



## Teilentladungen Lab #6

**227-0117-10L: MESS- & VERSUCHSTECHNIK**

Präsentiert von:



Begleitet von:

Prof. Dr. Christian M. Franck

Henning Janssen, Philipp Simka, Ondrej Sefl

Name	Matrikelnummer	Hauptbeitrag

10. Juni 2022

## 1 Inhalt

1	Inhalt .....	2
2	Einführung .....	3
2.1	Versuchsziel .....	3
2.2	Theorie .....	3
2.2.1	Teilentladungen (TE) .....	3
2.2.2	Grundlegender TE-Prüf- und Messkreis.....	4
2.2.3	Messung der TE-Stromimpulse .....	4
2.3	Versuchsvorbereitung.....	7
2.3.1	Verwendete Gerätschaften.....	7
2.3.2	Versuchsaufbau und -Ablauf.....	7
2.4	Messunsicherheiten.....	12
2.4.1	Messunsicherheiten durch Bauteile .....	12
2.4.2	Messunsicherheiten durch Versuchs- und Messmittel.....	12
3	Messprotokoll am 1.6.2022 .....	14
3.1	Genereller Versuchsaufbau .....	14
3.1.1	Verwendete Gerätschaften.....	14
3.1.2	Übersicht der vollzogenen Messungen.....	15
4	Ergebnisblatt.....	16
4.1	Kalibration und Bestimmung des Grundrauschens .....	16
4.1.1	Kalibrierung.....	16
4.1.2	Grundstörpegel .....	16
4.1.3	TE-Freiheit.....	17
4.2	Spitze zu Hochspannung .....	18
4.3	Spitze zu Erde .....	19
4.4	HS-Leiterseil .....	20
4.4.1	Trocken.....	20
4.4.2	Nass .....	20
5	Diskussion .....	22
5.1	Kalibration und Bestimmung des Grundrauschens .....	22
5.2	Spitze zu Hochspannung .....	22
5.3	Spitze zu Erde .....	22
5.4	HS-Leiterseil .....	23
5.4.1	Trocken.....	23
5.4.2	Nass .....	23
6	Eigenständigkeitserklärung.....	24

## 2 Einführung

### 2.1 Versuchsziel

Das Ziel des TE-Messversuchs ist die Erfassung der Ladung  $q = \int_0^\infty i(t)dt$ .

Im Vordergrund steht vielmehr die elektrische Messung und damit die quantitative Erfassung der Teilentladungen als das Verständnis der physikalischen Ursachen.

### 2.2 Theorie

#### 2.2.1 Teilentladungen (TE)

Mit Teilentladungen werden räumlich begrenzte elektrische Entladungen in einem Isolations-system bezeichnet. Diese treten immer dann auf, wenn die elektrische Feldstärke im Isolations-system an einer sehr lokalen Stelle so hoch wird, dass dort die Durchschlagsfestigkeit vom vorhandenen Isolierstoff überschritten wird. Dabei spielt es keine Rolle, ob diese Entladung an einer Metallelektrode oder frei im Isolierstoff (Hohlraum) entsteht.

Bei technischen Isoliersystemen werden TE durch unbeabsichtigte lokale Feldstärkeüberhöhungen, beispielsweise an leitfähigen Spitzen in Gasen, oder kleinen, gasgefüllten Hohlräumen in Feststoffen und Flüssigkeiten verursacht. Abhängig vom Entstehungsort wird in der Praxishäufig zwischen sog. "inneren TE" und "äusseren TE", sowie Gleitentladungen unterschieden.

#### **TE im Inneren**

Teilentladungen eines organischen Isolierstoffs stellen eine besondere Gefährdung dar. Werden sie nicht rechtzeitig erkannt, verursachen sie bei längerer Einwirkung eine irreversible Schädigung der Isolationsanordnung, bis hin zur Zerstörung durch einen vollständigen Durchschlag.

#### **Äussere TE / Koronaentladungen**

Äussere TE werden oft auch als Korona (-entladungen) bezeichnet. Sie entstehen in der Umgebung von metallischen Leitern oder Elektroden mit kleinem Krümmungsradius, die von Luft oder anderen Gasen umgeben sind, wie z.B. Hochspannungsfreileitungen und äussern sich aufgrund des Polaritätseffektes durch regelmässige Impulse konstanter Grösse im Bereich um den negativen Spannungsscheitel. Mit zunehmender Spannung nimmt die Häufigkeit der Impulse zu. Hier sind insbesondere die Verluste und die Lärmemission unerwünscht und weniger die "Schädigung" der Luftisolierung.

#### **Gleitentladungen**

Gleitladungen können entstehen, bei tangentialem Feldverlauf längs der Oberfläche einer Feststoffisolierung in einer Leiter-Erde-Anordnung, wie z.B. bei HS-Kabeln ohne geeignete Feldsteuerung am abisolierten Kabelende. Die Intensität der bei erhöhter Spannung entstehenden starken und unregelmässigen Entladungen wachsen mit steigender Spannungsamplitude an.

### 2.2.2 Grundlegender TE-Prüf- und Messkreis

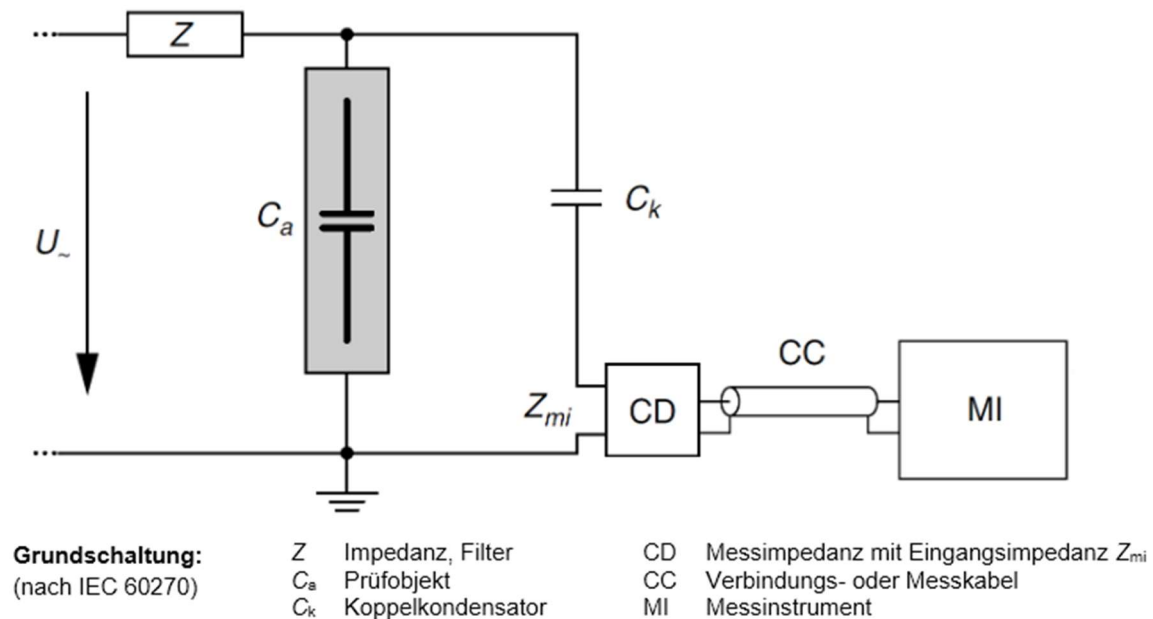


Abbildung 1: Grundlegender oder Klassischer TE-Prüf- und Messkreis (nach IEC 60270)

TE im oder am Prüfobjekt  $C_a$  bewirken an dessen Klemmen kleine, kurzzeitige Spannungseinbrüche, verbunden mit einer sprunghaften Erhöhung der Kapazität. Sofern die anliegende Spannung in der Lage ist, den wegen der Kapazitätserhöhung von  $C_a$  unvermeidlichen Spannungseinbruch sofort auszugleichen, können sehr kurzzeitige Stromimpulse (ns- oder  $\mu$ s-Bereich), sogenannte TE-Stromimpulse auftreten.

Im **klassischen TE-Messkreis** (siehe Abb.1) liegt ein Koppelkondensator  $C_k$  parallel zum Prüfobjekt  $C_a$  und übernimmt hier die Aufgabe, die AC- oder DC-Prüfspannung während des kurzzeitigen TE-Stromimpulses zu stabilisieren und den Spannungseinbruch auszugleichen.

Damit wird der TE-Stromimpuls  $i(t)$  zum "**Kreisstrom**" – er fließt aus  $C_k$  in das Prüfobjekt  $C_a$  hinein. Die **Messimpedanz CD** (coupling device) besteht immer mind. aus einem Hochpass, der die von der AC-Prüfspannung  $U_{\sim}$  hervorgerufenen Wechselströme und deren Oberwellen unterdrückt. Die nun messbar gemachten kurzzeitigen TE-Stromimpulse werden über die **Eingangsimpedanz  $Z_{mi}$**  in entsprechende Spannungsimpulse umgewandelt und über das Koaxialkabel CC auf das **Messinstrument MI** geführt.

