

Messung hoher Wechselspannungen

AC

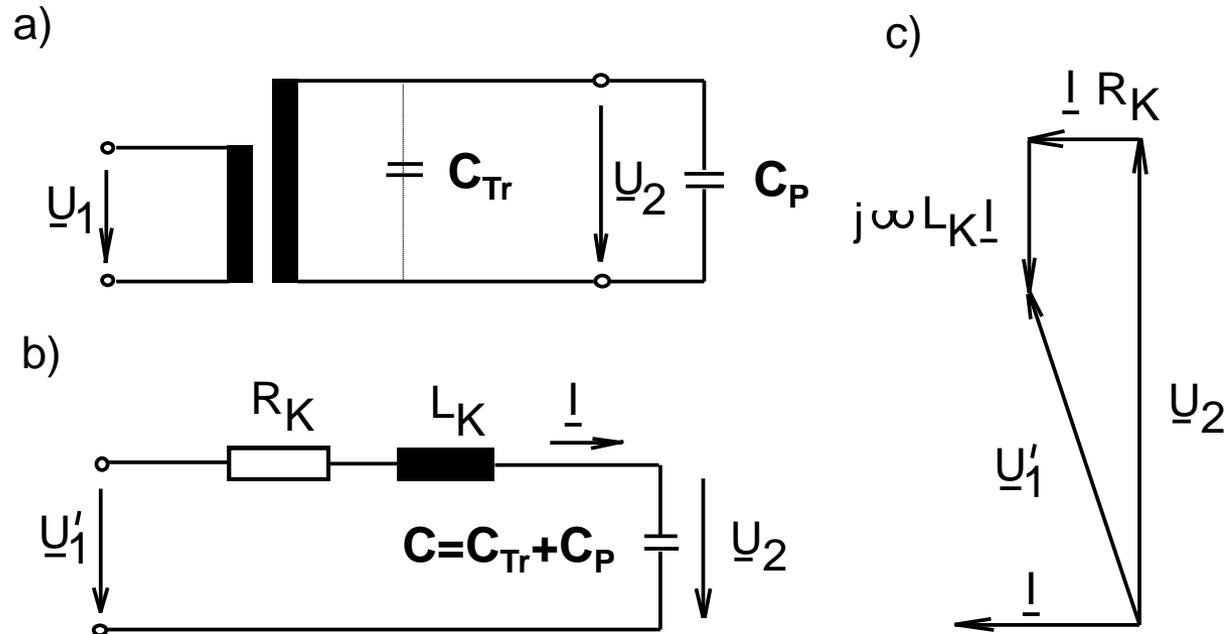
Umrechnung der Primärspannung des Prüftransformators auf die Hochspannungsseite

Im Prinzip ja, aber

... die Spannung auf der Hochspannungsseite ist v. a. abhängig von der Kapazität des Prüflings!!!

Ersatzschaltbild des Trafos mit Eigenkapazität C_{Tr} und angeschlossenem Prüfling C_P

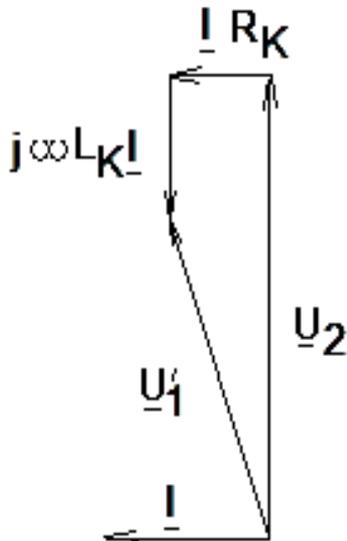
- a) Schaltbild
- b) Ersatzschaltbild
- c) Zeigerdiagramm



Eigenschaften von Hochspannungsprüftransformatoren

- Magnetisierungsstrom vernachlässigbar, solange keine Sättigung des Eisenkerns
- Für $R_K < L_K$ und die Sekundärspannung U_2 annähernd phasengleich der Primärspannung U_1' , gilt

$$U_2 \approx U_1' \frac{1}{1 - \omega^2 L_K C}$$



Prüftransformatoren \rightarrow großes u_k

\rightarrow Nenner der Gleichung stets > 1

\rightarrow kapazitive Überhöhung der Sekundärspannung.
(Reihenresonanz)

\rightarrow Sekundärspannung steht nicht mehr in einem festen Verhältnis zur Primärspannung

Bestimmung des Wertes der Hochspannung durch eine Spannungsmessung auf der Niederspannungsseite ist unzulässig, da sie zu niedrige Messwerte ergeben würde!! Gefährdung von Prüfling und Prüftransformator!

Einsatz von Spannungswandlern

- Wechselspannungen können mit Spannungswandlern außerordentlich genau gemessen werden.
- **Arten:**
 - Induktive und kapazitive Spannungswandler**
- Einsatz vor allem zu Messungen im Versorgungsnetz (im Labor nur selten für Spannungen über 100 kV)

Einsatz im Laborbetrieb nur dann ein, wenn bei mäßigen Spannungen eine besonders hohe Genauigkeit verlangt wird.

- Die Last eines Spannungswandlers wird als „**Bürde**“ bezeichnet
- Die Sekundärspannung eines Spannungswandlers gibt weitgehend unabhängig von der Belastung den zeitlichen Verlauf der Primärspannung wieder.
- Messgenauigkeit ist jedoch belastungsabhängig
- Entsprechend der Art des angeschlossenen Messgerätes können
 - * Scheitelwert,
 - * Effektivwert oder
 - * zeitlicher Verlauf der Hochspannung gemessen werden.

Arten von Spannungswandlern

Induktive Spannungswandler

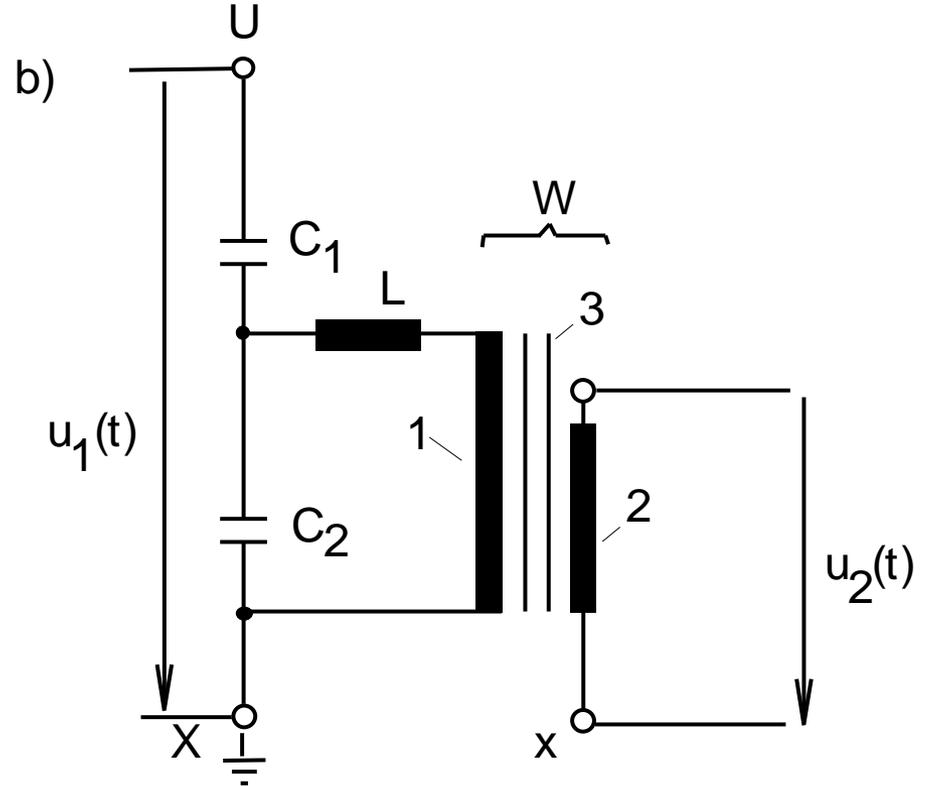
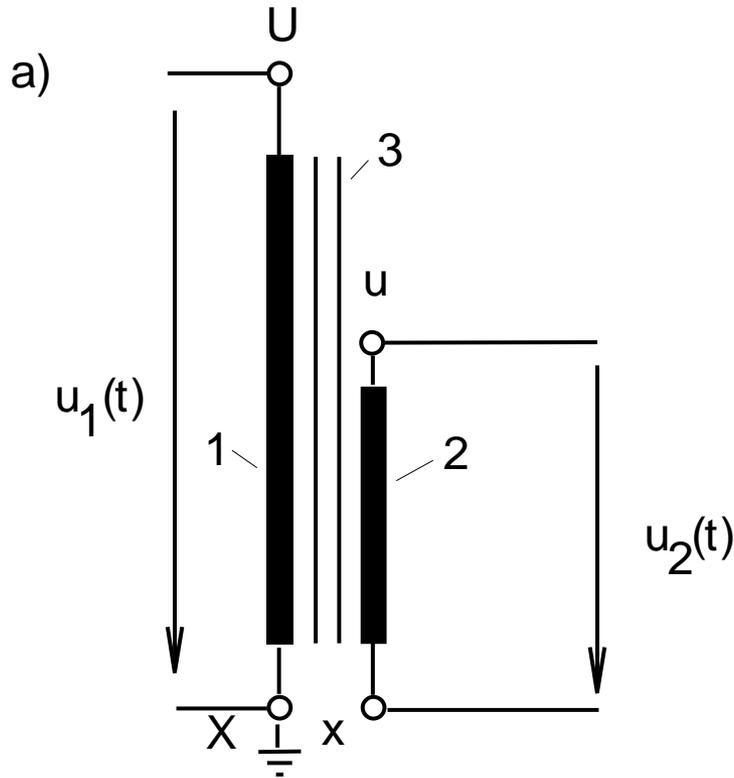
- Ausführung für sehr hohe Spannungen nur mit großem Aufwand, da bei 50 Hz hohe Windungszahl der Hochspannungswicklung erforderlich.
→ teure Konstruktionen.

Kapazitive Spannungswandler

- Für normalen Laborprüfbetrieb in einer Ausführung für den Netzbetrieb meist weniger geeignet, da sie eine große kapazitive Belastung der Spannungsquelle darstellen.

Der Wandler dient der Impedanztransformation der ggf. niederohmigen Bürde (Spannungsschreiber, Schutzrelais, etc.) auf hohe Werte, die das Übersetzungsverhältnis des kapazitiven Teilers weniger beeinflussen.

Arten von Spannungswandler



Grundsaltungen von Spannungswandlern

a) induktiver Spannungswandler

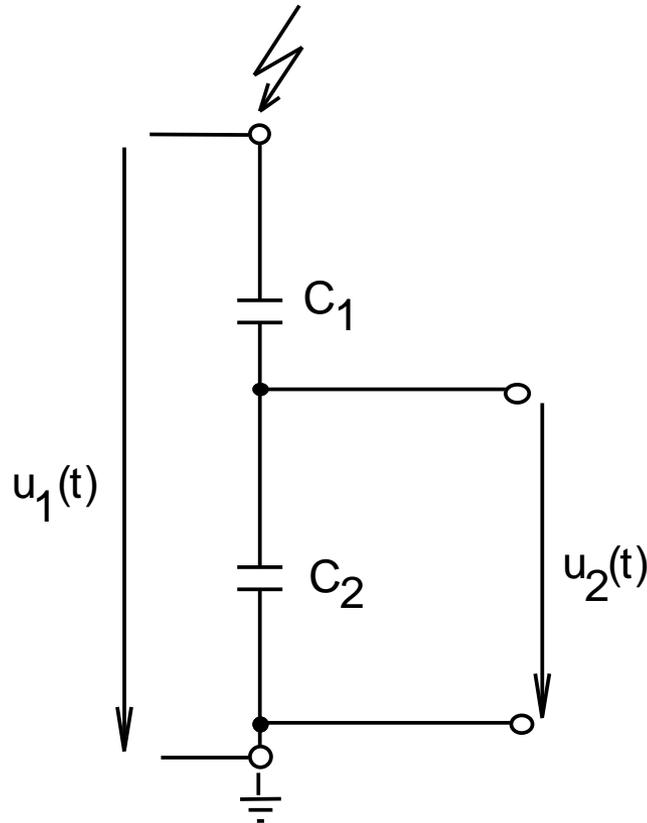
- 1 Primärwicklung
- 2 Sekundärwicklung
- 3 Eisenkern

b) kapazitiver Spannungswandler

- C1, C2 Kondensatoren des Spannungsteilers
- L Resonanzinduktivität
- W induktiver Zwischenwandler

Arten von Spannungsteilern

Kapazitive Teiler



Kapazitiver Spannungsteiler ohne Berücksichtigung der Erdkapazitäten

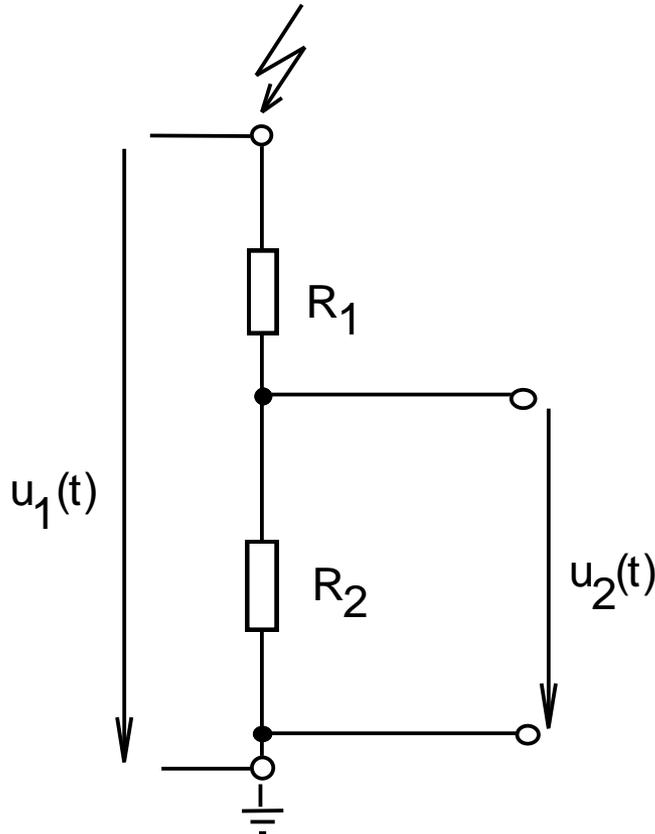
$$\ddot{u} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

Definiertes frequenzunabhängiges Übersetzungsverhältnis!

