

Energietechnisches Praktikum



Versuch

Betriebsmitteldiagnostik



ETI
Elektrotechnisches Institut

Stand: 16.10.2017

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Teilentladungen.....	5
2.1	Teilentladungsarten.....	6
2.1.1	Äußere TE	6
2.1.2	Innere TE.....	8
2.1.3	Wichtige Begriffe bei der TE-Messung	10
2.2	Detektion von Teilentladungen.....	11
2.2.1	Nichtelektrische Verfahren.....	11
2.2.2	Elektrische Verfahren	12
2.3	Messung von TE mittels Koppelkapazität nach IEC 60270	12
2.3.1	Prinzip.....	12
2.3.2	Kalibrierung	14
2.3.3	Ankopplung.....	15
2.3.4	Ladungsbestimmung im TE-Messsystem.....	16
2.4	Generatorstäbe und Isolierung.....	18
2.4.1	Aufbau der Leiterstäbe	19
2.4.2	Isolierung der Leiterstäbe	20
3	$\tan\delta$ -Messung.....	23
3.1	Energiekabel	23
3.2	Dielektrische Verluste.....	24
3.3	Ersatzschaltbilder	27
3.4	Betriebskapazität und deren Berechnung an einem Radialfeldkabel	29
3.5	Verlustfaktor eines Radialfeldkabels	30
3.6	Messung des Verlustfaktors mit der Scheringbrücke	31
3.6.1	Allgemeines	31
3.6.2	Abgleichbedingungen	31
3.6.3	Aufbau eines Pressgaskondensators	32
4	Literatur	35
5	Kontrollfragen.....	36
6	Versuchsaufbau	37
6.1	TE-Messgerät MPD 600.....	37
6.2	Kalibrator CAL542B.....	37

6.3	$\tan\delta$ - Messsystem	37
6.3.1	Standardbauteile.....	39
6.3.2	MI 600 Sensoreinheit und MCU 502.....	39
6.3.3	MI PC-Software	40
6.4	Prüfkreis, Spannungsquelle, Spannungsmessung.....	41
6.5	Prüflinge	41
6.5.1	Teilentladungsmessung.....	41
6.5.2	$\tan\delta$ – Messung	41

1 Einleitung

Unter elektrischen Betriebsmitteln versteht man ein Bauteil, eine Baugruppe oder Geräte einer elektrischen Anlage. Betriebsmittel in der elektrischen Energietechnik sind beispielsweise:

- Synchrongeneratoren
- Leistungstransformatoren
- Strom- und Spannungswandler
- Drosselspulen
- Kondensatorbänke
- Schaltanlagen
- Kabel und Freileitungen



Um den Alterungszustand eines Betriebsmittels festzustellen und gegebenenfalls Wartungen und Instandhaltungen durchzuführen, gibt es verschiedene Diagnoseverfahren.

Unter Diagnose versteht man in diesem Fall die messtechnische Erfassung von Zustandsgrößen durch geeignete Sensoren und nachfolgende Analyse und Interpretation der gemessenen Werte. Das Ergebnis der Diagnosemessung steht in der Regel zeitlich erst nach der Messung bereit und erfordert viel Erfahrung, um die Messergebnisse korrekt interpretieren zu können.

In diesem Versuch sollen zwei Verfahren der Diagnostik elektrischer Betriebsmittel vorgestellt werden:

- Teilentladungsmessung (TE-Messung)
- Verlustfaktormessung ($\tan\delta$ -Messung)

Die Vorteile dieser beiden Verfahren liegen darin, dass das zu prüfende Betriebsmittel bei der Diagnose nicht zerstört wird und dass sie auch an Stellen eingesetzt werden können, die normalerweise nicht zugänglich sind, z.B. an der Isolation eines unterirdisch verlegten Starkstromkabels.

2 Teilentladungen

Teilentladungen (TE) sind örtlich begrenzte Entladungen, die den Zwischenraum zwischen den Elektroden nicht vollständig überbrücken. Sie entstehen durch lokale Feldstärkeüberhöhungen, die die Durchschlagfeldstärke des Isoliermediums übersteigen. Ihre Stromstärke wird nicht durch den Innenwiderstand der Spannungsquelle, sondern durch den Energieinhalt der Teilkapazitäten und durch Raumladungen begrenzt. Sie treten meist in Form von Einzelimpulsen auf, die sich bei angelegter Wechselspannung periodisch wiederholen. TE treten ebenfalls bei Gleichspannung auf, sind dort aber schwerer zu detektieren, da sie in unregelmäßigen Abständen und nur sporadisch auftreten.

Die Teilentladungsmessung ist eine Messmethode, die Aussagen über die Güte einer elektrischen Isolierung erlaubt, ohne den Prüfling zu schädigen oder zu zerstören. So sind Teilentladungsmessungen u.a. Bestandteil von Typ- und Ausgangsprüfungen hochspannungstechnischer Betriebsmittel wie Kabel, Garnituren, Transformatoren, Messteiler etc., um Fertigungsfehler zerstörungsfrei zu erkennen. Die TE-Messung wird aber auch bei Vor-Ort-Messungen eingesetzt, um den Zustand in Betrieb befindlicher Komponenten zu diagnostizieren. Dieser Versuch soll Sie unter anderem mit der Vorgehensweise bei einer Teilentladungsmessung vertraut machen.

Bei einer Teilentladungsmessung wird an die Isolierstrecke des Prüflings (z.B. zwischen Innenleiter und Schirm eines Kabels) eine Spannung angelegt, die kleiner als deren Durchschlagspannung ist. Treten dabei Entladungen auf, die die Isolierstrecke nicht komplett, sondern nur teilweise überbrücken, spricht man von Teilentladungen.

2.1 Teilentladungsarten

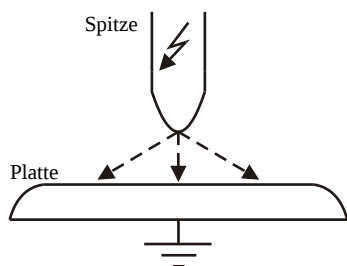
Man unterscheidet zwischen inneren und äußeren Teilentladungen. Im Folgenden werden beide Arten näher erläutert.

2.1.1 Äußere TE

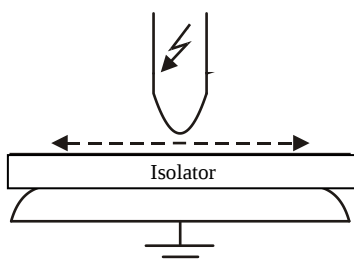
Äußere Teilentladungen treten im Bereich der Spannungsscheitel auf, sobald die TE-Zündspannung (Spannung, ab der die TE einsetzen kann) überschritten ist.

Bei einer Anordnung mit einer Spitze in Luft an Hochspannung beobachtet man beispielsweise kurz oberhalb der TE-Zündspannung Entladungen mit gleichem zeitlichen Abstand und gleicher Größe, die symmetrisch und regelmäßig zum negativen Spannungsscheitel angeordnet sind und deren Häufigkeit mit steigender Spannung zunimmt (sog. Trichel-Impulse). Erst bei höherer Spannung treten auch im Bereich des positiven Scheitels Entladungen auf, jedoch verglichen mit den Trichel-Impulsen nur unregelmäßig und sporadisch.

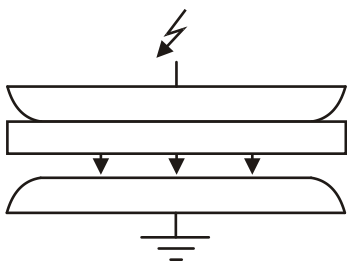
Als Beispiele seien folgenden Entladungsarten aufgeführt:



Koronaentladungen sind Entladungen durch lokale Überhöhung der Feldstärke in Gasen und Flüssigkeiten. Sie treten vor allem an Spitzen, Kanten und dünnen Leitern auf. Da sie meist an den Außenkonturen auftreten, sind sie durch ihr typisches Glimmen und Knistern leicht zu detektieren.



Gleitentladungen treten entlang von Oberflächen auf, wo sie einen niederohmigen Bereich bilden und somit lange Strecken auch bei mittlerer Spannung überwinden können. Ihre erste Ursache ist eine Koronaentladung direkt an der Elektrode, welche eine Oberflächenentladung auslösen kann.



Eine andere Form der Gleitentladung ist die **Entladung in einem Schichtmaterial**. An verschiedenen Grenzschichten (z. B. Grenzflächen einer Gas-Feststoff-Anordnung oder einer Feststoff-Feststoff-Anordnung) bildet sich eine lokale Spannungsüberhöhung aus, wodurch es zu einer Teilentladung kommt.

Bild 2.1 zeigt die Darstellung von äußeren Teilentladungen zweier unterschiedlicher Messsysteme. In Bild 2.1a ist die Anzeige eines herkömmlichen analogen TE-Messgerätes zu sehen. Hier ist die positive und negative Halbwelle der anliegenden Prüfspannung als Ellipse dargestellt. Zu sehen sind Teilentladungen nahe des negativen und positiven Scheitels. Bild 2.1b hingegen zeigt die Darstellung eines digitalen Teilentladungsmessgerätes. Hier sind Teilentladungen am negativen und positiven Spannungsscheitel zu beobachten.

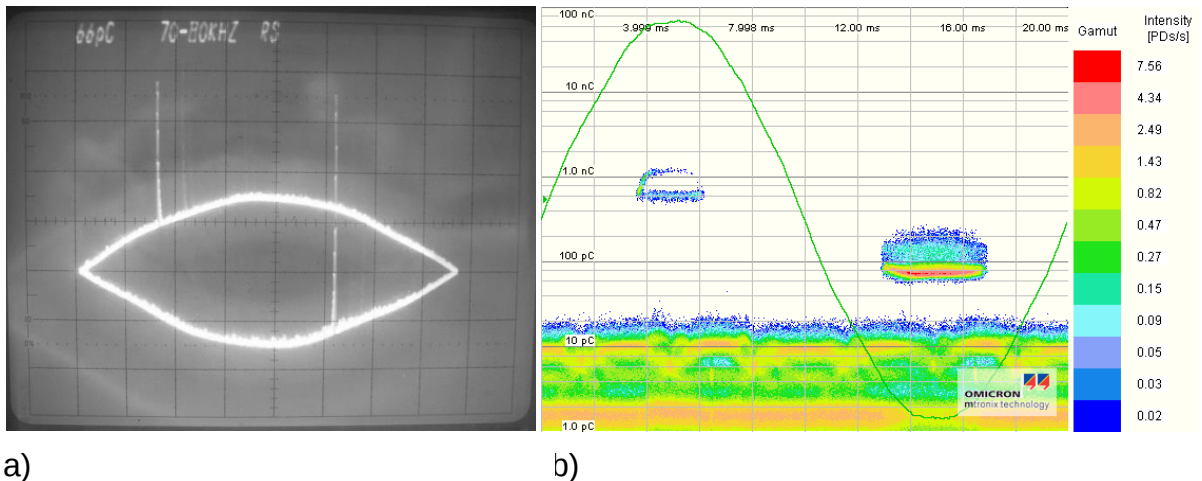


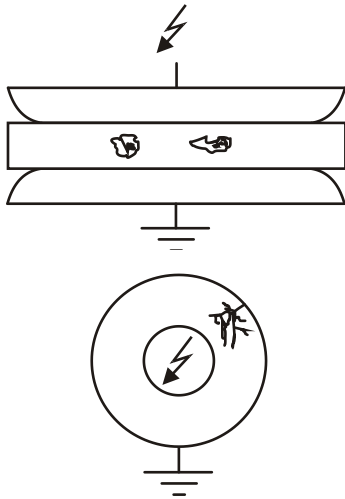
Bild 2.1 : Messgeräteanzeige: a) analoges TE-Messgerät; b) digitales TE-Messgerät

Der Vorteil bei der digitalen Messtechnik ist die Möglichkeit, die Teilentladungen zu speichern und so eine konsistente Darstellung zu erzeugen. Ebenfalls ist es möglich eine Häufigkeitsanalyse durchzuführen. Hier kann man unterscheiden, wie stark die Teilentladungen ausgeprägt sind, oder ob es sich um impulsartige, nicht-periodische Störer handelt.

2.1.2 Innere TE

Innere Teilentladungen sind Entladungen, die im Inneren eines Isolierstoffs entstehen. Sie treten im Bereich der Flanken zwischen Nulldurchgang und Scheitel der Prüfspannung auf.

Als Beispiele seien folgende Entladungsarten aufgeführt:



Hohlraum-entladungen entstehen durch Fehler im Isolierstoff, zum Beispiel durch eingeschlossene Luftblasen oder Verunreinigungen durch Stoffe mit anderer Dielektrizitätszahl.

Treeing-Kanäle sind Entladekanäle im festen oder flüssigen Isolierstoff, die eine dauernde TE hervorrufen und das Isoliermaterial nachhaltig schädigen.

Zur Erklärung betrachten wir ein vereinfachtes Modell eines gasgefüllten Hohlraums in einer Isolierung:

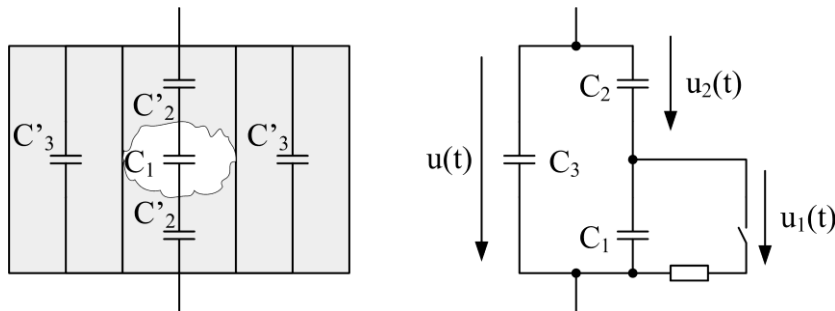


Bild 2.2: Prinzip der inneren Teilentladung

Die Hohlraumkapazität C_1 ist in Serie zur Kapazität der restlichen Isolierstrecke C_2 , dazu parallel liegt die Kapazität der fehlerfreien Isolierung C_3 . Ohne Teilentladungen liegt am Hohlraum die durch den Spannungsteiler C_2 und C_1 reduzierte Prüfspannung an:

$$u_1(t) = u(t) \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

Überschreitet die Feldstärke im Hohlraum den zum Zünden notwendigen Wert $u_z(t)$, wird C_1 durch eine Funkenentladung bis zur Löschspannung des Funkens entladen; infolgedessen lädt die Spannungsquelle C_2 auf den Momentanwert der Prüfspannung abzüglich der Funkenlöschspannung $u_l(t)$ auf. Durch den Verschiebungsstrom über C_2 wird C_1 erneut aufgeladen. Abhängig von der Amplitude der Prüfspannung können ein oder mehrere Teilentladungsimpulse pro Halbschwingung auftreten (Bild 2.3).

