

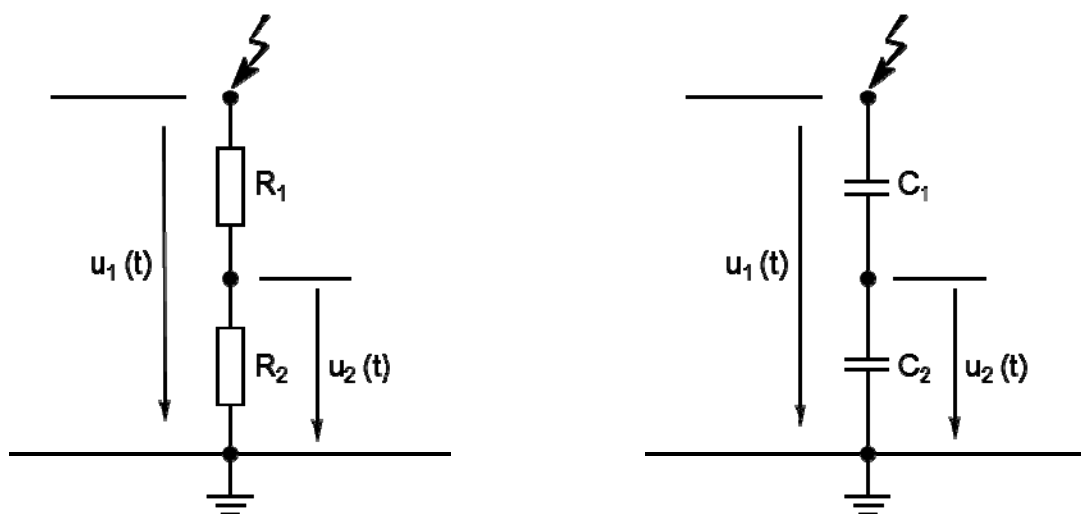
Universität der Bundeswehr München Professur für Hochspannungstechnik und Blitzforschung	
Hochspannungstechnisches Praktikum 1	Messung hoher Spannungen
Versuch 2	

1. Grundlagen

1.1 Messung mit der Kugelfunkenstrecke

Die Spannungsmessung erfolgt entweder bei fest eingestellter Spannung durch Verringern des anfänglich zu groß gewählten Kugelabstandes oder bei fest eingestelltem Kugelabstand durch Steigerung der Spannung bis zum Durchschlag. Die Durchschlagspannungen für Normalbedingungen (20°C und 0,1013 MPa) können aus Tabellen in den VDE-Vorschriften (VDE 0433, Teil 2) entnommen werden (siehe Anhang 1). Wird der Kugelabstand s im Verhältnis zum Kugeldurchmesser d klein genug gehalten, dann lassen sich die Werte für Gleichspannung bei $s \leq 0,4 \cdot d$ mit $\pm 5\%$ Genauigkeit bestimmen und für Wechselspannung und Stoßspannung bei $s \leq 0,5 \cdot d$ mit $\pm 3\%$ Genauigkeit. Da sich die Durchschlagspannung angenähert proportional mit der relativen Luftdichte ändert, können die gemessenen Spannungswerte auf Normalbedingungen umgerechnet werden (siehe Anhang 2).

1.2 Messung mit Spannungsteilern



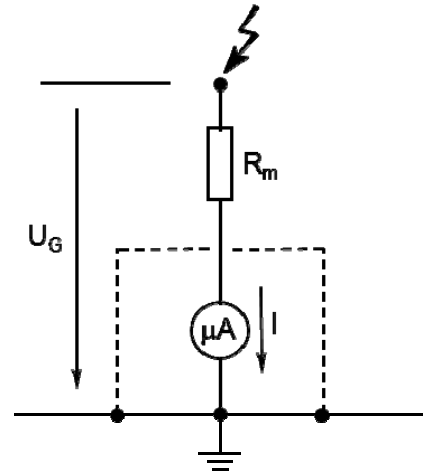
Mit Hilfe von ohmschen oder kapazitiven Spannungsteilern lassen sich die Messwerte mit einem Übersetzungsverhältnis \ddot{u} von der Hochspannungs- auf die Niederspannungsseite übertragen:

