

Protokoll zum Energietechnischen Praktikum

Versuch Erde

Erzeugung und Messung hoher Gleich- und Wechselspannungen

Gruppe:

Namen:

Datum:

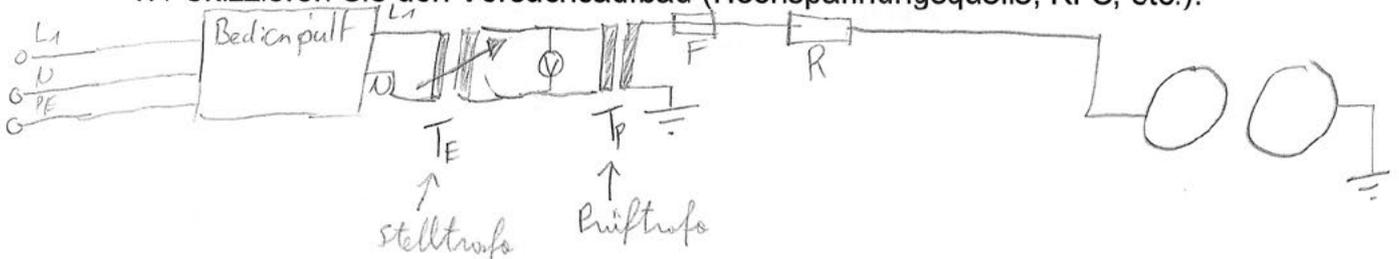
Allgemeiner Hinweis:

Diskutieren Sie alle Versuchsergebnisse in Stichworten.

Schwarz umrandete Aufgabenteile sind vor Versuchsbeginn zu beantworten. Beachten Sie die Abweichung von realen zu idealen Bauteilwerten. Bei Rechnungen werden ideale Werte angenommen. Kennzeichnen Sie die von Ihnen verwendeten Bauteile und Messkanäle in den vorgegebenen oder skizzierten Schaltbildern. Ein ordentliches Protokoll ist spätestens eine Woche nach der Versuchsdurchführung bei dem Betreuer oder im Sekretariat des IEH abzugeben.

1 Messungen mit der Kugelfunkenstrecke (KFS)

1.1 Skizzieren Sie den Versuchsaufbau (Hochspannungsquelle, KFS, etc.).

1.2 Ermitteln Sie das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} des Transformators für 100 kV.

$$\ddot{u} = \frac{100 \text{ kV}}{220 \text{ V}} = 454,54$$

1.3 Bestimmen Sie für verschiedene Schlagweiten die mittlere Primärspannung $U_{1,m}$ beim Durchbruch der Funkenstrecke. Berechnen Sie mit diesem Wert und dem Nennübersetzungsverhältnis die mittlere Durchschlagspannung \hat{U}'_1 in kV unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors. Führen Sie dazu bei jeder Schlagweite fünf Messungen mit ausreichendem zeitlichem Abstand durch. Der Kugeldurchmesser beträgt 25 cm.

Lufttemperatur:

23,1°C

Luftdruck:

1021 hPa

$$\delta = 0,289 \cdot \frac{7P}{273 + \theta}$$

Berechneter Korrekturfaktor:

K=1

Durchschlagspannung Kugelfunkenstrecken:

Schlagweite s in cm	theoretische Durchbruchspannung \hat{U}_D in kV	Erwartete Spannung am Digitalmultimeter U_{eff} in V	80 % der erwartete Spannung U_{eff} in V
1,0	31,7	49,31	39,45
2,0	59,0	91,78	73,42
3,0	86,0	133,79	107,03
4,0	112,0		
5,0	137,0		
6,0	161,0		
7,0	184,0		
8,0	206,0		
9,0	226,0		

Tabelle 1: Durchbruchspannungen für Kugeldurchmesser $d = 25$ cm

Bis 80% der Spannung kann schnell hochgekurbelt werden (Kein Durchschlag).

