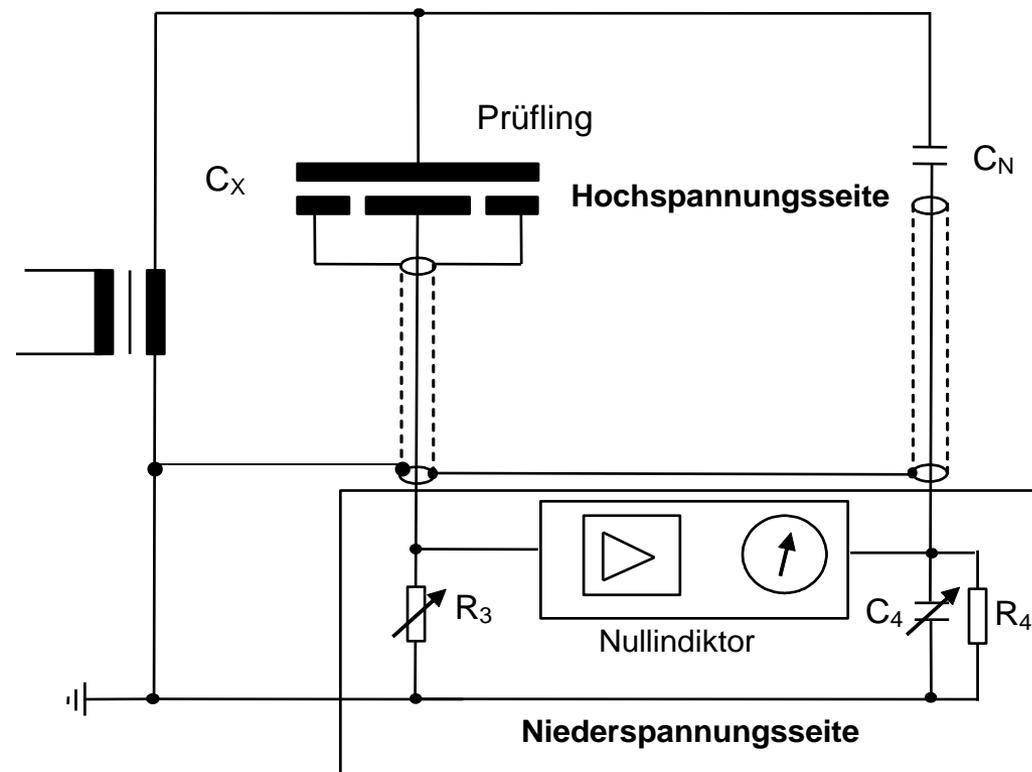


## C-tan-Messbrücke / „Schering-Brücke“

- Klassisches Messverfahren zur Bestimmung der Kapazität  $C$  und des Verlustfaktors  $\tan \delta$  einer Prüfanordnung.

- Grundsaltung:



### C-tan-Messbrücke / „Schering-Brücke“

Abgleichbedingung:

$$\underline{Z}_x / \underline{Z}_3 = \underline{Z}_N / \underline{Z}_4$$

Aus dem Vergleich von Real- und Imaginärteil der Abgleichbedingung ergibt sich

und

$$R_x = R_3 \cdot C_4 / C_N$$

$$C_x = C_N \cdot R_4 / R_3$$

sowie

$$\tan \delta_x = \omega C_x \cdot R_x = \omega C_4 \cdot R_4$$

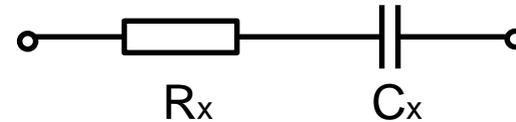
## C-tan-Messbrücke / „Schering-Brücke“

Herleitung der Gleichungen für  $R_x$ ,  $C_x$  und  $\tan \delta_x$ :

Ansatz / Abgleichbedingung:

$$\underline{Z}_x / \underline{Z}_3 = \underline{Z}_N / \underline{Z}_4$$

Ersatzschaltbild des Prüflings  $\underline{Z}_x$ :



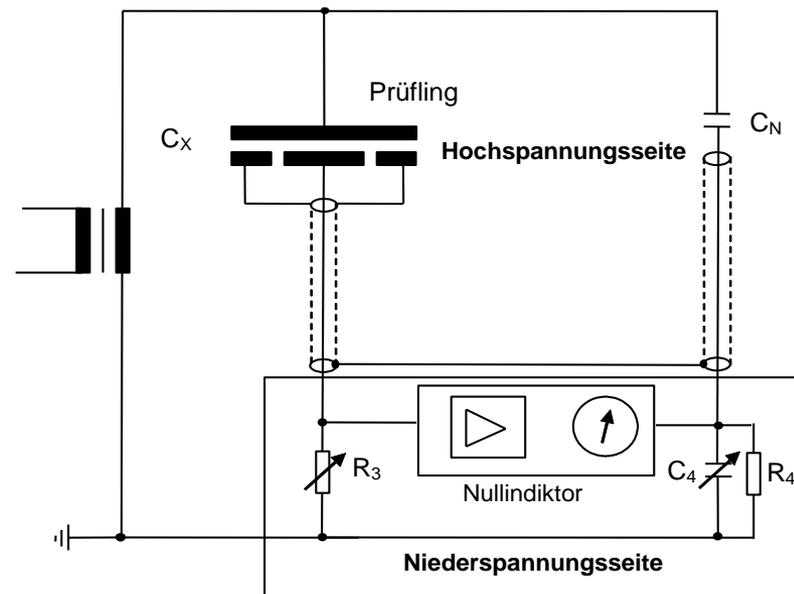
mit:

$$Z_x = R_x + \frac{1}{j\omega C_x}$$

$$\underline{Z}_N = \frac{1}{j\omega C_N}$$

$$\underline{Z}_3 = R_3$$

$$\underline{Z}_4 = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + j\omega C_4}$$



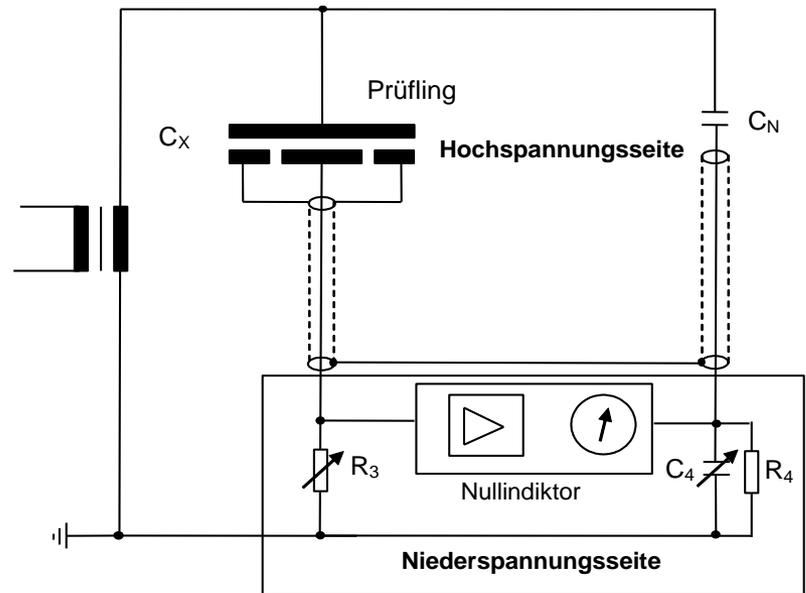
## C-tan-Messbrücke / „Schering-Brücke“

Herleitung der Gleichungen für  $R_x$ ,  $C_x$  und  $\tan \delta_x$ :

Eingesetzt in  $\underline{Z}_x / \underline{Z}_3 = \underline{Z}_N / \underline{Z}_4$

Erhält man

$$\frac{R_x + \frac{1}{j\omega C_x}}{R_3} = \frac{\frac{1}{j\omega C_N}}{\frac{1}{\frac{1}{R_4} + j\omega C_4}} = \frac{1}{R_4 + j\omega C_4 R_4}$$



Durch Kürzen mit  $j\omega$  erhält man

$$\frac{R_x + \frac{1}{j\omega C_x}}{R_3} = \frac{\frac{1}{R_4} + j\omega C_4}{j\omega C_N} = \frac{C_4}{C_N} + \frac{1}{j\omega C_N R_4}$$

## C-tan-Messbrücke / „Schering-Brücke“

Herleitung der Gleichungen für  $R_x$ ,  $C_x$  und  $\tan \delta_x$ :

$$\frac{R_x + \frac{1}{j\omega C_x}}{R_3} = \frac{C_4}{C_N} + \frac{1}{j\omega C_N R_4}$$

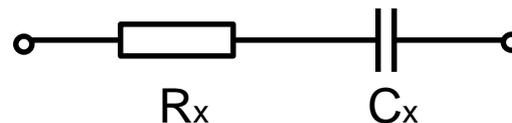
Multipliziert man die Gl. mit  $R_3$  so erhält man

$$R_x + \frac{1}{j\omega C_x} = \frac{R_3 C_4}{C_N} + \frac{R_3}{j\omega C_N R_4}$$

Durch Vergleich von Real- und Imaginärteil erhält man

$$R_x = \frac{R_3 C_4}{C_N} \quad \text{und} \quad C_x = \frac{R_4 C_N}{R_3}$$

sowie für das Serien-ESB



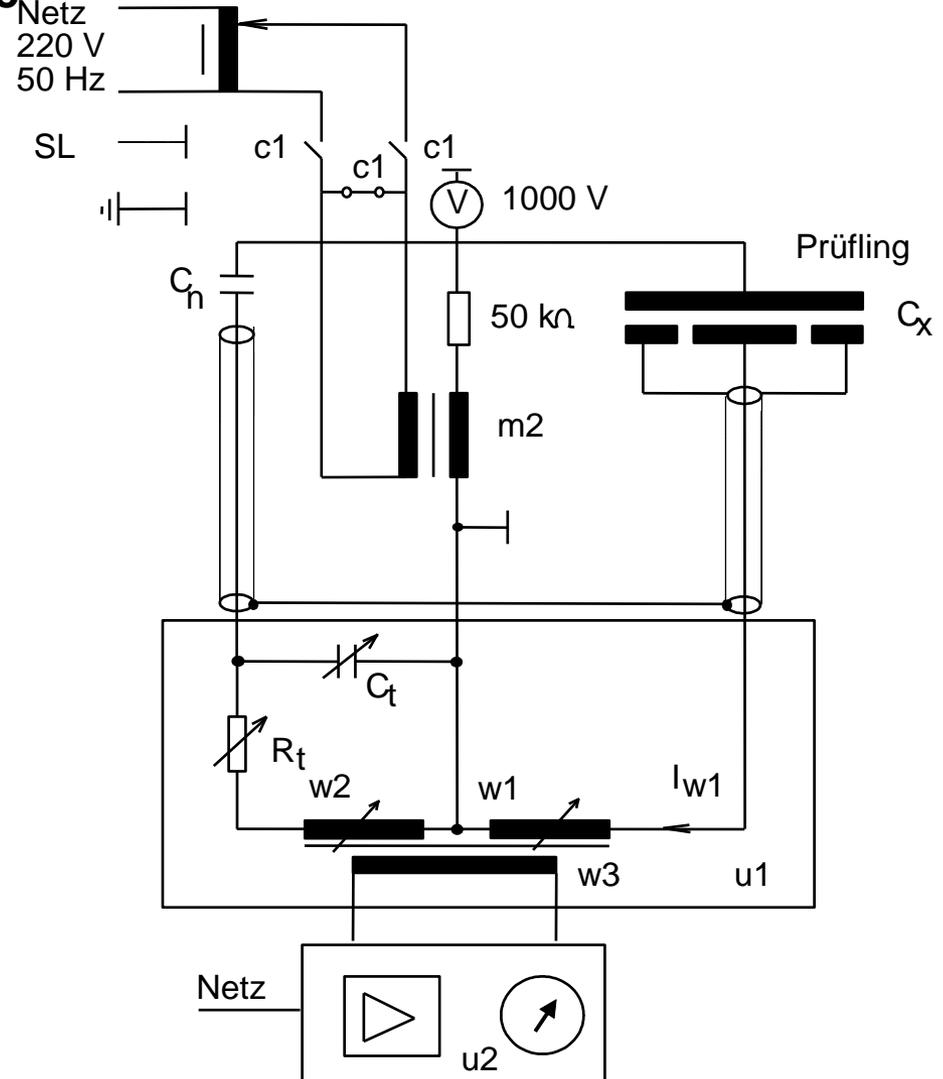
mit  $\tan \delta = \omega R_x C_x = \omega \frac{R_3 C_4}{C_N} \frac{R_4 C_N}{R_3}$

$$\tan \delta = \omega R_4 C_4$$

## C-tan-Messbrücke / „Schering-Brücke“

### Schaltung der praktischen Ausführung einer C - tan $\delta$ - Messeinrichtung

- $C_1$  Hauptschütz AC
- $C_2$  Hauptschütz DC
- $C_x$  Schutzringkondensator
- $C_n$  Normalkondensator 100 pF
- $C_t$  Bereichsstellung tan  $\delta$
- $m_1$  Stelltransformator
- $m_2$  Hochspannungstransformator
- $u_1$  C-tan  $\delta$  -Messbrücke
- $u_2$  Nullpunktindikator
- $w_1$  Bereichseinstellung
- $w_2$  Feinabgleich  $C_x$
- $w_3$  Feinabgleich  $C_x$
- $R_t$  Feinabgleich tan



### **C-tan-Messbrücke / „Schering-Brücke“**

#### **Erläuterungen zur Ausführung der Messschaltung:**

- **Hauptmerkmal:**

- Differenztransformator mit zwei Wicklungen mit einstellbaren Windungszahlen ( $w_1$ ,  $w_2$ ).  
(elektromagnetisch geschirmt und elastisch aufgehängt)
- Dritte Wicklung  $w_3$  dient zum Anschluss des Nullpunktindikators.
- Nach dem Brückenabgleich entspricht das Kapazitätsverhältnis  $C_x / C_n$  dem Windungszahlenverhältnis  $w_1 / w_2$ .