Geeignet für die Messung hoher Wechselspannungen !

Arten von Spannungsteilern

Ohmscher Teiler



Ohmscher Spannungsteiler ohne Berücksichtigung der Erdkapazitäten

theoretisch:

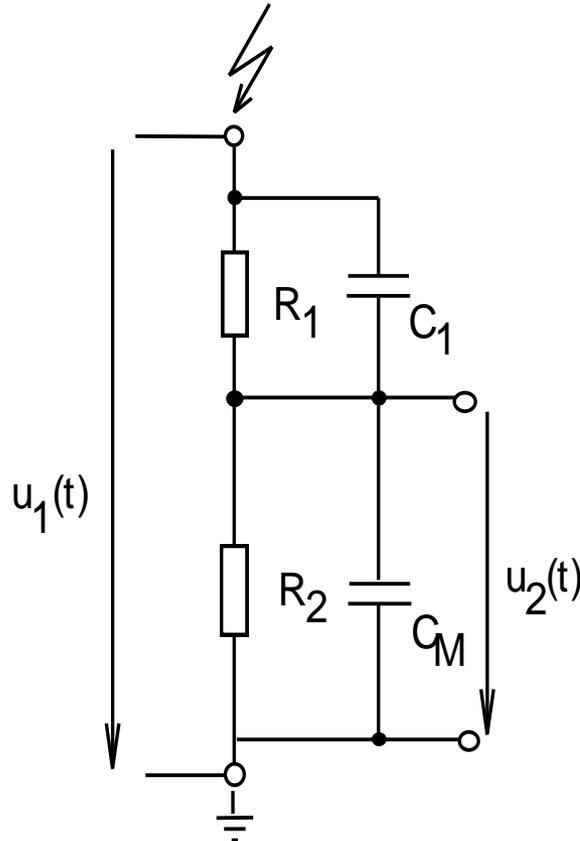
$$\ddot{u} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

In der Praxis kein definiertes frequenz-unabhängiges Übersetzungsverhältnis, aufgrund verteilter der Streukapazitäten gegen Erde und der Kapazität des Koaxialkabels zum Messinstrument!

Nicht geeignet für die Messung hoher Wechselspannungen !

Arten von Spannungsteilern

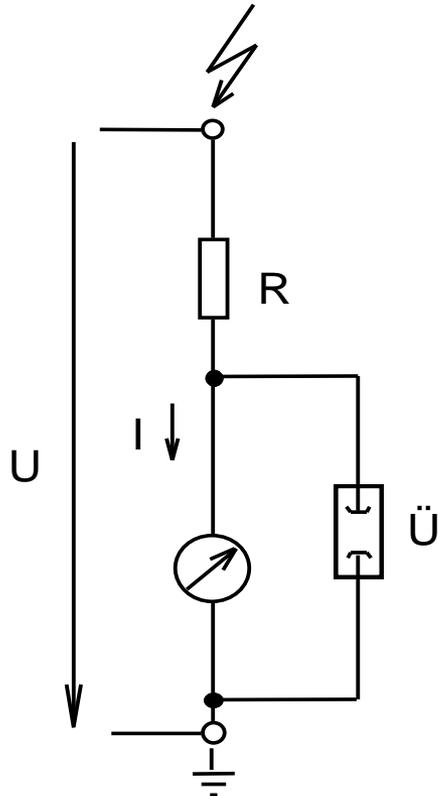
Kompensierter kapazitiver Teiler



- Parallelschaltung von C_M (Messkabel, Messinstrument) zum Niederspannungswiderstand R_2
- Teilverhältnis \ddot{u} ändert sich
(ohmsche Belastung des Niederspannungsteils kann fast immer vernachlässigt werden)
- Übersetzungsverhältnis wird frequenzabhängig .
- Parallelschaltung einer Kapazität C_1 zu R_1
- C_1 so wählen, dass für hohe Frequenzen die Impedanz des Hochspannungsteils R_1 , C_1 in der gleichen Weise abnimmt, wie die Impedanz des Niederspannungsteils.
- **Definiertes frequenzunabhängiges Übersetzungsverhältnis!**

Geeignet für die Messung hoher Wechselspannungen !

Ohmscher Vorwiderstand



Ü Edeltgassicherung
Schutz des Strommessers
bei Überschlügen.

theoretisch:

Durch R fließender Strom I wird mittels eines Drehspulinstruments gemessen.

U kann berechnet werden aus der Beziehung:

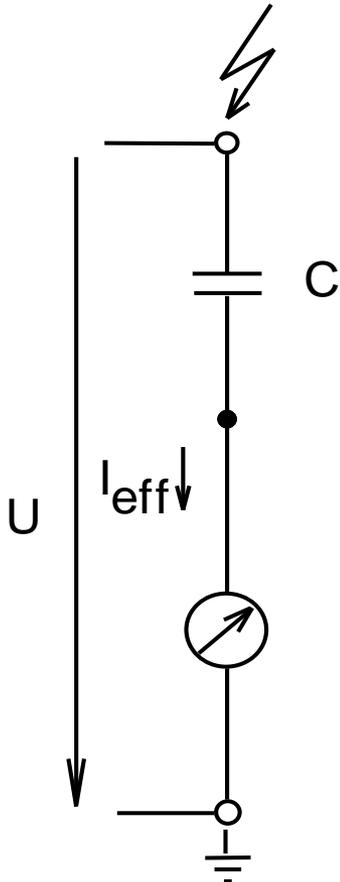
$$U = I \cdot R$$

In der Praxis:

Temperaturabhängigkeit von R und Streukapazitäten gegen Erde beeinflussen direkt die Messgenauigkeit!

Nicht geeignet für die Messung hoher Wechselspannungen !

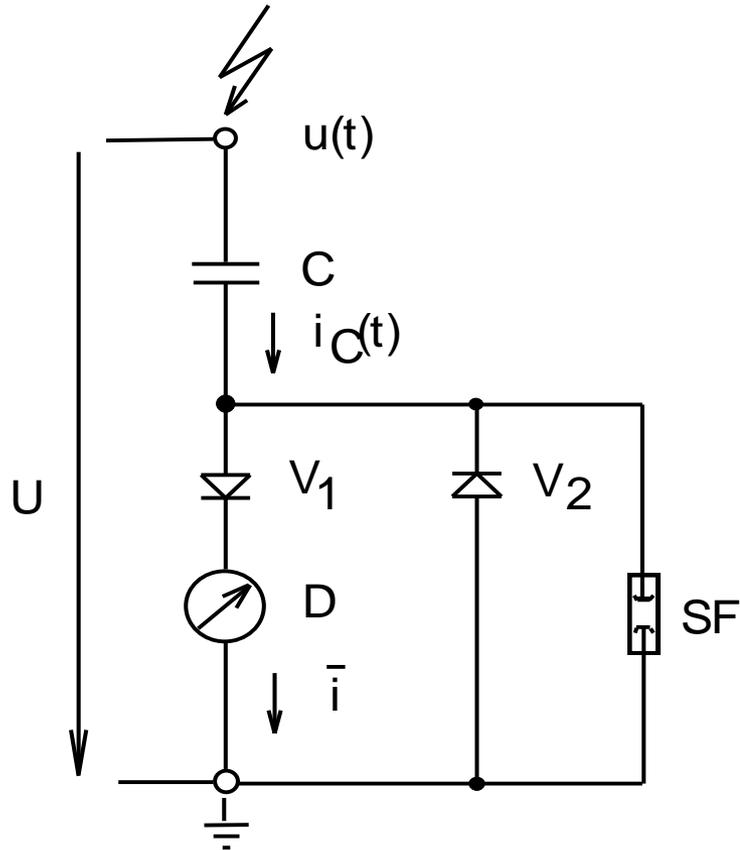
Kapazitiver Vorwiderstand



- Temperaturabhängigkeit von C ist vernachlässigbar gering
- Streukapazitäten gegen Erde wirken sich aufgrund der relativ hohen Kapazität von C kaum auf die Messgenauigkeit aus!
- Häufig in Laboratorien eingesetzt

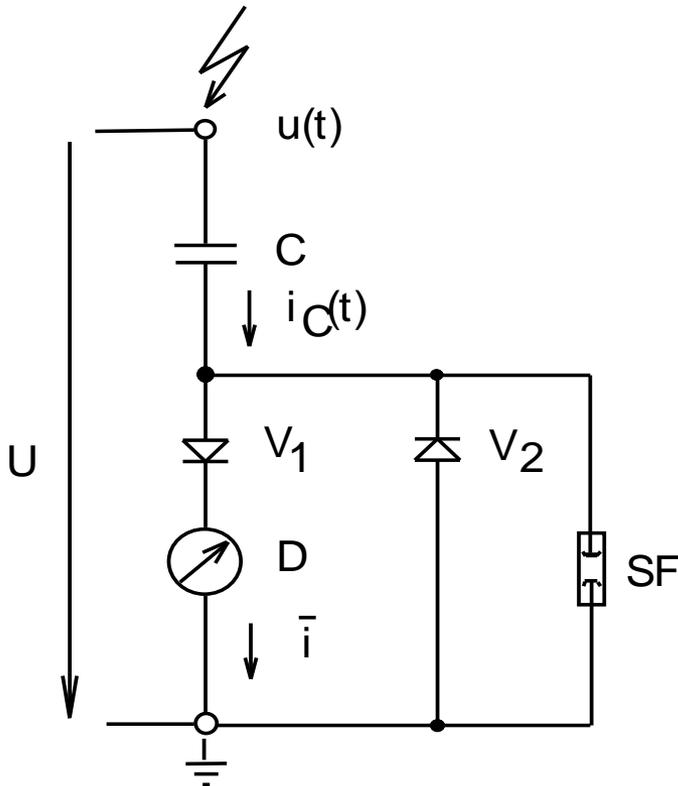
Geeignet für die Messung hoher Wechselspannungen !

Scheitelwertmessung nach Chubb-Fortescue



- D Drehspulinstrument,
- $i_C(t)$ Ladestrom,
- \bar{i} arithmetischer Mittelwert der Halbschwingung einer Polarität
- SF Schutzfunkenstrecke
- V Diode

Funktionsweise der Scheitelwertmessung nach Chubb-Fortescue



Für die Dioden als ideale Ventile gilt während der Durchlasszeit von V1:

$$\bar{i} = C \cdot du / dt \quad \text{für } t = 0 \dots T/2 \text{ ist}$$

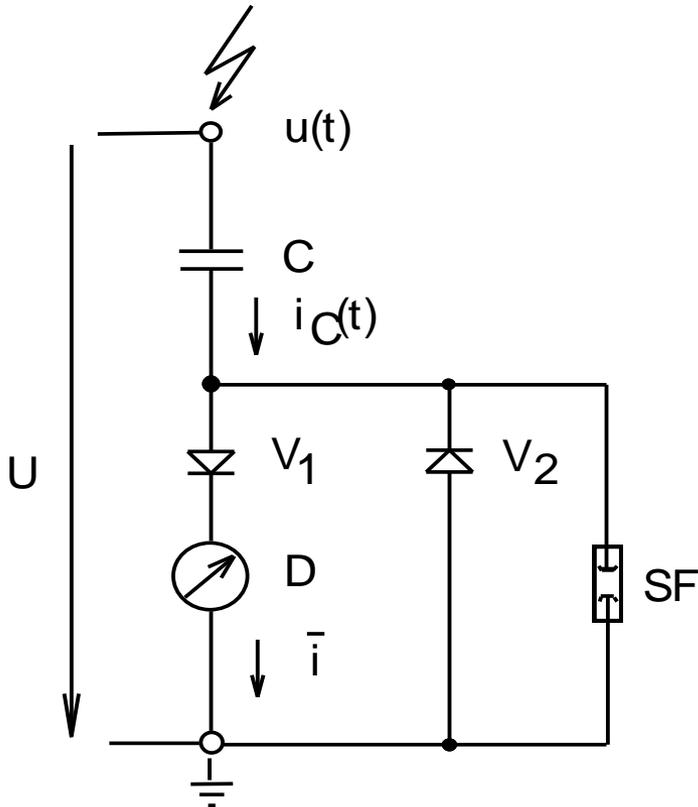
$$\bar{i} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i(t) dt = \frac{1}{T} \int_{u(t=0)}^{u(t=T/2)} C du = \frac{2}{T} C \hat{u} = 2 f C \hat{u}$$

Bei gleichen Scheitelwerten $|\hat{u}|$ - der Scheitelwerte in der positiven und negativen Halbschwingungen.