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

Gleichspannungsmessung

Im Praktikum Hochspannungstechnik wird für die *Gleichspannungsmessung* als vereinfachte Variante des ohmschen Spannungsteilers die Strommessung mit einem μA -Meter durchgeführt, das an den $140 \text{ M}\Omega$ Messwiderstand R_m angeschlossen ist. Die zu messende Gleichspannung ergibt sich zu

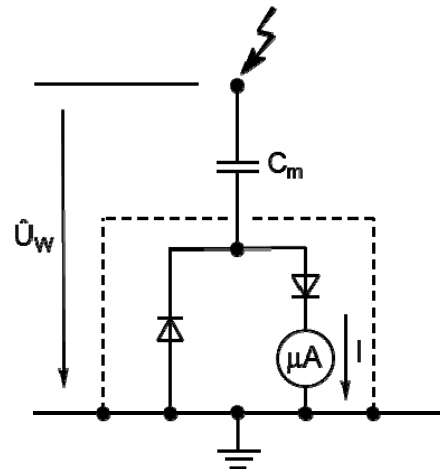
$$U_G = I \cdot R_m.$$



Wechselspannungsmessung

Die *Wechselspannungsmessung* erfolgt mit der Methode nach Chubb/Fortescue. Hierbei liegt ein μA -Meter in einem Zweig einer Antiparallelschaltung zweier Dioden, die an den 100 pF -Kondensator C_m angeschlossen ist. Diese Messmethode setzt voraus, dass beide Halbwellen der Wechselspannung die gleiche Amplitude besitzen und der Spannungsverlauf keine Einsattelungen aufweist. Der *Scheitelwert der Wechselspannung* ergibt sich zu