Die **Impedanz Z** verringert einerseits die Einwirkung allfälliger hochfrequenter Störungen vom HS-Prüftransformator und andererseits ein Abfließen der TE-Impulse über die Streukapazität des HS-Transformators.

### 2.2.3 Messung der TE-Stromimpulse

#### Eigenschaften von TE-Stromimpulsen

TE-Stromimpulse von einer Spitze oder Nadel (sog. Trichel-Entladungen) in atmosphärischer Luft weisen einen sehr raschen Stromanstieg im Bereich von ca. 1 ns auf, gefolgt von einem langsameren Stromabfall, welcher nach ca. 60...100 ns beendet ist. Ist die speisende Spannung ausreichend starr,

## Einführung

kann der zeitliche Verlauf dieser TE-Ströme ein gutes Abbild der physikalischen Entladungsentwicklung sein. Deutlich kurzzeitigere TE-Stromimpulse kann man in gasförmigen Hohlräumen von kompakten Isolieranordnungen messen.

### Bestimmung der scheinbaren Ladung

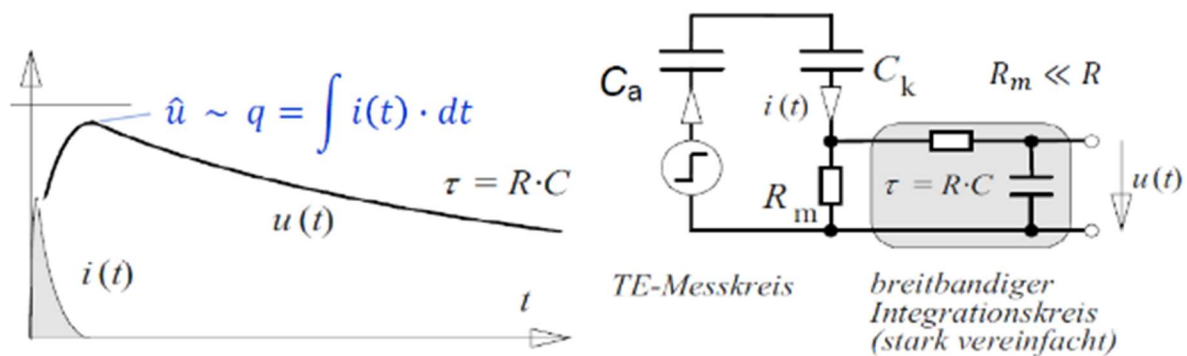


Abbildung 2: Breitbandige Integration des Ausgleichstromes  $i(t)$  in einem TE-Messkreis durch einen einfachen RC-Tiefpass

Eine lückenlose und zeitlich hochaufgelöste Messung der TE-Stromimpulse ist in der Praxis aus verschiedenen Gründen wie erforderliche Speichertiefe, hohe Abtastrate, Komplexität und Weiteren schwierig umzusetzen. Deshalb wurde die sogenannte scheinbare Ladung  $q$ , definiert als  $\int_0^\infty i(t) dt$  eingeführt.

Mit Hilfe einer Quasi-Integration kann der Scheitelwert  $\hat{u} \sim q = \int_0^\infty i(t) dt = C_k \cdot \Delta U'_\alpha$  mit guter Näherung angegeben werden.

Die scheinbare Ladung  $q$  wird dann mit  $q = |\hat{u}_{\max}| \cdot x$  berechnet, wobei  $x$  der jeweilige Umrechnungsfaktor und  $|\hat{u}_{\max}|$  der jeweilige Betrag der maximal gemessenen Spannung der TE ist. Die berechnete Ladung wird in pC angegeben.

### Messimpedanz CD

Im realen AC-Prüfkreis muss die Impedanz CD eine geeignete Hochpass-Charakteristik aufweisen, damit der betriebsfrequente Verschiebungsstrom vom Koppelkondensator  $C_k$ , sowie allfälligen Netzstörungen (Oberwellen), wirkungsvoll unterdrückt werden. In der Praxis wird dafür meist eine untere Grenzfrequenz  $f_{gu}$  von einigen 10 kHz bis zu ca. 200kHz gewählt. Bedingt durch den inneren Aufbau der Schaltung, mit dem integrierten Überspannungsschutz, ergibt sich für höhere Frequenzen unweigerlich immer auch ein Tiefpass-Verhalten, mit einer oberen Grenzfrequenz  $f_{go}$  von einigen 100kHz bis zu wenigen MHz. Für die sehr kurzzeitigen Stromimpulse  $i(t)$  bedeutet diese Bandpass-Charakteristik der Messimpedanz CD eine mehr oder weniger ausgeprägte Integration, was einen entsprechend "verzerrten" Signalverlauf der Spannungsimpulse  $u(t)$  bewirkt.

### Beobachtungen zusammen mit der Prüfspannung

Mit Hilfe der charakteristischen TE-Graphen können Fehler oder Defekte einfacher erkannt werden. Dem entsprechend verfügen die meisten modernen Messgeräte über eine graphische Darstellung. Diese können bei der Fehlersuche sehr behilflich sein.

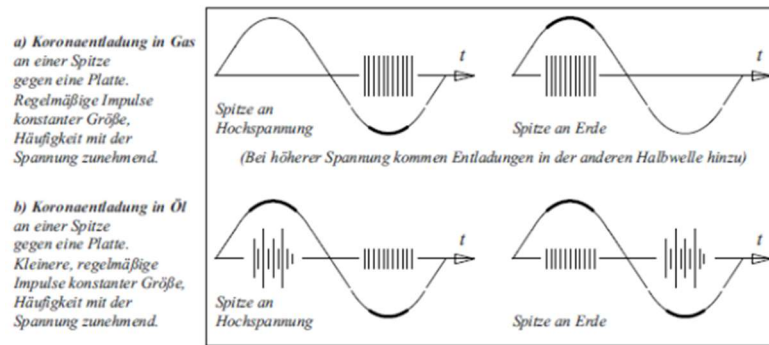


Abbildung 3: Charakteristisches Verhalten von Koronaentladungen (qualitativ)

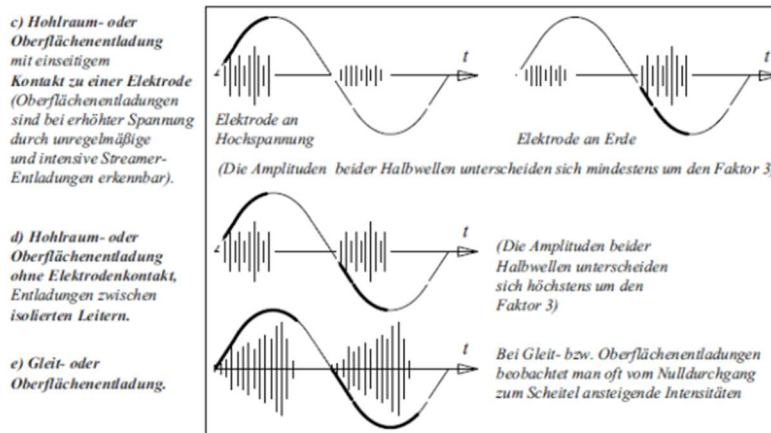


Abbildung 4: Charakteristisches Verhalten von Oberflächen- oder Gleitentladungen (qualitativ)

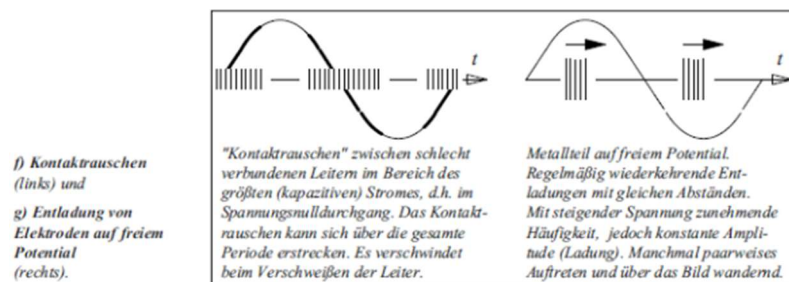


Abbildung 5: Kontaktrauschen (links) und Entladung auf freiem Potential (rechts)



## 2.3 Versuchsvorbereitung

Im Praktikum wird die variable 50-Hz-Prüfspannung  $U$ - mit einem 100-kV-Prüftransformator erzeugt, mit einem kapazitiven Spannungsteiler gemessen und ebenfalls auf das DSO geführt. Für  $Z$  wird ein HS-Widerstand von 50k $\Omega$  verwendet.

### 2.3.1 Verwendete Gerätschaften

#### Spannungsteiler

Kapazitiver Spannungsteiler mit Nenn-Ratio von 1:1000

(Belastung: Koaxialmesskabel, Supercube, 1:10 Probe)

#### Messkreis

Koppelkondensator  $C_k$ , Messimpedanz  $Z_{MI}$  (CD), Koaxialmesskabel am Oszilloskop als Messinstrument MI, 100-kV-Prüftransformator

#### Oszilloskop Agilent MSOX3014X

Zur Messung von Teilerspannung  $U_t$  und Scheitelwert  $|\hat{u}_{Max}|$  der Teilentladungen benötigen wir das Oszilloskop.

