Protokoll zum Energietechnischen Praktikum Versuch "Transientenbehandlung"

Transiente Vorgänge in der Hochspannungstechnik

Gruppe: Namen:

Datum:

Schwarz umrandete Aufgabenteile sind **vor** Versuchsbeginn zu beantworten!

1 Stoßspannungen

Zur Durchführung des Versuchs soll ein vierstufiger Marxgenerator verwendet werden (vergleiche Bild 3.4). Jede einzelne Stufe verfügt dabei über eine Stoßkapazität C_S' von 1 µF. Dämpfungs- und Entladewiderstände können aus den jeweils verfügbaren Widerständen frei gewählt werden.
Zur Versuchsdurchführung stehen folgende Widerstände zur Verfügung:

R_d	R_e
22 Ω	66 Ω
30 Ω	3,4 kΩ
43 Ω	
2 kΩ	
5 kΩ	
7,4 kΩ	

Die Kurvenform der erzeugten Stoßspannung wird mittels eines Breitband-Spannungsteilers ($\ddot{u}$ = 5000) und einem Digitalspeicheroszilloskop gemessen.

1.1 Erzeugung einer 1,2/50-Stoßspannung

Wie groß müssen in einer vierstufigen Marxschaltung die Widerstände R'_d und R'_e gewählt werden, wenn C_S = 250 nF und C_B = 3 nF gegeben sind?

R'_d = 34,19 Ω

R'_e = 67,68 Ω

$T_S \approx 2{,}96 \cdot R_d \cdot \frac{C_B \cdot C_S}{C_B + C_S} \Leftrightarrow R_d = \frac{T_S \cdot (C_B + C_S)}{2{,}96 \cdot C_B \cdot C_S} \Rightarrow R'_d = \frac{1{,}2 \cdot 10^{-6}\,s \cdot (253 \cdot 10^{-9}\,F)}{4 \cdot 2{,}96 \cdot 250 \cdot 10^{-9}\,F \cdot 3 \cdot 10^{-9}\,F} = 34{,}19\,\Omega$

$T_R \approx 0{,}73 \cdot R_e \cdot (C_B + C_S) \Rightarrow R'_e = \frac{T_R}{0{,}73 \cdot n \cdot (C_B + C_S)} = \frac{50 \cdot 10^{-6}\,s}{0{,}73 \cdot 4 \cdot 253 \cdot 10^{-9}\,F} = 67{,}68\,\Omega$

Wie groß ist der Ausnutzungsgrad η der Schaltung?

$$\eta = \frac{C_S}{C_B + C_S} = \frac{250 \cdot 10^{-9}\,F}{253 \cdot 10^{-9}\,F} = 0{,}988$$

Wählen Sie aus den verfügbaren Widerständen die Werte zur Erzeugung einer 1,2/50-Stoßspannung unter Berücksichtigung der genormten Toleranzen für Stirn- und Rückenzeiten!

R'_d = 30 Ω

R'_e = 66 Ω

Welche prozentualen Abweichungen der Stirn- und Rückenzeiten von den geforderten Werten sind zu erwarten?

T_s = 1,053 µs

T_r = 48,758 µs

ΔT_s (%) = 12,25 % (<30 %)

ΔT_r (%) = 2,48 % (<20 %)

$T_S = \frac{2{,}96 \cdot 4 \cdot 30\,\Omega \cdot 250 \cdot 10^{-9}\,F \cdot 3 \cdot 10^{-9}\,F}{253 \cdot 10^{-9}\,F} = 1{,}053 \cdot 10^{-6}\,s \Rightarrow \frac{|1{,}2 - 1{,}053|}{1{,}2} \cdot 100 = 12{,}25\,\%$

$T_r = 0{,}73 \cdot 4 \cdot 66\,\Omega \cdot 253 \cdot 10^{-9}\,F = 48{,}758 \cdot 10^{-6}\,s \Rightarrow \frac{|50 - 48{,}758|}{50} \cdot 100 = 2{,}48\,\%$

Bauen Sie die vierstufige Marxschaltung unter Verwendung der ermittelten Widerstände R'_d und R'_e auf.

Bestimmen Sie durch Messung die Stirn- und Rückenzeit und den Scheitelwert der Stoßspannung bei einer Ladespannung von U' = 25 kV (pro Stufe).