Somit gilt :

$$\hat{u} = \frac{\bar{i}}{2 f C}$$

Funktionsweise der Scheitelwertmessung nach Chubb-Fortescue



Bei der Herleitung wurde nicht vorausgesetzt, dass $u(t)$ sinusförmig ist!

Spannung darf jedoch nur einen Extremwert (Sattelfreiheit) besitzen!
(d.h. Strom darf in der positiven Halbschwingung nur einen Nulldurchgang haben).

Elektrostatische Spannungsmesser

Prinzip:

- Wirkungsweise beruht auf der Kraftwirkung des elektrischen Feldes.
- Anziehungskraft von 2 Elektroden eines Plattenkondensators der Fläche A und des Plattenabstands d :

$$|\vec{F}| = \frac{1}{2} \varepsilon_0 U^2 \frac{A}{d^2}$$

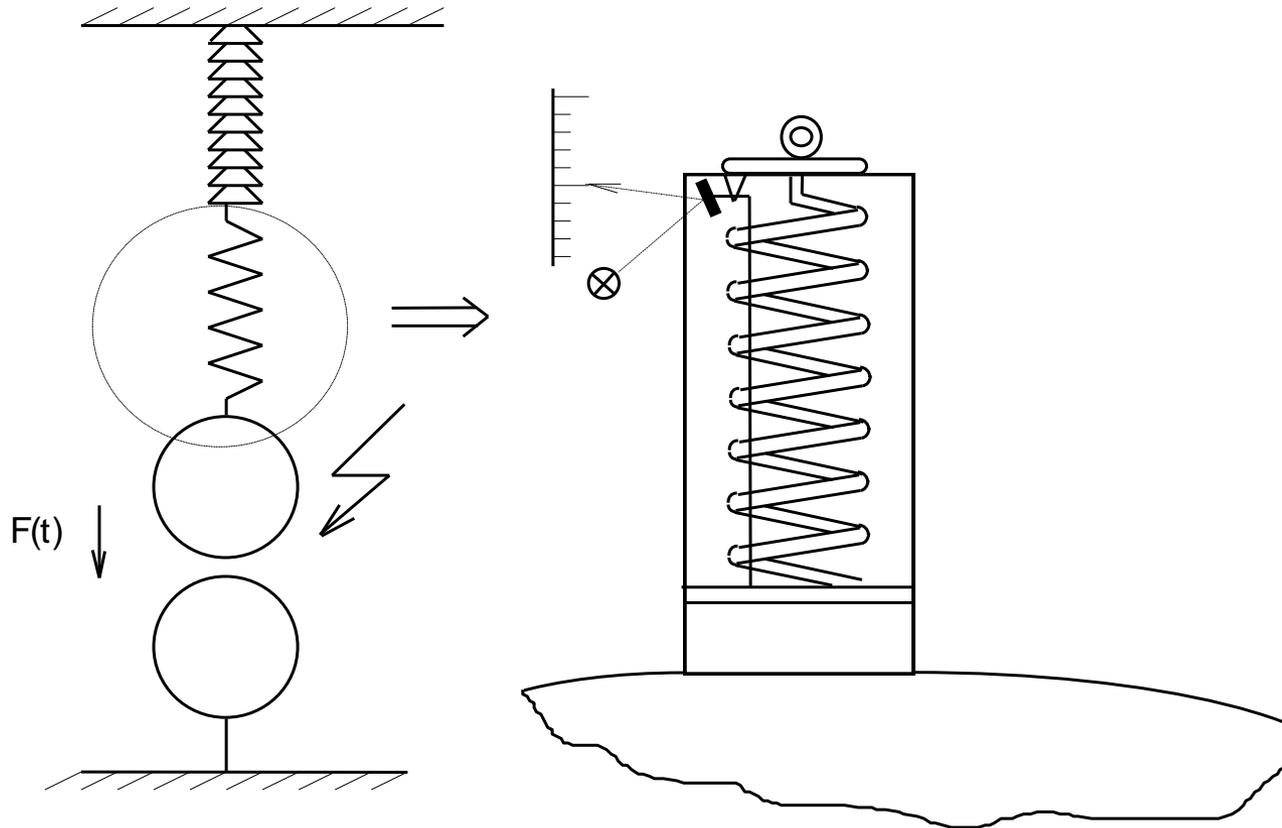
Elektrostatische Spannungsmesser (ESM) messen den **Effektivwert einer Spannung**.

Bauformen:

- ESM nach **Hueter**
- ESM nach **Starke-Schröder**

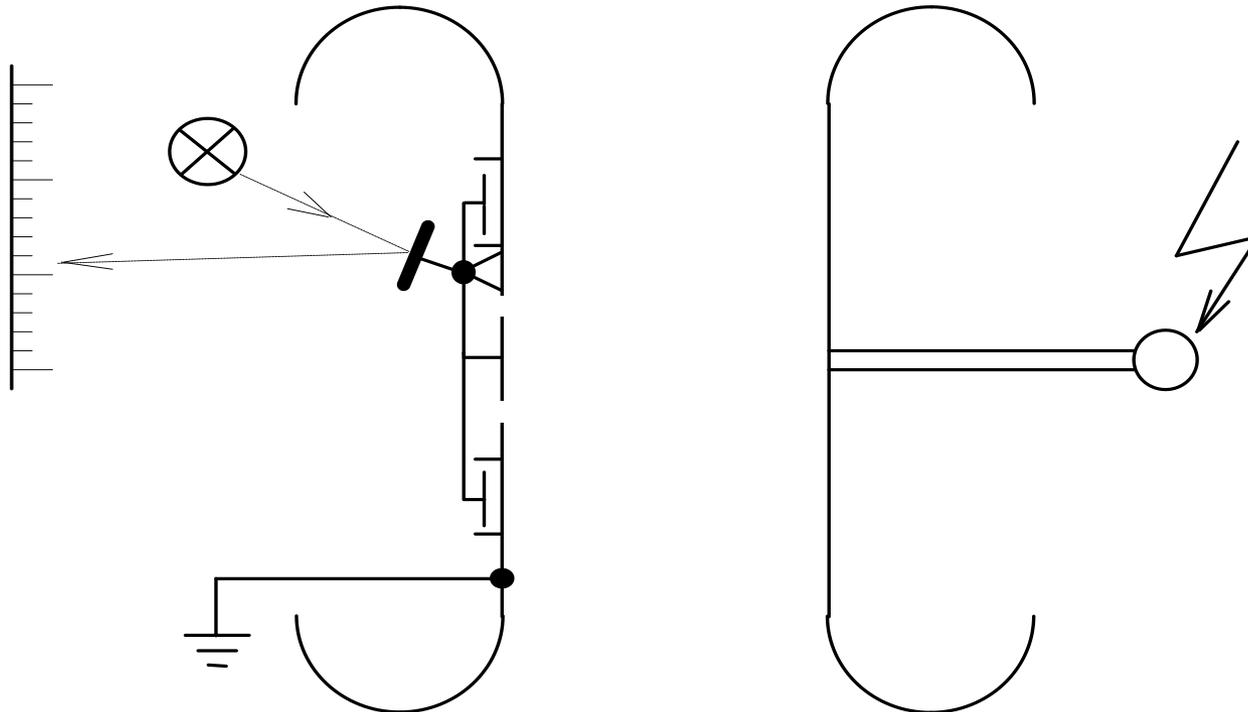
Elektrostatische Spannungsmesser

Elektrostatischer Spannungsmesser nach Hueter mit Lichtzeiger:



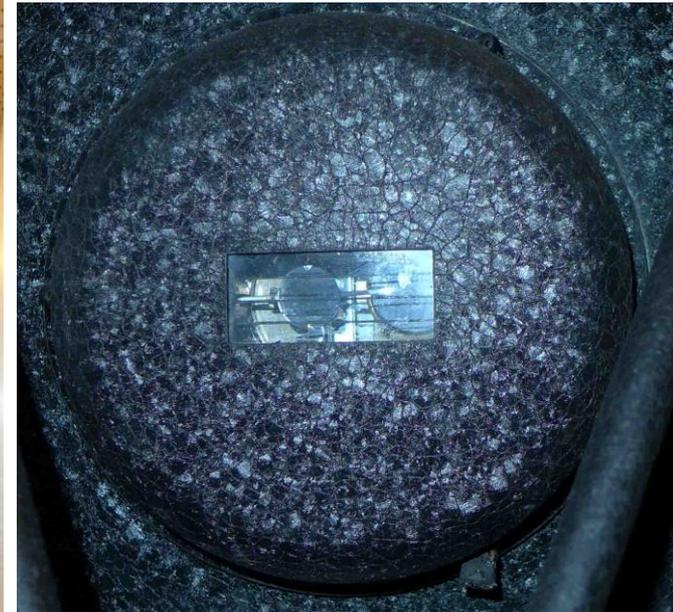
Elektrostatische Spannungsmesser

Elektrostatischer Spannungsmesser mit Lichtzeiger nach Starke-Schröder:

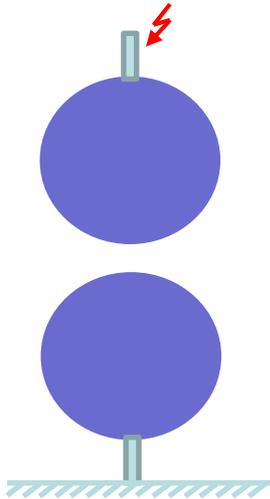


Elektrostatische Spannungsmesser

Elektrostatischer Spannungsmesser mit Lichtzeiger nach Starke-Schröder:



Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)

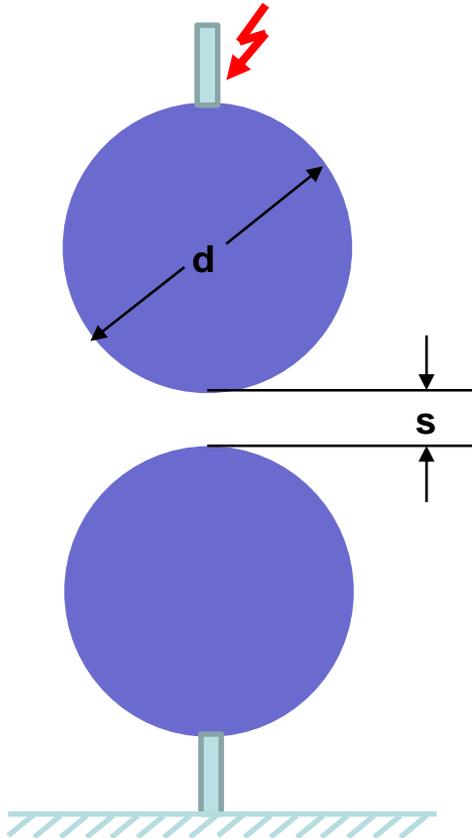


Grundprinzip

- Zum Durchschlag einer Gasstrecke im elektrischen Feld, z.B. zwischen zwei Kugeln ist eine bestimmte Spannung erforderlich, deren Höhe abhängt von
 - **Abstand der beiden Elektroden**
 - **Luftdruck**
 - **Temperatur**
 - **Luftfeuchte**

Bei Kenntnis der Durchschlagspannung U_D in Abhängigkeit vom Abstand s der Kugeln kann man diese Anordnung zur Spannungsmessung benutzen.

Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)



Einsatz, Vor- und Nachteile

- In fast allen Hochspannungslaboratorien anzutreffen.
- Messgerät zur Bestimmung hoher und höchster Spannungen
- Spricht auf den Scheitelwert der Spannung an.

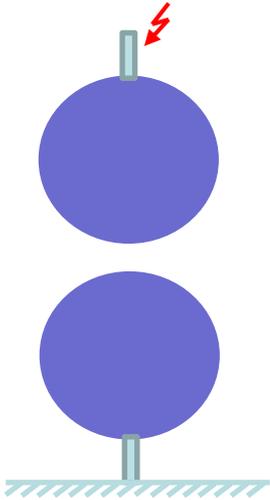
Vorteile:

- leicht zu kontrollierenden Aufbau
- einfache Handhabung,
- vielseitiger Einsatz

Nachteil:

- Spannung wird nicht direkt angezeigt

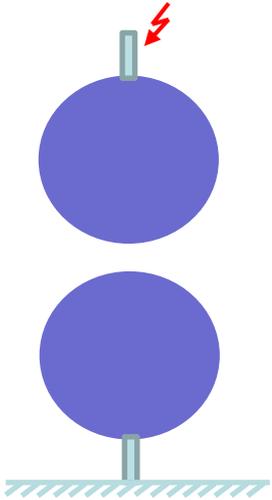
Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)



Physikalisches Prinzip

- Solange die Durchschlagszeit der Kugelfunkenstrecke klein ist gegen $T/2$ (T = Periodendauer der speisenden Spannung), ist der Scheitelwert der Wechsellspannung für den Durchbruch maßgebend.
- Frequenzeinfluss bis zu ca. 1000 Hz vernachlässigbar.
- Aus umfangreichen Messungen sind Tafeln aufgestellt worden, die die Messwerte für die Durchschlagspannung $U_D = f(s)$ als Funktion der Schlagweite s enthalten.
(VDE 0432 Teil 9; EN60052 / 2002; IEC60052 / 2002).
- Die maximale Messschlagweite s soll den halben Durchmesser d der Kugelelektroden ($s = d/2$) nicht überschreiten.

Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)



Messung

- Luftdruck , Temperatur und ggf. Luftfeuchte müssen bei der Messung berücksichtigt werden.
- Weichen sie von den Normalwerten ab, so ist die beim Durchschlag gemessene Spannung zu korrigieren.
- **Normalbedingungen:** (relative Luftdichte $\delta = 1$)

Temperatur $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Luftdruck $b = 1013 \text{ hPa (= 1013 mbar oder 760 Torr)}$

Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)

Beispielhafter Auszug der Tabellenwerte aus VDE 0432 T. 9 / Juni 2003

Scheitelwerte der Durchschlagsspannung (U_{50} -Werte bei Stoßspannungen) in kV für betriebsfrequente Wechselspannungen, volle Blitzstoßspannungen und Schaltstoßspannungen mit negativer Polarität und Gleichspannungen beider Polaritäten

Schlagweite in cm	Kugeldurchmesser in cm											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
0,05	2,8											
0,10	4,7											
0,15	6,4											
0,20	8,0	8,0										
0,25	9,6	9,6										
0,30	11,2	11,2										
0,40	14,4	14,3	14,2									
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8						
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9						
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0						
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0						
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9						
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7					
1,2	(35,1)	37,6	37,5	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4				
1,4	(38,5)	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9				

Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)

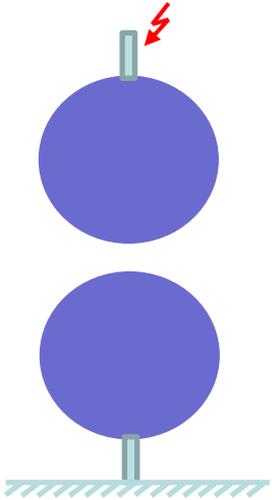
Beispielhafter Auszug der Tabellenwerte aus VDE 0432 T. 9 / Juni 2003

Scheitelwerte der Durchschlagspannung (U_{50} -Werte bei Stoßspannungen) in kV für volle Blitzstoßspannungen und Schaltstoßspannungen mit positiver Polarität

Schlagweite in cm	Kugeldurchmesser in cm											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
0,05												
0,10												
0,15												
0,20												
0,25												
0,30	11,2	11,2										
0,40	14,4	14,3	14,2									
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8						
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9						
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0						
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0						
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9						
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7					
1,2	(35,1)	37,8	37,6	37,4	37,4	37,4	37,4					
1,4	(38,5)	43,3	43,2	42,9	42,9	42,9	42,9					

Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)

Messung



- Messwertkorrektur von Normalbedingungen auf aktuelle Umgebungsbedingungen:

$$U = \delta \cdot k \cdot U_0$$

U = Durchschlagspannung bei aktuellen Umgebungsbedingungen

U_0 = Durchschlagspannung bei Normalbedingungen

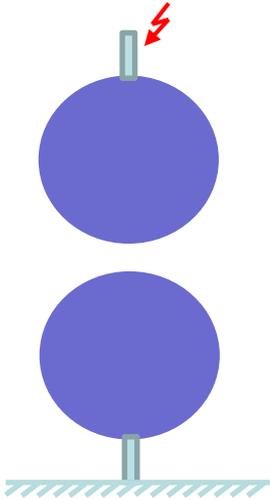
δ = Luftdichtekorrekturfaktor

k = Luftfeuchtekorrekturfaktor

- Gemessene Prüfspannung U sind bei abweichenden Umgebungsbedingungen auf einen geforderten Spannungswert U_0 bei Normalbedingungen umzurechnen.

$$U_0 = \frac{U}{\delta \cdot k}$$

Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)



Luftdichte-Korrekturfaktor:

Bei t in $^{\circ}\text{C}$ und b in hPa bzw. mbar

$$g = \frac{b}{1013} \frac{273 + 20}{273 + t} = 0,289 \frac{b}{273 + t}$$

Bei t in $^{\circ}\text{C}$ und b in Torr:

$$g = \frac{b}{760} \frac{273 + 20}{273 + t} = 0,386 \frac{b}{273 + t}$$

Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Messwerte:

Kann im Rahmen der Messgenauigkeit der Messfunkenstrecke unter normalen klimatischen Bedingungen bis zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 90 % vernachlässigt werden.

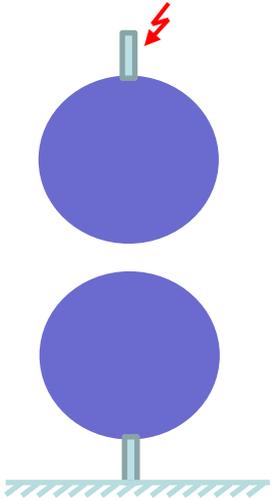
Bei höherer Luftfeuchtigkeit (z.B. Tropen):

→ Feuchtekorrektur erforderlich

Bei Kondensation auf der Kugeloberfläche:

→ Messgenauigkeit ↓↓↓ (**nicht messen!**)

Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)



Luftfeuchtekorrekturfaktor k:

Berücksichtigt den Einfluss von

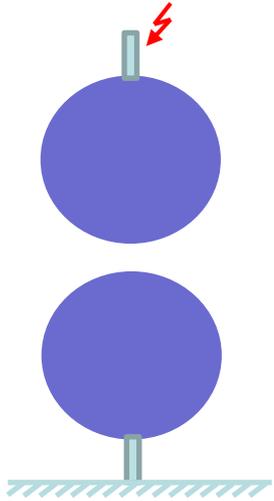
- Luftdichte (Luftdichtekorrekturfaktor δ) und
- absolute Luftfeuchte h in g/m^3

bei einem mittleren Wert der Luftfeuchte von $8,5 \text{ g}/\text{m}^3$ bei dem die Tabellenwerte der Durchschlagsspannungen U_0 (s. VDE 0432 Teil 9 / 6.2003) ermittelt wurden.

$$k = 1 + 0,002 \times (h / \delta - 8,5)$$

mit	RH	relative Luftfeuchte in %
	h	absolute Luftfeuchte in g / m^3
	h_s	Sättigungsfeuchte in g / m^3

Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)



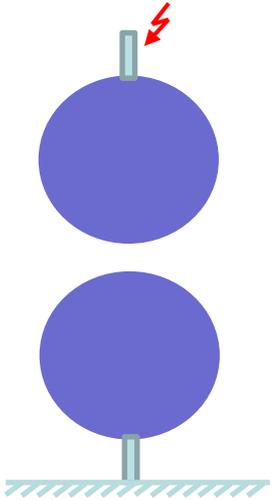
Bestimmung der absoluten Luftfeuchte h :

$$h = \frac{RH \cdot h_s}{100\%}$$

mit der **Sättigungsfeuchte** h_s als Funktion der Lufttemperatur t :

t in °C	-20	-10	-5	0	5	10	20	25	
h_s in g/m ³	1,08	2,36	3,32	4,85	6,8	9,2	12,8	17,3	
t in °C	30	35	40	50	60	70	80	90	100
h_s in g/m ³	30,4	39,6	50,2	83,0	130	198	293	424	599

Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)



Beispiel für die Berechnung des Luftfeuchtefaktors k:

Gegeben:

60% relative Luftfeuchte RH bei $\delta = 1$:

Absolute Luftfeuchte h:

$$t = 40^\circ\text{C}: \quad \rightarrow \quad h = 0,6 \times 50,2 = 30,12 \text{ g /m}^3$$

$$t = 5^\circ\text{C}: \quad \rightarrow \quad h = 0,6 \times 6,8 = 4,08 \text{ g /m}^3$$

Luftfeuchtefaktor k:

$$t = 40^\circ\text{C}: \quad k_{(\delta=1)} = 1 + 0,002 \times (30,12 / 1 - 8,5) = \mathbf{1,043}$$

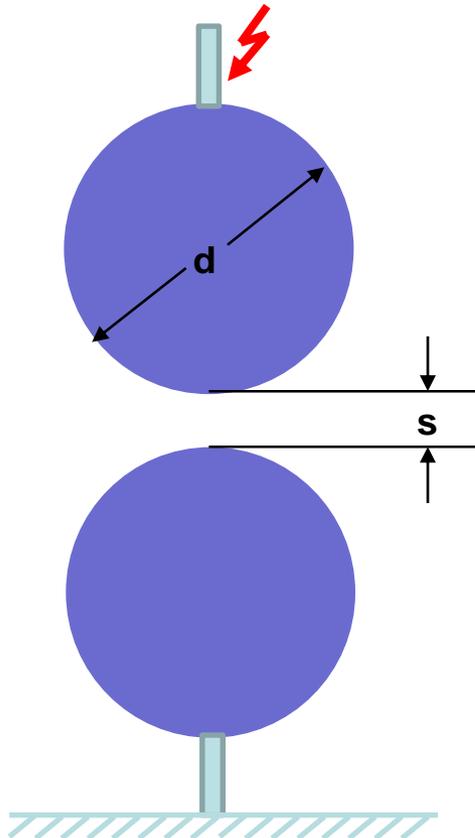
$$t = 5^\circ\text{C}: \quad k_{(\delta=1)} = 1 + 0,002 \times (4,08 / 1 - 8,5) = \mathbf{0,991}$$

Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)

Eigenschaften von Kugelfunkenstrecken:

Bei geringem Kugelabstand $s < d/2$ gilt:

- Feld zwischen den Kugeln ist fast homogen
- äußerst geringer Entladeverzug
- auch Stoßspannungsmessungen möglich.



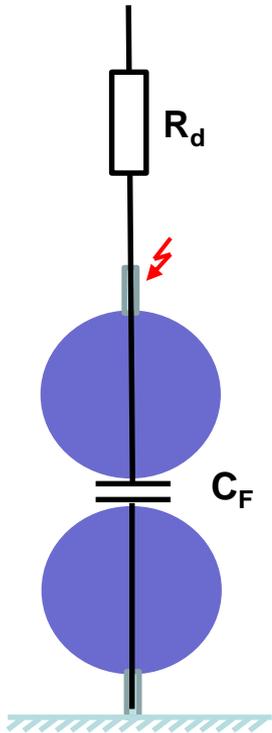
Empfohlene Maßnahme zur Reduzierung der Streuzeit:

Bereich zwischen den Kugeln der Funkenstrecke vorionisieren (z.B. durch UV-Bestrahlung mit Quecksilberdampf-Quarzlampe mit Lichtspektrum im fernen Ultraviolettbereich (UVC-Bereich)).

Obligatorische Bestrahlung für genaue Messergebnisse

- bei **Spannungen < 50 kV Scheitelwert** mit Kugeln aller Größen und
- in jedem Fall beim Messen mit **Kugeln von 12,5 cm und kleinerem Durchmesser**.

Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)



Hochohmiger induktivitätsarmer Vorwiderstand R_d

Grund:

- Unterdrückung hochfrequenter transients Vorgänge (Ausgleichsschwingungen)
- Begrenzung des Stromes während des Überschlags (Abbrand der Kugeln !).

Widerstandswert:

bei Wechselspannungen bis 1000 Hz: $R_d = 10 \text{ k}\Omega$ bis $1 \text{ M}\Omega$

bei Wechselspannungen höherer Frequenzen:

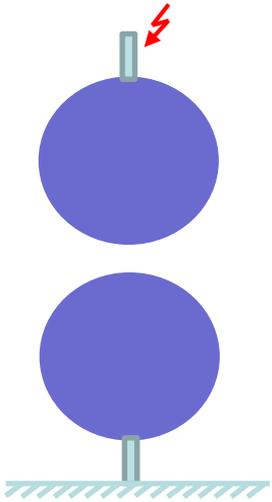
R_d und C_F bilden Spannungsteiler

→ Spannungsabfall an R_d beeinflusst Durchschlagsspannung

→ Widerstandswert im umgekehrten Verhältnis der Frequenz verkleinern.

Bedingung für R_d : Teilverhältnis mit $C_F \approx 1$

Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)



Durchführung der Messung nach VDE 0432, Teil 9

- Die Spannung muss mit einer deutlich unter der Durchschlagspannung liegenden Anfangsspannung angelegt werden um beim Einschalten Durchschläge zu vermeiden!
- Anschließend Spannung hinreichend langsam erhöhen, um ein korrektes Ablesen der Durchschlagspannung zu gewährleisten.

Um die Beeinflussung der Messergebnisse durch **Streuung** zu minimieren,

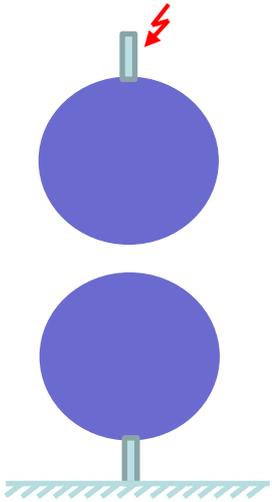
→ Funkenstreckendurchschlag mehrmals wiederholen,

(nach der Löschung des Überschlags durch jeweilige Abschaltung oder / und genügende Verringerung der Spannung; $\Delta t \approx 30\text{s}$).