CHANNEL 1: TE-Messsignal  $u(t)$ , über Messimpedanz  $Z_{MI}$  abfallend, «Spitze erkennen»  
Koaxialkabel am Oszilloskop mit Abschlusswiderstand 50 $\Omega$

CHANNEL 2: AC-Spannung vom Spannungsteiler  $U_t$   
1:10 Probe am Messkabelende  
1 M $\Omega$  Oszilloskop  
Nenn-Ratio von 1:1000

#### Supercube

Messen und anzeigen der aktuellen Prüfspannung  $U_{rms}$  vom Spannungsteiler mit dem aktuellen Teiler-Ratio der Kalibration.

#### Umgebungsbedingungen

Klima-Wandmessgerät PTU300 von VAISALA

#### TE-Kalibrator

Ladungs-Kalibrator zur Kalibrierung des Prüfkreises mit 100pC

### 2.3.2 Versuchsaufbau und -Ablauf

Zuerst erfolgt eine Kalibrierung des Prüfkreises. Danach soll die TE Aktivität einer "fast"-Spitze-Platte-Anordnung und sowohl in einem nassen als auch in einem trockenen HS-Leiterseil untersucht werden.

Allgemeine Übersicht der am Messtag herauszufindenden Informationen/Daten:

- Feststellen von tatsächlicher Nennratio von Spannungsteiler
- Prüfspannung: aktuelle AC-Prüfspannung in kV<sub>rms</sub>

- Angaben zum TE-Kalibrator (abgegebenen Ladung mit der zugehörigen Messunsicherheit ( $k=2$ ))
- scheinbare Ladung: Ladungswerte in pC der einzelnen TE-Impulse
- TE-Ein- und Aussatz: TE-Einsatzspannung  $U_i$  in kV und Aussetzspannung  $U_e$  in kV
- TE-Phasenlage: Position der TE in Bezug auf die 50-Hz-Sinusspannung auf dem DSO
- atmosphärische Umgebungsbedingungen: Umgebungstemperatur in °C, Luftdruck in kPa, rel. Feuchtigkeit in %

### 2.3.2.1 Kalibration und Bestimmung des Grundrauschens

In diesem Teilversuch soll der gesamte Prüfkreis kalibriert, der Umrechnungsfaktor  $x$  bestimmt und der Grundstörpegel berechnet werden. Benutzt wird der Standardaufbau ohne Kupferspitze.

Mit Hilfe des Kalibrators wird  $C_a$  mit einer bekannten Ladung  $q_0$  geladen und einer Kalibrationsspannung gespeist. Diese kann am Oszilloskop abgelesen und der Umrechnungsfaktor berechnet werden. Zu beachten ist hierbei, dass die im Kalibrator eingebaute Kapazität  $C_0$  kleiner als 10% der Prüflingskapazität  $C_a$  ist, damit der Kalibrierungsfehler minimiert wird.

#### Kalibrierung und Umrechnungsfaktor $x$

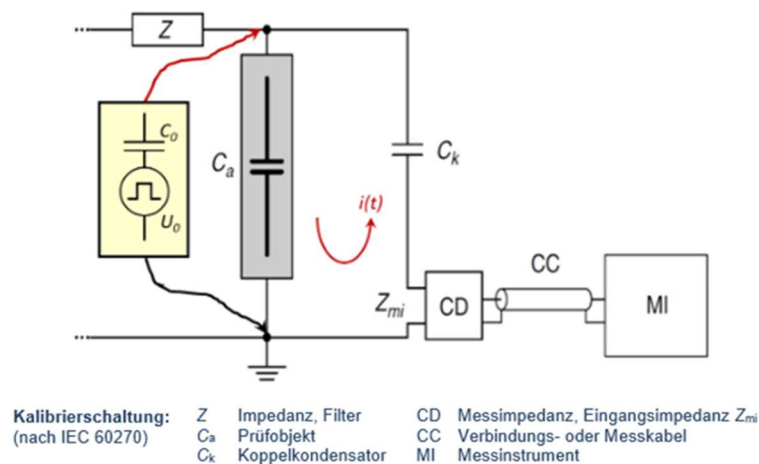


Abbildung 6: Kalibrierschaltung mit einem Kalibrator

- Mit Oszilloskop den zeitlichen Verlauf des Kalibrierimpulses beobachten
- Den Kalibrator im spannungslosen Zustand mit kurzen Laborkabeln direkt am Prüfobjekt  $C_a$ , zwischen Hochspannung und Erde anschliessen
- Eine Kalibrierladung von 100 pC wählen
- PD-CAL MODE auf der Bedieneinheit aktivieren
- Umrechnungsfaktor  $x = \frac{q_0}{|U_{0,Max}|}$  bestimmen
- Kalibrator entfernen
- PD-CAL MODE beenden und die Meldung auf der Bedieneinheit quittieren
- Grundstörpegel  $q = u_{noise} \cdot x$  berechnen



## Einführung

- Mit ausgeschalteter Prüfspannung  $U_{\sim}$  messen
- Mit Prüfspannung auf 0kV  $U_{\sim}$  messen

### 2.3.2.2 Nachweis der TE-Freiheit des Prüfkreises

Es soll zunächst untersucht werden, ob der aufgebaute Prüf- und Messkreis bis zur maximal zulässigen Prüfwechselspannung von 90 kV<sub>rms</sub> selber teilentladungsfrei ist. Denn nur so kann bei den nachfolgenden Untersuchungen zuverlässig beurteilt werden, ob die gemessenen TE vom Prüfobjekt stammen und nicht (teilweise) vom Prüfkreislaufbau.

Es wird mit dem gleichen Versuchsaufbau wie zuvor weiterverfahren.

- HS-Prüfung:
  - Stufenweise Erhöhung der Prüfspannung bis max. 90 kV<sub>rms</sub> oder bis erste TE sichtbar sind
  - Falls TE vorhanden/messbar sind, diese mit Korona-Kamera (UV-Licht) oder Korona-Gun (Ultraschall) lokalisieren

### 2.3.2.3 Spitze an Hochspannung

Hier sollen die an der Kupferspitze auftretenden Teilentladungen genauer untersucht werden. Für uns von Interesse sind ab und bis wann, sowie die Größenordnungen der TE.

Der Versuchsaufbau wird mit einer Kupferspitze (Prüfobjekt C<sub>a</sub>), die an der Hochspannungsseite wie in Abb.7 dargestellt verbunden wird, erweitert.

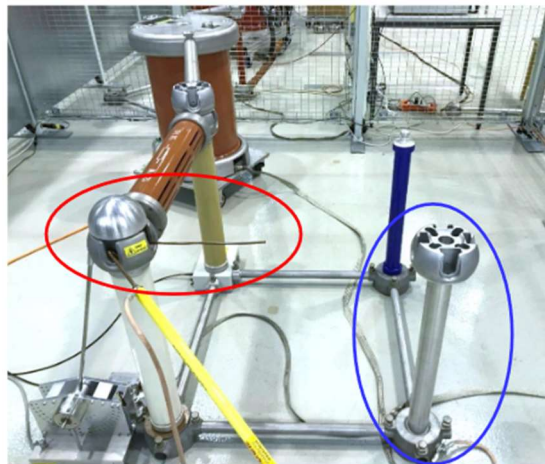


Abbildung 7: Kupferspitze am Hochspannungsseitigen Alukopf von C<sub>k</sub> gegen geerdeten Alu Kopf ("Platte")

- Kalibrierung
  - Überprüfen, ob Kalibration der Anordnung noch stimmt, bei Bedarf neu Kalibrieren
- HS-Prüfung
  - Stufenweise Erhöhung der Prüfspannung bis erste TE sichtbar sind, bei Bedarf DSO Kanäle anpassen
  - Messung im Zeitbereich  $\pm 10$  ms um den 50-Hz-Spannungsnulldurchgang (Trigger auf die Spannungsmessung einstellen, Channel 2)

## Einführung

- Messung im Bereich der TE-Messsignale auf der  $\mu\text{s}$ -Zeitskala (Trigger auf TE-Messkanal einstellen, Channel 1)
- Vergleich des zeitlichen Verlaufs der TE-Impulse mit den Kalibrierimpulsen (beide in der  $\mu\text{s}$ -Zeitskala)
- Beschreiben, was sich ohne DSO beobachten lässt (wieder mit Korona-Kamera und/oder Korona-Gun)
- Ein-/Aussetzen der TE
  - Langsame Erhöhung der Prüfspannung  $\ddot{U}$ , bis TE periodisch einsetzt ( $U_i$  entspricht der minimalen Spannung bei der dies eintritt)
  - Weiter erhöhen und beschreiben, wie sich das TE-Pulsmuster auf dem DSO verändert
  - Langsame Senkung der Prüfspannung  $U_{\sim}$ , bis keine TE mehr auftreten ( $U_e$  entspricht der maximalen Spannung bei der dies eintritt)
  - Prozess wiederholen für die Überprüfung der Reproduzierbarkeit von  $U_i$  und  $U_e$

### 2.3.2.4 Spitze an Erde

Hier sollen wieder die an der Kupferspitze auftretenden Teilentladungen genauer untersucht werden. Für uns von Interesse sind ab und bis wann, sowie die Größenordnungen der TE.

