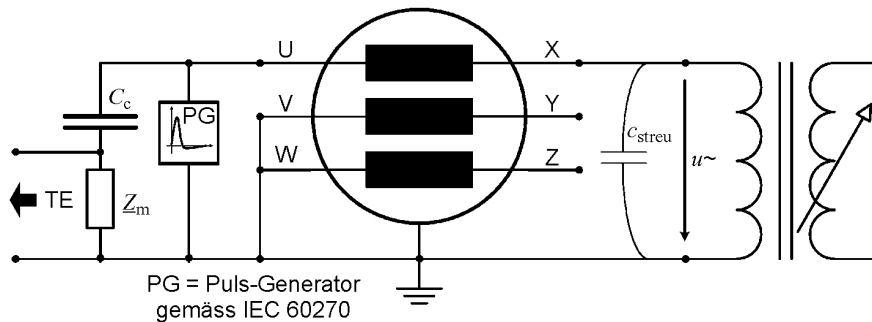


Bild 7 – Normalisierung der Prüfschaltung zur Messung S1.1

Das Verfahren der Normalisierung für vollständige Wicklungen entsprechend Bild 7 sollte mit den folgenden Schritten vorgenommen werden:

- 1) Die Prüfschaltung wird nach 7.3, abhängig von der Art der durchzuführenden Messung (siehe Tabelle 1 bis 4, 7.3) gewählt.
- 2) Alle Anschlussleitungen zu den Phasenklemmen, dem TE-Koppler und der Prüfspannungsquelle sollten so kurz wie möglich sein, und alle Komponenten der Prüfschaltung sollten in der endgültigen Form für die Messung angeordnet sein, wobei die Prüfspannungsquelle angeschlossen aber nicht eingeschaltet ist.
- 3) Der Referenzimpulsgenerator wird zwischen der zu prüfenden Phase und Erde mit möglichst kurzen Leitungen zur Vermeidung von Signalverzerrungen infolge von Leitungsinduktivitäten angeschlossen. Wenn möglich, sollte der Referenzimpulsgenerator immer direkt an die Phasenklemme angeschlossen werden.
- 4) Der Impulsgenerator sollte auf eine angemessene Impulsamplitude im zu erwartenden Bereich der Impulsamplituden des Prüfobjektes eingestellt werden.
- 5) Die Referenzimpulse konstanter Amplitude werden vom TE-Messgerät erfasst, um hiermit einen Skalierungsfaktor für die spätere Messung zu bestimmen.

Da die gesamte Anordnung von Prüfobjekt, Verbindungsleitungen und Messgerät mit Filter und Verstärker aus systemtheoretischer Sicht betrachtet werden muss, ist die Normalisierung einer einzelnen Prüfschaltung, für vollständige Statorwicklungen, nur für eine betrachtete Maschine in Verbindung mit einem gegebenen Erfassungssystem gültig. Es ist wichtig zu betonen, dass eine Normalisierung immer erforderlich ist, wenn sich die neue Prüfanordnung von der Anordnung der vorherigen Messung so unterscheidet, dass keine Wicklungssymmetrie ausgenutzt werden kann.

Prinzipiell könnten weiterentwickelte Normalisierungsverfahren durchgeführt werden, welche Informationen bezüglich Impulsdämpfung und Übersprechen der sich ausbreitenden Impulse innerhalb der Wicklung liefern. Diese Verfahren sind jedoch nicht Bestandteil dieser Norm.