Anmerkungen:

- \* Es wird auf das elektromagnetische Feld Null abgeglichen
- \* Wicklung  $w_1$  ist dekadisch gestuft,  
Wicklung  $w_2$  kontinuierlich einstellbar

- **Brückenabgleich:**

Die Windungszahlen der Wicklungen  $w_1 / w_2$  und das RC-Glied aus  $R_t$  und  $C_t$  werden so lange variiert, bis der magnetische Fluss im Ringkern null geworden ist

### C-tan-Messbrücke / „Schering-Brücke“

Nach dem Brückenabgleich gelten dann folgende Beziehungen:

$$\frac{C_x}{C_n} = \frac{w_2}{w_1}$$

$$\tan \delta = R_t \cdot \omega \cdot C_t$$

- Der Kapazitätswert des Prüflings  $C_x$  wird in der Reihenersatzschaltung erhalten.
- Im Rahmen des Messbereichsumfanges ist jedes beliebige Kapazitätsverhältnis  $C_x / C_n$  nach dem Brückenabgleich unmittelbar in einer Zahlenreihe ablesbar.
- Zur Messung des  $\tan \delta$  -Wertes dient ein RC-Glied.
- Bei den Messfrequenzen 50 und 60 Hz ist der  $\tan \delta$  -Wert des Prüflings an einer Ziffernreihe unmittelbar ablesbar.

### Messung von Teilentladungen

**Definition Teilentladungen** (engl.: „**P**artial **D**ischarge“, abgekürzt: PD)

**Örtlich begrenzte Entladungen** in Isolieranordnungen, welche

- die **Isolierung nur teilweise überbrücken** und daher
- **nicht zwingend zu einem unmittelbaren Versagen der Isolation**, d.h. zum Durchschlag der Gesamtisolation zwischen zwei Elektroden, führen.

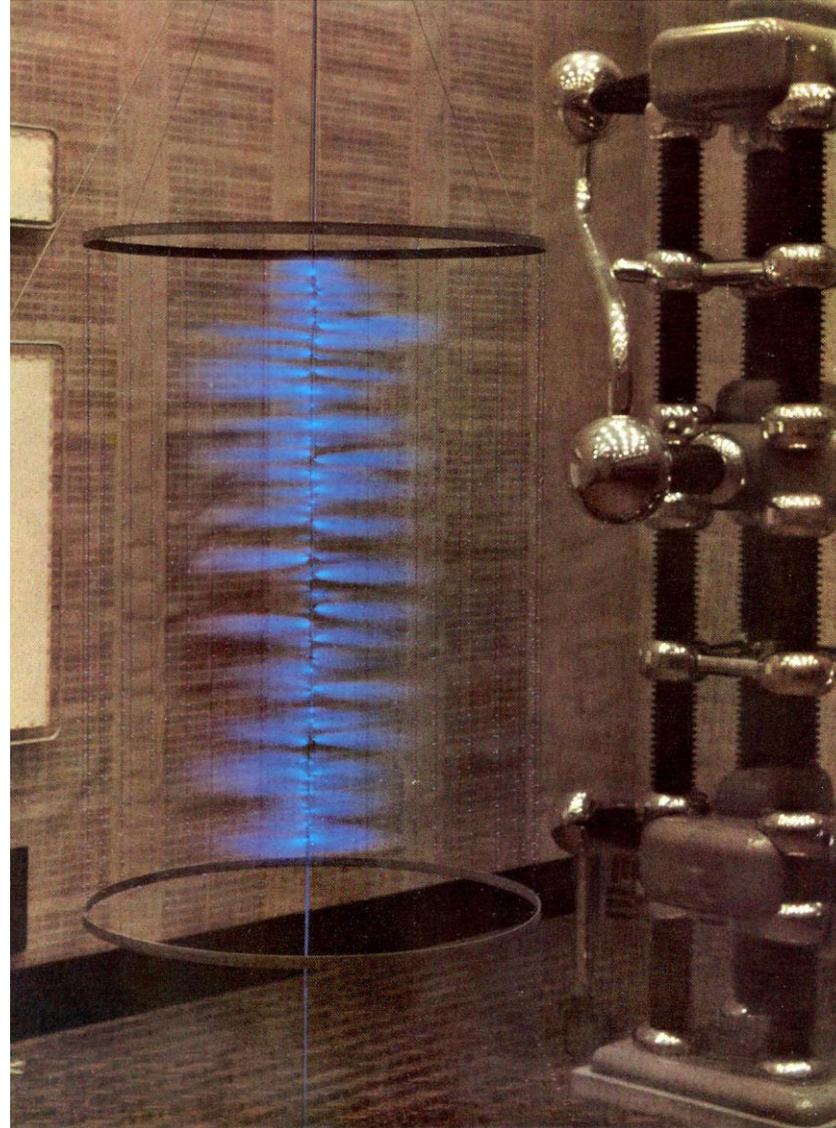
### Entstehung von Teilentladungen

- **Lokale E-Feld-Überbeanspruchungen** in Isoliersystemen ab einer gewissen Spannungshöhe
- **Mögliche Ursachen:**
  - Inhomogenitäten des elektrischen Feldes
  - unterschiedliche Permittivitäten
  - Fremdkörper, Gaseinschlüsse etc.).

### Messung von Teilentladungen

#### Beispiel:

Äußere Teilentladungen  
an einem Draht in einer  
geerdeten Koronareuse



### Messung von Teilentladungen

### Wirkung von Teilentladungen (TE)

### Meist schädliche oder gar zerstörende Auswirkungen auf die Isolation

- Im Rahmen der **Qualitätssicherung** oft erhebliche Anstrengungen zu ihrer messtechnischen Erfassung unternommen
- Notwendigkeit von **Messgeräten und Prüfverfahren** zur direkten Erfassung und Darstellung von Teilentladungen **ohne vorschädigende Auswirkungen auf den Prüfling**

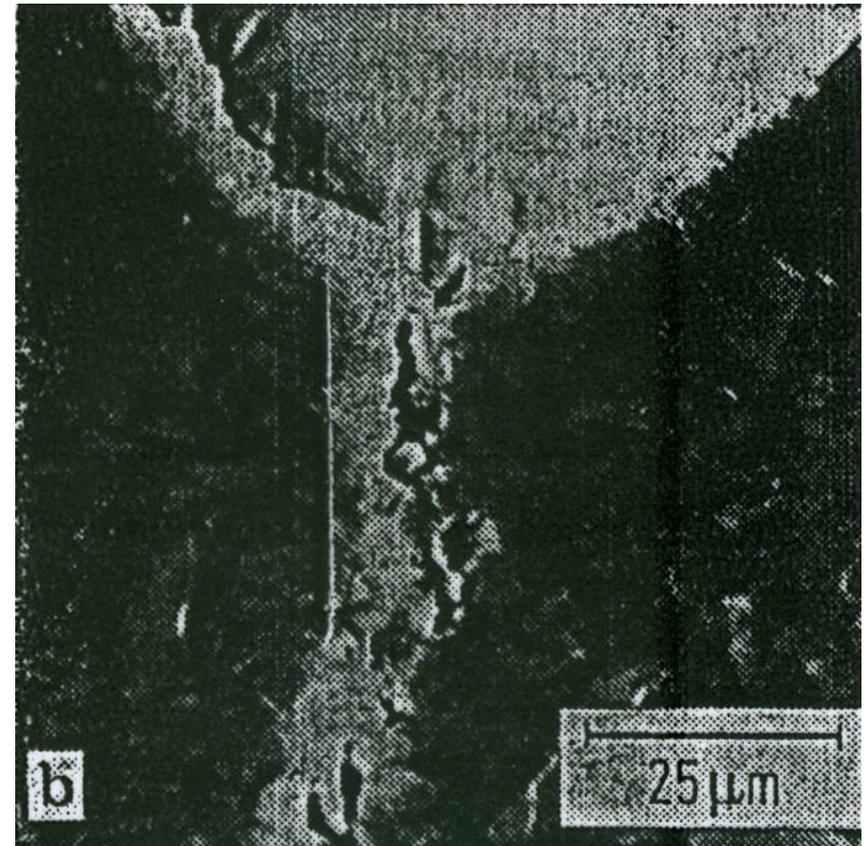
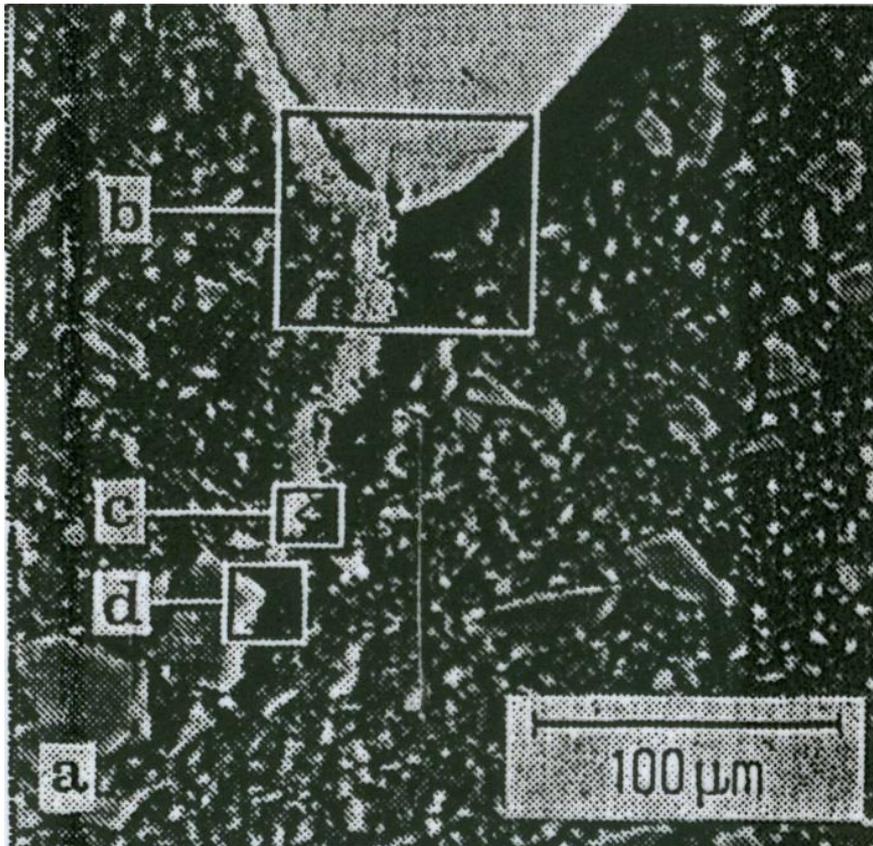
### Messung von Teilentladungen

**Beispiel:** Teilentladungsspuren in einer Papierwickelisolation eines 400-kV-Transformators nach ca. 4 Jahren Einwirkungsdauer