$$\hat{U}_w = I / (2 \cdot f \cdot C_m).$$

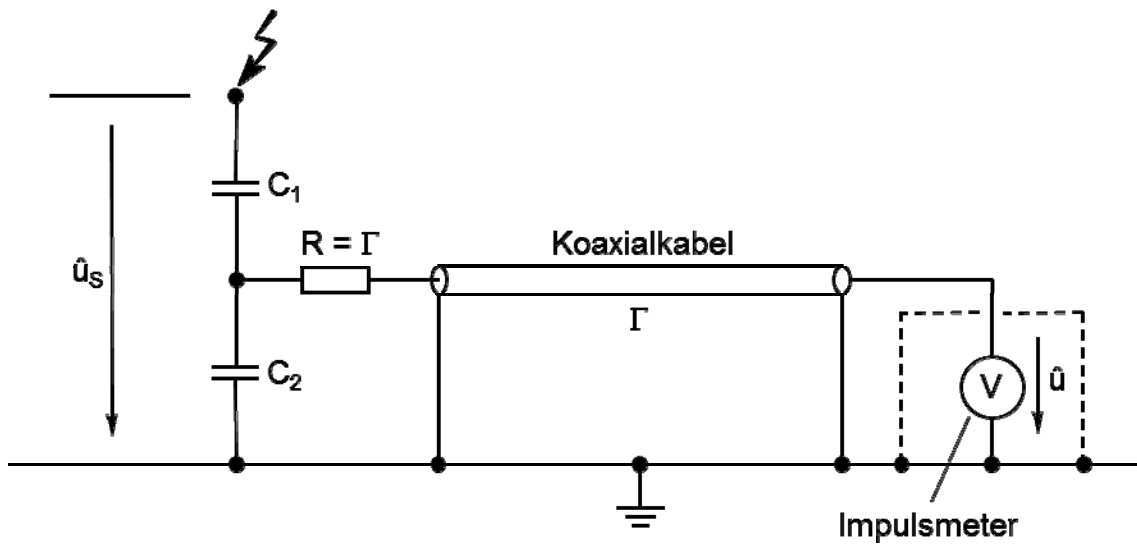


Stoßspannungsmessung

Die Messung des Scheitelwerts \hat{u} einer vollen bzw. abgeschnittenen *Blitzstoßspannung* erfolgt mit einem Impulsmeter an der Niederspannungskapazität C_2 des aus $C_1 = 1,2 \text{ nF}$ und $C_2 = 1,8 \text{ }\mu\text{F}$ bestehenden kapazitiven Spannungsteilers. Zur Vermeidung einer unzulässigen Entladung von C_2 ist ein hochohmiger Anschluss des Impulsmeters erforderlich. Im Gegensatz zur üblichen Messmethode kann daher das Koaxialkabel nicht mit dem Wellenwiderstand $\Gamma = 50 \text{ }\Omega$ abgeschlossen werden. Stattdessen wird zwischen dem Spannungsteiler und dem Koaxialkabel ein Widerstand $R = \Gamma$ eingebracht. Dies bewirkt, dass ein Spannungsimpuls infolge der Serienschaltung vom Widerstand R und Wellenwiderstand Γ amplitudenmäßig halbiert

wird. Die halbierte Spannungswelle wird am hochohmigen Eingang des Impulsmeters reflektiert, wobei die Spannung wieder auf den ursprünglichen Wert verdoppelt wird. Für die reflektierte Welle ergibt sich durch $R = \Gamma$ ein wellenwiderstandsmäßig angepasster Abschluss. Der *Scheitelwert der Stoßspannung* ergibt sich zu

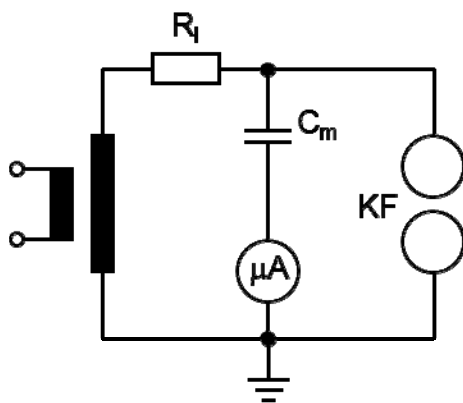
$$\hat{u}_s = \hat{u} (C_1 + C_2) / C_1.$$



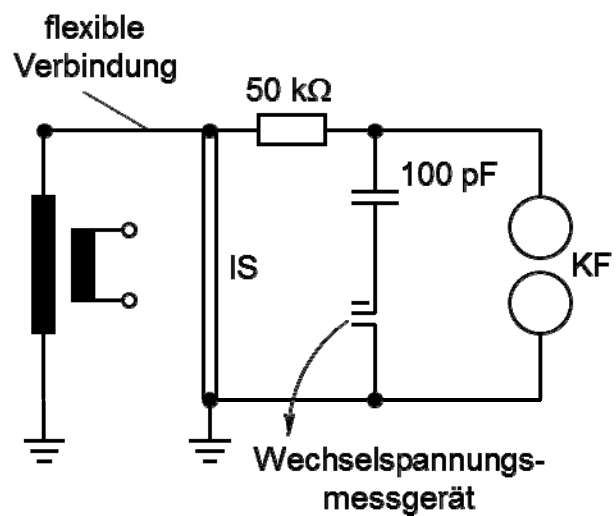
2. Schaltungen

2.1 Schaltung bei Wechselspannung

Schaltung:

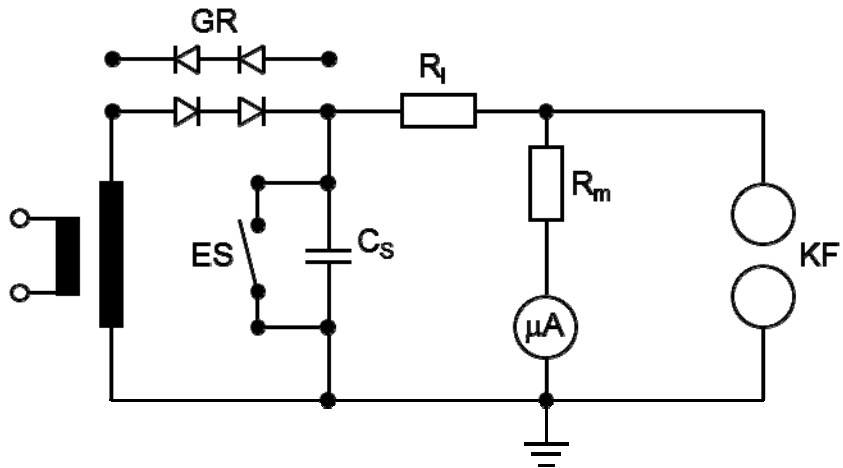


Aufbau:

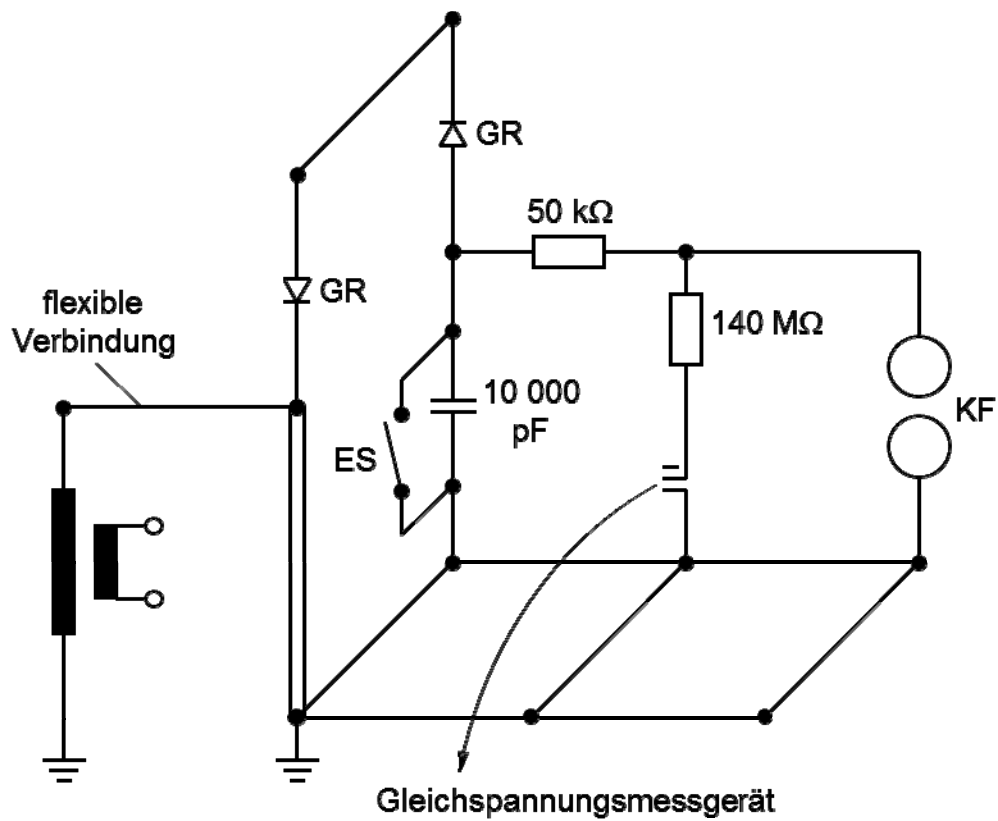


2.2 Schaltung bei Gleichspannung

Schaltung:

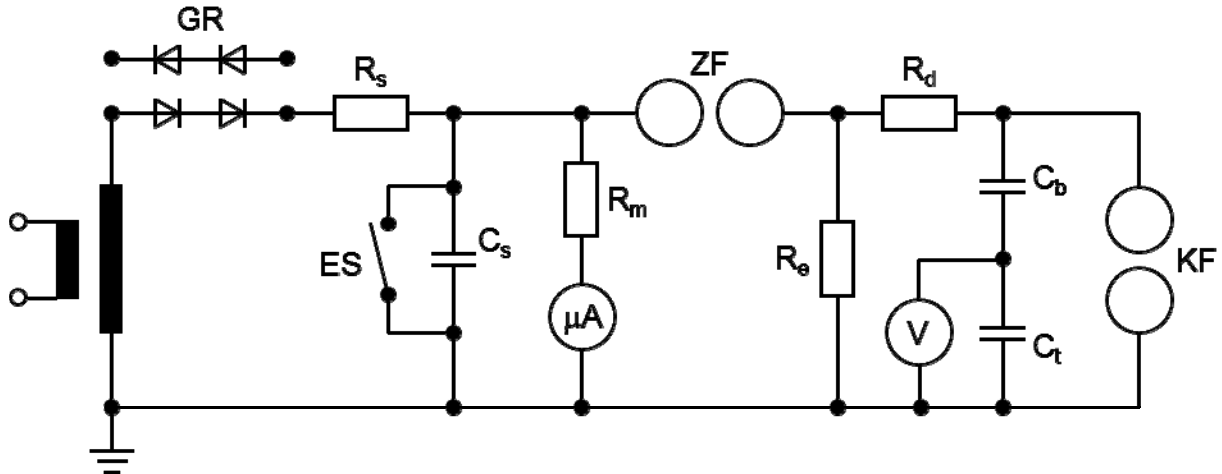


Aufbau:

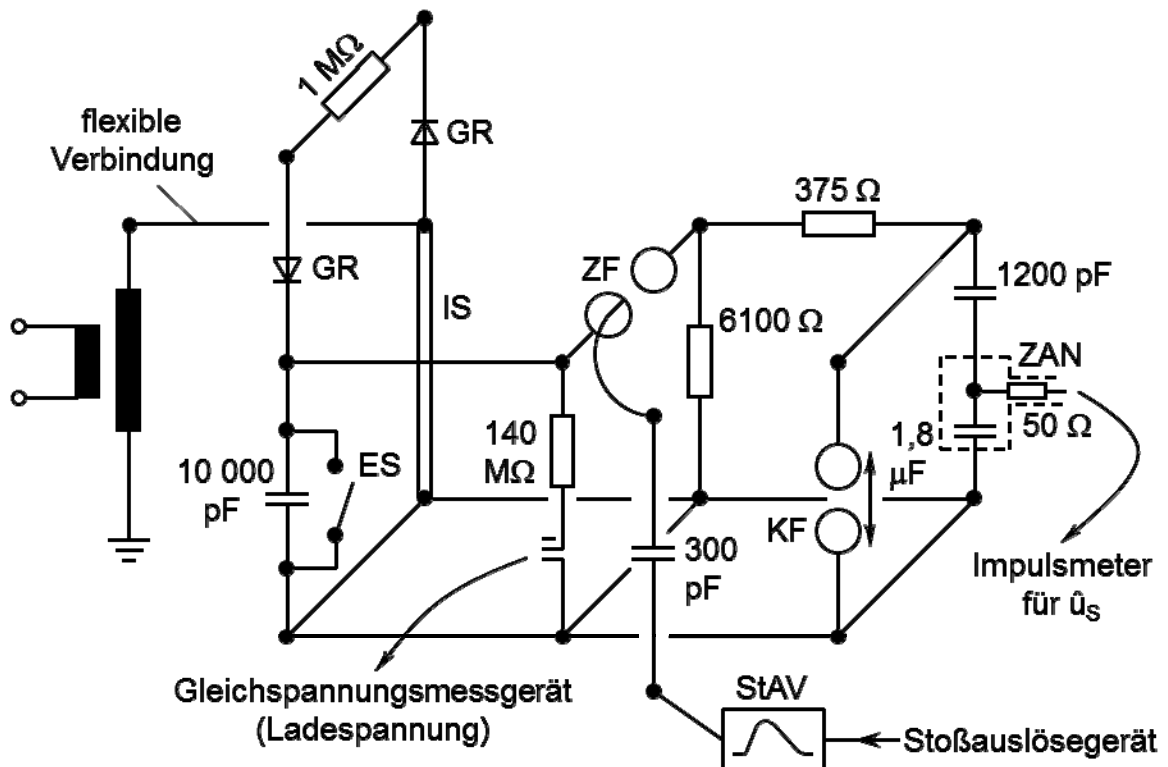


2.3 Schaltung bei Blitzstoßspannung

Schaltung:



Aufbau:



3. Versuchsdurchführung

Prüfling: Kugelfunkenstrecke KF (Kugel $d = 100$ mm)

Für die Umrechnung der Messwerte auf Normalbedingungen müssen Luftdruck und Temperatur gemessen werden. Mit dem Endmaß (10 x 20 x 50 mm) wird die Kugelfunkenstrecke KF (Kugeldurchmesser 100 mm) für den Kugelabstand $s = 10$ mm geeicht.

3.1 Messung bei Wechselspannung

Nach Schaltung unter 2.1 wird bei $s = 10, 20, 30$ und 40 mm die Spannung langsam bis zum Durchschlag an KF gesteigert. Am Wechselspannungs-Messgerät ist jeweils der Strom I_d im Durchschlag-Augenblick abzulesen.

Es sind jeweils 3 Messwerte aufzunehmen, aus denen der arithmetische Mittelwert zu bilden ist.

3.2 Messung bei Gleichspannung

Nach Schaltung unter 2.2 wird bei $s = 10, 20, 30$ und 40 mm die Spannung langsam bis zum Durchschlag an KF gesteigert. Am Gleichspannungs-Messgerät ist jeweils der Strom I_d im Durchschlag-Augenblick abzulesen. Die Messungen sind für positive und negative Gleichspannung (beide Gleichrichter GR umdrehen) durchzuführen.

Es sind jeweils 3 Messwerte aufzunehmen, aus denen der arithmetische Mittelwert zu bilden ist.

3.3 Messung bei Blitzstoßspannung

Nach Schaltung unter 2.3 wird mit Blitzstoßspannung $1,2/50 \mu\text{s}$ bei $s = 10, 20$ und 30 mm die Ladespannung so eingestellt, dass 50% aller Beanspruchungen zum Durchschlag an KF führen. Diese 50%-Durchschlag-Stoßspannungen U_{d50} sollen für positive und negative Polarität bestimmt werden.

Vorgehensweise:

Die Ladespannung wird anfangs so eingestellt, dass an KF sicher keine Durchschläge auftreten. Anschließend wird die Ladespannung stufenweise (jeweils ca. 1...3 kV) erhöht, wobei in jeder Stufe einige Stoßbeanspruchungen durchzuführen sind. Zwischen zwei Beanspruchungen soll dabei eine Pausenzeit von mindestens 3 s liegen. Der Abstand der Zündfunkenstrecke ZF ist bei der Spannungssteigerung entsprechend zu erhöhen.

Bei Einsatz der ersten Durchschläge an KF wird die Ladespannung so lange geringfügig geändert, bis etwa die Hälfte von 10 Beanspruchungen zum Durchschlag an KF führen (50%-Durchschlag-Stoßspannung U_{d50}). Wenn sich U_{d50} nicht unmittelbar einstellen lässt, kann dieser Wert auch durch Interpolation ermittelt werden (z.B. aus U_{d30} und U_{d70}).

Für jede U_{d50} sind 3 Messwerte von Ladespannung und Stoßspannungs-Scheitelwert am Impulsmeter aufzunehmen, aus denen der arithmetische Mittelwert zu bilden ist.

