

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

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

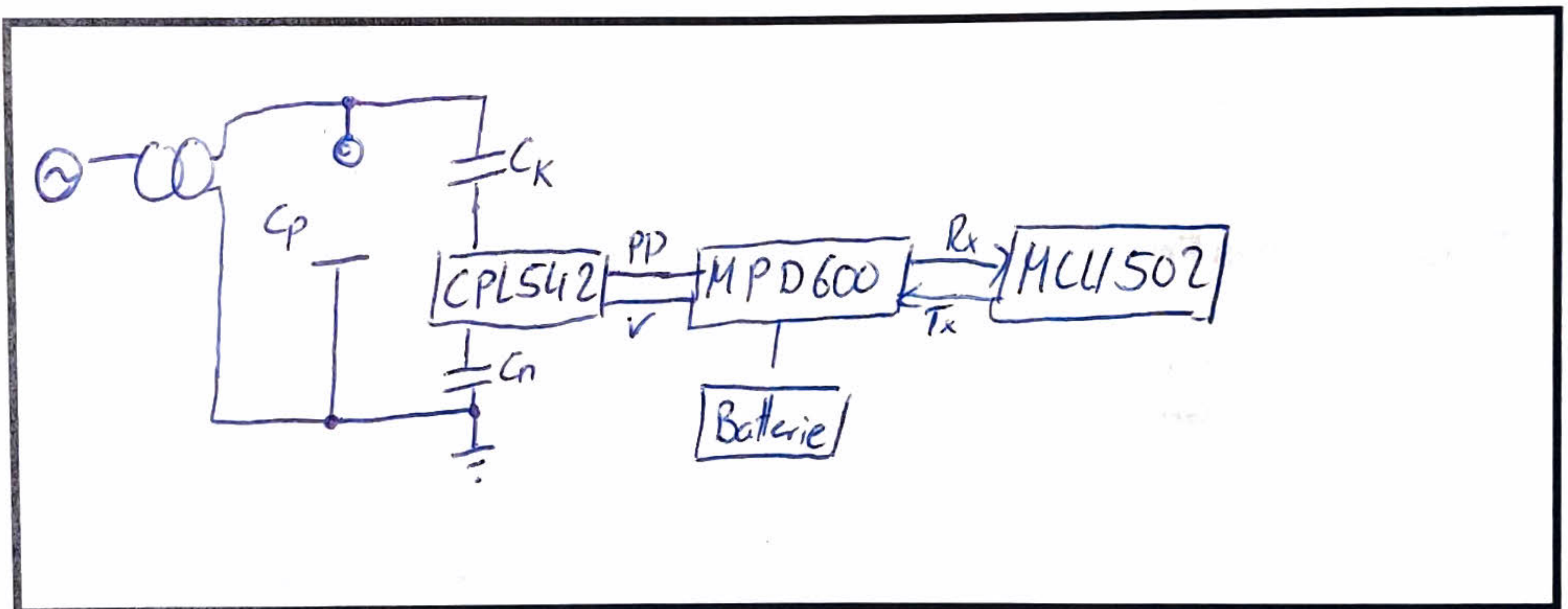
Die Kalibrierung ist ohne Erdung durchzuführen.

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	15,5
2.	6000	1000	3
3.	10000	300	8

Tabelle 1

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

Die 2. Messung hat den geringsten Grundstörpegel

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

2. eignet sich am besten: geringerer Grundstörpegel
höhere ~~Band~~ Bandbreite
somit höhere Impulsauflösung

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).

$$\ddot{u}_{\text{theoretisch}} = 2500.1$$

$$\ddot{u}_k = \frac{C_n + C_k}{C_k}$$

Legen Sie nun **an die bestehende Messanordnung** eine Spannung von $3 \text{ kV}_{\text{eff}}$ an und messen Sie ~~sie~~ mittels des gelben 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.

$$\ddot{u}_{\text{MPD}} = 24657$$

Warum unterscheidet sich das berechnete vom gemessenen Übersetzungsverhältnis?

- Messfehler, nicht genau auf 3 kV eingestellt
- Bauteiltoleranz, insbesondere Kondensator
- Streukapazität verändert Spannungsteiler

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:

$$Q_{IEC} = 2,156 \text{ pC}$$

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.

$$U_{TEE} = 5,023 \text{ kV}_{rms}$$

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.

$$U_{TEE} = 5,317 \text{ kV}$$

Frage: In welchen Bereichen der Prüfspannungsperiode treten TE auf?

zuerst negativer Scheitelwert
danach am positiven Scheitelwert

Frage: Um welche Art von Teilentladungen handelt es sich?