Der Versuchsaufbau wird minimal geändert. Die Kupferspitze (Prüfobjekt  $C_a$ ) wird an der Erdseite verbunden, wie in Abb.8 dargestellt.

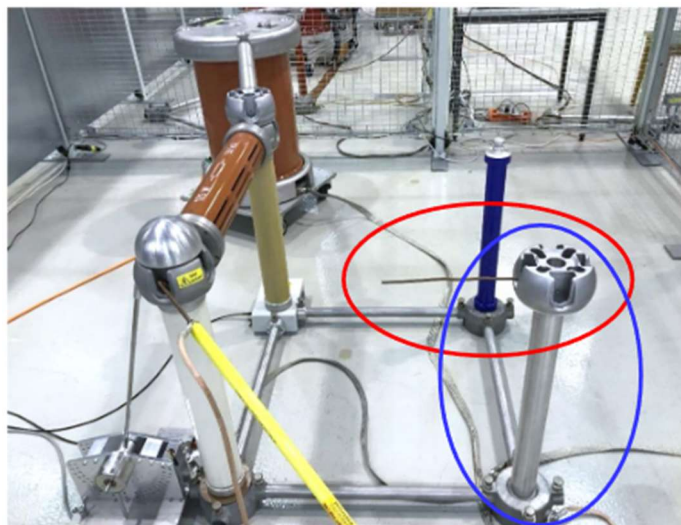


Abbildung 8: Kupferspitze am Erdseitigen Alukopf von  $C_k$  gegenüber dem Koppelkondensator ("Platte")

- Kalibrierung
  - Kann übersprungen werden, da sich der Versuchsaufbau nicht wesentlich verändert hat
- HS-Prüfung
  - Stufenweise Erhöhung der Prüfspannung bis erste TE sichtbar sind, bei Bedarf DSO Kanäle anpassen
  - Messung im Zeitbereich  $\pm 10 \text{ ms}$  um den 50-Hz-Spannungsnulldurchgang

(Trigger auf die Spannungsmessung einstellen, Channel 2)

- Messung im Bereich der TE-Messsignale auf der  $\mu\text{s}$ -Zeitskala

(Trigger auf TE-Messkanal einstellen, Channel 1)

- Vergleich des zeitlichen Verlaufs der TE-Impulse mit den Kalibrierimpulsen (beide in der  $\mu\text{s}$ -Zeitskala)
- Beschreiben, was sich ohne DSO beobachten lässt (wieder mit Korona-Kamera und/oder Korona-Gun)
- Ein-/Ausatz
  - Langsame Erhöhung der Prüfspannung  $U_{\sim}$ , bis TE periodisch einsetzt ( $U_i$  entspricht der minimalen Spannung bei der dies eintrifft)
  - Weiter erhöhen und beschreiben, wie sich das TE-Pulsmuster auf dem DSO verändert
  - Langsame Senkung der Prüfspannung  $U_{\sim}$ , bis keine TE mehr auftreten ( $U_e$  entspricht der maximalen Spannung bei der dies eintrifft)
  - Prozess wiederholen für die Überprüfung der Reproduzierbarkeit von  $U_i$  und  $U_e$
  - Vergleich der Resultate mit dem vorherigen Versuch

### 2.3.2.5 Trockenes und nasses Leiterseil

Bei diesem Teilversuch sollen wieder auftretende Teilladungen untersucht werden.

Die Kupferspitze wird entfernt. HS- und "Erd"-Seite werden mit einem HS-Alu-Freileitungsseil verbunden. Zu beachten ist der Austausch des bisherigen senkrechten Alu-Verbinders mit einem blauen Isolator. Dieser isoliert den Alu-Kopf zuverlässig bis  $100 \text{ kV}_{\text{rms}}$  gegen Erde.

Der Versuch wird einmal mit trockenem und einmal mit nassem HS-Leiterseil durchgeführt.

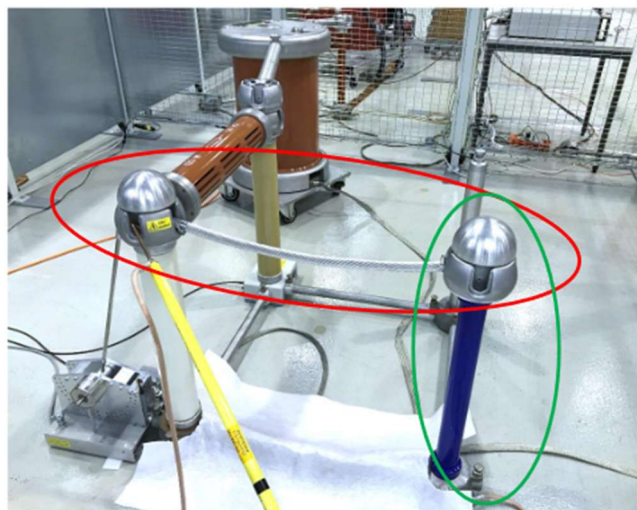


Abbildung 9: Verbindung mit HS-Alu-Freileiterseil

- Kalibrierung
  - Überprüfen, ob Kalibration der Anordnung noch stimmt, bei Bedarf neu Kalibrieren
  - Für die Wiederholung mit nassem Freileiterseil muss die Kalibrierung nicht erneut vorgenommen werden.

- HS-Prüfung
  - Ein-/Aussatz
    - Langsame Erhöhung der Prüfspannung  $U_{\sim}$ , bis TE periodisch einsetzt ( $U_i$  entspricht der minimalen Spannung bei der dies eintrifft)
    - Weiter erhöhen und beschreiben, wie sich das TE-Pulsmuster auf dem DSO verändert
    - Langsame Senkung der Prüfspannung  $U_{\sim}$ , bis keine TE mehr auftreten ( $U_e$  entspricht der maximalen Spannung bei der dies eintrifft)
  - Stufenweise Erhöhung der Prüfspannung bis erste TE sichtbar sind, bei Bedarf DSO Kanäle anpassen
  - Messung im Zeitbereich  $\pm 10$  ms um den 50-Hz-Spannungsnulldurchgang (Trigger auf die Spannungsmessung einstellen, Channel 2)
  - Messung im Bereich der TE-Messsignale auf der  $\mu$ s-Zeitskala (Trigger auf TE-Messkanal einstellen, Channel 1)
  - Vergleich des zeitlichen Verlaufs der TE-Impulse mit den Kalibrierimpulsen (beide in der  $\mu$ s-Zeitskala)
  - Beschreiben, was sich ohne DSO beobachten lässt (wieder mit Korona-Kamera und/oder Korona-Gun)
  - Nach Beendigung des ersten Teilversuchs die Spannung auf 0kV runterfahren, die HS-Quelle ausschalten und die Prüfanlage manuell erden

## 2.4 Messunsicherheiten

### 2.4.1 Messunsicherheiten durch Bauteile

Die Messunsicherheiten der einzelnen Komponenten wie Widerstände oder Kapazitäten sowie die Messunsicherheit der Tastköpfe können gemäss Versuchsanleitung vernachlässigt werden.

### 2.4.2 Messunsicherheiten durch Versuchs- und Messmittel

#### **Spannungsteiler**

Der im Praktikum verwendete Spannungsteiler hat eine Nennratio von 1:1000. Der tatsächliche Wert kann jedoch nur vor Ort mit dem gültigen Kalibrierschein festgestellt werden. Die Abweichung muss bei allen Berechnungen mit der Spannung  $U_T$  (Spannung nach Spannungsteiler) berücksichtigt werden und kann einfach mit einem Korrekturfaktor korrigiert werden. ( $= 1000 \cdot \text{Actual} \setminus \text{Ratio}$ )

#### **Oszilloskop Keysight DSOX3014T**

Die Genauigkeit des Oszilloskops beträgt  $\pm 2 \%$  des Messbereichs und es wird jeweils nur das gemessen, was im Display zu sehen ist.

Wie in der Vorlesung gezeigt, müssen wir alle Beiträge zur Bestimmung der Messunsicherheit bei Spannungsmessungen mit dem Oszilloskop bestimmen.