Messgenauigkeit bei AC:

bei Schlagweiten bis $0,5 d$ ($d = \text{Kugeldurchmesser}$) mit $\pm 3 \%$

Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)



Angaben im Messprotokoll zur Beurteilung der Streuung der Messwerte:

Neben

- Durchschlagspannung U_D als arithmetischen Mittelwert und
- gemessenen Einzelwerten (mind. 10 Spannungstöße X_i)
- Angabe der **Höhe der Standardabweichung σ** (gilt als IEC-Standard-Messeinrichtung, wenn σ bei AC und Blitzstoßspannung geringer als 1% und bei Schaltstoßspannung kleiner 1,5% ist).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

mit

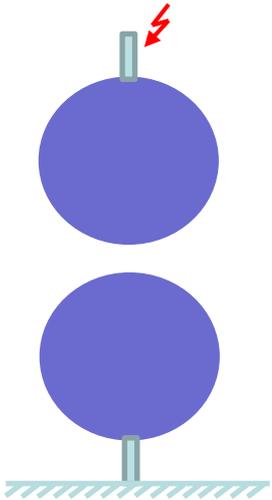
n	Gesamtzahl der Messwerte
X_i	i-ter Messwert
\bar{X}	Mittelwert aus n Messwerten

3

Messung hoher Gleichspannungen

DC

Messung mit der Kugelfunkenstrecke (KF)



Die bereits für die Messung hoher Wechselspannungen beschriebene Kugelfunkenstrecke kann auch zur Messung hoher Gleichspannungen eingesetzt werden.

Die zur Messung von Wechselspannungen gegebenen Erläuterungen gelten für die Messung von Gleichspannungen analog.

Messunsicherheit bei der Gleichspannungsmessung:
(etwas größer als bei Wechselspannungen).

bei Schlagweiten bis $0,4 d$ ($d = \text{Kugeldurchmesser}$) mit $\pm 5 \%$

Hochohmiger Vorwiderstand

Messung der Hochspannung U:

$$U = R \cdot I$$

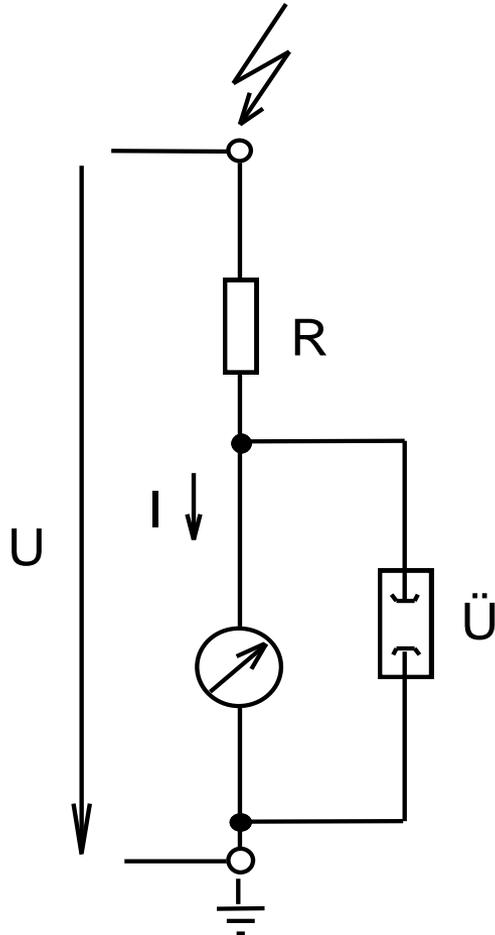
Messung hoher Gleichspannungen mit hochohmigem Vorwiderstand und Strommesser.

Ü Überspannungsableiter (Edelgassicherung) zum Schutz des Strommessers bei etwaigen Überschlägen.

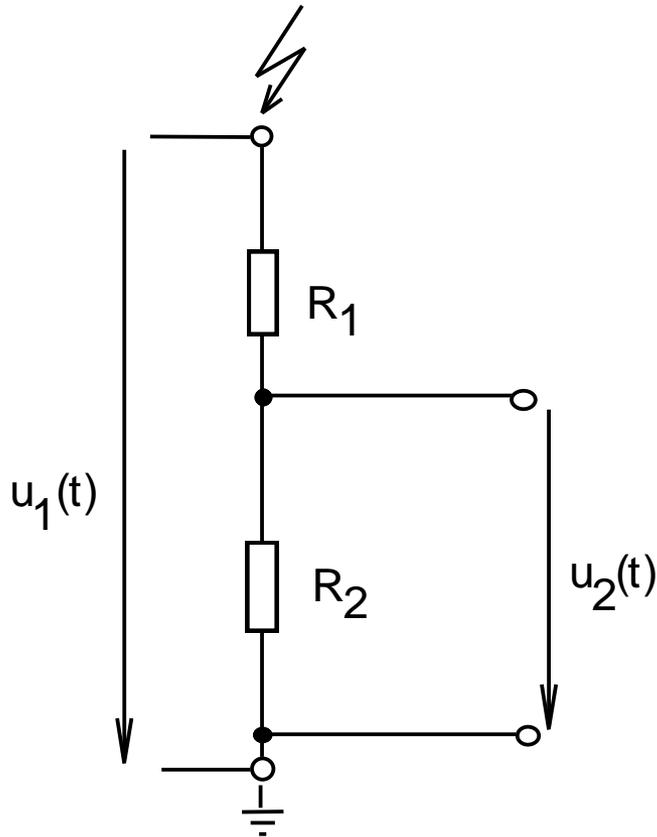
Verteilte Streukapazitäten gegen Erde spielen keine nennenswerte Rolle, da sie nur beim Hochfahren der Spannung geladen werden müssen.

Nachteil: Temperaturabhängigkeit des Widerstandswertes beeinflusst direkt die Genauigkeit der Messung.

→ **Ungeeignet für die Messung hoher Gleichspannungen !**



Ohm'scher Spannungsteiler



Übersetzungsverhältnis \ddot{u} :

$$\ddot{u} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Streukapazitäten gegen Erde spielen bei Gleichspannung keine Rolle!

Ohm'sche Spannungsteiler werden in Hochspannungslaboratorien standardmäßig zur Messung hoher Gleichspannungen eingesetzt.

Geeignet für die Messung hoher Gleichspannungen !

Elektrostatische Spannungsmesser (ESM)

Elektrostatische Messsysteme messen die Kraft, die im elektrostatischen Feld auf die Messelektrode ausgeübt wird, wobei dem Feld keine Leistung entzogen wird.

→ Einsatz wie bei AC möglich und Bauformen wie bei AC-Messung bereits erläutert.

- ESM nach **Hueter**
- ESM nach **Starke-Schröder**

Vorteil elektrostatischer Spannungsmesser:

Innenwiderstand nahezu unendlich

→ **Praktisch belastungsfreies Messen.**

Rotierende Voltmeter

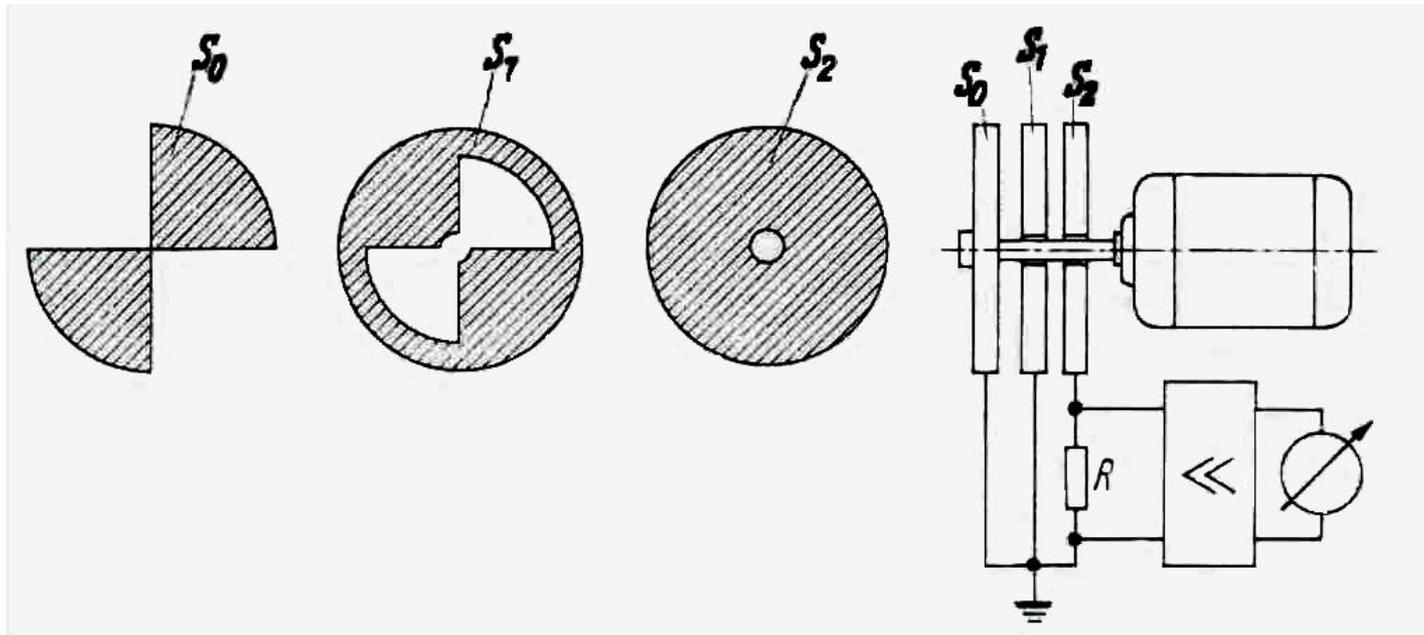
Verfahren:

Auf mechanischem Wege wird die Kapazität zwischen der Hochspannungs- und Messelektrode periodisch verändert.

- Ladungsverschiebung auf den Elektroden
- Der resultierende Wechselstrom kann ausgewertet werden und stellt ein Maß für die zu messende Spannung / Feldstärke dar.

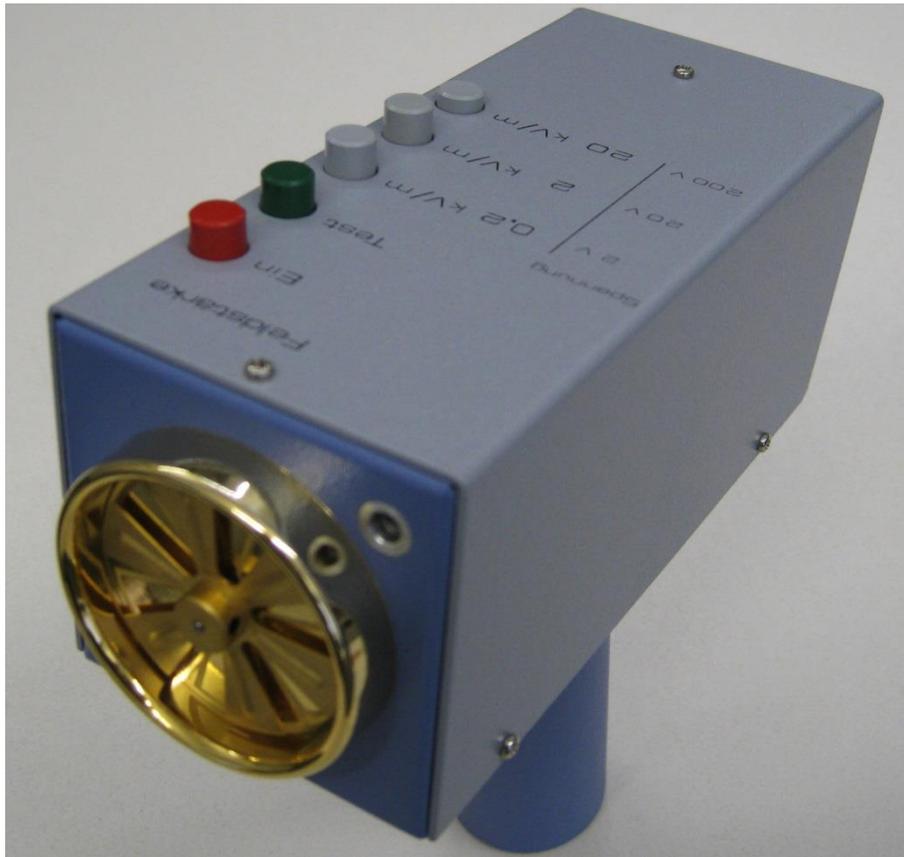
Prinzipieller Aufbau:

S_0 rotierende Sektorscheibe

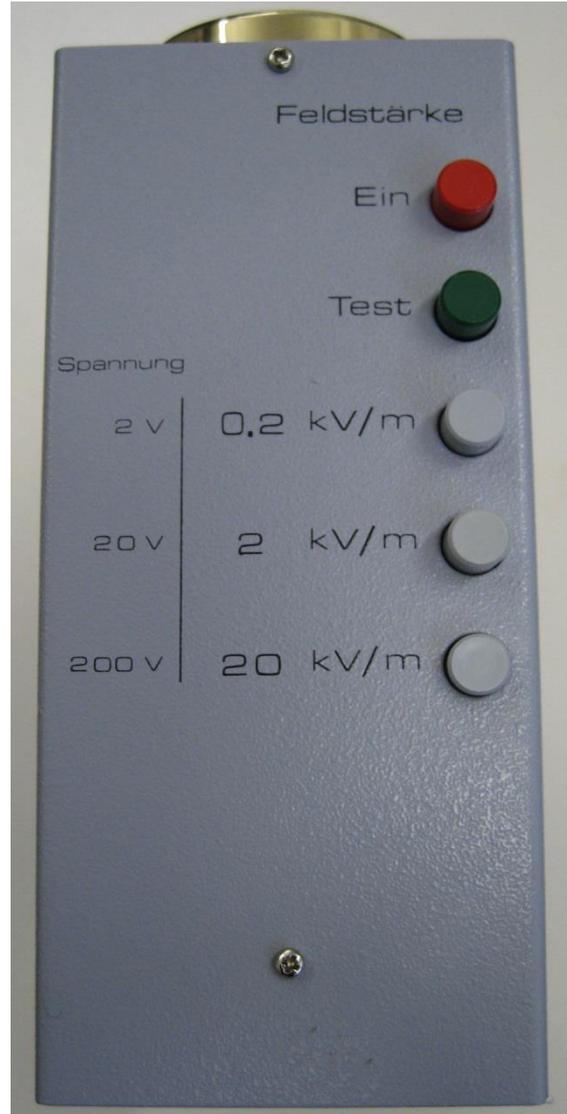


Rotierende Voltmeter (Fa. Kleinwächter)

Einsatz: DC und sehr niedrige Frequenzen bis $< \text{ca. } 1 \text{ Hz}$



Rotierende Voltmeter (Fa. Kleinwächter)



3

Messung von Impulsspannungen

Impuls

Geräte zur Messung von Stoßspannungen

- **Oszilloskope**
- **Digitale Impulsmesssysteme (Transientenrecorder)**
- **Kugelfunkenstrecken**

Messung mit dem Oszillographen

Ziel:

- Überprüfung, ob der Verlauf der Stoßspannung den Anforderungen des genormten Stoßes entspricht.
- Messung des Scheitelwerts der Stoßspannung

Anmerkung:

Mit modernen digital arbeitenden Geräten können neben einer Darstellung der Stoßspannung auch

- Daten direkt an externe oder eingebaute Rechner übertragen werden,
- on-line quantitative und statistische Auswertungen der Spannungsstöße durchgeführt werden.