9 Prüfverfahren

9.1 Durchführung von TE-Messungen an Wicklungen und Wicklungskomponenten

9.1.1 Allgemeines

Off-line TE-Messungen können an vollständigen Wicklungen, einzelnen Phasen oder einzelnen Wicklungskomponenten durchgeführt werden. Im Fall von vollständigen Wicklungen oder Teilwicklungen muss das Prüfobjekt von allen externen Quellen, Sammelschienen, Überspannungsableitern, Überspannungsschutzkondensatoren und vom Erregersystem getrennt werden. Wenn möglich, ist der Anschlusspunkt der Zuleitungen für die Prüfung an den Maschinenklemmen zu wählen. Unter keinen Umständen sollten die Anschlüsse an der Schaltereinheit gemacht werden. Bei allen nachfolgenden Prüfungen sollte die gesamte Prüfschaltung, einschließlich aller Komponenten nach Abschnitt 7, in der gleichen Art und Weise wie für die erste Messung ausgeführt werden, um sicherzustellen, dass die Messungen verglichen werden können. Weiterhin ist es wichtig, dass das nach Abschnitt 5 verwendete Messsystem und das nach Abschnitt 8 angewandte Normalisierungsverfahren immer gleich gewählt wird, um vergleichbare Messergebnisse zu erzielen, z. B. für Trenduntersuchungen. Zusätzlich sollten die tatsächlichen Prüfbedingungen im Prüfbericht nach Abschnitt 11 gut dokumentiert werden.

9.1.2 Prüfeinrichtung und Sicherheitsanforderungen

Die Prüfspannungsquelle, mit der die Wicklung an Spannung gelegt wird, sollte entsprechend Abschnitt 7 über den gesamten Bereich der anzulegenden Prüfspannung ausreichend TE frei sein. Für die Kurvenform der angelegten Spannung sollte $U_{pp}/U_{rms} = 2\sqrt{2}, \pm 5\%$ gelten. Die Spannungsquelle sollte auch eine zur Belastung der Wicklung ausreichende Bemessungsscheinleistung (kVA) besitzen. Falls eine solche Einheit nicht ohne weiteres verfügbar ist, kann eine geeignete Form der Blindleistungskompensation parallel oder in Serie zur Prüfspannungsquelle verwendet werden. Als Alternative ist es zulässig, die TE-Prüfungen bei geringeren Frequenzen durchzuführen, z. B. mit Hilfe einer 0,1 Hz Spannungsversorgung, oder bei höheren Frequenzen bis 400 Hz, falls ein Resonanzprüfsystem verwendet wird. In diesem Fall sollte beachtet werden, dass die bei Prüfungen mit sehr niedrigen Frequenzen ermittelten TE-Ergebnisse wesentlich von den bei Netzfrequenz ermittelten abweichen können und daher ein direkter Vergleich eventuell nicht möglich ist [3]. Welche Methode auch immer gewählt wird, alle nachfolgenden Prüfungen sollten mit der gleichen Spannungsversorgung durchgeführt werden, um Trenduntersuchungen der Prüfergebnisse über der Zeit durchführen zu können.

Die anzuwendenden Sicherheitsbestimmungen für die Hochspannungs-TE-Prüfung beinhalten die folgenden Punkte, sind aber nicht auf diese beschränkt:

- 1) Die Schaltung muss mit einem zuverlässigen Überstromrelais oder Schütz ausgestattet sein, um die Spannungsversorgung im Falle eines Durch- oder Überschlages abzutrennen.
- 2) Alle Hochspannungsverbindungen zu den Statorwicklungsklemmen sollten so kurz wie mit vertretbarem Aufwand möglich sein und müssen eine sichere Befestigung aufweisen, um eine unbeabsichtigte Abtrennung während der Prüfung zu vermeiden. Eine Erdungsstange muss vorhanden sein.
- 3) Der das Prüfobjekt unmittelbar umgebende Bereich sollte mit klar erkennbaren Abschränkungen deutlich gekennzeichnet werden.
- 4) Mindestens zwei Personen müssen während dem Anschliessen und Anlegen der Spannung anwesend sein.

Alle anzuwendenden Arbeitsschutzbestimmungen sowie die für die Einrichtung, in der die Prüfung durchgeführt wird, gültigen besonderen Bestimmungen sind zu befolgen.