Berechnung $U_{1,m}$ und \hat{U}'_1 :

$$U_{1,m} = \frac{1}{4} \sum_{i=2}^5 U_{1,i} \quad \hat{U}'_1 = \sqrt{2} \cdot \ddot{u} \cdot U_{1,m}$$

Messergebnisse:

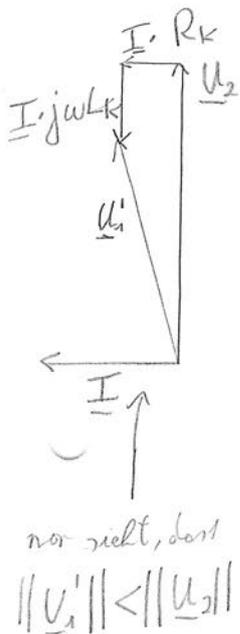
s [cm]	$U_{1,1}$ [V]	$U_{1,2}$ [V]	$U_{1,3}$ [V]	$U_{1,4}$ [V]	$U_{1,5}$ [V]	$U_{1,m}$ [V]	U'_1 [kV]	\hat{U}_D^* [kV]
1	39,4	46,6	43,2	44,2	47,6	44,9	28,9	31,7
2	80,5	84,4	86,1	86,1	86,5	85,8	55,1	59,0
3	128,5	128,7	127,9	130,3	131,2	129,5	83,2	86,0

Die zu messenden Größen sind **fett** dargestellt.

1.4 Tragen Sie $\hat{U}_D^* = f(U'_1)$ in das Diagramm 1 ein.

1.5 Benennen Sie mögliche Ursachen für die Differenz von \hat{U}_D^* und U'_1 . Nennen

Sie außerdem Unterschiede für die Differenzen zwischen den Ergebnissen aus dem Oszilloskop und dem Multimeter, skizzieren Sie ein Zeigerdiagramm, das die Unterschiede erklärt.



- Spannung wird nur primärseitig gemessen \rightarrow durch kapazitive Spannungüberhöhung ist die sekundärseitige Spannung höher als erwartet
- Messfehler
- Ungenauer Abstand zwischen den Klammern

2 Spannungsmessung mit kapazitivem Teiler

$$C_1 = 100 \text{ pF}$$

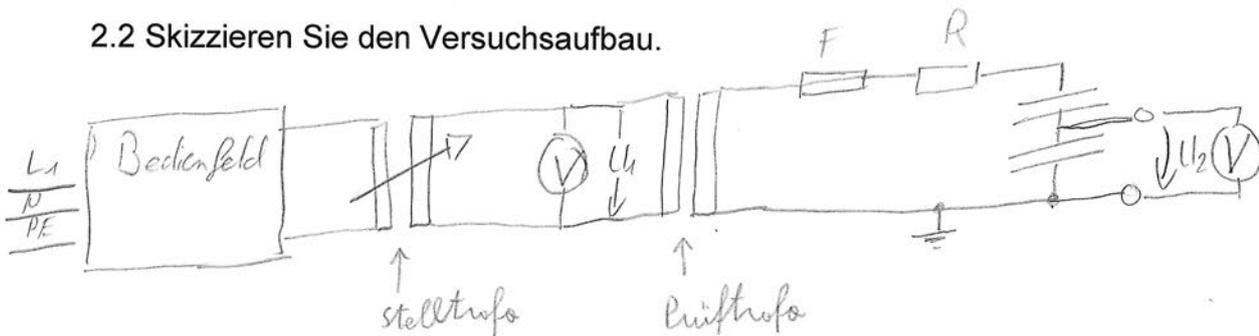
$$U_N = 50 \text{ kV} \quad (\text{oberspannungsseitig})$$

$$C_2 = 102,4 \text{ nF}$$

2.1 Ermitteln Sie das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} des Transformators.

$$\ddot{u} = \frac{50 \text{ kV}}{220 \text{ V}} = 227,27$$

2.2 Skizzieren Sie den Versuchsaufbau.



2.3 Bestimmen Sie das theoretische Übersetzungsverhältnis \ddot{u}_{Teiler} des kapazitiven Teilers.

$$\ddot{u}_{\text{Teiler}} = \frac{U_1(t)}{U_2(t)} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = \frac{100 \cdot 10^{-12} + 102,4 \cdot 10^{-9}}{100 \cdot 10^{-12}} = 1025$$