Messung mit dem Oszillographen

Anforderung an die Messtechnik:

- Um die Stirn der Stoßspannung vollständig abzubilden, muss die Zeitablenkung v.a. analoger Speicheroszillographen etwas früher als die Stoßspannung selbst ausgelöst werden.
- Bei nicht getriggelter Schaltfunkenstrecke des Stoßgenerators musste die Messspannung (z.B. mit einer Verzögerungsleitung) verzögert werden.
- Moderne digitale Messsysteme be- bzw. überschreiben fortlaufend ihren Speicher und können einstellbar nach erfolgter Triggerung Vergangenheitswerte erhalten.

Messung mit Oszilloskopen und digitalen A/D-Wandlern (Transientenrecorder)

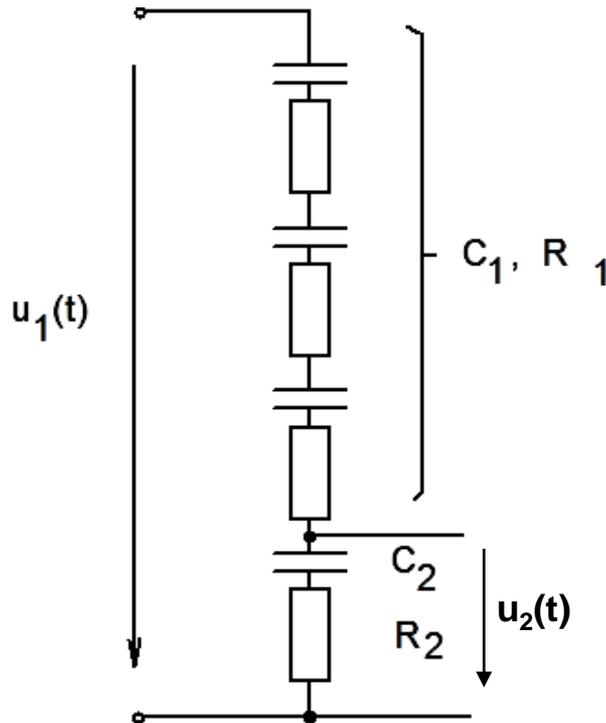
Der Anschluss dieser Geräte an den Hochspannungskreis geschieht stets über **Stoßspannungsteiler**.

Anforderungen an Stoßspannungsteiler :

1. Die abgegriffene Teilspannung muss stets der Gesamtspannung verhältnisgleich sein. (**Abbildungstreue**)
2. Der Teiler muss **frequenz-, spannungs- und polaritätsunabhängig und unabhängig sein von äußeren Einflüssen** (z.B. Temperatur) sein.
3. Die **Rückwirkung des Teilers auf die zu messenden Vorgänge** muss vernachlässigbar oder berechenbar sein.

Messung mit Oszilloskopen und digitalen A/D-Wandlern (Transientenrecorder)

Gedämpft kapazitiver Spannungsteiler



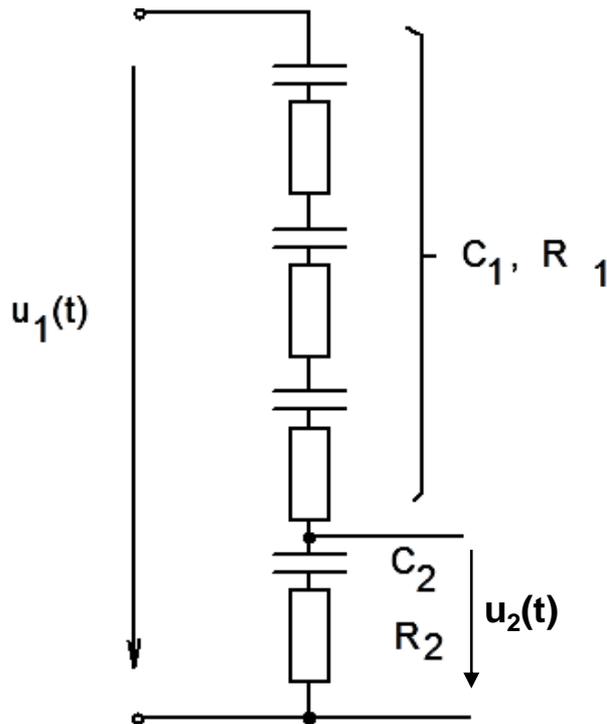
- Der gedämpft kapazitive Spannungsteiler (Zaengl-Teiler) eignet sich besonders für hohe und höchste Stoßspannungen.
- Ungeeignet für Gleichspannung, (keine parallelen Widerstände)
→ Verhalten wie kapazitiver Spannungsteiler

Aufbau:

mehrere in Serie geschalteten Dämpfungswiderstände R_1 und R_2 , sowie Kondensatoren C_1 und C_2 im Hoch- und Niederspannungsteil.

Messung mit Oszilloskopen und digitalen A/D-Wandlern (Transientenrecorder)

Gedämpft kapazitiver Spannungsteiler



Verhalten:

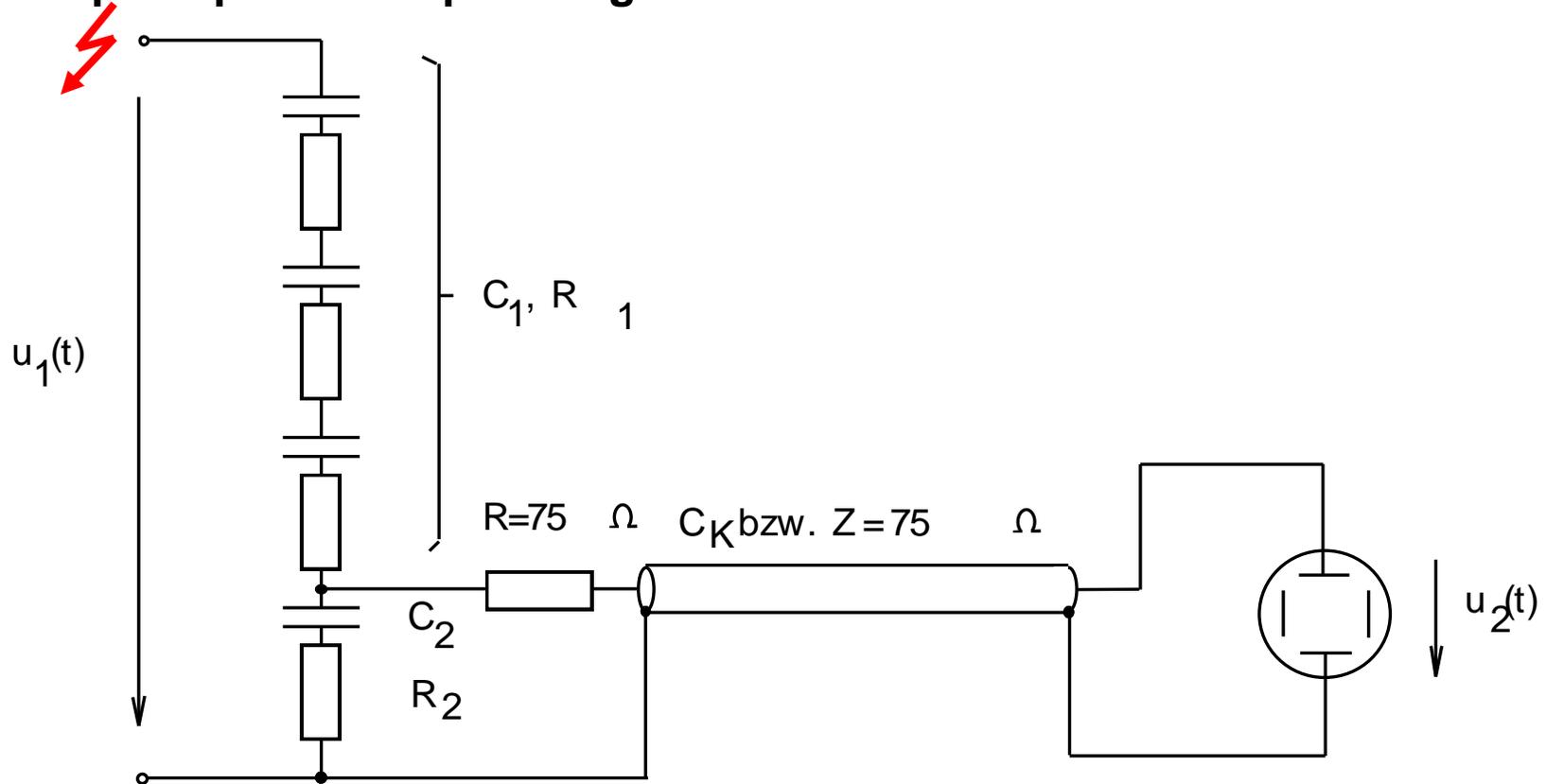
- Durch die verteilten Dämpfungswiderstände werden die Schwingungen infolge von Wanderwellen sowie Induktivitäten und Kapazitäten im Messkreis gedämpft.
- wirkt kapazitiv für niedrige und ohmsch für hohe Frequenzen.
- Bei Erfüllung der **Kompensationsbedingung** ergibt sich für diesen Spannungsteiler ein theoretisch frequenzunabhängiges Teilverhältnis \ddot{u} .

$$R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2$$

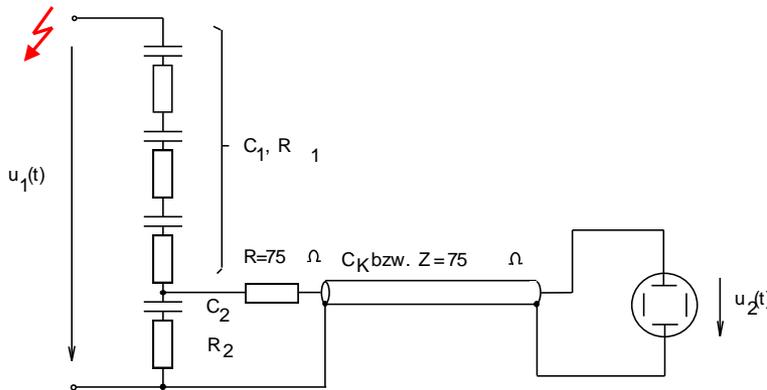
$$\ddot{u} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

Messung mit Oszilloskopen und digitalen A/D-Wandlern (Transientenrecorder)

Gedämpft kapazitiver Spannungsteiler

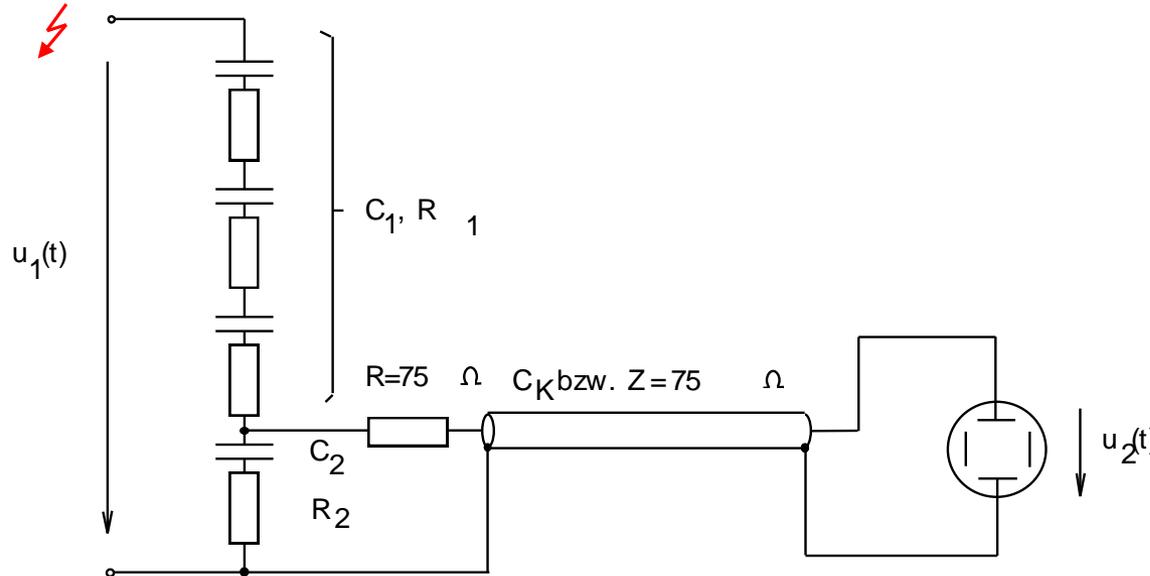


Messung mit Oszilloskopen und digitalen A/D-Wandlern (Transientenrecorder) Ankopplung des Messsystems (z.B. Oszilloskop) an den Teiler