4. Auswertung:

- 4.1 Alle Mittelwerte der gemessenen Ströme sind auf Spannungen umzurechnen. Sämtliche Mittelwerte der Spannungen sind auf Normalbedingungen zu beziehen (siehe Anhang 2) und in Tabellen zusammenzustellen.
- 4.2 In je einem Diagramm $\hat{U}_{\delta=1} = f(s)$ sind die Durchschlagspannungen nach VDE (siehe Anhang 1) und die Ergebnisse der Instrumentenmessungen nach 2.1, 2.2 und 2.3 aufzutragen.
- 4.3 In je einem Diagramm sind die prozentualen Abweichungen $F^* = f(s)$ der Instrumentenmessungen nach 2.1, 2.2 und 2.3 bezogen auf die Durchschlagspannungen nach VDE aufzutragen und mit den unter 1.1 angegebenen Messgenauigkeiten zu vergleichen.
- 4.4 Bestimmen Sie näherungsweise den theoretischen Stoßausnutzungsfaktor η_s für die Schaltung 2.3 und vergleichen Sie diesen mit der Kugelfunkenstrecken- und der Instrumentenmessung.

Anhang 1

Tabelle der Durchschlagspannungen einer einpolig geerdeten Kugelfunkenstrecke

In der folgenden Tabelle sind die auf Normalbedingungen (20°C und 0,1013 MPa) bezogenen Durchschlagspannungen $\hat{U}_{\delta=1}$ für die im Praktikum verwendete Messfunkenstrecke KF (Kugeldurchmesser 100 mm) angegeben. Vollständige Tabellen finden sich in den VDE-Vorschriften (VDE 0433, Teil 2: 1961). Für Stoßspannung haben die angegebenen Werte die Bedeutung von 50%-Durchschlag-Stoßspannungen U_{d50} .

Kugelabstand	Scheitelwerte der Durchschlagspannungen	
s	Wechselspannung pos. und neg. Gleichspg. neg. Stoßspannung	pos. Stoßspannung
mm	kV	kV
		16,8
5	16,8	19,9
6	19,9	23,0
7	23,0	26,0
8	26,0	28,9
9	28,9	31,7
10	31,7	
		37,4
12	37,4	42,9
14	42,9	48,1
16	48,1	53,5
18	53,5	59,0
20	59,0	
		64,5
22	64,5	70,0
24	69,5	75,5
26	74,5	80,5
28	79,5	85,5
30	84,0	
		97,5
35	95,0	109
40	105	120
45	115	130
50	123	

Anhang 2

Luftdichtekorrektur

Die Durchschlagspannung in Luft ist außer von der Elektrodenanordnung auch von der relativen Luftdichte d abhängig. Die Durchschlagfestigkeit der Luft steigt mit wachsendem d annähernd proportional an. Um untereinander vergleichbare Messergebnisse zu erhalten, rechnet man die tatsächlich gemessenen Werte auf "Normalbedingungen" um. Als Normalbedingungen sind 20°C und 0,1013 MPa entsprechend einer relativen Luftdichte von $d = 1$, definiert (VDE 0432 Teil 1: 1994).

Da die Luftdichte mit dem Luftdruck proportional ansteigt und umgekehrt proportional mit der absoluten Temperatur fällt, ergibt sich für d :

$$\delta = \frac{p}{0.1013} \cdot \frac{273 + 20}{273 + \vartheta} \quad \text{mit } p \text{ in MPa und } \vartheta \text{ in } ^\circ\text{C}$$

Die im Bereich des Umgebungsdruckes bei einer relativen Luftdichte $\delta \neq 1$ gemessenen Spannungswerte U_d lassen sich nach folgender Formel in die Spannungswerte $U_{d=1}$ bei Normalbedingungen umrechnen:

$$U_{d=1} = U_\delta / \delta$$