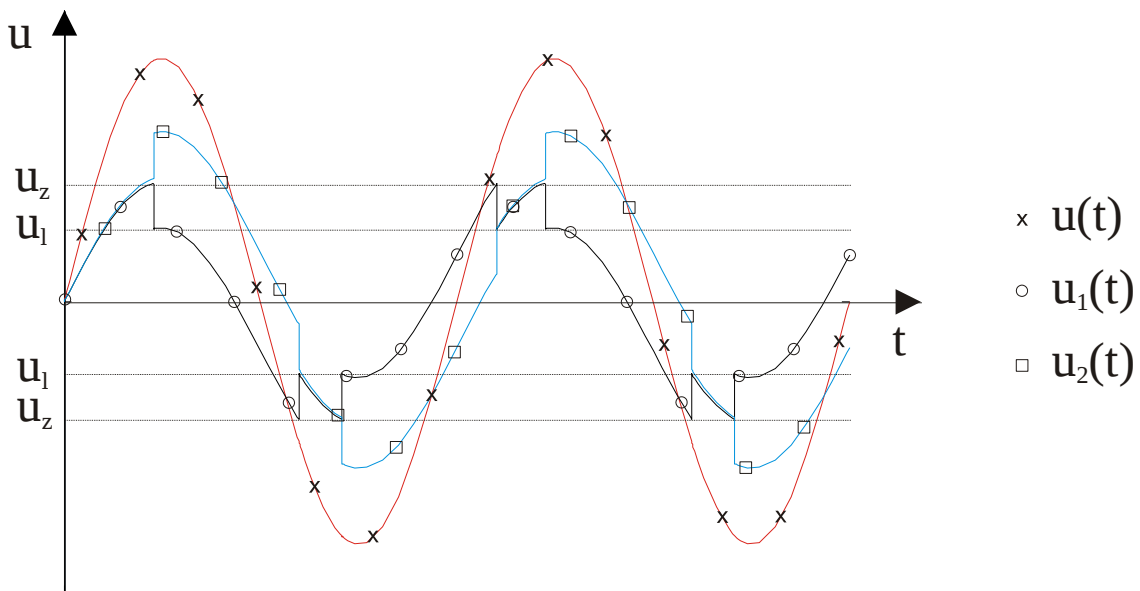


Bild 2.3: Verdeutlichung der Zünd- und Löschspannung

Die zusätzliche Ladung, die C_2 bei einer Entladung von C_1 erhält, bewirkt in der folgenden Halbschwingung eine zusätzliche Spannung über C_1 , so dass der Hohlraum nun bereits bei einer geringfügig niedrigeren, angelegten Prüfspannung zündet und die Teilentladung stabil in beiden Halbschwingungen brennt.

Bei dem hier beschriebenen Modell innerer TE wurde eine Änderung der Parameter des Hohlraums nicht berücksichtigt. In der Praxis können z.B. Abbranderscheinungen, Aufladeeffekte, ein Druckanstieg infolge einer Erwärmung durch den Funken oder durch gebildete chemische Zersetzungsprodukte eine Abdrosselung oder auch eine Zunahme der TE-Stärke und -Häufigkeit im Laufe der Zeit bewirken.

2.1.3 Wichtige Begriffe bei der TE-Messung

<i>Störer</i>	Unerwünschte in den Messkreis einkoppelnde periodische oder impulsartige Signale und Rauschen
<i>Grundstörpegel (GSP)</i>	TE-Pegel einkoppelnder Störsignale in die kalibrierte Messanordnung. Aus der Höhe des GSP kann auf den minimal detektierbaren TE-Pegel geschlossen werden. Dieser ist laut Norm definiert als das Zweifache des GSP .
<i>TE-Einsatzspannung</i> U_{TEE} , engl.: PDIV	Spannungslevel, bei dem bei der Prüfung TE einsetzt. ¹
<i>TE-Aussatzspannung</i> U_{TEA} , engl.: PDEV	Spannungslevel, bei dem die TE wieder erlöschen. Liegt in der Regel unter der TE-Einsatzspannung.
<i>IEC 60270</i>	Internationale Norm zur Teilentladungsmessung

¹ Sollte bei intaktem Betriebsmittel über der Betriebsspannung liegen (Anforderungen werden in entsprechenden Normen beschrieben)

2.2 Detektion von Teilentladungen

Teilentladungen können auf verschiedene Arten festgestellt werden. Die gebräuchlichste Art ist die später genauer behandelte elektrische Messung der TE nach IEC 60270. Nachfolgend werden Verfahren zur Detektion von TE beschrieben.

2.2.1 Nichtelektrische Verfahren

2.2.1.1 Akustische Verfahren

Beim akustischen Verfahren werden die bei TE auftretenden Knistergeräusche mittels Richtmikrofon geortet. Dieses Verfahren bietet sich vor allem bei sehr großen Prüflingen und äußerer TE an.

2.2.1.2 Visuelle oder optische Verfahren

Optische Verfahren gründen auf den Leuchterscheinungen von Koronaentladungen. Dies sind ebenfalls Verfahren für äußere TE. Bei schwachen TE kann man mit Hilfe eines Restlichtverstärkers in dunklen Räumen die Korona orten.

2.2.1.3 Beobachtung von Entladungsspuren

Entladungsspuren, vor allem in festen Isolierstoffen, lassen ebenfalls Rückschlüsse auf die Stärke der Entladung zu. Jedoch ist meist eine Zerstörung (Aufschneiden der Isolierung) zur Feststellung notwendig.

2.2.1.4 In Öl gelöste Gase

Eine Analyse der im Öl gelösten Gase lässt ebenfalls eine Schlussfolgerung auf TE zu. Die steigende Gaskonzentration ist jedoch eine Langzeitercheinung und nicht als Prüfverfahren gedacht.

2.2.2 Elektrische Verfahren

2.2.2.1 Detektion von TE mittels Antennen und Feldsonden

Zur Registrierung von Teilentladungen innerhalb von gasisolierten Schaltanlagen (GIS) werden kapazitive Feldsonden und Antennen eingesetzt. Durch Teilentladungen werden in der GIS elektromagnetische Wellen angeregt, die über eine Sonde oder Antenne erfasst und zur weiteren Auswertung ausgekoppelt werden.

2.2.2.2 Auskopplung mittels Ankoppelvierpol

Bei diesem Verfahren wird ein Teilentladungsimpuls induktiv oder mittels kapazitivem Koppler über einen Ankoppelvierpol aus dem Prüfkreis ausgekoppelt und einem Teilentladungsmessgerät zugeleitet. Dieser Ansatz wird im Folgenden näher beschrieben.

2.3 Messung von TE mittels Koppelkapazität nach IEC 60270

2.3.1 Prinzip

Im Allgemeinen ist die bei einer Teilentladung umgesetzte Ladungsmenge nicht direkt messbar. Die Entladung bewirkt jedoch einen kleinen Spannungseinbruch an den Prüflingsklemmen.

Im Fall innerer TE (Bild 2.2) ruft die im Hohlraum umgesetzte Ladung Δq_1 an C_1 einen Spannungssprung hervor

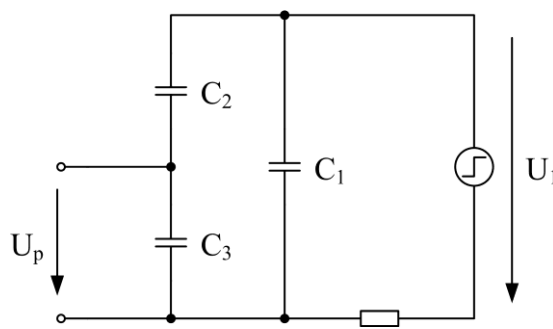
$$\Delta U_1 = \frac{\Delta q_1}{C_1}.$$

Dieser Spannungssprung wird nun über den Spannungsteiler C_2 und C_3 auf die Prüflingsklemmen übertragen

$$\Delta U_p = \frac{C_2}{C_2 + C_3} \cdot \Delta U_1 = \frac{C_2}{C_2 + C_3} \frac{\Delta q_1}{C_1}.$$

Anschaulich ist dies eine Veränderung des Ersatzschaltbildes wie in Bild 2.4 dargestellt. Die Kapazitätswerte von C_1 , C_2 und C_3 sind nur größenmäßig bekannt. Es gilt

$$C_3 \gg C_1 \gg C_2.$$

Bild 2.4: Schaltbild zur Bestimmung des Prüfspannungseinbruchs ΔU_p

Dadurch kann aus dem Spannungseinbruch nicht auf die tatsächlich im Hohlraum umgesetzte Ladung geschlossen werden. Man definiert deshalb die sogenannte scheinbare Ladung q_s (engl.: apparent charge) als ein Maß für die Teilentladungsstärke.

Definition:

Die scheinbare Ladung ist diejenige Ladung, die über den Prüflingsklemmen eingespeist werden muss, um an diesen denselben Spannungssprung zu bewirken, wie die Teilentladung selbst.

Da der Spannungseinbruch nur wenige Volt beträgt und damit wesentlich kleiner als die anliegende Prüfspannung ist, kann man ihn nicht direkt messen. Man schaltet dem Prüfling deshalb eine Koppelkapazität C_k parallel (Bild 2.5). Diese Koppelkapazität wandelt den Spannungseinbruch in einen Stromimpuls um, der über einen sogenannten Ankoppelvierpol (AKV)² dem TE-Messgerät zugeleitet wird. Der Ankoppelvierpol ist in Serie zur Koppelkapazität integriert, man spricht deshalb von **indirekter Ankopplung**.

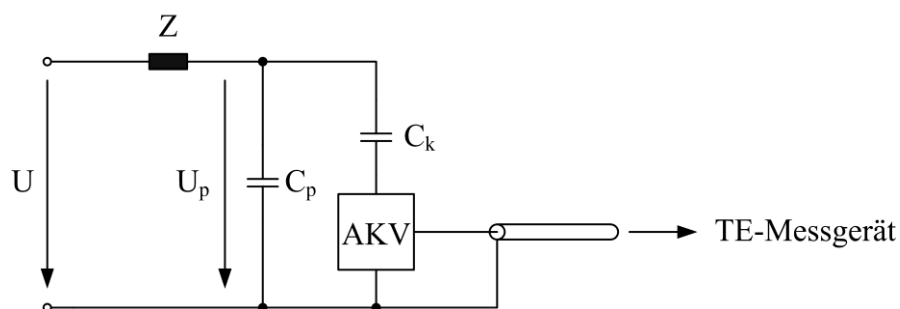


Bild 2.5 : Typischer TE-Messkreis (indirekte Ankopplung)

² Im einfachsten Fall handelt es sich hierbei um einen Widerstand, über dem die Spannung gemessen wird.

Um die Funktion des Koppelkondensators zu erklären, gehen wir zunächst davon aus, dass seine Kapazität wesentlich größer als die Prüflingskapazität sei. Er gleicht damit den Spannungseinbruch an den Prüflingsklemmen nahezu vollständig aus.

Im Idealfall einer unendlich großen Koppelkapazität gilt damit:

$$q_s = \int i_k dt = \left(C_3 + \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \right) \Delta U_p = C_p \cdot \Delta U_p,$$

d.h. das Zeitintegral über dem Strom i_k durch die Koppelkapazität entspricht der scheinbaren Ladung q_s .

Die Spannungsquelle kann bei diesem vergleichsweise schnellen Umladevorgang als abgekoppelt betrachtet werden, was durch die Induktivität Z in Bild 2.5 symbolisiert wird.

In der Praxis ist die Koppelkapazität etwa gleich groß wie die Prüflingskapazität. Zum einen würde durch eine große Koppelkapazität ein zu großer prüffrequenter Wechselstrom fließen, den die Spannungsquelle aufzubringen hätte, zum anderen sind Hochspannungskondensatoren großer Kapazität teuer.

Eine reale Koppelkapazität gleicht also den Spannungseinbruch an den Prüflingsklemmen nicht vollständig aus. Die Integration des Stroms durch C_k ergibt einen kleineren Wert als die scheinbare Ladung, nämlich die sogenannte messbare Ladung q_m . Es gilt

$$q_m = \frac{1}{\frac{C_p}{C_k} + 1} \cdot q_s$$

2.3.2 Kalibrierung

Damit das TE-Messgerät trotzdem korrekt die scheinbare Ladung anzeigt, muss es für jeden Prüfaufbau neu kalibriert werden. Zur Kalibrierung wird der Proportionalitätsfaktor

$$k = \frac{C_p}{C_k} + 1$$

am TE-Messgerät eingestellt. Dazu wird bei abgeschalteter Prüfspannung mit einem Kalibrator ein **Impuls bekannter Ladung über den Prüflingsklemmen**

eingespeist und die Anzeige des TE-Messgeräts auf diesen Wert justiert. Der Proportionalitätsfaktor selbst ist dabei uninteressant.

Der Kalibrator besteht aus einer Spannungsquelle, die einen Spannungssprung ΔU_{cal} bekannter Sprunghöhe liefert, in Serie mit einer bekannten Kapazität C_{cal} . Meistens ist die Parallelschaltung aus Prüflings- und Koppelkapazität wesentlich größer als die Kapazität im Kalibrator, so dass die in den Prüfkreis eingespeiste Ladung näherungsweise allein vom Kalibrator (Bild 2.6) bestimmt wird

$$q_{cal} = C_{cal} \cdot \Delta U_{cal}.$$

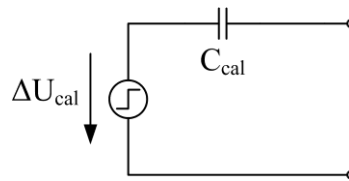


Bild 2.6: Ersatzschaltbild des Kalibrators

2.3.3 Ankopplung

Außer der bisher beschriebenen indirekten Ankopplung (Bild 2.5), bei der der Ankoppelvierpol im Koppelzweig angeordnet wird, ist eine direkte Ankopplung (Bild 2.7) mit dem AKV im Prüflingszweig möglich.

Die indirekte Ankopplung wird hauptsächlich angewandt, wenn der Prüfling nicht erdfrei geschaltet werden kann (z.B. ein Energiekabel). Sie ist jedoch im Vergleich mit der direkten Ankopplung weniger empfindlich, da zusätzliche Kapazitäten im Prüfkreis, wie z.B. Erdstreukapazitäten C_E oder die Kapazität eines Spannungsteilers, die Prüflingskapazität C_p scheinbar vergrößern. Bei direkter Ankopplung sind solche zusätzlichen Kapazitäten der Koppelkapazität C_k zuzurechnen.

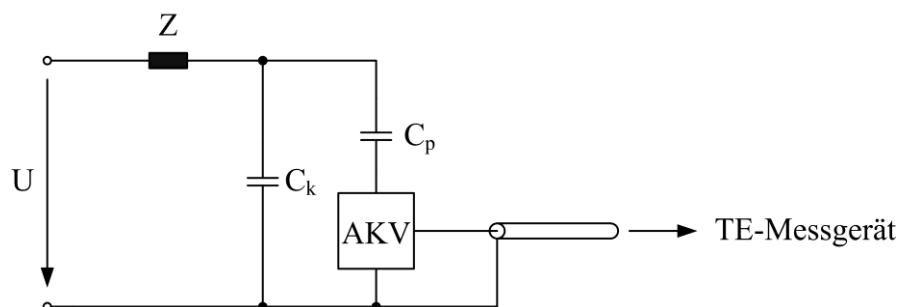


Bild 2.7: Direkte Ankopplung: AKV in Reihe zum Prüfling

Die Differenzmessung (Bild 2.8) bietet eine Möglichkeit zur Unterdrückung externer Störsignale. Teilentladungen innerhalb des aus Prüfling und Koppelkapazität bestehenden Kreises rufen einen Kreisstrom hervor, der die Ankoppel-

vierpole gegenseitig durchfließt. Das TE-Messgerät bildet die Differenz beider Spannungsabfälle. Teilentladungen oder Störungen von außerhalb des Prüfkreises kommend, bewirken in beiden Zweigen gleichsinnige Ströme. Ist die Brücke abgeglichen, so ist die Differenzspannung zwischen den Zweigen null. Der externe Impuls wird nicht an das TE-Messgerät weitergeleitet.