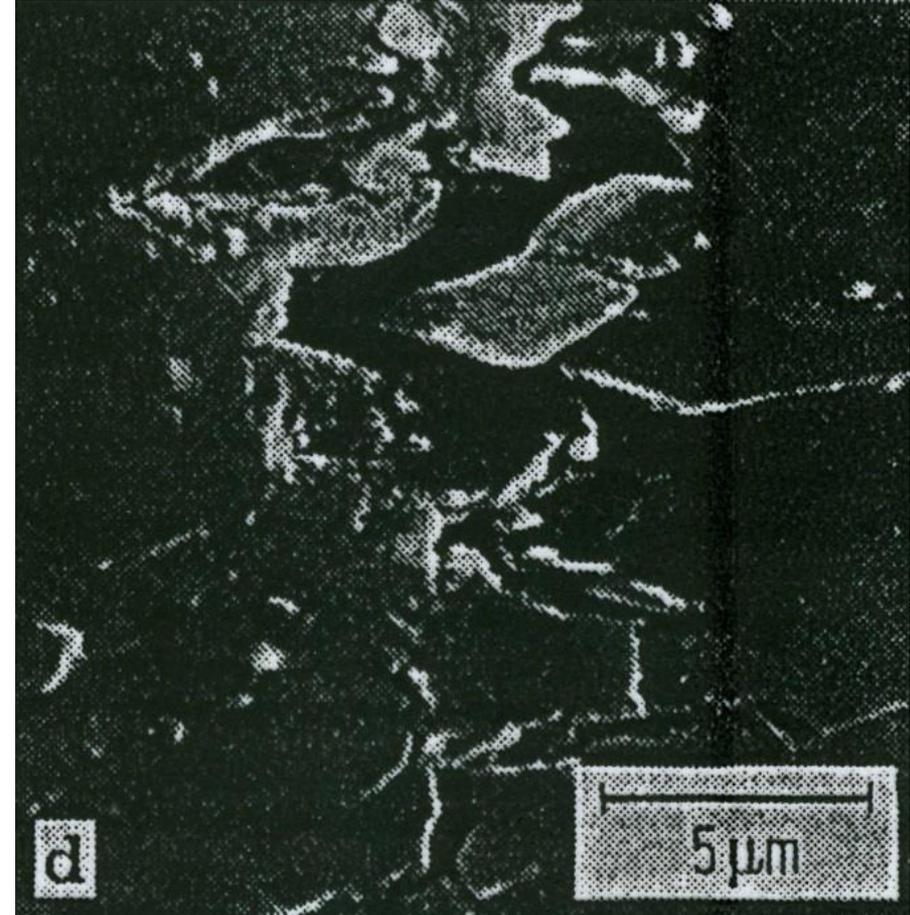
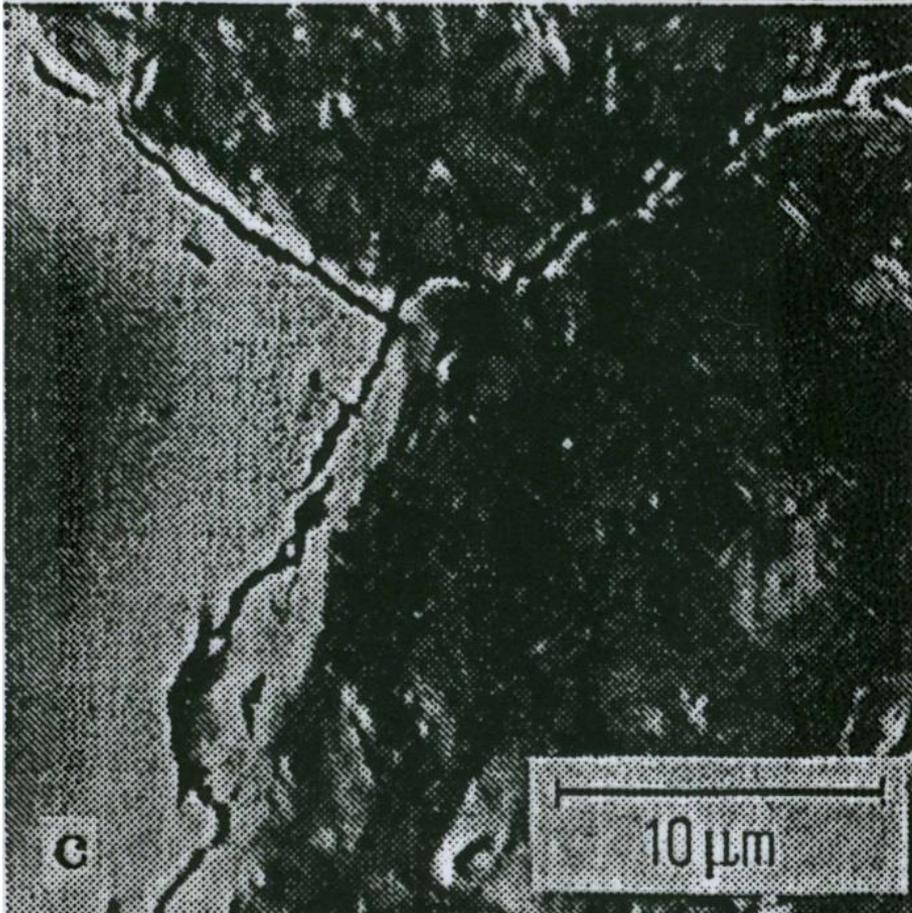
## Messung von Teilentladungen

Beispiel: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Teilentladungskanals mit unterschiedlichen Auflösungen



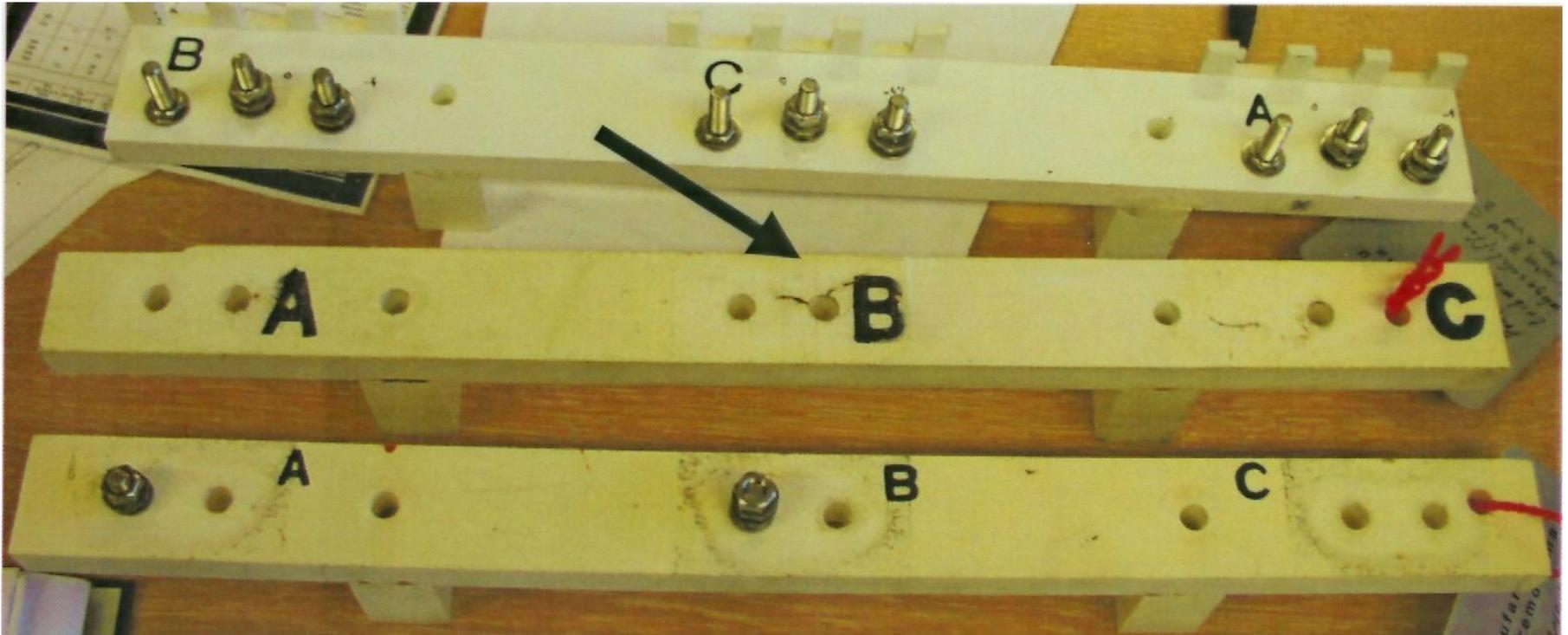
### Messung von Teilentladungen

**Beispiel: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Teilentladungskanals mit unterschiedlichen Auflösungen**



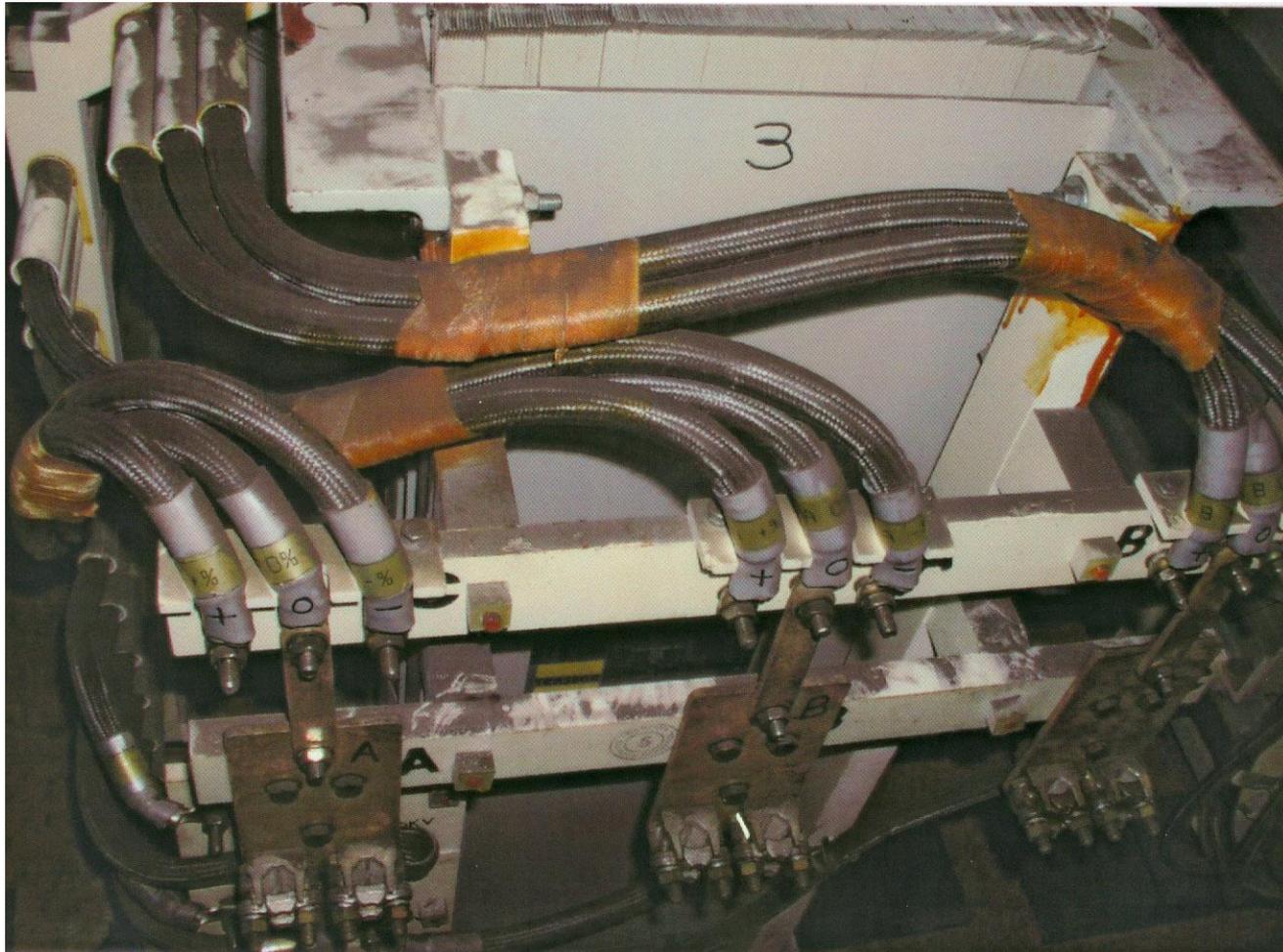
## Messung von Teilentladungen

Beispiel: Teilentladungsspuren (Gleitentladungen) an einer Anschlussbrücke



### Messung von Teilentladungen

Beispiel: Potentialverschiebungen durch Verschmutzung und daraus resultierende Feldstärkeüberhöhungen



### Messung von Teilentladungen

**Beispiel:** Teilentladungsspuren an Isolierstofftrennplatten für Kontaktdurchführungen  
(Vorschädigung durch Teilentladungen)



### Messung von Teilentladungen

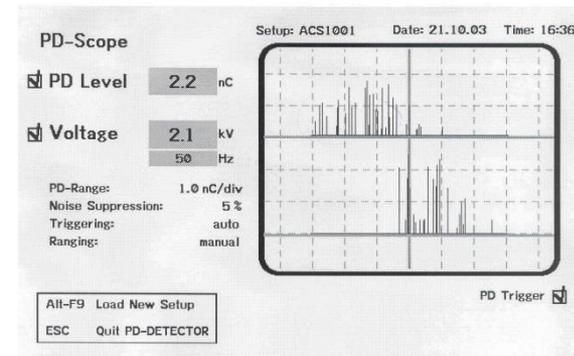
**Beispiel:**  
Schadensbild nach Eintritt  
eines Kurzschlusses mit  
Störlichbogen



## Messung von Teilentladungen

### Prüfverfahren zur zerstörungsfreien Erfassung von Teilentladungen

- **Teilentladungsmesseinrichtungen**  
mit phasenkorrelierter Darstellung  
der Teilentladungen



- **C-tan  $\delta$ -Messung**  
(begrenzte Aussagefähigkeit  
bei Teilentladungen)