U_m = 102 kV

T = 563 ns

T_s = 0,994 µs

T_r = 45,36 µs

Welcher Ausnutzungsgrad ergibt sich hierbei?

$$\eta = \frac{102\,kV}{100\,kV} = 1,02$$

Wie groß sind die Abweichungen zwischen den gemessenen, den abgeschätzten und den vorgegebenen Werten für T_S und T_r? Wie groß ist die Abweichung zwischen dem gemessenen und dem abgeschätzten Wert für η? Erklären Sie in Stichworten: Wodurch kommen diese Abweichungen zustande? Werden die Toleranzen verletzt?

Messung vgl. Schätzung: T_S: 0,994 µs − 1,053 µs = −0,113 µs ≙ 10,73 %

T_R: 45,36 µs − 48,758 µs = −3,34 µs ≙ 6,85 %

η: 1,02 − 0,998 = 0,022 ≙ 2,204 %

Messung vgl. Norm: T_S: 0,994 µs − 1,2 µs = −0,26 µs ≙ 21,6̄ % (< 30 %)

T_R: 45,36 µs − 50 µs = −4,64 µs ≙ 9,28 % (< 20 %)

⇒ T_S & T_R geringer als berechnet, η höher als berechnet.

Ursachen:

- Teilerverhältnis in Realität nur 499,8 : 1
- Ablesefehler am Oszilloskop
- Bauteiltoleranzen
- Parasitäre Induktivitäten des Aufbaus nicht berücksichtigt.
- Kapazitäten des Spannungsteilers nicht berücksichtigt.

1.2 Erzeugung von Stoßspannungen unterschiedlicher Steilheit

Ermitteln Sie durch Messung die Stirnzeiten verschiedener Stoßspannungsformen und vergleichen Sie die gemessenen mit den berechneten Werten. Verwenden Sie zur Berechnung der Stirnzeiten die für 1,2/50-Stoßspannungen gebräuchliche Abschätzung.

U' = 25 kV

R'_e = 66 Ω

Formel zur Abschätzung der Stirnzeit:

$$T_s = 2{,}96 \cdot 4 \cdot R_d' \cdot \frac{C_B \cdot C_S}{C_B + C_S}$$

	Berechnet	Gemessen
R'_d = 22 Ω	T_s = 0,772 µs	T_s = 0,913 µs
R'_d = 43 Ω	T_s = 1,509 µs	T_s = 1,569 µs
R'_d = 2 kΩ	T_s = 7,020 µs	T_s = 33,63 µs

Geringe Abweichung bei R_d' = 43 Ω.
Große Abweichungen bei R_d' = 22 Ω und R_d' = 2 kΩ

Grund: Bei R_d' = 43 Ω : $T_s \approx 1{,}2$ µs ⇒ Hier stimmt die Näherungsformel.
Bei den anderen Widerständen ist die Stirnzeit wesentlich geringer bzw. größer. Hier passt der Korrektionsfaktor (2,96) nicht mehr.

1.3 Stoßkennlinien

Ermitteln Sie für eine gegebene Schlagweite und Atmosphärendruck die Stoßkennlinie der Schutzfunkenstrecke mit homogenem Feld durch Aufschalten von Stoßspannungen unterschiedlicher Steilheit bei konstanter Ladespannung U' = 25 kV (pro Stufe). Wählen Sie den Entladewiderstand zu R'_e = 66 Ω.

Nehmen Sie bei einer Spannungsform jeweils drei Wertepaare (U_d, t_d) im zeitlichen Abstand von mindestens 15 s auf.

R'_d = 43 Ω

Nr.	t_d (ns)	U_d (kV)
1	625	54,00
2	616	55,00
3	602	53,00
$\bar{x}$	614,3	54,00

R'_d = 2 kΩ

Nr.	t_d (ns)	U_d (kV)
1	19663	46,9
2	19874	46,9
3	19942	46,9
$\bar{x}$	19828	46,9

Schätzen Sie den Wert der statischen Durchbruchspannung U_{stat} mit Hilfe des Flächenzeitgesetzes rechnerisch ab. Nähern Sie hierzu jeweils den Verlauf der Spannung bis zum Abschneiden durch eine Gerade an. Stellen Sie zuerst die Gleichungen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ für den zeitlichen Verlauf dieser Stoßspannungen mit den konstanten Steigungen S_1 und S_2 auf. Setzen Sie diese dann mit Hilfe des Flächen-Zeit-Gesetzes gleich und lösen Sie die resultierende Gleichung nach der statischen Durchbruchspannung U_{stat} auf. Beachten Sie die unterschiedlichen Zeiten t_0 und t_d der beiden Spannungen.