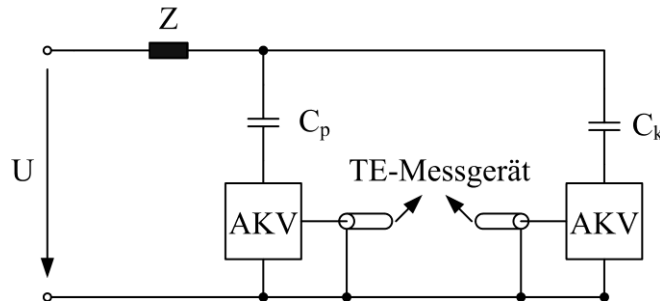


Bild 2.8: Differenzmessung

Die Differenzmessung setzt voraus, dass C_p und C_k gleich groß sind. Sie wird deshalb oft in Prüfeinrichtungen eingesetzt, wo zwei identische Prüflinge zur Verfügung stehen.

2.3.4 Ladungsbestimmung im TE-Messsystem

Um den ausgekoppelten Stromimpuls in einen Ladungswert umzurechnen, muss dieser integriert werden. Dies kann auf zwei verschiedene Arten geschehen: die Integration im Zeitbereich und die Integration im Frequenzbereich (Quasiintegration).

2.3.4.1 Integration im Frequenzbereich (Quasiintegration)

Hierbei nutzt man aus, dass das Amplitudendichtespektrum eines TE-Impulses im unteren Frequenzbereich konstant ist (Bild 2.9).

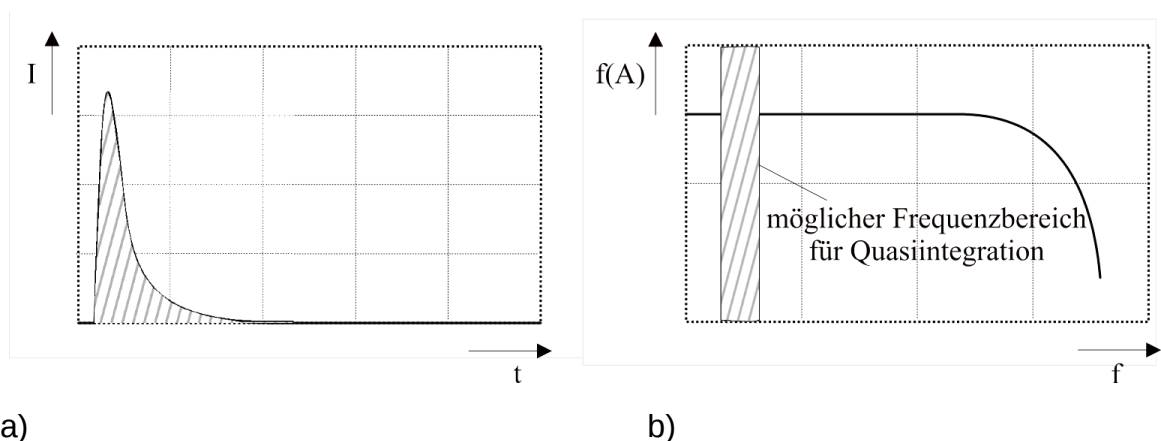


Bild 2.9: Simulierter Teilentladungsimpuls im a) Zeit- und b) Frequenzbereich

Bei der Quasiintegration bestimmt man nicht direkt die Amplitude des Gleichanteils, sondern man misst die Amplitudendichte in einem Frequenzbereich im konstanten Teil des Spektrums, in welchem dem Messsignal keine Störungen überlagert sind.

Konventionelle TE-Messgeräte messen üblicherweise in einem Frequenzband zwischen einigen 10 bis 100 kHz. Der Erfassungsbereich wird über einen Bandpass ausgefiltert. Auf einen Impuls mit konstantem Amplitudendichtespektrum im Durchlassbereich liefert der Bandpass am Ausgang seine Impulsantwort. Das Ausgangssignal des Bandpasses wird vom TE-Messgerät abhängig von der Phasenlage der Prüfspannung auf einem Bildschirm dargestellt. Außerdem wird die Scheitelspannung des Ausgangssignals einer Anzeige zugeführt, die den größten periodisch auftretenden Wert als gemessene scheinbare Ladung anzeigt. Bei der Integration im Frequenzbereich wird die schmalbandige Messung verwendet. Hier wird laut der Norm IEC 60270:2001 ein Bandpass von 9 – 30 kHz vorgeschlagen. Bei manchen TE-Messgeräten kann die Mittenfrequenz des schmalbandigen Bandpasses verstellt werden (IEC-Norm: $50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz}$), so dass der Erfassungsbereich auf einen beliebigen Frequenzbereich eingestellt werden kann.

Der Nachteil der schmalbandigen Messung liegt in der großen Impulsauflösungszeit. Folgen zwei TE-Impulse dicht aufeinander, können sie nur korrekt erfasst werden, wenn der Bandpass nach der Erfassung des vorherigen Impulses nahezu ausgeschwungen hat (Bild 2.10). Trifft der zweite Impuls ein während der Bandpass noch schwingt, überlagern sich an seinem Ausgang die beiden zeitverschobenen Impulsantworten, was bei der anschließenden Scheitelwertbildung zu einem Messfehler führen kann. Da die Ausschwingzeit des Bandpasses in etwa umgekehrt proportional zur Bandbreite ist, werden bei der schmalbandigen Messung schnelle Impulsfolgen falsch erfasst.

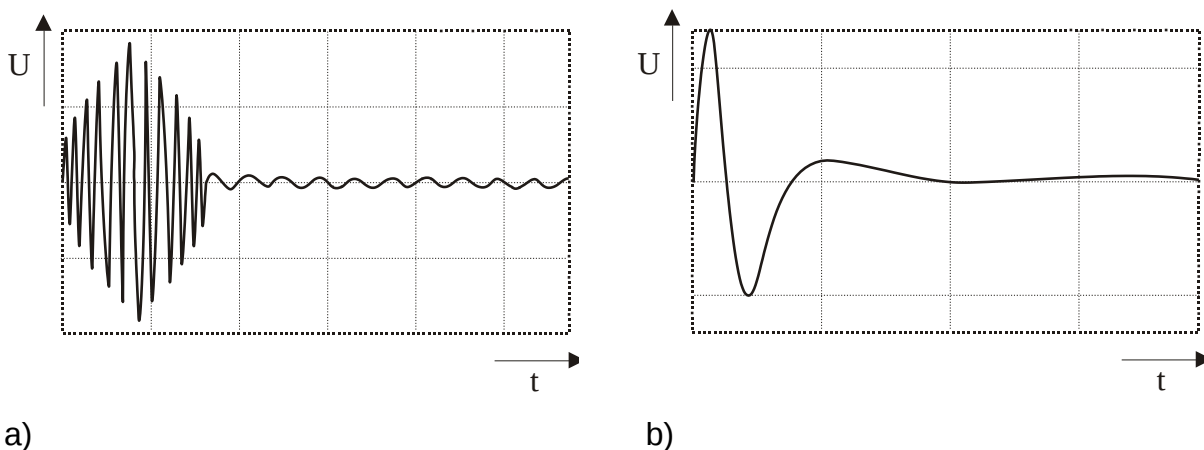


Bild 2.10: Impulsantworten von a) schmal- und b) breitbandigem Bandpass

Ein weiterer Nachteil der schmalbandigen Messung ist, dass die Polarität des TE-Impulses nicht feststellbar ist.

2.3.4.2 Integration im Zeitbereich

Solche TE-Messgeräte ermitteln die scheinbare Ladung durch die Integration des Stromverlaufes der Impulse im Zeitbereich.

Hier wird die breitbandige Messung angewendet. Nach der IEC 60270:2001 wird bei einer Bandbreite zwischen 100 – 400 *kHz* gemessen. Moderne TE-Messgeräte arbeiten mit Bandbreiten bis in den MHz-Bereich. Misst man jedoch nicht in einem geschirmten Prüffeld, können z.B. Radiosender die innerhalb dieses Frequenzbandes senden, über den als Antenne wirkenden Prüfaufbau einkoppeln und die Messung stören.

Durch die breitbandige Messung ist es möglich aus dem zeitlichen Verlauf der TE-Impulse nähere Informationen über den möglichen Zusammenhang zwischen der Isolierstoffalterung und einzelnen TE-Messgrößen zu gewinnen.

Im Gegensatz zu den schmalbandigen Messgeräten stellen die breitbandigen Ladungsmessgeräte mit Integration im Zeitbereich keine besonderen Anforderungen an das Spektrum, z.B. an die Konstanz der Amplitudendichte der an den Prüflingsklemmen gemessenen TE-Impulse. Die scheinbare Ladung wird grundsätzlich unabhängig vom Verlauf der Amplitudendichte ermittelt. Aufgrund ihrer großen Bandbreite zeigen diese Geräte ein großes Impulsaufhebungsvermögen.

2.4 Generatorstäbe und Isolierung

Die großtechnische Bereitstellung elektrischer Energie erfolgt konventionell mit Drehstromsynchrongeneratoren. Sie erzeugen einen Großteil der weltweit verbrauchten elektrischen Energie. Drehstromsynchrongeneratoren werden in geringem Umfang (z.B. in Windkraftanlagen) eingesetzt.

Drehstrommaschinen bestehen aus Läufer und Ständer mit drei räumlich um 120° versetzten Kupferwicklungen, wie in Bild 2.11 abgebildet. Durch Permanentmagneten oder Elektromagneten wird mittels der Drehung des Läufers ein magnetisches Drehfeld erzeugt, welches in den ruhenden Ständerwicklungen Spannungen induziert.

In der Realität sind die Ständerwicklungen längs des Umfangs der Ständerbohrung gleichmäßig in die Nuten verteilt (Bild 2.11 rechts). In die Nuten des Ständers

sind vorgeformte *Leiterstäbe* eingelegt. Für einen zuverlässigen Betrieb des Generators ist die Isolierung der Ständerwicklung bzw. der einzelnen Leiterstäbe ein wichtiger Aspekt bei der Konstruktion. Aus diesem Grund sind Aufbau und die Isolierung der Stäbe im Folgenden näher erläutert.

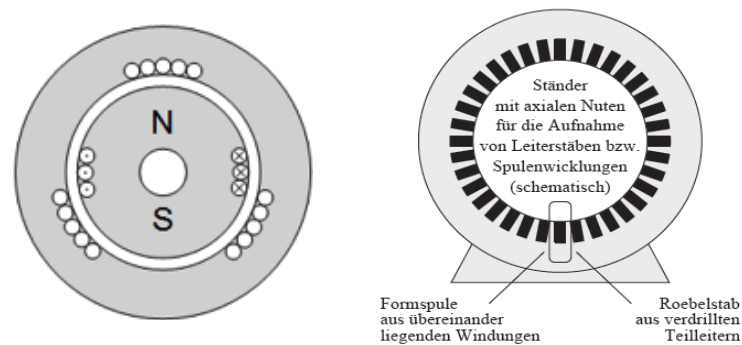


Bild 2.11: Querschnitt eines Synchrongenerators (Vollpolläufer)

2.4.1 Aufbau der Leiterstäbe

Bei Maschinen mit hohen Leistungen sind die Nennspannungen auf etwa 27 kV begrenzt, da höhere Spannungen mit den klassischen vorgefertigten Maschinenisoliersystemen nicht beherrschbar sind. Aus diesem Grund werden die Generatoren mit einem Maschinentransformator verschaltet, welcher die Spannung auf eine höhere Übertragungsspannung transformiert.

Bei Generatoren im 1300 MVA-Bereich sind Betriebsströme von bis 28 kA erreichbar, d.h. für den Stromfluss werden sehr große Leiterquerschnitte benötigt. Aufgrund des Skin效kts käme es zu einer inhomogenen Stromdichteverteilung, was zu einer niedrigeren Leistungsdichte führt. Ein Leiterstab besteht deshalb aus mehreren parallelen Teilleitern, welche jeweils gegeneinander und gegen die Eisenbleche des Ständers isoliert sind.

2.4.1.1 Roebelung

Die meisten elektrischen Maschinen werden mit einer Doppel- oder Mehrlagenwicklung gewickelt, d.h. in jeder Nut sind zwei unterschiedliche Wicklungen vorhanden. Wenn eine Wicklung in einer Nut nah am Luftspalt positioniert ist, liegt diese auf der Rückseite der Nut hinter der zweiten Wicklung, also weiter vom Luftspalt entfernt. Der magnetische Fluss nimmt in radialer Richtung nach außen hin ab, was bedeutet, dass in einer einzigen Ständerwicklung die induzierte Spannung abhängig von der Position in der Nut unterschiedlich ist. Zur Vergleichmäßigung der Flussverteilung und um Kreisströme zu verhindern, werden die Teilleiter in

einen sog. *Roebelstab* verdrillt. Durch die Verdrillung erhält jeder Teilleiter im Mittel die gleiche radiale Position in der Nut (Bild 2.12).

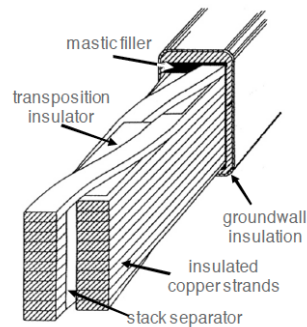


Bild 2.12: Aufbau eines Roebelstabes

2.4.2 Isolierung der Leiterstäbe

Die Aufgabe der Hauptisolierung (engl. *groundwall insulation*) ist, die Leiterstäbe gegen das geerdete Stator-Blechpaket sowie gegen die einzelnen Leiter in der gleichen Statornut und im Wickelkopf zu isolieren. Die Isolierung muss der Betriebsfeldstärke bei Nennspannung U_n und transienten Überspannungen standhalten können.

Für die dielektrische Barriere hat sich mineralisches Glimmerpapier (engl. Mica) bewährt. Glimmer hat eine Sandwichstruktur aus isolierenden Silikat- (SiO_4 -Tetraedern) und leitenden Metallionenschichten (AlO_6 -Oktaedern). Diese Papier-ähnliche Folie wird mit Bindemitteln auf einem Träger appliziert. Somit wird die benötigte mechanische Festigkeit erreicht und es bleiben keine Hohlräume zurück, in denen Teilentladungen auftreten können. Beim Vakuumdruckimprägnationsverfahren (engl. *VPI: vacuum-pressure-impregnation*) werden die gewickelten Leiterstäbe vorgetrocknet, evakuiert und anschließend mit Polyesterharz oder Epoxidharz mit Druck beaufschlagt, imprägniert und schließlich im Ofen ausgehärtet.