### Messung von Teilentladungen

### Ausprägung von Teilentladungen (TE)

**stationär oder impulsförmig**

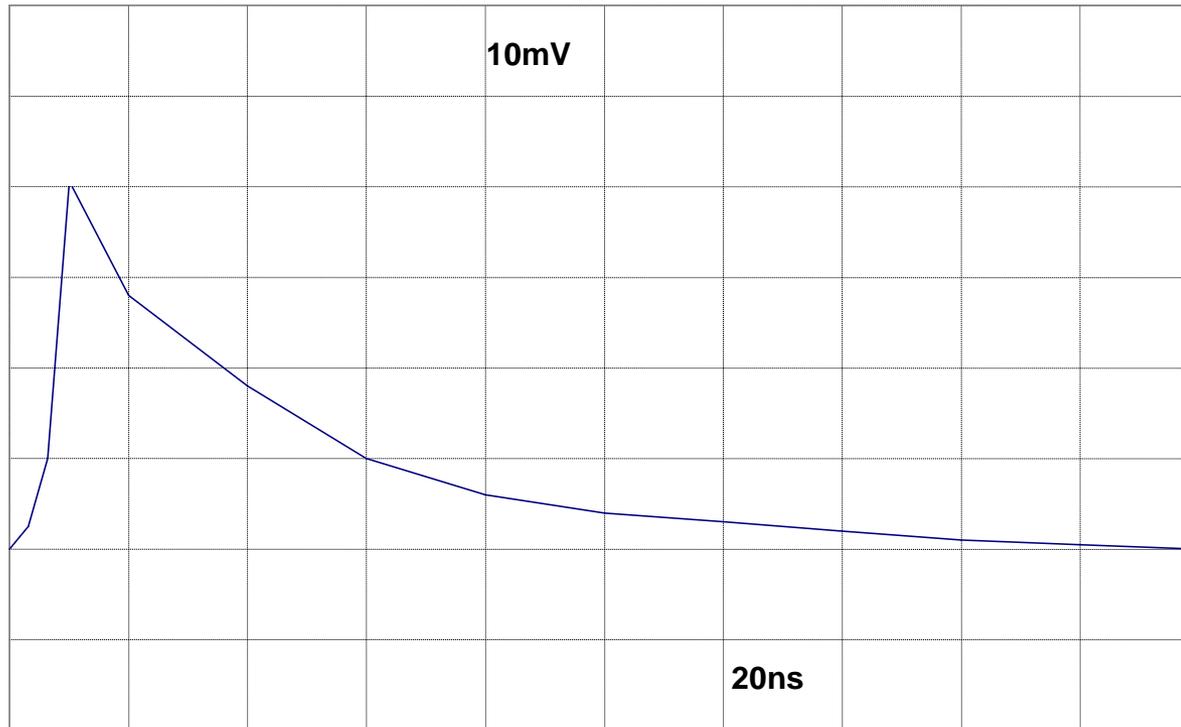
Je nachdem ob die Bedingungen für eine kontinuierliche Energiezufuhr erfüllt sind.

- **Pfad der Ladungszufuhr niederohmig**
  - kontinuierliche Ladungsnachführung
  - **stationäre Teilentladungen**
- **Pfad der Ladungszufuhr hochohmig bei selbstheilender Isolation:**
  - im Anschluss an einen TE-Impuls zunächst Ladungsausgleich
  - Zusammenbruch des E-Feldes an der Entladungsstelle
  - anschließend erneuter Aufbau bis die Bedingungen für eine weitere Teilentladung gegeben sind.
  - **impulsförmige Teilentladungen**
- Durch die Teilentladung werden dabei kleine Ladungsmengen im pC-Bereich an der Entladungsstelle verschoben, die sich auch außerhalb des betroffenen Isoliersystems in einem Messkreis als Ladungverschiebungen, d.h. kleine Ströme abbilden.

## Messung von Teilentladungen

### Trichelimpuls in Luftisolation an einer konischen Spitze

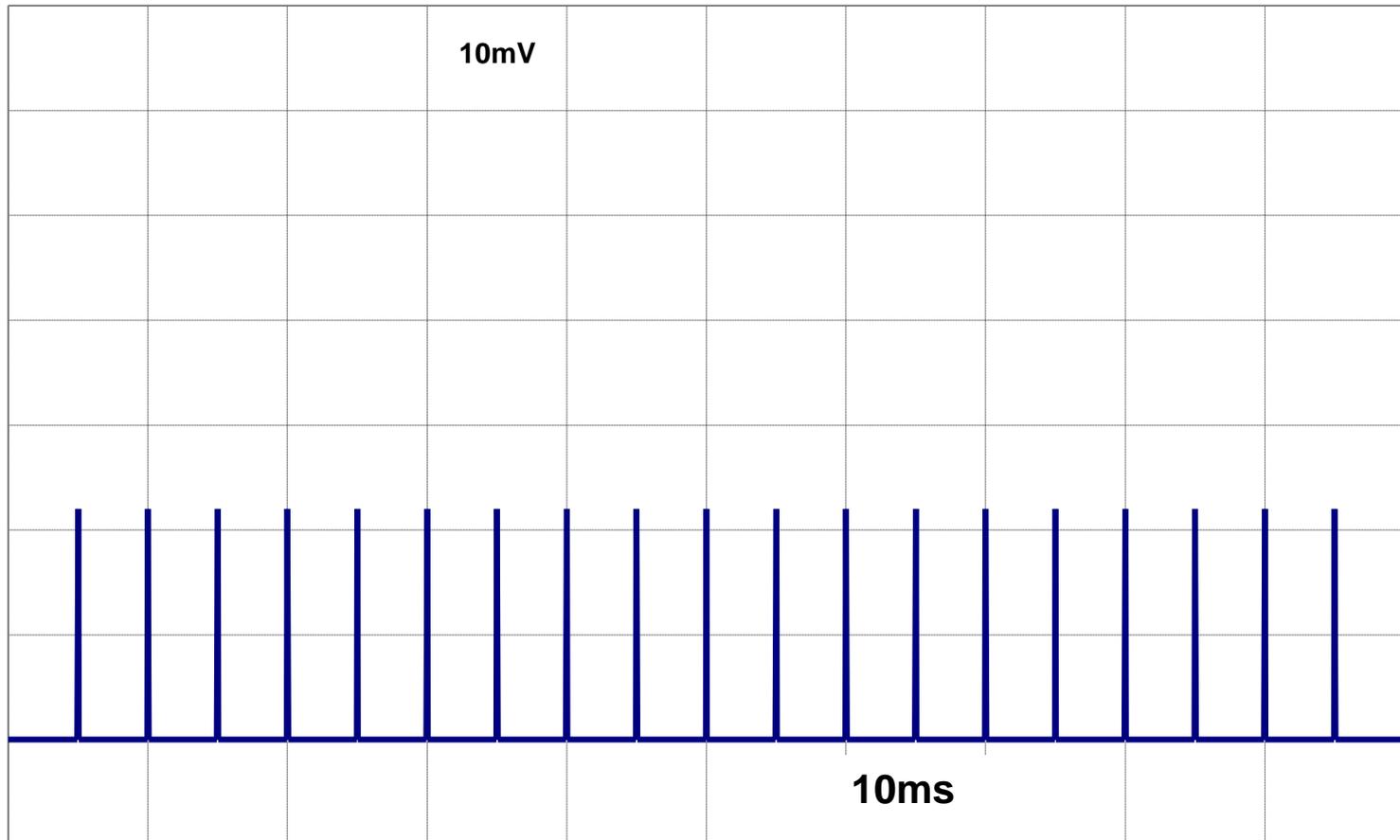
(Länge 40 mm,  $\varnothing$  0,7 mm)



## Messung von Teilentladungen

### Serie von Trichelimpulsen in Luftisolation an einer konischen Spitze

(Länge 40 mm,  $\varnothing$  0,7 mm)



### Messung von Teilentladungen

„Teilentladung“ als **Sammelbegriff** für

- **Koronaentladungen** an Ecken, Kanten, Spitzen oder zylindrischen Leiter in Gasen (Luft, SF<sub>6</sub>) oder flüssigen Isolierstoffen.
- **Entladungen in einem gasgefüllten Hohlraum**, der ganz oder teilweise von einem festen oder flüssigen Isolierstoff umgeben ist oder an eine Elektrode angrenzt.
- **Oberflächen- oder Gleitentladungen an Grenzflächen** verschiedener Isolierstoffe (z.B. Feststoff / Gas)

### Messung von Teilentladungen

#### *Äußere und innere Teilentladungen*

- ***Äußere Teilentladungen***

Teilentladung in Luft oder SF<sub>6</sub> außerhalb eines Betriebsmittels  
(z.B. Freileitungskorona),  
oder  
in einem größeren Gasraum (z.B. SF<sub>6</sub>-Anlage)

- ***Innere Teilentladungen***

Teilentladungen innerhalb eines abgeschlossenen Betriebsmittels  
(z.B. Transformator, Motor, etc.) oder einer Komponente (Isolator,  
Durchführung, etc.)

### Messung von Teilentladungen

#### Physikalischer Ablauf äußerer Teilentladungen

Bei Überschreitung der **Teilentladungs-Einsatzspannung**  $U_i$  setzt in Gasen an Elektroden mit starker Krümmung (Ecken, Kanten, Spitzen etc.) Stossionisation ein.

Je nach momentaner Polarität der Elektrode

- wachsen bei **negativer inhomogener Elektrode** Elektronenlawinen von feldstarken Bereichen ( $\alpha > \eta$ ) in feldschwächere Gebiete vor ( $\alpha > \eta$ ) und werden durch **Elektronenabsorption** aufgelöst,
- oder sie werden bei **positiver inhomogener Elektrode** in Bereichen mit ( $\alpha > \eta$ ) **in Richtung Anode beschleunigt und von dieser absorbiert.**

Bei **Überschreitung der kritischen Elektronenzahl**  $N_{cr}$  (ca.  $10^6 - 10^8$ ) trägt dabei die Lawine durch Aussendung **ionisationsfähiger Photonen** selbst zur **Auslösung weiterer Lawinen** bei.

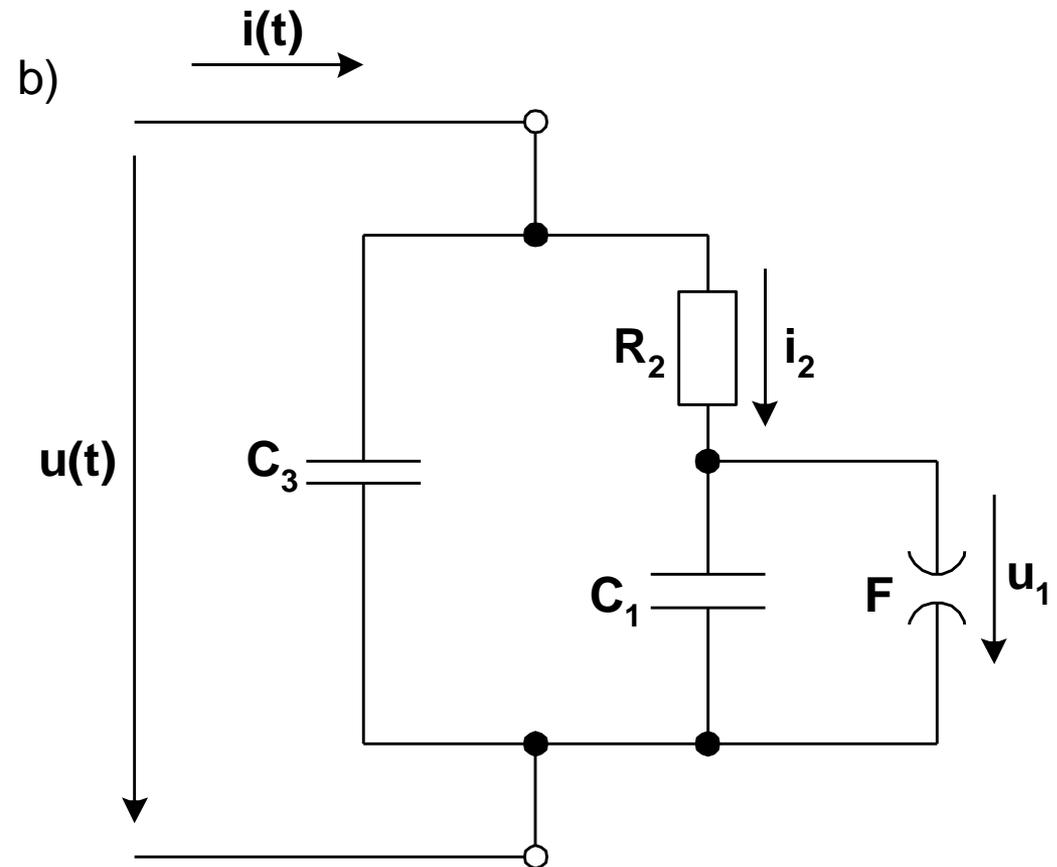
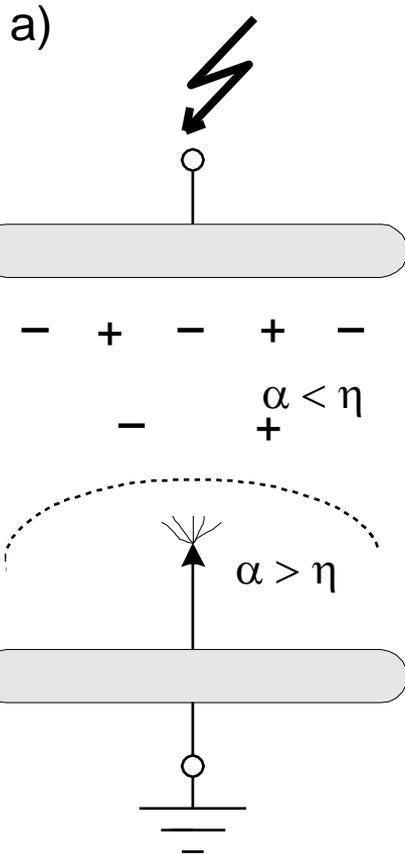
Äußere Teilentladungen führen, je nach Spannungshöhe, zu einer mehr oder weniger großen **Folge von Ladungsimpulsen sehr kurzer Dauer.**