Die **Quantisierungsungenauigkeit**  $\Delta u_q$  bei einem 8-bit Oszilloskop ( $n=8$ ) berechnet sich zu

$$\Delta u_q = \frac{\text{Messbereich}}{2\sqrt{3} \cdot N} = \frac{\#div_i \cdot \frac{\text{Spannung}}{\text{Division}}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 2^8}$$

wobei

$$\text{Messbereich} = \#div_i \cdot \frac{\text{Spannung}}{\text{Division}}, N = 2^n = 2^8 \text{ und } k=2$$

$\#div_i := \text{Anzahl vertikale Divisionen im Messbereich}$

Die **vertikale Ungenauigkeit** beträgt im «Worst Case»

$$\Delta u_{VG} = 2\% \cdot \text{Messbereich} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Der in Kombination verwendete **Tastkopf** verursacht folgende Messungenauigkeit

$$\Delta u_{TK} = 0.03 \cdot \frac{1}{2} \cdot \text{Messwert} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Dazu die mit der Oszilloskop-Statistikauswertung **empirisch ermittelte Standardabweichung**  $s$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Damit kann die **kombinierte Standardunsicherheit** der Spannungsmessung mit dem Oszilloskop berechnet werden:

$$\Delta u_c = \sqrt{s^2 + \Delta u_q^2 + \Delta u_{VG}^2 + \Delta u_{TK}^2}, \text{ Auftretswahrscheinlichkeit von 63.27 \%}$$

Und schlussendlich kann die **erweiterte Messunsicherheit** mit  $k=2$  bestimmt werden:

## Supercube

Standardmessunsicherheit  $\pm 1\%$  des Messbereichs

## TE-Kalibrator

Die Angaben zu der vom TE-Kalibrator abgegebenen Ladung, mit der zugehörigen Messunsicherheit ( $k=2$ ) sind am Praktikumstag vor Ort einsehbar.

### 3 Messprotokoll am 1.6.2022

#### 3.1 Genereller Versuchsaufbau

Der generelle Versuchsaufbau bleibt über alle Teilversuche ungefähr gleich so wie in der Versuchsvorbereitung, Kapitel 2.3 und Folgende, beschrieben.

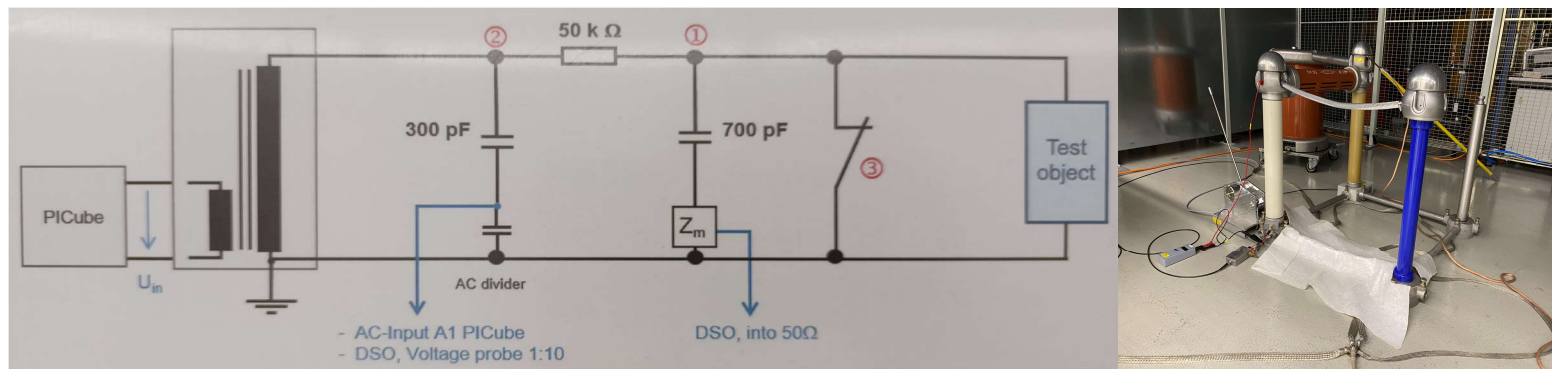


Abbildung 10: Versuchsaufbau schematisch (links) und vor Ort (rechts)

Die Prüfspannung kann direkt am Supercube als RMS-Wert mit einer Abweichung von  $\pm 1\%$  abgelesen werden und muss nicht mit verschiedenen und langen Fehlerrechnungen berechnet werden.

Die Atmosphärischen Umgebungsbedingungen lagen am Versuchstag bei:

- Luftdruck: 960.5 hPa
- Umgebungstemperatur: 22.2 °C
- Relative Luftfeuchtigkeit: 50.8 %

##### 3.1.1 Verwendete Gerätschaften

Zusätzlich zu den in 2.3.1 aufgelisteten Geräten kommen folgende hinzu:

- **100 kV HS-Transformator**  
Dient der Erzeugung und Bereitstellung der 50 Hz AC-Prüfspannung (max.  $90\text{kV}_{\text{RMS}}$ )
- **Kupferspitze**
- **HS-Leiterseil**  
Hochspannungsleitung, bestehend aus Verschiedenen Stahl- und anderen Drähten, die ineinander verwickelt sind, Länge ca. 80cm
- **Korona-Kamera/-Gun**  
Hiermit können vorhandene, von bloßem Auge nicht sichtbare, Koronaentladungen lokalisiert und identifiziert werden

##### Ergänzung zu TE-Kalibrator

Im Zertifikat angegebene Daten:

Ladungsnennwert	=	+100	pC;
Effektive Ladungsabgabe	=	+97.3	pC
2 $\sigma$ -Messunsicherheit	=	$\pm 2.8$	pC



**Ergänzung zum Teilverhältnis** Das effektive Teilverhältnis wird vor Ort als  $1116 \pm 11$  angegeben, das heisst, das gemessene  $U_t$  muss mit einem Korrekturfaktor 1.116 multipliziert werden, jedoch können wir hier, wie bereits erwähnt direkt  $U_{\sim}$  vom Supercube ablesen.

### 3.1.2 Übersicht der vollzogenen Messungen

ID	Aufgabe	Unteraufgabe	Ladung	CH1 Div.	CH2 Div.	Time Div.	$U_{0,max}$	std	$\bar{U}$	scopes	Beschreibung
1	Kalibrierung	Kalibrierung	10 pC	50 [V/div]	2 [mV/div]	100 [ns/div]	7.0122 mV	140.68 $\mu$ V	0 kV	0	
2	Kalibrierung	Kalibrierung	100 pC	50 [V/div]	20 [mV/div]	100 [ns/div]	67.922 mV	402.97 $\mu$ V	0 kV	1	
3	TE-Nachweis	Ohne Betriebsspannung		50 [V/div]	1 [mV/div]	2 [ms/div]	504 $\mu$ V	27.304 $\mu$ V	0 kV	3	operate-state
4	TE-Nachweis	Betriebsspannung 0kV		50 [V/div]	1 [mV/div]	2 [ms/div]	619.8 $\mu$ V	83.678 $\mu$ V	0 kV	4	
5	TE-Nachweis	Betriebsspannung 90kV		50 [V/div]	1 [mV/div]	5 [ms/div]	2.612 mV	143.03 $\mu$ V	90 kV	5	TE-freiheit festgestellt
6	Spitze an HS	Kalibrierung	100 pC	50 [V/div]	20 [mV/div]	100 [ns/div]	69.934 mV	238.94 $\mu$ V	0 kV	6 und 7	us und ns bereich
7	Spitze an HS	Kalibrierung	100 pC	50 [V/div]	20 [mV/div]	20 [ms/div]	69.956 mV	267.82 $\mu$ V	0 kV	8	herausgezoomt vgl scope 10
8	Spitze an HS	Einsetzspannung		10 [V/div]	20 [mV/div]	5 [ms/div]	29.4 mV	2.1561 mV	17.3 kV	9	
9	Spitze an HS	Einsetzspannung							17.2 kV		
10	Spitze an HS	Einsetzspannung							17.3 kV		
11	Spitze an HS	Aussetzspannung							17.5 kV		
12	Spitze an HS	Aussetzspannung							17.4 kV		
13	Spitze an HS	Aussetzspannung							17.3 kV		
14	Spitze an HS	Messung für Vergleich		20 [V/div]	20 [mV/div]	100 [ns/div]	25.504 mV	1.0423 mV	18.1 kV	10	bei 18.1 kV
15	Spitze an HS	Messung für Vergleich		20 [V/div]	20 [mV/div]	5 [ms/div]	25.385 mV	1.017 mV	18.1 kV	11	herausgezoomt vgl scope 10
16	Spitze an Erde	Messung für Vergleich		20 [V/div]	5 [mV/div]	5 [ms/div]	1.6814 mV	1.1384 mV		12	Feststellung der charakteristischen TE am DSO
17	Spitze an Erde	Einsetzspannung							46.2 kV		
18	Spitze an Erde	Einsetzspannung							46.3 kV		
19	Spitze an Erde	Einsetzspannung							46.1 kV		
20	Spitze an Erde	Aussetzspannung							46 kV		
21	Spitze an Erde	Aussetzspannung							46 kV		
22	Spitze an Erde	Aussetzspannung							46.1 kV		
23	Spitze an Erde	Messung für Vergleich		20 [V/div]	5 [mV/div]	5 [ms/div]	1.6258 mV	608.88 $\mu$ V	46.4 kV	13	bei 46.4 kV
24	Spitze an Erde	Messung für Vergleich		20 [V/div]	5 [mV/div]	100 [ns/div]	1.182 mV	503.85 $\mu$ V	46.4 kV	14	bei 46.4 kV
25	Leiterseil Trocken	Kalibrierung	100 pC	20 [V/div]	20 [mV/div]	100 [ns/div]	65.791 mV	296.95 $\mu$ V	0 kV	15,16,17	
26	Leiterseil Trocken	Messung		50 [V/div]	2 [mV/div]	5 [ms/div]	3.6196 mV	360.05 $\mu$ V	90.9 kV	18	keine TE, bei 90.9kV
27	Leiterseil Nass	Messung		50 [V/div]	2 [mV/div]	5 [ms/div]	1.6986 mV	2.2851 mV		19	
28	Leiterseil Nass	Einsetzspannung							49.8 kV		
28	Leiterseil Nass	Einsetzspannung							56.7 kV		
28	Leiterseil Nass	Einsetzspannung							53.5 kV		
28	Leiterseil Nass	Aussetzspannung							51.3 kV		
28	Leiterseil Nass	Aussetzspannung							55.6 kV		
28	Leiterseil Nass	Aussetzspannung							58 kV		

Tabelle 1: Messprotokoll

## 4 Ergebnisblatt

### 4.1 Kalibration und Bestimmung des Grundrauschens

#### 4.1.1 Kalibrierung

Die Kalibrierung wurde vor jedem Versuch wie in der Versuchsvorbereitung beschrieben durchgeführt.