- Anschluss des Oszilloskops wird über ein Koaxialkabel an den gedämpft kapazitiven Spannungsteiler.
- Messkabel wird am Oszillographen nicht mit dem Wellenwiderstand ($Z_W = 75 \Omega$) abgeschlossen, da sonst C_2 über den Abschlusswiderstand Z_W zu stark belastet d.h. zu rasch entladen würde ($C_2 \cdot Z_W = 45 \mu\text{s}$).
- **Besser:** Anschluss des Kabels am Teiler mit einem Widerstand $R = Z_W$ in Serie, so tritt am Messkabel nur der halbe Spannungsabfall an $R_2 - C_2$ auf.
 - ➔ quasi offenes Endes des Koaxkabels am Oszillographen ($1 \text{ M}\Omega // 15 \text{ pF}$)
 - ➔ Reflexion mit Spannungsverdopplung auf,
 - ➔ am Oszilloskopeingang wieder die gleiche Spannung wie an C_2
- Reflektierte Welle läuft im Messkabel zum Teiler zurück und wird jetzt im Widerstand $R = Z_W$ praktisch vollständig abgebaut ($R_2 \ll R$; C_2 wirkt bei hohen Frequenzen wie ein Kurzschluss; ➔ Kabelabschluss ca. Z_W)

Messung mit Oszilloskopen und digitalen A/D-Wandlern (Transientenrecorder) Ankopplung des Messsystems (z.B. Oszilloskop) an den Teiler



Übersetzungsverhältnis des Teiler für hohe Frequenzen:

$$\ddot{u} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

Übersetzungsverhältnis des Teiler für niedrige Frequenzen:

$$\ddot{u} = \frac{C_1 + C_2 + C_K}{C_1}$$

Für niedrige Frequenzen wird die Kabelkapazität C_K an C_2 wirksam (R vernachlässigbar)
 → Teilerverhältnis vergrößert sich (oft $C_K \ll C_2$, → Effekt vernachlässigbar)!

Messung von Stoßspannungen mit der Kugelfunkenstrecke

Der Scheitelwert der Stoßspannung kann, ähnlich wie bei AC- und DC-Messungen (VDE 0432, Teil 9) auch mit einer zum Prüfling parallel geschalteten Kugelfunken-strecke gemessen werden.

Voraussetzung:

Feld zwischen den Kugeln der Messfunkenstrecke ist weitgehend homogen.

50 % - Durchschlag-Stoßspannung

Scheitelwert derjenigen Stoßspannung, bei dem unter festgelegten Bedingungen 50 % aller Stöße zu Durchschlägen am Prüfling führen.

Dabei ist die Schlagweite der Kugelfunkenstrecke so einzustellen, dass von allen erzeugten Spannungsstößen je etwa die Hälfte zu Überschlägen an der Kugelfunkenstrecke bzw. am Prüfling führt.

Messunsicherheit bei Kugelfunkenstrecken:

bei Schlagweiten bis $0,5 d$ ($d =$ Kugeldurchmesser) mit $\pm 3 \%$

Durchführung von Stoßspannungsprüfungen

Zur Ermittlung der 50%-Durchschlag-Stoßspannung eines Prüflings ist je nach der zulässigen Messunsicherheit eines der folgenden Verfahren anzuwenden:

1. Vereinfachtes Verfahren für orientierende Messungen:

Spannung solange mit kleinen Schritten ΔU ändern, bis bei unveränderter Spannung 4 bis 6 Durchschläge bei 10 aufeinanderfolgenden Stößen auftreten.

Durchführung von Stoßspannungsprüfungen

Zur Ermittlung der 50%-Durchschlag-Stoßspannung eines Prüflings ist je nach der zulässigen Messunsicherheit eines der folgenden Verfahren anzuwenden:

2. Vereinfachtes Spannungssteigerungsverfahren mit Wahrscheinlichkeitsnetz nach 3a.

Interpolation der Spannung im Wahrscheinlichkeitsnetz mit
2 Folgen à 10 Spannungsstößen in einem Spannungsbereich, in dem

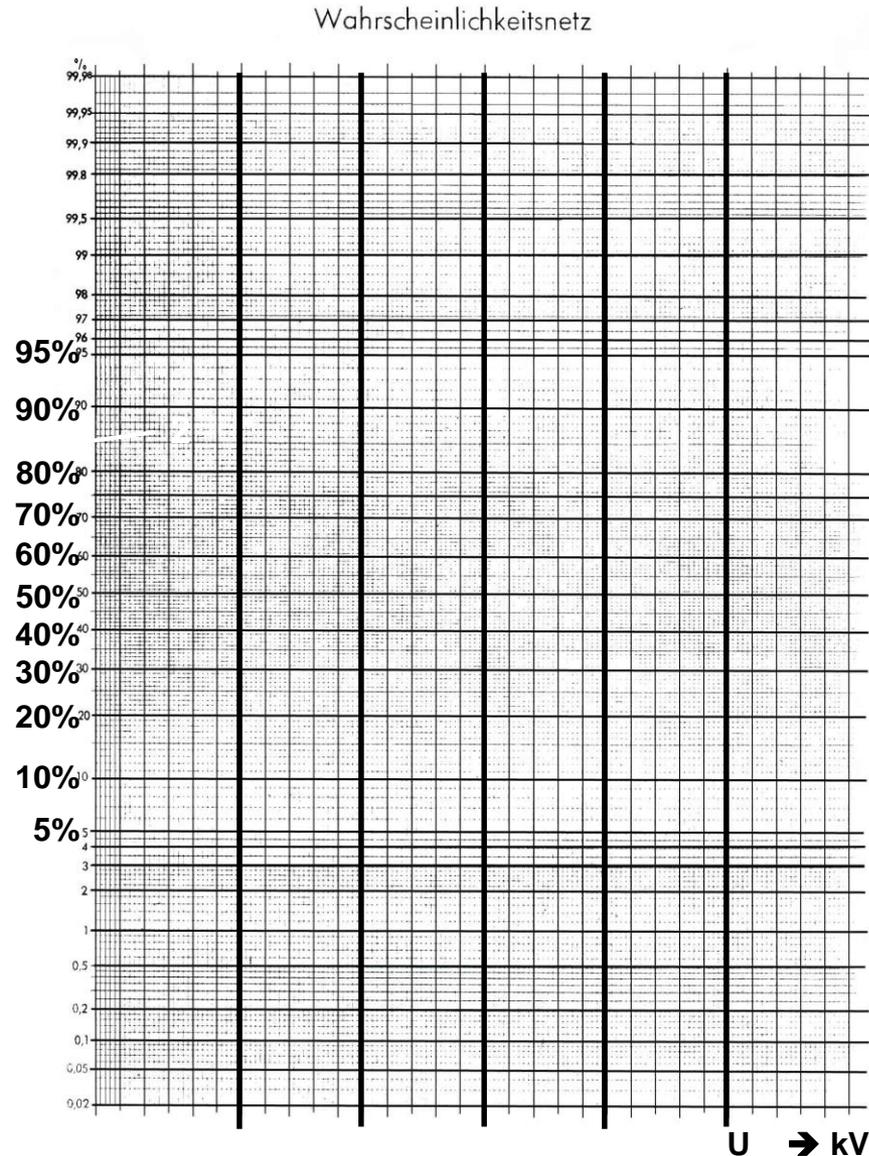
- eine Folge von Spannungsstößen weniger als 5

und

- eine Folge mehr als 5 Durchschläge ergibt.

Durchführung von Stoßspannungsprüfungen

Spannungssteigerungsverfahren mit Wahrscheinlichkeitsnetz



Durchführung von Stoßspannungsprüfungen

Spannungssteigerungsverfahren mit Wahrscheinlichkeitsnetz

Grobe Spannungssteigerung bis ein erster Durchschlag auftritt.

Beispiel:

z.B. 98 kV

- Durchführung einer Folge von 10 Spannungstößen
- Wenn die Durchschlagswahrscheinlichkeit
 - > 50% → Spannungsabsenkung
 - < 50% → Spannungserhöhung
- Durchführung einer 2. Folge von 10 Spannungstößen

U / kV	98	102
Spannungstöße mit Durchschlag	//	//// ///
Spannungstöße ohne Durchschlag	//// ///	/
Durchschlagswahrscheinlichkeit in %	20	90

Durchführung von Stoßspannungsprüfungen

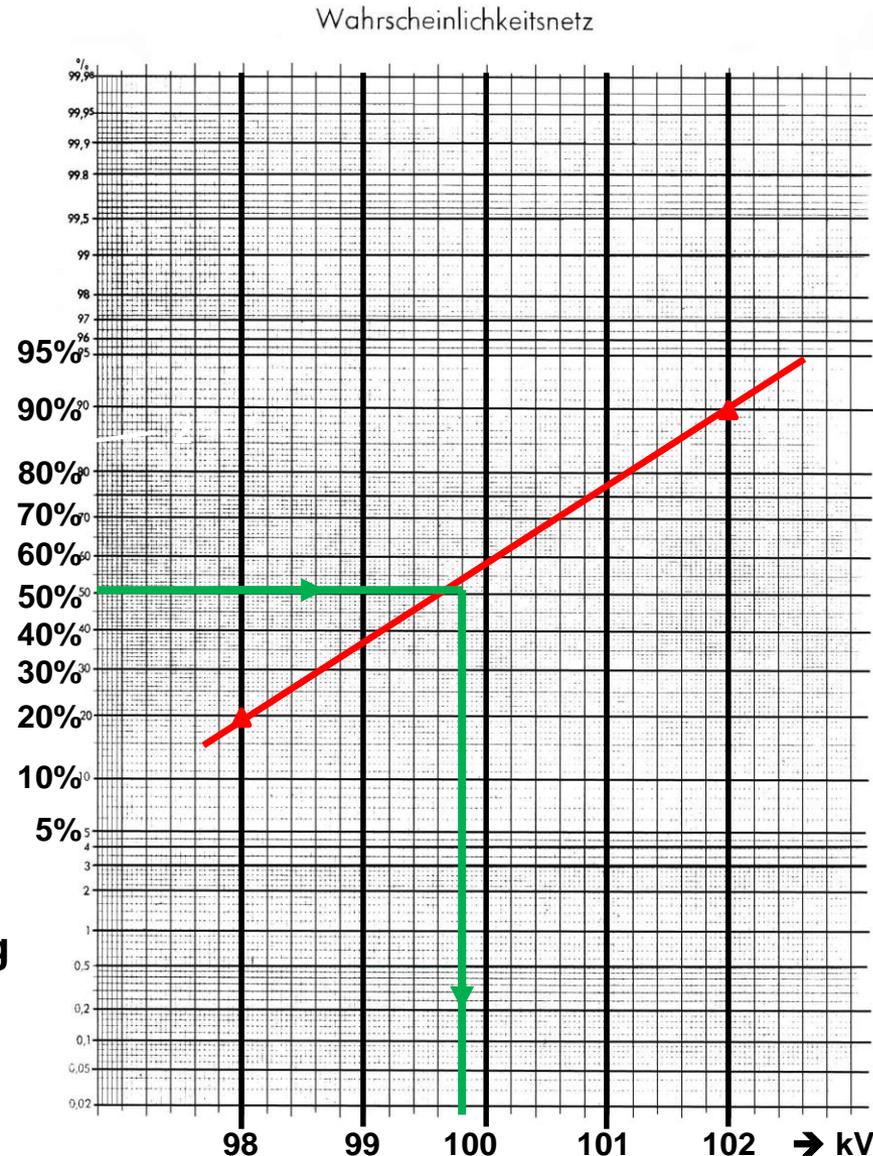
Beispiel

Spannungssteigerungsverfahren mit Wahrscheinlichkeitsnetz

Ergebnis:

Ergebnis für die 50%-Durchschlagsspannung

$$U_{50} \approx 99,8 \text{ kV}$$



Durchführung von Stoßspannungsprüfungen

Zur Ermittlung der 50%-Durchschlag-Stoßspannung eines Prüflings ist je nach der zulässigen Messunsicherheit eines der folgenden Verfahren anzuwenden:

3. Genauere Verfahren nach Norm

3a) Spannungssteigerungsverfahren (VDE 0432, Teil 9)

Stoßgenerator auf 5 verschiedene Stoßspannungen nahe der erwarteten 50%-Durchschlag-Stoßspannung einstellen, die sich voneinander um ca. 1 % unterscheiden.

- Mit jeder Spannung sind mindestens 10 Stöße auf den Prüfling zu geben.
- Die Durchschlagswahrscheinlichkeiten (Anzahl der Durchschläge bezogen auf 10 Stöße) sind über der Spannung in ein **Wahrscheinlichkeitsgitter** einzutragen und mit einer Ausgleichsgeraden zu versehen,
- 50%-Wahrscheinlichkeit ablesen.

Durchführung von Stoßspannungsprüfungen

Spannungssteigerungsverfahren mit Wahrscheinlichkeitsnetz

Beispiel: Geschätzte oder grob ermittelte 50%-Durchschlagsspannung: ca. 100 kV

Bei einer Stoßspannungsprüfung zur Bestimmung der 50%-Durchschlagsspannung einer Isolieranordnung in Luft wurden folgende Durchschlagshäufigkeiten ermittelt.