Herleitung:

$u_1(t) = S_1 \cdot t \Rightarrow t_{01} = \frac{U_b}{S_1}$, $t_{01} = \frac{U_1}{S_1}$ | Im homogenen Feld gilt: $U_{stat} = U_b$

$u_2(t) = S_2 \cdot t \Rightarrow t_{02} = \frac{U_b}{S_2}$, $t_{02} = \frac{U_2}{S_2}$

Fläche-Zeit-Gesetz:

$$\int_{t_{01}}^{t_{01}} [u_1(t) - U_b]\,dt \stackrel{!}{=} \int_{t_{02}}^{t_{02}} [u_2(t) - U_b]\,dt$$

$$\Leftrightarrow \int_{t_{01}}^{t_{01}} [S_1 \cdot t - U_b]\,dt = \int_{t_{02}}^{t_{02}} [S_2 \cdot t - U_b]\,dt \Leftrightarrow \frac{1}{2} S_1 \cdot [t^2]_{t_{01}}^{t_{01}} - U_b \cdot [t]_{t_{01}}^{t_{01}} = \frac{1}{2} S_2 \cdot [t^2]_{t_{02}}^{t_{02}} - U_b \cdot [t]_{t_{02}}^{t_{02}}$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2} \cdot S_1 \cdot (t_{01}^2 - t_{01}^2) - U_b \cdot (t_{01} - t_{01}) - \frac{1}{2} \cdot S_2 \cdot (t_{02}^2 - t_{02}^2) + U_b \cdot (t_{02} - t_{02}) = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2} \cdot S_1 \cdot \left(\frac{U_1^2}{S_1^2} - \frac{U_b^2}{S_1^2}\right) - U_b \cdot \left(\frac{U_1}{S_1} - \frac{U_b}{S_1}\right) - \frac{1}{2} S_2 \cdot \left(\frac{U_2^2}{S_2^2} - \frac{U_b^2}{S_2^2}\right) + U_b \cdot \left(\frac{U_2}{S_2} - \frac{U_b}{S_2}\right) = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_1^2}{2S_1} - \frac{U_b^2}{2S_1} - \frac{U_1 U_b}{S_1} + \frac{U_b^2}{S_1} - \frac{U_2^2}{2S_2} + \frac{U_b^2}{2S_2} + \frac{U_2 U_b}{S_2} - \frac{U_b^2}{S_2} = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_1^2}{2S_1} + \frac{U_b^2}{2S_1} - \frac{U_1 U_b}{S_1} - \frac{U_2^2}{2S_2} - \frac{U_b^2}{2S_2} + \frac{U_2 \cdot U_b}{S_2} = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2 \cdot S_1} \cdot (U_1^2 - 2U_1 U_b + U_b^2) - \frac{1}{2S_2} \cdot (U_2^2 - 2U_2 U_b + U_b^2) = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2S_1} \cdot (U_1 - U_b)^2 - \frac{1}{2S_2} \cdot (U_2 - U_b)^2 = 0 \quad | \cdot 2$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{S_1} \cdot (U_1 - U_b)^2 - \frac{1}{S_2} \cdot (U_2 - U_b)^2 = 0 \quad | \,\sqrt{\;}^{1/2}$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{S_1}} \cdot (U_1 - U_b) - \frac{1}{\sqrt{S_2}} \cdot (U_2 - U_b) = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_1}{\sqrt{S_1}} - \frac{U_b}{\sqrt{S_1}} - \frac{U_2}{\sqrt{S_2}} + \frac{U_b}{\sqrt{S_2}} = 0 \Leftrightarrow \frac{U_1}{\sqrt{S_1}} - \frac{U_2}{\sqrt{S_2}} = U_b \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{S_1}} - \frac{1}{\sqrt{S_2}}\right)$$