Kalibrierung	Ladung	$ U_{0, \max} $	Umrechnungsfaktor x	
Beginn	9.8 pC	7.0122 mV	1.397564	pC/mV
	97.3 pC	67.922 mV	1.432526	pC/mV
Spitze an HS	97.3 pC	69.934 mV	1.391312	pC/mV
	97.3 pC	69.956 mV	1.390874	pC/mV
Leiterseil Trocken	97.3 pC	65.791 mV	1.478926	pC/mV

Tabelle 2: Kalibrierungsprotokoll

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse für den Scheitelwert  $|U_{0, \max}|$  und den berechneten Wert x

Abbildung 11 zeigt ein komplexes System von Schwingungen ausgelöst durch den Kalibrationsimpuls mit Scheitelwerten im mV Bereich. Einsetzspannung  $U_i$  Aussetzspannung  $U_a$

#### 4.1.2 Grundstörpegel

Mit Umrechnungsfaktor x der Kalibration lassen sich Grundstörpegel in Ladungen umrechnen. Die gelieferten Resultate liefert Tabelle 3.

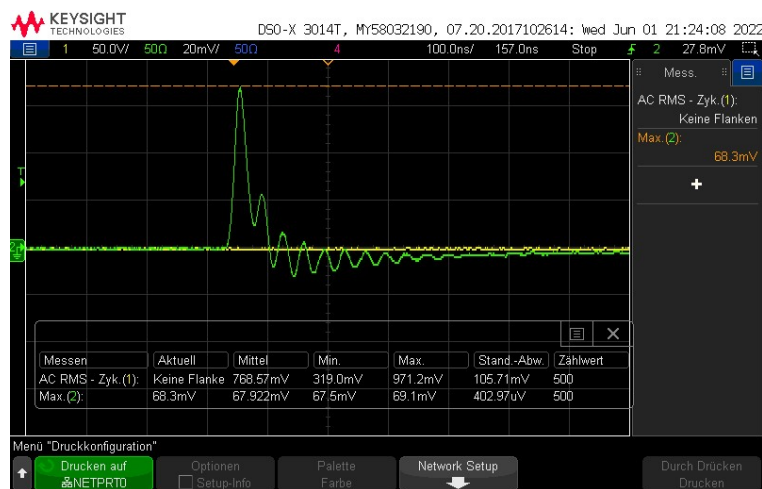


Abbildung 11: Kalibrierung ohne Kupferspitze

Wir stellen fest, dass die Werte bei Betriebsspannung 0kV die Werte ein wenig höher sind

Grundstörpegel	$U_{t, \max}$		Umrechnungsfaktor x		Ladung	
Kein Betrieb	1.0402	$\pm 6.24$ mV	1.4325255	pC/mV	1.490113	$\pm 1.103$ pC
Betriebsspannung 0 kV	1.129	$\pm 6.24$ mV	1.4325255	pC/mV	1.617321	$\pm 1.184$ pC

Tabelle 3: Grundstörpegel

### 4.1.3 TE-Freiheit

Wie in Abbildung 12 ersichtlich wurden bis  $90\text{kV}_{\text{rms}}$  keine Teilentladungen gemessen. Somit ist das System erwiesenermassen Teilentladungsfrei.

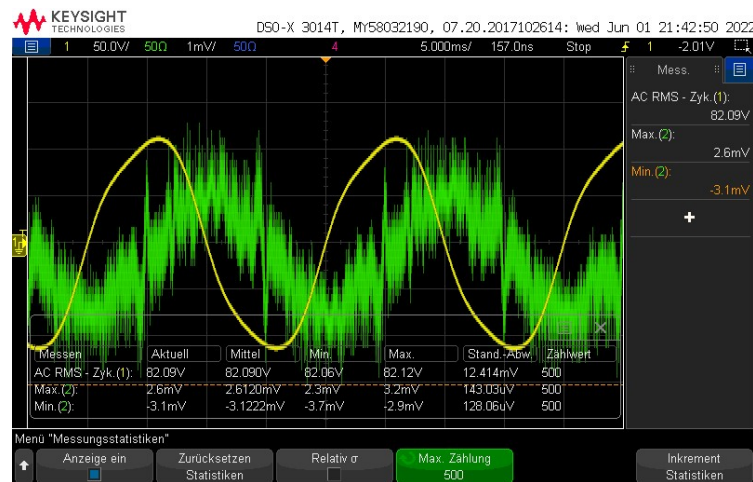


Abbildung 12: Messung beim Nachweis der TE-Freiheit

Die Spannung  $u(t)$ , hier auf Channel 2, ist Phasenverschoben um ungefähr  $90^\circ$  und enthält Rauschen ohne Teilentladungen.

## 4.2 Spitze zu Hochspannung

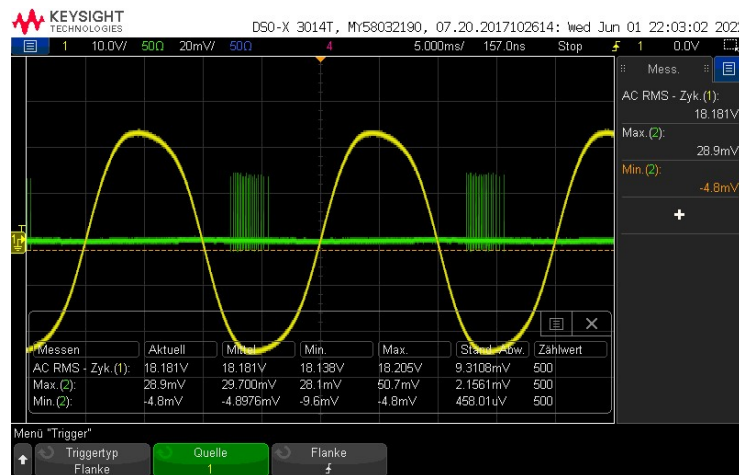


Abbildung 13: Teilentladungen mit typischem Spitze-zu-HS Charakter

Abb.13 zeigt mehrere Teilentladungsimpulse auf der negativen Halbwelle, typisch für eine Spitze an HS Teilentladung. Gemessen wurden solche Teilentladungen bereits ab ca. 17 kV<sub>rms</sub>. Wir haben festgestellt, dass die Amplitude und Breite des Impulses eine Betriebsspannungsabhängigkeit vorweist.

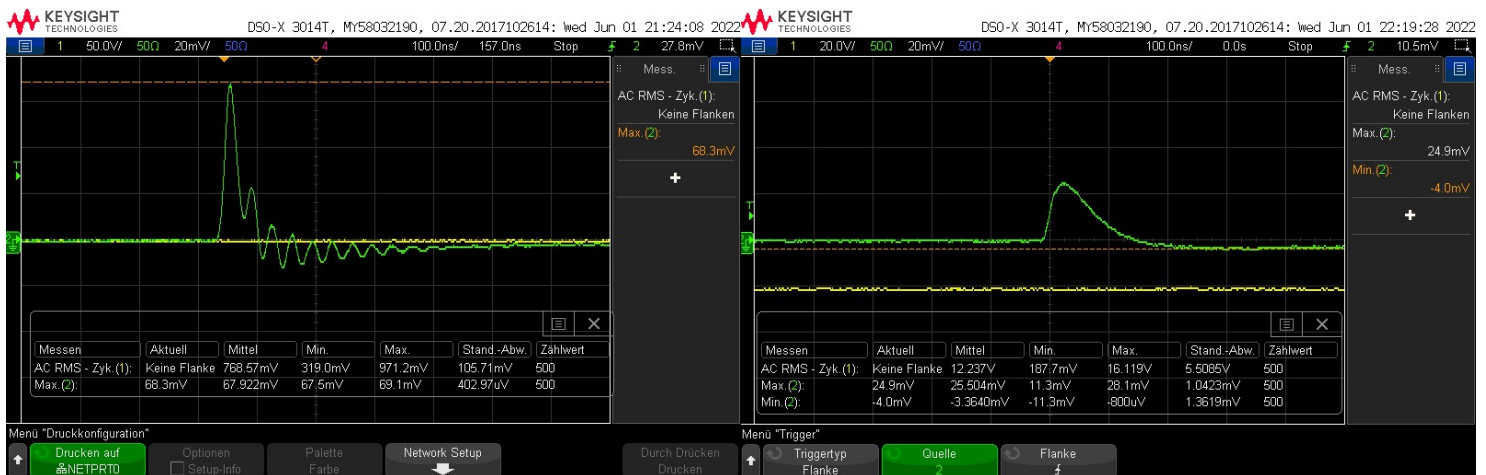


Abbildung 14: Vergleich Kalibrierimpuls ohne (links) und mit (rechts) Kupferspitze

In Abb. 14 sieht man den Vergleich von Kalibrierimpuls und Teilentladungsimpuls im ns Bereich. Man kann die Ähnlichkeit gut erkennen, auch wie der Teilentladungsimpuls viel mehr gedämpft ist und langsamer abfällt.