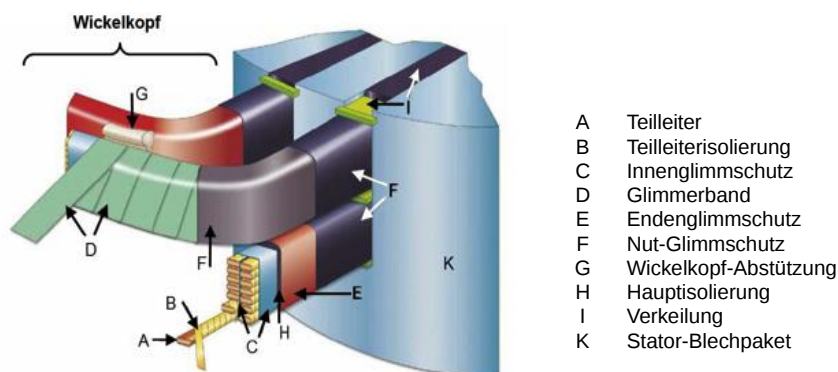


Bild 2.13: Isoliermaterialien für eine Ständernut [Von Roll AG]

Im Bild 2.13 ist der Aufbau des Stators und der Stäbe nochmal detailliert dargestellt. Die Teileiter (A) sind gegeneinander mit einer dünnen Glimmerschicht (B) isoliert. Zudem sind alle Teileiter in einem Stab nochmals durch verschiedene Isolationsschichten gegen das Statorblech isoliert. Da die Spannung zwischen einzelnen Teileiter relativ gering ist, kann die Teileiterisolierung dünn gehalten werden. Mit

$$d = \frac{U_n}{E_{max} \cdot \sqrt{3}}$$

kann die Dicke d der Hauptisolierung berechnet werden.

2.4.2.1 Innerer und äußerer Glimmschutz

Aufgrund von Ungleichmäßigkeiten, ist die gesamte Seitenfläche des Leiterstabes nicht vollständig mit der Nut verbunden. Teilentladungen (TE) können daher in diesen Hohlräumen auftreten (Bild 2.14 links). Um TE zu verhindern wird ein geerdetes, leitfähiges Band (Bild 2.13 (F)) auf der Hauptisolierung angebracht (Bild 2.14 rechts).

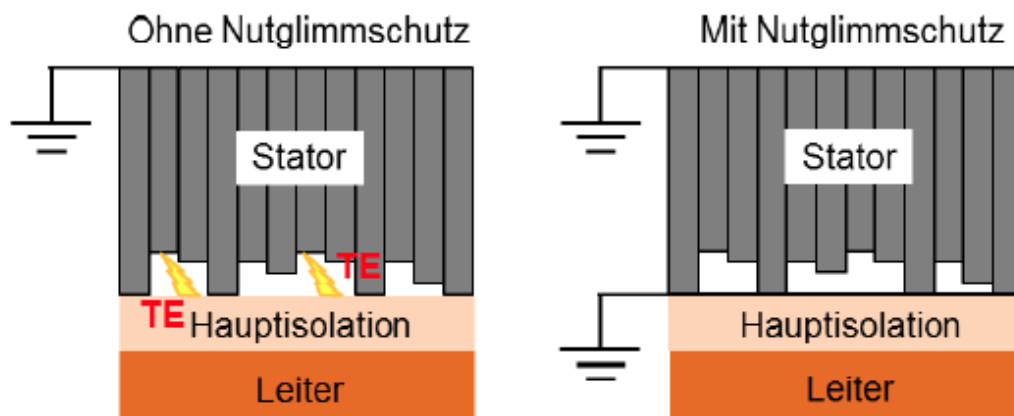


Bild 2.14: Funktion Nut-Glimmschutz (schematisch)

Beim Nutaustritt zum Wickelkopf ist der Potentialanstieg auf der Oberfläche des Stabes sehr steil (Bild 2.15 links). Die Austrittsstelle stellt eine klassische Gleitanordnung dar. Zur Unterdrückung von Gleitentladungen wird eine Potentialsteuerung in Form eines halbleitenden Bandes, bestehend aus nichtlinearen Materialien, eingesetzt. Dessen Leitfähigkeit erhöht sich mit der Feldstärke, sodass das Feld aus den Bereichen mit hoher Feldstärke verdrängt wird (Bild 2.15 rechts).

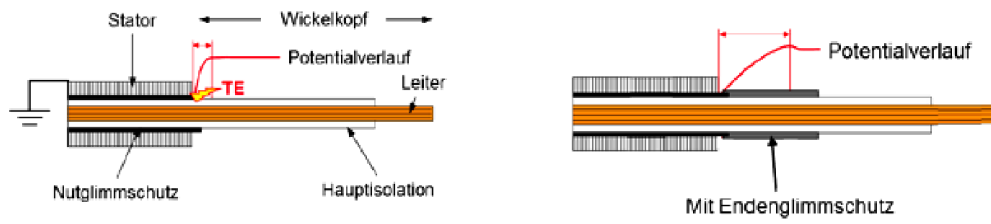


Bild 2.15: Potentialverlauf ohne (links) und mit Endenglimmschutz (rechts)

3 $\tan\delta$ -Messung

Da Energiekabel typische Prüflinge für $\tan\delta$ -Messungen darstellen, werden sie in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

3.1 Energiekabel

Kabel werden zur Übertragung bzw. zur Verteilung elektrischer Energie genutzt. Ihr Aufbau ist durch VDE-Normen erfasst und beschrieben, ebenso ihr Anwendungsbereich und die Verlegungsart. Die Isolierstoffe und Bauarten der Kabel werden durch die Betriebsbedingungen vorgegeben. Grundsätzlich besteht ein Kabel aus Leiter, Isolierung, Schirmung, Mantel (Feuchtigkeitsschutz) und Bewehrung (mechanische Belastbarkeit). Das am häufigsten verwendete Kabel in der Energietechnik ist das Radialfeldkabel.

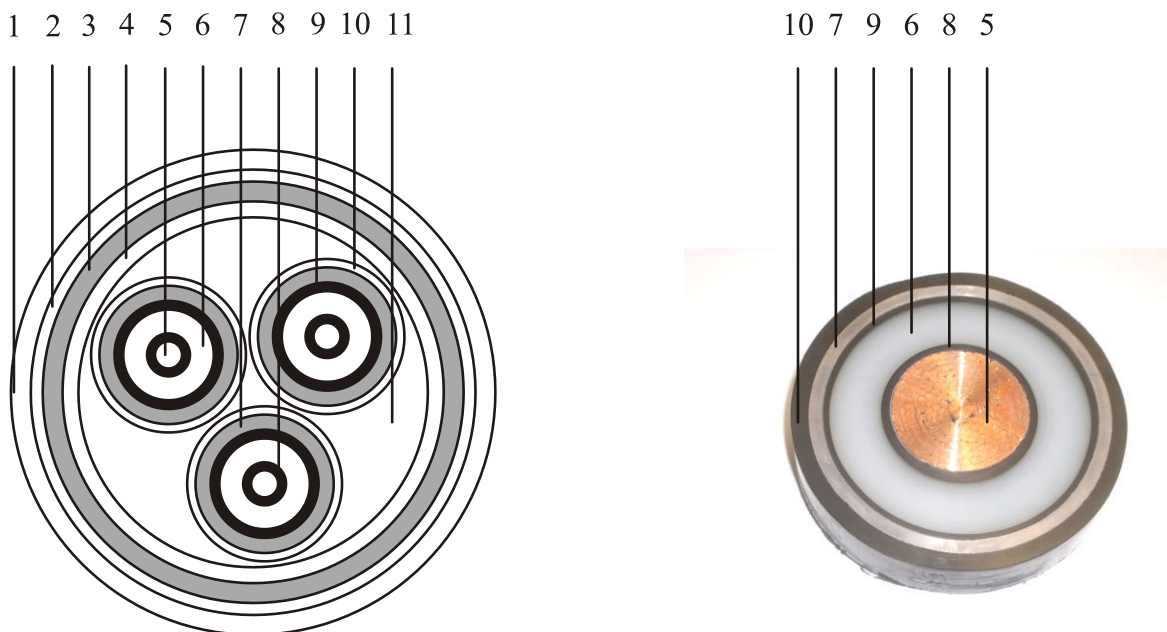


Bild 3.1: Aufbau eines Radialfeldkabels

1. PVC-Schutzhülle; 2. Korrosionsschutz; 3. Bewehrung; 4. innere Schutzhülle;
5. Leiter; 6. Isolierung; 7. Schirm; 8. innere Leitschicht; 9. äußere Leitschicht;
10. Mantelschutzhülle; 11. Füllstoff

Bei Radialfeldkabeln wird üblicherweise das Dreimantelkabel (Bild 3.1) verwendet. Jeder Leiter hat einen eigenen Mantel und verfügt über einen metallischen Schirm zur Feldbegrenzung. Die drei Leiter werden unter Ausfüllung der Zwickel verseilt. Anschließend werden sie mit einem Korrosionsschutz umgeben. Es folgen Schutzhüllen und Bewehrung.

Für das Anschließen der Kabelenden sind Kabelendverschlüsse notwendig. Sie müssen sowohl einen mechanischen Schutz und Kabelabschluss bilden als auch das elektrische Feld beim Übergang vom Kabel zum Anschluss so steuern, dass keine unzulässig hohen Beanspruchungen durch die Feldstärke entstehen können. Die Auswirkungen der Feldsteuerung kann man an einem einfachen Beispiel in Bild 3.2 erkennen: Ohne Feldsteuerung am Kabelende kommt es am Ende des Schirms zu einer Feldstärkeüberhöhung, was einen sicheren Betrieb unmöglich macht.

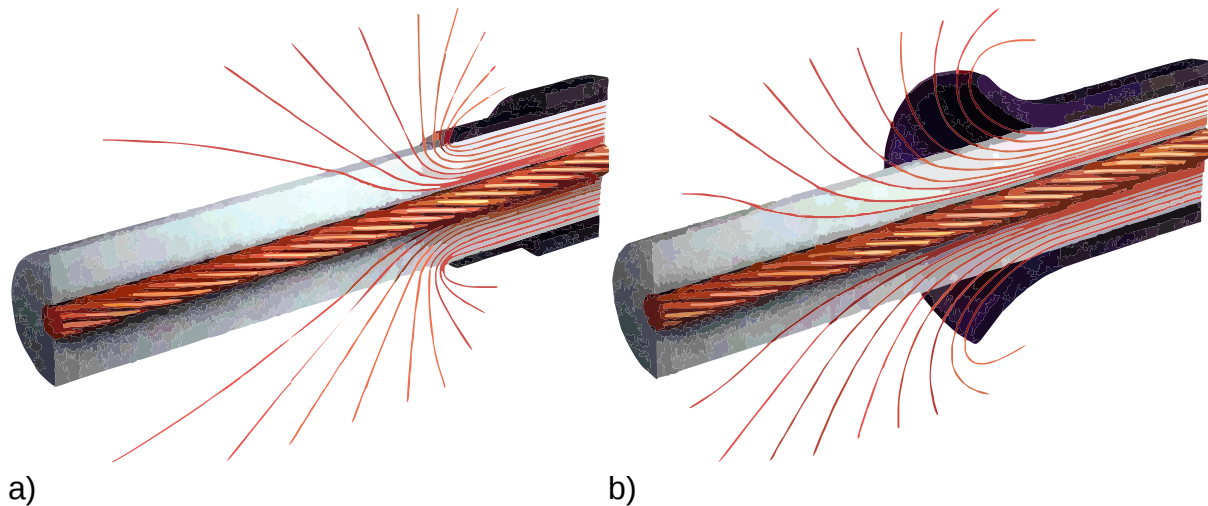


Bild 3.2: Äquipotentiallinien a) ungesteuertes b) gesteuertes Kabelende

Während solche Feldstärkeüberhöhungen bei einer TE-Messung detektiert und lokalisiert werden können, gibt die $\tan\delta$ -Messung Aufschluss über dielektrische Verluste, welche beispielsweise bei Öl-Papier-Kabeln als Indikator für den Alterungszustand der Kabelisolierung dienen.

3.2 Dielektrische Verluste

Dielektrische Verluste treten in festen und flüssigen Isolierstoffen auf. Sie werden über den sogenannten dielektrischen Verlustfaktor $\tan\delta$ definiert

$$\tan\delta = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Blindleistung}} .$$

Man berücksichtigt damit, dass Strom und angelegte Wechselspannung bei einem nichtidealen Dielektrikum um einen Winkel $\varphi < 90^\circ$ phasenverschoben sind. Der dielektrische Verlustfaktor ist ein Kriterium für Güte, Reinheitsgrad und Alterungszustand des Isolierstoffs.

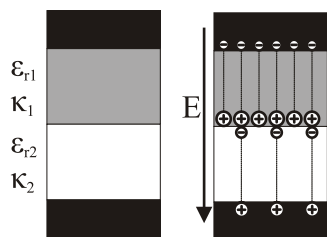
Für die dielektrischen Verluste gibt es mehrere Ursachen, die alle den Verlustfaktor beeinflussen.

- **Leitungsverluste ($\tan\delta_c$):**

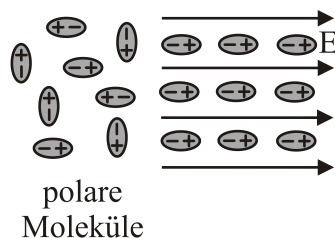
Sie sind bei Anlegen einer Gleichspannung die einzige Verlustursache, bei Anlegen einer Wechselspannung nimmt ihre Bedeutung zugunsten anderer Verlustmechanismen ab. Leitungsverluste entstehen durch die Verschiebung von freien Ladungsträgern unter Einfluss eines elektrischen Feldes (Ionen, Elektronen).

- **Polarisationsverluste ($\tan\delta_p$):**

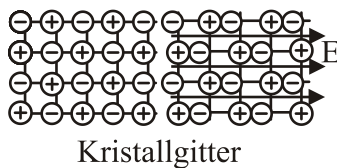
Diese Verluste machen den größten Teil an den Gesamtverlusten aus. Polarisationsverluste haben verschiedene Ursachen:



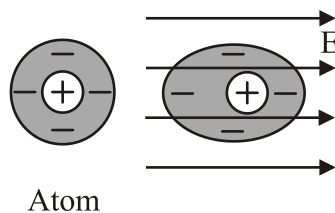
Grenzflächenpolarisation: Tritt an Grenzflächen (Korngrenzen, Übergang amorpher-kristalliner Bereich) von festen Isolierstoffen bzw. Dielektrika auf, an denen Ladungen im Takt des Wechselfeldes umpolarisiert werden.



Orientierungspolarisation: Tritt auf, wenn im Dielektrikum Dipole enthalten sind, die sich im angelegten elektrischen Feld ausrichten bzw. im Takt des angelegten Wechselfeldes schwingen (z.B. Wasser).



Gitterpolarisation: In einem Ionengitter (kristalliner Werkstoff) werden positive und negative Ionen durch das elektrische Wechselfeld aus ihrer Ruhelage verschoben.



Deformationspolarisation: Die Atomhülle eines Atoms wird durch das elektrische Feld relativ zum Atomkern ausgelenkt und schwingt im Takt der Wechselfrequenz.