2.4 Geben Sie den zu erwartenden maximalen Effektivwert der Spannung an, den Sie am Oszilloskop erwarten und treffen Sie eine Einschätzung zur Sicherheit.

$$U_{\text{eff,max}} = \frac{U_N}{\ddot{u}_{\text{Teiler}}} = \frac{50 \text{ kV}}{1025} = 48,78 \text{ V} > \text{Spannungsbereich Oszilloskop}$$

2.5. Bestimmen Sie das resultierende theoretische Übersetzungsverhältnis des Teilers.

$$\ddot{u}_{\text{res}} = \ddot{u}_{\text{Teiler}} \cdot 10 = 10250$$

2.6 Berechnen Sie die prozentuale kapazitive Spannungsüberhöhung $\hat{u}_{\hat{u}}$ auf der Unterspannungsseite (220 V), die durch den Trafo verursacht wird. Folgende Transformatorkenndaten sind bekannt:

$$S_N = 2,5 \text{ kVA}$$

$$u_{k1} = 2,7 \%$$

$$\hat{u}_{\hat{u}} = \frac{U_{2f}}{U_1} = \frac{1}{1 - \underbrace{\omega^2 \cdot L_k \cdot C}_{= u_k}} = \frac{1}{1 - 0,027} = 1,0277$$

2.7 Überprüfen Sie experimentell die berechnete Spannungsüberhöhung. Messen Sie dazu bei verschiedenen Primärspannungen U_1 mittels Oszilloskop die Spannung $\hat{U}_{\text{Osz.}}$ an der Unterspannungskapazität. Hinweis: Überprüfen Sie, ob das Signal $\hat{U}_{\text{Osz.}}$ symmetrisch ist und wählen Sie die entsprechende Messmethode.

Messergebnisse:

$U_{1,\text{Soll}}$ in V	80	120	160
$U_{1,\text{Ist}}$ in V	80,425	119,93	159,9
\hat{U}'_1 in kV	25,85	38,55	51,39
$\hat{U}_{\text{Osz.}}$ in V	2,603	3,881	5,114
$\hat{U}_2 = \hat{u}_{\text{Teiler}} \cdot \hat{U}_{\text{Osz.}}$ in kV	26,68	39,78	52,42
\hat{U}_2 / \hat{U}'_1	1,032	1,032	1,020

Die zu messenden Größen sind **fett** dargestellt.

2.8 Tragen Sie den Scheitelwert \hat{U}_2 als Funktion von \hat{U}'_1 in das Diagramm 1 ein und erläutern Sie die Abweichungen der Kurvenverläufe.

$\frac{\hat{U}_2}{\hat{U}'_1} > \hat{u}_{\hat{u}}$, da kapazitive Spannungsteiler zu einer weiteren Spannungsüberhöhung führt.

3 Überlagerungsfaktor und Stromflusszeit einer Einweg-Gleichrichterschaltung

Die in Bild 1 gezeigte Einweg-Gleichrichterschaltung ist zunächst aufzubauen. Der ebenfalls abgebildete Widerstandsteiler, bestehend aus den Widerständen R_1 und R_2 , der gleichzeitig den Belastungswiderstand R_B bildet, ist danach anzuschließen.