9.1.3 Vorbereiten der Prüfobjekte

Vor Beginn der Prüfung sollte der Stator auf Sauberkeit geprüft werden. Ferner sind ausreichende Luftabstände zwischen benachbarten Phasenverbindungen und zwischen internen Leitungen innerhalb der Wicklung erforderlich. Leitungen sollten weder miteinander noch mit Oberflächen auf unterschiedlichem Potential in Berührung kommen.

E DIN IEC 60034-27 (VDE 0530-27):2005-07

Um sicherzustellen, dass die Wicklungsisolation eine für die Prüfung ausreichende Spannungsfestigkeit besitzt, wird empfohlen, den Isolationswiderstand vor Beginn der TE-Prüfung zu bestimmen, der im Allgemeinen bei einer Korrektur auf 40 °C [4] über 100MΩ liegen sollte. Die Messung des Isolationswiderstandes zeigt, ob die Wicklung übermäßig verschmutzt, feucht oder ob die Isolation beschädigt ist. Falls der Isolationswiderstand nicht ausreichend ist, ist es ratsam, die elektrischen Messungen erst durchzuführen, nachdem die Wicklung gereinigt und getrocknet ist und/oder die Ursache des geringen Isolationswiderstandes gefunden wurde. Abhängig von Vereinbarungen zwischen Prüfer und Kunde kann die Maschine auch ohne weitere Behandlung TE geprüft werden.

Einzelne Wicklungskomponenten (z. B. Spulen, Stäbe, oder Wicklungsabschnitte wie Statorbetten) sollten sorgfältig vorbereitet werden, bevor an diese Hochspannung angelegt wird. Sie sollten gereinigt und trocken sowie mit dem endgültigen Glimmschutz versehen sein. Elektrische Feldüberhöhungen an den Enden der Komponenten sollten vermieden werden und alle Teileleiter gut miteinander kontaktiert sein. Der Außenglimmschutz soll über seine gesamte Länge in Kontakt mit dem Erdpotential sein, um eine Äquipotentialfläche zu bilden. Hierfür wird ein dünner, biegsamer Kupferdraht, Litzen oder geeignete Nutmodelle empfohlen.

9.1.4 Konditionieren

Da sich die TE-Aktivität während der ersten Minuten nach dem Anlegen der Spannung typischerweise verringert, wird mittels Konditionierung ein stabileres TE-Verhalten der Wicklung oder der zu messenden Wicklungskomponente sichergestellt. Daher sollte das Prüfobjekt mit Hilfe einer Spannungsbelastung über mehrere Minuten konditioniert werden, bevor TE-Daten aufgenommen werden. Zur Vermeidung einer Überbeanspruchung der Wicklung sollte die angelegte Spannung entsprechend dem jeweiligen Wicklungszustand gewählt werden. Sowohl für neue als auch für betriebsgealterte Wicklungen wird eine Konditionierungsdauer von ca. 5 Minuten bei der maximalen Prüfspannung (siehe 9.1.5) empfohlen. Eine Konditionierung kann auch für einzelne Wicklungskomponenten sinnvoll sein. Nach dem Konditionierungszyklus kann die Spannung neu angelegt werden, um die Teilentladungsmessungen zu beginnen.

9.1.5 Prüfspannungen

Für die TE-Prüfung wird das Prüfobjekt nach Abschnitt 7 an den Prüfkreis angeschlossen, und die Steigerung der angelegten Spannung erfolgt entweder in geeignet gewählten Stufen (z. B. $\Delta U = 0.2 U_{\max}$) oder durch kontinuierliches Hochfahren ($\leq 1 \text{ kV/s}$) bis zur maximalen Prüfspannung $U_{\max}$. Bei stufenförmiger Spannungssteigerung (siehe Bild 8a) wird eine Haltezeit von mindestens 10 Sekunden auf jeder Stufe empfohlen, um die entsprechenden TE-Parameter einschliesslich des TE-Musters für jeden Spannungsschritt zu erfassen. Im Falle einer kontinuierlich gesteigerten Prüfspannung muss die Spannungsquelle während der Spannungsregelung ausreichend TE-frei sein. Die maximal angelegte Prüfspannung $U_{\max}$ für neue Wicklungen und Wicklungskomponenten sollte aus den folgenden Spannungswerten gewählt werden:

$$U_1 = U_N / \sqrt{3} \text{ oder Betriebsspannung (Leiter-Erde) des Isolationssystems,}$$

$$U_2 = 1.2 U_N / \sqrt{3} \text{ oder } 120 \% \text{ der Betriebsspannung (Leiter-Erde) des Isolationssystems,}$$

$$U_3 = U_N \text{ oder Bemessungsspannung (Leiter-Leiter) des Isolationssystems.}$$