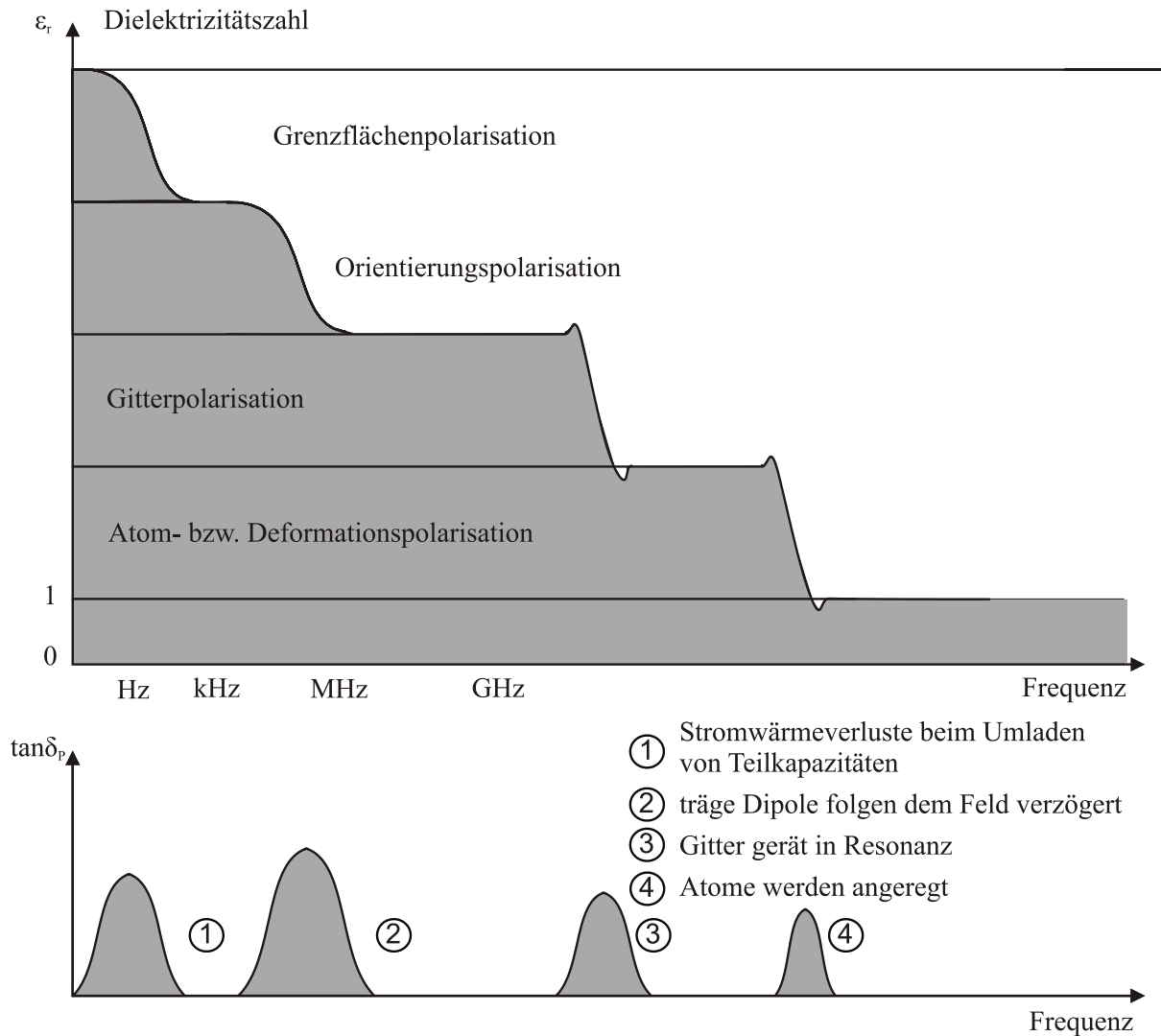


Bild 3.3: Frequenzabhängigkeit der Polarisationsverluste

- **Teilentladungsverluste ($\tan \delta_{TE}$):**

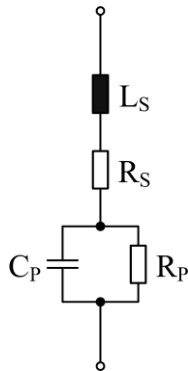
Verluste, die durch Zünden von Teilentladungen entstehen.

Der **Gesamtverlustfaktor** setzt sich aus den verschiedenen Verlusten zusammen

$$\tan \delta = \tan \delta_C + \tan \delta_P + \tan \delta_{TE}.$$

3.3 Ersatzschaltbilder

Zur vereinfachten rechnerischen und messtechnischen Erfassung der dielektrischen Verluste entwickelt man ein elektrisches Ersatzschaltbild des Isolierstoffs, in dem auch die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung berücksichtigt wird.



- L_S = Induktivität die erst bei sehr hohen Frequenzen berücksichtigt werden muss
- R_S = ohmsche Verluste durch Zuleitung, Kontakte, Skineffekt, Bahnwiderstand
- R_P = dielektrische Verluste
- C_P = ideale Kapazität

Bild 3.4: Allgemeines Ersatzschaltbild eines Dielektrikums

In der Praxis werden vereinfachte Ersatzschaltbilder verwendet, die aus einer Parallel- oder Reihenschaltung zwischen einem idealen Kondensator und einem Widerstand bestehen.

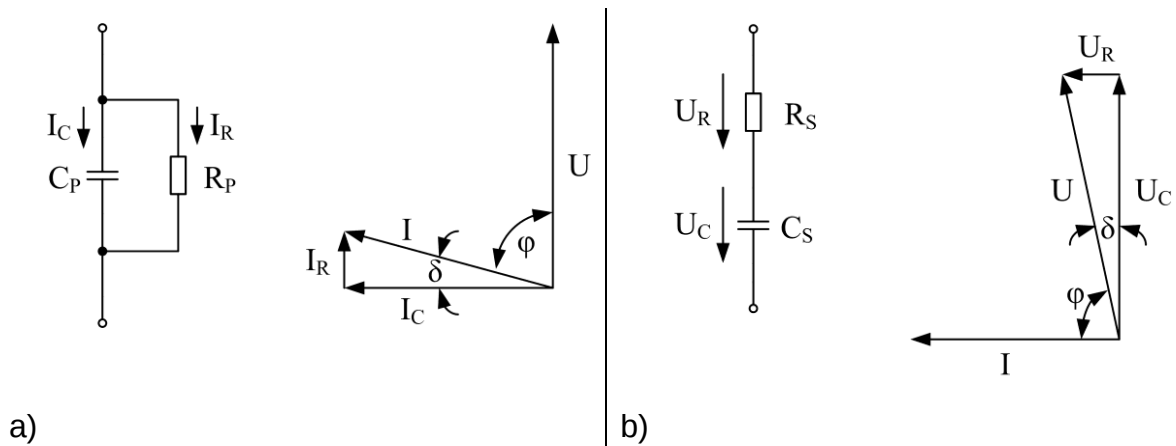


Bild 3.5: Ersatzschaltungen und Zeigerdiagramme für verlustbehaftete Dielektrika
in a) Parallelschaltung und b) Serienschaltung

Legt man das Parallel-Ersatzschaltbild zugrunde, so ist der Verlustfaktor $\tan \delta_P$ folgendermaßen definiert

$$\tan \delta_P = \frac{P_{\text{Wirk}}}{P_{\text{Blind}}} = \frac{U \cdot I \cdot \cos \varphi}{U \cdot I \cdot \sin \varphi} = \frac{I_R}{I_C} = \frac{R_P}{\omega C_P} = \frac{1}{R_P \cdot \omega \cdot C_P}.$$

Für das Serienerersatzschaltbild gilt

$$\tan \delta_S = \frac{U_R}{U_C} = R_S \cdot \omega \cdot C_S.$$

Für technische Frequenzen (z.B. 50/60Hz) wird vor allem das Parallel-Ersatzschaltbild verwendet. Deshalb müssen Kapazität C_S und Widerstand R_S in die entsprechenden Werte der Parallelersatzschaltung umgerechnet werden, wenn in der Messeinrichtung das Serienerersatzschaltbild zugrunde gelegt wurde.

Die an den Klemmen gemessene Impedanz Z und der Verlustwinkel eines verlustbehafteten Kondensators C_X sind für beide Ersatzschaltungen (Bild 3.5) gleich; die Kapazitäten C_P , C_S und die Widerstände R_P , R_S sind jedoch verschieden

$$R_S = \frac{R_P}{1 + (\omega R_P C_P)^2},$$

$$C_S = C_P \frac{1 + (\omega R_P C_P)^2}{(\omega R_P C_P)^2}.$$

Umgestellt ergibt sich für das parallele Ersatzschaltbild

$$R_P = R_S \frac{1 + (\omega R_S C_S)^2}{(\omega R_S C_S)^2},$$

$$C_P = \frac{C_S}{1 + (\omega R_S C_S)^2}.$$

Es ist zu beachten, dass die mit einem bestimmten Verlustfaktor vorgenommene Umrechnung jeweils nur für eine feste Frequenz gilt, da der Verlustfaktor selbst frequenzabhängig ist. Dies kommt auch dadurch zum Ausdruck, dass in den Bestimmungsgleichungen für den Verlustfaktor die Kreisfrequenz ω enthalten ist. Die Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Frequenz wird von diesen einfachen Ersatzschaltungen nicht vollständig wiedergegeben, da komplexe Polarisations-effekte (Bild 3.3) nicht nachgebildet werden. Daher ist die Erfassung des Verlustfaktors über einen großen Frequenzbereich weder mit dem Parallelersatzschaltbild noch nach dem Serienerersatzschaltbild möglich.

3.4 Betriebskapazität und deren Berechnung an einem Radialfeldkabel

Die Kapazitätswerte zwischen Teilen elektrischer Maschinen und Anlagen, die im Betrieb unterschiedliches Potential aufweisen, können aus verschiedenen Gründen interessant sein. So kann z.B. die Beobachtung der Kapazität bei hoher elektrischer Belastung in Abhängigkeit von der Zeit, der Temperatur oder der Frequenz Auskunft über den Zustand der Isolierung geben.

Einfacher lässt sich mit der sogenannten „Betriebskapazität“ /Küp1988/ rechnen. Diese stellt eine Ersatzkapazität für einen bestimmten Leiter dar, die den gleichen Ladestrom aufnehmen würde, wie der entsprechende Leiter bei Nennbetrieb des Leitersystems. Die Betriebskapazität ist also eine Ersatzkapazität für eine bestimmte Betriebsart.

Allgemein gelten für die Betriebskapazität und den Ladestrom:

$$C_{Bi} = \frac{\underline{I}_{Li}}{j\omega \underline{U}_{i0}}.$$

C_{Bi} = Betriebskapazität des Leiters i aus einem System von n Leitern

$\underline{I}_{Li}$ = Ladestrom, den der Leiter i bei Nennbetrieb aufnimmt

ω = Kreisfrequenz des (sinusförmigen) Spannungssystems

$\underline{U}_{i0}$ = Betriebsspannung des Leiters i gegen Erde

Die Betriebskapazität eines Leiters eines beliebigen Spannungssystems wird aus dem Ladestrom berechnet, den dieser Leiter bei Betriebsspannung aufnimmt und kann immer nur für eine bestimmte Betriebsart angegeben werden.

Im Folgenden wird für eine symmetrische Drehstromfreileitung die Betriebskapazität des Leiters der Phase 1 abgeleitet.

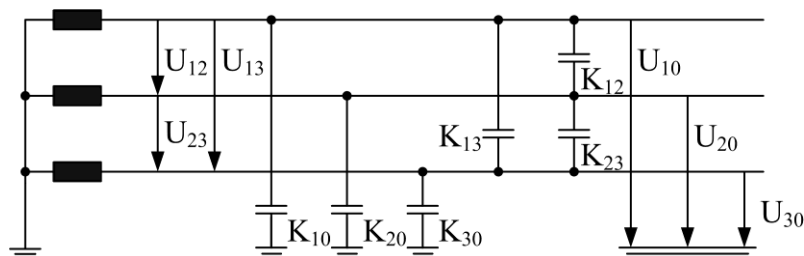


Bild 3.6: Teilkapazitäten der symmetrischen Drehstromfreileitung

Der Ladestrom, den die Phase 1 im Betrieb aufnimmt, ergibt sich zu:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{L1} &= j\omega K_{12}\underline{U}_{12} + j\omega K_{13}\underline{U}_{13} + j\omega K_{10}\underline{U}_{10} \\ &= j\omega K_{12}(\underline{U}_{10} - \underline{U}_{20}) + j\omega K_{13}(\underline{U}_{10} - \underline{U}_{30}) + j\omega K_{10}\underline{U}_{10}.\end{aligned}$$

Bei der Berechnung der Betriebskapazität von Drehstromkabeln muss je nach Kabeltyp die Wirksamkeit verschiedener Teil- und Erdkapazitäten berücksichtigt werden. Bei Radialfeldkabeln (Bild 3.7) bilden die Leiter nur Teilkapazitäten gegen Erde, da sie gegenseitig durch einen Metallschirm bzw. metallisierte Folien abgeschirmt sind.

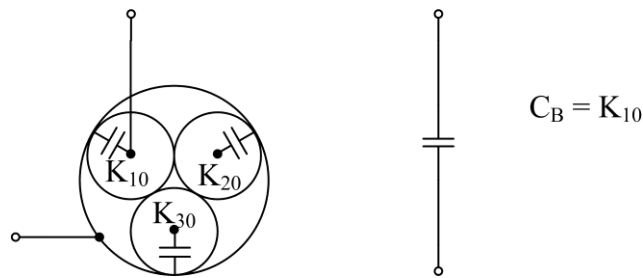


Bild 3.7: Anordnung zur Ermittlung der Betriebskapazität eines Radialfeldkabels

Aus Symmetriegründen gilt bei Radialfeldkabeln

$$K_{12} = K_{13} = K_{23} = 0 \text{ und}$$

$$K_{10} = K_{20} = K_{30}.$$

Ferner gilt bei einem symmetrischen Drehstromsystem

$$\underline{U}_{10} + \underline{U}_{20} + \underline{U}_{30} = 0.$$

Damit ergibt sich

$$\underline{I}_{L1} = j\omega \underline{U}_{10} K_{10}.$$

Die Betriebskapazität der Phase 1 eines Radialfeldkabels ergibt sich also zu

$$C_{B1} = K_{10}.$$

3.5 Verlustfaktor eines Radialfeldkabels

Beim Radialfeldkabel, bei dem die Betriebskapazität mit der gemessenen Kapazität K_{10} identisch ist, entspricht der dabei ermittelte Verlustfaktor $\tan \delta_{10}$ dem der Betriebskapazität C_B

$$I_R = \underline{U} \omega C_B \tan \delta_B = \underline{U} \cdot \omega \cdot K_{10} \tan \delta_{10}.$$

3.6 Messung des Verlustfaktors mit der Scheringbrücke

Obwohl die Scheringbrücke im Versuch selbst nicht zum Einsatz kommt, soll die Funktionsweise dieser Messmethode hier vorgestellt werden, da solche Brücken immer noch zu finden sind und das Messprinzip sehr anschaulich ist.