**Teilentladungseinsatz erfolgt stets bei negativer Polarität zuerst an der Elektrode mit dem inhomogeneren Feld (z.B. Spitze).**

## Messung von Teilentladungen

### Spitze-Platte als Beispiel für eine stark inhomogene Elektrodenanordnung

- a) Elektrodenanordnung Spitze-Platte
- b) Ersatzschaltbild



### Messung von Teilentladungen

#### Innere Teilentladungen

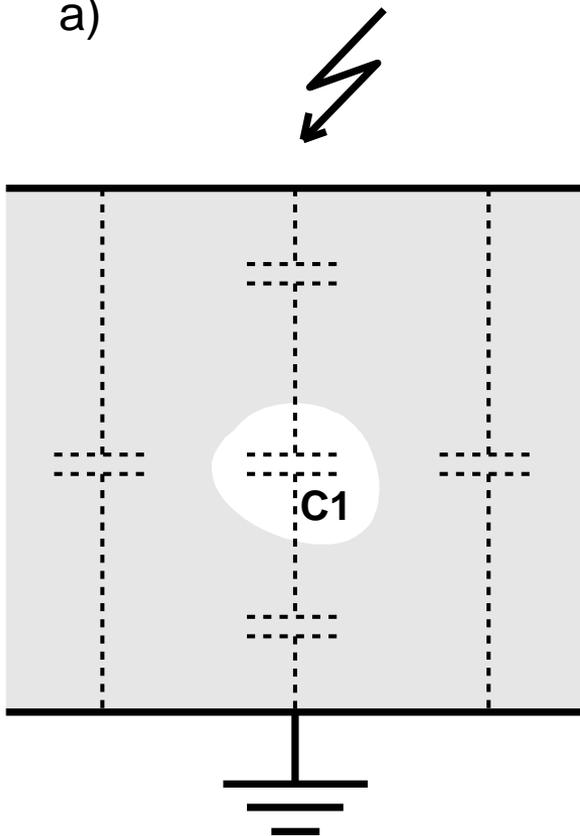
- Können in festen oder flüssigen Isolierstoffen auch weit entfernt von den Elektrodenoberflächen auftreten.
- Schädigung der Isolation an der Stelle des Einschlusses durch Dauerbeanspruchung
- Durch fortlaufende Teilentladungen bilden sich Erosionsdurchschlagskanäle, die nach einiger Zeit auch zum vollständigen Durchschlag führen können.

## Messung von Teilentladungen

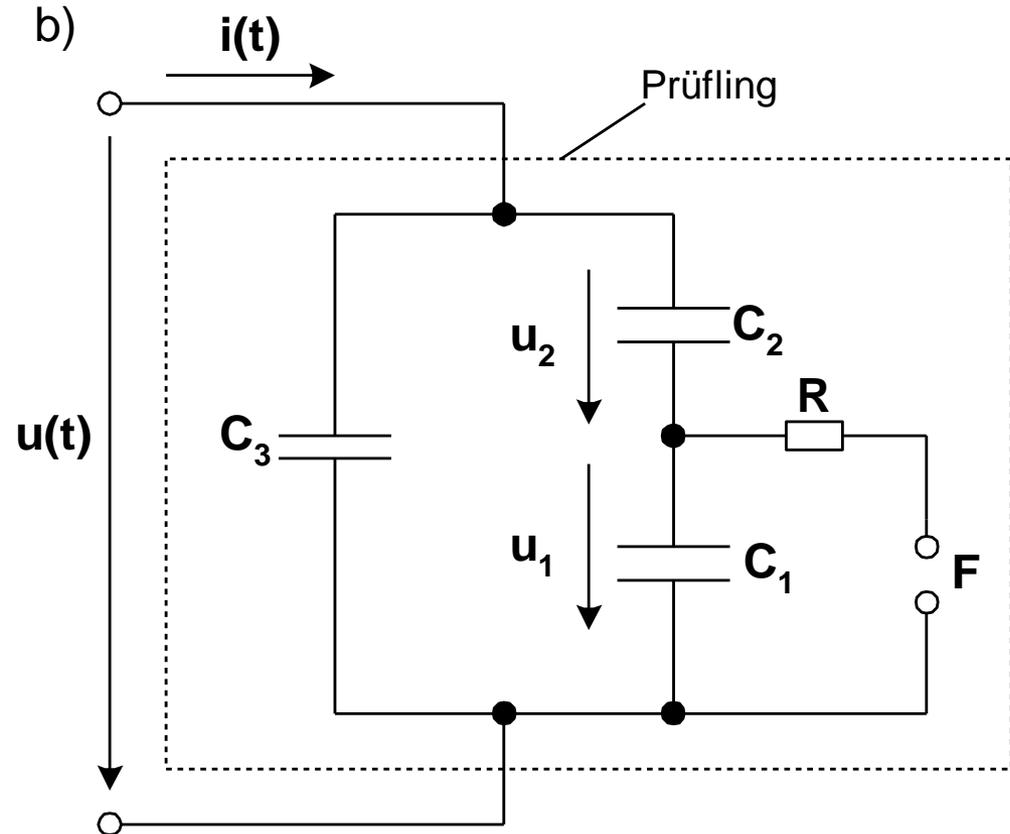
### Beispiel einer Anordnung mit inneren Teilentladungen

- a) Lufteinschluss in einem Isolierstoff
- b) Ersatzschaltbild

a)



b)



### Messung von Teilentladungen

In diesem Ersatzschaltbild stellt

- $C_1$  die Kapazität des Hohlraums,
- $C_2$  das in Reihe mit dem Hohlraum liegende gesunde Dielektrikum und
- $C_3$  die restliche teilentladungsfreie Kapazität des Prüflings dar.

Im Allgemeinen ist  $C_3 \geq C_1 \geq C_2$  und deswegen näherungsweise  $C \approx C_3$ .

#### Anmerkung:

Dieses einfache Ersatzschaltbild ist nur für grundsätzliche Betrachtungen geeignet !

(nicht geeignet, um die komplizierten elektromagnetischen Ausbreitungsvorgänge von Teilentladungen, beispielsweise in Transformatoren, zu beschreiben).

Aufgrund der Vielzahl und des parasitären Charakters der Übertragungsweise entziehen sich größere Geräte meist der Darstellung in einem einfachen Ersatzschaltbild.

### Messung von Teilentladungen

#### Physikalischer Ablauf innerer Teilentladungen

- Die an C liegende Wechselspannung wird durch den kapazitiven Spannungsteiler  $C_1$ ,  $C_2$  geteilt, so dass an einem Hohlraum ohne Teilentladung die Spannung

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

liegt.

- Erreicht die Spannung am Hohlraum, bzw. die Feldstärke im Hohlraum, den zum Selbständigwerden der dort stattfindenden Ionisationsprozesse erforderlichen Wert  $U_{\text{zünd}}$ , so setzt eine **Funkenentladung** ein, und die Spannung am Hohlraum bricht zusammen.
- Nach Unterschreiten der Brennspannung  $U_{\text{Lösch}}$  des Funkens reißt die Entladung ab, die Hohlraumkapazität wird erneut aufgeladen.
- Abhängig von der Höhe der äußeren Spannungsamplitude können pro Halbschwingung ein oder mehrere Teilentladungsimpulse auftreten.

### Messung von Teilentladungen

#### Größte Entladungshäufigkeit bei äußeren Teilentladungen

zuerst im Bereich des Scheitelwerts  $\hat{u}$  bei steigender Prüfspannung

#### Größte Entladungshäufigkeit bei inneren Teilentladungen

im Bereich größter Spannungsänderung  $du/dt$  bei steigender Prüfspannung (Nulldurchgang der Spannung, Flanke)

(Vorzeichen hängt nicht von der Polarität der Spannung, sondern von dem der Spannungsänderung  $du/dt$  ab)

#### **Vorteil:**

- Unterscheidbarkeit innerer und äußerer Teilentladungen
- Hilfreiche Information für die Suche der Fehlerstelle

### Messung von Teilentladungen

#### Begriffe und Definitionen

##### **Teilentladungseinsetzspannung ( $U_i$ ),**

Spannung bei der erste Teilentladungen dauerhaft auf dem Bildschirm zu erkennen sind.

Dazu gehören nicht der Grundstörpegel oder Störungen durch Spannungs-änderungen am Transformator.

##### **Teilentladungsaussetzspannung ( $U_e$ ),**

Spannung bei der die letzten dauerhaften Teilentladungen aufhören, nachdem Teilentladungen angezeigt wurden.

Wiederum ist der Grundstörpegel und Störungen durch den Transformator nicht zu beachten.

### Messung von Teilentladungen

#### Begriffe und Definitionen

##### Scheinbare Ladung $q$

Scheinbare Ladung  $q$  einer Teilentladung (VDE 0434) ist die Ladung, die infolge einer Teilentladung kurzzeitig zwischen den Klemmen eines Prüflings eingespeist wird und die Spannung zwischen den Klemmen vorübergehend um den selben Wert ändert wie die Teilentladung selbst.

##### Anmerkung:

Die scheinbare Ladung  $q$  ist nicht gleich der Ladung, die tatsächlich an der Entladungsstelle auftritt und die nicht direkt gemessen werden kann.

Die von der Teilentladung an den Klemmen des Prüflings hervorgerufene Impulsform der Spannung kann in der Praxis von der durch den Kalibrierimpuls erzeugten abweichen.

Die scheinbare Ladung  $q$  wird als die Ladung angesehen, die bei Einspeisung in den Klemmen des Prüflings die gleiche Anzeige am Messgerät wie die Teilentladung selbst ergibt.

### Messung von Teilentladungen

### Messschaltungen zur Teilentladungsmessung

#### Anordnung der Messimpedanz $Z_m$

- entweder in Reihe mit dem Prüfling gegen Erde

oder

- mittels eines geeigneten Kopplungskondensators  $C_K$   
parallel zum Prüfling

#### Bei Reihenschaltung von $C_K$ und $Z_m$ :

Teil des Teilentladungsstroms kann an der Messimpedanz vorbeifließen, wenn der Prüfling nicht so abgeschirmt ist, dass der Gesamtstrom mit Sicherheit erfasst wird und zwangsläufig über die Messimpedanz fließt.

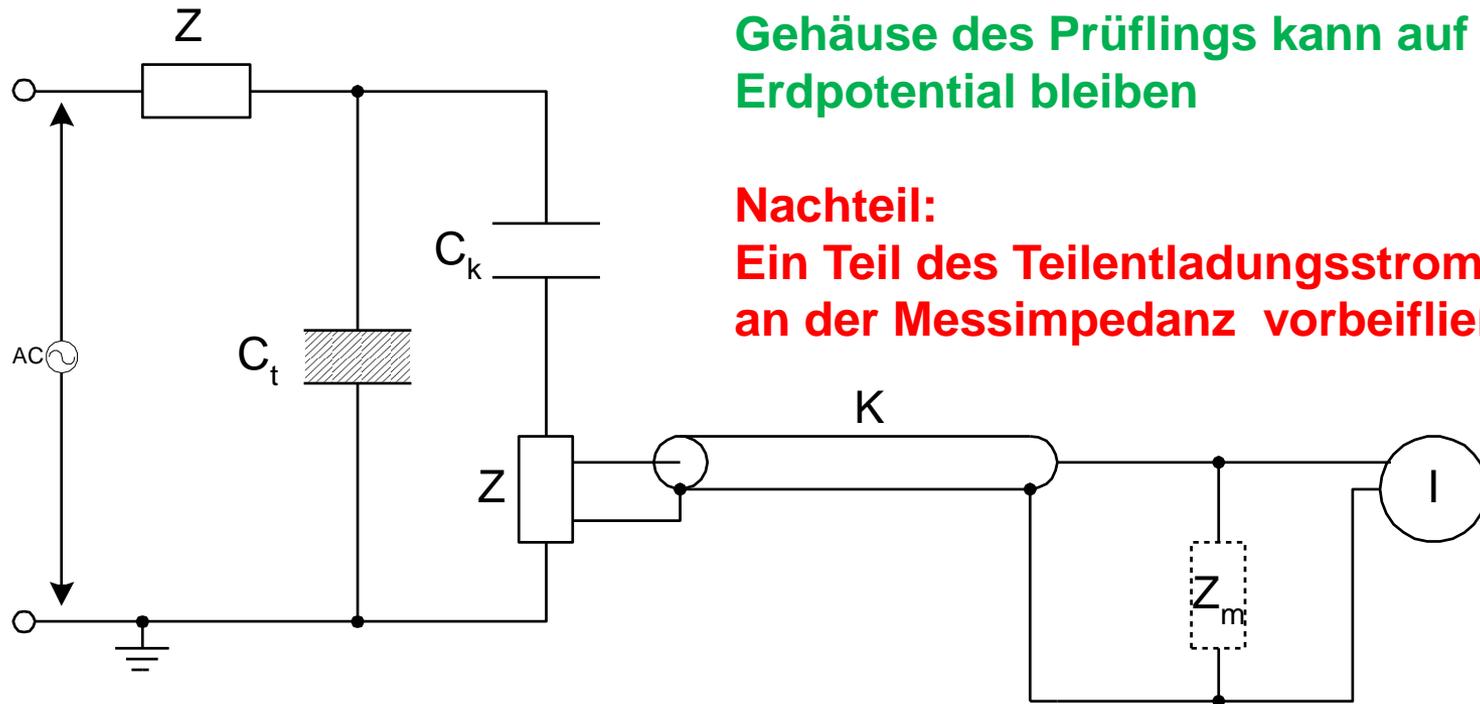
**3 Grundschaltungen** vorhanden, von denen alle anderen Schaltungen zur Anzeige und Messung von Teilentladung abgeleitet sind.