$$\Rightarrow U_b = \frac{\frac{U_1}{\sqrt{S_1}} - \frac{U_2}{\sqrt{S_2}}}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} - \frac{1}{\sqrt{S_2}}} = \frac{U_1\sqrt{S_2} - U_2\sqrt{S_1}}{\sqrt{S_1 S_2}} \cdot \frac{\sqrt{S_1 S_2}}{\sqrt{S_2} - \sqrt{S_1}} = \boxed{\frac{U_1\sqrt{S_2} - U_2\sqrt{S_1}}{\sqrt{S_2} - \sqrt{S_1}} = U_{stat}}$$

Setzen Sie nun Ihre gemessenen Wertepaare für die mittlere Durchschlagspannung U_d und die Steigung S in die Gleichung für U_{stat} ein.

$S_1 = \frac{54\,kV}{614,\overline{3} \cdot 10^{-9}\,s} = 8,79 \cdot 10^{10}\,\frac{V}{s}$

$S_2 = \frac{46,9\,kV}{19828 \cdot 10^{-9}\,s} = 2,478 \cdot 10^{9}\,\frac{V}{s}$

U_{stat} für $u_1(t)$ und $u_2(t)$: $U_{stat} = 45,467\,kV$

$$U_{stat} = \frac{U_1 \cdot \sqrt{S_2} - U_2 \cdot \sqrt{S_1}}{\sqrt{S_2} - \sqrt{S_1}}$$

$$= \frac{54 \cdot 10^3\,V \cdot \sqrt{2,478 \cdot 10^9\,\frac{V}{s}} - 46,9 \cdot 10^3\,V \cdot \sqrt{8,79 \cdot 10^{10}\,\frac{V}{s}}}{\sqrt{2,478 \cdot 10^9\,\frac{V}{s}} - \sqrt{8,79 \cdot 10^{10}\,\frac{V}{s}}}$$

$= 45467\,V$

2 Wanderwellen auf Leitungen

Wenn Netzbetreiber in einem Kabel (z. B. zwischen einem Umspannwerk und einer Ortsnetzstation, siehe Bild 2.1) einen Fehler vermuten, wird das Kabel auf beiden Seiten freigelegt, sodass die offenen Enden vorliegen. Mit Hilfe eines Prüftransformators wird an einem der Enden Hochspannung angelegt, sodass sich der Fehler in Form von Teilentladungsimpulsen bemerkbar macht. Über eine Ankoppeleinheit wird das Fehlersignal ausgekoppelt und kann mit dem Oszilloskop ausgewertet werden.