3.6.1 Allgemeines

Von allen Vergleichsverfahren zur Messung von Kapazitäten ergeben Wechselstrombrücken die genauesten Ergebnisse. Der Vorteil der Scheringbrücke besteht darin, dass Kapazität und Verlustfaktor eines Prüflings C_{test} mit der Impedanz $\underline{Z}_1$ auch bei Nennspannung gefahrlos gemessen werden können.

3.6.2 Abgleichbedingungen

Zum gefahrlosen Abgleich ist die Schaltung (Bild 3.8) im Allgemeinen so dimensioniert, dass an den Abgleichelementen R_4 , C_4 und R_3 nur Spannungsabfälle von wenigen Volt anstehen. Sollte im Falle eines Durch- oder Überschlags am Prüfling $\underline{Z}_1$ oder am Referenzkondensator C_{ref} (auch als Normalkondensator bezeichnet) Hochspannungspotential an die Brückenpunkte A oder B gelangen, so werden die Abgleichelemente und der Bedienende durch parallel geschaltete Überspannungsableiter geschützt, die im normalen Betriebszustand nicht leitend sind.

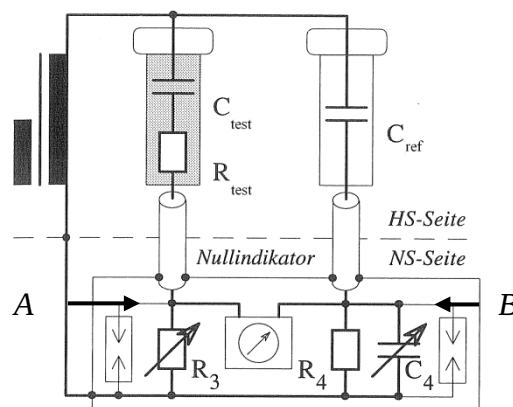


Bild 3.8: Scheringbrücke

Der Abgleich der Brücke erfolgt durch abwechselndes Verstellen von R_3 und C_4 . Im abgeglichenen Zustand besitzen die Knotenpunkte A und B gleiches Potential, womit die Spannung über dem oszillographischen Nullindikator zu Null wird. In diesem Fall ist das Übersetzungsverhältnis der beiden als Spannungsteiler aufgefassten Brückenzweige $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_3$ und $\underline{Z}_{ref}$, $\underline{Z}_4$ gleich groß.

Die komplexen Impedanzen sind beschrieben durch

$$\underline{Z}_1 = R_{\text{test}} + \frac{1}{j\omega C_{\text{test}}} \quad \underline{Z}_3 = Z_3 = R_3$$

$$\underline{Z}_{\text{ref}} = \frac{1}{j\omega C_{\text{ref}}} \quad \frac{1}{\underline{Z}_4} = \frac{1}{R_4} + j\omega C_4.$$

Die Bedingung für den Abgleich der Brücke lautet

$$\frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3} = \frac{\underline{Z}_{\text{ref}}}{\underline{Z}_4}$$

Aus dem Vergleich der Real- und Imaginärteile folgt

$$R_{\text{test}} = \frac{C_4}{C_{\text{ref}}} R_3 \quad \text{und}$$

$$C_{\text{test}} = C_{\text{ref}} \frac{R_4}{R_3}$$

Mit $\tan \delta_{\text{test}} = R_{\text{test}} \omega C_{\text{test}}$ ergibt sich

$$\tan \delta_{\text{test}} = R_4 \omega C_4.$$

Wenn man R_4 festlegt, hat man für jede Unbekannte ein variables Element, also

$$\tan \delta_{\text{test}} \sim C_4 \quad \text{und}$$

$$C_{\text{test}} \sim \frac{1}{R_3}.$$

Zu beachten ist, dass in der Scheringbrücke zur Vereinfachung der Berechnung von R_{test} und C_{test} das Prüfobjekt durch die Serienschaltung einer Kapazität C_{test} und eines Widerstands R_{test} ersetzt wird. Die Kapazität C_p der Parallelersatzschaltung des Prüflings (Bild 3.5a) ist kleiner als C_{test}

$$C_p = C_{\text{test}} \frac{1}{1 + \tan^2 \delta_{\text{test}}}$$

Dieser Unterschied tritt allerdings erst bei relativ großen Werten von $\tan \delta$ in Erscheinung.

3.6.3 Aufbau eines Pressgaskondensators

Als Referenzkondensator C_{ref} können für niedrigere Spannungen Luft-, Glimmer- oder Kunststoff-Folienkondensatoren verwendet werden. Für höhere Spannungen (ab etwa 20 kV) und Messungen mit hoher Genauigkeit werden ausschließlich Pressgaskondensatoren benutzt.

Pressgaskondensatoren sind nahezu verlustfrei ($\tan \delta \approx 10^{-6}$) bei gleichzeitig hoher Spannungsfestigkeit, unabhängig vom Aufstellungsort und den elektrischen Feldern, die von außen auf sie einwirken. Man kann sie deswegen als Vergleichsnormale bei Hochspannungsmessungen verwenden.

Die Füllung besteht aus N_2 , CO_2 oder SF_6 . Wegen des im Kondensator herrschenden hohen Drucks wird die mittlere freie Weglänge im Gas verkleinert, so dass evtl. ausgelöste Elektronen unterhalb eines zur Lawinenbildung notwendigen Energieniveaus abgebremst werden (Zur Erinnerung: Durch höheren Druck wird der Arbeitspunkt auf der Paschen-Kurve nach rechts verschoben). Durch Verwendung eines elektronegativen Gases (SF_6) können geringere Betriebsdrücke eingestellt werden. Allgemein liegt der Betriebsdruck je nach Gasart zwischen 3 – 14 bar bei 20 °C Fülltemperatur.

Aufbau:

Um die Messkapazität herum, die aus zwei rotationssymmetrischen Metallteilen 1, 2 besteht, befindet sich ein Druckbehälter 4, der gleichzeitig als Isolation zwischen Hochspannung und Erde dient (Bild 3.9). Die Niederspannungselektrode 2 ragt in die Hochspannungselektrode 1 hinein und wird so von dieser gegen äußere Einflüsse geschirmt. Die Zuleitung zur Niederspannungselektrode verläuft durch ein tragendes, geerdetes Rohr 3, welches gleichzeitig als Schutzzyylinder, bzw. Schirm wirkt. Die Elektroden des Pressgaskondensators sind poliert, und ihr Abstand voneinander ist so gewählt, dass bei Betriebsspannung keine unzulässigen Feldstärken auftreten.

Daten des Referenzkondensators:

$$C_{ref} = 100,7 \text{ pF für } \vartheta = 20 \text{ °C und } p = 1,4 \text{ MPa} = 14 \text{ bar}$$

$$U_N = 200 \text{ kV}$$

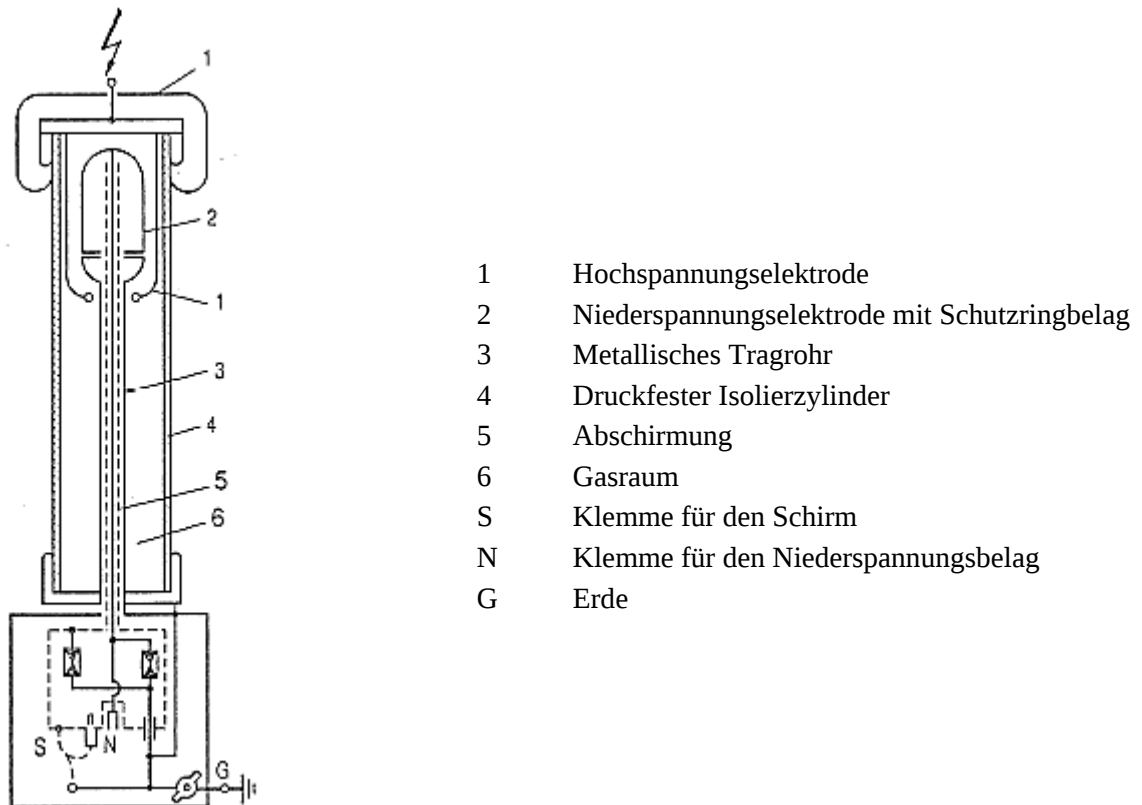


Bild 3.9: Schnittbild des Pressgas-Referenzkondensator mit doppelter Schirmung

4 Literatur

- Schwab, A. J. Hochspannungsmeßtechnik; 2. Auflage; 1981; Springer Verlag
- Beyer, M.; Boeck, W.; Hochspannungstechnik; 1. Auflage; 1986; Springer Verlag
Möller, K.; Zaengl, W.
- Küpfmüller, K. Theoretische Elektrotechnik; 12. Auflage; 1988; Springer Verlag
- Heinhold, L.; Stubbe, R. Kabel und Leitungen für Starkstrom; 5. Auflage; 1999; PUBLICIS Kommunikations Agentur
- DIN e.V. Hochspannungs-Prüftechnik: Teilentladungsmessungen IEC 60270; 4. Auflage; 2001 VDE-Verlag GmbH
- Küchler, A. Hochspannungstechnik; 3. Auflage; 2009; Springer Verlag
- König, D.; Narayana Teilentladungen in Betriebsmitteln der Ener-
Rao, Y. gietechnik, 1. Auflage; 1993; VDE- Verlag

5 Kontrollfragen

1. Was sind Teilentladungen?
2. Welche Arten von Teilentladungen gibt es?
3. Welche Messverfahren gibt es?
4. Warum werden Teilentladungen gemessen?
5. Wodurch unterscheiden sich die drei Schaltungen in den Abbildungen Bild 2.5, Bild 2.7 und Bild 2.8?
6. Weshalb muss die Messeinrichtung für jeden Prüfling neu kalibriert werden?
7. Erklären Sie den Aufbau eines Radialfeldkabels.
8. Welche dielektrischen Verlustmechanismen gibt es?
9. Nennen Sie drei Polarisationsverluste.
10. Was ist die Definition und die Bedeutung der Betriebskapazität?
11. Wie kann man die Betriebskapazität eines Radialfeldkabels messen?
12. Erklären Sie den $\tan\delta$ im Reihen- und Parallelersatzschaltbild (Zeigerdiagramm).
13. Leiten Sie die Abgleichbedingungen der Scheringbrücke her.
14. Erläutern Sie den prinzipiellen Aufbau von Generatorstäben.
15. Welche wesentlichen Merkmale hat die Isolierung der Leiterstäbe, wie ist diese im Detail ausgeführt und welche markanten Eigenschaften ergeben sich daraus?

6 Versuchsaufbau

Für die Durchführung der Versuche stehen verschiedene Prüflinge zur Verfügung, deren TE-Verhalten und $\tan\delta$ - Werte mit Hilfe modernster Messtechnologie untersucht werden sollen.

6.1 TE-Messgerät MPD 600

Eingesetzt wird ein TE-Messgerät der Firma Omicron (MPD 600). Die Anleitung des TE-Messgerätes ist zusätzlich zu diesem Dokument vorhanden. Bitte arbeiten Sie diese Anleitung durch, damit Sie mit dem Anschluss des Messsystems und der grundlegenden Bedienung der Software vertraut sind.

6.2 Kalibrator CAL542B

Für die TE-Versuche steht ein Kalibrator mit einstellbaren Ladungen von 1 pC bis 100 pC (positive und negative Polarität) zur Verfügung.



Bild 6.1: Kalibrator CAL542B

6.3 $\tan\delta$ - Messsystem

Eingesetzt wird ein $\tan\delta$ -Messsystem der Firma Omicron (MI 600 Universal Current Measuring System). Dieses Messsystem besteht aus zwei MI 600 Sensor-Einheiten (der Referenzsensor und der Testobjektsensor), einem Omicron MCU 502 (Lichtwellenleiter auf USB Controller), einem Messshunt und einer PC Software. Die Messanordnung ist in Bild 6.2 dargestellt.