## Messung von Teilentladungen

### Messschaltungen zur Teilentladungsmessung

#### Messschaltung 1:

Messimpedanz  $Z_m$  in Reihe mit dem Kopplungskondensator  $C_k$



**Vorteil:**

**Gehäuse des Prüflings kann auf Erdpotential bleiben**

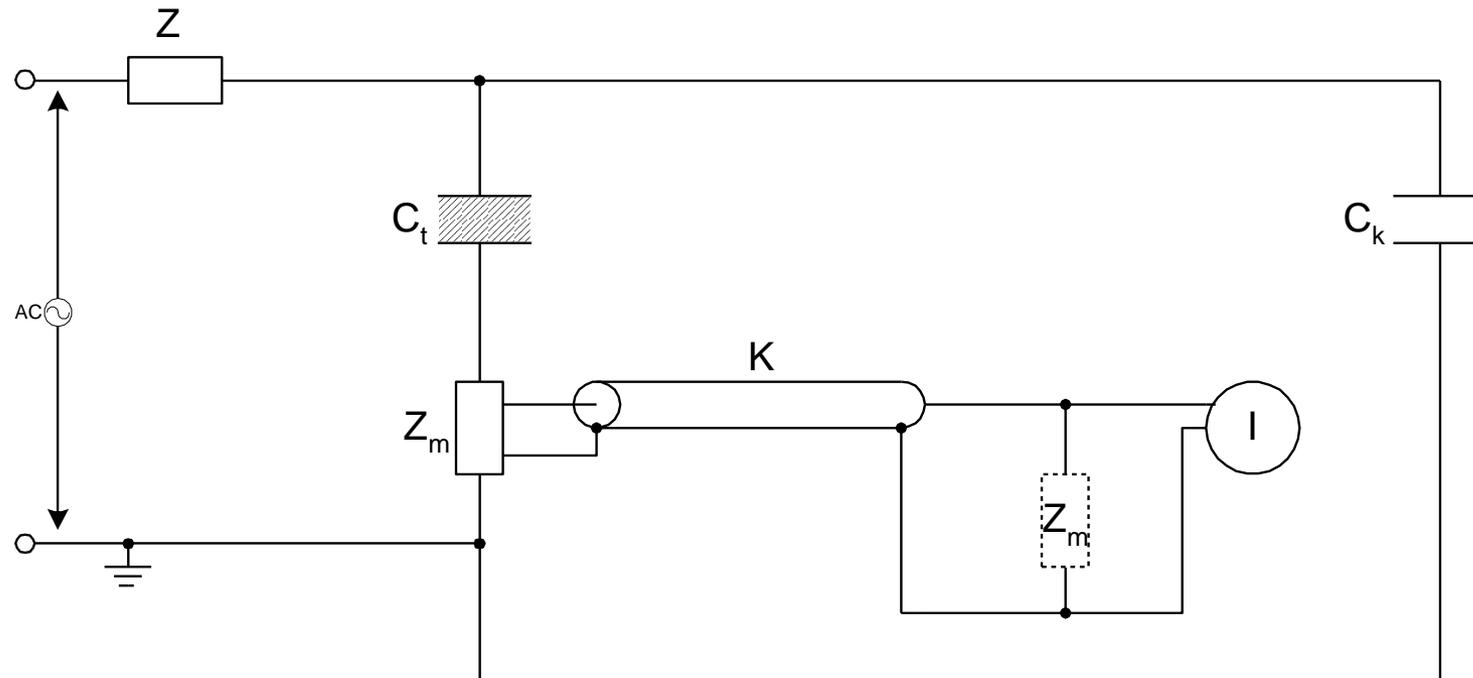
**Nachteil:**

**Ein Teil des Teilentladungsstroms kann an der Messimpedanz vorbeifließen**

## Messung von Teilentladungen

### Messschaltungen zur Teilentladungsmessung

**Messschaltung 2:**  
**Messschaltungen zur Teilentladungsmessung**  
**(Messimpedanz  $Z_m$  in Reihe mit dem Prüfling  $C_t$ )**



### Messung von Teilentladungen

#### Messschaltungen zur Teilentladungsmessung

##### Messschaltung 2:

Messimpedanz  $Z_m$  in Reihe mit dem Prüfling  $C_t$

##### Vorteile:

- Vollständiger Teilentladungsstrom des Prüflings muss über  $Z_m$  fließen

##### Nachteil:

- Niederspannungsseite des Prüflings muss gegen Erde isoliert sein

#### Gelegentliche Verwendung einer modifizierten Messschaltung 2:

Funktion des Kondensators  $C_k$  wird von der Streukapazität gegen Erde übernommen.

##### Anmerkung:

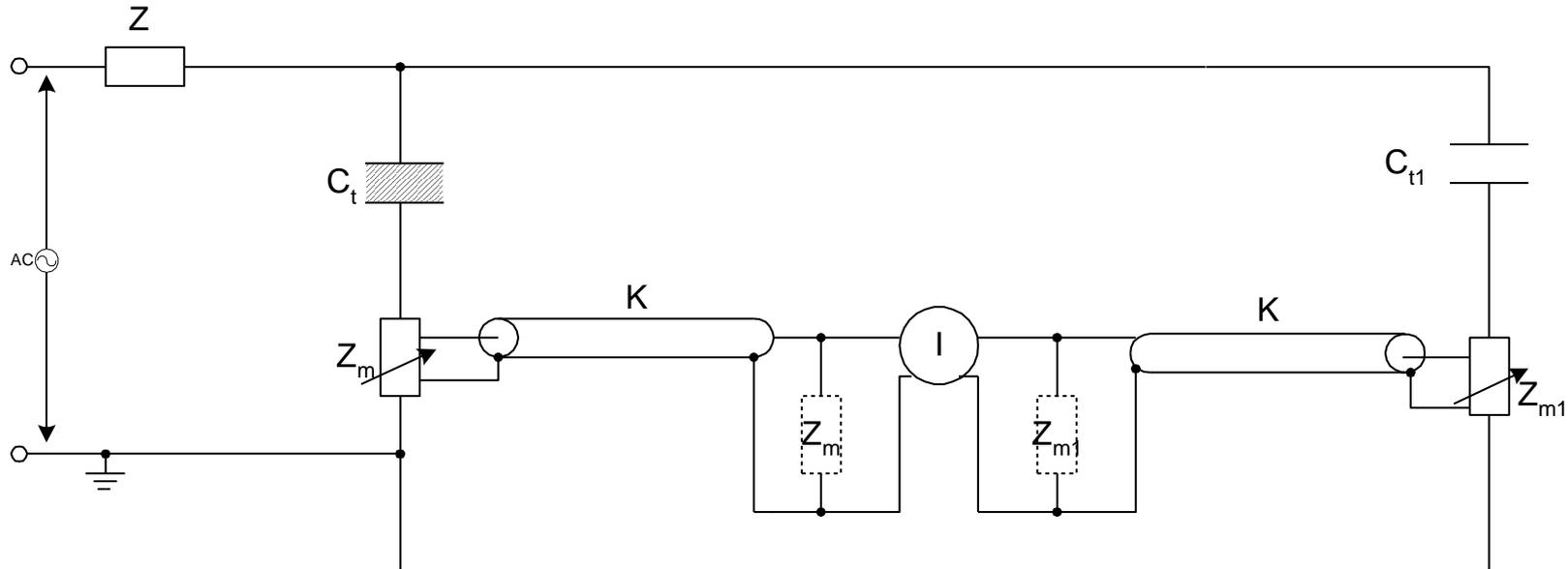
Möglich, wenn die Eigenkapazität  $C_t$  des Prüflings klein im Verhältnis zu der Streukapazität gegen Erde ist.

Es reicht jedoch auch aus, wenn die Eigenkapazität des Prüftransformators in derselben Größe wie  $C_t$  liegt. → Dann muss jedoch  $Z$  entfallen.

## Messung von Teilentladungen

### Messschaltungen zur Teilentladungsmessung

#### Messschaltung 3: Abgeglicherer Prüfkreis / Brückenschaltung



### Messung von Teilentladungen

### Messschaltungen zur Teilentladungsmessung

#### Messschaltung 3:

#### Abgeglicherer Prüfkreis / Brückenschaltung

- 2 Messimpedanzen  $Z_m$  und  $Z_{m1}$
- Niederspannungsseite des Prüflings und des Kopplungskondensators  $C_{t1}$  müssen beide gegen Erde isoliert sein.

#### Vorteil der Messschaltung 3

- Äußere Störungen werden teilweise eliminiert
- Optimierung der Störunterdrückung:
  - Künstliche Entladungsquelle zwischen HS-Klemme und Erde schalten.
  - Impedanz  $Z_m$  oder  $Z_{m1}$  bis zum Minimum der Messgeräteanzeige ändern.

**Dämpfungsverhältnisse von 3 bis 1000 oder mehr gegenüber äußeren Störern sind möglich.**

### Messung von Teilentladungen

### Messschaltungen zur Teilentladungsmessung

### Funktion von Z in den Messschaltungen 1, 2 und 3:

- **Filter gegen Störimpulse aus dem Netz**  
Z ist eine **Induktivität** (Tiefpasseigenschaft)
- **Erhöhung der Messempfindlichkeit,**  
durch **Abblocken der TE-Impulsanteile des Prüflings, die sonst über die Impedanz der Spannungsquelle abfließen würden.**

### Anmerkung:

- Durch den Spannungszusammenbruch an der Fehlerstellenkapazität  $C_1$  bricht auch die Spannung  $u(t)$  über dem gesamten Prüfling kurzfristig ein,
- Nachladung zunächst aus der Streukapazität  $C_3$  des Prüflings.
- Z verhindert aufgrund der Trägheit der Induktivität zunächst ein Nachladen des Prüflings aus der Spannungsversorgung, so dass praktisch der gesamte Nachladestrom des Prüflings der Koppelkapazität entnommen werden muss. (fließt damit über die Messimpedanz  $Z_m$  ).
- Erst danach erfolgt eine Nachladung aus dem Transformator.

### Messung von Teilentladungen (TE)

### Kalibrierung

#### ***Begründung für Kalibrierungen vor jeder Prüfung***

Voraussetzung für vergleichbare Ergebnisse bei Messungen mit

- verschiedenen TE- Messeinrichtungen,
- unterschiedlichen Anlagenkomponenten  
(z.B. andere Kapazität des Koppelkondensators),
- Versuchsanordnungen und
- Messaufgaben (z.B. TE-Intensitäten).

### Messung von Teilentladungen (TE)

#### Kalibrierung

#### Durchführung

- Einspeisung einer bekannte Ladungsmenge  $Q_{\text{Kal}}$  aus einem Kalibrator am Ort des Prüflings in die Messschaltung ohne Prüfling.
- Dem von der Teilentladungsmesseinrichtung erfassten Signal wird für den gewählten Messbereich, z.B. per Rechnereingabe, der Ladungswert des Kalibrierimpulses zugeordnet.
- Die durch Teilentladungen des Prüflings hervorgerufene Ladungsmenge ( $u(t)$  an  $Z_m \rightarrow i(t) \rightarrow Q = \int i(t) dt$ ) wird mit der bekannten Ladungsmenge des Kalibrierimpulses  $Q_{\text{Kal}}$  verglichen (weitgehend unabhängig von den Komponentendaten der Messschaltung).

**Erzeugung einer bekannte und genau definierte Ladungsmenge im Kalibrator:**

$$Q_{\text{Kal}} = C_{\text{Kal}} \cdot U$$

**Aufladen eines bekannten Kondensators  $C_{\text{Kal}}$  mit definierter Spannung  $U$ .**

### Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

#### Begriffe, Definitionen

#### Isolationswiderstand von Isolierstoffen (VDE 0303 Teil 31)

Der Isolationswiderstand zwischen zwei Elektroden, die in Kontakt mit einem Probekörper oder in ihm eingebettet sind, ist das

mathematische Verhältnis der

**angelegten Gleichspannung**

zur

**Gesamtstromstärke** zwischen den Elektroden

nach einer festgelegten Zeit nach Anlegen dieser Spannung.

**Der Isolationswiderstand ist sowohl vom Volumenwiderstand als auch vom Oberflächenwiderstand des Probekörpers abhängig.**

### Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

#### Begriffe, Definitionen

#### Durchgangswiderstand (VDE 0303 Teil 30)

Das Ergebnis der **Division** einer

zwischen zwei Elektroden **angelegten Gleichspannung**, die an zwei (gegenüberliegenden) Flächen eines Probekörpers angebracht sind, durch

die **stetige Stromstärke zwischen diesen Elektroden**, mit **Ausnahme des Stroms entlang der Oberfläche** unter Vernachlässigung möglicher Polarisationserscheinungen an den Elektroden.