### Ein-/Aussetzspannung

Die Einsetzspannung bezeichnet die erforderliche Spannung, bei der zum ersten Mal regelmässige Teilentladungen auftreten. Die Aussetzspannung bezeichnet die erforderliche Spannung, bis alle davor

Spitze an HS	Messung 1		Messung 2		Messung 3	
Einsetzspannung $U_i$	17.3	± 0.173 kV	17.2	± 0.172 kV	17.3	± 0.173 kV
Aussetzspannung $U_a$	17.5	± 0.175 kV	17.4	± 0.174 kV	17.3	± 0.173 kV

Tabelle 4: Ein-/Aussetzspannung bei Spitze an HS

bestehenden TE verschwinden. Die Spannungen wurden alle am Supercube, bei erstmaligem Erfüllen der Bedingungen, abgelesen.

### 4.3 Spitze zu Erde

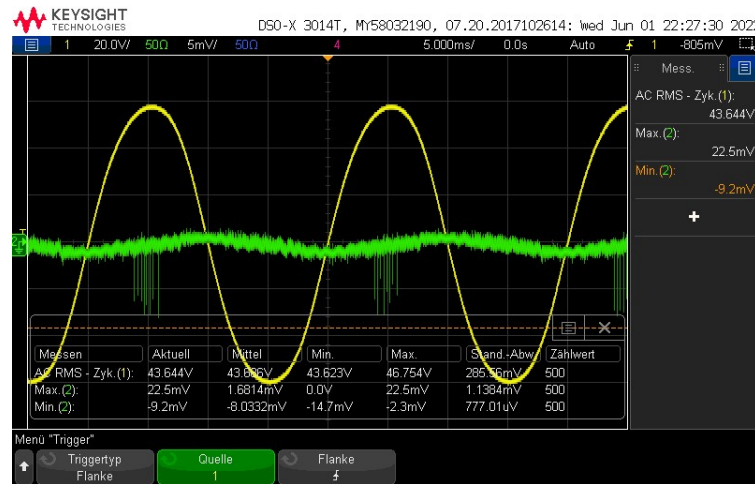


Abbildung 15: Teilentladungen mit typischem Spitze-zu-Erde Charakter

Abb.15 zeigt mehrere Teilentladungsimpulse auf der positiven Halbwelle, typisch für eine Spitze an Erde Teilentladung. Gemessen wurden solche Teilentladungen ab ca. 46 kV<sub>rms</sub>. Wir haben festgestellt, dass die Amplitude und Breite des Impulses eine Betriebsspannungsabhängigkeit vorweist.

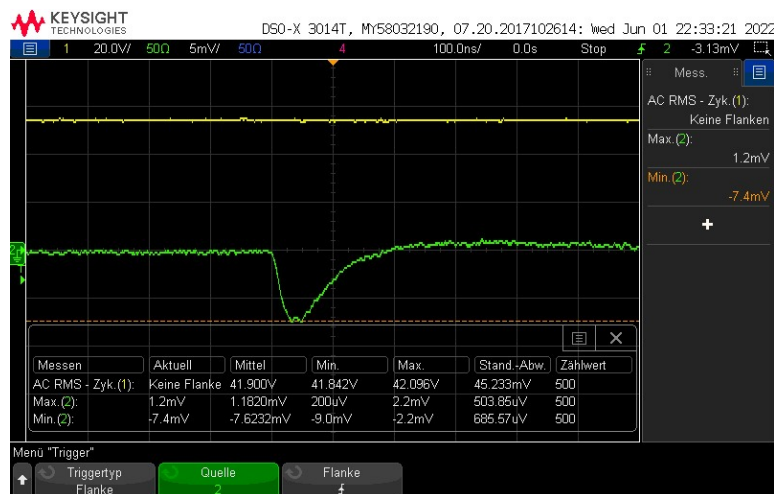


Abbildung 16: Teilentladungen mit typischem Spitze-zu-Erde Charakter (vergrößert)

### Ein-/Aussetzspannung

Die Einsetzspannung bezeichnet die erforderliche Spannung bis zum ersten Mal regelmässige Teilentladungen auftreten. Die Aussetzspannung bezeichnet die erforderliche Spannung bis alle davor bestehenden TE aufhören. Die Spannungen wurden alle am Supercube abgelesen bei erstmaligem Erfüllen der Bedingungen.

Spitze an Erde	Messung 1			Messung 2			Messung 3		
Einsetzspannung $U_i$	46.2	±	0.462 kV	46.3	±	0.463 kV	46.1	±	0.461 kV
Aussetzspannung $U_a$	46	±	0.46 kV	46	±	0.46 kV	46.1	±	0.461 kV

Tabelle 5: Ein-/Aussetzspannung bei Spitze an Erde

## 4.4 HS-Leiterseil

### 4.4.1 Trocken

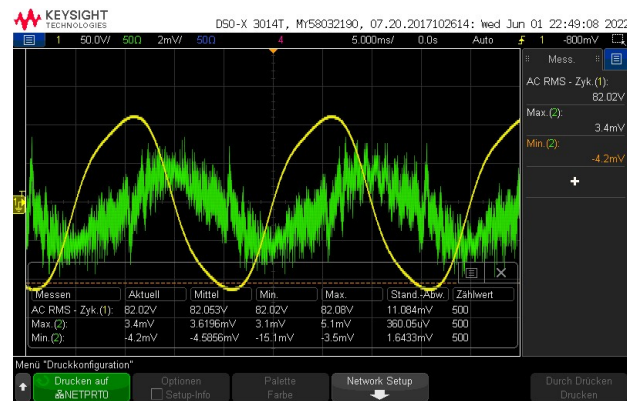


Abbildung 17: Keine Teilentladungen bei maximaler Betriebsspannung

Es liessen sich bis zur maximalen Spannung von 90kV noch keine Teilentladungen messen. Abb.17 zeigt den Spannungsverlauf mit  $u(t)$  auf Channel2 (grün) mit einer ca 90° Phasenverschiebung und ohne TE.

### 4.4.2 Nass

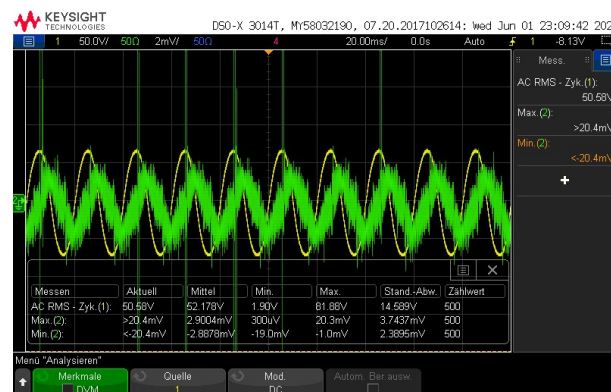


Abbildung 18: Teilentladungen von nassem Leiterseil

Wie in Abb. 18 zu sehen sind TE bei nassem Leiterseil messbar. Die Messungen sind relativ ungenau und schwierig reproduzierbar, da der Messzeitraum ausschlaggebend dafür ist, wie viel Wasser sich noch auf dem Leiterseil befindet. Über die Zeit reduzieren sich die Impulse, bis sie verschwinden.





Abbildung 19: Teilentladungen von nassem Leiterseil (vergrössert)

Unser Versuch zeigt, dass sich ab ca 50kV Teilentladungen feststellen lassen, die zu unregelmässigen Impulsen auf der positiven Halbwelle. Je nasser das Leiterseil und je höher die angelegte Spannung ist, desto grösser und breiter werden die Impulse.