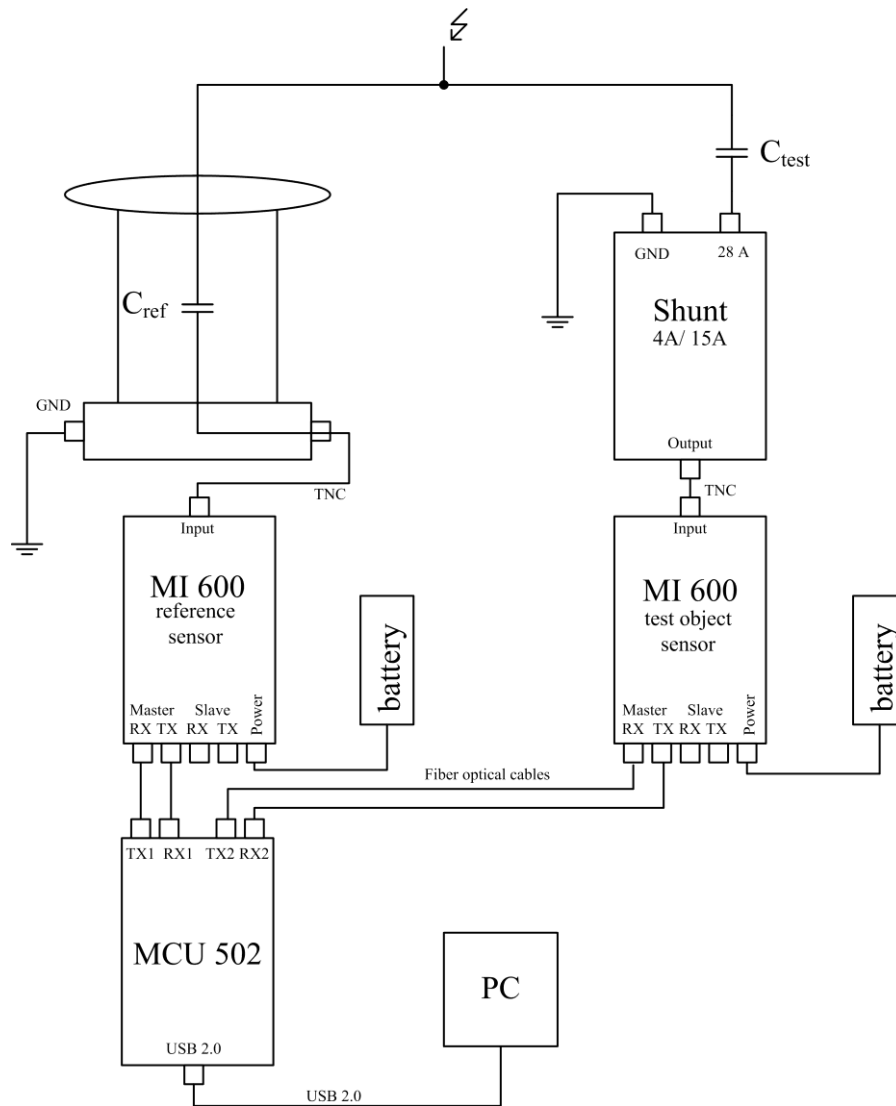


Bild 6.2: Messanordnung des MI 600 Universal Current Measuring System

6.3.1 Standardbauteile

- Shunt: Ein Shunt ist ein niederohmiger elektrischer Widerstand, der zur Messung von Strömen verwendet wird. Er schützt durch seine begrenzende Funktion die nachfolgenden Geräte vor einem Überstrom. Bei diesem Versuch sind Shunts von 4 A und 15 A verfügbar.
- C_{ref} : Normalkapazität: Diese Kapazität ist als ideale Kapazität anzusehen. Es steht ein SF₆ – Pressgaskondensator zur Verfügung.
- C_{test} : Verlustbehaftete Prüflingskapazität

6.3.2 MI 600 Sensoreinheit und MCU 502

Je eine der beiden Sensoreinheiten wird mit dem Normalkondensator (linker Zweig) und dem Prüfling (rechter Zweig) verbunden. **Auf einen korrekten Anschluss ist zu achten.** Diese Sensoren messen die Frequenz und den Strom. Die Eingangssignale werden von A/D-Wandlern digitalisiert. Anschließend wird eine Fast-Fourier-Transformation durchgeführt. Durch die Transformation ist es möglich die Grundwelle der Signale herauszufiltern.

Das MI 600 bestimmt die Zeitdifferenz der Nulldurchgänge der gemessenen Ströme. Aus der Zeitdifferenz Δt kann nun die Phasenverschiebung φ berechnet werden

$$\varphi = 360^\circ \cdot f \cdot \Delta t.$$

Am ideal angenommenen Normalkondensator tritt eine Phasenverschiebung von $\varphi = 90^\circ$ auf. In unserem Prüfling treten Verluste auf, somit beträgt die Phasenverschiebung φ nicht mehr 90° , sondern unterscheidet sich um den Verlustwinkel

$$\delta = 90^\circ - \varphi.$$

Die Prüflingskapazität C_{test} wird ebenfalls bestimmt. Die Spannung U im Normalkondensatorzweig ist gleich der Spannung im Prüflingszweig (der Spannungsabfall über den Shunt kann vernachlässigt werden). Daraus folgt

$$U_{ref} = I_{ref} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{ref}} = I_{test} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{test}} = U_{test}.$$

Diese Gleichung kann man nun nach C_{test} auflösen

$$C_{test} = C_{ref} \cdot \frac{I_{test}}{I_{ref}}.$$

6.3.3 MI PC-Software

In Bild 6.3 sind die für den Versuch wichtigsten Bedienelemente zusammengestellt.

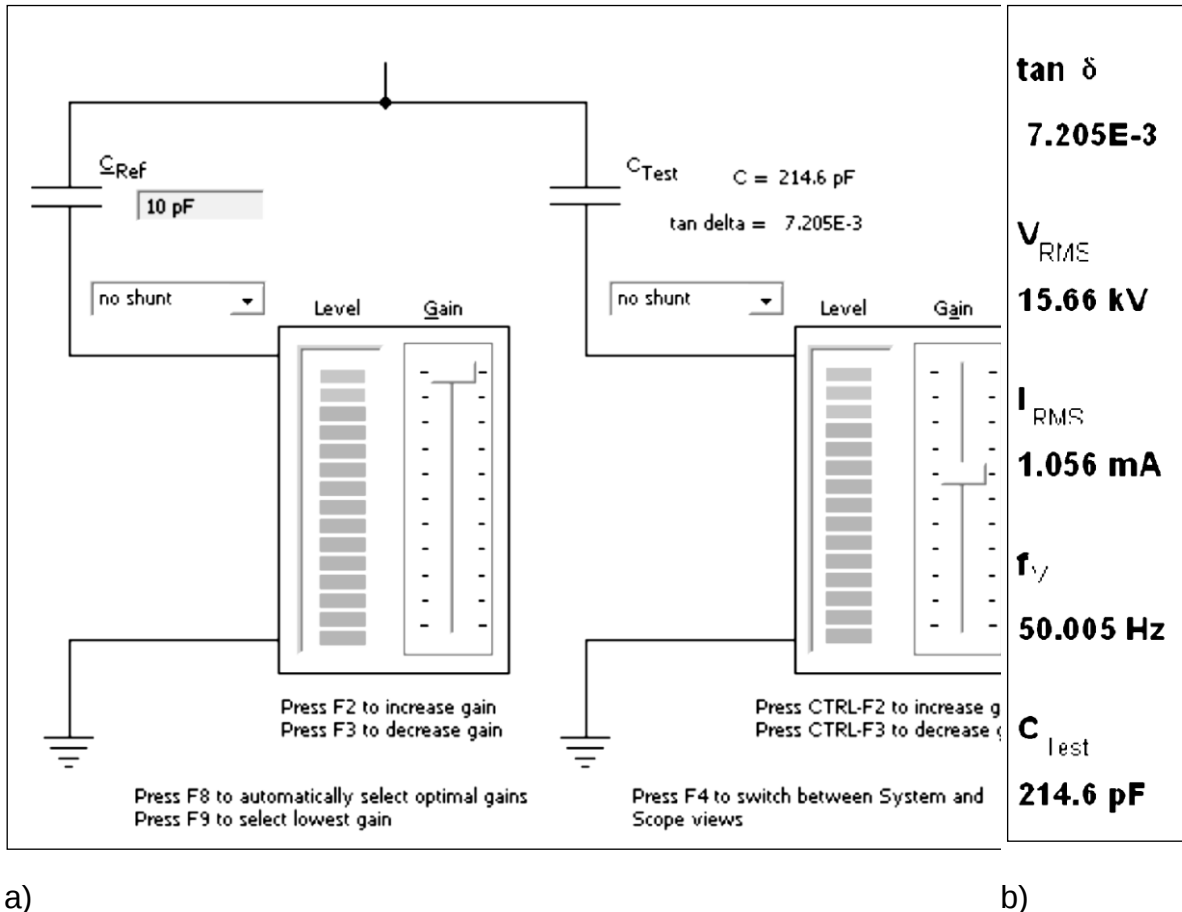


Bild 6.3: a): Visualization Display; b) Measured Quantities Display

In Bild 6.3a ist die gegebene Normalkapazität und der eingesetzte Shunt einzugeben. In Bild 6.3b werden alle Messergebnisse angezeigt: der Verlustfaktor $\tan \delta$, der Effektivwert (englisch: RMS - root mean square) der Spannung V_{RMS} und des Stromes I_{RMS} , die Frequenz f_V und die Prüflingskapazität C_{test} .

6.4 Prüfkreis, Spannungsquelle, Spannungsmessung

Zum Aufbau des Prüfkreises zur TE- und $\tan\delta$ -Messung stehen folgende Bauteile zur Verfügung:

- Prüftransformator mit Steuerpult, $U = 0 \dots 20 \text{ kV} / 50 \text{ Hz}$
- Wasserwiderstand
- Multimeter
- Spannungsteiler
- Koppelkondensator $C_K = 1200 \text{ pF}$ mit isoliertem Abgriff
- Normalkondensator $C_{ref} = 100,7 \text{ pF}$ für die Verlustfaktormessung

6.5 Prüflinge

6.5.1 Teilentladungsmessung

- Spitze-Platte Anordnung in Luft
- Plattenkondensatoranordnung mit Fehlstelle
- Generatorstab mit und ohne Halbleiter Feldsteuerung

6.5.2 $\tan\delta$ – Messung

- 5 Schutzring-Plattenkondensatoren mit verschiedenen Ölsorten unterschiedlicher Alterung
- Generatorstab mit und ohne Halbleiter Feldsteuerung (vgl. Teilentladungsmessung)

Protokoll zum Praktikum Elektroenergiesysteme,

Versuch Jupiter

Diagnostik elektrischer Betriebsmittel

Gruppe: Namen:

Datum:

Schwarz umrandete Aufgabenteile sind **vor** Versuchsbeginn zu beantworten!

Wichtige Hinweise zum Umgang mit Lichtwellenleitern (LWL):

- Bitte die Lichtwellenleiter nicht knicken und nicht auf sie treten, da sie sehr empfindlich sind und zerstört werden könnten.
- Beim Verbinden der Lichtwellenleiter (LWL) ist darauf zu achten, dass an den Kupplungen der LWL kleine Nuten zum richtigen Einstecken in die Buchsen der Messgeräte vorhanden sind.
- Bitte keine Gewalt anwenden!

1 Versuche zur Teilentladungsmessung

1.1 Allgemeine Hinweise zur Teilentladungsmessung

Die in diesem Abschnitt angegebenen allgemeinen Hinweise gelten für alle nachfolgenden TE-Messungen!

1.1.1 Kalibration

Erden Sie bei jeder neuen Messung alle in der Nähe befindlichen freien Potentiale und kalibrieren Sie mit folgenden Einstellungen, sofern keine anderen Vorgaben in der Versuchsbeschreibung vorliegen:

 $f_{\text{Center}} = 1 \text{ MHz}$ $Q_{\text{max}} = 100 \text{ nC}$ $Q_{\text{min}} = 1 \text{ pC}$

bandwidth = 300 kHz

 $Q_{\text{cal}} = 100 \text{ pC}$

Die Kalibrierung ist ohne Erdung durchzuführen.

Entfernen Sie vor der Teilentladungsmessung bei Hochspannung den Kalibrator und bringen Sie ihn aus dem Hochspannungsbereich! Er wird sonst zerstört!

1.1.2 Bestimmung der TE-Einsatzspannung

Erhöhen Sie langsam die Spannung, bis erste Teilentladungen sichtbar sind. Stellen Sie sicher, dass die beobachtete TE dauerhaft brennt und es sich nicht nur um ein Einzelereignis oder eine Störung handelt. Die TE-Einsatzspannung U_{TEE} ist die Spannung, ab der eine stabile TE zu beobachten ist.

1.1.3 Begrenzung der Prüfspannung

Achtung! Reduzieren Sie die Spannung des Trafos T1 am Steuerpult auf 50 %, um die Maximalprüfspannung auf etwa 10 kV zu begrenzen und somit einen Durchschlag der TE-Prüflinge zu verhindern. Schalten Sie nach der Aufzeichnung der Histogramme die Prüfspannung umgehend ab, um thermische Durchschläge, vor allem am Plattenkondensator mit Fehlstelle, zu verhindern.

1.1.4 Anleitung für Einstellungen der MPD600-Software im „Settings“-Tab und das Speichern der Screenshots

- Trigger source: Line Trigger 50 Hz
- High Sensitivity mode: aus
- Show individual PD events: ein (vor jedem Speichern der Bilder ausschalten)
- Einstellung der Diagramme auf unipolar logarithmisch
- Einstellungen für Q_{max} und Q_{min} selbst wählen
- Speichern der Bilder: Rechtsklick auf das Bild, danach „save current view as PNG image“

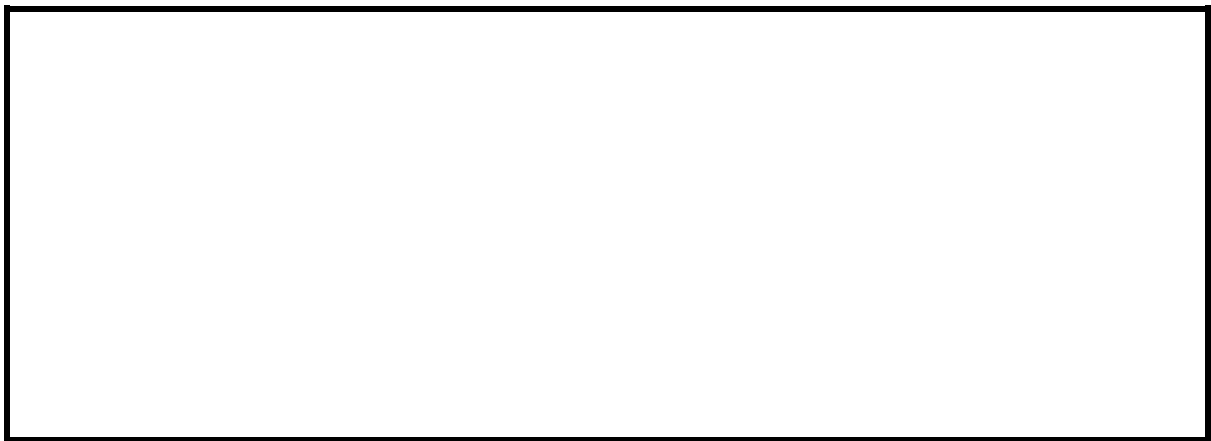
Speichern Sie die Bilder im Ordner „D:/Messungen/Praktikum Elektroenergiesysteme/GruppeX“, wobei X der Gruppennummer entspricht.

1.2 Übungen zur Kalibrierung bei einer indirekten Ankopplung

Bauen Sie entsprechend Kapitel 6.4 (alle Bauteile bis auf den Normalkondensator C_{ref} verwenden) sowie der Beschreibung des MPD 600 im Anhang den Messaufbau für die Teilentladungs- und Spannungsmessung auf. Als Prüfling dient die Spitze-Platte Anordnung in Luft. Skizzieren Sie die Schaltung mit dem kapazitiven Spannungsteiler zur Ermittlung der Prüfwechselspannung!

Hinweis: Dem V-Ausgang des Ankoppelvierpols ist ein Kondensator $C_n = 30 \mu\text{F}$ parallel geschaltet. C_n und der Koppelkondensator C_k bilden somit ebenfalls einen kapazitiven Teiler, welcher die angelegte Prüfwechselspannung zusätzlich misst.

Skizze: Messaufbau zur Teilentladungsmessung



Kalibrieren Sie die Schaltung nacheinander bei den in der Tabelle 1 gegebenen Mittenfrequenzen und Bandbreiten (Einstellung CAL542B: 100 pC) und vervollständigen Sie die Tabelle. Die Kalibration ist im Calibration-Tab vorzunehmen. **Speichern Sie das dazugehörige phasenaufgelöste Teilentladungsbild (Phase Histogramm) nach einer Messdauer von 10 Sekunden sowie die Fast-Fourier-Transformationsdarstellung (FFT) bei jedem Messbandpass.** Zur Aufzeichnung wählen Sie „Go“ im Settings-Tab und stellen eine Aufzeichnungsdauer von 10 Sekunden ein. Kalibrieren Sie nach jeder Änderung der Mittenfrequenz oder der Bandbreite neu.