#### **Anmerkung:**

Wenn nicht anders festgelegt, wird der Durchgangswiderstand 1 min. nach Anlegen der Spannung bestimmt.

### Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

#### Begriffe, Definitionen

### Spezifischer Durchgangswiderstand (VDE 0303 Teil 30)

Das Ergebnis der Division einer

**Gleichstrom-Feldstärke**

durch die

stetige **Stromdichte** in einem isolierenden Werkstoff.

In der Praxis ist es der auf ein kubisches Einheitsvolumen bezogene Durchgangswiderstand.

#### **Anmerkung:**

Die SI-Einheit des spezifischen Durchgangswiderstands ist das  $\Omega\text{m}$ . Üblich ist auch die Verwendung der Einheit  $\Omega\text{cm}$ .

### Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

#### Begriffe, Definitionen

#### Oberflächenwiderstand (VDE 0303 Teil 30)

Das Ergebnis der **Division** einer  
zwischen zwei Elektroden auf einer Oberfläche eines Probekörpers  
**angelegten Gleichspannung**,  
durch  
die **Stromstärke zwischen diesen Elektroden in einer  
angegebenen Anlegezeit der Spannung**, wobei mögliche  
Polarisationserscheinungen an den Elektroden vernachlässigt  
werden.

#### Anmerkung 1:

Wenn nicht anders festgelegt, wird der Oberflächenwiderstand 1 min. nach Anlegen der Spannung bestimmt.

#### Anmerkung 2:

Im allgemeinen fließt der Strom hauptsächlich durch eine Oberflächenschicht des Probekörpers und irgendeine damit verbundene Feuchtigkeit und Oberflächenverunreinigung, aber es fließt auch ein Teil des Stromes durch das Innere des Probekörpers.

### Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

#### Begriffe, Definitionen

#### Spezifischer Oberflächenwiderstand (VDE 0303 Teil 30)

Das Ergebnis der **Division**

einer **Gleichstrom-Feldstärke**

durch

die **lineare Stromdichte in einer Oberflächenschicht**  
eines isolierenden Werkstoffes.

In der Praxis ist es der auf eine quadatische Fläche bezogene Oberflächenwiderstand. Die Größe des Quadrates ist dabei unerheblich.

#### **Anmerkung:**

Die SI-Einheit des spezifischen Oberflächenwiderstands ist das  $\Omega$ .

### Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

### Allgemeine Hinweise zur Prüfung von Isolierstoffen

Bei Isolierstoffprüfungen sind stets die entsprechenden Normen über die betreffende Materialart zu beachten.

Sie regeln u.a. die **Vorbehandlung**:

- ggf. Lagerung bei vorgeschriebener Temperatur und Luftfeuchtigkeit über eine bestimmte Zeit,
- mechanische Vorbehandlung durch Ziehen, Drücken, Biegen usw. ,
- Behandlung der Proben mit Flüssigkeiten oder Chemikalien

und geben genaue **Vorschriften über** die erforderlichen

- Messeinrichtungen,
- Messspannungen,
- Messfrequenzen und
- Elektrodenanordnungen.

### Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

#### Beispiele für Normen zur Prüfung von Isolierstoffen

|  |          |
|--|----------|
| Isolierholz                            | VDE 0310 |
| Isolierpapiere auf Zellulosebasis      | VDE 0311 |
| Pressspan                              | VDE 0315 |
| Hartpapier, Hartgewebe                 | VDE 0318 |
| Isolierfolien                          | VDE 0345 |
| Transformatorenöle                     | VDE 0370 |
| Schwefelhexafluorid (SF <sub>6</sub> ) | VDE 0373 |

### Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

#### Obligatorischer Inhalt des Prüfberichtes

- Messergebnisse
  
- Angaben über
  - Art,
  - Bezeichnung und Lieferform des Isolierstoffes,
  - Herstellung, Form und Abmessungen der Proben, sowie die Art und Dauer der Vorbehandlung enthalten.
  - Art und Höhe der Messspannung,
  - Elektrodenanordnung und ihre Abmessungen.

### Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

### Messung des elektrischen Widerstandes von nichtmetallischen Werkstoffen ( VDE 0303 Teil 30)

Messspannungen nach VDE 030 Teil 30 vorzugsweise

**100 V, 500V oder 1000 V DC**

(in Sonderfällen auch 10 V oder 500 V)

Die der Probe zugeführte elektrische Leistung kann zu einer Erwärmung der Probe führen, die den Widerstand merklich ändern kann.

**Leistungsaufnahme der Probe nicht größer als  $0,1 \text{ W/cm}^3$**

### Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

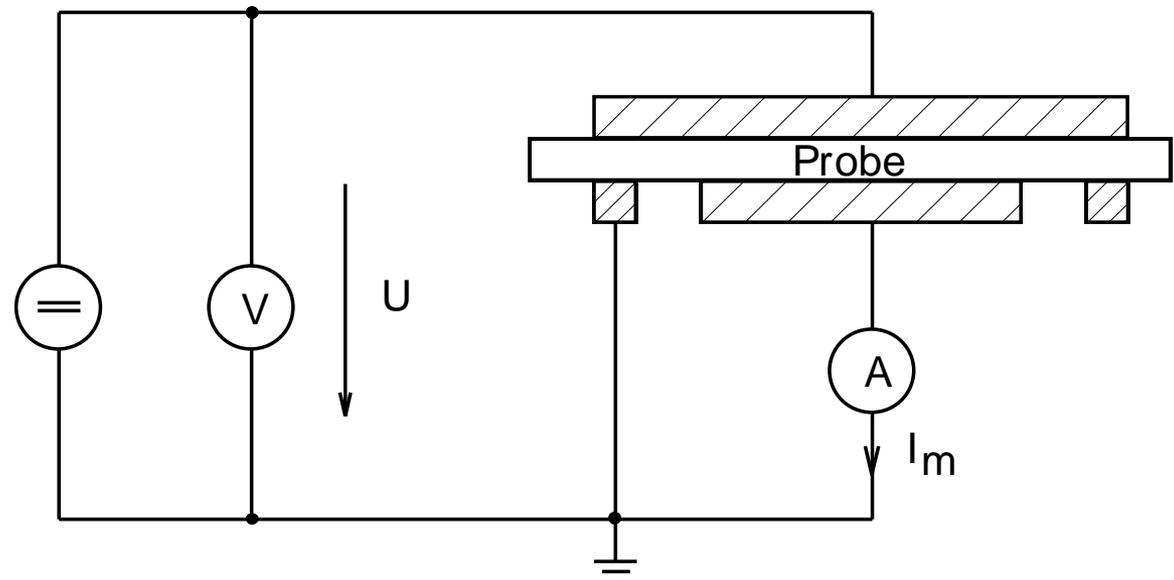
### Messung des elektrischen Widerstandes von nichtmetallischen Werkstoffen ( VDE 0303 Teil 30)

#### Durchgangswiderstand ( $R_D$ )

**Prüflinge:** Kreisförmiger Plattenelektroden mit Schutzring

**Schutzring:** Schutzring und Messelektrode liegen auf gleichem Potential,  
→ Fehlerströme ( z.B. Oberflächenströme) werden nicht mitgemessen

#### Prinzipielle Prüfanordnung zur Messung des Durchgangswiderstandes



### Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

### Messung des elektrischen Widerstandes von nichtmetallischen Werkstoffen ( VDE 0303 Teil 30)

#### Durchgangswiderstand ( $R_D$ )

#### Berechnung des spezifische Durchgangswiderstand $\rho_D$ in $\Omega \cdot \text{cm}$ :

$\rho_D$  wird aus  $R_D$  eines Würfels von 1 cm Kantenlänge berechnet.

$$\rho_D = \frac{R_D \cdot F}{a} = \frac{U \cdot F}{I_m \cdot a}$$

mit:  $F$  = Messfläche in  $\text{cm}^2$   
 $a$  = Probendicke in cm

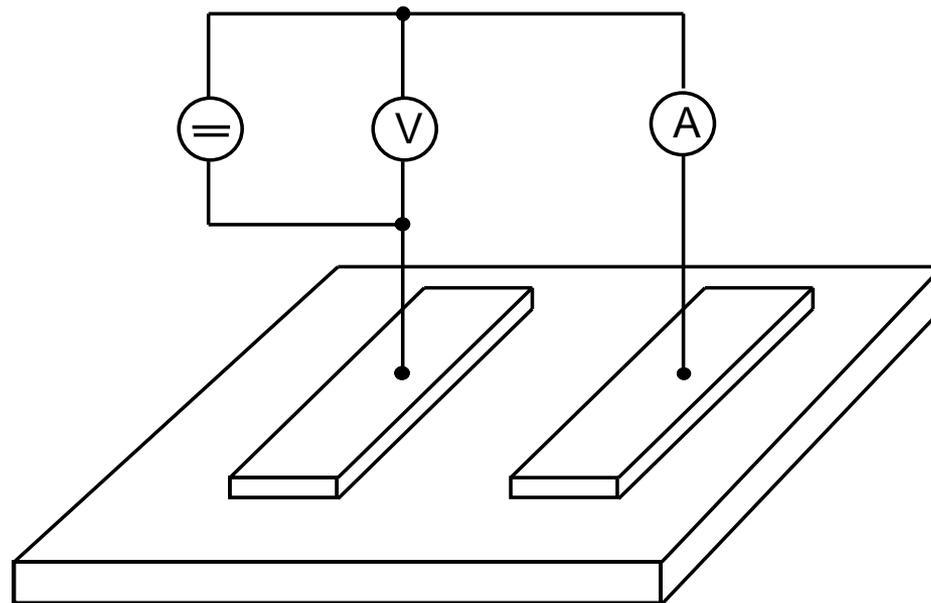
### Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

### Messung des elektrischen Widerstandes von nichtmetallischen Werkstoffen ( VDE 0303 Teil 30)

#### Oberflächenwiderstand ( $R_o$ )

- Gibt Aufschluss über den an der Oberfläche eines Isolierstoffes herrschenden Isolationszustand.
- Sehr stark von äußeren Einflüssen wie z.B. Feuchtigkeit und Verschmutzung abhängig.

**Prinzipielle Prüfanordnung  
zur Messung des  
Oberflächenwiderstandes  
nach VDE 0303 Teil 30**



### Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

### Messung des elektrischen Widerstandes von nichtmetallischen Werkstoffen ( VDE 0303 Teil 31)

#### Widerstand zwischen Stöpseln ( $R_S$ )

- Gibt Aufschluss über das elektrische Isoliervermögen und ggf. über etwa vorhandene Inhomogenitäten eines Isolierstoffes.
- Bei der Messung dieses Widerstandes wird auch der Oberflächenwiderstand miterfasst (relativ grobe Messung begrenzter Genauigkeit).
- **Anwendung:** Besonders bei Schichtstoffen und Gesteinen  
Plattenmaterial Maße 50mm x 75mm

- **Messelektroden:** 2 zylindrische leicht konische Messing- oder Stahlstifte  
(Verjüngung ca. 2%; Durchmesser 5mm)

**Elektrodenaufnahme:**

- 2 zur Probenoberfläche senkrechte Durchgangsbohrungen mit einem Mittenabstand von  $25 \pm 1$  mm
- Die Stöpsel-Elektroden werden stramm passend in die Bohrungen eingesetzt.
- Abhängig von der Form der Probe Mindestmaße nach VDE 030 Teil 3 einhalten.