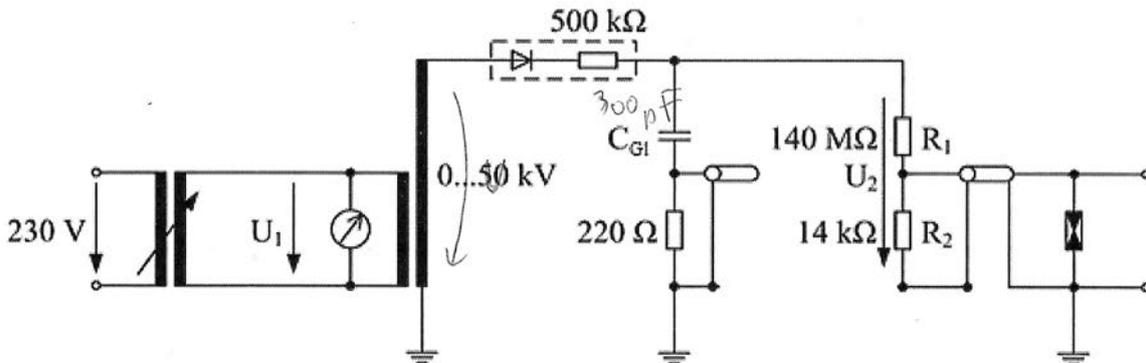


Bild 1: Einweg-Gleichrichterschaltung mit Messanordnung

Vorüberlegungen:

- 3.1 Berechnen Sie den Überlagerungsfaktor einer belasteten Einweg-Gleichrichterschaltung ohne Verwendung eines Kondensators C bei sinusförmig verlaufender Transformatorspannung. Die Durchlassspannung der Diode und der Innenwiderstand des Transformators können vernachlässigt werden.

$$\begin{aligned}
 \text{gk: } \frac{\overline{u}}{U} &= \frac{\frac{1}{2}(U_{\max} - U_{\min})}{\frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt} & U_{\max} &= 50 \text{ kV} \\
 & & U_{\min} &= 0 \text{ V} \\
 & & u(t) &= \begin{cases} U_{\max} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases} \\
 & = \frac{\frac{1}{2} \cdot U_{\max}}{\frac{U_{\max}}{\pi}} & \text{Daher: } \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt &= \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_{\max} \cdot \sin(2\pi f t) dt \\
 & = \frac{\pi}{2} & &= \frac{1}{T} \cdot U_{\max} \cdot \frac{1}{2\pi f} \cdot [-\cos(2\pi f t)]_{t=0}^{T/2} \\
 & = 1,57 & &= \frac{U_{\max}}{T \cdot 2\pi f} \cdot \underbrace{[-\cos(\pi) - \cos(0)]}_{=2} \\
 & & &= \frac{U_{\max}}{\pi}, \text{ mit } f = \frac{1}{T}
 \end{aligned}$$

- 3.2 Berechnen Sie den Wert des Gleichanteils bei Verwendung eines Hochspannungstransformators mit einem Übersetzungsverhältnis von 220 V/50 kV und einer gestellten Primärspannung von 110 V.

$$\begin{aligned} \text{Primär: } 110\text{V} &\Rightarrow \text{Sekundär: } 25\text{kV} \\ \text{Gleichanteil: } \bar{U} &= \frac{1}{\pi} \cdot U_{\text{max}} = \frac{25\text{kV} \cdot \sqrt{2}}{\pi} = 11,25\text{kV} \\ &\quad \uparrow \\ &\quad 25\text{kV} \cdot \sqrt{2} \end{aligned}$$

- 3.3 Geben Sie den Überlagerungsfaktor und den Gleichanteil für $C \rightarrow \infty$ an.

$$\begin{aligned} \text{Überlagerungsfaktor: } &0 \\ \text{Gleichanteil: } &\bar{U} \quad (\text{Amplitude der Sekundärspannung vom Transformator}) \end{aligned}$$

- 3.4 Bestimmen Sie das reale Übersetzungsverhältnis des ohmschen Teilers.

Messen Sie dazu die jeweiligen Widerstände mithilfe des Multimeters. \rightarrow nicht möglich, da

$$\underbrace{\bar{U}_{\text{Teiler}}}_{\text{Theoretisch}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{110\text{M}\Omega + 19\text{k}\Omega}{19\text{k}\Omega} = 10\,001$$

Innenwiderstand des Multimeters des Ergebnis verfehlt

- 3.5 Oszillographieren Sie für eine Primärspannung des Prüftransformators von $U_1 = 110\text{V}$ den Ladestrom des Glättungskondensators $C_{\text{Gl}} = 300\text{pF}$, sowie gleichzeitig den Wechselanteil der Ausgangsspannung $U_2(t)$. Wie stehen positive und negative Stromzeitfläche im Verhältnis? Geben Sie eine Begründung für das Verhältnis an.