äußere TE - Koronaentladung

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:

$$Q_{IEC} = 2,45 \text{ pC}$$

Bestimmen Sie die TE-Einsatzspannung.

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

$$U_{TEE} = 5,08 \text{ kV}$$

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

$$U_{TEE} = 5,6 \text{ kV}$$

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

Anordnung umgebaut, neuer Aufbau

Frage: In welchen Bereichen der Prüfspannungsperiode treten TE auf?

zuerst am positiven Scheitelwert, danach am negativen Scheitelwert

Frage: Um welche Art von Teilentladungen handelt es sich?

äußere TE - Koronaentladung

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:

$$Q_{IEC} = 1,55 \text{ pC}$$

- Gehen Sie bei der Bestimmung der TE-Einsetzspannung 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?

Ja, neuer Prüfling

Frage: In welchen Bereichen der Prüfspannungsperiode treten TE auf?

vor negativem / positiven Scheitelwert, an ansteigender Flanke, im Nulldurchgang und teilweise im Scheitel

Frage: Um welche Art von Teilentladungen handelt es sich?

Innere Entladung - Hohlraumentladung

Außere Entladung - Koronaentladung
(im Scheitel)

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:

$$Q_{IEC} = 7 \text{ pC}$$

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

$$U_{TEE} = 4,17 \text{ kV}$$

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?

Ja, neuer Prüfling

Frage: In welchen Bereichen der Prüfspannungsperiode treten TE auf?

Scheitel positive/negative Halbwelle gleichzeitig, bei höheren Spannungen auch TE in der ~~Flanke~~ Flanke beider Polaritäten

Frage: Um welche Art von Teilentladungen handelt es sich?

Innere Entladung - Hohlraumentladung

Außere Entladung - Koronaentladung an der Kante von leitendem zu isolierendem Klebeband

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:

$$Q_{IEC} = 6 \text{ pC}$$

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

$$U_{TEE} = 6 \text{ kV}$$

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?

Ja, neuer Prüfling

Frage: In welchen Bereichen der Prüfspannungsperiode treten TE auf?

Weniger Entladung im Scheitel als zuvor $\Rightarrow$ weniger Koronaentladung
aber weiterhin bei ansteigender Flanke $\Rightarrow$ Hohlraumentladung

Frage: Um welche Art von Teilentladungen handelt es sich?

Innere Entladung $\rightarrow$ Hohlraumentladung

Außere Entladung - Koronaentladung

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

Einsatzspannung bei Stab mit Feldsteuerung höher, weil das E-Feld homogenisiert wird. Es treten ebenso weniger Koronaentladungen auf.

⇒ Halbleiter Feldsteuerung ist sinnvoll um TE zu reduzieren.