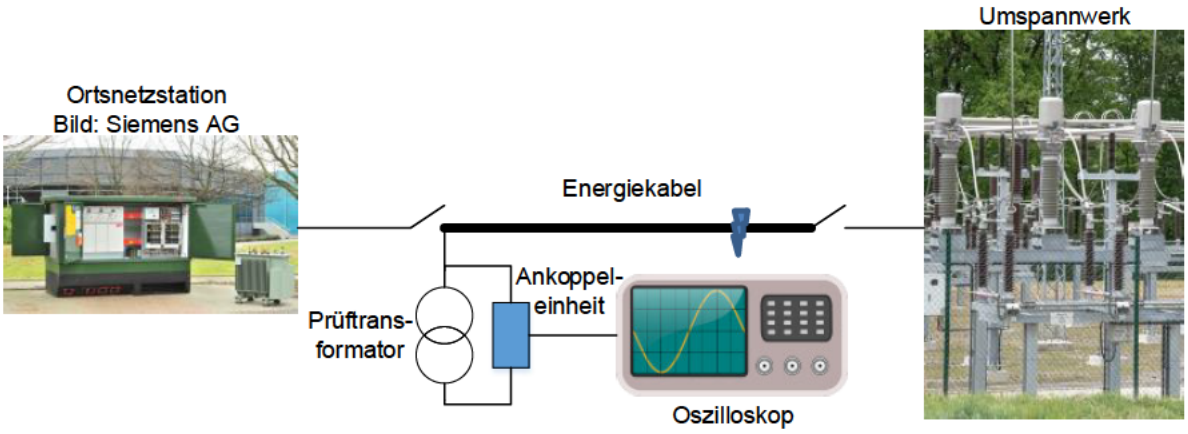


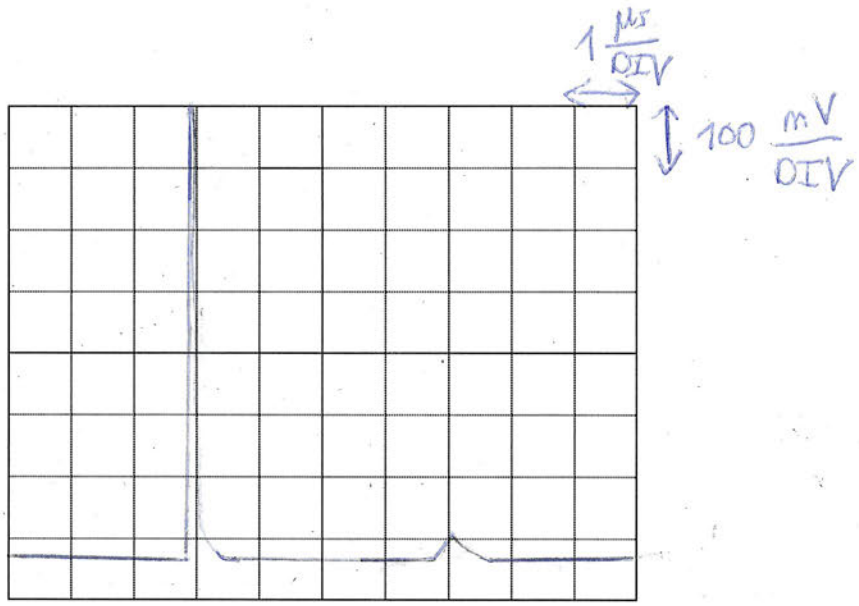
Bild 2.1: Ortung von Teilentladungen in einem Energiekabel

Dies soll in diesem Praktikumsversuch nachgeahmt werden. Anstelle eines Energiekabels wird ein 500 m langes Koaxialkabel verwendet. An einer Stelle x werden mit Hilfe eines TE-Generators TE-Signale in das Kabel gespeist. Ausgehend von dieser „simulierten Fehlerstelle“ breitet sich das TE-Signal in beide Richtungen mit einer Geschwindigkeit von $v \approx 200$ m/µs aus.

Finden Sie mit Hilfe des Oszilloskops heraus, wie lange die Wegstrecke bis zum Fehlerort x, gemessen vom Kabelanfang (0 m), ist. Schließen Sie hierzu das Oszilloskop an den Kabelanfang (0 m) oder das Kabelende (500 m) an.

Zeichnen Sie zunächst das Oszillogramm auf und markieren Sie die Punkte, an denen Sie den zeitlichen Abstand bestimmen.

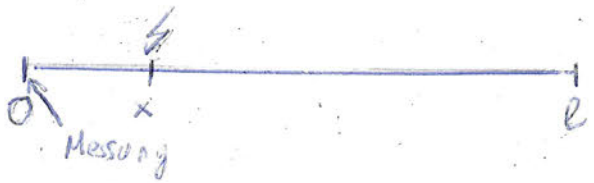
Oszillogramm:



Messen Sie hieraus den zeitlichen Abstand Δt zwischen den beiden Impulsen:

$\Delta t =$ 3,9875 µs

Beschreiben Sie Δt in Abhängigkeit von der Ausbreitungsgeschwindigkeit v und der Kabellänge l und dem Fehlerort x:



$$t_1 = \frac{x}{v}$$

$$t_2 = \frac{(l-x)+l}{v} = \frac{2l-x}{v}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2l-x-x}{v} = 2 \cdot \frac{l-x}{v}$$

$$\Delta t\,(l,x,v) = 2 \cdot \frac{l-x}{v} \quad \Rightarrow \quad x = l - \frac{\Delta t \cdot v}{2}$$

Berechnen Sie hieraus die Wegstrecke

$$x = 500\,m - \frac{3{,}9875 \cdot 10^{-6}\,s \cdot 200 \cdot 10^{6}\,\frac{m}{s}}{2} = 101{,}25\,m.$$