5 Messreihen à 10 Spannungstößen:

U / kV	98	99	100	101	102
Spannungstöße mit Durchschlag	/	///	////	///// /	///// ///
Spannungstöße ohne Durchschlag	///// ///	///// //	///// /	///	/
Durchschlagswahrscheinlichkeit in %	10	30	40	60	90

Durchführung von Stoßspannungsprüfungen

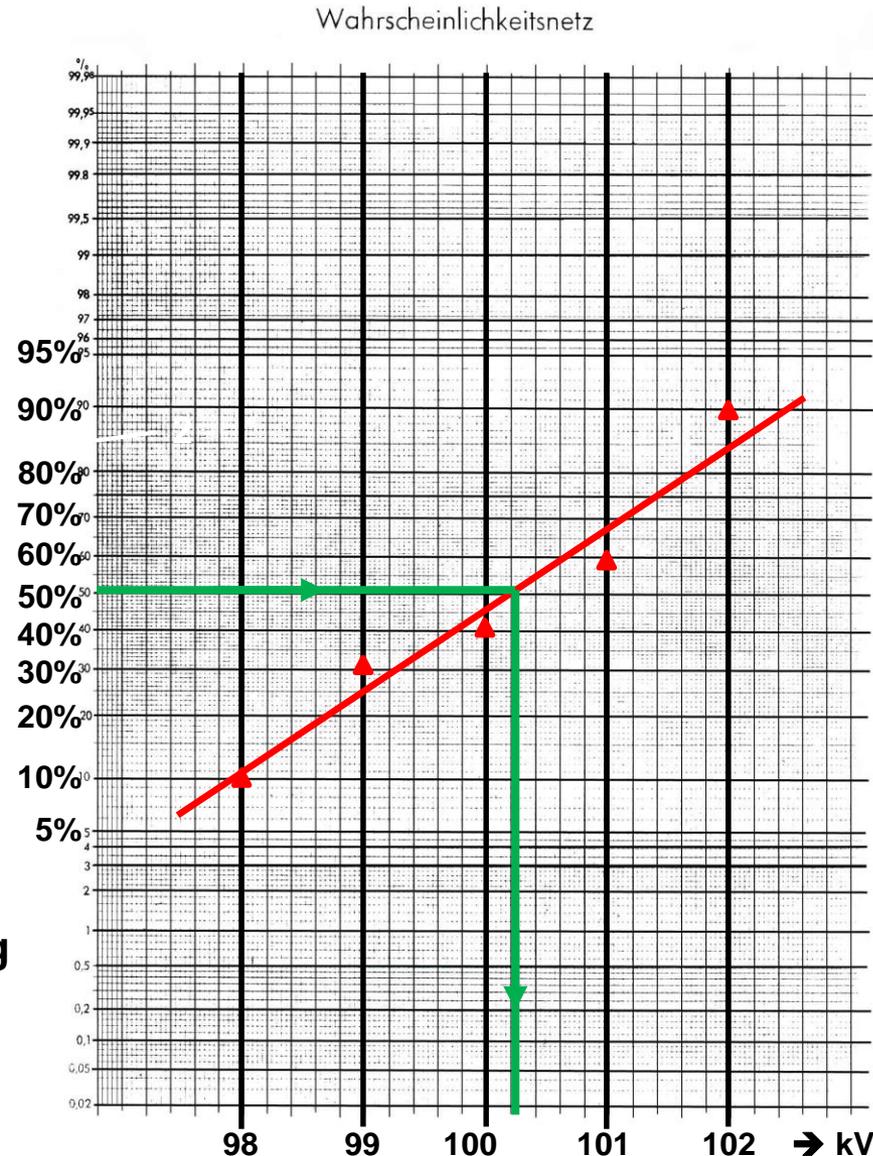
Beispiel

Spannungssteigerungsverfahren mit Wahrscheinlichkeitsnetz

Ergebnis:

Ergebnis für die 50%-Durchschlagsspannung

$$U_{50} = 100,2 \text{ kV}$$



Durchführung von Stoßspannungsprüfungen

3. Verfahren nach Norm

3b) Auf-Ab-Methode (VDE 0432, Teil 9)

Stoßgenerator auf eine Stoßspannungen nahe der erwarteten **50%-Durchschlag-Stoßspannung U_{50}** einstellen.

- Mindestens 20 Spannungsstöße in ungefähr 1-%-Schritten der erwarteten 50%-Durchschlag-Stoßspannung auf den Prüfling zu geben.
- Dabei wird nach jedem Spannungstoß, der nicht zu einem erneuten Durchschlag führt um ein festes $\Delta\hat{u}$ (ca. 1-%-Schritt) erhöht bzw. im Fall eines Durchschlages um ein $\Delta\hat{u}$ erniedrigt.
- Nach **mindestens 20 Spannungsstößen** kann dann U_{50} mit nachstehender Gleichung aus den Messwerten berechnet werden.

$$U_{50} = \frac{\sum_{v=1}^{\mu} [n_v \cdot \hat{u}_v]}{n}$$

mit

n_v = Anzahl der Spannungsstöße bei \hat{u}_v

n = Gesamtzahl der Spannungsstöße

μ = Anzahl der Klassen mit unterschiedlichen Spannungen U_v

Durchführung von Stoßspannungsprüfungen

Beispiel:

Entsprechend dem vorgenannten Verfahren wurden die in nachstehender Tabelle angegebenen Scheitelspannungswerte \hat{u} gemessen.



n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
\hat{u} / kV	170	180	190	200	210	220	230	240	250	240	250	240	230	220	210
n	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\hat{u} / kV	220	230	240	250	240	230	240	230	240	230	220	230	240	230	220

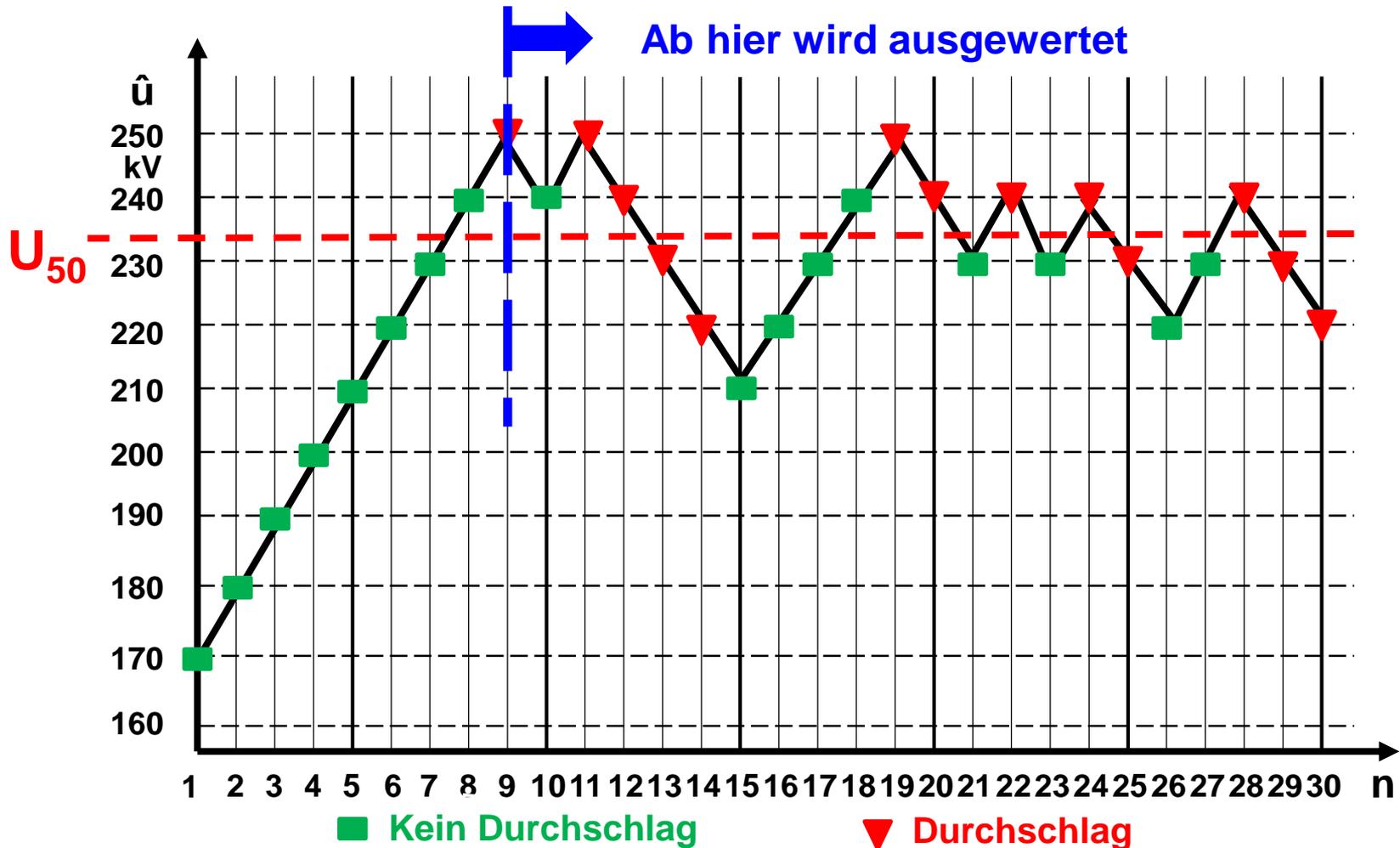


Kein Durchschlag



Durchschlag

Durchführung von Stoßspannungsprüfungen



Durchführung von Stoßspannungsprüfungen

Beispiel:

Entsprechend dem vorgenannten Verfahren wurden die in nachstehender Tabelle angegebenen Scheitelspannungswerte \hat{u} gemessen.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
\hat{u} / kV	170	180	190	200	210	220	230	240	250	240	250	240	230	220	210
n	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\hat{u} / kV	220	230	240	250	240	230	240	230	240	230	220	230	240	230	220

■ Kein Durchschlag ▼ Durchschlag

Klasse v	210kV	220kV	230kV	240kV	250kV
n_v	1	4	7	7	3
$N_v \cdot U_v$	210kV	880kV	1610kV	1680kV	750kV
$= \sum N_v \cdot U_v$			5130 kV		
$U_{50} = (\sum N_v \cdot U_v) / n$	233,2 kV				

Durchführung von Stoßspannungsprüfungen

Überprüfung der Messgenauigkeit für „Auf-Ab-Methode“ und „Spannungssteigerungsverfahren“ (VDE 0432, Teil 9)

Folgende **Bedingung** für die **Standardabweichung σ** muss überprüft werden:

Max. zulässiger Wert für volle Blitz- und Schaltstoßspannungen: 1%

Überprüfung der Bedingung:

Maximal 2 Durchschläge bei 15 Spannungstößen bei nachstehenden Spannungswerten:

$U_{50} - 1\%$ für Blitzstoßspannungen

$U_{50} - 1,5\%$ für Schaltstoßspannungen

Anmerkung: Zeitlicher Abstand zwischen 2 Spannungstößen muss $\geq 30s$ sein !

Reduzierung der Messwertstreuung bei Stoßspannungsmessungen mit Kugelfunkenstrecken

- Vorionisation des Bereichs zwischen den Kugeln (z.B. durch UV-Bestrahlung, radioaktiver Stoff, Quecksilberdampf-Quarzlampe, Röntgenröhre).

- **Vorionisation für genauere Messergebnisse**

Bei Spannungen < 50 kV Scheitelwert mit Kugeln aller Größen (optional)

und

in jedem Fall beim Messen mit Kugeln von 12,5 cm Durchmesser und kleiner (immer).

Messung von Stoßspannungen mit der Kugelfunkenstrecke

Anwendbarkeit, Polarität und Normen

Anwendbarkeit des Prüfverfahrens:

Nur bei selbstheilender Isolation, d.h. wenn der Prüfling durch die wiederholte Spannungsbeanspruchung nicht beeinträchtigt wird;

(trifft im allgemeinen bei gasförmigen Isoliermitteln zu, denen gegebenenfalls ein fester Isolierstoff parallel geschaltet sein kann)

Polarität der Prüfspannung:

Im allgemeinen ist der Prüfling mit Stoßspannung negativer und positiver Polarität zu prüfen, außer es besteht kein Zweifel, welche Polarität die höhere Beanspruchung des Prüflings darstellt und damit zu den niedrigeren Durchschlagsspannungen führt . (meist positive Stoßspannung).

(Die Polarität der Stoßspannung ist im Prüfbericht stets anzugeben).

Normen:

Für die Durchführung von Stoßspannungsprüfungen sind die Verfahren nach VDE 0432, Teil 9 oder ggf. die entsprechenden IEC-Vorschriften maßgebend.

Messung von Stoßspannungen mit der Kugelfunkenstrecke

Durchführung von Stoßspannungsprüfungen

Zu beachten:

Der **zeitlich Abstand zwischen zwei Stößen** muss jeweils ausreichend groß sein ($\geq 30\text{s}$), damit die Durchschlagsbedingungen beim Auftreten eines Stoßes nicht durch den vorhergehenden Stoß beeinflusst werden.

Bei **mehrstufigen Anlagen mit Stoßspannungen ab mehreren 100 kV** ist dies durch die erforderliche Ladezeit der Stoßkondensatoren (z. B. $> 15\text{s}$) ohnehin gewährleistet.

E N D E