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

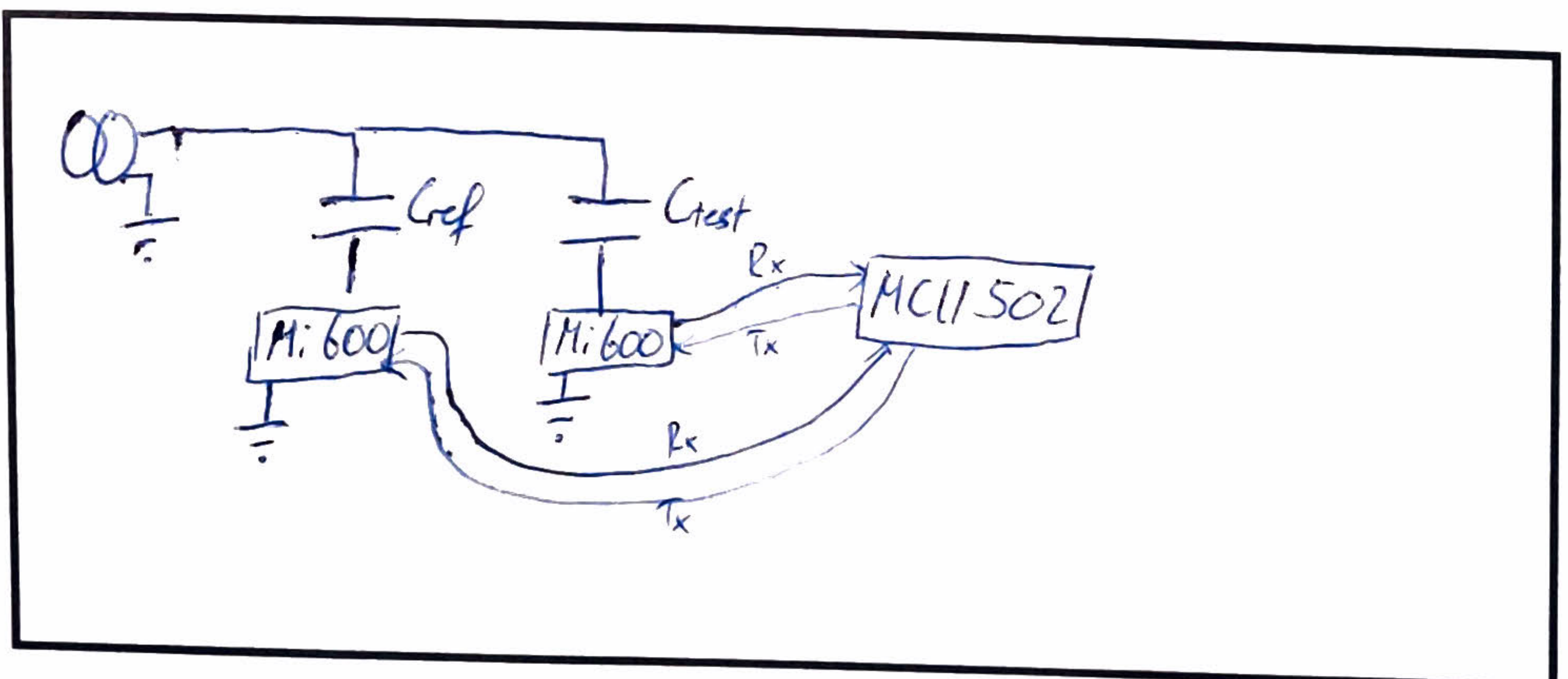
Bauen Sie gemäß Kapitel 6.3 und 6.5 den Messaufbau für die Verlustfaktormessung auf.

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 $d_{\text{Dielektrikum}}: 3,3 \text{ mm}$

$$C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} = \epsilon_0 \cdot \frac{2 \cdot B \cdot L + 2 \cdot H \cdot L}{d} = 258 \text{ pF}$$

Skizzieren Sie die Schaltung:



Der Eingangsbereich der Messeingänge der MI-Sensoren liegt bei $20\text{ }\mu\text{A} < I < 100\text{ mA rms}$. 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: $\epsilon_r \approx 7$