Eingeschwingener Zustand stationär \rightarrow Ladungsmenge in C und raus ist gleich groß, \rightarrow Flächenintegral positiv & negativ sind gleich groß

3.6 Bestimmen Sie den Wert des Wechselanteils $\Delta U_2 = U_{2,\max} - U_{2,\min}$ mit dem Oszilloskop bei 50 V und 110 V Primärspannung mit den Glättungskondensatoren der Kapazitäten $C_{GI} = 0,3 \text{ nF}$ und 6 nF .

Weiterhin sind bei den jeweiligen Primärspannungen und Glättungskondensatoren die Zeiten t_D zu messen, während durch die Diode ein Durchlassstrom fließt. Daraus ist der Stromflusswinkel Θ zu berechnen ($360^\circ = 1$ Periodendauer).

Mit Hilfe des parallel liegenden hochohmigen Vorwiderstands ($R = 140 \text{ M}\Omega$) ist der Gleichanteil von $u_2(t)$ durch eine Strommessung zu bestimmen.

Erläutern Sie, wie Gleichanteil, Wechselanteil, Überlagerungsfaktor und Stromflusszeit von der Primärspannung und der verwendeten Kapazität abhängen.

Geben Sie an, wozu der Überspannungsableiter zwischen Innen- und Außenleiter des Messkabels dient.

Schutz des Oszilloskops vor zu hohen Spannungen, falls Fehler!
Verhindert Versuchsabbruch.

Hinweise:

- Für den Scheitelwert der Überlagerung (ripple) gilt $\delta U = 1/2 \Delta U$
- Der Ladestrom I_2 ist aus dem DC RMS Wert der gemessenen korrespondierenden Spannung U_{R220} zu berechnen
- Alle Aufgaben sind mit den Messfunktionen des Oszilloskops zu messen.
- Nutzen Sie die Statistikfunktion des Oszilloskops und setzen Sie diese vor jeder Messung zurück.

Tragen Sie die Ergebnisse in die folgende Tabelle ein.

$\bar{u} = 227,27$

blau
rot
rot
blau

U_1 in V	50	110	50	110
C_{Gl} in pF	300	300	6000	6000
ΔU_2 in V	0,180	1,29	0,04	0,08
ΔU_2 in kV	4,80	10,29	0,4	0,8
t_b in ms	3,0	2,637	2,57	2,62
Θ in °	54°	47,5°	46,3	47,16
U_{R220} in mV	49,4	102	62,1	150,5
I_2 in mA	0,22	0,46	0,28	0,58
\bar{U}_2' in V	12,1	2,87	1,34	3,17
\bar{U}_2 in kV	12,1	28,7	13,4	31,7
δU in kV	2,4	5,145	0,2	0,4
$\delta U / \bar{U}_2$	0,20	0,18	0,015	0,013

$20ms = 360^\circ$
 $I_2 = \frac{U_{R220}}{220\Omega}$
 $\frac{\Delta U_2}{2}$
 $\frac{\delta U}{U_2}$

Die zu messenden Größen sind **fett** dargestellt.

3.7 Geben Sie an, wie sich Wechselanteil, Gleichanteil, Überlagerungsfaktor und Stromflusszeit in Abhängigkeit von der Primärspannung und der verwendeten Kapazität ändern.