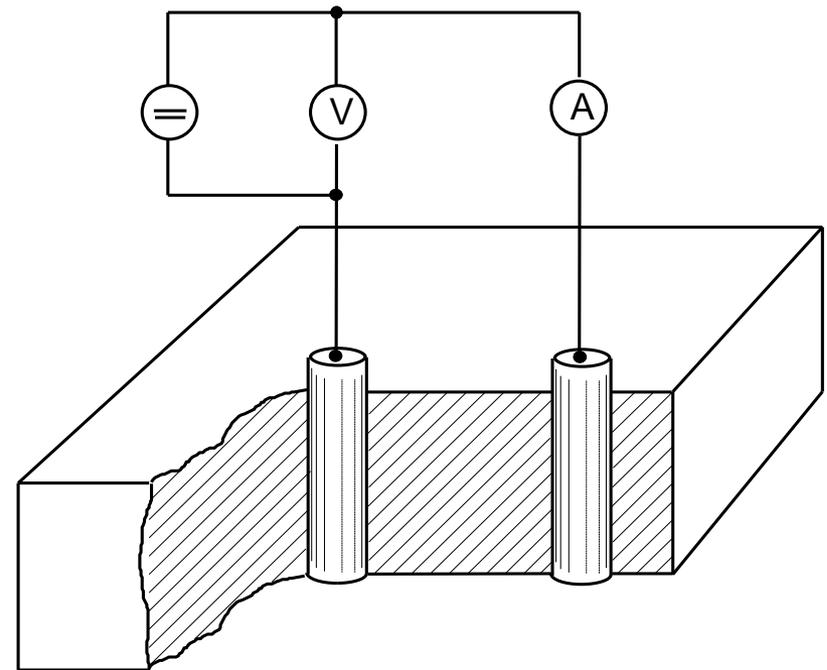
### Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

### Messung des elektrischen Widerstandes von nichtmetallischen Werkstoffen ( VDE 0303 Teil 30)

### Widerstand zwischen Stöpseln ( $R_S$ )

#### Prinzipielle Prüfanordnung zur Messung des Stöpselwiderstandes nach VDE 0303 Teil 31

(Stiftdurchmesser 5mm ;  
Verjüngung ca. 2% ;  
Probenmaß 50mm x 75mm ;  
Prüfspannung  $500 \pm 10$  V ;  
Anlegezeit 1min)



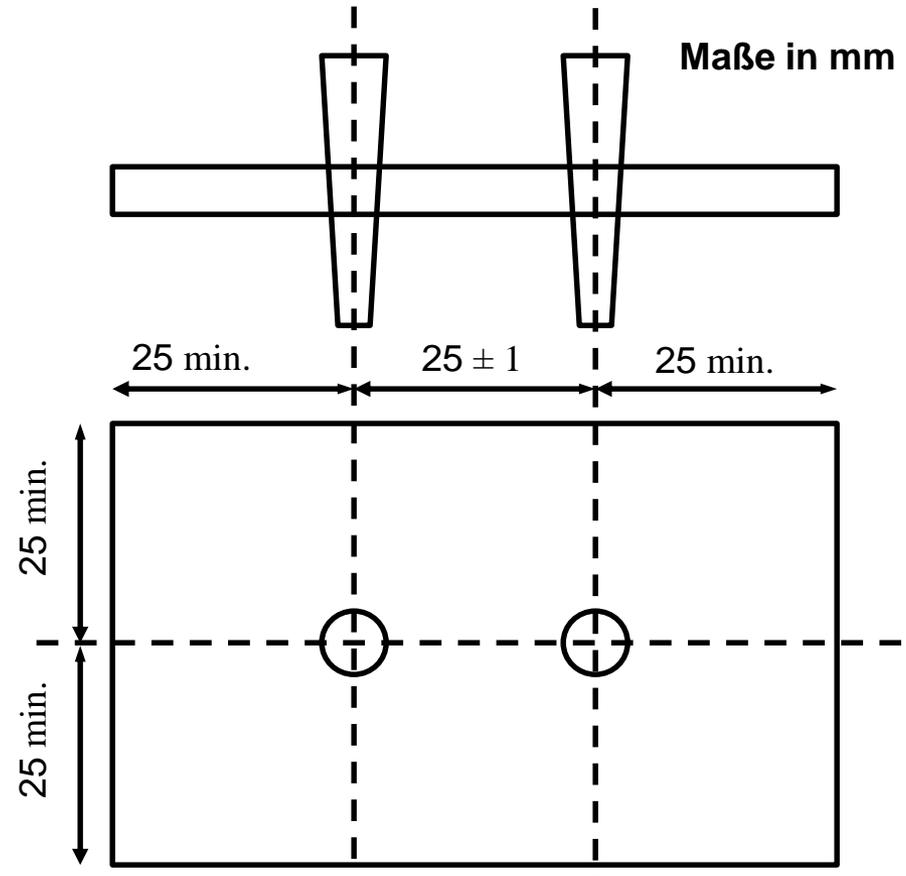
## Bestimmung elektrischer Widerstandswerte

### Messung des elektrischen Widerstandes von nichtmetallischen Werkstoffen ( VDE 0303 Teil 30)

#### Widerstand zwischen Stöpseln ( $R_S$ )

#### Prinzipielle Prüfanordnung zur Messung des Stöpselwiderstandes nach VDE 0303 Teil 31

(Stiftdurchmesser 5mm ;  
Verjüngung ca. 2% ;  
Prüfspannung  $500 \pm 10$  V ;  
Anlegezeit 1min)



### Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften ( VDE 0303 Teil 4)

Als **dielektrische Eigenschaften** gelten nach VDE 0303 Teil 4

- die **Dielektrizitätszahl (DZ)  $\epsilon_r$**
- der **dielektrische Verlustfaktor  $\tan \delta$**
- und die **dielektrische Verlustzahl (DV)  $\epsilon_r''$**

#### Prüfgeräte:

- möglichst **oberschwingungsfreie Wechselspannungsquelle**,
- **empfindliches Anzeigegerät** für den Abgleich der Messeinrichtung,
- **Messeinrichtung**, die es ermöglicht, die Kapazität vom Betrag  $C_x$  mindestens auf  $0,01 \cdot C_x + 0,5 \text{ pF}$  und den Betrag des dielektrischen Verlustfaktors  $\tan \delta$  mindestens auf  $0,05 \cdot |\tan \delta| + 0,1 \cdot 10^{-3}$  zu bestimmen
- **Elektrodenanordnung**, bei der die Probe zwischen den Elektroden in einem möglichst homogenen definierten elektrischen Feld liegt.

### Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften ( VDE 0303 Teil 4)

#### Anforderungen an den Wechselspannungserzeuger:

- muss die für die Messung erforderliche Frequenz bereitstellen können
- muss von der Messschaltung genügend entkoppelt sein, damit durch den Abgleich der Messschaltung keine Spannungs- und Frequenzänderungen hervorgerufen werden.
- Frequenzgenauigkeit 5 %
- Oberschwingungsgehalt  $< 1 \%$

Als **Anzeigegeräte für den Abgleich** der Messeinrichtung z.B. benutzt werden

- Kopfhörer mit Verstärker oder Frequenzumsetzer,
- elektronische Spannungsmesser,
- Nullindikatoren mit Sichtanzeige.

Als **Messeinrichtungen** können z.B. benutzt werden

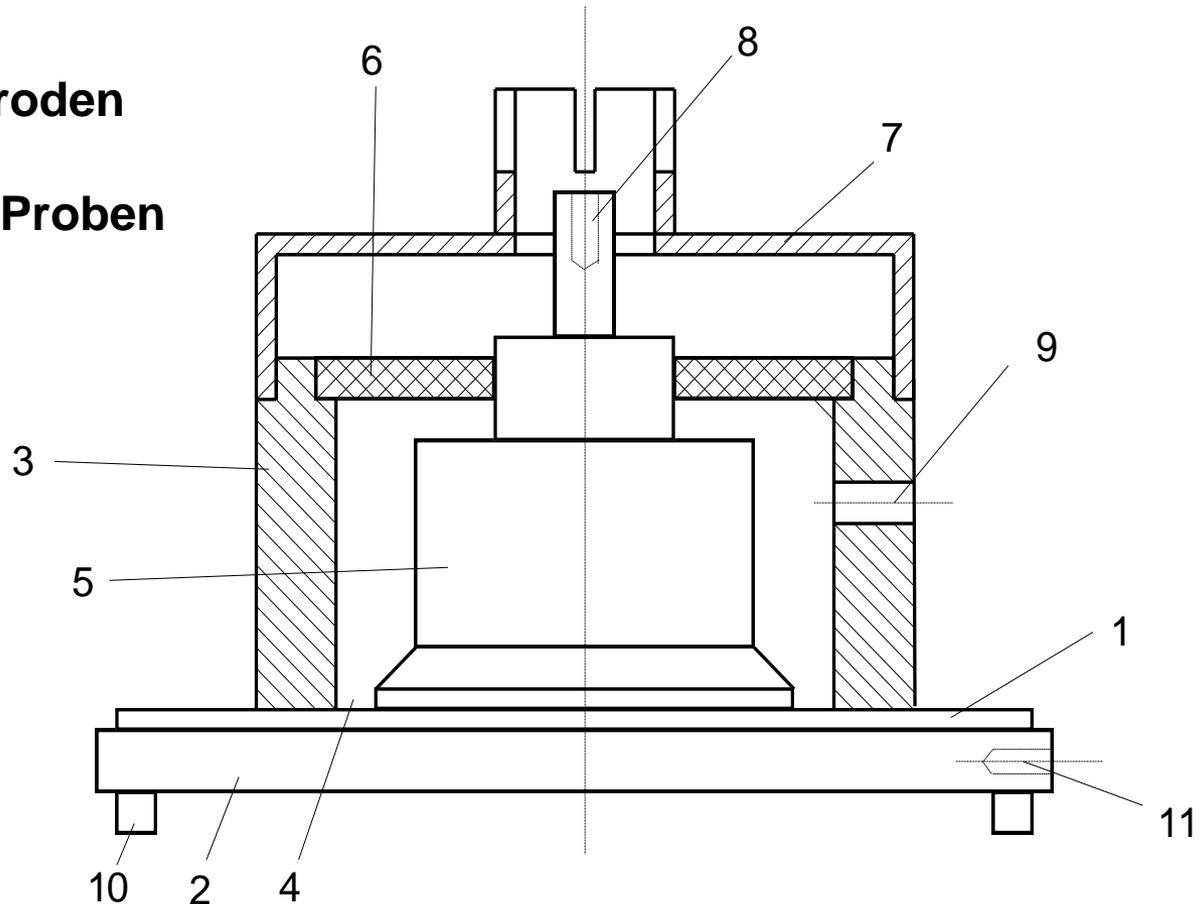
- Hochspannungsbrücke nach Schering (50 Hz)
- C-tan -Messbrücke mit Differenztransformator

### Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften (VDE 0303 Teil 4)

### Elektrodenanordnungen für verschiedene Isolierstoffe

#### Elektrodenanordnung mit kreisförmigen Plattenelektroden mit Schutzring für plattenförmige Isolierstoff-Proben

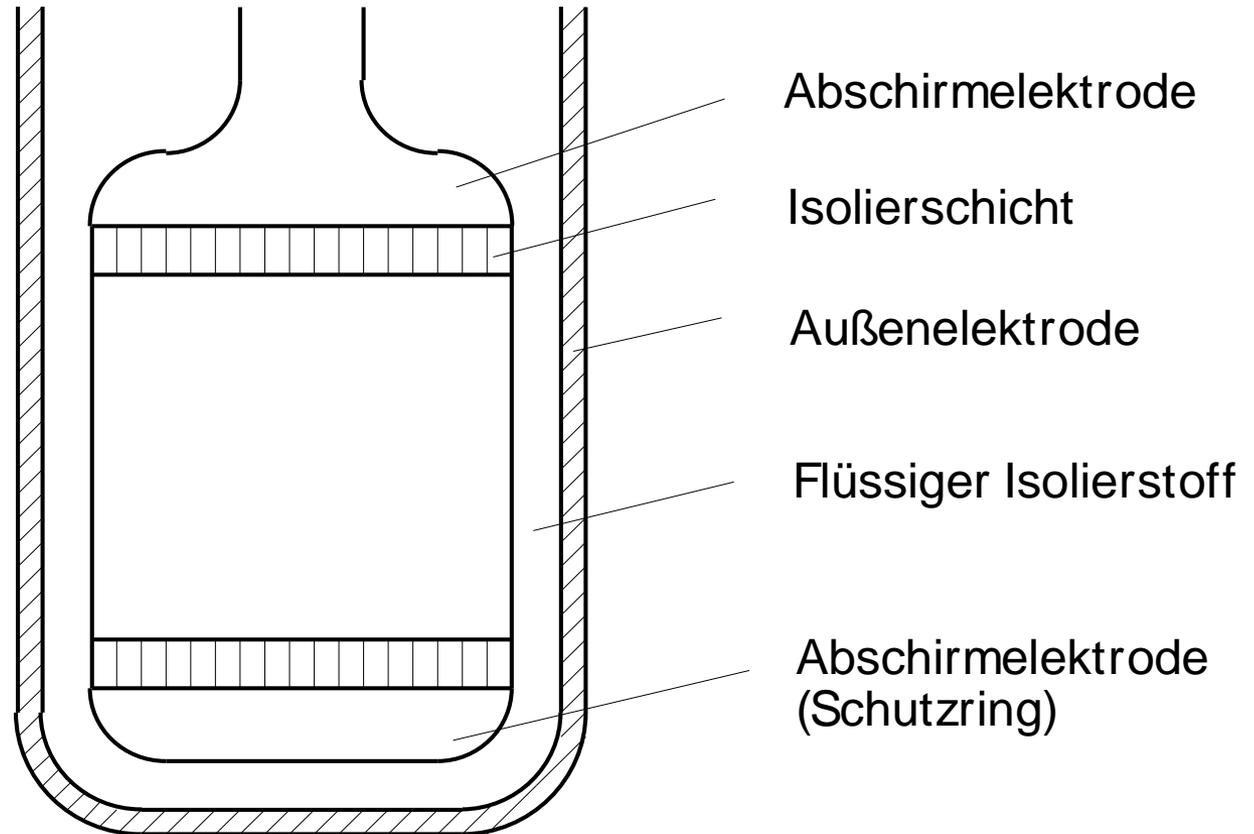
- 1 Probe
- 2 Spannungselektrode
- 3 Schutzring
- 4 Schutzspalt
- 5 Geschützte Elektrode
- 6 Isolier- und Führungsstück
- 7 Abschirmkappe
- 8 Anschluss für Messleitung
- 9 Anschluss für Erde
- 10 Isolierfüße
- 11 Spannungszuführung



### Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften (VDE 0303 Teil 4)

#### Elektrodenanordnungen für verschiedene Isolierstoffe

**Prinzip eines  
Messkondensators  
mit Schutzring für  
flüssige Isolierstoffe**



**E N D E**