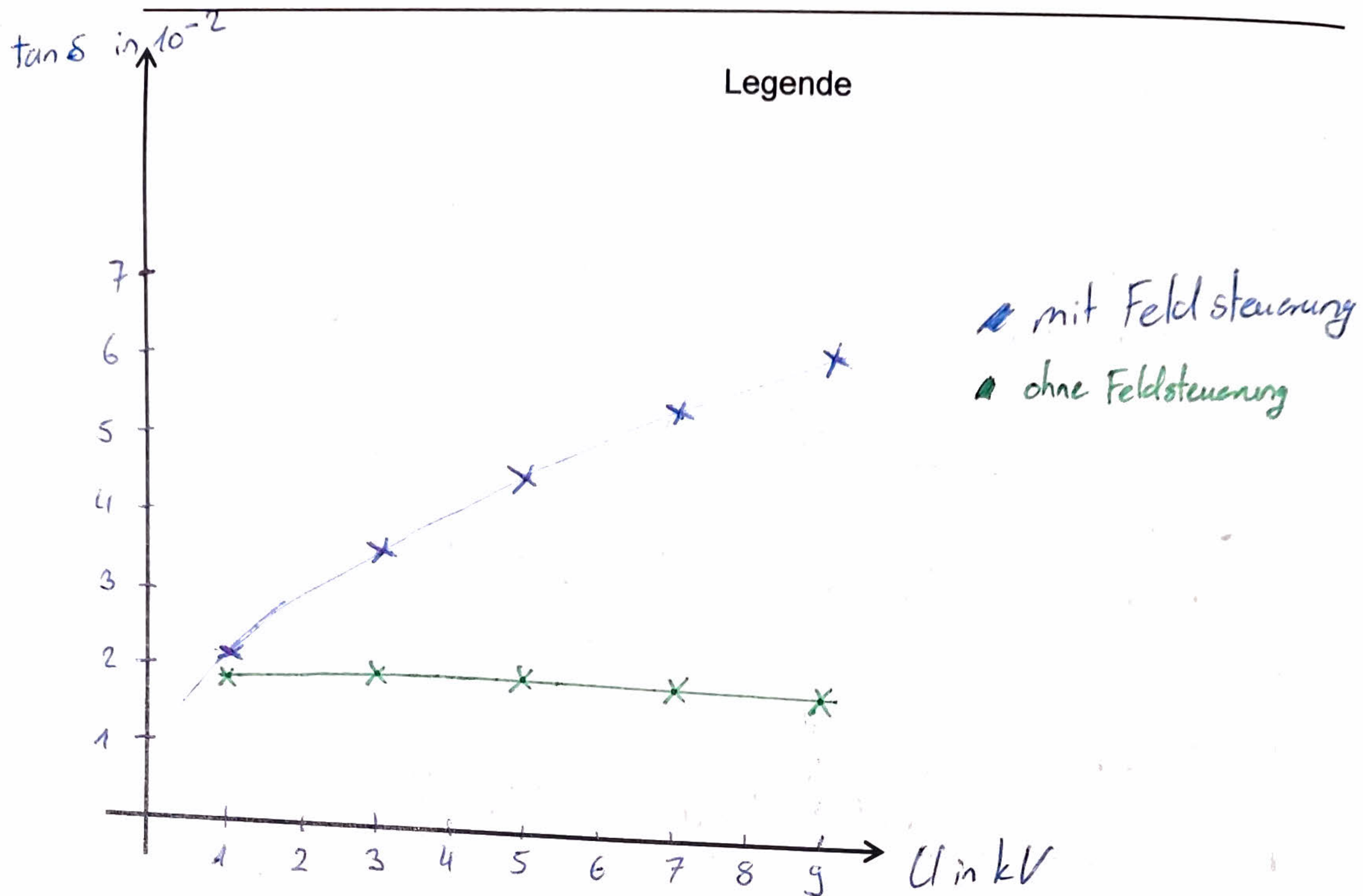
$$C_s = \epsilon_r \cdot C_0$$
$$I = \frac{U_{rms}}{\frac{1}{j\omega C}} = U_{rms} \cdot 2\pi \cdot f \cdot C = U_{rms} \cdot 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_r \cdot 258\text{ pF}$$
$$I = 2,84\text{ mA}$$

kein Shunt notwendig (auch bei 9kV)

2.2 **tan δ-Messung an den Generatorstäben**

Messen Sie den Verlustfaktor jedes Stabes mit Hilfe des tan δ-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 δ (mit Feldsteuerung)	tan δ (ohne Feldsteuerung)
1	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
3	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$2,02 \cdot 10^{-2}$
5	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$2,02 \cdot 10^{-2}$
7	$5,45 \cdot 10^{-2}$	$1,97 \cdot 10^{-2}$
9	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$1,94 \cdot 10^{-2}$



$\tan \delta = \frac{P}{Q}$ wenn $\tan \delta$ steigt, steigen die ohmschen Verluste

Bei Generatorstab mit Feldsteuerung steigen die Verluste mit steigender Spannung stärker an, als ohne Feldsteuerung.

Aufgrund der Erkenntnisse aus 1.8 muss ein geeigneter Kompromiss für Betriebsanwendung gewählt werden.

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 Messelektroden Durchmesser von 76 mm und einen Plattenabstand von 2 mm .

Berechnen Sie die Leerkapazität C_0 der Prüfgefäße.

$$C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} = \epsilon_0 \cdot \frac{\pi \frac{D^2}{4}}{d} = 20,08 \text{ pF}$$

Der Eingangsbereich der Messeingänge der MI-Sensoren liegt bei $20 \mu\text{A} < I < 100 \text{ mA rms}$. 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: $\epsilon_{r,\text{öl}} \approx 2,3$

$$I_{\text{rms}} = U_{\text{rms}} \cdot \omega C = U_{\text{rms}} \cdot 2\pi f \cdot \epsilon_r \cdot C_0$$

$$I_{\text{rms}} = 29,02 \mu\text{A}$$

2.4 C und tanδ - Messung an den Ölproben

Messen Sie die Kapazität und den Verlustfaktor jedes Ölkondensators mit Hilfe des tanδ - 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.