Wechselanteil \nearrow , wenn $U_1 \nearrow$ und \searrow wenn $C_{gl} \nearrow$
 Gleichanteil \nearrow " $U_1 \nearrow$ " \nearrow " $C_{gl} \nearrow$
 Überlagerungsfaktor \rightarrow " $U_1 \nearrow$ " \rightarrow " $C_{gl} \nearrow$
 Stromflusszeit \rightarrow " $U_1 \nearrow$ " \rightarrow " $C_{gl} \nearrow$

\nearrow : Wert steigt, \searrow : Wert sinkt, \rightarrow : Kein Einfluss auf Wert

3.8 Ergänzen Sie anhand der Messungen gewonnen Erkenntnisse die folgenden Sätze:

Der Überlagerungsfaktor nimmt zu bei

sinkendem Belastungswiderstand
sinkender Kapazität des Glättungskondensators

Der Gleichanteil nimmt zu bei

steigendem Belastungswiderstand
steigender Kapazität des Glättungskondensators

4 Messung der Spannungsverläufe einer Villard-Verdopplungs-Schaltung

In Bild 2 ist der Aufbau für eine Villard-Verdopplungsschaltung dargestellt.

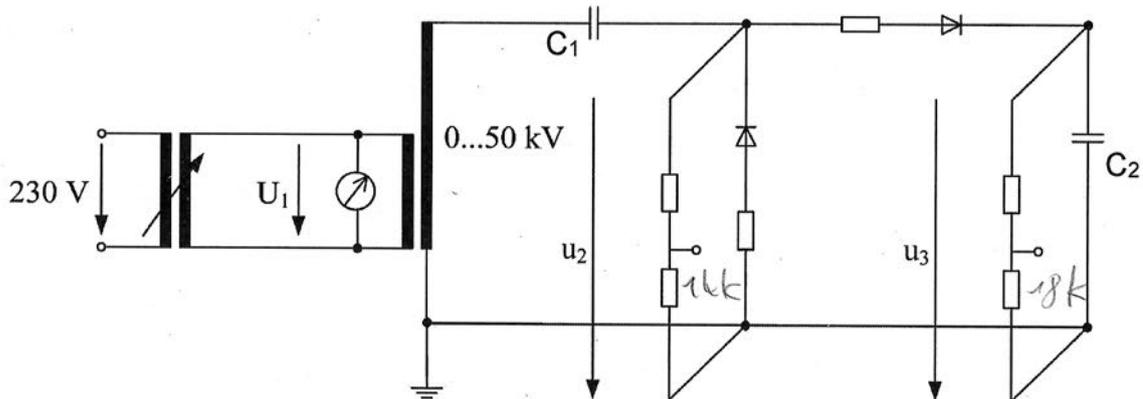


Bild 2: Villard-Verdopplungsschaltung

4.1 Bauen Sie die Schaltung zunächst auf.

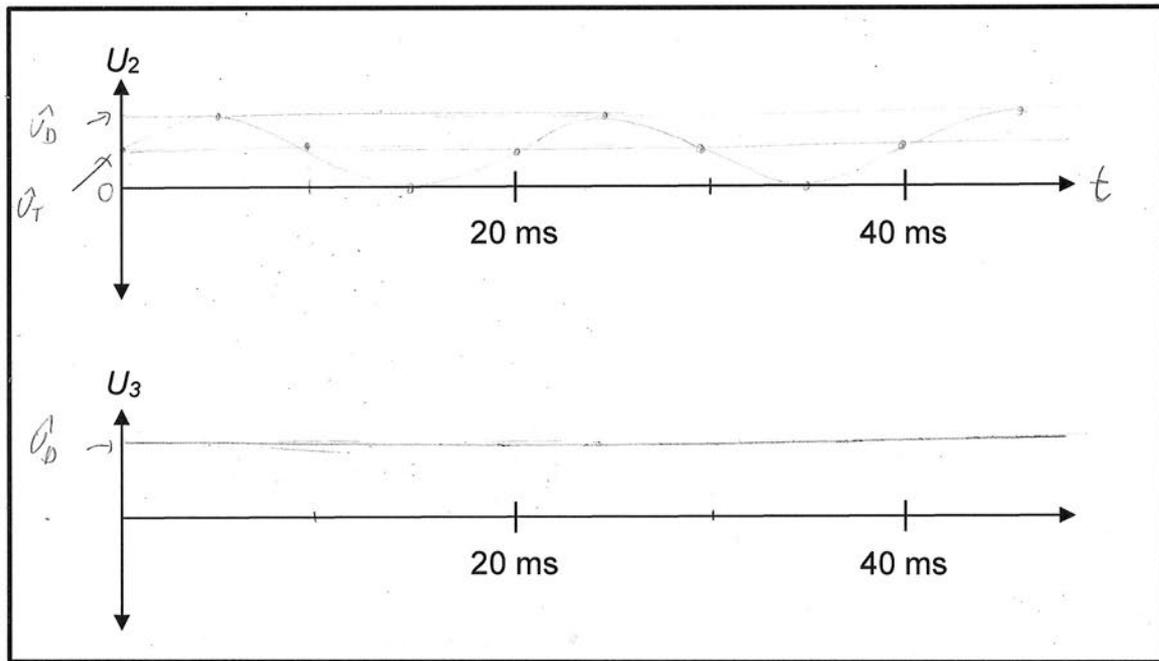
$C_1 = 1200 \text{ pF}$, $C_2 = 1200 \text{ pF}$; ohmscher Spannungsteiler: $140 \text{ M}\Omega / 14 \text{ k}\Omega \rightarrow$ Teiler: $\frac{140 \text{ M}\Omega}{140 \text{ M}\Omega + 14 \text{ k}\Omega} \approx 19 \text{ kV}$