Für betriebsgealterte Wicklungen sollte die Hochfahrgeschwindigkeit sowie die maximale Prüfspannung zwischen dem Prüfer und dem Kunden vereinbart werden.

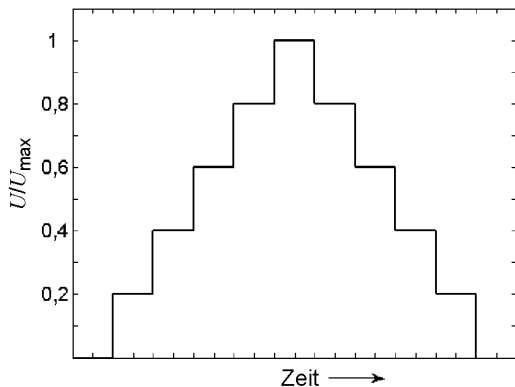


Bild 8a – Stufenförmige Spannungssteigerung in Schritten von $U/U_{\max} = 0.2$

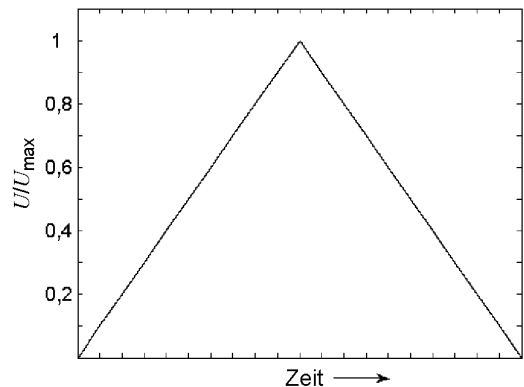


Bild 8b – Kontinuierliche Spannungssteigerung mit rampenförmiger Prüfspannung

9.1.6 TE-Prüfverfahren

9.1.6.1 Bewertung des Grundstörpegels

Vor Beginn der TE-Prüfung sollte der in der Messanordnung vorliegende Grundstörpegel ermittelt werden, um sicherzustellen, dass die Prüfanordnung bis zur maximalen Prüfspannung ausreichend Rausch- und TE-frei ist. Dies sollte vorzugsweise mit der zur Prüfung vollständig vorbereiteten TE-Messanordnung durchgeführt werden, indem das Prüfobjekt durch einen angemessenen entladungsfreien Kondensator ersetzt wird oder, wenn ein solcher Kondensator nicht zur Verfügung steht, durch Betrieb der gesamten Prüfanordnung im Leerlauf bis zur maximalen Prüfspannung mit Spannungsquelle, TE-Koppler und TE-Messgerät, jedoch mit nicht angeschlossenem Prüfobjekt. Im Falle der Leerlauf-Prüfung muss die Prüfschaltung für den Leerlaufzustand separat normalisiert werden, um zuverlässige TE-Werte zu erhalten. Falls bei der nachfolgenden Prüfung rampenförmige Spannungen verwendet werden, soll die Leerlauf-Prüfung mit dem gleichen Spannungsanstieg erfolgen.