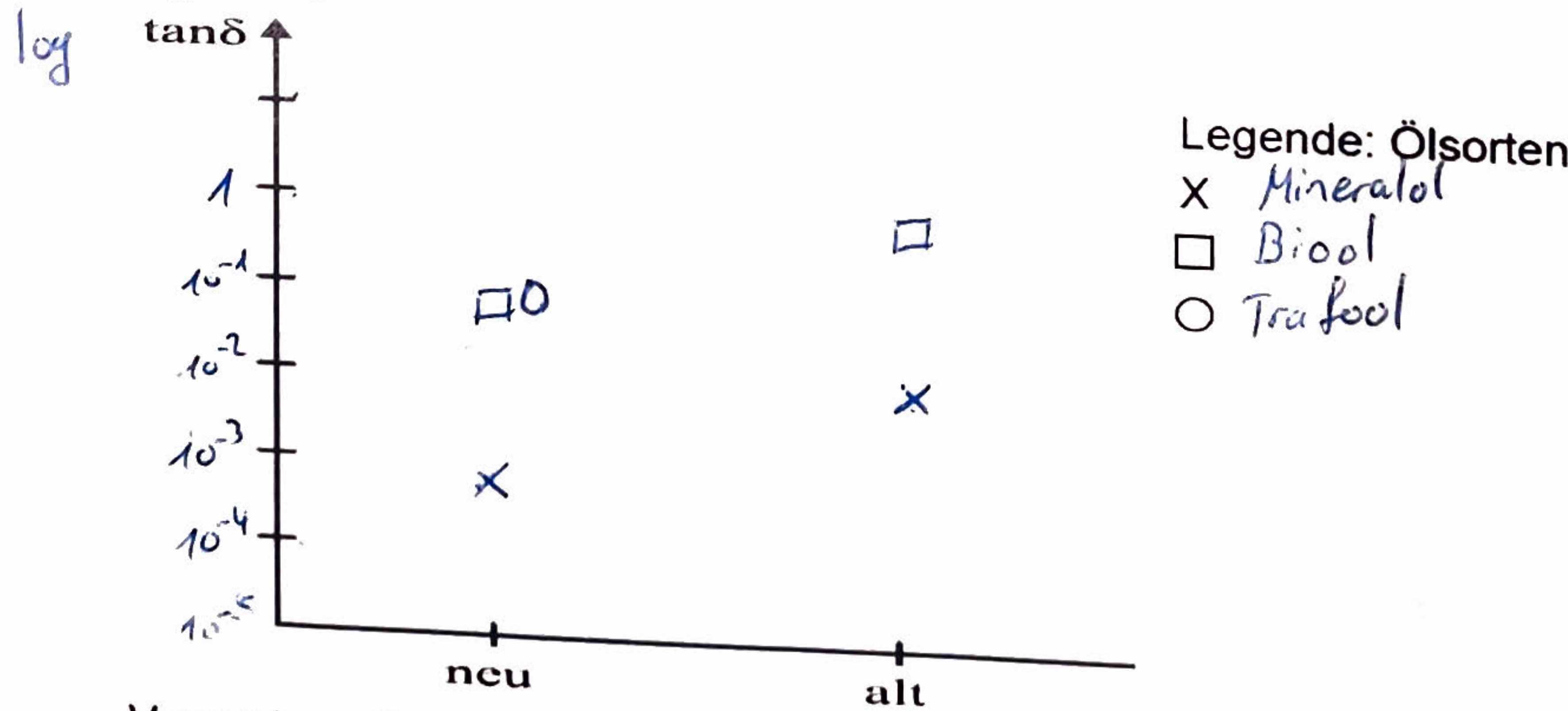
Hinweis: Setzen Sie die Leerkapazität C₀ als gegeben voraus.

$$\epsilon_r = \frac{C_s}{C_0}$$

Probe	Ölart	C ₀ [pF]	C _s [pF]	tanδ	C _p [pF]	ε _r	Zu-stand
1	Mineralöl	20,08	43,23	7·10 ⁻⁴	43,23	2,15	neu
2	Mineralöl	20,08	44,77	4·10 ⁻³	44,77	2,22	gealtert
3	Bioöl	20,08	62,61	4,4·10 ⁻²	62,50	3,12	neu
4	Bioöl	20,08	85,15	6,38·10 ⁻¹	60,52	4,24	gealtert
5	Betriebsgealtertes Trafoöl	20,08	43,6	4,8·10 ⁻²	43,50	2,17	gealtert

$$C_p = \frac{C_s}{1 + (\tan\delta)^2}$$

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



Versuchen Sie die Ergebnisse zu beurteilen.