4.2 Bestimmen Sie die maximale Ausgangsspannung am Transformator \hat{U}_T und die erwartete verdoppelte Spannung \hat{U}_D bei einer Primärspannung $U_1 = 55 \text{ V}$. $\approx 1000 \text{ V}$

$$\hat{U}_T = \frac{55 \text{ V}}{230 \text{ V}} \cdot 50 \text{ kV} \cdot \sqrt{2} = 16,91 \text{ kV} \quad \hat{U}_D = 2 \cdot \hat{U}_T = 33,818 \text{ kV}$$

230 V angenommen aus Bild 2, tatsächlich über 220V

4.3 Zeichnen Sie im folgenden Diagramm die erwarteten Verläufe für die Spannung $u_2(t)$ und $u_3(t)$ ein.



4.4 Schätzen Sie mit den Ergebnissen aus 4.2 und 4.3 die Spitze-Spitze Werte U_{2SS} und U_{3SS} sowie den Gleichanteil \bar{U}_3 und den Überlagerungsfaktor von $u_3(t)$ ab (zu Hause!). Oszillographieren Sie die Spannungen $u_2(t)$ und $u_3(t)$ bei einer Primärspannung $U_1 = 55 \text{ V}$. Bestimmen Sie die Spitze-Spitze Werte U_{2SS} und U_{3SS} sowie den Gleichanteil \bar{U}_3 und den Überlagerungsfaktor von $u_3(t)$. Begründen Sie stichwortartig die Ergebnisse der Messungen und die Abweichungen zu den erwarteten Werten. Einstellungen am Oszilloskop beachten!

	Erwarteter Wert	Gemessener Wert am Oszilloskop	Messergebnis
U_{2SS}	33,348 kV	3,48V	34,8 kV
\hat{U}_{2max}	33,818 kV	3,06V	30,6 kV
\bar{U}_3	33,848 kV	3,61V	28,1 kV
U_{3SS}	0	380 mV	2,96 kV
$\delta U / \bar{U}_3$			0,053

$\ddot{u} = 10000$
 $\ddot{u} = 7778$

Die zu messenden Größen sind **fett** dargestellt.

Wie verhalten sich die erwarteten Werte zu den real gemessenen Werten. Erklären Sie mögliche Abweichungen:

Spannung U_2 nicht ideal glatt. C_2 wird gelad. und entlad.

Gründe:

• Kapazitäten haben parasitäre Traktionwerte (vgl. "ESR")
→ Stromfluss

• Ohmsche Spannungssteile stellen Last dar

• Vorwiderstände der Dioden + Block der Kondensatoren

• Bauteiltoleranzen

Energetechnisches Praktikum – Versuch AC/DC