-

Nr.	Mittenfrequenz f_{Center} [kHz]	Bandbreite [kHz]	Grundstörpegel Q_{IEC} [pC]
1.	300	300	
2.	6000	1000	
3.	10000	300	

Tabelle 1

Frage: Beschreiben und vergleichen Sie die drei Messungen im Hinblick auf den Grundstörpegel.

Frage: Welches Frequenzfenster eignet sich am besten? Begründen Sie Ihre Wahl!

1.3 Vorbereitung zur Teilentladungsmessung

Berechnen Sie zunächst das theoretische Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}_{\text{theoretisch}}$ des kapazitiven Spannungsteilers bestehend aus dem Koppelkondensator $C_k = 1200 \text{ pF}$ und dem Kondensator $C_n = 30 \text{ }\mu\text{F}$ (Eingangskapazität des MPD600).

$\ddot{u}_{\text{theoretisch}} =$

Legen Sie nun **an die bestehende Messanordnung** eine Spannung von $3 \text{ kV}_{\text{eff}}$ an und messen Sie sie mittels des orangenen Spannungsteilers ($\ddot{u} = 5000$) und des Digitalmultimeters. Stellen Sie das Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}_{\text{MPD}}$ am MPD 600 ein, indem Sie den gemessenen Wert der Prüfspannung im Calibration-Tab eingeben. Geben Sie nun das Übersetzungsverhältnis an, welches von der Software berechnet wird.

$\ddot{u}_{\text{MPD}} =$

Warum unterscheidet sich das berechnete vom gemessenen Übersetzungsverhältnis?

1.4 Teilentladungsmessung an einer Spitze-Platte-Anordnung: Spitze an Hochspannung

Schließen Sie den Spitze-Platte-Prüfling an, indem Sie die Spitze mit der Hochspannung verbinden und die Plattenelektrode erden.

Kalibrieren Sie gemäß Kapitel 1.1.1 und geben Sie den Grundstörpegel Q_{IEC} an:

$Q_{IEC} =$

Bestimmen Sie die TE-Einsetzspannung (siehe Kapitel 1.1.2).

Zeichnen Sie das Teilentladungsbild bei U_{TEE} 30 s lang auf und speichern Sie es zusammen mit dem zugehörigen Phasen Histogramm.

$U_{TEE} =$

Erhöhen Sie die Spannung bis sich an einer anderen Stelle innerhalb der Prüfspannungsperiode weitere TE ergeben. Geben Sie die Einsetzspannung dieser TE an, zeichnen Sie wiederum 30 s lang auf, und speichern Sie das Histogramm.

$U_{TEE} =$

Frage: In welchen Bereichen der Prüfspannungsperiode treten TE auf?

Frage: Um welche Art von Teilentladungen handelt es sich?

1.5 Teilentladungsmessung an einer Spitze-Platte-Anordnung: Platte an Hochspannung

Verbinden Sie nun die Plattenelektrode mit der Hochspannung und erden Sie die Spitze.

Überlegen Sie, ob eine Kalibration durchgeführt werden muss und geben Sie den Grundstörpegel Q_{IEC} an:

$Q_{IEC} =$

Bestimmen Sie die TE-Einsetzspannung.

Zeichnen Sie die Teilentladungen 30 s lang als Histogramm auf und speichern Sie es.

$U_{TEE} =$

Erhöhen Sie die Spannung bis sich an einer anderen Stelle innerhalb der Prüfspannungsperiode weitere TE ergeben. Geben Sie die Einsetzspannung dieser TE an, zeichnen Sie wiederum 30s lang auf, und speichern Sie das Histogramm.

$U_{TEE} =$

Frage: Haben Sie neu kalibriert? ☐ ja ☐ nein. Falls ja, warum?

Frage: In welchen Bereichen der Prüfspannungsperiode treten TE auf?

Frage: Um welche Art von Teilentladungen handelt es sich?

1.6 Teilentladungsmessung an Plattenkondensator mit Fehlstelle

Schließen Sie den sich im Ölbad befindlichen Plattenkondensator mit Fehlstelle (ein mit Klebestreifen abgedichtetes Bohrloch in einer Plexiglasplatte) an. Verbinden Sie eine Plattenelektrode mit Hochspannung und erden Sie die andere.

Überlegen Sie, ob eine Kalibration durchgeführt werden muss und geben Sie den Grundstörpegel Q_{IEC} an:

$Q_{IEC} =$

- Gehen Sie bei der Bestimmung der TE-Einsatzspannung und der Speicherung der Histogramme wie oben vor.
- Zeichnen Sie nun die Teilentladungen bei $U_{\max} = 10 \text{ kV}$ 30 s lang als Histogramm auf und speichern Sie es. Schalten Sie die Prüfspannung unmittelbar nach der Aufzeichnung ab.

Frage: Haben Sie neu kalibriert? ☐ ja ☐ nein. Falls ja, warum?

Frage: In welchen Bereichen der Prüfspannungsperiode treten TE auf?

Frage: Um welche Art von Teilentladungen handelt es sich?

1.7 Teilentladungsmessung an einem Leiterstab ohne Halbleiter Feldsteuerung

Schließen Sie den Leiterstab ohne Halbleiter Feldsteuerung an. Die Halterung soll dabei an Hochspannung, der Leiterstab an Erdpotential angeschlossen werden.

Überlegen Sie, ob eine Kalibration durchgeführt werden muss und geben Sie den Grundstörpegel Q_{IEC} an:

$Q_{IEC} =$

Gehen Sie bei der Bestimmung der TE-Einsatzspannung und der Speicherung der Histogramme wie oben vor.

$U_{TEE} =$

Zeichnen Sie nun die Teilentladungen bei $U_{max} = 6 \text{ kV}$ 30 s lang als Histogramm auf und speichern Sie es. Schalten Sie die Prüfspannung unmittelbar nach der Aufzeichnung ab.

Frage: Haben Sie neu kalibriert? ☐ ja ☐ nein. Falls ja, warum?

Frage: In welchen Bereichen der Prüfspannungsperiode treten TE auf?

Frage: Um welche Art von Teilentladungen handelt es sich?

1.8 Teilentladungsmessung an einem Leiterstab mit Halbleiter Feldsteuerung

Schließen Sie den Leiterstab mit Halbleiter Feldsteuerung an. Die Halterung soll dabei an Hochspannung, der Leiterstab an Erdpotential angeschlossen werden.

Überlegen Sie, ob eine Kalibration durchgeführt werden muss und geben Sie den Grundstörpegel Q_{IEC} an:

$Q_{IEC} =$

Gehen Sie bei der Bestimmung der TE-Einsatzspannung und der Speicherung der Histogramme wie oben vor.

$U_{TEE} =$

Zeichnen Sie nun die Teilentladungen bei $U_{max} = 10 \text{ kV}$ 30 s lang als Histogramm auf und speichern Sie es. Schalten Sie die Prüfspannung unmittelbar nach der Aufzeichnung ab.

Frage: Haben Sie neu kalibriert? ☐ ja ☐ nein. Falls ja, warum?

Frage: In welchen Bereichen der Prüfspannungsperiode treten TE auf?

Frage: Um welche Art von Teilentladungen handelt es sich?

Vergleichen Sie die Ergebnisse von beiden Stäben und versuchen Sie es zu beurteilen.

2 Versuche zum Verlustfaktor $\tan \delta$

In diesem Versuchsteil soll der Verlustfaktor der unterschiedlich isolierten Generatorstäbe untersucht und interpretiert werden. Weiterhin wurden verschiedene Ölproben von Transformatoren an die Universität geschickt. Anhand des ermittelten ε_r und $\tan \delta$ der Proben sollen Aussagen über den Alterungszustand des Öls getroffen werden.

2.1 Vorbereitung der Verlustfaktor-Messung an den Generatorstäben

Bauen Sie gemäß Kapitel 6.3 und 6.5 den Messaufbau für die Verlustfaktormessung auf.

Berechnen Sie die Leerkapazität C_0 der Generatorstäbe in erster Näherung.

Folgende Angaben stehen hierfür zur Verfügung; berücksichtigen Sie die gesamte wirksame Fläche des Generatorstabes:

L: 90 cm , B: 3,678 cm, H: 1,673 cm $d_{\text{Dielektrikum}}$: 3,3 mm

$C_0 =$

Skizzieren Sie die Schaltung:

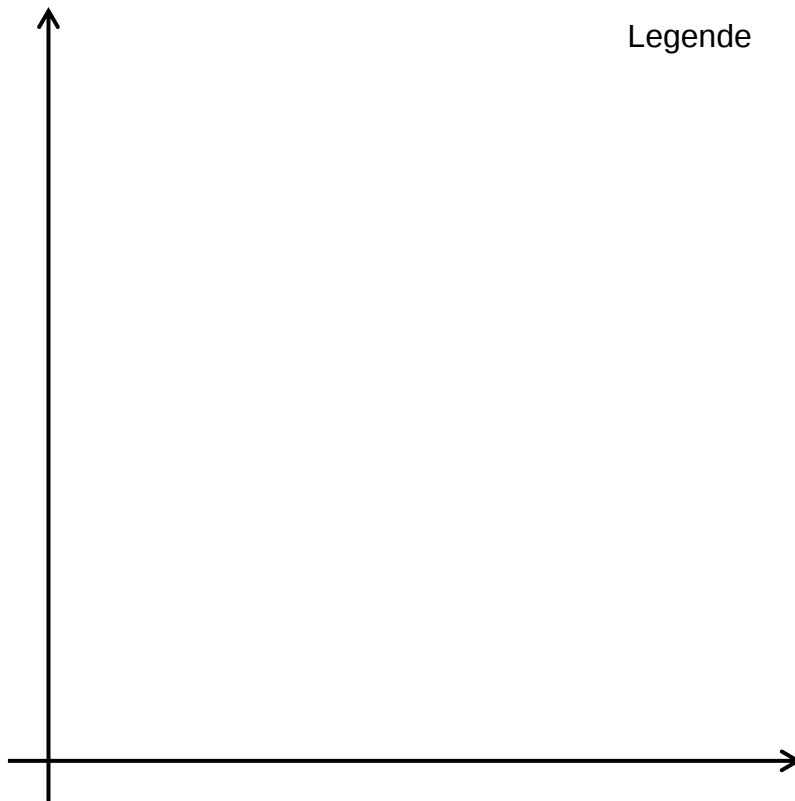
Der Eingangsbereich der Messeingänge der MI-Sensoren liegt bei $20\ \mu\text{A} < I < 100\ \text{mA rms}$. Außerdem steht je ein Shunt für die Maximalströme 4 A und 15 A zur Verfügung. Berechnen Sie den Strom, der in den Messeingang fließt, wenn eine Spannung von 5 kV rms am Prüfling anliegt. Würden Sie einen Shunt einsetzen und wenn ja, welchen und warum?

Hinweis: $\varepsilon_r \approx 7$

2.2 $\tan \delta$ -Messung an den Generatorstäben

Messen Sie den Verlustfaktor jedes Stabes mit Hilfe des $\tan \delta$ -Messsystems bei verschiedenen Spannungen. Tragen Sie Ihre Ergebnisse in Tabelle und das Diagramm ein. Wählen Sie hierfür eine geeignete Skala. Versuchen Sie die Ergebnisse anschließend zu beurteilen.

Spannung / kV	$\tan \delta$ (mit Feldsteuerung)	$\tan \delta$ (ohne Feldsteuerung)
1		
3		
5		
7		
9		



2.3 Vorbereitung $\tan\delta$ -Messung an den Ölproben

Bauen Sie gemäß Kapitel 6.3 und 6.5 den Messaufbau für die Verlustfaktormessung auf.

Die Schutzringkondensatoren, die zur Messung der Öle verwendet werden, haben einen Messelektrorendurchmesser von 76 mm und einen Plattenabstand von 2 mm .

Berechnen Sie die Leerkapazität C_0 der Prüfgefäße.

$C_0 =$

Der Eingangsstrombereich der Messeingänge der MI-Sensoren liegt bei $20\text{ }\mu\text{A} < I < 100\text{ mA rms}$. Außerdem stehen je ein Shunt für die Maximalströme 4 A und 15 A zur Verfügung. Berechnen Sie den Strom der in den Messeingang fließt, wenn eine Spannung von 2 kV rms am Prüfling anliegt. Würden Sie einen Shunt einsetzen und wenn ja, welchen und warum?

Hinweis: $\varepsilon_{r,\text{öl}} \approx 2,3$

2.4 C und $\tan\delta$ - Messung an den Ölproben

Messen Sie die Kapazität und den Verlustfaktor jedes Ölkondensators mit Hilfe des $\tan\delta$ - Messsystems und vervollständigen Sie die Tabelle mit der Berechnung des ε_r . Die Messungen sind bei 2 kV durchzuführen. Bei welchem Öl könnte es sich um gealtertes Öl handeln?

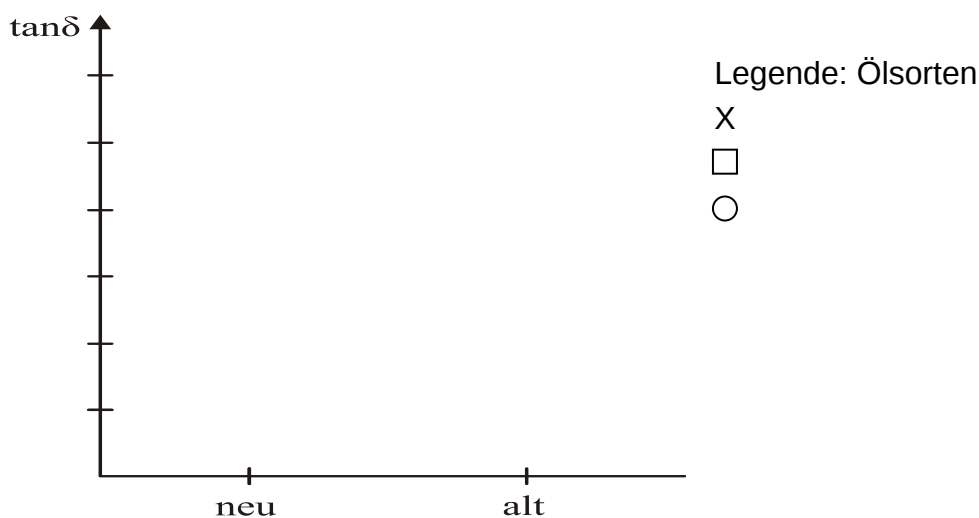
Leiten Sie die Formel für die Berechnung des ε_r mit Hilfe der allgemeinen Gleichung für die Kapazität eines Plattenkondensators her.

Hinweis: Setzen Sie die Leerkapazität C_0 als gegeben voraus.

$\varepsilon_r =$

Probe	Ölart	C_0 [pF]	C_s [pF]	$\tan\delta$	C_p [pF]	ε_r	Zustand
1	Mineralöl						
2	Mineralöl						
3	Bioöl						
4	Bioöl						
5	Betriebsgealtertes Trafoöl						

Wählen Sie eine geeignete Skala und übertragen Sie ihre Ergebnisse in folgendes Diagramm:



Versuchen Sie die Ergebnisse zu beurteilen.