9.1.6.2 Reduzierung des Einflusses von Rauschen und Störungen

Störquellen innerhalb der Messeinrichtung können praktisch nicht beseitigt werden, z. B. thermisches Rauschen nach Anhang C (externes Rauschen, Störungen und Empfindlichkeit). Störungen, die von externen Komponenten hervorgerufen werden, können durch entsprechende Massnahmen reduziert oder sogar beseitigt werden. In einem ersten Schritt ist es notwendig, solche Störsignale bei ihrem Auftreten zu lokalisieren und geeignete Massnahmen zu deren Minimierung vorzunehmen. Im Allgemeinen können die folgenden Richtlinien zur Optimierung der Messanordnung herangezogen werden:

- Es ist eine bewährte Kombination aus TE-Koppler und Messeinrichtung zu verwenden.
- Um die Dämpfung zwischen Prüfobjekt und Koppler zu verringern, ist der Koppler so dicht wie möglich am Prüfobjekt aufzustellen.
- Spannungsquelle und TE-Koppler sind an gegenüberliegenden Wicklungsklemmen nach Abschnitt 7 anzuschliessen, um sicherzustellen, dass Störungen von der Quelle bei der Ausbreitung durch die Wicklung gedämpft werden.
- Bei der Prüfung von vollständigen Statorwicklungen ist sicherzustellen, dass die Zuleitungen aller integrierten Temperaturfühler (RTD) am geerdeten Statorgehäuse befestigt sind.
- Der Prüfaufbau, bestehend aus Transformator und TE-Koppler, muss separat normalisiert und geprüft werden, um zuverlässige Information bezüglich der Störampplituden zu erhalten.
- Die Normalisierung und Messung der Prüfanordnung wird vor jeder Verwendung empfohlen. Abhängig vom Ort und Zeitpunkt der Messung kann sich die Qualität des Versorgungsnetzes ändern und/oder der Transformator kann über längere Zeiträume zunehmend verschmutzt werden. Darüber hinaus kann die Isolierung des Transformators altern oder Sonstiges geschehen.

E DIN IEC 60034-27 (VDE 0530-27):2005-07

- Die Erdung des Prüfobjektes und des Messgerätes muss grundsätzlich gut sein (grossflächige Erdungen). Es sollte möglichst der gleiche Erdanschlusspunkt für den TE-Koppler, das Prüfobjekt und die Messeinrichtung verwendet werden.
- Die Prüfanordnung ist so kompakt wie möglich aufzubauen. Kurze Messkabel, kurze Erdungsanschlüsse und kompakte Schaltungsabmessungen verringern die Induktivität sowie elektromagnetische Einkopplungen in die Prüfschaltung infolge von Antennenwirkungen.
- Einige Messleitungen benötigen einen Abschlusswiderstand, um Reflexionen zu vermeiden. Aus dem gleichen Grund sollten nur bewährte Leitungen verwendet werden.
- Einige elektronische Geräte, z. B. Computer und Bildschirme, können Störungen des Messgerätes verursachen. Das Positionieren dieser Geräte in eine andere Richtung kann solche Beeinflussungen der Messung oftmals reduzieren.

9.1.6.3 TE-Prüfung

Mit der für die Prüfung vollständig vorbereiteten TE-Messschaltung nach Abschnitt 7 wird die Prüfspannung, wie in 9.1.5 beschrieben, am Prüfobjekt angelegt. Bei jeder Spannungsstufe oder während der kontinuierlichen Spannungssteigerung sollten die in Abschnitt 6 empfohlenen TE-Daten erfasst und verarbeitet werden, um entsprechende TE-Datendarstellungen zu erhalten. Um die $Q = f(U)$ Kurve sowie die TE-Einsetz- (PDIV) und -Aussetzspannung (PDEV) entsprechend Abschnitt 6 ermitteln zu können, sollte die Messung, wie in Bild 8 dargestellt, mit ansteigender und anschliessend abfallender Prüfspannung durchgeführt werden. Während Spannungssteigerung- und -absenkung sollte jeweils die gleiche Änderungsgeschwindigkeit verwendet werden.