Die Teilentladungen sind sowohl hörbar, als auch sichtbar (z.B. mit Corona-Gun)

### Ein-/Aussetzspannung

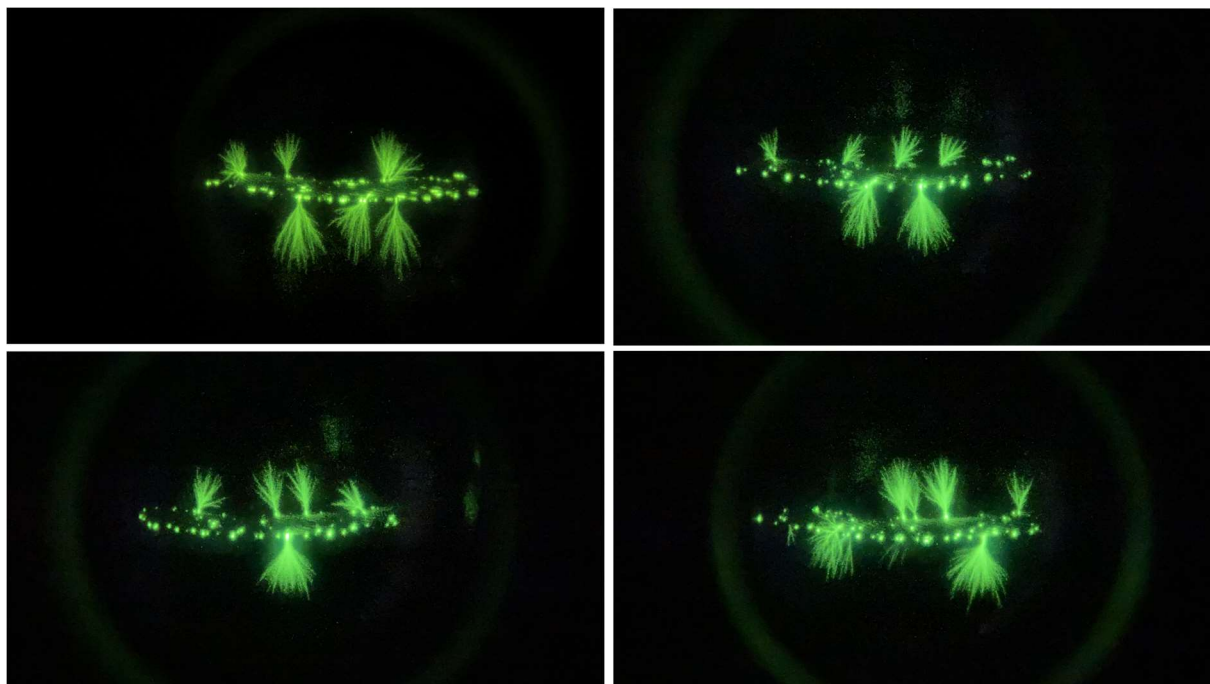


Abbildung 20: Koronaeffekte beim nassen Leiterseil mit Corona-Gun sichtbar gemacht

Die Einsetzspannung bezeichnet die erforderliche Spannung bis zum ersten Mal regelmässig Teilentladungen auftreten. Die Aussetzspannung bezeichnet die erforderliche Spannung bis alle davor bestehenden TE aufhören. Die Spannungen wurden alle am Supercube abgelesen bei erstmaligem Erfüllen der Bedingungen.

HS-Leiterseil nass	Messung 1			Messung 2			Messung 3		
Einsetzspannung $U_i$	49.8	±	0.498 kV	56.7	±	0.567 kV	53.5	±	0.535 kV
Aussetzspannung $U_a$	51.3	±	0.513 kV	55.6	±	0.556 kV	58	±	0.58 kV

Tabelle 6: Ein-/Aussetzspannung beim nassen HS-Leiterseil

## 5 Diskussion

Der TE Impulsstrom wird im Versuch gegen dessen Fliessrichtung gemessen und wird auf dem Oszilloskop invertiert angezeigt. Dies nennen wir Polaritätsinversion. Deshalb muss auf Interpretation der Polaritäten geachtet werden, d.h. wir müssen die Amplitudenachse der Impulse umdrehen.

### 5.1 Kalibration und Bestimmung des Grundrauschens

Wie man in der Tabelle 2 gut sehen kann, sind sowohl die gemessenen Werte von  $\hat{U}$  als auch die berechneten Werte von  $x$  sehr konsistent über alle Versuche. Die Scheitelwerte liegen alle im mV Bereich. Damit hat der Messwiderstand  $Z$  einen messbaren Einfluss auf den Versuchsaufbau: Ohne Widerstand keine (respektive wesentlich weniger).

Der Grundstörpegel befindet sich auf tiefem Niveau und folgt keinem Muster. Er hat insgesamt einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Messungen.

### 5.2 Spitze zu Hochspannung

Die Messungen haben ergeben, dass Teilentladungen bei der Spitze-an-Hochspannung-Anordnung bereits ab ca. 17kV entstehen können. Sie treten regelmässig und nur in der negativen Halbwelle auf und haben eine von der Spannung abhängende Breite und Amplitude. Aufgrund der Polaritätsinversion sind diese Impulse negativ, anstatt, wie in der Realität, positiv.

Verglichen mit der Theorie handelt es sich hier um eine "Korona Entladung in Gas" mit "Spitze an Hochspannung", insofern erfüllen die Messungen unsere Erwartungen.

Verglichen mit dem Kalibrationsimpuls ist eine Ähnlichkeit feststellbar, jetzt aber viel mehr gedämpft. Der Teilentladungsimpuls hat Tiefpasscharakter, was ebensolches Verhalten für den Messaufbau vermuten lässt.

Die Einsetzspannung liegt im Schnitt knapp unter der Aussetzspannung. Zu erwarten wäre das Gegenteil, jedoch sind die Abweichungen im Bereich der Messunsicherheit und Aufgrund der Messart stark abhängig von der Reaktionsfähigkeit der involvierten Personen. Dennoch wurde die Reproduzierbarkeit mit den drei Messungen gezeigt.

### 5.3 Spitze zu Erde

Die Messungen haben ergeben, dass sich bei der Spitze zu Erde Anordnung Teilentladungen bereits ab ca. 46kV Teilentladungen bilden können. Sie treten regelmässig und nur in der positiven Halbwelle auf und haben eine von der Spannung abhängende Breite und Amplitude. Aufgrund der Polaritätsinversion sind diese Impulse positiv, anstatt, wie in der Realität, negativ.

Verglichen mit der Theorie handelt es sich hier um eine "Korona Entladung in Gas" mit "Spitze an Erde", insofern erfüllen die Messungen unsere Erwartungen.

Die Einsetzspannung liegt im Durchschnitt leicht über der Aussetzspannung, was ebenfalls zu erwarten war. Die Reproduzierbarkeit wurde mit den drei Messungen gezeigt.

Verglichen mit Spitze zu Hochspannung sind die Ein- und Aussetzspannungen wesentlich höher. Dies entspricht der Theorie. Eine an Hochspannung gekoppelte Kupferspitze verursacht leichter eine Feldüberhöhung gegenüber der Erdplatte, während eine Hochspannungs-"Platte" gegenüber einer Kupferspitze an Erde Schwierigkeiten hat, eine Feldüberhöhung zu erzeugen. Konsequenterweise sind die Ein- und Aussetzspannung von Teilentladungen höher.

## 5.4 HS-Leiterseil

### 5.4.1 Trocken

Für das trockene Leiterseil gab es, im Gegensatz zum nassen Leiterseil, noch keine Teilentladungen bis zu 90kV. Dies ist insofern zu erwarten, da HS-Leiterseile so ausgelegt sind, dass Verluste (z.B. Teilentladungen) möglichst gering sind. Um dies zu erreichen, ist die Oberfläche der Kabel möglichst glatt. Damit werden Feldüberhöhungen vermieden.

### 5.4.2 Nass

Wie bereits angedeutet sind bei nassem Leiterseil Feldüberhöhungen aufgetreten. Dazu muss erwähnt werden, dass die Eintrittsspannung stark variiert, abhängig davon wie viel Wasser, respektive Wassertröpfchen, sich noch auf der Oberfläche des Leiterseils befinden. Damit werden genaue Messungen schwierig, da sich das Leiterseil über den Messzeitraum abtropfen und trocknen kann.

Die Messungen haben ergeben, dass sich bereits ab einer Spannung von ca. 50kV Teilentladungen bilden können, jedoch reduzieren sie sich mit der Zeit, bis sie ganz verschwinden, da das Seil trocknet. Die Teilentladungen entstehen durch Spitzen oder anderen Unebenheiten, die die Wassertröpfchen auf der Oberfläche des Leiterseils bilden. Die Teilentladungen treten in unterschiedlich Stärken und unregelmässigen Frequenzen auf, d.h. sie liegen statistisch weit auseinander.

Verglichen mit der Theorie handelt es sich hier um Teilentladungen in Öl, jedoch sind die Teilentladungen immer nur auf der positiven Halbwelle, nie auf der negativen. Die Ähnlichkeit könnte daher stammen, dass sich Wasser als Flüssigkeit eher als Öl verhält als wie ein Gas, aber eben nur ähnlich.

Die Teilentladungen sind hörbar, ein Surren oder Knattern, verursacht durch thermische Ausdehnung der Luft, und auch (z.B. mit Corona-Gun) sichtbar, ein einzigartiges Funkenspektakel.

## 6 Eigenständigkeitserklärung

Das Messprotokoll haben wir während des Versuchstages gemeinsam erstellt, dabei haben wir abwechselnd vom Oszilloskop abgelesen und die Ergebnisse notiert.

Die Einführung, Auswertung, Berechnung der Messunsicherheiten und die Diskussion haben wir gemeinsam zu gleichen Teilen erstellt.

Name	Legi-Nummer	Unterschrift