Falls die Teilentladungskennwerte während der Spannungsbelastung elektronisch erfasst und in Messwertdateien abgespeichert werden, können die in Abschnitt 6 empfohlenen Diagramme erstellt und weitere Auswertungen, wie in Abschnitt 10 beschrieben, durchgeführt werden, um die gemessenen TE-Ergebnisse zu bewerten. Dies kann die Verteilung der Impulsamplituden, phasenaufgelöste Verteilungen oder spezifische TE-Muster (siehe Abschnitt 6 und 10) bei unterschiedlichen Stufen während der Prüfspannungssteigerung und -absenkung umfassen.

Alle Anmerkungen oder Beobachtungen während der Prüfung sollten aufgezeichnet werden, um eine zukünftige Bezugnahme zu erleichtern. In Abhängigkeit der geprüften Maschine und abhängig vom Ziel der Prüfung sollte eine angemessene Serie von Standardmessungen und/oder optionalen erweiterten Messungen, wie in Abschnitt 7 beschrieben, durchgeführt werden.

9.2 Identifizierung und Lokalisierung von Teilentladungsquellen

9.2.1 Allgemeines

Bei Verwendung von Messgeräten, die die TE-Parameter nach 6.3 liefern, bewertet die elektrische TE-Messung an den Klemmen des Prüfobjektes die Intensität, Häufigkeit, und Polarität der Entladungen. Um jedoch aus diesen Parametern sinnvolle Informationen bezüglich des Wicklungszustandes abzuleiten, ist es wichtig, den Ort der Teilentladungsquelle zu identifizieren.

Im Allgemeinen wird die TE-Prüfung zunächst an einzelnen Phasen durchgeführt, während die jeweils anderen zwei Phasen an Erdpotential angeschlossen werden. Dies liefert eine charakteristische TE-Verteilung oder ein TE-Muster für jede Phase. Im Anschluss an die Prüfung der einzelnen Phasen und unter der Annahme, dass eine Spannungsquelle mit ausreichender Bemessungsscheinleistung (kVA) zur Verfügung steht, ist die erste und grundlegendste Methode zur Bestimmung des Entladungsursprungs unter Off-line Prüfbedingungen, mit Hilfe der Prüfspannungsquelle gleichzeitig alle drei Phasen der Wicklung mit Spannung zu beaufschlagen. Unter diesen Bedingungen werden die Auswirkungen des Spannungsgradienten zwischen den Phasen im Wickelkopf eliminiert. Wenn alle drei Phasen gleichzeitig mit Spannung beaufschlagt werden, verschwinden im TE-Muster die Entladungen zwischen den Phasen im Wickelkopfbereich. Entladungen zwischen Phase und Erde sind jedoch nach wie vor vorhanden, und deren Ursache sollte gründlich untersucht werden. Eine entsprechende Verringerung der TE-Amplitude und Impulsanzahl deutet darauf hin, dass Wickelkopfentladungen zu den an einzelnen Phasen durchgeführten Messungen beitragen. Dies ist eine wirkungsvolle Methode zur Trennung der Wickelkopfentladungen von den Entladungen in der Nut.

Um die Ursachen spezifischer Probleme ausfindig zu machen, kann es für den diagnostischen Prozess hilfreich sein, die Wicklung zu unterteilen, sofern möglich. Da die Maschinenhersteller jedoch Polverbinder, Umfangsverbinder, und Leitungen einer Phase miteinander verschalten, so dass diese Elemente miteinander in Kontakt sind, stellt diese Situation einen anormalen Zustand dar, in dem ein Teil der Schaltung geerdet ist und der andere an Spannung liegt, wodurch hohe TE-Pegel entstehen können. In Fällen, in denen es notwendig ist, eine unterteilte Wicklung zu prüfen, sollten Kunde und Prüfer den Maschinenhersteller zu Rate ziehen, um vor der Durchführung entsprechende Anweisungen zu erhalten.

Es wurde eine Vielzahl von zusätzlichen Prüfmethoden entwickelt, die unterschiedliche physikalische Auswirkungen von Teilentladungen ausnutzen. Um die Anwesenheit oder das Fehlen von Wickelkopfentladung zu bestätigen, besteht ein sinnvolles Vorgehen während der Prüfung darin, die Wicklung von beiden Seiten mit Hilfe eines Betrachtungssystems oder einer Kamera zu untersuchen, die in der Lage ist, Koronaentladungen zu erfassen. Ein Vorteil von Off-line Prüfungen besteht darin, Prüfungen durchführen zu können, bei denen, falls erforderlich, Gehäuseabdeckungen und Rotor entfernt sind.

Die folgende Beschreibung behandelt die weit verbreitete elektrische Methode zur Lokalisierung. Nichtelektrische Methoden zur Lokalisierung von TE-Quellen sind in Anhang A beschrieben.

9.2.2 Elektromagnetische Sonden

Die Verwendung von elektromagnetischen Sonden zur Lokalisierung von TE-Quellen erfordert eine Abtastung der Statornuten (nach Ausbau des Rotors), der Nutaustrittsbereiche oder des Wickelkopfbereichs bei unterschiedlichen Prüfspannungen. Zusätzlich zur Erfassung von Messdaten bei U_1 kann es erwünscht sein, entsprechende Messungen auch bei einzelnen Zwischenspannungsschritten $< U_1$ durchzuführen. Diese Art Sonden sind üblicherweise am besten nutzbar, wenn die Messdaten mit einer vorhandenen Datenbank verglichen werden können, um eine Bewertung der geprüften Maschine zu ermöglichen.

Es muss beachtet werden, dass die TE-Aktivität nicht auf den Wickelkopf der Maschine beschränkt ist. Klemmenkästen, Leitungsführungen, Anschlussplatten, Stützisolatoren usw. können TE hervorrufen und sollten bei der Prüfung mittels Sonde mit einbezogen werden. Es muss auch beachtet werden, dass Sonden die elektrische Feldverteilung stören können und möglicherweise unerwünschte Entladungen hervorrufen. Bei der TE-Messung innerhalb des Wickelkopfs mit solchen Sonden müssen zusätzliche Sicherheitsanforderungen für das Prüfpersonal berücksichtigt werden.

10 Interpretation der Messergebnisse

10.1 Allgemeines

Im Allgemeinen ist die werksseitige TE-Prüfung von Wicklungen und Wicklungskomponenten zur Sicherstellung einer gleichmässigen Fertigungsqualität vorgesehen, während die TE-Prüfung von Wicklungen vor Ort zur Ermittlung des Alterungszustandes infolge von unterschiedlichen Beanspruchungsfaktoren im Betrieb gedacht ist. Daher ist die Interpretation der bei den Prüfungen ermittelten Ergebnisse der abschließende und wichtigste Schritt nach Durchführung der TE-Messungen. In Abhängigkeit der Prüfergebnisse ist zu entscheiden, ob irgendwelche Anzeichen von Fehlstellen vorhanden sind und, wenn ja, was diese bezüglich der Funktionalität des Isolationssystems bedeuten, ob irgendwelche zusätzliche Prüfungen notwendig sind sowie die Planung und/oder Durchführung von notwendigen korrektiven Instandhaltungsmaßnahmen.

Es muss beachtet werden, dass individuelle Maschinen während des Betriebs normalerweise spezifischen Beanspruchungsprofilen unterliegen und dass eine Vielzahl von Konstruktionsmerkmalen, Fertigungsbedingungen und unterschiedlichen Isolationssystemen von unterschiedlichen Herstellern existiert. Dies hat üblicherweise signifikante Unterschiede in der Höhe der Teilentladungen zur Folge, abhängig von den individuellen Eigenschaften der geprüften Maschine. Folglich ist ein direkter Vergleich der unterschiedlichen Maschinentypen bezüglich absoluter Werte nicht möglich.

Es ist auch nicht möglich, absolute Grenzwerte für vollständige Wicklungen festzulegen, z. B. als Abnahmekriterium zur Verwendung während der Fertigung oder dem Betrieb. Daher werden in dieser Norm keine spezifischen Grenzwerte angegeben, die zur Qualitätsbeurteilung verwendet werden können.